

Propriétés géotechniques et minéralogiques d'une carotte des fonds à nodules (Pacifique Nord). Application à l'utilisation d'un site côtier de simulation

Caractères géotechniques
Caractères sédimentologiques
Fonds Pacifique
Geotechnical properties
Sedimentological properties
Pacific Ocean Bottom

J.-P. Longuemard, A. Monaco
Centre de Recherches de Sédimentologie Marine, Centre Universitaire, avenue de
Villeneuve, 66025 Perpignan.

Reçu le 29/3/78, révisé le 29/5/78, accepté le 14/6/78.

RÉSUMÉ

Dans le cadre de recherches sur la traficabilité d'engins se déplaçant sur les fonds (exploitation des nodules polymétalliques), des analyses ont été exécutées sur une carotte du Pacifique Nord et, comparativement, sur des sédiments néritiques, lagunaires et des argiles artificielles (bentonite). Les valeurs des paramètres géotechniques situent les fonds de la zone du Pacifique étudiée dans les sédiments pélitiques à indice de plasticité élevé ($I_p \# 70$) et fortement compressibles ($C_c \# 1,7$). Ces caractères s'expliquent moins par le cortège minéralogique argileux, assez banal, que par l'existence d'une fraction colloïdale siliceuse. La présence de micronodules, intéressante du point de vue génétique, ne paraît pas altérer les propriétés mécaniques. Les données acquises montrent que pour extrapoler les résultats obtenus lors des essais *in situ* de comportement d'engins dans le domaine margino-littoral au domaine des grands fonds il est nécessaire d'effectuer des expériences complémentaires en laboratoire sur des mélanges artificiels.

Oceanol. Acta, 1978, 1, 4, 463-471.

ABSTRACT

Geotechnical and mineralogical properties
of a North Pacific Ocean core application at use
of costal site for simulation

As part of the investigation of the mobility of underwater vehicles used for the harvesting of polymetallic nodules, a North Pacific Ocean core was analysed and compared with other sediments (lagoonal, bentonite). The North Pacific Ocean deposits show a high index of plasticity and compressibility ($I_p \# 70$, $C_c \# 1.7$). Clay minerals being banal, these characteristics are best explained by the colloidal fraction. The low proportion of micronodules (20-150 μm) would not appear to modify the mechanical properties, but should be taken into account. Complementary laboratory investigations of artificial mixtures will be undertaken, in order to understand by extrapolation the behaviour of engines studied in lagoon conditions to the ocean floor. The geotechnical properties of deep sea sediments are situated between the values obtained with lagoonal sediments ($I_p = 43$, $C_c = 0.37 - 0.38$) and bentonite ($I_p : 100$, $C_c = 1.6 - 2$).

Oceanol. Acta, 1978, 1, 4, 463-471.

Les recherches sur la traficabilité des fonds en vue de leur exploitation nous ont amené à plusieurs types d'intervention : la reconnaissance de sites peu profonds pour la réalisation d'essais *in situ* (lagunes littorales du Golfe du Lion), des essais en laboratoire sur des argiles artificielles (bentonite), l'étude minéralogique et mécanique comparée de sédiments naturels destinée à définir les caractéristiques des fonds à nœuds.

Pour ce dernier objectif une carotte du Pacifique Nord-Oriental, (n° 1 TAAF-NIX/30/NR 71) prélevée par 4 830 m de profondeur, entre les îles de Clarion et de Clipperton, nous a été confiée par le Centre National pour l'Exploitation des Océans.

Les résultats consignés dans la présente note situent les dépôts pélagiques du Pacifique par rapport à d'autres sédiments néritiques et lagunaires qui ont fait l'objet d'essais de traficabilité *in situ* et par rapport à de la bentonite utilisée pour les simulations en laboratoire (mesures à l'aide d'une boîte à cisaillement).

CARACTÈRES SÉDIMENTOLOGIQUES, MINÉRALOGIQUES ET GÉOCHIMIQUES DES SÉDIMENTS

Comme la plupart des dépôts pélagiques, les sédiments analysés sont caractérisés par une faible proportion en fraction grossière supérieure à 40 µm (<2 %), une médiane granulométrique de l'ordre de 1 µm, une nette prédominance de la fraction argilo-colloïdale (>65 %), une faible teneur en carbone organique (<0,20 %). La couleur brune de ces sédiments, due à la présence

d'oxydes, est associée, ici à une décarbonatation poussée (CaO #1,10 %). Seuls les organismes siliceux : radiolaires et diatomées, sont représentés.

