

S E D I M E N T O L O G I E   E T   B I O N O M I E

par

J. J. BLANC

I -) INTRODUCTION :

Ces quelques pages ont pour objet de définir l'essentiel des techniques granulométriques usuelles appliquées aux sédiments marins et leur relations avec l'écologie des biocoenoses sessiles de substrats meubles.

Il ne m'appartient pas de faire l'historique de la Sédimentologie marine, discipline essentiellement synthétique qui utilise les résultats de la Géologie stratigraphique, de la Chimie et de la Minéralogie. Cependant, son évolution dans le temps demeure en liaison avec le progrès des techniques, depuis la simple calcimétrie jusqu'aux déterminations minéralogiques par les méthodes de la radiocristallographie.

THOULET fut le précurseur, le père des techniques appliquées à l'étude des sédiments sous-marins. Collaborateur du Prince ALBERT Ier de Monaco, il examinera des milliers d'échantillons dragués dans toutes les mers du globe. Son disciple SUDRY fut l'auteur de la première thèse de sédimentologie marine littorale et fit une étude détaillée des facies sablo-vaseux de l'étang de Thau. Les techniques de l'époque essentiellement liées aux progrès de la Chimie analytique et de la Minéralogie, beaucoup moins évoluées au siècle dernier, se bornaient à de nombreuses calcimétries, à des séparation minéralogiques au moyen de liqueurs denses, à des déterminations au microscope polarisant et à quelques granulométrie sommaires.

En revanche, THOULET, SUDRY et CHEVALLIER firent un grand nombre d'observations hydrodynamiques sur l'évolution du littoral et le transport des sédiments. Une grande partie de leurs résultats, souvent peu connus, sert de base aux recherches actuelles.

A cette époque, l'Université de Nancy était le centre des recherches de sédimentologie marine.

Puis, durant une période de près de vingt ans, les esprits curieux parurent se désintéresser de la sédimentologie sous-marine. Il fallut la thèse de DANGEARD, en 1929, pour que reprissent les recherches systématiques. A bord du "Pourquoi-Pas", sous la direction du Dr. CHARCOT, DANGEARD donna une cartographie géologique sous-marine de la Manche permettant de relier les horizons stratigraphiques du bassin parisien et du bassin de Londres.

Actuellement, les recherches de sédimentologie sous-marine sont l'apanage de laboratoires bien équipés et la multiplicité des techniques requiert la collaboration de spécialistes (pétrographie sédimentaire, chimie, radiocristallographie). En France, les équipes dirigées par MM<sup>r</sup> BERTHOIS, BOURCART, RIVIERE et VATAN centralisent les résultats obtenus sur les littoraux de la Manche, de l'Atlantique et de la Méditerranée. D'éminents géographes comme A. GUILCHER et J. TRICART étudient aussi les problèmes de sédimentologie sous-marine.

La Granulométrie a pour objet de montrer la répartition statistique des grains d'un sédiment pour les différents écarts dimensionnels considérés. De la représentation graphique obtenue l'on calculera des indices numériques simples caractérisant le sédiment et renseignant éventuellement sur son évolution et ses origines. Il faut insister particulièrement sur ces techniques granulométriques car la question intéresse les biologistes désireux de préciser la nature des substrats.

Il appartient donc à l'écologiste du benthos de connaître, sinon d'effectuer lui-même, les principaux aspects des techniques granulométriques.

## II -) METHODOLOGIE :

Sur le plan expérimental, il y aura une méthode pour chaque catégorie granulométrique du matériau utilisé. Les auteurs actuels admettent la classification suivante : (WENTWORTH et KRUMBEIN)

plus de 256 mm	= blocs (boulders)
256 à 4 mm	= galets et petits blocs (cobbles, pebbles)
4 à 2 mm	= granules (granules)
2 à 0,25 mm	= sable (sand)
0,25 à 0,050 mm	= sablon (fine sand)
0,050 à 4 $\mu$	= limons, poudres, pré-colloïdes (silt)
moins de 4 $\mu$	= argiles (clay)

En de nombreux cas, le sédiment sera très hétérogène : il y aura des blocs, des galets mêlés à une matrice de sable et de vase. Les écarts dimensionnels extrêmes seront importants. L'on devra faire appel à trois méthodes successives afin de préciser la granulométrie totale.

