

Essai d'application de la géostatistique à la cartographie sédimentaire dans la zone couverte par la carte bathymétrique au 1/40 000 de l'île de Batz aux Trépieds

Gérard André Auffret, André Marechal, Léopold Berthois

▶ **To cite this version:**

Gérard André Auffret, André Marechal, Léopold Berthois. Essai d'application de la géostatistique à la cartographie sédimentaire dans la zone couverte par la carte bathymétrique au 1/40 000 de l'île de Batz aux Trépieds . Bulletin de l'Institut de Géologie du bassin d'Aquitaine, 1970, 9, pp.121-136. insu-01510296

HAL Id: insu-01510296
https://insu.hal.science/insu-01510296

Submitted on 19 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

VII.8eb17
XVII. 2

BULLETIN
DE L'INSTITUT DE GEOLOGIE
DU BASSIN D'AQUITAINE

Essai d'application de la géostatistique à la cartographie sédimentaire dans la zone couverte par la carte bathymétrique au 1/40 000 de l'ile de Batz aux Trépieds

par Gérard André AUFFRET, André MARECHAL Léopold BERTHOIS.

1970 = *Tiré à Part* = N° 9

351 COURS DE LA LIBERATION - 33 TALENCE

Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine
9, 1970, p. 121 - 136

Essai d'application de la géostatistique à la cartographie sédimentaire dans la zone couverte par la carte bathymétrique au 1/40 000 de l'ile de Batz aux Trépieds

par Gérard André AUFFRET,* André MARECHAL** Léopold BERTHOIS*.

RESUME. -

On étudie dans cette note la distribution des dépôts meubles dans un secteur situé au large de Roscoff au moyen d'une carte schématique délimitant les zones à dépôts « homogènes ». Les paramètres retenus sont les pourcentages des diverses fractions granulométriques du matériel prélevé au fond par dragage. Les méthodes géostatistiques permettent d'évaluer la précision avec laquelle sont déterminés les teneurs moyennes qui caractérisent ces zones ainsi que leur surface.

ABSTRACT -

This paper presents a study of the distribution of the unconsolidated deposits in a zone located seaward of Roscoff using a schematic map to delineate the areas of « homogeneous » deposits. The parameters utilised are the different percentages of the various grain-size fractions of the bottom grab-samples. Geostatistical methods permit a precise analysis of the precision with which are determined the average parameter percentages which characterise the zones, as well as their geographical extent.

---

* - Laboratoire de Géologie de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de RENNES.

** - Centre de Morphologie Mathématique de l'Ecole des Mines de PARIS.

PREAMBULE -

Au cours de l'étude de caractère très général entreprise en Manche Occidentale à l'instigation de la Station Biologique de Roscoff, la nécessité s'est faite sentir de la mise au point d'une méthode pour coordonner les différentes techniques couramment utilisées en sédimentologie marine mais employées le plus souvent en ordre dispersé que sont : la bathymétrie, les dragages, la photographie sous-marine et la courantométrie. Chacune de ces différentes étapes qui doivent mener à la comprehension de la répartition actuelle des sédiments doit être entreprise selon un ordre logique, et la précision des résultats obtenus correctement évaluée.

Après avoir dressé une carte bathymétrique de la zone étudiée au 1/40 000ème, nous abordons la reconnaissance des principaux types sédimentaires. Cette étude faite à partir d'un réseau de reconnaissance à maille relativement large ne visait pas à une description exhaustive déjà entreprise par G. BOILLOT (1964), mais a été réalisée dans l'esprit méthodologique ci-dessus évoqué.

I - INTRODUCTION -

Le propos de cet exposé est l'étude de la distribution des dépôts superficiels sous-marins dans une zone du plateau continental située au large de Roscoff, par l'établissement d'une carte schématique indiquant les zones à dépôt « homogène ». Les paramètres d'étude retenus sont les pourcentages des diverses fractions granulométriques du matériel prélevé au fond par dragages.

On caractérise les différentes zones par la moyenne de la fraction granulométrique dominante : il est donc indispensable de connaître avec quelle précision sont estimées les teneurs moyennes, afin de vérifier si elles sont vraiment significatives de la prépondérance d'une classe granulométrique. On a utilisé pour cela des méthodes dérivées de la théorie des probabilités et initialement mises au point pour résoudre des problèmes analogues d'estimation minière : les méthodes géostatistiques.

II - LA GEOSTATISTIQUE -

A - Généralités -

La géostatistique est née du besoin impératif de connaître avec précision les réserves minières d'un gisement et de la constatation que l'emploi de la statistique classique, dans ce domaine, conduisait à des résultats aberrants. En effet, cette théorie considère que tous les échantillons prélevés sont des réalisations indépendantes d'une même loi de probabilité dont on cherche à déterminer les paramètres par l'histogramme expérimental : moyenne, variance etc... Ce point de vue est parfaitement justifié lorsque les échantillons concernent par exemple le tirage de boule de même dimension mais de couleur différente hors d'une urne. Par contre, lorsque les échantillons proviennent de l'observation d'un phénomène naturel en un certain nombre de points d'un champ donné, il y a de grandes chances pour qu'ils ne soient plus indépendants : si on observe en un point du fond sous-marin une prépondérance de cailloutis, il y a plus de chance qu'il en soit de même à 100 m. de là qu'à 10 km,.

En d'autres termes, les variables mesurées par les naturalistes sont régionalisées, en ce sens que leur valeur est liée plus ou moins étroitement à leur position dans l'espace : elles possèdent une structure, car elles résultent en général , de l'action de phénomènes physiques bien déterminés. Mais on sait que dans la genèse d'un phénomène naturel interviennent une multitude de causes dont l'action se fait sentir à différentes échelles. Au niveau du globe terrestre, on peut observer de grands ensembles comme les bassins océaniques (structure à grande échelle), à un niveau inférieur, on peut distinguer des bassins secondaires séparés par des seuils, puis, des réseaux de dépression ou de crêtes de degré inférieur. et ainsi de suite...

La nature se présente donc comme une série de structures s'emboitant les unes dans les au-

tres et qu'on aperçoit en tant que telles que dans la mesure où on les observe à l'échelle à laquelle elles se font sentir. A une échelle d'observation donnée, les phénomènes présenteront toujours un double caractère :

- structuré : dû à la structure perceptible à l'échelle où l'on se place.
- aléatoire : dû au fait que la nature, dans le cadre d'un phénomène physique donné, présente toujours des modalités différentes qui résultent du « hasard » ou de structures d'échelles inférieures.

