

APPORT D'UNE APPROCHE GÉOSTATISTIQUE DANS L'INTERPRÉTATION DES MESURES DE DIAGRAPHIES DIFFÉRÉES

A. DENIS, F. CREMOUX et D. BREYSSE

Centre de développement
des géosciences appliquées¹

Nous proposons d'étudier et d'interpréter les données diagrapiques issues de macro-dispositifs en tenant compte, pour chaque mesure, du volume investi.

Les macrodispositifs, en raison de leur géométrie, ont un effet intégrateur important sur la mesure diagrapique. Ceci se traduit pour ces dispositifs par une définition ou résolution verticale médiocre. De plus, dans la plupart des cas, le pas d'échantillonnage de la mesure le long du forage est inférieur à la résolution verticale de l'outil : les volumes investis se chevauchent, d'où des données qui ne sont plus additives.

Une approche géostatistique des données diagrapiques nous permet d'étudier l'influence de l'effet intégrateur de l'outil sur la valeur de la mesure et de proposer trois méthodes de régularisation des données. Leur objectif est de rendre les données additives par une transformation des supports de mesure (volumes investis).

Nous montrerons ainsi par une étude sur des signaux réels et synthétiques puis par l'intermédiaire d'une interprétation combinée de plusieurs diagrapies, qu'une simple régularisation des supports de mesure permet d'une part d'obtenir une information plus rigoureuse avec la mesure diagrapique, et d'autre part d'accroître les possibilités des macrodispositifs et tout particulièrement leur résolution verticale.

ENHANCING WELL LOG INTERPRETATION BY USING A GEOSTATISTICAL APPROACH

We propose to study macro logging techniques data by taking into account for each measure the volume affected by the physical process.

The volume of sediment affected by a measure carried out with a logging tool (sonic logs, density logs, etc.) depends on the nature of the surrounding formations and on the setting of the instrument. The various parameters which influence the measurement are: the source-detector spacing, the spacing between detectors, the sampling interval along a well, and the volume of material considered (the measured entity). Depending on the tool, the measured entity can be either cylindrical, spherical or ellipsoidal. Three main groups of measured entities have been identified: jointed entities, overlapping entities and disjointed entities.

(1) Université de Bordeaux I,
Bâtiment de Géologie,
33405 Talence Cedex - France

When the length of the measured entities exceeds the sampling interval, there is an overlapping of the entities (macro logging tools). In that case, each measurement on an entity is partially correlated to the measurement on a neighbour entity, addition of data is unmeaningful and vertical definition is low. Simple statistical treatments, geostatistics or multivariate analysis are then biased, and the bias increase with the ratio between the length of the measured entity and the sampling interval increases. Starting from the assumption that, for a given logging tool, the measured entity remains stable throughout a well, it is possible to make the data additive by transforming the measured entities.

A geostatistical approach allows to study the integrator effect of the tool on logging data and three methods to homogenize logging techniques data are proposed. The interest of these techniques for the homogenization of data is shown in several cases (synthetics and actuals logs data).

The homogenization technique can give more rigorous log data, which can then be treated without bias. These methods also give the opportunity to increase the vertical resolution of logging tools: the improvement really depending of the sampling interval.

APORTACIÓN DE UN ENFOQUE GEOESTADÍSTICO EN LA INTERPRETACIÓN DE MEDICIONES DE DIAGRAFÍAS DIFERIDAS

El propósito del presente trabajo consiste en estudiar e interpretar los datos diagráficos procedentes de macro-dispositivos, teniendo en cuenta, para cada medición, del volumen de que se trata.

Debido a su propia geometría, los macro-dispositivos ejercen un efecto integrador importante sobre la medición diagráfica. Esto se pone de manifiesto, por una definición o resolución vertical mediocre. Además, en la mayor parte de los casos, el paso de muestreado de la medición a lo largo del pozo es inferior a la resolución vertical de la herramienta : los volúmenes de que se trata se superponen, de lo cual se deriva que los datos dejen de ser aditivos.

Un enfoque geoestadístico de los datos diagráficos nos permite estudiar la influencia del efecto integrador de la herramienta sobre el valor de la medición y, por ende, proponer tres métodos de regularización de los datos. Su objetivo consiste en proceder de modo que los datos sean aditivos por medio de una transformación de los soportes de mediciones (volúmenes correspondientes).

Por todo ello, se trata de demostrar, por medio de un estudio de las señales reales y sintéticas y asimismo, por una interpretación combinada de varias diagráfias, que una simple regularización de los soportes de medición permite, en primer lugar, obtener una información con mayor rigor de la medición diagráfica, y, en segundo lugar, incrementar las posibilidades de los macro-dispositivos y, fundamentalmente, su resolución vertical.

INTRODUCTION

Les outils de diagraphies différées (sonique, résistivité, rayon gamma, etc.) sont constitués, pour la plupart, d'un émetteur et d'un ou plusieurs récepteurs ou tout simplement pour certains outils d'un seul capteur. Le volume de terrain investi par le dispositif de mesure varie avec la géométrie de l'outil utilisé et la nature du milieu environnant. D'une manière générale, pour les outils à un émetteur et un ou plusieurs capteurs, le volume est de forme cylindrique (fig. 1a). La valeur du rayon correspond à la profondeur d'investigation de l'outil dans le terrain et la hauteur, à l'espacement entre récepteurs et capteurs ou à l'écartement entre capteurs. Pour les outils à un seul capteur, le volume mesuré est plutôt de forme sphérique (fig. 1b) ou ellipsoïdale selon la nature lithologique du milieu environnant. Chaque mesure, quel que soit le dispositif de mesure, se trouve ainsi liée à un volume (support de la mesure).

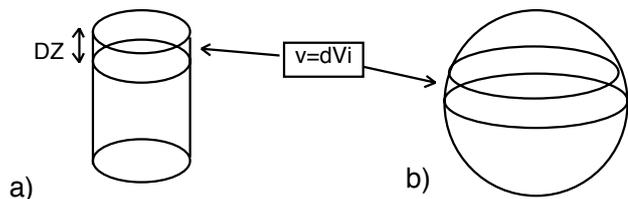


Figure 1
 Définition des volumes d'investigation supports de la mesure :
 a) support cylindrique ; b) support sphérique.
 Definition of measured entities: a) cylindrical entities ;
 b) spherical entities.

La notion de volume de terrain affecté à la mesure ou de support de la mesure est primordiale [1] et [2]. En effet, lors d'une interprétation combinée d'un ensemble de données diagraphiques pour, par exemple, la détermination de la minéralogie de la formation, des reports graphiques du type porosité — sonique ou encore densité — sonique sont utilisés [3] et [4]. Comme les mesures proviennent d'outils à géométries différentes, les volumes d'investigation peuvent être fortement différents. On compare ainsi des mesures effectuées sur des volumes (intégrés par le processus physique) différents : le report graphique ne peut qu'en être faussé. Il en va de même si les traitements portent sur une analyse statistique multivariable ou un découpage en électrofaciès et électrobanes. En

plus de la variation géométrique du support de la mesure, d'un dispositif à l'autre ou en fonction de la nature du milieu environnant, il convient également de distinguer trois grands groupes dans la répartition des supports de la mesure (fig. 2) à l'intérieur d'un forage, qui sont : les supports empilés (fig. 2a), les supports chevauchants (fig. 2b) et les supports disjoints (fig. 2c).

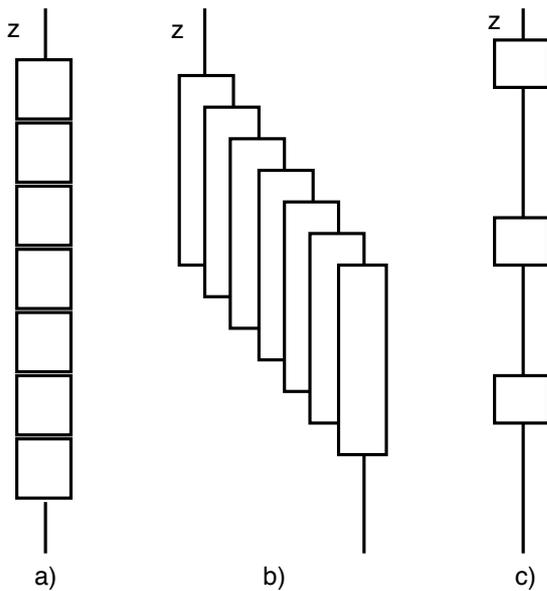


Figure 2

Structures des supports de la mesure : a) supports empilés ; b) supports chevauchants ; c) supports disjoints.

Structures of measured entities: a) piled entities; b) overlapping entities; c) disjointed entities.

Les mesures des diagraphies différées, à l'exception des mesures de diamètre de puits, présentent généralement une structure de type chevauchante. Elle apparaît dès lors que la dimension verticale du support de la mesure est supérieure au pas d'échantillonnage (ΔZ) de la mesure le long du forage, ce qui est presque toujours le cas pour des macrodispositifs. Dans ces conditions, une mesure effectuée à un niveau donné est directement liée aux mesures des niveaux voisins. La dépendance qui existe entre les mesures persiste tant que les volumes de terrain investis par chaque mesure successive ne sont pas disjoints. Ceci implique que les variables ne sont plus additives localement. Les traitements statistiques et géostatistiques sur ces variables comportent alors un biais d'autant plus important que le rapport entre le support

de la mesure et le pas d'échantillonnage est grand. En partant de l'hypothèse que le support de la mesure, pour un outil donné, est constant le long d'un forage, on montre que la non-additivité locale des variables de diagraphies différées résulte uniquement de la structure chevauchante [5].

