

# Interprétation semi-automatique des enregistrements des paramètres de forage (sondeuses hydrauliques en rotation)

**M. BOURGET**

CDGA, Université  
Bordeaux I,  
avenue des Facultés,  
33405 Talence Cedex

**M. RAT**

Laboratoire Central  
des Ponts et Chaussées,  
58, boulevard Lefebvre,  
75735 Paris Cedex 15

## Résumé

Une méthodologie semi-automatique d'interprétation des enregistrements en fonction de la profondeur des paramètres de forage est mise au point à partir de deux campagnes de sondages destructifs. Les foreuses utilisées sont hydrauliques et fonctionnent en rotation. Dans un premier temps, on rappelle que les paramètres sont liés aux circuits hydrauliques de fonctionnement des foreuses. Ainsi, la première étape de l'interprétation est de s'assurer de leur fiabilité, et ceci signifie aussi éliminer le bruit et les valeurs aberrantes. La méthode d'interprétation se compose ensuite d'une analyse en composantes principales des trois paramètres : vitesse d'avance (VA), pression sur l'outil (PO) et couple de rotation (CR) qui fait apparaître un paramètre composé spécifique à chaque campagne. Ce paramètre composé est alors découpé en zones statistiquement homogènes (à l'aide de l'entropie ou de l'algorithme de Fisher), en accord avec la géologie des milieux forés. On obtient ainsi, sous la forme de deux logs figurés, la caractérisation des milieux géologiques en terme de forabilité.

# A semi-automatic interpretation of the recording versus depth of drilling parameters (hydraulic drilling machine, working in rotation)

## Abstract

A semi-automatic methodology is built, based on the recording versus depth of drilling parameters of two drilling surveys. The drilling machines, working in rotation, are hydraulic. First, the authors underline that drilling parameters depend on the instrumentation of the hydraulic circuits of the drilling machine. Thus, interpretation requires the reliability of the parameters, noise elimination and absence of wrong values. The interpretation methodology begins with a principal component analysis of the three parameters rate of penetration (VA), weight on bit (PE) and torque (CR). A composed parameter is derived for each survey and is used to define (through an entropy approach or a Fisher algorithm) statistically homogeneous geological sub-domains along the drill. The net product of the interpretation is two lithologic logs providing the characterization of the geological drilled media in term of forability.

## Introduction

L'apparition, il y a une vingtaine d'années des appareils enregistreurs des paramètres de forage a profondément modifié l'organisation des campagnes de reconnaissance ou l'organisation de certains chantiers. Tant que l'on ne disposait que de l'enregistrement de deux paramètres, généralement la vitesse de foration et la pression de fluide, l'interprétation ne pouvait être que relativement simple et se faisait manuellement. Maintenant, on dispose des enregistrements numériques d'un grand nombre de paramètres; il n'est plus possible de se contenter de ce type d'interprétation si l'on veut exploiter l'ensemble des données acquises, d'autant plus que l'expérience a montré qu'il pouvait conduire à des erreurs. Certaines entreprises de forage fournissent déjà des paramètres composés. Nous avons essayé d'améliorer cette démarche en utilisant les techniques d'analyse des données pour fournir, à partir des enregistrements, un découpage en zones homogènes des sondages. Pour cette recherche, nous avons utilisé les enregistrements de deux campagnes de reconnaissance, dans des sites géologiques très différents.

## Présentation des données

Deux campagnes de sondages sont à notre disposition.

### Campagne de Charron

La première a été organisée, sous forme expérimentale, spécialement pour constituer un jeu de données pour cette étude. Elle s'est déroulée à Charron en Charente-Maritime (commune de Bords) sur le déblai PK 21, situé sur le tracé de l'autoroute A 837 (Saintes-Rochefort). 34 forages ont été réalisés par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Bordeaux avec la foreuse hydraulique Sédidril 750 fonctionnant en rotation.

L'implantation des sondages suit deux profils formant un T. Le premier, situé le long du tracé de l'autoroute, est constitué de 26 sondages espacés de 10 m et profonds de 12 m. Le deuxième, qui lui est perpendiculaire, est formé de 9 sondages espacés de 20 m et profonds de 15 m.

L'information géologique est constituée:

- du sondage carotté effectué pendant la campagne préliminaire par FONDASOL;
- des cartes géologiques du BRGM au 1/50 000 de Saint-Agnan et de Rochefort.

Les formations du Cénomaniens supérieur et moyen qui ont servi à établir la carte géologique du BRGM ont été reconnues dans la commune de Bords. La comparaison avec le sondage carotté permet de déduire que les matériaux du déblai appartiennent à ces formations.