- pour les blocs, galets et granules : mesure directe
- pour les sables, sablons, poudres : tamisages
- pour les pré-colloïdes et les argiles : sédimentation

1. Mesure directe : L'on pourra peser plusieurs Kilogs du sédiment et isoler à la main les lots de galets, blocs ou granules se rapportant aux écarts dimensionnels choisis : 5cm , de 4 à 3 cm , de 3 à 2 cm , etc... par exemple. Chaque lot sera pesé et le pourcentage calculé par rapport au poids total de l'échantillon prélevé. Les galets seront mesurés au pied à coulisse à la règle. A.CAILLEUX a indiqué une méthode granulométrique commode pour effectuer les mesures sur place (plages de galets, cordons littoraux).

2°/ Méthode par tamisage : En deçà des granules, il faudra tamiser 100 gr. de sédiment à travers des colonnes de tamis emboîtés à mailles décroissantes. Le numéro marqué pour chaque tamis correspond au nombre moyen de mailles par pouce anglais. La série de mailles successives et souvent une progression géométrique de raison  $\sqrt{2}$  (TYLER) ou 2 (WENTWORTH). L'on peut ainsi multiplier le nombre des tamis pour le domaine dimensionnel : 3,80 mm. (tamis 6) à 0,035 mm. (tamis 350). Le "refus" de chaque tamis sera pesé au 1/10 gr. près, précision largement suffisante et du même ordre que les erreurs expérimentales inévitables (grains coincés dans les mailles des tamis, pertes, etc...).

L'on aura intérêt à réaliser une agitation homogène et les colonnes de tamis seront disposées sur un plansichter. La vitesse ne doit guère dépasser 100 tours / minute.

On a beaucoup discuté sur la durée des tamisages, BERTHOIS et BIELLOT ont calculé des formules et des tables donnant la durée du tamisage en fonction du poids prélevé et de la nature du matériau. En procédant à des essais empiriques, j'ai adopté :

- 8 mn. de tamisage pour le sédiment très riches en débris de coquilles.

- 10 mn. pour les sédiments calcaires

- 15 mn. " " " siliceux.

Au-delà de cette durée et pour des vitesses de rotation plus fortes, l'on fragmente les grains, ce qui fausse la granulométrie naturelle du sédiment.

Il ne sera pas nécessaire de décalcifier le sédiment. D'abord parceque les coquilles et débris de tests ou de concrétions font partie du sédiment lui-même en des proportions importantes (parfois 90%),

ensuite parceque la décalcification totale est une opération plus longue et plus délicate qu'on ne le croit généralement. Il est cependant évident que l'on aura intérêt à comparer les courbes granulométriques des sédiments décalcifiés par rapport aux courbes des sédiments bruts si l'on se trouve en substrat géologique siliceux ( Iles d'Hyères par ex. ) l'on pourra isoler les stocks d'origine détritique et évaluer la proportion des concrétionnement organogènes.

3°/ Méthode par sédimentation : Au-dessous de la maille 350 ( 0,035 mm environ ) l'on utilise la vitesse de chute des particules dans un fluide afin d'en évaluer le diamètre moyen.

En considérant des particules sphériques se sédimentant dans un fluide homogène, la formule de Stokes donnera le diamètre moyen  $d$  pour une hauteur de chute  $h$ , après un temps  $t$ . Si  $v$  est la vitesse de chute l'on a :  $v = \frac{h}{t}$  en cm./ seconde :

$$\text{et : } v = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot \left( \frac{D_1 - D_2}{\eta} \right) \cdot g$$

où :  $D_1$  = poids spécifique moyen du grain qui tombe en  $\text{gr/cm}^3$

$D_2$  = poids spécifique du fluide en  $\text{gr/cm}^3$

$g = 981 \text{ cm / sec}^2$

$r$  = rayon de la particule ou  $\frac{d}{2}$

$\eta$  = viscosité du fluide en  $\text{gr / cm/ sec}$ .

Le fluide est généralement l'eau bi-distillée.

Plusieurs méthodes ont été proposées : lévigation, balance à sédimentation, densimétries, flotteurs, etc... Nous décrirons ici la méthode de sédimentation la plus courante à l'aide de la pipette d'ANDREASEN adoptée par tous les laboratoires et la technique de défloculation établie par A. RIVIERE.