Un autre paramètre qui est fonction du support de la mesure est la résolution ou définition verticale. Ce paramètre est particulièrement important dans l'interprétation des données diagraphiques issues des macrodispositifs car il constitue un des points faibles de ces dispositifs par rapport aux microdispositifs. Rappelons que la définition verticale correspond à l'épaisseur minimale de la formation qui peut être distinguée par un outil. Elle est ainsi égale à la dimension du support de mesure dans la direction du forage. Lorsqu'on est en présence d'entités lithologiques dont les épaisseurs sont supérieures à la définition verticale, les réponses diagraphiques sont propres à chaque entité. Par contre, si l'on est en présence de couches minces, d'épaisseur inférieure à la définition verticale, la réponse diagraphique ne permet pas de les caractériser ni de les délimiter : leur influence potentielle sur la mesure est noyée par l'effet intégrateur de l'outil. Le dispositif de mesure interviendra également sur la définition des limites de couche. Le passage d'une couche à l'autre s'opère de manière progressive sous la forme d'une rampe dont l'étalement le long du forage dépend directement de la définition verticale du dispositif. La caractérisation physique d'entités lithologiques dépendra donc de leur épaisseur et de la définition verticale du dispositif de mesure. Ainsi le pas d'échantillonnage le long du forage n'intervient pas dans la définition verticale du dispositif de mesure et son augmentation permet tout au plus de laisser présager la présence de bancs minces par l'apparition de petites marches d'escalier au niveau des rampes [3] et [6].

En définitive, les mesures diagraphiques issues de macrodispositifs sont non additives et présentent des volumes d'investigation et des définitions verticales entièrement dépendantes du dispositif de mesure.

Si l'on veut obtenir une information plus riche et rigoureuse à partir des macrodispositifs, il faut rendre les mesures, provenant de ces dispositifs, additives (pour des traitements statistiques sans biais), comparables au niveau des supports de mesure (pour rendre rigoureux les reports graphiques ou tous traitements qui combinent plusieurs types de dispositifs de mesure) et

augmenter la résolution verticale des dispositifs en la rendant indépendante du dispositif de mesure. L'objectif est donc triple. Une approche géostatistique des données diagraphiques permet d'atteindre cet objectif.

1 APPROCHE GÉOSTATISTIQUE DES MESURES DE DIAGRAPHIES DIFFÉRÉES

1.1 Les outils et concepts de la géostatistique

La géostatistique est le cadre d'étude des variables régionalisées dont la théorie est due à G. Matheron [1, 2, 7]. Les variables régionalisées permettent de qualifier un phénomène se déployant dans l'espace et y présentant une certaine structure. Elles sont caractérisées, d'un point de vue mathématique, par une fonction $z(x)$ donnant la valeur d'une variable z mesurée et caractéristique du phénomène étudié en un point x d'un domaine à 1, 2 ou 3 dimensions. L'utilisation de la théorie probabiliste des fonctions aléatoires permet d'en formaliser le concept. Une variable régionalisée devient alors la réalisation unique d'une fonction aléatoire $Z(x)$. L'inférence statistique de la fonction aléatoire $Z(x)$ est rendue possible avec l'introduction d'hypothèses de stationnarité d'ordre 2 (on impose seulement que les deux premiers moments de la loi de probabilité soient invariants dans le domaine de variation de la fonction aléatoire). En pratique, on se contente d'une hypothèse plus faible, appelée hypothèse intrinsèque [8] et [9], qui exige que seuls les accroissements de la fonction aléatoire soient stationnaires d'ordre 2. Sous cette hypothèse, la fonction aléatoire se caractérise par une fonction $\gamma(h)$ appelée le demi-variogramme où pour tout vecteur h on écrit :

$$2 \cdot \gamma(h) = \text{Var} [Z(x+h) - Z(x)]$$

Le variogramme constitue l'outil de base de la géostatistique : il permet d'obtenir une mesure de la différence entre les données espacées d'une distance h et d'évaluer la zone d'influence d'une mesure expérimentale.

Toute variable régionalisée est associée à un support géométrique [5] et [10] qui représente le volume sur lequel la valeur de la variable régionalisée est mesurée ou calculée. À chacune des positions du support géométrique à l'intérieur du champ géométrique (c'est-à-dire le domaine où la variable régionalisée est

susceptible d'être mesurée) correspond une valeur bien définie de la variable régionalisée. Si l'on change l'orientation, la forme ou les dimensions du support géométrique on obtient une nouvelle variable régionalisée dont la répartition dans l'espace est différente de la première. Pour certains développements théoriques propres à la géostatistique, on réduit le support géométrique à un point. On parle alors de variable régionalisée à support ponctuel. Le passage d'un support géométrique v à un autre V plus grand est, en géostatistique, une opération de régularisation dont l'expression générale peut s'écrire par exemple :

$$\text{Mes}_V(Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Mes}_v(Z - z) \cdot p(z) \cdot dz$$

avec $p(z) = 1/V$ si $z \in V$ et $p(z) = 0$ si $z \notin V$.

La fonction $\text{Mes}_V(Z)$ représente pour des supports géométriques empilés ou disjoints la régularisée de la fonction $\text{Mes}_v(z)$ sur le volume V . Elle est obtenue par le produit de convolution d'une fonction régularisée sur un support plus petit (v), ou un support ponctuel, avec une fonction de pondération p proportionnelle à l'indicatrice géométrique du volume V . La fonction de pondération p peut bien sûr prendre différentes expressions, mais son domaine d'existence est, dans tous les cas, limité à la dimension du volume sur lequel on opère la régularisation.

Pour que le calcul d'un variogramme ou d'une régularisation ait un sens il faut que la variable régionalisée réponde à certaines règles comme la règle d'additivité [5] et [8] : une variable régionalisée est dite additive si toute combinaison linéaire de ses valeurs garde la même signification ou le même sens physique. Par exemple, la mesure d'une masse volumique sur deux échantillons de même volume (support constant) est une variable additive car la moyenne arithmétique de ces deux valeurs est bien la masse volumique moyenne des deux échantillons. Par contre, si la mesure de la masse volumique est obtenue sur deux échantillons de volumes différents, la variable n'est plus additive car la moyenne arithmétique des deux mesures ne représente pas la masse volumique moyenne des deux échantillons. Il en est de même lorsque les supports de mesure se chevauchent car dans ce cas, même si les volumes de mesure sont identiques, le volume total à prendre en compte dans le calcul de la masse volumique moyenne n'est pas la somme des volumes des échantillons mais cette somme moins le volume commun aux deux échantillons. Ainsi une variable

régionalisée non additive pourra être due, soit à des supports géométriques variables sur le champ géométrique, soit à des supports géométriques chevauchants, soit à la nature propre de la variable. Une autre règle à laquelle doit se conformer une variable régionalisée est la relation d'additivité des variances [5] qui s'écrit :

$$\text{Var}[v/V] = \text{Var}[P/V] - \text{Var}[P/v]$$

où P représente un ensemble de supports ponctuels, v un support géométrique tel que $\cup P = v$ et V un support géométrique tel que $\cup v = V$ (réunion des n volumes empilés v). Cette relation exprime que la variance d'une variable à support régularisée sur un support v présente une variance sur le domaine V ($\text{Var}[v/V]$) plus faible que sa variance initiale ($\text{Var}[P/V]$). Une régularisation d'un support ponctuel P à un support v entraîne une chute de variance égale à $\text{Var}[P/v]$.

1.2 Application aux données de diagraphies différées

Lorsque l'on tient compte du volume investi par le dispositif de mesure, la mesure que l'on obtient est une fonction complexe que l'on peut écrire sous la forme :

Mesure(z) = OPE [NM(z), V(R(NM(z), dispositif), dispositif)]
 où OPE est un opérateur d'intégration relatif à l'outil, NM(z) une fonction qui représente la nature du milieu environnant (variable le long d'un forage d'axe z) et V le volume d'intégration lui-même fonction du rayon, ou profondeur d'investigation, et de la géométrie du dispositif. Le rayon d'investigation est lui-même fonction de la nature du milieu environnant et de la géométrie du dispositif. Le volume d'investigation (support géométrique) s'écrit pour un dispositif donné :

$$V = \int_{-\Delta Rc/2}^{\Delta Rc/2} \pi \cdot R(z) \cdot dz$$

Dans les cas les plus simples où la fonction R(z) est uniquement dépendante de la géométrie du dispositif nous aurons :

- pour un dispositif à deux récepteurs espacés de ΔRc et R le rayon d'investigation de l'outil de mesure: $R(z) = \text{Const} = R$, le volume V est alors un cylindre de hauteur ΔRc et de rayon R ;
- pour un dispositif à un seul capteur de rayon d'investigation R avec $\Delta Rc/2 = R$: $R(z) = ((\Delta Rc/2)^2 - z^2)$, le volume est alors une sphère de rayon R.

Pour illustrer l'application des concepts géostatistiques aux données diagraphiques nous allons prendre

comme exemple l'enregistrement de mesures de lentueur d'onde de compression dans une formation calcaire. Cet enregistrement (fig. 3a) présente les caractéristiques suivantes :

- distance entre les récepteurs : 0,60 m (ΔRc) ;
- pas d'échantillonnage le long du forage : 0,15 m (ΔZ) ;
- longueur de l'enregistrement : 50 m (L) ;
- mesures exprimées en lentueur : $\mu\text{s/ft}$;
- milieu calcaire relativement homogène (Bathonien moyen à supérieur).

Support géométrique : nous nous trouvons dans le cas où la distance entre les récepteurs est supérieure au pas d'échantillonnage : la répartition des supports est donc de type chevauchant. Les dimensions du support géométrique sont d'environ 0,60 m (ΔRc) selon l'axe du forage et de la valeur du rayon d'investigation du dispositif de mesure selon les axes perpendiculaires à l'axe du forage. La forme du support géométrique est, dans l'hypothèse où la profondeur d'investigation est constante le long du forage quelle que soit la nature lithologique du milieu, cylindrique (fig. 1a). Le support géométrique de la mesure sera symbolisé par V.