Les différentes formations présentes sont de haut en bas avec leurs épaisseurs moyennes:

- une couche de terre végétale en surface (0,5 m);
- un niveau de calcaire (4,85 m);

- un niveau de grès lumachellique (1,25 m);
- une formation sableuse (1,80 m);
- une formation constituée de marnes sableuse ou de calcaire argileux (1,50 m);
- un deuxième niveau calcaire (plus de 4 m).

Le premier niveau calcaire appartient aux formations du Cénomaniens supérieur qui s'étendent jusqu'à la base du niveau argileux. Le deuxième niveau calcaire constitue le sommet du Cénomaniens moyen. Cette partie du Cénomaniens a été exploitée dans cette région comme matériau d'empierrement ou comme pierre de taille. On note d'ailleurs la présence, au pied du déblai, d'une carrière souterraine abandonnée.

### Campagne de Joinville

La deuxième campagne considérée est celle qui s'est déroulée à Joinville-le-Pont (1992) pour l'évaluation d'une solution enterrée de l'autoroute A 86 par le Laboratoire Régional de l'Est Parisien. La foreuse utilisée est une foreuse hydraulique Mobil-drill BL50 fonctionnant en rotation.

Ce deuxième jeu de données, constitué de 34 forages espacés de 100 à 200 m dont la profondeur varie de 25 à 50 m, a été retenu en raison du nombre élevé de sondages carottés (17) qui ont été réalisés pendant la reconnaissance et qui nous permettent d'avoir une bonne connaissance géologique du site. Néanmoins, la géologie du site est très complexe et est loin de se caractériser par la régularité observée sur le site de Charron.

De façon simplifiée on peut distinguer:

- les alluvions modernes (2 à 8 m);
- les alluvions anciennes (3 à 7 m);
- les marnes et caillasses du Lutétien (0 à 9 m);
- les calcaires grossiers du Lutétien formés de bancs plus ou moins durs, d'épaisseur variable entre 20 cm et 5 m (l'épaisseur totale est d'environ 20 m);
- les sables du Soissonnais du Sparnacien (5 à 10 m);
- les fausses glaises du Sparnacien (1 à 3 m);
- les argiles plastiques du Sparnacien (0 à 3 m).

### Principe de fonctionnement d'une foreuse

En négligeant les mouvements internes à l'outil comme la rotation des molettes dans le cas d'un tricone, on peut considérer que le mode de fonctionnement de l'outil de forage est à deux degrés de liberté, uniquement animé d'un mouvement de rotation horizontal et d'un mouvement de translation vertical.

L'action d'une foreuse peut être schématisée (Fig. 1) à partir de l'interaction entre l'outil et le milieu foré: elle dépend de l'amplitude du mouvement de translation **A** pendant un intervalle de temps **T**, de la force verticale **F** appliquée sur l'outil, de son couple de rotation **CR**, du mouvement de rotation **W**, de la surface de contact **S** entre l'outil et le milieu foré et du comportement du milieu foré face au forage que l'on peut globalement appeler **RF**.

L'objectif étant d'identifier des couches homogènes, il s'agit de déterminer **RF**.

L'amplitude **A** du mouvement vertical est fixée par le pas d'enregistrement en fonction de la profondeur

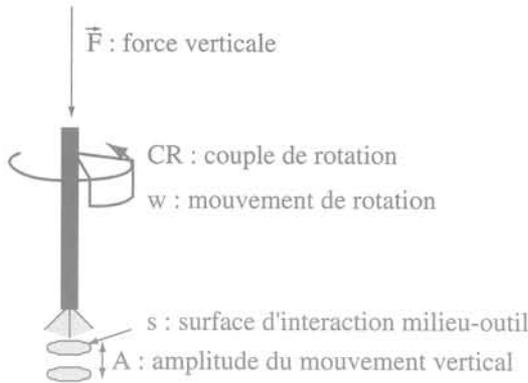


FIG. 1 Schéma simplifié du processus de forage.  
Outline of the drilling process.