Pour rendre compte de ce double aspect aléatoire et structuré des phénomènes naturels on a recours à une interprétation de type probabiliste, fondée sur la théorie des fonctions aléatoires stationnaires :

En théorie des probabilités, on définit la notion de variable aléatoire (V.A.) vectorielle $Y = (Y_1, Y_2, \ldots Y_K)$ à K composantes : c'est une famille de K variables aléatoires qui ne sont généralement pas indépendantes. Lorsque le nombre K de ces composantes devient infini, on obtient une famille infinie de variables aléatoires, c'est une fonction aléatoire. Si Y est une V.A. ordinaire, le résultat d'un tirage au sort effectué selon la loi de probabilité de Y est une valeur numérique particulière y. De même, si Y est une V.A. vectorielle $(Y_1, Y_2, \ldots Y_K$ un tirage au sort selon la loi (à K variables) de Y donne un vecteur $y = (y_1, y_2, \ldots y_K)$, c'est-à-dire, K valeurs numériques particulières. Enfin, si Y (x) est une fonction aléatoire (F.A.) c'est-à-dire une variable aléatoire vectorielle à une infinité de composantes - un tirage au sort effectué selon la loi (à une infinité de variables) de Y (x) donne une fonction numérique particulière y (x). On dit que y (x) est une réalisation de la fonction aléatoire Y(x).

La valeur de la F.A. Y(x) au point d'appui x_0 est une V.A. ordinaire Y (x_0) dont la valeur numérique y (x_0) est une réalisation: On peut par exemple considérer un profil topographique comme une réalisation d'une fonction aléatoire. La cote h en un point d'abcisse x_1 peut être considérée comme une variable aléatoire F (x_1) et le profil topographique f (x) comme une réalisation d'une fonction aléatoire inconnue F (x). On peut remarquer sur cet exemple que les variables aléatoires F (xi) et F (xi + ε) ne sont pas indépendantes. En effet, la cote au point xi + ε réalisation de la V.A. F (xi + ε) diffère généralement peu de la cote au point xi.

Mais la difficulté qu'introduit cette interprétation est qu'en général, la réalisation dont on dispose est unique, c'est celle qu'on a sous les yeux : alors qu'en statistique, l'hypothèse d'indé-

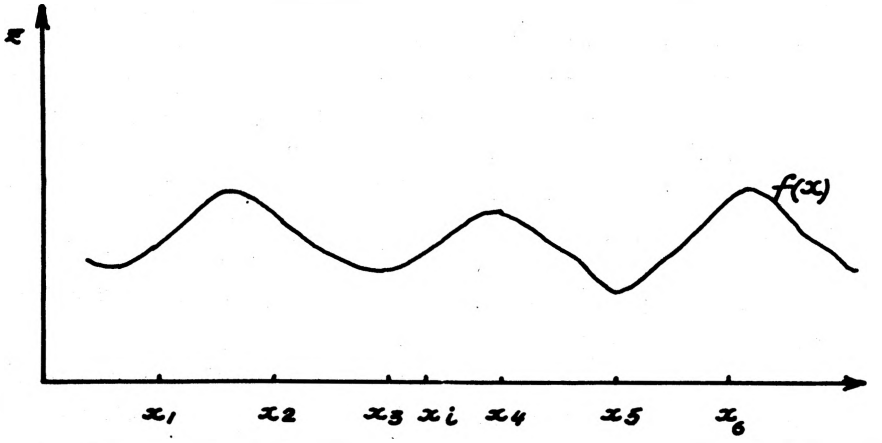


fig:1 Assimilation d'un profil topographique f(x) à une réalisation d'une fonction aléatoire stationnaire F(x)

pendance des échantillons permet de considérer chacun comme une nouvelle réalisation de la variable aléatoire, et ce faisant, de reconstituer expérimentalement la loi de probabilité. Dans notre interprétation la réalisation est unique et il nous faut abandonner l'espoir de reconstituer la loi de la fonction aléatoire. C'est ici qu'intervient l'observation naturaliste : si on cherche en effet, à mettre en évidence, dans un champ donné, une structure sous-jacente, c'est qu'on suppose l'existence d'un processus générateur homogène à l'intérieur de ce champ, autrement dit que dans les différents points du champ, la nature a répété une même expérience. dont les résultats sont comme dans toute expérience physique, entâchés de fluctuations aléatoires.

Pour reprendre l'exemple précédent concernant la topographie, on considère que dans un champ suffisamment important se développe une série d'accidents topographiques de même « style ».

Dans ces conditions, on a la possibilité de donner, à la structure moyenne à travers le gisement (c'est-à-dire au réseau de relations point à point) une signification de valeur moyenne pour la fonction aléatoire F (x) dans ses différentes réalisations possibles.

En résumé, la géostatistique s'appuie sur une interprétation probabilisée de la nature : cette interprétation n'est féconde que si le phénomène, à l'échelle à laquelle on l'étudie, est homogène et présente une structure moyenne ; cette structure moyenne sera mise en évidence par une courbe appelée variogramme, qui est le seul renseignement dont on aît besoin pour déterminer la précision des estimations qui seront faites.

Dans la suite de cet exposé, la fonction aléatoire F (x) (ou variable régionalisée) dont il sera question concerne la distribution de différents pourcentages ; par exemple celui des cailloutis dans un champ constitué par les fonds sous-marins au large de Roscoff.

En un point donné ce pourcentage peut-être considéré comme une variable aléatoire F (x_0). la distribution observée f (x) est une réalisation d'une fonction aléatoire F (x). Mais, pour simplifier les écritures nous désignerons par f (x) la variable aléatoire au point x du champ au lieu de F (x_0).

B - Le variogramme. -

La fonction aléatoire F (x) étant supposée stationnaire, sa valeur probable à priori est identique en tous les points du champ considéré, c'est-à-dire que les espérances mathématiques (ou moyenne) des V.A. (f (x) et f (x + h) sont égales.

$$E\left[f(x) \right] = E\left[f(x+h) \right]$$

soit $E\left[f(x+h) - f(x) \right] = o$

Alors la fonction :

$2\gamma(x,h) = E\left[f(x+h) - f(x) \right]^2$ représente la variance de l'accroissement du paramètre entre les points x et x + h. Du fait de la stationarité cette variance est la même quelque soit le point d'appui x ou y.

$$E\left[f(x+h) - f(x) \right]^2 = E\left[f(y+h) - f(y) \right]^2$$

C'est donc une fonction du vecteur $h = h_1, h_2, h_3$ seul.

$$2\gamma(h) = E\left[f(x+h) - f(x) \right]^2$$

Comme cette variance est supposée constante pour tous les points x, on a encore :

$$2\gamma(h) = \underset{x}{Moy.}\left[E\ f(x+h) - f(x) \right]^2$$

quand x se déplace dans le champ. On pourra donc estimer cette fonction, si on connaît f (x) en un certin nombre de sondage, et pour des valeurs de h égales à des multiples de la distance « d » entre les sondages :

Si d est le pas de la maille de reconnaissance, on aura :

$$2\gamma(kd) = Moy.\left[f(x+kd) - f(x) \right]^2$$

pour tous les sondages pour lesquels on peut former $f(x+kd) - f(x)$ dans une direction donnée.