La floculation des colloïdes et pré-colloïdes est un phénomène naturel fondamental qu'il faudra éviter si l'on veut effectuer la granulométrie de fraction argileuse du sédiment.

L'influence des électrolytes détermine la floculation rapide des particules colloïdales qui s'agglomèrent et se sédimentent. Les particules sont chargées positivement ou négativement; et des ions sont collés à leurs surfaces. Les ions du liquide forment une autre couche autour de la particule qui est déjà chargée par ses ions internes (GESTNER). La coagulation a lieu lorsque la charge des particules descend au-dessous d'un certain potentiel critique.

Afin de calculer exactement le diamètre des particules par la formule de Stockes, il importe d'avoir affaire à des solutions rigoureusement défloculées et dont l'état électrique ne puisse gêner la chute du sédiment. D'où nécessité de contrôler continuellement le pH des solutions.

A. RIVIERE a mis au point la technique suivante :

- Broyer grossièrement 5 gr. environ d'argile, disperser sommairement dans 50cm<sup>3</sup> d'eau distillée et prendre le pH. Amener le pH aux environs de 8 à l'aide de Na OH. N/10, ajouter 6cm<sup>3</sup> d'eau oxygénée pure et mettre au bain-marie bouillant durant 3 heures. On laisse reposer jusqu'au lendemain.

- Ensuite, deux cas sont à envisager :

A) - L'on décalcifie le sédiment :

Amener à l'ébullition douce et ajouter doucement ClH.1/10 jusqu'à destruction complète du CO<sup>3</sup>Ca. Il est utile de contrôler le pH. du liquide au moyen d'un papier imbibé d'héliantina. Cette opération peut demander plusieurs heures.

Ensuite, l'argile sera acidifiée jusqu'à pH 2 environ, puis centrifugée, lavée encore avec ClH. N/10 une fois ou deux. Enfin on lavera avec de l'eau distillée jusqu'à la défloculation.

L'argile défloculée sera amenée vers pH. 8 avec quelques gouttes de Na OH. N/10 et à un volume d'environ 100<sup>cc</sup> avec de l'eau distillée. Puis, il faudra ajouter, très exactement, 10<sup>cc</sup> de pyrophosphate de soude à 50 / 100 et agiter 17 heures.

La suspension sera ramenée à 500<sup>cc</sup> par addition d'eau distillée dans une éprouvette sans bec. L'on agitera et l'on fera un prélèvement de 10<sup>cc</sup> à la pipette d'ANDREASEN, à une profondeur comprise entre 6 et 7 cm. Les 10<sup>cc</sup> de la suspension seront recueillis dans une capsule exactement tarée au 1/10 de milligramme, séchés à l'étuve à 110° et pesés. Ce premier prélèvement correspondra à l'instant zéro.

On fait généralement 12 prélèvements de 10<sup>cc</sup> espacés comme suit :  
0' - 2' - 4' - 16' - 1 h. - 2 h. - 4 h. - 8 h. - 24 h. 2 jours -  
4 jours - 8 jours.

En deça, la dimension des particules, souvent inférieures à 0,2 $\mu$ , ne correspond plus à une sédimentation régulière, les mouvements browniens et d'autres phénomènes masquant l'action de la pesanteur.

En se rapportant à des abaques établies en fonction de la loi de Stokes, c'est-à-dire de la température et de la viscosité du fluide, l'on calcule le rayon moyen des particules correspondant à chaque prélèvement. Les poids des diverses fractions recueillies donnent les proportions relatives.

Il est évident que les résultats ainsi obtenus traduisent les vitesses de sédimentation des fractions granulométriques. D'autre part, les grains étant assimilés à des sphères, il est souvent utile d'effectuer des mesures de contrôle au microscope à l'aide d'un oculaire micrométrique préalablement étalonné.

Enfin, la viscosité étant liée aux variations de température au 1/10 de degré centigrade près, il faut placer les suspensions dans un thermostat généralement réglé à 25°. Si des variations de température sont néanmoins observées, l'on effectuera la correction au moyen de la loi de Stokes. Le contrôle des diamètres au moyen du microscope a donc une grande importance, étant donné par ailleurs que beaucoup de minéraux argileux ont une forme lamellaire et non sphérique, cette forme lamellaire étant liée à leur propre structure cristalline.