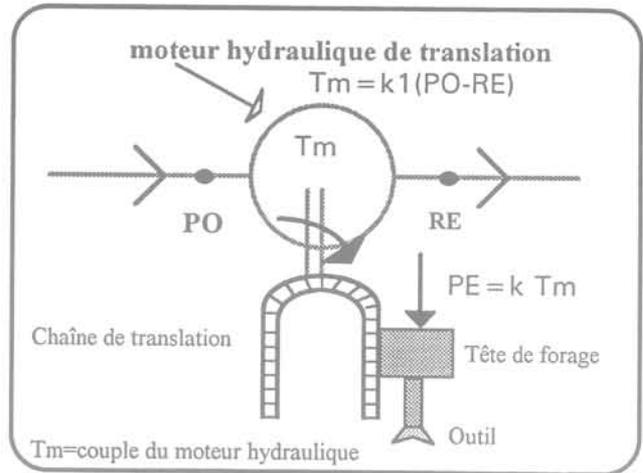


FIG. 2 Schéma de fonctionnement du circuit hydraulique du mouvement de translation de l'outil (foreuse Sédidrill 750).  
Diagram of the hydraulic circuit working of the bit translation movement (the Sédidrill 750 machine).

qui est, en général, maintenue constante pendant une campagne. Le temps  $T$  est connu par l'intermédiaire de la vitesse d'avance  $VA$ . La surface  $S$  est fonction du diamètre, de la forme et du degré d'usure de l'outil. La force verticale  $F$  correspond à la pression  $PE$  exercée par la tête de forage et le train de tige. La vitesse de rotation du train de tige  $VR$ , permet de connaître le mouvement de rotation  $w$ .

## 2.4

### Instrumentation des foreuses

Les deux foreuses qui ont été choisies sont hydrauliques et fonctionnent en rotation, car ce sont celles qui sont les plus faciles à instrumenter et qui, ainsi, paraissent les plus fiables pour l'enregistrement de paramètres. En effet, les circuits hydrauliques transmettent des contraintes qui sont linéairement liées à la pression d'huile du circuit. Dans le cas de circuits pneumatiques, la compressibilité de l'air rend difficile l'interprétation des mesures (la variation de volume d'air se fait aux dépens de sa pression). Nous ne considérons que le forage en rotation, l'enregistrement des paramètres de forage en percussion posent des problèmes différents. Les grandeurs couple de rotation, pression sur l'outil et retenue sont mesurées par l'intermédiaire des pressions d'huile dans les circuits hydrauliques correspondants. Néanmoins, les capteurs de pressions sont rarement étalonnés, et le fonctionnement des circuits hydrauliques est mal connu.

Prenons l'exemple du circuit hydraulique de translation de la foreuse Sédidrill 750 (Fig. 2).

La force verticale transmise à l'outil ( $PE$ ) est proportionnelle au couple ( $T_m$ ) du moteur hydraulique.

Par ailleurs,  $T_m$  est proportionnel à la différence entre les deux pressions en amont ( $PO$ ) et en aval ( $RE$ ) du moteur hydraulique.

Ainsi, la pression effectivement appliquée sur l'outil ( $PE$ ) est proportionnelle à  $PO-RE$ .

Il est donc indispensable de connaître les deux pressions qui sont appelées pression sur l'outil ( $PO$ ) et retenue ( $RE$ ).

Des capteurs (hydrauliques ou mécaniques), doivent être correctement placés et choisis de façon à mesurer

fidèlement les grandeurs qui permettent de caractériser le fonctionnement de la foreuse.

Ces grandeurs sont :

- la profondeur  $Z$  ;
- la vitesse d'avance du forage  $VA$  ;
- la pression sur l'outil  $PO$  ;
- la retenue  $RE$  ;
- la vitesse de rotation du train de tige  $VR$  ;
- le couple de rotation exercé sur le train de tige  $CR$  ;
- la pression du fluide d'injection  $PI$ .

## 2.5

### Exemple d'une diaggraphie instantanée

Regardons maintenant un exemple d'enregistrement de paramètres de fonctionnement d'une foreuse en fonction de la profondeur : le forage 12 de la campagne de Charron (Fig. 3).

Le dispositif d'enregistrement de la vitesse de rotation n'a pas fonctionné correctement pendant cette campagne. Sur ce sondage, les valeurs délivrées par le capteur sont aberrantes. Sur les quelques forages où les valeurs sont correctes, on a pu constater que la vitesse de rotation est de 400 tours par minutes et varie peu. Il n'est donc pas indispensable de mesurer la vitesse de rotation si on est sûr que son réglage ne sera pas changé pendant la campagne (ou dans le cas contraire, il faut noter ses valeurs au moment du changement).

Le capteur de pression d'injection fait apparaître des valeurs quasiment nulles tout au long du sondage sauf à environ 9,7 m de profondeur, il est habituellement utilisé comme indice d'argilosité (phénomène de bourrage par l'argile au niveau de l'outil qui provoque une montée en pression) ou de cavité (chute de pression).