Si on définit la structure d'un ensemble comme le système de relation liant les points entre eux, il apparaît que le variogramme donne une image moyenne de la structure en mesurant l'écart quadratique moyen séparant deux points distants de h.

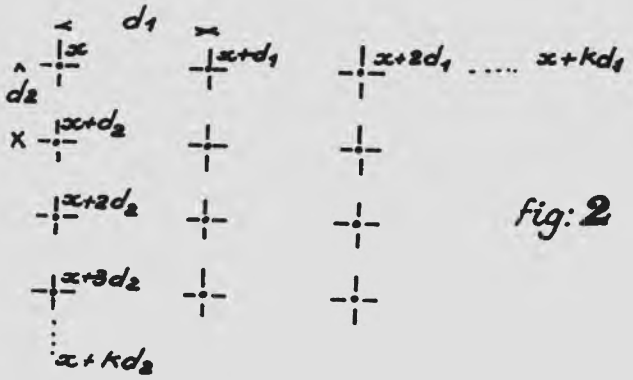


fig: 2 Schéma d'implantation d'un réseau de reconnaissance.

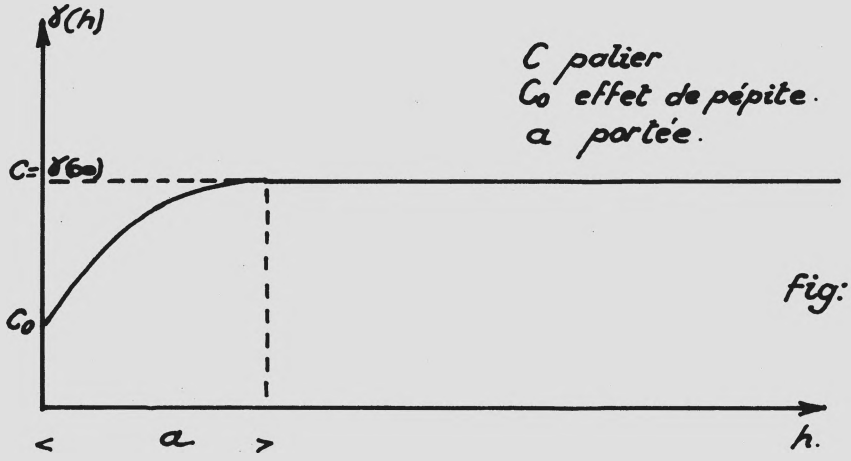


fig: 3 Fonction variogramme

Examinons les caractéristiques structurelles mises en évidence :

- un palier : f (x) est stationnaire et son palier C mesure la dispersion totale à grande échelle.
- Si γ (h) ne passe pas par l'origine, mais au point C_0 : il existe une structure à petite échelle (vraie ou due aux erreurs de mesure) inférieure à la maille de reconnaissance (effet de pépite).
- Si γ(h) atteint son palier à une distance a appelée portée : a est la distance au delà de laquelle les corrélations entre les valeurs f (x_i) disparaissent, c'est la zone d'influence des points.
- γ(h) peut ne pas dépendre de la direction du vecteur h mais seulement de son module : la fonction f(x) est dite isotrope.

Il existe un cas simple d'anisotropie c'est celui où par une simple transformation linéaire sur les données, on rend le variogramme isotrope.

C - L'utilité du variogramme -

Le variogramme synthétise dans son comportement au voisinage de l'origine et à l'infini certaines caractéristiques structurales de la régionalisation : des éléments comme la portée, l'anisotropie peuvent se relier à des hypothèses génétiques. On peut en effet créer théoriquement des fonctions aléatoires engendrées suivant un mécanisme connu et calculer leur variogramme théorique. Le cas le plus connu est celui du mouvement brownien d'une particule, dont les accroissements sont stationnaires et dont le variogramme est une droite. Cependant, il est toujours délicat d'attribuer une genèse à un phénomène sur la seule ressemblance des va-

riogrammes théoriques et expérimentaux étant donné que deux phénomènes de mécanisme fort différent peuvent engendrer le même variogramme.
Par contre, il est possible et même indispensable de raccorder la courbe expérimentale à une courbe théorique qui possède les mêmes caractéristiques. On peut alors à l'aide de ce modèle mathématique et sans faire référence à des similitudes génétiques, penser à l'exploitation de son contenu structural pour résoudre des problèmes d'estimation par exemple :
Etant donné une surface, on estime sa teneur par la moyenne des mesures effectuées sur les dragages de cette zone. Quelle est la précision d'une tel le estimation. ?

III - APPLICATION A L'ETUDE DES DEPOTS SOUS-MARINS. -

A - Paramètres, géostatistique -

On s'est intéressé dans la zone du plateau continental étudié à la granulométrie des dépôts sous-marins. Ces dépôts superficiels sont classés en trois catégories :

- cailloutis : 2 cm. $<$ ø $<$ 20 cm.
- graviers 2 mm. $<$ ø $<$ 2 cm.
- sable 80 µ $<$ ø $<$ 2 mm.

On a considéré accessoirement la teneur en fraction biologique des cailloutis et des graviers.

Ces différentes fractions ne sont pas arbitraires. Comme **BOURCART** l'a montré des différentes « phases » possèdent des caractéristiques physiques et même minéralogiques particulières. Leur présence dans un sédiment n'est pas fortuite mais correspond à des types de dépôt génétiquement différents La distribution de ces différentes « phases » que nous observons dans le champ considéré résulte de la combinaison d'au moins trois processus géologiques différents qui se sont succédés au cours du quaternaire.

1°) Mise en place des cailloutis et graviers au cours de la régression Wurmienne.

2°) Remaniement de ces cailloutis et graviers distribués lors de la transgression marine Flandrienne

3°) Transport et accumulation de sables et graviers d'origine biologique et remaniement des graviers détritiques (?) par les courants de marée actuels.

On peut donc, en première approximation admettre que l'hypothèse de stationnarité est satisfaite pour les cailloutis et les graviers du large, mais le processus des accumulations sableuses ne peut être considéré comme stationnaire que sur les fonds plats de cailloutis et de graviers reposant sur la dalle de calcaire du Lutétien où le régime des courants est probablement lui-même stationnaire, mais au voisinage du socle paléozoïque on observe d'importantes accumulations sableuses qui se situe, à ce niveau, un changement important du montrent que se situe, à ce niveau, un changement important du régime hydraulique et l'hypothèse stationnaire ne peut donc plus être retenue. A l'échelle que nous avons envisagée ceci n'affecte que la bordure sud de la zone et peut être toléré, mais, dans un travail plus précis, il ne pourrait pas en être de même. Cette zone de transition devrait alors être considérée pour elle-même et prospectée en conséquence.
On définit donc, en chaque point x_o, trois teneurs, $f_1(x_o)$, $f_2(x_o)$, $f_3(x_o)$. Ces définitions ponctuelles purement théoriques sont en fait des limites :

$$f_1(x_o) = \lim_{S \to o} \frac{\text{Poids de sable dans S}}{\text{Poids total de dépôt superficiel dans S}}$$

Il est clair qu'expérimentalement on ne peut jamais atteindre les valeurs $f(x_o)$ mais seulement leur valeur moyenne sur la surface de prélèvement : les quantités alors mesurées ne sont pas les $f(x_o)$, mais leurs régularisées par le prélèvement.