Sur la carotte (53 cm de longueur), on note une certaine évolution des paramètres granulométriques et chromatiques; du haut vers le bas du prélèvement :

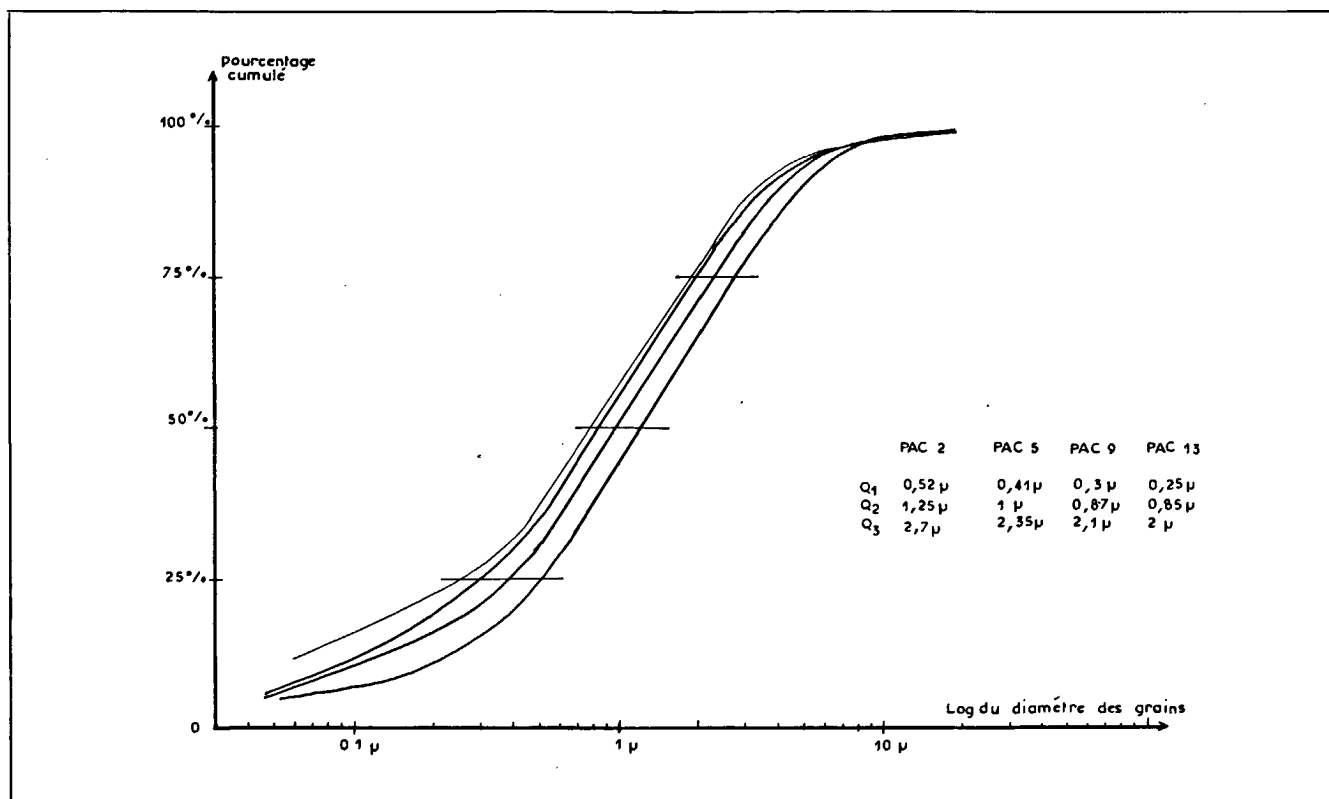
- diminution de la médiane (1,25 à 0,85 µm) parallèlement à la diminution de la fraction détritico-sablo-silteuse;
- augmentation du coefficient de Hazen (d_{60}/d_{10} de 11,5 à 23,5);
- augmentation régulière de l'activité colloïdale exprimée par le rapport $A=I_p/C$ (I_p , indice de plasticité; C, teneur en argile).

A cette évolution va correspondre une augmentation de la cohésion et de l'indice de plasticité. La répartition dimensionnelle des grains [voir les courbes cumulatives semi-logarithmiques en S (fig. 1)] pourrait traduire, comme on le verra plus loin, une double origine des produits constituant le sédiment.

Du point de vue minéralogique, la composition argileuse est proche de la composition habituelle donnée pour des argiles du Nord-Pacifique (Griffin *et al.*, 1968). Elle comprend : l'illite assez bien cristallisée (43 à 50 %), la smectite (25 à 30 %), la kaolinite et la chlorite (25 %) et l'attapulgite (≈5 %).

L'observation au microscope électronique de la fraction des sédiments dont les particules sont de diamètre inférieur à 5 µm permet de reconnaître deux populations, l'une comprenant des particules larges et souvent à bords nets, dont l'illite, l'autre formant un fond argilo-colloïdal

Figure 1
Granulométries des sédiments du Pacifique Nord-Oriental.
Granulometry of North-East Pacific deposits





A



B



C



D

Figure 2

Aspects de la fraction argilo-colloïdale (Microscope électronique à transmission) : A, coexistence de deux populations de minéraux à grosses particules où dominant l'illite, les débris vitreux et les diatomées et fond à smectite et attapulgite ($\times 7\,500$); B et C, fond argilo-colloïdal où l'on remarque les produits crypto-cristallins en chaîne. Ce fin réseau emprisonne, parfois, les fibres d'attapulgite

(B $\times 15\,000$, C $\times 30\,000$); D, produits d'altération dérivés des diatomées ($\times 18\,000$).