Le débit d'injection varie peu (entre 54 et 70 l/h), ces variations n'ont pas d'influence sur les valeurs de la pression d'injection, l'enregistrement de ce paramètre n'est donc pas essentiel.

Par la suite, nous n'utiliserons pas ces deux paramètres.

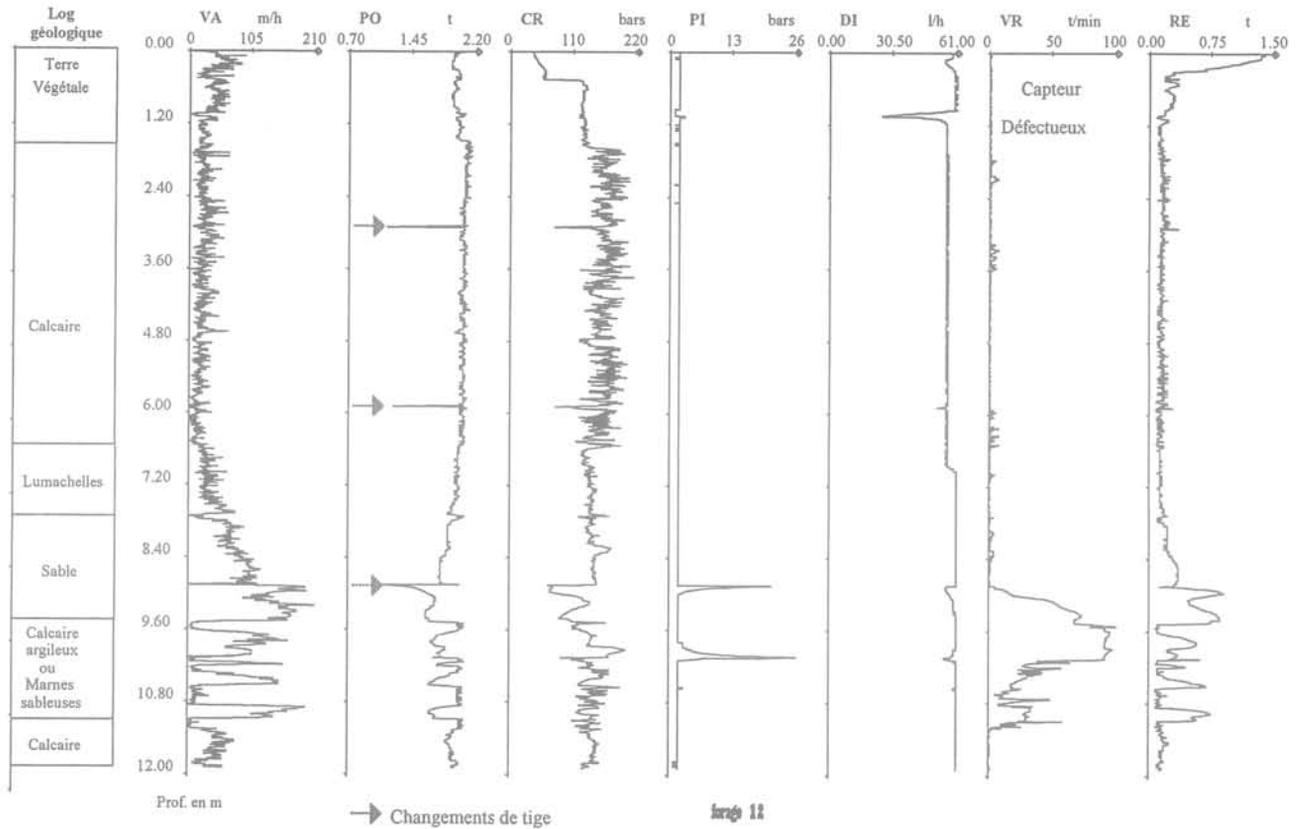


FIG. 3 Exemple d'enregistrement brut de paramètres de forage (avant filtrage et avec les valeurs aberrantes).  
Example of a recording versus depth of drilling parameters (before filtering and with wrong values).

Les valeurs de la retenue vont de 0,1 à 1,4 tonnes (1 à 14 kN), celles de la pression sur l'outil de 1,8 à 2 tonnes (18 à 20 kN). On constate donc, d'une part que la retenue se caractérise par un domaine de variation plus grand que celui de la pression sur l'outil, et d'autre part, que les valeurs de RE ne sont pas toujours négligeables comparées à celles de PO. La pression qui est effectivement appliquée sur l'outil (PE) correspond à la force qui est transmise par l'intermédiaire du moteur hydraulique du circuit de translation. Elle vaut PO - RE. On voit donc que RE est loin d'avoir une influence négligeable et qu'elle doit être enregistrée.