C'est effectivement ce qui se passe par dragage : la drague ramasse superficiellement les matériaux sur une longueur d'environ 200 m. et dans des directions variables ; c'est sur ces valeurs régularisées que seront calculées les variogrammes.

On conçoit intuitivement que ceux-ci ne pourront pas donner la structure « ponctuelle » du dépôt , mais seulement la structure de la variable régularisée. On montre effectivement que tel est le cas, mais si on s'intéresse à la structure kilométrique des dépôts cette régularisation ne modifie pas le variogramme aux distances kilométriques c'est sur cette propriété qu'on s'est fondé pour effectuer les calculs de teneurs et de variance d'estimation.

Le champ exploré est d'environ 15 Km. x20 Km., reconnu à la maille régulière de 2,8 Km. de côté E/O et 4,4 km. N/S. soit 18 sondages à cette maille. Certains de ces sondages ont été doublés ou triplés pour avoir une idée de la variation hectométrique. On démontre théoriquement que le variogramme est bien estimé jusqu'aux distances égales au quart des dimensions du champ. On sait que dans le cas présent, seul, le premier point à 3 Km. peut être tenu comme sûr, il en résulte une grande imprécision sur la forme à donner au variogramme théorique. On sait cependant que dans de nombreux phénomènes naturels le variogramme est linéaire au voisinage de l'origine et peut présenter un effet de pépite. On a donc retenu un schéma dont la forme, au voisinage de l'origine est du type :

$\gamma(h) = C_o + p\,h$ (p étant la pente de droite).

On peut à partir de cette équation, calculer quelle doit être la variance des sondages dans le champ : la valeur prévue est, au moins pour les cailloutis, très proche de la valeur expérimentale.

Il faut donc noter avant de poursuivre que l'étude présente doit essentiellement être tenue pour un exemple des possibilités qu'offre la géostatistique dans la reconnaissance des fonds sous-marins, plutot que donnant des résultats définitifs. On reprendra pour cela l'exploration sur un gisement de dimensions plus importantes pour que les résultats statistiques soient mieux assurés.

B - Réalisation -

Une série de dragages a été réalisée dans la région couverte par la carte bathymétrique de l'Ile de Batz aux Trépieds dressée par L. BERTHOIS Dix huit échantillons ont été prélevés selon un réseau rectangulaire : en six des noeuds de ce réseau ainsi qu'en des points supplémentaires, les dragages ont été répétés avec un décalage de 250 m. environ afin d'étudier la variabilité locale. L'étude a porté au total sur quarante échantillons. Le pourcent en cailloutis (fraction granulométrique supérieure à 20 mm.) a été calculé à bord à partir de la totalité du dragage. Les pourcents en graviers et en sables ont été calculés au laboratoire sur le prélèvement effectué à bord. En outre, la fraction biologique de la totalité des cailloux de l'échantillon est séparée à la main et son pourcentage calculé, la même opération est effectuée sur les graviers (fraction granulométrique comprise entre 2 et 20mm) après échantillonnage à l'aide d'un séparateur mécanique.

On étudie alors la variation spatiale des pourcents en cailloutis, graviers et sables sur l'échantillon total puis, sur les cailloux et graviers après soustraction de la fraction biologique. Le calcul des variogrammes se fait en associant deux à deux, les pourcents calculés, en translatant le réseau des valeurs h, 2 h, 3 h, h étant le paramètre de la maille suivant lequel s'effectue cette translation. Cette opération est effectuée selon les directions Est-Ouest et Nord-Sud

On calcule ainsi la valeur de la fonction variogramme :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \left[f(x) - f(x+h) \right]^2$$

et d'autre part, la variance statistique D^2 des échantillons.

La série des dragages effectués sur des points rapprochés permet de calculer une valeur de $\gamma(h)$ pour une valeur faible de h. L'étude des courbes obtenues permet d'étudier le caractère de la variation spatiale des différentes fractions.

- I°) - Etude des variogrammes -

On peut en première approximation faire passer une droite moyenne entre les différents points avec une précision variable : très bonne