Colloidal and clayey fraction viewed with an electron microscope: A, two populations: large illite, glass, diatoms; smectite and attapulgite ($\times 7\,500$); B and C, clayey and colloidal fraction: particles are bound to chain like aggregates with elongated fibres of attapulgite (B $\times 15\,000$, C $\times 30\,000$); D, alteration products from diatoms ($\times 18\,000$).

où dominant la smectite, les lattes d'attapulgite et des produits amorphes ou cryptocristallins (fig. 2 A). Ces derniers sont de plusieurs types et leur nature a pu, en partie, être déterminée par l'analyse ponctuelle semi-quantitative au microscope électronique à balayage. Il s'agit de particules silico-alumineuses ou silico-ferriques,

parfois en chaînes (fig. 2 B et 2 C), de résidus de Diatomées en un état plus ou moins avancé d'altération (fig. 2 D) et d'oxydes de fer (hématite).

Dans la fraction sablo-silteuse où la phase organique siliceuse domine, les minéraux détritiques et volcano-



A



B



C



D



E

Figure 3

Structures des minéralisations polymétalliques : A et B, fins concrétionnements ovoïdes sans noyau nettement défini [Microscope électronique à balayage sur section polie ($\times 1\ 500$)]; C, particules silico-alumineuses porteuses de manganèse, cobalt, cuivre et nickel [Microscope électronique à balayage ($\times 7\ 500$)]; D et E, Micronodule polymétallique en « chou fleur » (D $\times 400$, E $\times 2\ 500$).

Structures of polymetallic mineralisations viewed with scanning microprobe: A and B, finer concretions without nucleus ($\times 1\ 500$); C, silico-aluminous particles bearing manganese, cobalt, copper and nickel ($\times 7\ 500$); D and E, "cauliflorous" polymetallic micronodules (D $\times 400$, E $\times 2\ 500$).

détritiques sont abondants : quartz, feldspaths, verres potassiques ou calciques, minéraux titanés, silicates divers. Mais on reconnaît également des phosphates de calcium, des grains de barytine, des pyritosphères et des particules organiques; on note par ailleurs, la présence de nombreuses minéralisations manganésifères en divers états structuraux, mais essentiellement sous forme de micronodules polymétalliques dont la taille varie de 20 à 150 μm (fig. 3). L'augmentation du diamètre s'accompagne d'une complexité morphologique qui aboutit à la

forme en « chou-fleur » caractéristique de beaucoup de macronodules (fig. 3 D et 3 E).

La composition chimique de ces concrétions (analyses ponctuelles à la microsonde électronique) est, elle aussi, comparable à celle des structures plus évoluées (notamment les teneurs en manganèse, nickel et cuivre) de la même zone du Pacifique Nord-Oriental reconnue pour sa richesse en manganèse, nickel et cuivre (Cronan, 1972). Voici leur composition moyenne : Mn = 29 %;