La vitesse d'avance est le paramètre le plus variable: elle varie de 0 à 200 m/h (0 à 0,055 m/s).

Le couple de rotation, dont les valeurs présentées ici sont en fait celles du capteur de pression situé dans le circuit hydraulique de rotation, varie entre 20 et 200 bars (2 et 20 MPa), ce qui correspond à une variation de 85 à 850 kilogrammes/mètres (0,85 à 8,5 kNm) en utilisant la règle de conversion établie lors de l'étalonnage de la foreuse: couple réel en mkg = 4,25 x valeur du capteur correspondant en bars.

3

## Traitement des enregistrements

Le traitement des enregistrements comprend deux étapes importantes: tout d'abord la régularisation des paramètres puis leurs découpages en zones homogènes.

3.1

### Régularisation des paramètres

3.1.1

#### Élimination des valeurs aberrantes

La première étape consiste à éliminer les changements de tige et les enregistrements relatifs aux capteurs qui ont mal fonctionné (ici VR). Il est, en effet, indispensable de limiter l'influence des valeurs aberrantes car elles biaisent les caractéristiques statistiques des paramètres.

Les changements de tiges font apparaître des valeurs liées à la baisse (ou à la montée) en pression dans les circuits hydrauliques au moment d'un arrêt (ou d'une reprise) du forage. Les changements de tige sont plus ou moins visibles selon la foreuse hydraulique utilisée. Ici, les deux premiers sont nets et bien localisés, par contre, lors du troisième, la pression sur l'outil après le changement de tige n'est pas la même qu'avant: une discontinuité de valeurs apparaît.

La technique utilisée pour éliminer les valeurs aberrantes est de remplacer les valeurs après changement de tige par celles juste avant (sur une profondeur de 20 cm). Elle présente l'inconvénient de faire apparaître un palier. Si on veut masquer cet effet, les valeurs peuvent être remplacées par les réalisations d'une fonction aléatoire gaussienne ayant même moyenne et écart-type que l'enregistrement juste avant le changement de tige. La perte d'informations au cours des changements

de tiges est d'environ 20 cm. Si les tiges font 1 m, 20 % de l'information est perdue (7 % de perte pour les tiges de 3 m).

### 3.1.2

## Filtrage du bruit

Les paramètres obtenus sont fortement bruités. En effet, la partie haute fréquence des enregistrements se comporte comme une fonction aléatoire pure. Elle présente toutes les caractéristiques d'un bruit et est à l'origine de l'aspect discontinu des enregistrements. Cette composante n'est pas porteuse d'informations sur les milieux traversés et perturbe les méthodes de traitement. Elle doit donc être éliminée par filtrage ou lissage. La source de ce bruit peut être liée à l'action des dents (qui est un processus discontinu), à la faible épaisseur du milieu ambiant impliqué dans le processus de forage (quelques millimètres), au pas d'échantillonnage (de l'ordre du centimètre), à l'action de la pompe d'injection (qui peut faire apparaître le phénomène de « langage »), aux vibrations produites par la foreuse...

Les transformées de Fourier de VA, PE et CR sont présentées sous la forme du diagramme du logarithme népérien du module normalisé par rapport au module maximal en fonction de la fréquence (Fig. 4). Cette représentation, habituellement utilisée pour déterminer les caractéristiques d'un filtre, présente l'avantage de permettre une bonne visualisation, sur le même gra-

phique, du comportement des hautes et des basses fréquences du signal étudié.

Le spectre des enregistrements peut être décomposé en quatre parties. La première se caractérise par une zone de fortes valeurs (de 0 à environ  $2 \text{ m}^{-1}$ ), la deuxième par une forte décroissance (de  $2 \text{ m}^{-1}$  à environ  $8 \text{ m}^{-1}$ ), la troisième par une décroissance plus faible (de 8 à environ  $30 \text{ m}^{-1}$ ) et, enfin, les fréquences supérieures à  $30 \text{ m}^{-1}$  se caractérisent par la stabilisation autour d'une constante. Dans les trois cas, les spectres sont similaires à celui d'une fonction aléatoire pure pour des fréquences supérieures à la fréquence de coupure  $F_c = 30 \text{ m}^{-1}$ . C'est cette fréquence de coupure qui est retenue pour le filtrage. Elle est suffisante pour supprimer l'influence de la composante aléatoire qui bruite les paramètres de forage. Néanmoins, on pourrait filtrer une bande de fréquences plus large. En effet, une démarche possible est d'adapter la taille de la fenêtre de filtrage à la dimension de l'événement le plus petit que l'on veut pouvoir identifier. Ici, trois choix sont possibles : 50, 12,5 ou 3 cm. Si on choisit d'éliminer les événements (couches, fissures...) d'épaisseur inférieure à  $e_c = 50 \text{ cm}$ , il faut filtrer les fréquences supérieures à  $F_c = 1/e_c = 2 \text{ m}^{-1}$ .