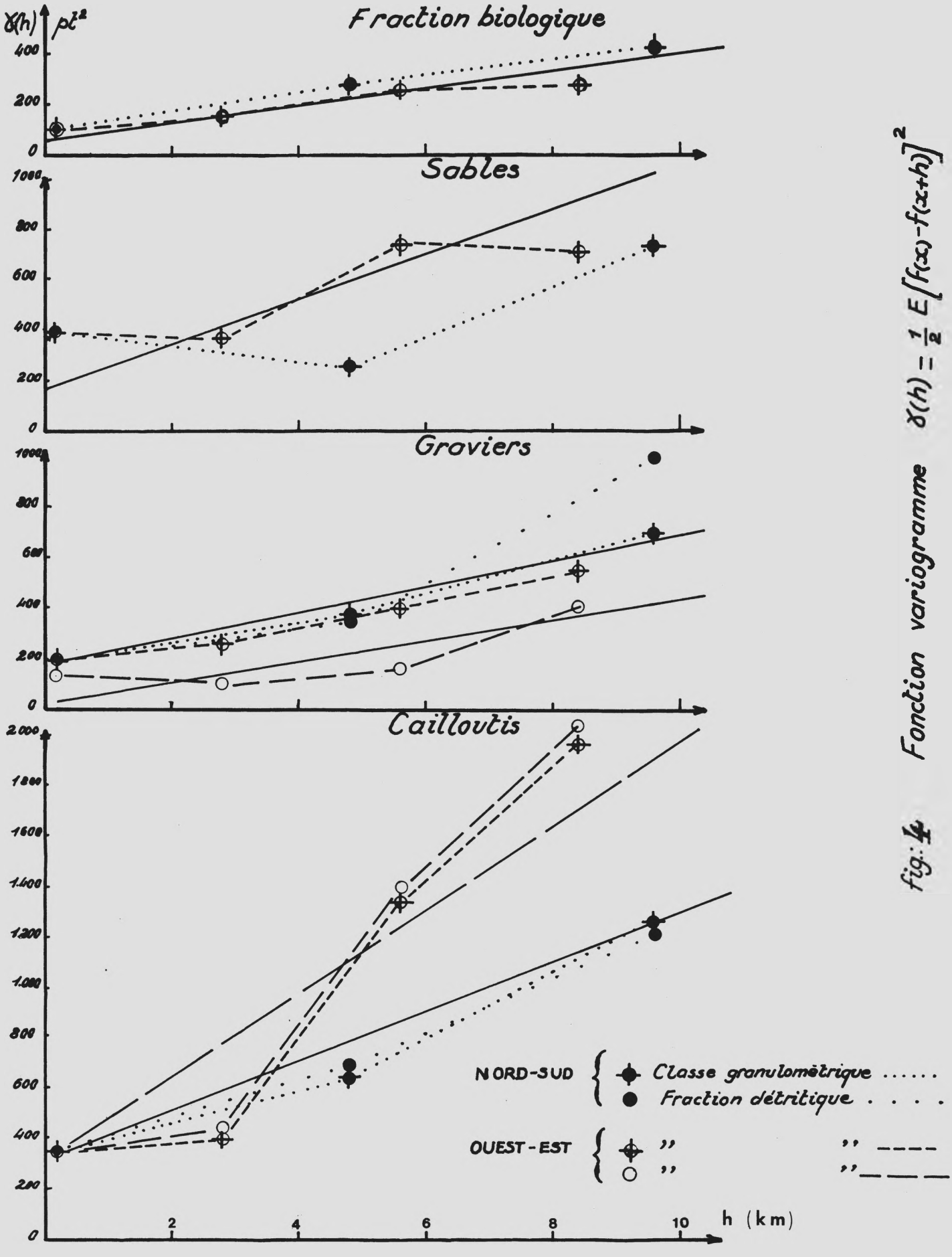


fig: 4 Fonction variogramme $\gamma(h) = \frac{1}{2} E[f(x)-f(x+h)]^2$

pour les cailloutis, cette interpolation est moins bonne pour les graviers et surtout pour les sables, mais elle reste néanmoins acceptable en première approximation. On propose donc un schéma linéaire pour ces variogrammes. L'équation de ces types de variogrammes est de la forme :

$$\gamma (h) = C_o + p\ h$$

C_o : valeur moyenne de l'effet de pépite
p : pente de la droite.
h : distances (exprimées en kilomètres)

a) - Etude qualitative des différents variogrammes obtenus -

CAILLOUTIS -

- Ouest-Est -

Une seule droite permet d'interpoler les points relatifs aux cailloutis détritiques et à la fraction granulométrique toute entière. Pour h = 5 600 m. la valeur de la variance statistique est atteinte.

- Nord-Sud -

On peut encore tracer une seule droite, pour h = 9 600 m., la valeur de la variance est tout juste atteinte. La pente de la droite, pour cette direction est moins importante que pour la direction Est-Ouest. Les variations spatiales sont donc moins rapides. Ce fait, est à mettre en relation avec la présence à l'est du champ prospecté de la formation gravelo-sableuse du Trezen-Vraz qui est important facteur d'anisotropie. Mais le fait essentiel pour les deux directions considérées est l'existence d'un effet de pépite important, c'est-à-dire d'une valeur de γ (h) pour h faible (environ 200 m.). Cet effet est lié à l'importance des variations locales et à l'imprécision de l'échantillonnage effectué par la drague, imprécision elle-même fonction de la nature des fonds. Il en résulte, qu'il serait illusoire de resserrer à l'extrême la maille du réseau de dragages, les valeurs obtenues pouvant être fortement modifiées pour une translation du réseau de l'ordre d'une centaine de mètres.

GRAVIERS -

- Est-Ouest -

Pour h = 5 600 m. la valeur de la variance statistique est atteinte pour l'échantillon global. Les graviers détritiques sont caractérisés par une répartition spatiale plus régulière qui doit témoigner de l'antériorité de leur mise en place.

- Nord-Sud -

La valeur de la variance statistique est presque atteinte pour h = 4 800 m. Une seule droite permet de rendre compte de l'évolution des variogrammes de la fraction « graviers » et des graviers détritiques. L'anisotropie observée dans la direction Est-Ouest est donc oblitérée dans la direction Nord-Sud. On peut y voir l'effet d'une prépondérance des courants de marée dans cette direction qui transporteraient indifféremment graviers d'origine détritiques et biologiques.

SABLES -

Il ne semble pas exister d'anisotropie. On doit noter encore l'importance de l'effet de pépite qui traduit l'irrégularité de la répartition des accumulations sableuses dans les zones dépourvues d'une couverture continue.

FRACTION BIOLOGIQUE DES CAILLOUTIS ET DES GRAVIERS

La fraction biologique comprend presque exclusivement des débris coquilliers constitués de carbonate de calcium. Mais nous y avons inclus d'autres résidus de l'activité biologique tels les tubes arénacés d'Annélides, par contre, une Nummulite remaniée du calcaire Lutétien est classée dans la fraction « détritique ». Nous estimons que la distinction entre « fraction biologique » et « détritique » est plus significative du point de vue sédimentologique que la teneur en carbonate de calcium qui peut comprendre des carbonates détritiques mélangés à des débris coquilliers.

b) - Etude quantitative des variogrammes -

La courbe du variogramme étant tracée et ces principaux paramètres mis en évidence (p : pente de la droite et C_o : effet de pépite), par l'assimilation à un schéma linéaire, le premier travail consiste alors à calculer la variance statistique théorique des échantillons dans le champ prévisible à partir de ce schéma linéaire. La seconde tâche est de calculer la variance d'extension de l'échantillon central dans son rectangle d'influence. Dans l'interprétation géostatistique Z (s) (teneur de l'échantillon s) est considérée comme une variable aléatoire, de même, on démontre que Z (S) (teneur moyenne de S) est une V.A. définie comme étant l' intégrale stochastique $Z(S) = \frac{1}{S} \int_S Z(s)\, ds$.

L'erreur que l'on commet en attribuant à S la valeur de s est donc elle-même une V.A. et sa variance $E\left[Z(S) - Z(s) \right]^2$ est appelée par définition variance d'extension de s à S. On remarquera que le variogramme $2\gamma(h) = E\left[f(x+h) - f(x) \right]^2$ est la variance d'extension du point x au point x + h. On démontre que toutes les variances d'extension se calculent à partir de la seule connaissance de $\gamma(h)$ et des figures s et S.

Nous ne rentrerons pas dans le détail des calculs qui permettent d'aboutir à ces différents résultats. Ils ont été rendus très commodes par le calcul d'abaque qui supprime pratiquement toute difficulté. Nous en résumons les résultats dans le tableau ci-dessous :

(On a appelé « écart type » la racine carrée de la variance d'extension).