Champ géométrique : il est représenté par un volume dont la dimension le long du forage est de 50 m (L) et par le rayon d'investigation du dispositif de mesure pour les dimensions perpendiculaires à l'axe du forage. Par la suite nous symboliserons le champ géométrique par F. Lorsque les supports de mesure ont une structure de type empilé joint $F = \sum V$ ($\cap V = \emptyset$). Dans notre cas, les supports de mesure sont chevauchants nous avons donc : $F = \sum V - \cap V$.

Structure spatiale de la variable DT : les mesures expérimentales nous permettent de construire un variogramme expérimental brut (fig. 4). Son interprétation nous conduit à formuler une hypothèse de quasi-stationnarité limitée à des voisinages restreints autour des données expérimentales. En effet, une hypothèse de stationnarité sur l'ensemble du signal tel qu'il se présente entre les profondeurs 500 et 550 m n'est pas justifiée. Par contre, comme la stationnarité est relative à l'échelle d'observation, il est possible de définir les limites d'un voisinage autour des données expérimentales et ainsi de postuler une hypothèse de quasi-stationnarité locale [5] et [7].

Une fois cette hypothèse considérée, tous les développements géostatistiques se feront sur ce voisinage de quasi-stationnarité.

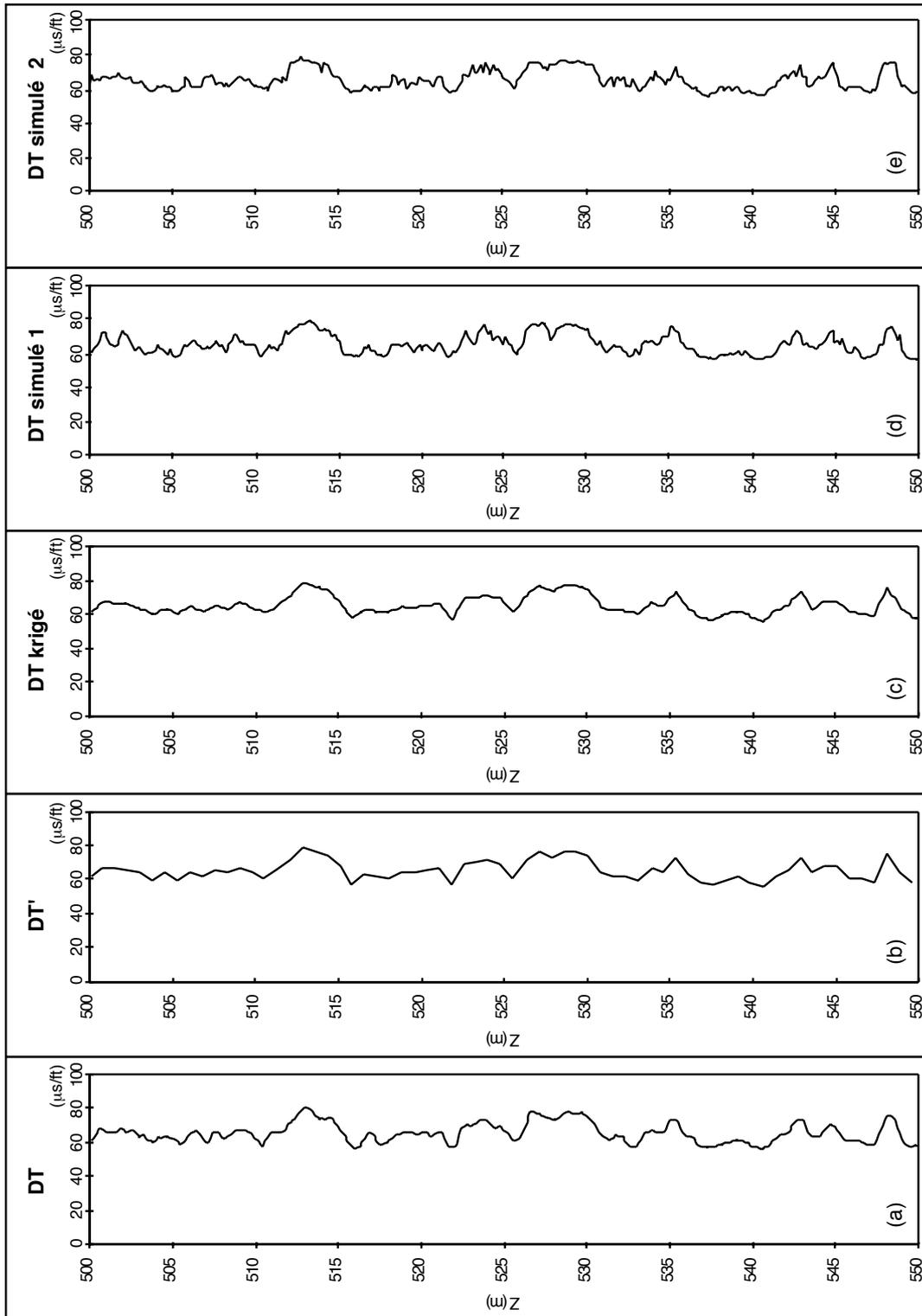


Figure 3

Exemples de diagraphie DT :

a) données initiales au pas de 0,15 m ; b) données au pas de 0,6 m ; c) données krigées au pas de 0,15 m ; d) données simulées au pas de 0,15 m ; e) autre exemple de données simulées.

Presentation of sonic log:

a) raw data $\Delta Z = 0.15$ m ; b) raw data $\Delta Z = 0.60$ m ; c) kriged data $\Delta Z = 0.15$ m ; d) simulated data $\Delta Z = 0.15$ m ; e) other simulated data.

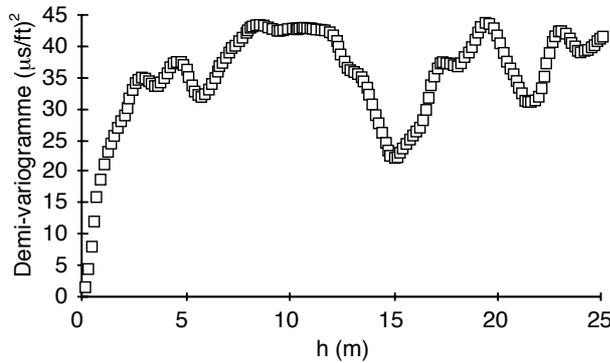


Figure 4
Variogramme expérimental brut de la variable DT.
Experimental raw semi-variogram of DT variable.

La variable régionalisée DT telle qu'elle est définie ne répond pas aux concepts géostatistiques :

- non-additivité locale en raison de la structure de son support de mesure (chevauchant) ;
- additivité des variances non respectée.

En effet, si l'on considère la variable régionalisée DT comme régionalisée sur le support V, nous devons avoir la relation :

$$\text{Var}[V/F] = \text{Var}[P/F] - \text{Var}[P/V]$$

Cette égalité ne sera jamais respectée car nous avons $F \neq \Sigma V$. Nous sommes donc dans la configuration où la variable régionalisée DT est mal régionalisée sur le support V.

En définitive, la variable DT n'est pas additive et mal régionalisée sur son support de mesure. Si l'on veut utiliser correctement la variable DT, il faut trouver un support de mesure v de type empilé joint (pour respecter la condition d'additivité) tel que :

$$\text{Var}[v/F] = \text{Var}[P/F] - \text{Var}[P/v] \text{ avec } \cup v = F \text{ et } \cap v = \emptyset$$

Ceci revient à régionaliser la variable DT sur un support dont la réunion le long du forage reconstruit le champ géométrique. Une solution est de prendre un support géométrique v tel que sa dimension suivant l'axe du forage soit égale au pas d'échantillonnage ΔZ et ses dimensions suivant les axes perpendiculaires à l'axe du forage soient égales à la profondeur d'investigation du dispositif de mesure. Nous aurons ainsi :

$$V = \sum_{i=1}^k V_i \quad \text{avec } k = V/v = \Delta R_c / \Delta Z$$

$$F = \sum_{i=1}^n V_i \quad \text{avec } n = F/v = L \Delta Z$$

Pour rechercher à partir d'une variable DT mal régionalisée sur un support V une nouvelle variable régionalisée sur un support plus petit v, deux techniques peuvent être envisagées :

- régularisation par krigeage et simulation conditionnelle ;
- méthode géométrique en espace réel ou régularisation par changement de support.

Ces deux techniques de régularisation des données diagraphiques nous permettront d'obtenir une variable régionalisée régularisée sur un support plus petit et d'augmenter ainsi la définition verticale du dispositif de mesure par un facteur α tel que :

$$\alpha = V/v = \Delta R_c / \Delta Z$$

La définition verticale du dispositif devient ainsi, pour un même dispositif (ΔRc constant), dépendante du pas d'échantillonnage de la mesure le long du forage. Pour un macrodispositif, le gain sur la définition verticale peut ainsi être fixé librement puisqu'il n'est plus fonction du dispositif lui-même mais uniquement du pas d'échantillonnage ΔZ.