Comme dans le domaine fréquentiel sur lequel la composante aléatoire devient prépondérante est comparable sur les différents paramètres de forage et comme les diverses causes qui peuvent créer ce bruit ne sont, en général, pas spécifiques à un seul paramètre de forage, ils sont tous filtrés de la même bande de fréquence.

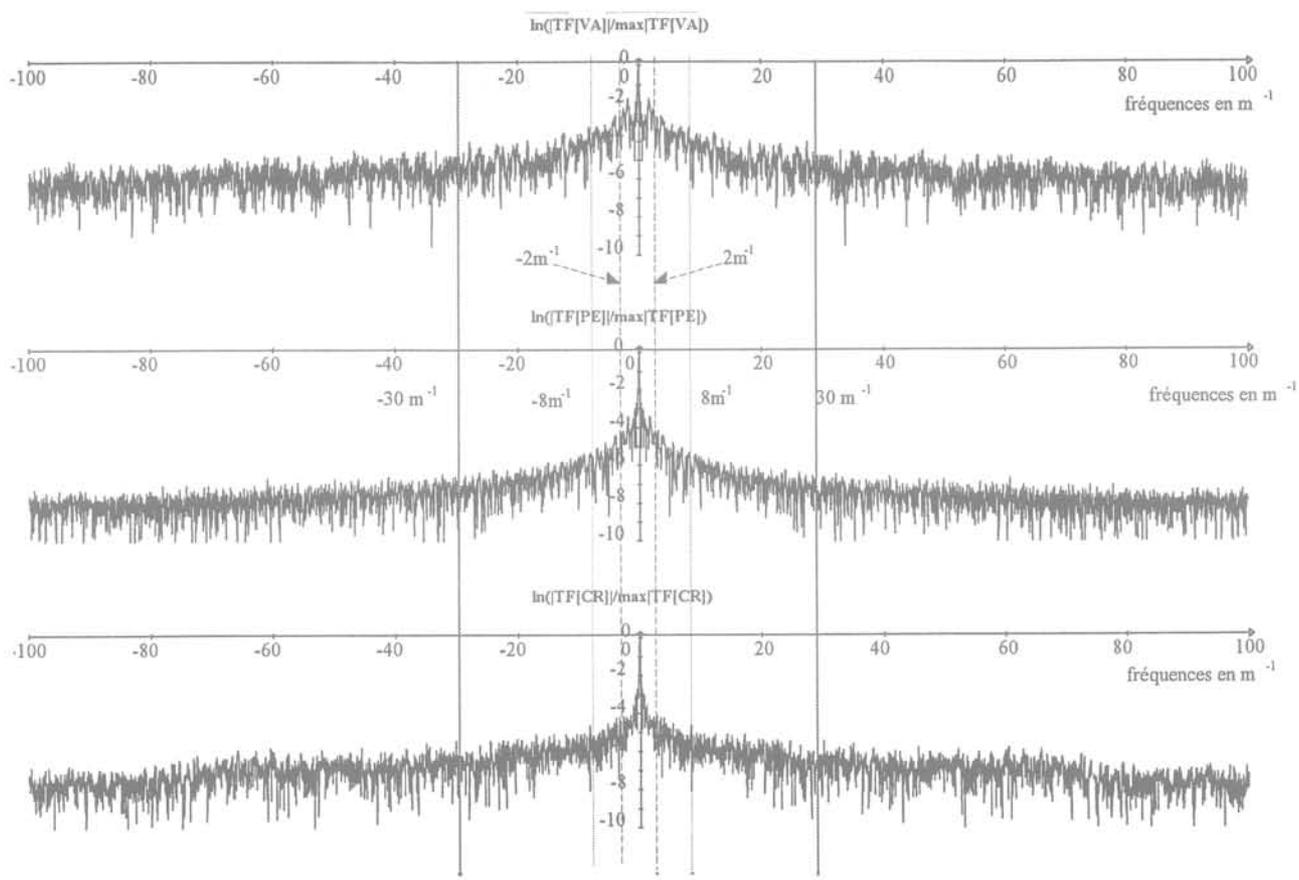


FIG. 4. Transformées de Fourier de VA, PE et CR : tracé du logarithme du module normalisé en fonction de la fréquence.