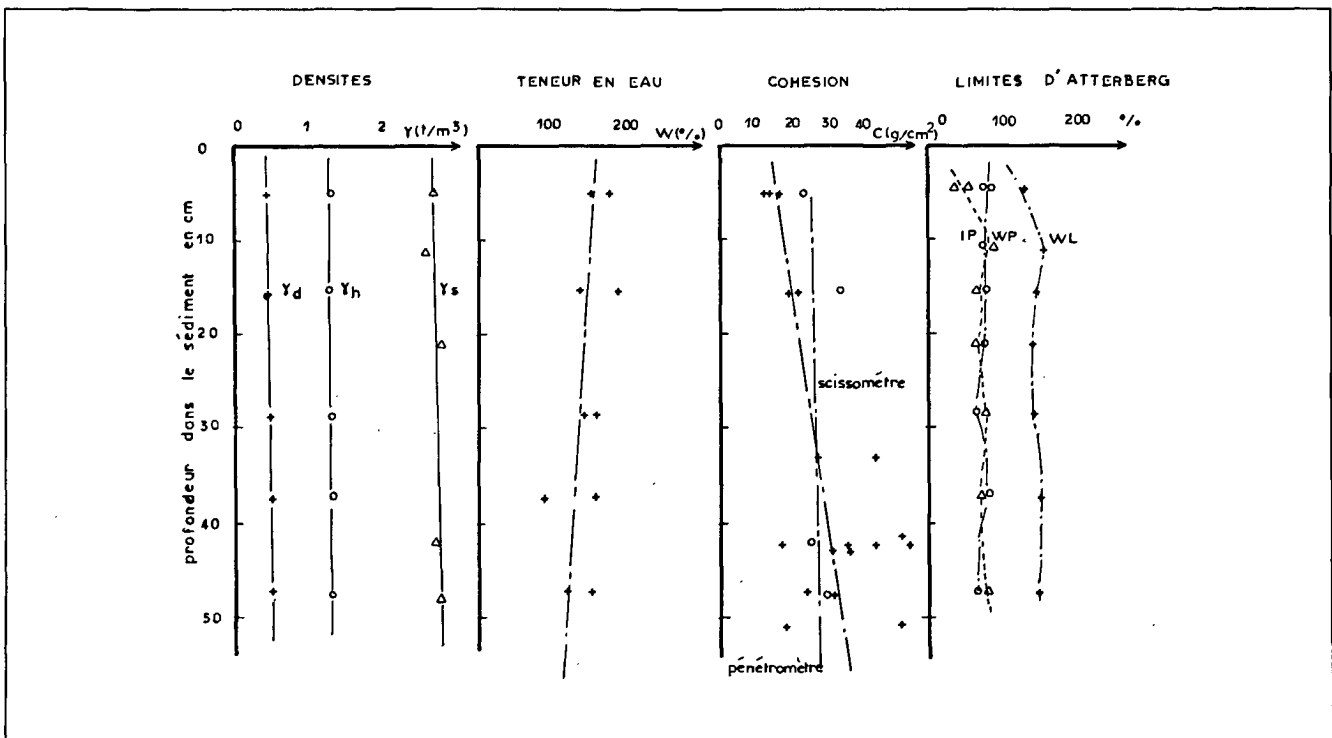


Figure 4
Évolution des paramètres mécaniques sur la hauteur de la carotte du Pacifique.
Vertical evolution of mechanic parameters in the Pacific core.

Si = 5,5 %; Fe = 2,3 %; Mg = 1,1 %; Al = 2,1 %;
Ca = 0,6 %; Co = 0,4 %; Cu = 0,9 %; Ni = 1,6 %;
Ti = 0,5 % (différence en oxygène).

On remarque le net accroissement en cuivre et, surtout, en nickel, par rapport aux dépôts hydrogènes (Bonatti *et al.*, 1972), aux croûtes manganésifères de l'archipel hawaïen (Fein et Morgenstein, 1973) et aux nodules de la même zone récoltés lors de la mission « Valdina » 08.1 (Friedrich, Pluger, 1974 in Valdivia 08.1).

La composition chimique globale des sédiments étudiés indique la nette prépondérance de la silice, des silicates et des alumino-silicates ($\text{SiO}_2 > 50\%$); l'excès de silice, tel qu'il apparaît dans le rapport Si/Al ($\approx 3,5$), est dû, en partie, à la phase organogène.

En résumé, deux populations de minéraux coexistent. La première est essentiellement terrigène et volcanoclastique; la seconde comprend des produits hydrogènes ou de néoformation : produits colloïdaux chargés en éléments de transition, argiles smectitiques ou fibreuses qui dérivent, en partie, de l'altération du matériel volcanique.

Cette double origine rendrait compte des modalités de la distribution dimensionnelle. Si cette remarque peut s'appliquer à tout le bassin sédimentaire Pacifique, il devient certain que, même sur des aires plus restreintes, l'influence respective des diverses sources est éminemment variable et dépend du contexte morphotectonique. C'est ce qui résulte de la comparaison entre nos résultats et ceux obtenus notamment sur la dorsale Est-Pacifique (Volat *et al.*, 1975), dans la plaine abyssale au Nord de l'Archipel des Touamotou (Hoffert *et al.*, 1976) et sur les

sédiments des missions Transpac KS.S09 et Tahino 04 étudiés par le Laboratoire de Mécanique des Sols de Nantes et destinés à des essais d'identification de sol.

Bien que l'océan Nord-Pacifique ne reçoive en général que peu de matériel dérivé du continent (Horn *et al.*, 1972), les dépôts de la zone comprise entre les îles de Clarion et de Clipperton comportent une assez forte participation de produits terrigènes et volcanodétritiques. Ce caractère est à la base de propriétés géotechniques spécifiques qui éloignent ces sédiments du pôle bentonite auquel s'apparentent de nombreux sédiments pélagiques enrichis en phase colloïdale amorphe.

PARAMÈTRES PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

Les essais effectués sur la carotte NR 7105 sont essentiellement destinés à effectuer une comparaison entre ce type de sédiment et les sédiments côtiers ou artificiels.

Densité et teneur en eau

Les différentes teneurs obtenues sur le sédiment du Pacifique (fig. 4) montrent que la densité humide γ_h croît régulièrement et parallèlement avec la densité sèche γ_d ; que γ_d tend à augmenter avec la profondeur à laquelle est effectuée la mesure dans la carotte.

Les gradients de γ_d et γ_h s'accompagnent d'une variation plus nette de la teneur en eau (w).