B) - L'on ne décalcifie pas le sédiment:

La présence d'ion  $CO_3^{3-}$  amène une floculation énergique. Il importe de neutraliser l'action de cet ion dans la marche d'une granulométrie fine par sédimentation.

L'on utilisera la technique précédente, exceptées la décalcification et la centrifugation. Puis on ajoutera très exactement  $10^{cc}$  d'hexamétaphosphate de soude au 15/1000 au lieu du pyrophosphate du cas précédent.

III - ) ELEMENTS DE STATISTIQUE ET REPRESENTATION GRAPHIQUE:

Ces méthodes (mesure directe, tamisage et sédimentation) donneront donc les proportions relatives des catégories granulométriques d'un sédiment.

Il convient d'adopter une représentation graphique approprié et susceptible de donner des indices numériques caractérisant le degré d'évolution du sédiment.

L'on portera en abscisses la valeur des diamètres des différentes catégories granulométriques et en ordonnées les pourcentages de ces catégories exprimés par les poids respectifs de chaque fraction.

Il sera donc possible d'établir, au moyen de notions statistiques simples, les histogrammes de fréquence et les histogrammes cumulatifs. L'on considèrera la maille moyenne établie entre deux tamis consécutifs de maille  $x_1$  et  $x_2$ , telle que  $x_1 > x_2$ . Cette maille moyenne aura pour valeur  $\frac{x_1 + x_2}{2}$  et correspondra à la masse du "refus" laissé sur le tamis de maille  $x_2$ .

A partir des histogrammes l'on pourra tracer les courbes cumulatives et les courbes de fréquences. La masse étant assimilée à une fonction du diamètre, l'on démontre, à la limite (dont on peut se rapprocher expérimentalement en multipliant le nombre des tamis), que la courbe de fréquence est la dérivée de la courbe cumulative.

Les points d'inflexion de cette courbe cumulative correspondront aux maxima et aux minima de la courbe de fréquence, c'est-à-dire aux points où s'annulera la dérivée seconde de la fonction  $y = f(x)$ .

La méthode des histogrammes conduit à des erreurs systématiques car la valeur des coordonnées dépend de l'écart choisi arbitrairement entre deux domaines granulométriques successifs (tamis par exemple) tels que  $x_1 > x_2$ .

L'on peut rendre, théoriquement, cette représentation correcte en portant en ordonnées, non plus les "refus"  $\Delta M$  de chacun des tamis mais la valeur  $\frac{\Delta M}{\Delta x}$ ,  $\Delta x$  désignant la valeur  $x_1 - x_2$  entre deux tamis consécutifs (A. RIVIERE).

A la limite, l'on calcule la courbe cumulative  $y = f(x)$  et sa dérivée, la courbe de fréquence telle que  $y' = \frac{dM}{dx}$ . Ainsi, le graphique obtenu à partir de  $y'$  sera plus satisfaisant que l'histogramme direct établi avec  $y' \neq \frac{\Delta M}{\Delta x}$

A. RIVIERE a aussi employé un mode de représentation polaire et les diagrammes circulaires obtenus mettent en évidence les stocks sédimentaires. Les sables littoraux évalués montrent généralement plusieurs stocks. Dans cette représentation polaire, les rayons seront proportionnels à  $\sqrt{\frac{dM}{dx}}$  en posant  $m = f(x)$

et les valeurs angulaires  $\theta$  seront égales à :

$$\theta = k_1 \cdot \frac{x_1 + x_2}{2} \quad K_1 = \text{cte}$$

Le plus souvent, l'on emploiera les graphiques cumulatifs qui synthétisent les autres modes de représentation. Sur le graphique obtenu, il sera aisé de calculer:

- la médiane  $Q_2$ , ou valeur du diamètre correspondant à la fréquence 50%.

- les quartiles  $Q_1$  et  $Q_3$  correspondant aux fréquences 25% et 75%.

les déciles extrêmes  $P_{10}$  et  $P_{90}$  correspondant aux fréquences 10% et 90%.