Fourier's transform of VA, PE, CR : logarithm of the normalized modulus versus frequencies.

Les enregistrements filtrés de fréquences supérieures à 30 m<sup>-1</sup> sont présentés figure 5.

### 3.2

## Découpage d'un enregistrement en zones homogènes

Deux méthodes de découpage d'un paramètre en zones homogènes sont proposées : l'entropie et l'algorithme de Fisher.

### 3.2.1

#### L'entropie

L'entropie à la profondeur  $z$  de l'enregistrement en fonction de la profondeur du paramètre  $X(z)$  (qui peut être VA, PO, CR...) est définie de la façon suivante :

$$H(X, z) = \int_{z_0}^z \left| \frac{dX(u)}{du} \right| du$$

où  $z_0$  est une profondeur de référence qui est, par exemple, le début du forage ( $z_0 = 0$ ).

L'entropie se comporte sur un signal aléatoire, stationnaire d'ordre 2, dérivable en moyenne quadratique et dont la densité du processus dérivé est symétrique par rapport à la valeur moyenne (qui est nulle), comme une courbe linéaire en moyenne dont les écarts par

rapport à la linéarité sont stationnaires d'ordre 2 (Bourget M., Crémoux F., 1993).

Les paramètres, une fois filtrés peuvent être étudiés avec l'entropie. Elle permet de faire apparaître les profondeurs successives qui présentent des valeurs de paramètres comparables et ainsi de les regrouper. L'entropie permet le découpage d'un paramètre en zones statistiquement homogènes : la limite entre deux zones se caractérise par une rupture de pente.

L'inconvénient de l'utilisation de l'entropie est qu'il n'y a pas de critère clairement établis pour différencier une hétérogénéité d'une limite entre deux zones. L'entropie est linéaire en moyenne, mais les écarts par rapport à la moyenne posent, dans certains cas, des problèmes d'interprétation : ils traduisent soit une limite de couche, soit une couche homogène au sens de moyenne et variance constantes mais avec une variabilité importante.

#### • Découpage du forage 12 par l'entropie

Les découpages présentés figure 5 sont faits à partir des enregistrements filtrés des fréquences entre 30 et 100 m<sup>-1</sup> et rééchantillonnés avec un pas de 1,5 cm. Le rééchantillonnage permet de diminuer de façon significative le nombre de points (ici de 2250 à 750 pour un paramètre). De plus, rappelons que le pas d'échantillonnage le mieux adapté est celui correspondant à la fréquence de Niquist qui est de 2 points pour la longueur d'onde minimale (ici 3,3 cm), il est donc inutile de conserver un pas d'échantillonnage de 5 millimètres après filtrage du contenu fréquentiel entre 30 et 100 m<sup>-1</sup>.