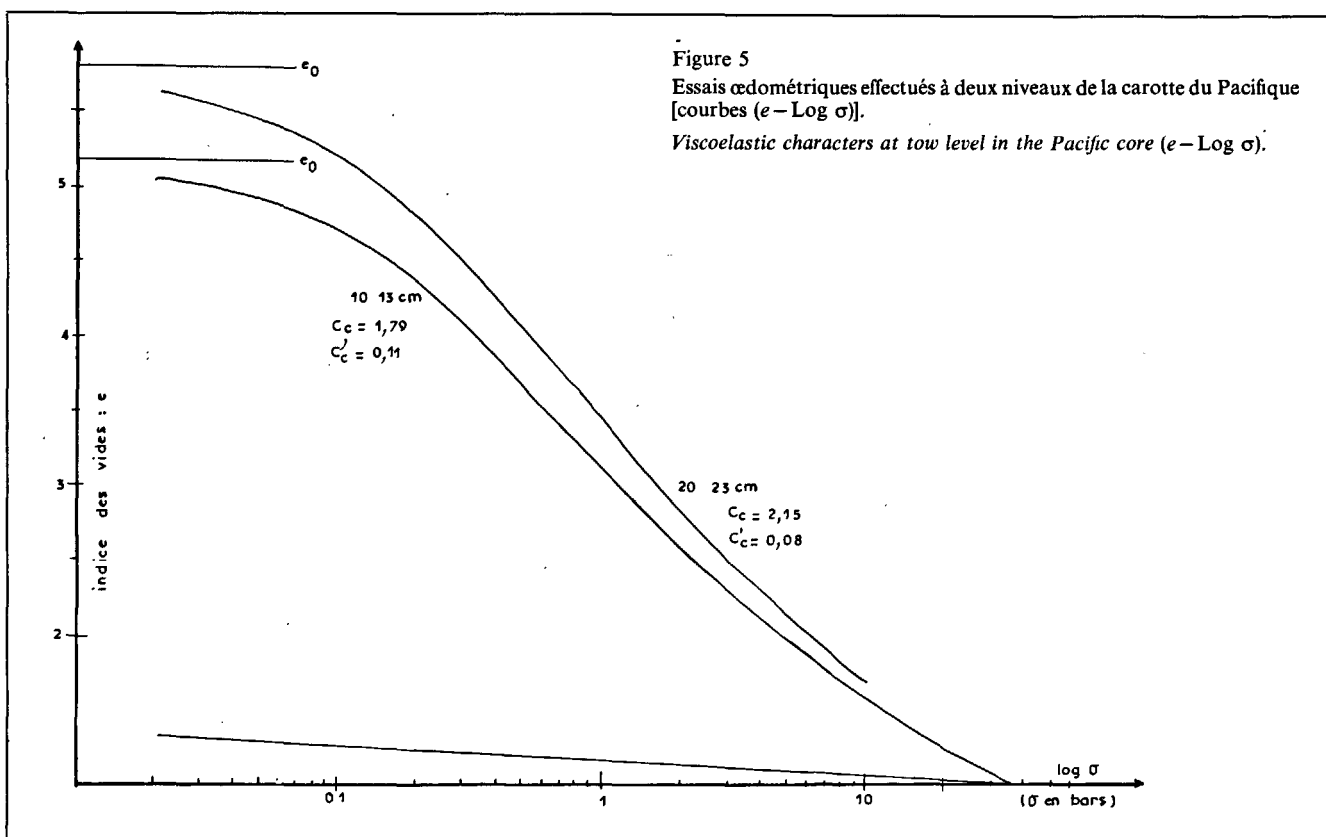


Figure 5
Essais œdométriques effectués à deux niveaux de la carotte du Pacifique [courbes (e - Log σ)].
Viscoelastic characters at tow level in the Pacific core (e - Log σ).

Essais œdométriques

Deux essais œdométriques ont été effectués. Les courbes Δe log σ (fig. 5) montrent une nette variation de C_c avec σ malgré une allure régulière des relations Δe - log σ. Pour σ inférieur à 640 g/cm² l'allure des courbes œdométriques est identique aux formes de courbes obtenues pour ce type d'essais sur des sédiments côtiers (Baie de Banyuls - Étang de Salses - Rade de Brest) ou sur d'autres sites (Richards, 1967).

Le léger indice de décompression C'_c par rapport à C_c montre la faible élasticité de ces matériaux. Le rapport C_c/C'_c des sédiments côtiers est inférieur à celui trouvé pour l'argile du Pacifique.

La corrélation entre les valeurs de l'indice de compression et d'autres paramètres physiques teneur en eau w et limite de liquidité W_L peut se faire par deux relations (1) et (2) soit :

$$C_c = f(w) \text{ (Duboul-Razavet, 1973),} \tag{1}$$

$$C_c = (10^{-3}w - 0,01) \frac{3}{2} \cdot \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}} - f(Q_2),$$

$$C_c = f(W_L) \text{ (Sanglerat, 1975),}$$

$$C_c = 0,009 (W_L - 10). \tag{2}$$

La relation (1) peut se réduire à (3) pour les sédiments des fonds à nodules

$$C_c = (W_L - 10) 4,5 \cdot 10^{-3} \tag{3}$$

Les valeurs de C_c calculées à partir de (2) et de (3) sont respectivement de 1,08 et comprises entre 0,8 et 1 et

inférieures aux valeurs mesurées qui sont comprises entre 1,24 et 2.

Ces deux calculs semblent indiquer que la valeur de C_c mesurée en laboratoire est quelquefois plus élevée qu'en nature. La décompression et un long transport de la carotte peuvent en être la cause. Il faut néanmoins tenir compte du fait que les relations expérimentales (1) et (3) ne sont pas établies spécifiquement pour ce type de fonds marins.

Limites d'Atterberg

Des essais, effectués sur des sédiments remaniés, sont représentatifs de la qualité de la carotte. Le transport ne paraît pas intervenir dans les erreurs de mesure.