	CAILLOUX	GRAVIERS	SABLES	FRACTION BIOLOGIQUE
Variance Expérimentale	1221 pt^2	458 pt^2	570 pt^2	298 pt^2
Variance Théorique	1268 pt^2	580 pt^2	795 pt^2	280 pt^2
Variance d'extension	298 pt^2	197 pt^2	269 pt^2	76 pt^2
Ecart type	17 %	14 %	16,5 %	9 %

On peut remarquer la bonne concordance des valeurs théoriques et expérimentales pour les cailloux et la fraction biologique des cailloutis et graviers. En ce qui concerne les graviers et les sables : la variance expérimentale assez nettement inférieure à la variance théorique peut signifier que le variogramme devrait avoir un palier qui n'a pu être mis en évidence, le champ prospecté n'étant pas suffisamment étendu.

- 3°) - Interprétation cartographique -

Cette dernière étape de l'étude géostatistique est certainement la plus intéressante mais elle nécessite les études précédentes concernant l'équation du variogramme et le calcul des variances d'extension élémentaires.

Ces données étant obtenues, il s'agit de regrouper les zones élémentaires en fonction des critères sédimentologiques.

a) - Choix des critères -

Comme nous le signalions ci-dessus, nous limiterons les discriminations à quelques faciès sédimentaires bien différenciés. En tout état de cause, il importe de choisir des critères aussi objectifs que possible et susceptibles d'être généralisés.

On peut admettre lorsqu'une classe granulométrique a un pourcentage supérieur à 50, que le faciès sédimentaire est nettement marqué par cette fraction. Ainsi, nous délimiterons les zones où le pourcentage de l'une des fractions dépasse cette valeur pour tous les dragages effectués aux noeuds du réseau. Les autres zones seront considérées comme « hétérogènes ». Si un des échantillons entouré de dragages positifs ($Zo > 50$ %) est négatif ($Zo < 50$ %), il sera considéré comme une lacune dans la zone, aussi, la condition exposée ci-dessus n'est pas absolument nécessaire pour la définition des zones.

Nous définissons ainsi une zone caillouteuse (5 rectangles).

La teneur moyenne de cette zone en cailloutis(Zc) est la moyenne des valeurs des dragages effectués aux noeuds du réseau. Quand plusieurs dragages ont été effectués à un noeud du réseau, on fait intervenir leur moyenne

La teneur moyenne en cailloutis est :

$$Z_c = 77\ \%$$

b) - Calcul de la variance d'estimation de cette valeur moyenne.

La zone concerne cinq rectangles d'influence, la théorie de la géostatistique montre qu'en ce cas on doit diviser la variance d'extension d'un échantillon dans sa zone d'influence par le nombre d'échantillons, il vient :

$$Z_c = Z \pm 2\,D \quad Z_c = 77\ \% \pm 16\ \%.$$

Calculons de même la teneur de Zg en graviers :

$$Z_g = 14\% \pm 12\ \%.$$

Nous ne tiendrons pas compte de la teneur en sable Z_s qui est inférieure à 10 %.

-Zone graveleuse (2 rectangles) -

$$Z_g = 68\ \% \pm 20\ \%$$

$$Z_s = 31\ \% \pm 23\ \%$$

- Zone sableuse (4 rectangles) -

$$Z_s = 65\ \% \pm 17\ \%$$

$$Z_g = 32\ \% \pm 14\ \%$$

Nous considérerons le reste du champ comme étant occupé par deux zones hétérogènes.

- Zone hétérogène (I) - (cinq rectangles) -

$$Z_c = 16\ \% \pm 16\ \%$$

$$Z_g = 46\ \% \pm 12\ \%$$

$$Z_s = 38\ \% \pm 15\ \%$$

-Zone hétérogène (II) - (deux rectangles) -

$$Z_c = 30\ \% \pm 24\ \%$$

$$Z_g = 44\ \% \pm 20\ \%$$

$$Z_s = 26\ \% \pm 23\ \%$$

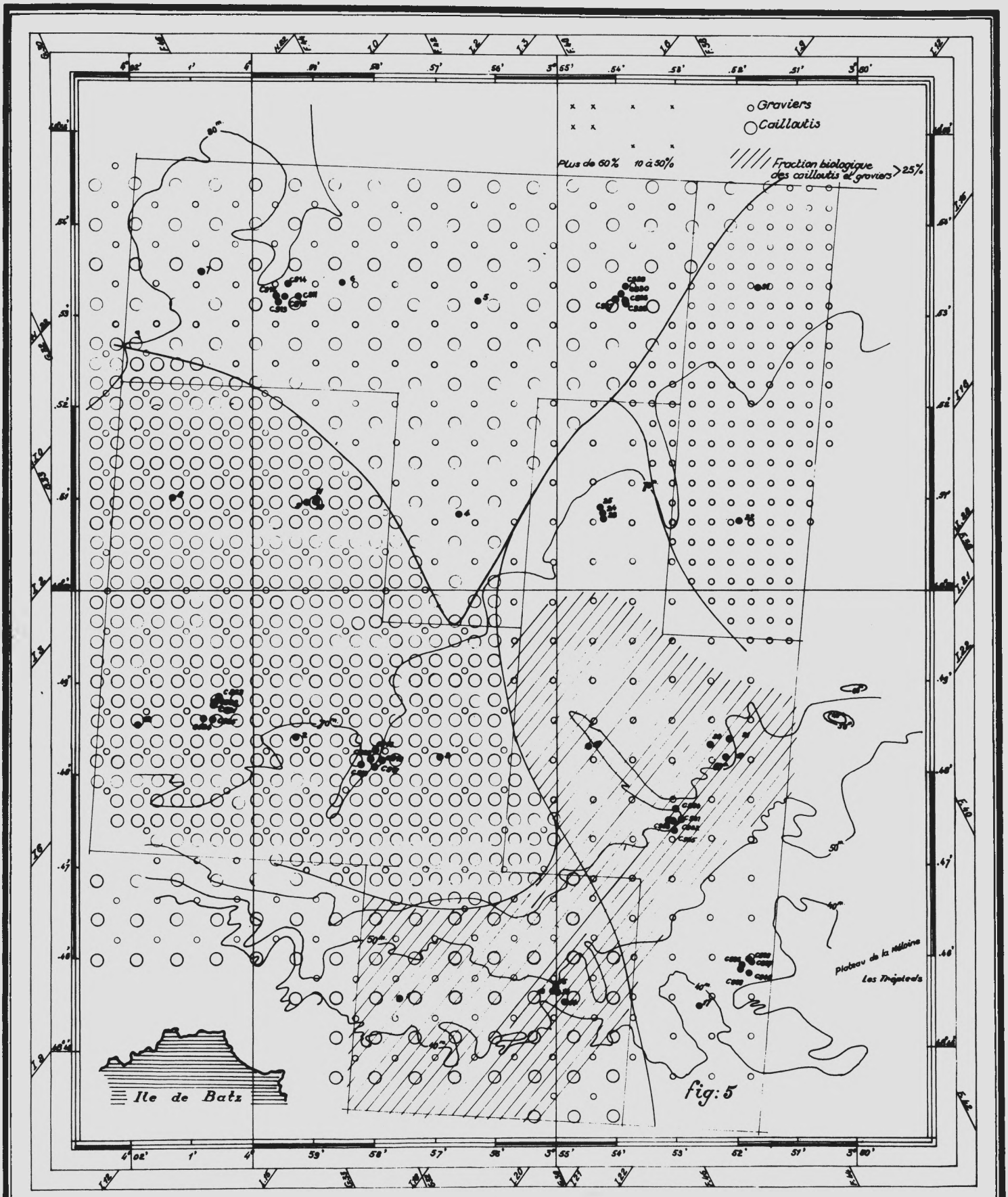

Graviers
Caillautis
Plus de 60%
10 à 30%
Fraction biologique des cailloutis et graviers > 25%
Plateau de la Méloine
Les Trépieds
Ile de Batz