A partir de ces valeurs, l'on calculera:

- l'indice de classement =  $\frac{Q_1}{Q_3}$

- l'indice d'asymétrie =  $\frac{Q_1 + Q_3}{Q_2}$

- l'indice d'angulosité =  $\frac{Q_3 - Q_1}{2(P_{90} - P_{10})}$

- l'indice des déciles extrêmes =  $\frac{P_{10}}{P_{90}}$

Si  $d_M$  et  $d_m$  représentent les diamètres extrême et si l'on fait,  $G = \frac{d_M}{d_m}$

- l'on aura l'indice de classement de A.RIVIERE, tel que :

$$g = \log G$$

Toutes ces valeurs ont une grande importance et s'expriment à partir des courbes cumulatives. Il est facile d'ajouter les masses de "refus" des tamis successifs et de ramener par exemple 100 grammes de sédiment à la fréquence limite 100%. L'on pourra indifféremment cumuler les résultats :

- du côté des grains grossiers: d M correspond à 100% .
- " " " fins : d m " " " "

#### IV -) IMPORTANCE DES GRANULOMETRIES EN BIONOMIE MARINE

Ainsi l'on caractérisera divers types de fonds marins à partir de leurs propriétés granulométriques.

A.RIVIERE a montré que si l'on trace les courbes cumulatives des sédiments fins, en adoptant une abscisse logarithmique, l'on obtient trois types de courbes :

1 / les courbes à concavité tournée vers le haut ou type parabolique caractérisent les sédiments non évolués.

2 / les courbes à facies linéaires, s'apparente au type logarithmique caractérisent les sédiments déposés par excès de charge après une certaine évolution et un transport.

3 / les courbes à concavité tournée vers le bas ou type hyperbolique caractérisant les sédiments déposés par décantation après une longue évolution tels que les argiles Kaoliniques des grandes profondeurs.

J'ai montré récemment ce schéma est valable pour les sédiments sableux grossiers et que, après transformation de la forme cumulative logarithmique en forme canonique, il était aisé de passer d'un type à l'autre par translation de la médiane. Ce gradient de variation est valable pour les sédiments détritiques grossiers (blocs, galets) et,

au terme de l'évolution, l'on aboutit toujours au type hyperbolique.

Les recherches sédimentologiques entreprises sur le littoral et le plateau continental de la Provence m'ont permis d'individualiser le substrat des biotopes décrits par J.M.PERES et J.PICARD.

1/ Les sédiments non évolués, paraboliques, caractérisent les talus détritiques (blocs, galets peu émoussés) des biotopes superficiels infralittoral et élittoral et des sables coquilliers de la zone superficielle.

2/ Les sédiments logarithmiques caractérisent le substrat des herbiers de Posidonies (mattes), les cordons littoraux (galets et sables grossiers), les chenaux d'érosion sur le fond, les sables de calanques mis en place après un triage hydrodynamique relativement poussé. Il en est de même pour certains biotopes des groupements détritiques du large ressortant aux niveaux inférieurs du système oligophotique.

3/ Les sédiments hyperboliques résultent de décantations poussées à l'abri des triages et des actions hydrodynamiques. Ils caractérisent les vases côtières élittorales du plateau continental (100m. en moyenne) et les vases profondes des canons sous-marins (- 400 à - 650m.), biotopes des groupements aphotiques (vases à Dentalium, etc...) souvent pauvres en espèces. L'on retrouve ce dernier type dans les sables vaseux à Cymodocées déposés dans les "lagunes" en arrière du front d'émergence de l'herbier à Posidonies jouant le rôle de brise-lames ( Ile de Port-Cros, Bandol, le Brusç).

L'on observe d'autre part des types intermédiaires; parfois plusieurs catégories se juxtaposent sous l'influence d'actions chimiques ou hydrodynamiques locales: telles sont les vases à fibres de Posidonies décantées à l'abri des caps et des files, en des fonds riches en matières humiques acides entretenant une défloculation naturelle des colloïdes. Telles sont aussi les vases du Grand

Congloué, par 40m. de fond, amphores colmatées par les décantations, véritable sédimentation "en vase clos" depuis le deuxième siècle avant notre ère.

Enfin, les biotopes phréatiques du sable fin des grandes plages sont particuliers à un sable littoral très sélectionné par les actions hydrodynamiques et se rapprochant du type hyperbolique.