Les différentes limites (liquidités W_L, plasticité W_P) et l'indice de plasticité I_P ont été mesurés à 8 niveaux de la carotte (tableau 1). Une croissance de W_L et de I_P, apparaît vers la base du prélèvement alors que W_P semble plus constant. Le gradient de W_L, plus important vers le haut de la carotte, correspond au gradient de C_c. D'une manière générale, ces résultats sont compatibles avec les variations de la teneur en eau qui décroît dans le même sens (fig. 4).

Cohésion

Les valeurs de C sont comprises entre 10 et 40 g/cm², pour une valeur moyenne de 26 g/cm². Alors que les valeurs C mesurées par scissométrie croissent légèrement vers le bas de la carotte, les valeurs obtenues par pénétrométrie ont un gradient beaucoup plus élevé. Ce

Tableau 1
Valeurs des paramètres physiques de la carotte TAAF-NIX/30/NR 71.
Physical parameters of the TAAF-NIX/30/NR 71 core.

| cm | CEdométrie | | | | Cohésion (g/cm ²) | | Densités (t/m ³) | | Teneur en eau | | Limite d'Atterberg | |
|----|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|
| | e ₀ | C _c | C' _c | σ' _c | C _p | C _s | γ _h | γ _d | u' (%) | W _L (%) | W _p (%) | I _p |
| | Pac 1 | | | | | | | | | | | |
| 5 | Pac 2 | | | | 13 | 22 | 1,26 | 0,45 | { 153 188 } | { 123 123 } | { 87 74 } | { 36 49 } |
| | Pac 3 | | | | | | | | | | | |
| 10 | Pac 4 | | | | 5,16 | 1,54 | 0,11 | | | 155 | 75 | 80 |
| 15 | Pac 5 | | | | 20,5 | 32 | 1,27 | 0,44 | { 141 188 } | 145 | 74 | 71 |
| | Pac 6 | | | | | | | | | | | |
| 20 | Pac 7 | | | | 5,81 | 1,53 | 0,08 | | | 138 | 75 | 63 |
| 25 | Pac 8 | | | | | | | | | | | |
| | Pac 9 | | | | | | 1,29 | 0,50 | { 139 158 } | 140 | 66 | 74 |
| 30 | Pac 10 | | | | | | | | | | | |
| 35 | Pac 11 | | | | | | 1,29 | 0,50 | { 88 157 } | 149 | 79,5 | 69,5 |
| 40 | Pac 12 | | | | | | | | | | | |
| 45 | Pac 13 | | | | 37 | 24 | | | | | | |
| | Pac 13 | | | | 29,5 | 28 | 1,31 | 0,52 | { 121 151 } | 148 | 69 | 79 |
| 50 | Pac 14 | | | | | | | | | | | |

gradient correspond nettement à une diminution corrélative de la teneur en eau (fig. 4 et tableau 1).

La présence de micronodules, de dimensions comprises entre 20 et 150 μm est de nature à jouer un rôle sur la résistance au cisaillement (droite de Coulomb). Cet effet doit être pris en compte dans l'étude de sédiment artificiel de simulation (traficabilité). Ces sédiments essentiellement constitués par des particules de diamètre inférieur à 20 μm, n'offrent pratiquement aucun angle de frottement interne; de ce fait la résistance au cisaillement équivaut à la cohésion. La nature minéralogique des constituants intervient sur C; en effet, pour un même pourcentage en élément fin, la valeur de C est supérieure à ce qu'elle doit être dans le cas des sédiments côtiers tout en étant

conforme aux valeurs fournies dans le rapport ENSMN. Pour la carotte du Pacifique analysée, une teneur en eau plus élevée et la prépondérance de la fraction argilo-colloïdale paraissent à l'origine de cette différence.

COMPARAISON AVEC D'AUTRES TYPES DE SÉDIMENTS

Outre la connaissance des qualités minéralogiques et mécaniques des fonds à nodules, les analyses ont pour but, rappelons-le, de permettre de situer les essais de traficabilité d'engins effectués en milieu margino-littoral et sur bentonite par rapport à ce qu'ils seraient sur les grands fonds.

Tableau 2 A

Comparaison des caractères sédimentologiques et minéralogiques de divers sédiments et d'argiles artificielles (étang de Leucate, Nord-Pacifique, Bentonite).

Comparison of sedimentological and mineralogical properties of different sediments and artificial clays (Etang de Leucate, north profile, bentonite).

| Paramètres | Sédiments | | |
|----------------------|--|---|--|
| | Étang de Leucate | Pacifique | Bentonite |
| d_{60} | Très hétérogène $8,8 \mu\text{m} < d_{60} < 63 \mu\text{m}$ | 1,85 à 1,15 μm | |
| Médiane d_{50} | 5,4 à 53 μ | 1,15 à 0,80 μm | 0,05 $\mu\text{m} < d < 0,5 \mu\text{m}$ |
| Coefficient de Hazen | 41 à 122 | 11,6 à 23,5 | — |
| % Sable | 26 à 58 % | 1,17 à 0,21 % | — |
| % Limon | 30 à 46 % | 33 à 24,5 % | — |
| % Argile | 11 à 37 % | 66 à 75,3 % | 87 % |
| % Illite | 65 à 70 % | 43 à 48,4 % | — |
| % Montmor. | Traces | 31 à 26,6 % | ≈ 90 % |
| % Kaolinite | 30 à 35 % | Chlorite + kaolinite 25 % | — |
| Autres constituants | Traces de chlorite | Traces d'attapulгите Feldspath, quartz | — |
| Activité colloïdale | 0,8 à 1,15 | 0,75 à 1,05 | 0,5 à 7,2 |

Tableau 2 B

Comparaison des caractères mécaniques de divers sédiments et d'argiles artificielles.