Avant d'aborder la description des deux techniques pour une meilleure régularisation de la variable DT, on peut remarquer que l'on peut obtenir très simplement une variable régionalisée DT' correctement régionalisée sur son support si l'on ne prend en considération que les mesures telles que les supports géométriques V soient disjoints. Ceci revient à ne considérer sur l'enregistrement DT qu'une valeur sur k. On obtient ainsi (fig. 3b) une nouvelle variable régionalisée DT' qui est additive (support V de type empilé) et qui respecte la relation d'additivité ($\cup V = F$ et $\cap V = \emptyset$). Cette méthode permet d'obtenir rapidement une variable régionalisée correctement régularisée mais avec une importante perte d'information. La perte d'information est d'autant plus importante que le support de mesure est grand par rapport au pas d'échantillonnage, et nous n'obtenons aucun gain sur la définition verticale du dispositif de mesure qui reste dépendant de la géométrie du dispositif. La variable régionalisée DT' présente un variogramme (fig. 5) d'aspect général très peu différent de celui de la variable DT. Il est intéressant de voir le comportement à l'origine des variogrammes des variables DT et DT' (fig. 6) : pour la variable DT, le variogramme présente à l'origine un comportement de type dérivable en moyenne quadratique (ou à effet de pépité négatif) caractéristique de données fortement dépendantes entre elles. Cette dépendance est uniquement

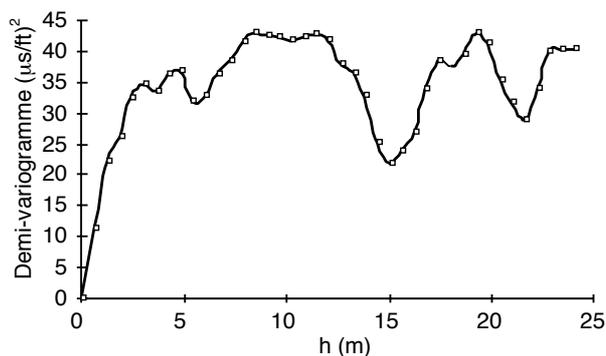


Figure 5
Variogramme expérimental brut de la variable DT'.
Experimental raw semi-variogram of DT' variable.

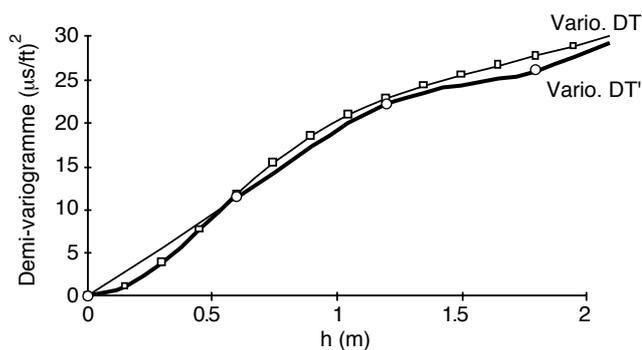


Figure 6
Comportement à l'origine des variogrammes des signaux DT et DT'.
Behaviour near the origin of semi-variogram of DT and DT' variables.

due à l'effet intégrateur de l'outil de mesure : elle n'est donc qu'artificielle. Fort logiquement, le comportement à l'origine du variogramme de la variable DT' devient linéaire : l'effet de dépendance artificielle est annulé.

La principale conclusion que l'on peut tirer de ces observations est qu'un pas d'échantillonnage de la mesure inférieur à la définition verticale de l'outil n'apporte, pour les macrodispositifs, aucune information supplémentaire sur la structure spatiale des données et par conséquent aucune information supplémentaire sur les caractéristiques physiques ou lithologiques du milieu. Au contraire, on amène au niveau des données enregistrées une structure spatiale artificielle qui pollue les mesures en les rendant fortement dépendantes entre elles.

De la façon dont sont utilisées actuellement les données diagraphiques des macrodispositifs un pas d'échantillonnage le long du forage égal à la définition verticale du dispositif apporte une information plus rigoureuse sur le milieu environnant que des mesures enregistrées avec un pas d'échantillonnage plus petit le long du forage.

On arrive ainsi au paradoxe où plus on fait de mesures (pas d'échantillonnage petit) plus il y a de mesures qui sont biaisées par l'effet intégrateur de l'outil.

La variable régionalisée DT' et son variogramme associé vont nous permettre d'estimer le variogramme théorique de la variable DT régularisée sur un support plus petit. Le variogramme de la variable DT' (fig. 5

et 6) peut être approché par un variogramme théorique de type sphérique aux caractéristiques suivantes :

$$\gamma(h) = c \cdot \text{Sph}\left(\frac{h}{a}\right) = c \begin{cases} 1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \frac{h^3}{a^3} & \text{pour } h \leq a \\ = c & \text{pour } h \geq a \end{cases}$$

Nous obtenons pour le couple c et a respectivement appelés le seuil et la portée du variogramme, pour un support géométrique V (fig. 7), les valeurs suivantes : $c_V = 35 (\mu\text{s}/\text{ft})^2$; $a_V = 3,00 \text{ m}$.

À partir de ce variogramme, nous pouvons estimer le variogramme sphérique théorique (a_0 , c_0) pour un support ponctuel par l'utilisation des deux relations [11] suivantes (l_v représente la longueur du support dans la direction du forage : l_v = 0,60 m) :

$$a_0 = a_V - l_V$$

$$c_0 = \frac{c_0}{20} \left(20 - 10 \frac{l_V}{a_V} + \frac{l_V^3}{a_V^3} \right)$$

Nous obtenons pour le variogramme théorique sphérique ponctuel l'estimation suivante : $a_0 = 2,40 \text{ m}$; $c_0 = 41 (\mu\text{s}/\text{ft})^2$.

Une fois le variogramme théorique ponctuel estimé il est possible, avec les mêmes relations, d'obtenir une estimation d'un variogramme théorique pour n'importe quel support géométrique. Dans le cas d'un support géométrique v (l_v = 0,15 m) nous avons l'estimation suivante (fig. 7) : $a_v = 2,55 \text{ m}$; $c_v = 39,7 (\mu\text{s}/\text{ft})^2$.

La variable DT sera donc correctement régularisée sur le support v si son variogramme expérimental tend vers un variogramme théorique sphérique où $a = 2,55 \text{ m}$

et $c = 39,7 (\mu\text{s}/\text{ft})^2$ à effet de pépite positif ou nul indiquant ainsi une élimination de l'influence de l'effet intégrateur de l'outil et une zone d'influence de chaque point de mesure de 2,55 m.

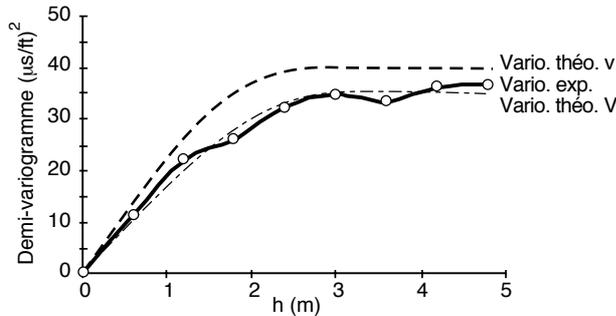


Figure 7

Estimation des variogrammes théoriques sur V et v à partir du variogramme expérimental brut de la variable DT'.

Estimation of model fitted with V and v from experimental raw semi-variogram of DT variable.

2 RÉGULARISATION DES MESURES

2.1 Régularisation par krigeage et simulation conditionnelle

2.1.1 Krigeage des données diagaphiques

À partir de données correctement régularisées sur un support géométrique V (fig. 3b), nous pouvons obtenir, par krigeage, une estimation de données régularisées sur un support plus petit v. L'hypothèse que nous devons formuler aux points expérimentaux est que :

$$DT'_v(Z_i) \approx DT'_V(Z_i)$$

C'est-à-dire que la mesure réalisée sur un support géométrique V est une bonne estimation de la mesure qui aurait pu être réalisée sur un support plus petit v, en ce point Z_i .

À partir de cette hypothèse, l'information disponible est double : une information expérimentale ($DT'_V(Z_i)$) d'une part, une information sur la structure spatiale des données, représentée sous la forme d'un variogramme théorique sphérique ($a = 2,55 \text{ m}$; $c = 39,7 (\mu\text{s}/\text{ft})^2$) relatif au support v, d'autre part.

L'estimation par krigeage ordinaire est obtenue par la résolution d'un système dit « système de krigeage » dont les principaux ouvrages de géostatistique [5, 8, 12] donnent la formulation. Rappelons que le krigeage est

un estimateur linéaire sans biais, un interpolateur exact et, sous l'hypothèse que l'information structurale soit bien maîtrisée, un estimateur optimal.

La figure 3c présente le signal krigeé (DT Krigeé). On obtient un signal lissé car un estimateur, aussi optimal soit-il, ne peut restituer des détails qui ne sont pas dans l'information expérimentale disponible. Le variogramme associé (fig. 8) confirme que l'estimation par krigeage apporte peu d'informations supplémentaires. De plus, par un comportement à l'origine de type dérivable en moyenne quadratique, il se rapproche du variogramme expérimental de la variable DT. Le krigeage ne résout pas notre problème de régularisation mais confirme que le signal de la variable DT est peu différent d'un signal krigeé d'une variable DT' dont les points de mesure sont beaucoup plus espacés.

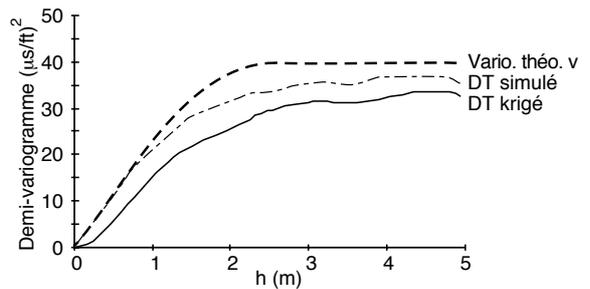


Figure 8

Variogrammes expérimentaux pour les variables DT krigeé et DT simulé.

Experimental semi-variograms of DT krigeé and DT simulated.

2.1.2 Simulation conditionnelle des données diagaphiques

Dans la vision géostatistique des données, le phénomène mesuré est considéré comme la réalisation particulière d'une fonction aléatoire. Cette hypothèse nous permet, dans un cadre probabiliste, d'utiliser tous les outils classiques de la théorie des probabilités. Ainsi, on peut calculer d'autres réalisations de la fonction aléatoire qui, par construction, garderont la même variabilité spatiale que le phénomène simulé. On parle alors de simulation ou de simulation conditionnelle si l'on impose à la réalisation de conserver la même valeur aux points expérimentaux. De nombreuses méthodes de simulation ont été développées dont les plus classiques sont la méthode des bandes tournantes

[8] et [13], les méthodes spectrales ou encore la méthode séquentielle [8].