#### V -) RADIOCRISTALLOGRAPHIE ET DETERMINATION MINÉRALOGIQUE DES ARGILES

##### SCOUS-MARINES:

Il convient d'examiner maintenant les rapports entre la composition minéralogique des argiles sous-marines et certains biotopes reconnus par les bionomistes dans le système oligophotique. Ces recherches font appel à des techniques modernes complexes et les laboratoires de Biologie marine doivent alors travailler en liaison avec des spécialistes de la radiocristallographie disposant d'un matériel très coûteux.

On sait que les minéraux des argiles sont des silicates complexes dont la maille cristalline fondamentale est un tétraèdre dont le centre est occupé par un atome de Silicium ou d'Aluminium et dont les sommets sont occupés par 4 atomes d'Oxygène. Les Silicates se distinguent par la façon dont les tétraèdres s'enchaînent ensemble. L'architecture cristalline réalise une combinaison ionique stable dont l'ensemble est électriquement neutre. L'atome de  $Si^{++++}$  correspond à un petit ion fortement chargé qui impose par cela la dureté et la rigidité des silicates tandis que l'ion  $O^{-}$ , par ses divers modes d'arrangement dans la maille élémentaire du silicate.

La combinaison ionique se fera toujours vers l'obtention de la densité la plus régulière et la plus élevée. Ainsi s'expliquent les phénomènes d'isomorphisme, et de clivage, les macles et les propriétés mécaniques des alliages. Ainsi, les théories cristallographiques modernes renoncent aux sels d'un acide silicique" hypothétique pour

pour justifier la pluralité des silicates et expliquent la structure intime des minéraux.

Depuis les travaux de HAÛY, on admet que les atomes formant la maille d'un cristal sont distribués suivant un système de plans réticulaires. La pénétration de rayons X mous à l'intérieur d'un cristal donne des réflexions sur les divers plans réticulaires suivant le principe d'HUYGHENS. L'onde se propagera donc dans le cristal en donnant une onde réfléchie sur chaque plan réticulaire. La relation de BRAGG montre que cette réflexion est sélective; chaque plan réticulaire "choisit" les rayons du faisceau et les longueurs d'ondes. La réciproque est valable.

Ainsi, les physiciens utilisent les propriétés cristallographiques d'un minéral pour mesurer les longueurs d'ondes et les minéralogistes utilisent des longueurs d'ondes connues pour mesurer les distances séparant les plans réticulaires, d'où la détermination du cristal.

La longueur d'onde choisie pour le rayonnement incident peut être donnée par un monochromateur; l'on adopte aussi la raie  $K_{\alpha}$  du Cobalt. Enfin l'on peut utiliser l'anticathode de Fer ou de Tungstène. On dispose actuellement de chambres d'ionisation perfectionnées et l'on peut se rapporter à des substances de référence. Enfin un monocristal pourra être déterminé par le calcul de ses paramètres en se rapportant à des tables. Les techniques varient : diagrammes de LAÛE, spectres de DEBYE - SCHERRER, méthode des agrégats orientés basée sur la rotation du cristal. Cette dernière méthode, perfectionnée par A. RIVIERE, est plus employée en Sédimentologie.

Les recherches effectuées sur la fraction argileuse des vases profondes du plateau continental de la Provence m'ont permis de caractériser minéralogiquement certains types de fonds correspondant à des biotopes.

Ainsi, les fonds vase-sableux du plateau continental, biocénoses à Pennatula rubra, Dentalium inaequicostatum, sont caractérisés par l'association minéralogique Illite-Kaolinite qui paraît fondamentale pour la Provence. Au-delà de - 100m., sur le rebord extérieur du plateau, en bordure des cañons, l'on note l'apparition brusque de la Montmorillonite. Il est intéressant de constater que la limite sud de l'association Kaolino-illitique et le début de la zone à Montmorillonite coïncident avec la limite nord des biocénoses à Leptometra phalangium et Dentalium panormum.

Les techniques d'analyse radiocristallographique du sédiment constituent donc le complément indispensable des granulométries.

Ces lignes avaient pour but de donner un aperçu sur ces techniques et sur l'étendue de leur champ d'application. Il est actuellement impossible d'en envisager toute la portée puisque toute progression demeure liée aux progrès de la Minéralogie et de la Physico-Chimie.

Il n'en reste pas moins que toute cartographie bionomique sous-marine doit s'accompagner d'une étude sédimentologie poussée des substrats. Les techniques sont longues et délicates, le matériel de recherche est coûteux.

---