Comparison of the mechanical properties of different sediments and artificial clays.

| Paramètres | Sédiments | | |
|------------------------------------|---|---|-----------------------------|
| | Étang de Leucate | Pacifique | Bentonite |
| Cohésion C | { 5 à 15 g/cm ² 20 à 40 g/cm ² } | 10 à 50 g/cm ² | 10 à 20 g/cm ² |
| Teneur en eau w | { 85 à 115 % 45 à 75 % } | 180 à 100 % | 280 à 200 % |
| Densité sèche γ_d | 0,7 à 1,2 t/m ³ | 0,45 à 0,55 t/m ³ | 0,4 t/m ³ |
| Densité humide γ_h | 1,60 t/m ³ | 1,30 t/m ³ | 1,2 t/m ³ |
| Densités des grains γ_s | ≈ 2,70 t/m ³ | 2,70 à 2,80 t/m ³ | ≈ 2,60 t/m ³ |
| Limite de liquidité W_L | 83 | 145 | — |
| Limite de plasticité W_P | 40 | 75 | — |
| Indice de plasticité I_P | 43 | 70 | — |
| Coefficient de consolidation C_c | 0,310 à 7,510 ⁻³ cm ² /s | 10 ⁻⁴ à 410 ⁻³ cm ² /s | 12 à 194 cm ² /s |
| Indice de compression C_c | 0,37 à 0,48 | 1,24 à 2,15 | 1,62 à 2,02 |

Le tableau 2 présente un état comparatif de trois types de sédiments : sédiments pélagiques du Pacifique, vases lagunaires, bentonite. La cohésion est le paramètre dont les valeurs sont les plus voisines dans les trois milieux.

Les différentes valeurs de C sont comprises dans une même fourchette, notons, toutefois, que la cohésion des vases de l'étang de Salses est très proche de la cohésion des fonds à nodules (tableau 2B). D'une manière générale, les valeurs des paramètres mécaniques de la carotte du Pacifique sont comprises entre celles des sédiments de l'étang de Salses et celles de la bentonite des bassins d'expérimentation.

Sur les courbes $w = f(\gamma_d)$ les dépôts du Pacifique se situent dans le prolongement des sédiments des baies et des étangs littoraux (fig. 6). Cette évolution est corrélative de la diminution du grain moyen et de l'augmentation de la proportion en phyllites gonflantes.

Il paraît nécessaire d'effectuer des essais de traficabilité d'engins sur des vases artificielles de bentonite avec différentes valeurs de la teneur en eau. Ces essais, difficiles à réaliser dans des grands bassins, peuvent s'effectuer à partir de mesures en laboratoire pour mettre en évidence les corrélations entre l'adhérence aux parois métalliques et la nature des sédiments. Lors des mesures d'adhérence, la présence de micronodules pourrait compenser le