C'est cette dernière méthode que nous avons utilisée sur nos données. Elle est restreinte à l'utilisation de champs gaussiens. Préalablement, nos données feront l'objet d'une anamorphose. L'idée de base de la méthode séquentielle est de générer des données les unes après les autres (de manière séquentielle) : chaque point est généré à partir de la loi de densité de probabilité conditionnelle obtenue avec les points déjà générés. La densité de probabilité conditionnelle est obtenue sans grande difficulté à partir du moment où le champ de données est de distribution gaussienne. En effet, dans ce cas la densité de probabilité conditionnelle est elle-même gaussienne et ses deux premiers moments peuvent être obtenus en résolvant les équations de krigeage.

La figure 3d présente l'exemple d'une simulation conditionnelle obtenue à partir du signal DT'. L'aspect du signal simulé (DT simulé 1) apparaît plus agité. Le variogramme associé (fig. 8) montre en effet un seuil plus élevé que celui de la variable DT krigé, sans pourtant atteindre la valeur du seuil du variogramme théorique sphérique de support v . Toutefois, le variogramme de la variable DT simulée présente un comportement à l'origine conforme à notre attente : absence de comportement à l'origine de type dérivable en moyenne quadratique ou à effet de pépité négatif.

Une autre simulation est présentée à la figure 3e. Ce signal ne présente pas globalement de différences importantes avec d'autres simulations comme le signal DT simulé 1 de la figure 3d. Toutefois, on observe localement des variations dont l'amplitude nous informe sur la dispersion de la variable DT à cette échelle de mesure.

Une simulation conditionnelle à partir d'une variable régularisée sur un support V permet donc d'obtenir un signal dont les données sont correctement régularisées entre les mesures expérimentales sur un support plus petit v . Le comportement général n'est pas, quant à lui, entièrement satisfaisant : la variance du signal est bien inférieure à celle attendue. Nous pouvons expliquer cela par une sorte de bridage de l'agitation du signal par les points fixes que représentent les points expérimentaux dans une simulation conditionnelle. Notre hypothèse de départ, bien que satisfaisante pour des distances inférieures à la portée, ne l'est plus pour des distances supérieures. Il nous faut donc rechercher une méthode de régularisation des données qui n'oblige pas

de garder certains points de passages obligatoires pour le signal simulé.

2.2 Régularisation par changement de support

Dans les domaines de l'imagerie médicale et biologique se sont développées des méthodes dites géométriques à espace transformé ou réel. Elles présentent l'avantage d'être extrêmement rapides dans le traitement de la mesure. Dans le but de modifier le support de la mesure, deux de ces méthodes vont être adaptées et successivement utilisées. Tout d'abord la méthode de rétroprojection non itérative BPT (*Black Projection Technique*) [14, 15, 16], puis la méthode de reconstruction simultanée itérative SIRT (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*) [17, 18, 19]. Dans l'approche géostatistique des données diagraphiques pour leur régularisation, aucune hypothèse sur l'opérateur sonde OPE (opérateur d'intégration relatif à l'outil, cf. § 1.2) n'a été formulée. Dans cette nouvelle approche, nous devons savoir comment la sonde filtre les propriétés du milieu ; divers opérateurs peuvent être envisagés, par exemple :

– un opérateur moyenne arithmétique :
$$Z = \frac{\int_V z \cdot dv}{\int_V dv}$$

– un opérateur moyenne harmonique :
$$\frac{1}{Z} = \frac{\int_V 1/z \cdot dv}{\int_V dv}$$

– un opérateur minimum : $Z = \text{Min}_V(z)$

avec

Z : mesure sur le support V (sonde)

z : valeur inconnue sur le support v .

Une connaissance préalable de « l'effet sonde » sur les mesures sera donc nécessaire pour obtenir une régularisation des données diagraphiques de bonne qualité.

2.2.1 Principe de la régularisation

Le support de la mesure V relatif à la mesure en un point j de l'axe Z des profondeurs est décomposé en volumes élémentaires dV_i dont la hauteur est égale au pas d'échantillonnage ΔZ (fig. 1). Nous avons ainsi

NB volumes élémentaires dV_i : $NB = d/\Delta Z$ où d peut être, soit le diamètre de la sphère pour des outils à un seul capteur, soit l'espacement ou l'écartement pour des outils à plusieurs capteurs ($d = \Delta Rc$).

Les indices i et j utilisés, par la suite, ont comme signification respective :

i : indice des volumes élémentaires variant de 1 à NB selon la direction Z ;

j : indice de position de la mesure selon la direction Z .

Nous calculons tout d'abord pour chaque position j , la valeur relative de la mesure (Mr_{ij}) à chaque volume élémentaire dV_i :

$$Mr_{ij} = MT_j \cdot dV_i \quad (2)$$

où MT_j représente la valeur de la mesure effective au point j et dont le support est V .

Chaque volume élémentaire va se voir affecter NB valeurs Mm_{ij} différentes, ce qui permet de calculer une valeur propre à chaque niveau j par l'expression :

$$Mm_j = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{NB} Mr_{ij} \quad (3)$$

où Mm_j représente la valeur régularisée de la mesure sur une hauteur ΔZ .

Nous obtenons ainsi une première estimation dont on va chercher à contrôler la validité et à affiner la précision en comparant les valeurs initiales de la mesure (MT_j) aux valeurs « reconstruites » à partir des valeurs Mm_j . On calcule en fait un résidu qui sera à chaque nouvelle itération rétropropagé sur les valeurs Mm_j par le calcul d'une correction. Nous avons ainsi les expressions suivantes dans le cas d'un opérateur sonde de type moyenne arithmétique :

$$Res_j^k = MT_j - Mc_j^k \quad (4)$$

avec
$$Mc_j^k = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{NB} Mm_i^k \cdot dV_i \quad (5)$$

où :

Res_j^k : résidu pour un point j à la k ème itération ;

Mc_j^k : valeur reconstruite à la k ème itération à partir des valeurs Mm .

La correction à apporter sur les valeurs Mm à la k ème itération s'écrit :

$$Cm_j^k = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{NB} Cr_{ij}^k \quad (6)$$

avec

$$Cr_{ij}^k = Res_j^k \cdot dV_i$$

soit la nouvelle valeur de la mesure régularisée :

$$Mm_j^{k+1} = Mm_j^k - Cm_j^k \quad (7)$$

Le nombre d'itérations est déterminé par un seuil sur l'erreur moyenne calculée sur l'ensemble des données entre les valeurs mesurées et les valeurs reconstruites à partir des valeurs régularisées.

Les volumes élémentaires qui composent le support de la mesure peuvent être variables et ainsi rendre compte de la profondeur d'investigation de la mesure suivant le milieu environnant. Ceci suppose toutefois une connaissance préalable du milieu ainsi que de la profondeur d'investigation suivant la lithologie.

2.2.2 Application

L'algorithme précédent est directement utilisé sur la variable DT. Les hypothèses simplificatrices que nous formulons sont les suivantes :

- un opérateur de type moyenne arithmétique ;
- un volume d'investigation V de forme cylindrique constant sur l'ensemble du domaine, c'est-à-dire en fait $R(NM(z), \text{dispositif}) = \text{const}$.

Les résultats de la régularisation (DT rég.) sont présentés sur la figure 9b en regard des données initiales de la variable DT (fig. 9a) qui sont affectées de l'effet intégrateur de la sonde.

Fort logiquement nous observons une augmentation de la variance du signal lors d'une régularisation sur le support v . Le variogramme associé (fig. 10) confirme l'augmentation générale du niveau de variance du signal DT rég. et montre qu'une structure spatiale est conservée. L'opération de régularisation n'a apparemment pas généré de bruit parasite : l'effet de pépite est nul. Par rapport au variogramme théorique attendu, le comportement du variogramme de la variable DT rég., au-delà de la portée de $a = 2,55$ m est correct. Par contre, pour des portées inférieures, le variogramme théorique à associer à la variable DT rég. devrait comporter une première portée d'environ 1 m.

Afin de mieux juger de l'influence de la régularisation des mesures diagraphiques, nous allons focaliser sur une zone à gradient de la variable DT : zone comprise entre les cotes 509 et 512 m (fig. 11). La zone à gradient positif et négatif s'étend sur 0,90 m de chaque côté d'une valeur minimale ($58 \mu\text{s}/\text{ft}$) située à la cote 510,40 m. Nous nous situons dans une zone où