fig: 5

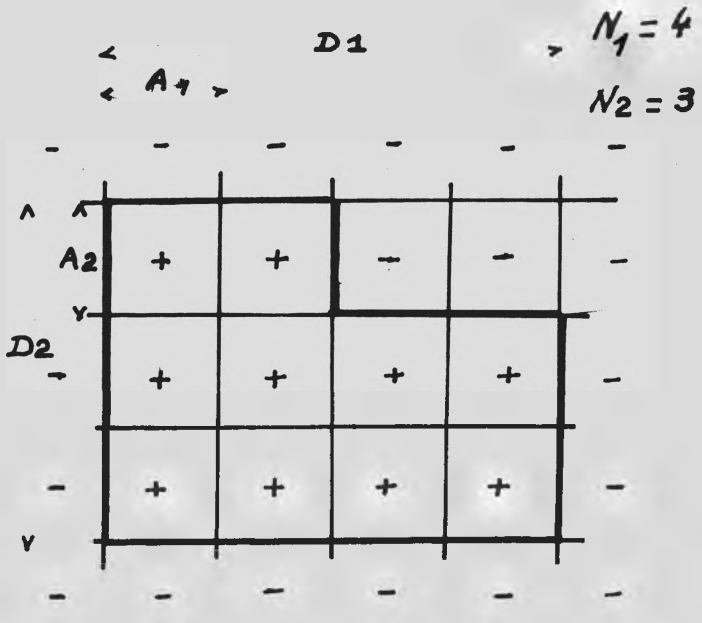
Par ailleurs, la teneur en fraction biologique des cailloutis et graviers est une indication importante. Nous considérerons accessoirement la zone où les teneurs ponctuelles sont supérieures à 25 % de l'échantillon total. Il vient

ZB = 38 % ± 9 %,

c) - Evaluation de la précision de l'estimation des surfaces -

Nous avons donc délimité cinq zones dont les sondages sont caractérisés par la condition ZX 50 % où l'ensemble des conditions Zc, Zg, Zs sont inférieurs à 50 % et nous les avons caractérisés par leurs teneurs respectives Zc, Zg, et Zs ainsi que par les variances d'estimation relatives à ces valeurs. Les théories transitives utilisées en géostatistique permettent aussi d'évaluer la précision avec laquelle on estime la surface de ces zones à l'aide du réseau de reconnaissances.

$$\frac{D^2}{S^2} = \frac{1}{n^2}\left[\frac{1}{6} N_2 + 0{,}061 \quad \frac{(N1)^2}{N_2}\right]$$



n : nombre de rectangles d'influence de la zone

N1 : nombre de mailles de la variation diamétrale D_1.

N2 : nombre de mailles de la variation diamétrale D_2

Les résultats sont les suivants :

- Zone caillouteuse - (5 rectangles) -

S = S* ± 31 %

- Zone graveleuse - (2 rectangles) -

S = S* ± 64 %

- Zone sableuse - (4 rectangles) -

S = S* ± 40 %

- Zone hétérométrique I - (5 rectangles) -

S = S* ± 42 %

- Zone hétérométrique II - (2 rectangles) -

S = S* ± 64 %

- Zone de cailloutis et graviers détritiques et biologiques - (4 rectangles) -

S = S* ± 40 %

Ces cinq zones sont délimitées sur la carte par des tracés rectilignes, que la nature bien entendu ignore, aussi, en tenant compte des grandes lignes directrices de la bathymétrie nous avons régularisé le contour de ces zones. Nous avons en effet montré dans une précédente étude les relations qui existaient entre bathymétrie et nature du fond. Si l'on considère les nouvelles zones définies, les estimations précédentes relatives aux teneurs et aux surfaces sont donc des erreurs maximum, les erreurs réelles étant certainement moins importantes du fait de l'amélioration du tracé.

fig.6 Estimation des surfaces

IV - CONCLUSION -

Ces premiers résultats, obtenus il est vrai dans une zone particulièrement variée, mettent en évidence le caractère relativement irrégulier de la variation spatiale du pourcentage des trois classes granulométriques considérées. Il paraît donc d'autant plus indispensable d'apprécier le degré de précision des résultats obtenus pour éviter des interpolations hâtives et de limiter les discriminations à quelques types sédimentaires bien différenciés.

La technique de dragage paraît susceptible, ces conditions étant remplies, de permettre l'établissement d'une cartographie. Elle présente comme l'avait signalé G. BOILLOT, l'avantage d'éliminer les variations trop localisées et de donner ainsi une représentation simplifiée des fonds sédimentaires, en un mot elle donne une image « régularisée ». Cette simplification commode, pour les besoins de la cartographie ne doit cependant pas être oubliée. On s'exposerait alors à de graves erreurs dans l'interprétation dynamique de la répartition des sédiments. En ce cas, des techniques complémentaires telle que la photographie sous-marine doivent être nécessairement utilisées. D'autre part, les conditions de travail de la drague sur le fond sont fonction de paramètres nombreux : forme et dimensions de l'engin, nature du fond, durée et vitesse du dragage.

C'est sur les fonds « hétérogènes » (mélanges « réels » ou juxtaposition en suivant la distinction faite par G. BOILLOT), que l'erreur de mesure est la plus importante ; deux dragages successifs faits en deux points aussi voisins que possible pourront donner des résultats très différents. Il est donc inutile de resserrer le réseau de dragage dans de telles régions ; par contre, il faudra rechercher et limiter les zones « homogènes » à l'échelle considérée et resserrer le réseau de dragage pour en préciser les contours.

Nous n'aborderons pas dans ce travail le stade de l'interprétation sédimentologique de la carte dressée qui devrait intervenir ici. Cette analyse sera faite dans une étude en cours portant sur la nature et la répartition des fonds sédimentaires; elle se fondera sur un échantillonnage plus important ainsi que sur les photographies sous-marines et des mesures courantométriques. Nous avons seulement voulu montrer à partir d'un exemple simple les possibilités d'application de la géostatistique à la cartographie et aux études sédimentologiques qui nous paraissent susceptibles d'un important développement.