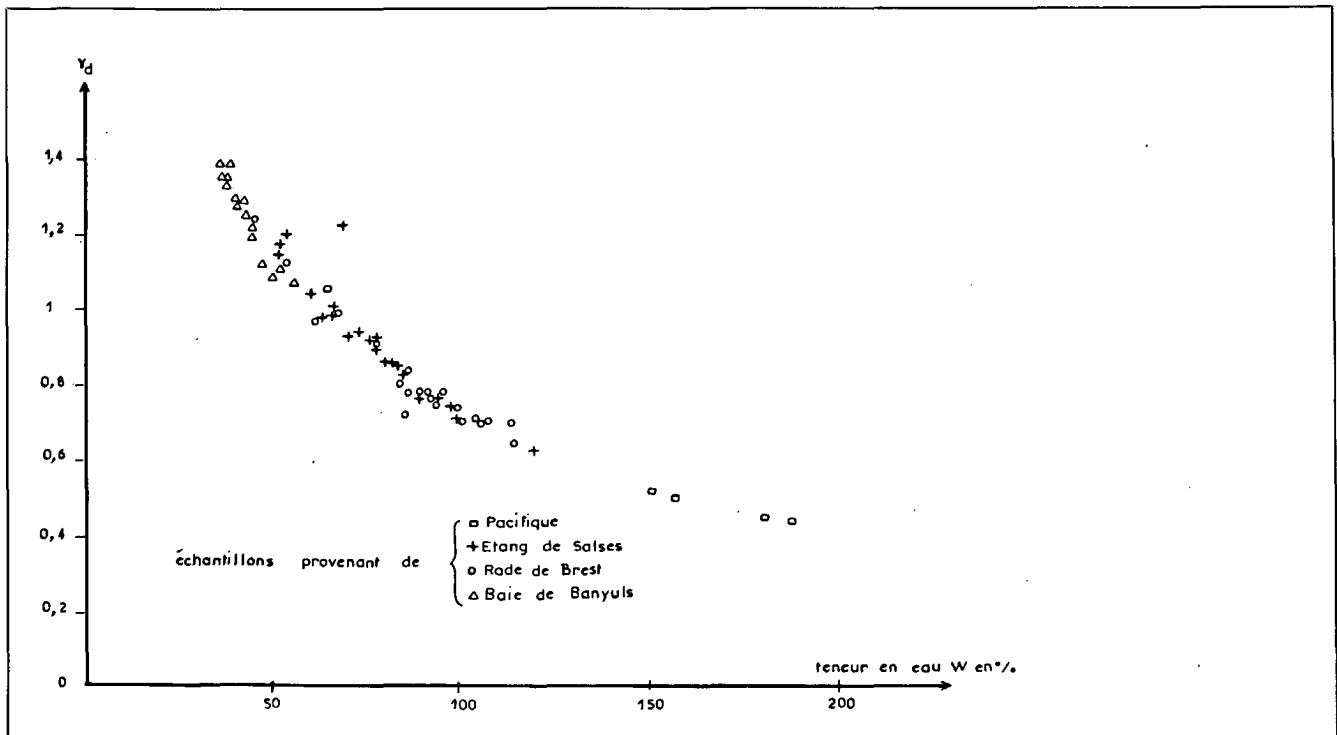


Figure 6
 Courbe $w=f(\gamma_d)$ situant les divers types de sédiments étudiés.
 $w=f(\gamma_d)$ for different types of sediments.

manque de particules grossières dans les vases des grands fonds en augmentant la résistance au cisaillement. Des mesures à partir d'éléments en provenance directe des fonds à nodules s'avèrent donc utiles.

La bentonite, sédiment artificiel courant, dispose de limites d'Atterberg très élevées, en particulier son indice de plasticité est égale au double de celui des fonds à nodules. Pour l'ensemble des paramètres mécaniques, les valeurs mesurées sur l'échantillon du Pacifique sont comprises entre celles obtenues pour l'étang de Salses et celles obtenues sur du sédiment artificiel (tableau 2 B).

CONCLUSION

Les propriétés mécaniques des dépôts du Pacifique Nord-oriental étudiés situent les qualités mécaniques de ces sédiments entre celles des vases lagunaires peu profondes et celles de la bentonite, telles leur haute plasticité et leur forte teneur en eau. Cette situation s'explique aisément par la composition minéralogique à illite dominante et une assez forte participation de particules terrigènes qui éloignent ces sédiments du pôle hydrogène. Compte tenu des données ponctuelles fournies sur d'autres sites du Pacifique il paraît dangereux de généraliser le comportement des « boues rouges ». Toutefois les valeurs composées de paramètres physiques des trois types de sédiments semblent autoriser l'intrapolation des résultats.

RÉFÉRENCES

- Bonatti E., Kraemer T., Rydell H., 1972. Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits, in *Ferromanganese deposits on the ocean floor*, edited par D. R. Horn, Lamont Doherty Geol. Observ., New York, 149-167.
- Costet J., Sanglerat G., 1975. *Cours pratique de mécanique des sols*, Dunod, Paris, 288 p.
- Cronan D. S., 1972. Regional geochemistry of ferromanganese nodules in the world ocean, in *Ferromanganese deposits on the ocean floor*, edited by D. R. Horn, Lamont Doherty Geol. Observ., New York, 19-30.
- Duboul-Razavet Ch., Longuemard J.-P., 1973. Corrélation entre quelques facteurs géotechniques et sédimentologiques des fonds marins sous-consolidés, *Ann. Hydro. Mar.*, février, 43-47.
- Fein C. D., Morgenstein M., 1973. Micropobe analysis of manganese crusts from the hawaïan archipelago. *Interuniversity Program of Research on Ferromanganese deposits of the ocean floor*, National Science Foundation, National Technical Information Service, 85-92.
- Griffin J. J., Windom H., Goldberg E. D., 1968. The distribution of Clay minerals in the World Ocean, *Deep-Sea Res.*, 15, 433.
- Hoffert M., Schaaf A., Dunoyer de Segonzac G., Karpoff A. M., Clauer N., Courtois C., 1976. Sédimentation authigène dans une zone profonde du Pacifique Sud, 4^e Réun. Sc. Terre, Paris, p. 224.
- Horn D. R., Horn B. M., Delach M. N., 1972. Distribution of ferromanganese deposits in the world ocean, in *Ferromanganese deposits on the ocean floor*, edited by D. R. Horn, Lamont Doherty Geol. Observ., New York, 9-17.
- Richards A. F., 1967. *Marine geotechnique*, University of Illinois Press, 327 p.
- Valdivia, 08-01, 1974. Geophysical, geological and geochemical investigations of deposit science in the range of manganese nodules fields in the central Pacific, *Meerestech. Mar. Technol.*, 5, 6, 187-206.
- Volat J. L., Hoffert M., Pautot G., 1975. Premières phases de sédimentation dans le domaine des dorsales océaniques : exemple de la dorsale Est-pacifique, 3^e Réun. Sc. Terre, Montpellier, 385.