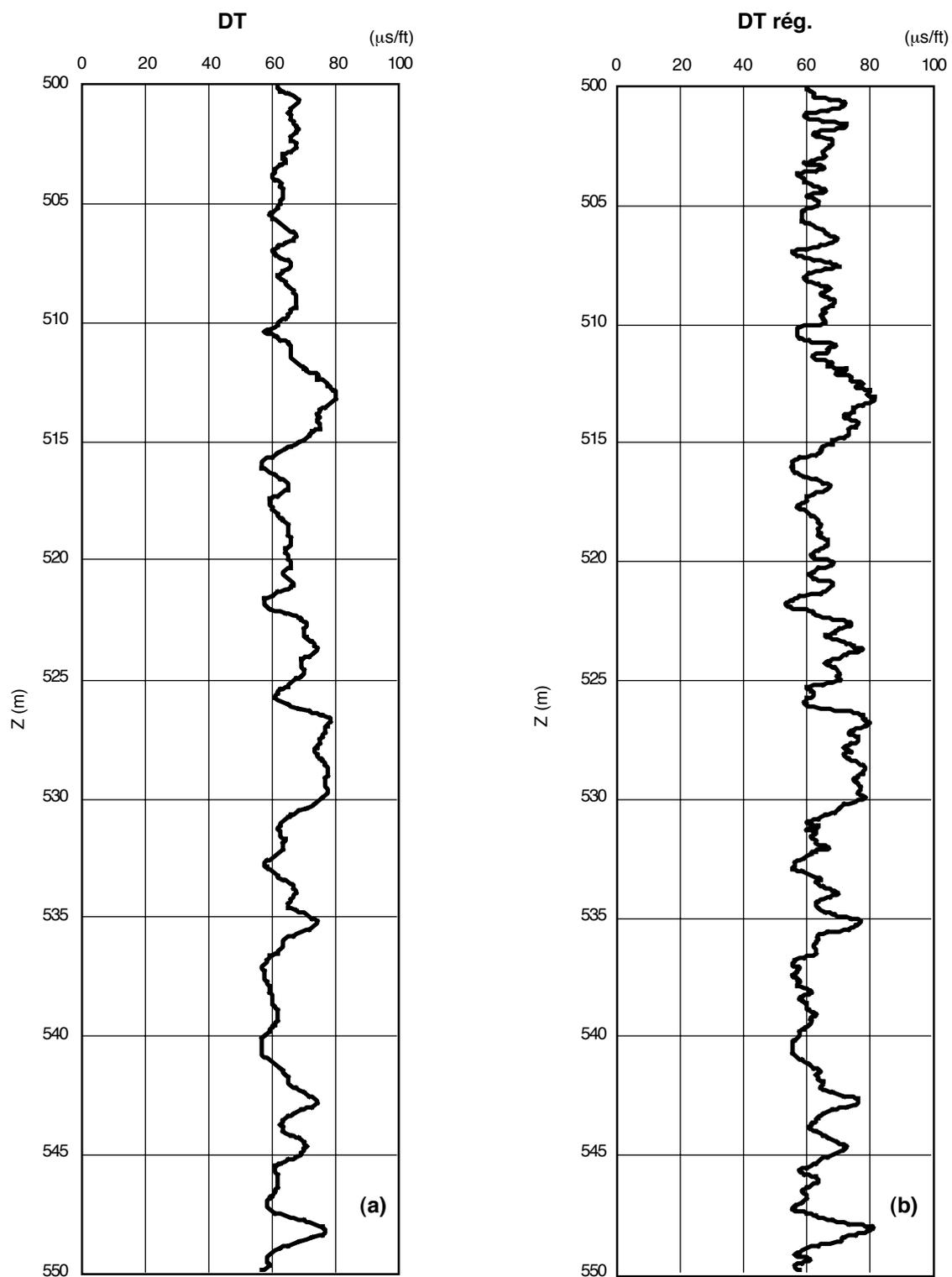


Figure 9

a) données initiales (DT) ; b) données régularisées (DT rég.).

a) raw data (DT); b) homogenized data (DT rég.).

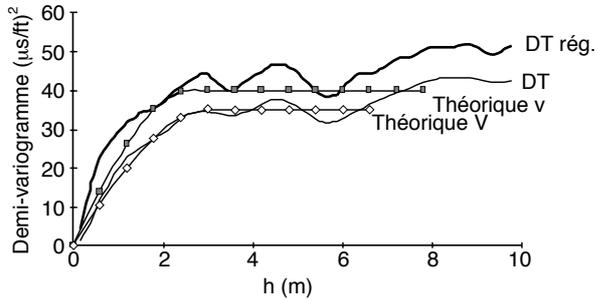


Figure 10
Variogrammes expérimentaux et théoriques des variables DT et DT rég.
Experimental and fitted models semi-variograms of DT and DT rég. variables.

distinguer nettement une zone de forte vitesse de propagation sur 0,60 m de hauteur centrée sur la position de la valeur minimale précédente. Les effets de rampes de part et d'autre de cette zone sont réduits à 0,15 m. Le facteur α d'augmentation de la définition verticale est ici de 4. La reconstruction de ce type de zone qui est d'une épaisseur inférieure à la définition verticale initiale des outils explique le comportement du variogramme proche de l'origine. On met en évidence par la régularisation de la variable DT, une structure spatiale des données de faible portée sur la variable DT rég. qui était noyée par l'effet intégrateur de l'outil.

manifestement la résolution verticale de l'outil est mise à défaut. En effet, les mesures enregistrées ne rendent pas du tout compte des caractéristiques propres du terrain : elles ne sont le résultat que de l'effet intégrateur de l'outil. La régularisation de la variable DT permet de

3 APPORTS DE LA RÉGULARISATION DES MESURES DE DIAGRAPHIES DIFFÉRÉE

Trois méthodes pour une meilleure régularisation des données diagraphiques ont été présentées. La dernière apparaît comme la plus performante, car elle utilise toutes les mesures enregistrées contrairement aux

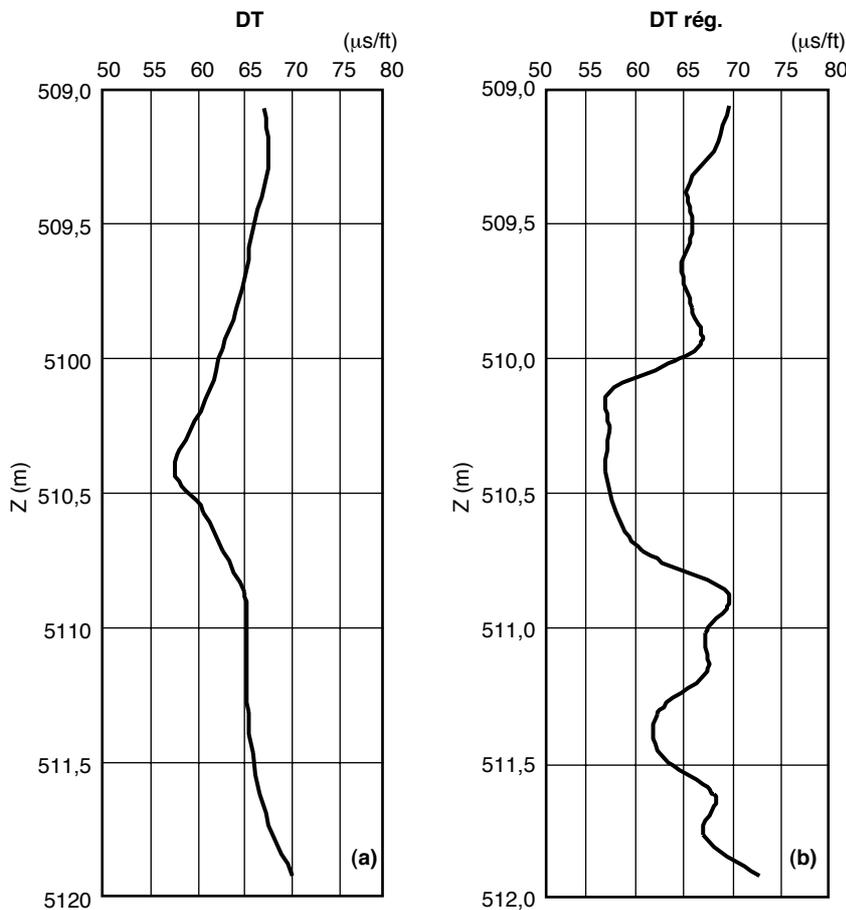


Figure 11
a) données initiales (DT)
b) données régularisées (DT rég.).
*a) raw data (DT)
b) homogenized data (DT rég.).*

deux autres qui partent d'une variable DT' où l'on a supprimé toutes les données affectées par l'effet intégrateur de l'outil de mesure.

Nous devons maintenant montrer que cette méthode de régularisation des données permet d'obtenir des données qui se rapprochent au mieux de la réalité du terrain et de quantifier son influence sur l'interprétation combinée de plusieurs diagraphies.

3.1 Étude de signaux synthétiques

Pour étudier le comportement de la régularisation sur les données et tout particulièrement pour voir si une mesure de support V une fois régularisée sur un support v ($v < V$) est une bonne estimation de la mesure réelle de support v , nous choisissons de travailler avec des signaux synthétiques.

Nous construisons à partir d'un générateur de données aléatoires et d'un opérateur structurant quelconque un signal terrain (fig. 12). Sa structure est telle que le

montre son variogramme à la figure 13. Les points de ce signal sont distants de 1 unité (u). La valeur affectée à chaque point représente la mesure d'une variable VT quelconque de support v disjoints dont la dimension selon l'axe de mesure est de $1u$.

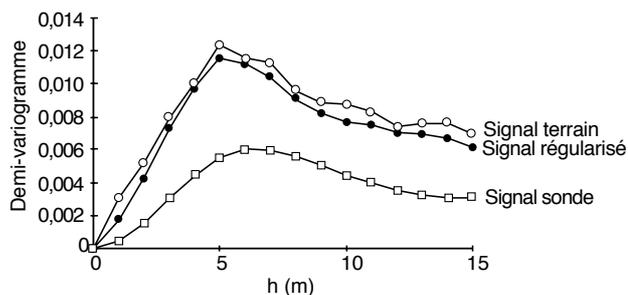


Figure 13
Variogrammes expérimentaux des signaux synthétiques VT, VS et VR.
Experimental semi-variograms of VT, VS and VR variables.