- BIBLIOGRAPHIE -

- G.A. AUFFRET, L. CABIOC'H, L. BERTHOIS & J.L. DOUVILLE - Aperçu sur la bathymétrie et la sédimentologie au large de Roscoff d'après la carte bathymétrique au 1/40 000ème et les photographies sous-marines.

  - *Cahiers de Biologie marine (sous presse)* -

- L. BERTHOIS - Carte bathymétrique au 1/ 40 000ème de l'Ile de Batz aux Trépieds.
  1969 Publiée par la Station Biologique de Roscoff.

- L. BERTHOIS, A. MAREC, G.A. AUFFRET
  Evaluation de l'erreur topographique dans une carte bathymétrique au 1/ 40 000ème aux abords de Roscoff.
  Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine, n°9, p. 137-142

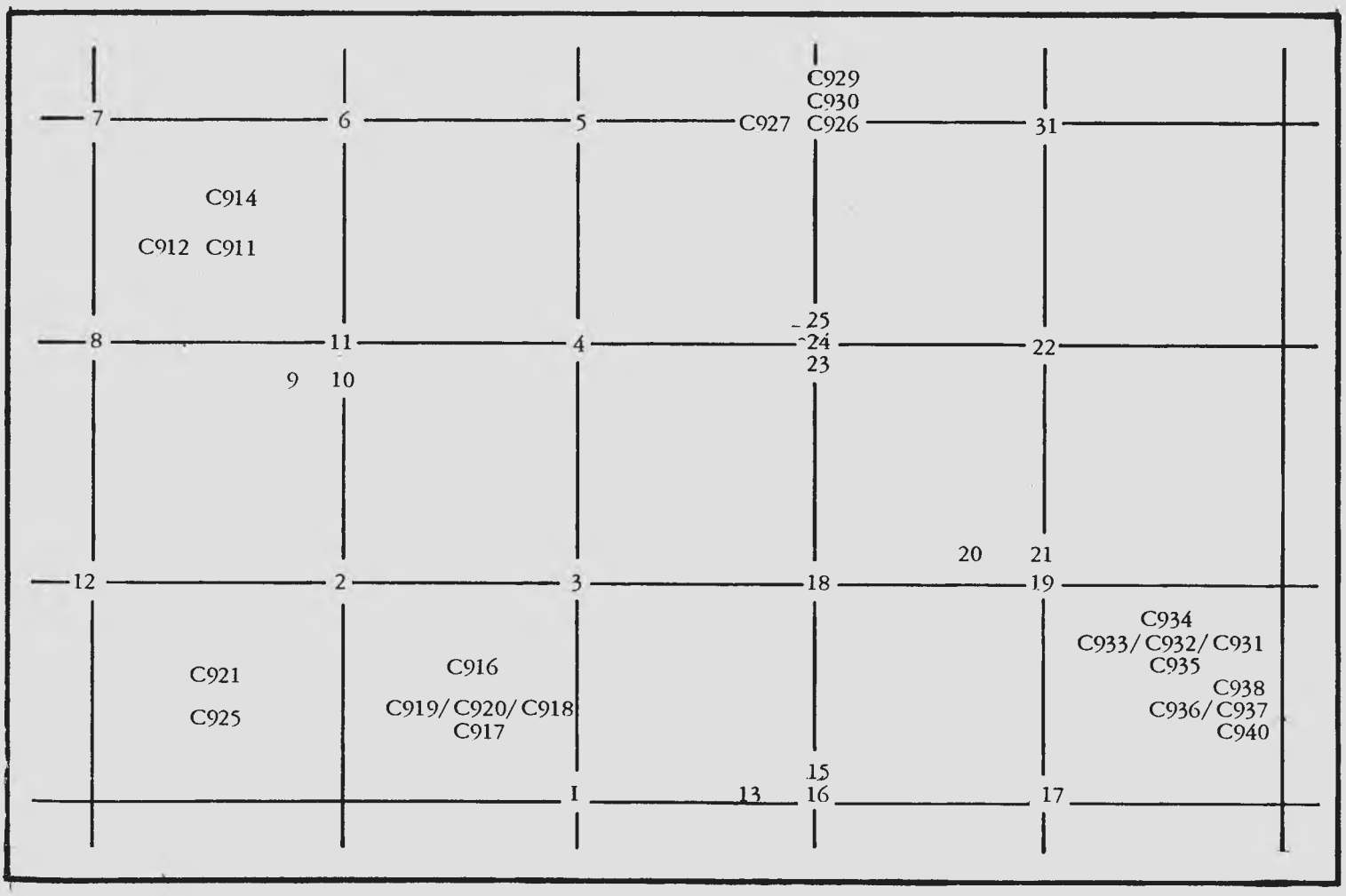
- G. BOILLOT - Géologie de la Manche Occidentale -
1964 Annales de l'Institut Océanographique -
Tome XLII - Fasc. 1, 1964, 220 p.

- J. BOURCART - Essai d'une classification raisonnée des matériaux meubles.
1941 *Bulletin Soc. Géol. Fr. (5), t. XI, pp. 117-153 -*

- G. MATHERON - Les variables régionalisées et leur estimation.
Masson & Cie. - 305 pages.
1965 - *Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique :*
- *Fascicule 2 : Cours de géostatistique.*
- *Fascicule 3 : Le Krigeage universel.*

- J. SERRA - Echantillonnage et estimation locale des phénomènes de transition minier.
1967 *Thèse de Docteur-Ingénieur - Nancy - 1967.*

- PLAN DE L'ECHANTILLONNAGE -



- TABLEAU DES TENEURS -

Nos	Z_c	Z_g	Z_s	Z_b
I	33	47	20	41
2	97	2	1	0
3	100	0	0	0
4	30	41	29	3
5	0	52	48	5
6	29	45	26	9
7	0	52	48	9
8	65	24	11	4
9	16	12	72	10
10	63	30	7	3
11	70	16	14	9
12	73	24	3	3
13	69	28	3	8
14	0	11	89	0
15	3	41	56	41
16	10	51	39	57
17	0	5	95	35
18	5	39	56	35
19	4	48	48	48
20	11	40	49	42
21	7	34	59	33
22	0	77	23	6
23	0	49	51	10
24	0	35	65	10
25	0	49	51	27
31	1	60	39	7
C911	42	40	18	2
C912	33	27	40	7
C914	75	13	12	1
C916	94	5	1	1
C917	94	5	1	0
C918	70	25	5	2
C919	92	5	3	1
C920	85	14	1	1
C921	100	0	0	0
C925	100	0	0	0
C926	0	65	35	55
C927	5	59	36	6
C928	4	62	33	2
C929	75	20	5	1
C930	0	10	90	8
C931	1	65	34	16
C932	0	53	47	6
C933	0	45	55	8
C934	0	16	84	14
C935	0	45	55	12
C936	0	87	63	18
C937	3	59	38	11
C938	4	67	29	26
C940	0	35	65	7