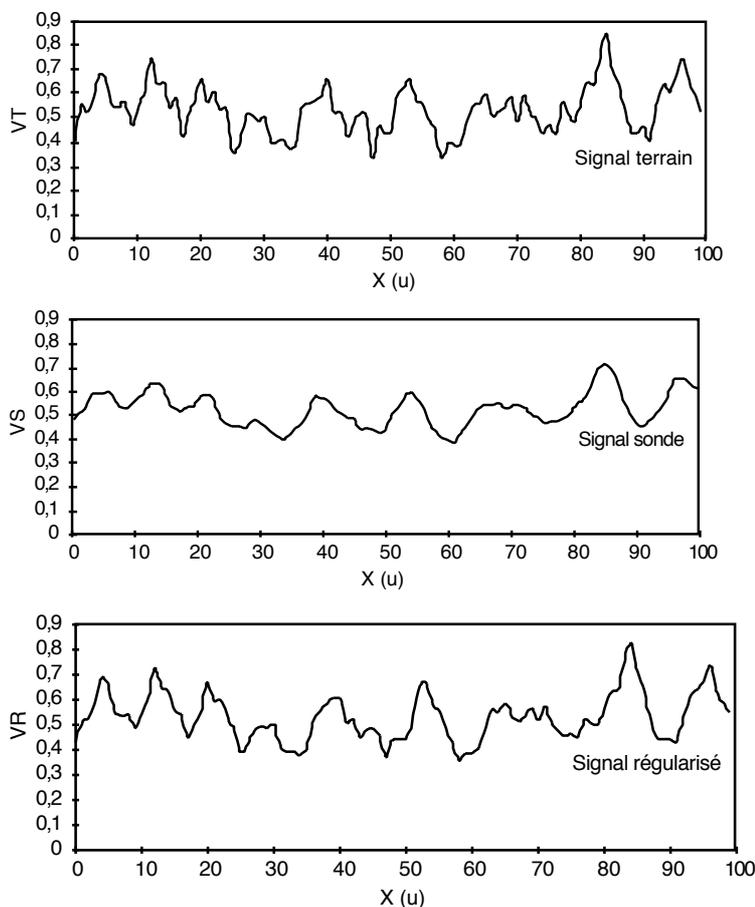


Figure 12
Signaux synthétiques. VT : signal terrain ; VS : signal sonde ; VR : signal régularisé.
Synthetic dataset VT: field data; VS: tool data; VR: homogenized data.

À partir du signal VT nous pouvons calculer un signal sonde VS. Il représente les mesures classiquement obtenues avec les macrodispositifs, c'est-à-dire des mesures influencées par l'effet intégrateur propre à chaque outil. L'opérateur d'intégration a été choisi de type moyenne harmonique mobile avec une longueur (définition verticale) de 4u. Le volume d'investigation V est, par hypothèse, de forme cylindrique et constant sur l'ensemble du domaine de mesure. Le signal sonde VS obtenu avec ces hypothèses est présenté à la figure 12. Sur son variogramme associé (fig. 13) on retrouve les traits caractéristiques, déjà mis en évidence avec la variable DT, d'un signal issu d'un macrodispositif.

Le niveau de variance est faible et le comportement à l'origine est de type dérivable en moyenne quadratique. Nous obtenons ainsi un signal sonde où les mesures sont fortement dépendantes entre elles simplement par l'introduction d'une structure spatiale fictive due à l'effet intégrateur de l'outil de mesure.

Le signal régularisé où chaque mesure est relative à un support v (de dimension 1.u selon l'axe de mesure) est donné à la figure 12. Sa forme générale se rapproche du signal terrain sans être parfaitement identique. Il en est de même pour les variogrammes de la figure 13 où le variogramme du signal régularisé (VR) se rapproche du variogramme du signal terrain (VT) : les niveaux de variance sont proches mais à l'origine, le variogramme du signal régularisé présente un léger effet de pépité négatif. L'algorithme de régularisation ne permet pas de retrouver parfaitement la structure spatiale du signal initial (signal terrain VT) en raison

vraisemblablement de l'opérateur d'intégration « sonde » fortement non linéaire. D'un point de vue statistique, le signal régularisé se rapproche nettement du signal terrain comme on peut le visualiser sur les figures 14a et 14b. Nous passons d'un coefficient de détermination de 0,55 avec les mesures issues directement d'un outil diagraphique à un coefficient de détermination de 0,95 avec le signal régularisé.

Cette approche numérique, avec les hypothèses considérées, nous incite à penser qu'un signal régularisé permet d'obtenir des mesures plus représentatives du terrain environnant tout en augmentant la définition verticale de l'outil de mesure puisque l'on passe, dans cet exemple, d'une définition verticale de 4.u à une définition verticale de 1.u sur le signal régularisé.

3.2 Influence de la régularisation sur l'interprétation combinée de diagraphies

Nous allons nous intéresser à l'apport potentiel d'une régularisation correcte des données diagraphiques sur l'interprétation combinée de diagraphies. L'objectif est de mettre en évidence qu'une utilisation rigoureuse de plusieurs diagraphies doit préalablement passer par un étape de régularisation de données afin que les volumes de mesure, entre les différentes variables, soient comparables.

L'application envisagée consiste à rechercher des zones calcaires à l'intérieur d'un ensemble où alternent des niveaux calcaires et marneux tels que le présente le log lithologique de la figure 15. Pour distinguer ces

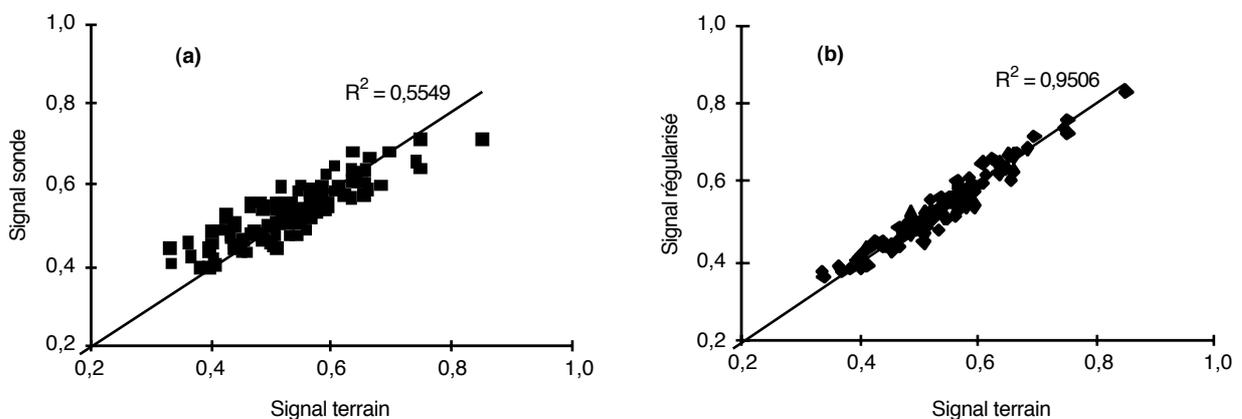


Figure 14
Corrélation entre le signal terrain VT et le signal sonde VS (a) et entre le signal terrain VT et le signal régularisé VR (b).
VT - VS and VT - VR correlation diagrams.

niveaux nous avons choisi de nous appuyer sur la méthode du pointé M-N [3]. Les paramètres M et N sont calculés à partir de la réponse de trois diagraphies : sonique, densité et porosité neutron. Leurs expressions sont respectivement :

$$M = \frac{\Delta t_{mf} - \Delta t}{\rho_b - \rho_{mf}} \quad N = \frac{\phi_{nmf} - \phi_n}{\rho_b - \rho_{mf}}$$

avec

Δt_{mf} : temps de parcours sonique dans le filtrat

Δt : temps de parcours sonique dans la formation

ϕ_{nmf} : porosité neutron du filtrat

ϕ_n : porosité neutron de la formation

ρ_b : densité mesurée de la formation

ρ_{mf} : densité du filtrat.

Les données diagraphiques ont été régularisées en tenant compte de la géométrie respective des outils de mesure. Les données présentées à la figure 15 sont des mesures régularisées sur le plus petit volume commun aux trois diagraphies.

Dans la technique du pointé M-N, chaque minéral pur est représenté par un point d'abscisse N et d'ordonnée M. Aussi pour reconnaître les zones calcaires, nous faisons l'hypothèse que les valeurs N et M doivent être comprises entre :

$$N : 0,58 - 0,62$$

$$M : 0,78 - 0,85$$

Ces intervalles ont été calés à partir de zones où des mesures de calcimétrie, sur échantillons prélevés, avoient 100 % en CaCO_3 .

Nous obtenons deux découpages distincts (fig. 15) selon que l'on considère les variables régularisées ou non. Ils suscitent les observations suivantes.

- Les niveaux marneux (essentiellement des faciès de marnes grises) sont bien reconnus sur les deux découpages.
- Dans les zones calcaires, le découpage avec variables régularisées tend à être plus discriminant ; certains points de coordonnées N et M sont rejetés en dehors de l'intervalle retenu.
- Dans les zones calcaires légèrement argileuses ou à passées marneuses (zones 584-594 m et 607-610 m), le découpage à partir des variables non régularisées n'indique pas la présence de niveaux calcaires à l'exception d'une zone comprise entre les cotes 584,5 et 587 m. Le découpage avec variables régularisées met par contre en évidence la présence de niveaux calcaires. Certains points de coordonnées

N et M se sont ainsi rapprochés du point calcite du diagramme N - M et rentrent dans l'intervalle défini.

Par cet exemple d'interprétation combinée de plusieurs diagraphies, il apparaît qu'une régularisation des données apporte une information plus discriminante, dont l'origine est directement liée à l'augmentation de la définition verticale qui résulte de la régularisation des supports de mesure.

CONCLUSION

La valorisation des macrodispositifs passe par la réalisation d'un objectif triple (additivité des données, supports de mesure comparables, augmentation de la définition verticale). Cet objectif peut être atteint par une régularisation des volumes investis ou supports de mesure. La méthode consiste à transformer une structure de support de type chevauchante en un type empilé.

L'utilisation des outils de la géostatistique permet de montrer l'influence importante de l'effet intégrateur de l'outil, aussi bien sur la forme de la réponse de l'outil que sur sa valeur. Il a également été montré qu'un pas d'échantillonnage, aussi réduit soit-il, apporte peu d'informations complémentaires par rapport à un pas d'échantillonnage correspondant à la définition verticale de l'outil de mesure si l'on ne prend pas en compte l'effet de l'outil sur la mesure.

Trois méthodes pour la régularisation de données ont été proposées. Les deux premières s'appuient sur des concepts géostatistiques où la connaissance de l'opérateur outil n'est pas nécessaire, la troisième utilise des méthodes géométriques de transformation et nécessite une connaissance a priori de l'opérateur sonde. Cette méthode a l'avantage de faire appel à l'ensemble des données enregistrées.

La régularisation des données a été testée sur un jeu de signaux synthétiques. Les résultats montrent qu'il est possible de retrouver jusqu'à 95 % de l'information initiale. L'utilisation combinée des données de plusieurs diagraphies est une pratique extrêmement courante mais dont le principal défaut est de ne pas tenir compte des différences qui existent entre les volumes investis par les différents outils. Une régularisation des données, propre à chaque outil, nous a permis de déterminer un support de mesure comparable entre les outils et, par l'application proposée (recherche de zones calcaires et marneuses), de montrer qu'une régularisation

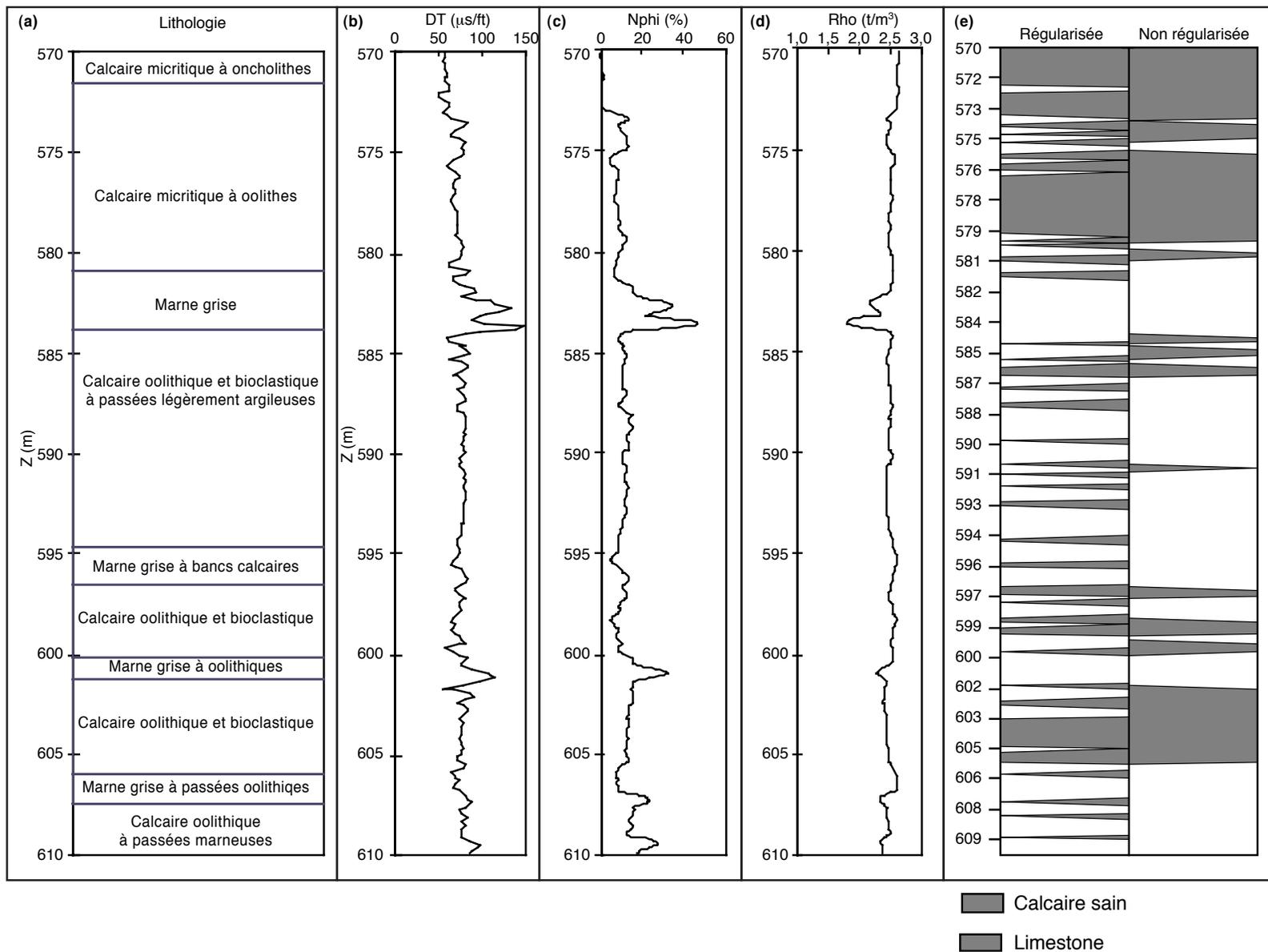


Figure 15
 a) log lithologique ; b) DT régularisé ; c) NPHI régularisé ; d) Rho régularisé ; e) découpages.
 a) lithological log; b) homogenized DT; c) homogenized NPHI; d) homogenized RHO; e) faciology coding.

des données apporte une information plus discriminante. La régularisation des données permet également une augmentation de la définition verticale des outils : le gain est alors directement fonction du pas d'échantillonnage de la mesure dans le forage.

D'autres applications peuvent trouver un intérêt dans la prise en compte des volumes de la mesure comme le calage entre les sismo-sondages et les diagraphies acoustiques [20] et [21] qui nécessite le calcul d'un temps intégré corrigé, ou encore dans le calcul de l'impédance acoustique puis des coefficients de réflexion (combinaison des diagraphies acoustiques et de densités) pour l'élaboration de films synthétiques.

La régularisation des supports de mesure telle que nous l'avons présentée s'appuie sur des hypothèses simplificatrices concernant les volumes investis et l'opérateur d'intégration de l'outil. Dans le but d'une amélioration de la qualité de la régularisation des données, nous cherchons désormais à intégrer au niveau des volumes investis une connaissance a priori sur la lithologie en fonction de la profondeur ($R(z) \neq \text{const}$) et de rechercher le meilleur opérateur d'intégration suivant l'outil de mesure.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du réseau de laboratoires Géomatériaux Environnement Ouvrages (GEO) dans le thème Identification in situ.

RÉFÉRENCES

- 1 Matheron G. (1962), Traité de géostatistique appliquée. *Mem. Bur. Rech. Géol. Minière*, 14, tome I, Éditions Technip, Paris.
- 2 Matheron G. (1963), Traité de géostatistique appliquée. *Mem. Bur. Rech. Géol. Minière*, 14, tome II, Éditions Technip, Paris.
- 3 Serra O. (1984), Diagraphies différées - interprétation des données diagraphiques. *Bull. Cent. Rech. Explor. Prod. Elf Aquitaine*.
- 4 Burke J.A., R.L. Campbell Jr. et A.W. Schmidt (1969), The litho-porosity cross-plot. *SPWLA, 10th Ann. Log. Symp. Trans., Paper Y*.
- 5 Journel A. et C. Huijbrets (1978), *Mining Geostatistic*, Academic Press, New York.
- 6 Suau J., L. Albertelli, M. Cigni et U. Gagniani (1984), Interpretation of very thin gas sand. *SPWLA, 25th Ann. Log. Symp. Trans., Paper A*.
- 7 Matheron G. (1970), La théorie des variables régionalisées et ses applications. *Cah. Morphologie Math.*, 5, École des Mines de Paris, Fontainebleau.
- 8 Deutsch C. et A. Journel (1992), *Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press.
- 9 Delhomme J.P. (1978), Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. *Bull. Rech. Géol. Min.*, deuxième série, section III, 4, p. 341-375.
- 10 Lajaunie Ch. (1993), Les bases de la modélisation géostatistique de l'effet de support. *INIST*, 104, p. 15-28.
- 11 Clark I. (1979), *Practical Geostatistics*, Applied Science Publishers.
- 12 Cressie N. (1990), The origins of kriging. *Mathematical geology*, 22, 3, p. 239-252.
- 13 Montoglou A. (1987), Digital simulation of multivariate two- and three-dimensional stochastic process with a spectral turnig bands method. *Mathematical geology*, 19, 2, p. 129-149.
- 14 Oldendorf W.H. (1961), Isolated flying spot detection of radiodensity discontinuities displaying the internal structural pattern of a complex object. *IRE Trans. bio. Med. Elect.* BME 8, p. 68-72.
- 15 Kuhl D.E. et R.Q. Edward (1963), *Image Separation in Radio-Isotope Scanning, Radiology*, 80, p. 653-661.
- 16 Cote Ph. et R. Lagabrielle (1986), La tomographie sismique comme méthode de reconnaissance détaillée du sous-sol. *Revue française de géotechnique*, 36, p. 47-53.
- 17 Gilbert P. (1972), Iterative methods for the three dimensional reconstruction of an object from projections. *J. Theor. Biol.*, 36, p. 105-117.
- 18 Cote Ph. (1989), Tomographie sismique en génie civil. *Rapport LCPC, GT-36*.
- 19 Denis A. et P. Morlier (1991), Nouvelles méthodes d'identification des fractures par diagraphie acoustique en full wave form. *Revue de l'institut français du pétrole*, 46, 2, p. 183-197.
- 20 Mari J.L. et F. Coppens (1989), *La sismique de puits*, Éditions Technip, Paris, .
- 21 Boyer S. et J.L. Mari (1994), *Sismique et diagraphie*, Éditions Technip, Paris.

Manuscrit définitif reçu en mars 1997