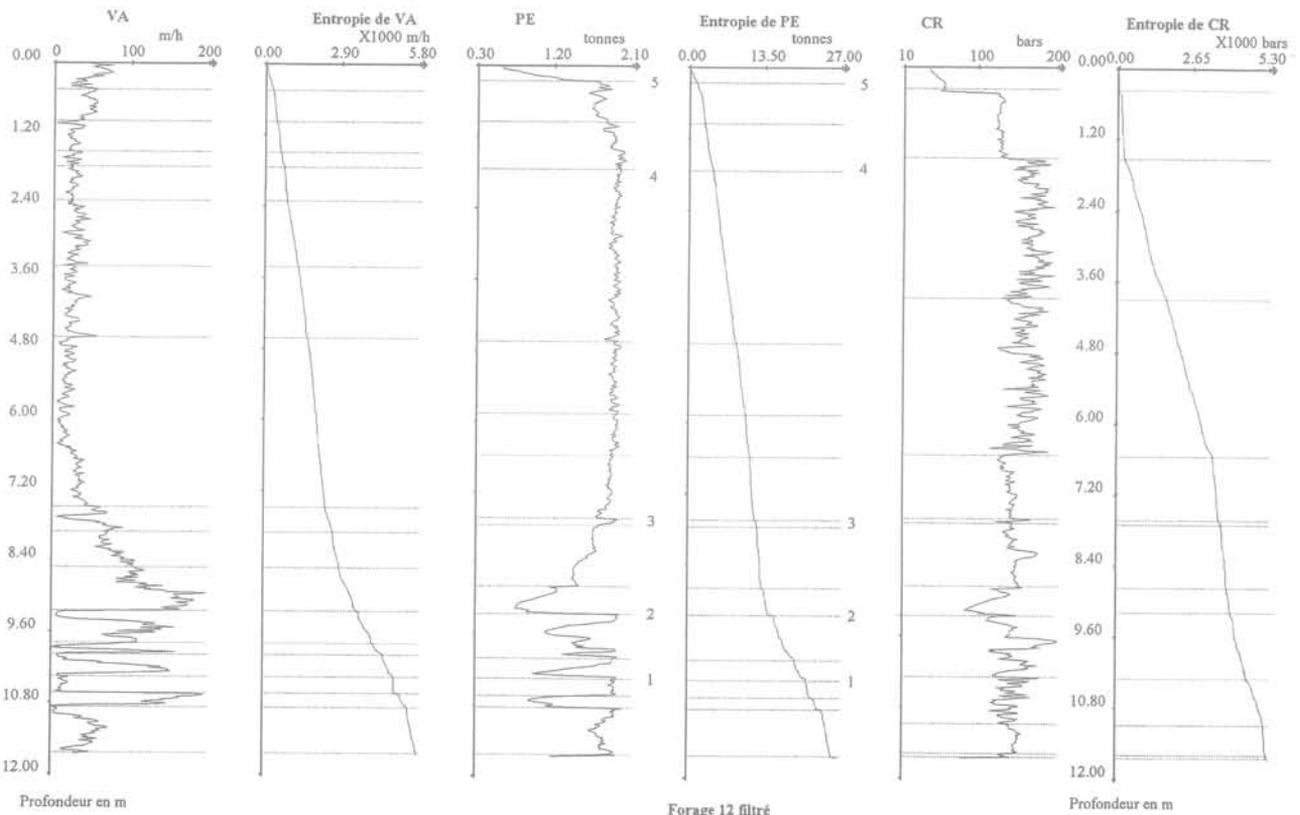


FIG. 5 Un découpage des paramètres avec l'entropie.

A classification of the parameters with the entropy approach.

Sur les découpages des trois paramètres, on remarque que quatre limites de zones communes correspondent à l'interface entre deux unités géologiques: le toit de la couche argileuse, le toit de la couche sableuse et le toit du calcaire supérieur. Seul le toit de la couche de calcaire inférieur est mal défini, mais cette limite semble être masquée par le comportement très variable de la zone argilo-sableuse. Le nombre des découpages est le plus dense au sein de cette zone à cause de sa structure même qui pourrait être considérée hétérogène. De même, la zone la moins variable pour les trois paramètres correspond à la couche calcaire supérieure et présente le nombre de découpages le plus faible. Elle apparaît, à l'échelle du forage, comme la plus homogène. On remarque que seul le couple permet de détecter le toit de la couche de lumachelles.

### 3.2.2

#### L'algorithme de Fisher

Le découpage des diagraphies instantanées en zones homogènes, en utilisant les méthodes d'ensemble (analyse discriminante par exemple), ne donne pas de bons résultats car les enregistrements sont trop agités: d'une couche géologique à l'autre, le recouvrement des valeurs est tel qu'elles ne peuvent être différenciées. La méthode statistique adaptée doit donc considérer l'organisation spatiale des valeurs. Parmi les méthodes statistiques de classement, l'algorithme de Fisher est le seul (avec celui de Ward qui en est très proche) qui tient compte de l'ordre des échantillons.

L'algorithme de Fisher regroupe les profondeurs en différentes zones en minimisant la variance des valeurs au sein de chaque zone (variance intra-zone); ce qui revient à maximiser la variance entre les zones (variance inter-zones). C'est un algorithme de classement de type descendant qui permet, pour un enregistrement composé de N valeurs, d'obtenir toutes les possibilités de regroupement des valeurs en une à N zones (une zone étant formée de profondeurs successives). Le nombre de zones qui permet le mieux de répartir les valeurs s'obtient en traçant la courbe de la variance intra-zone en fonction du nombre de zones. Il se traduit par une cassure sur cette courbe qui est liée à la convergence de la variance intra-zone vers son minimum (atteint pour N zones).

Le critère de découpage de cet algorithme étant la minimisation de la variance intra-zone, il n'est pas adapté pour traiter le cas des enregistrements contenant des zones de fortes et de faibles variances: le découpage se focalise sur les zones les plus agitées.

Néanmoins, cette technique a été retenue parce que deux couches homogènes se caractérisent en premier lieu par des moyennes différentes: la variance est une information de deuxième ordre par rapport à la moyenne. Une zone homogène dont la variabilité est importante peut être identifiée dans le cas où les valeurs oscillent de façon rapide autour de la moyenne. Par contre, quand elles présentent des pics isolés, on conclut à la présence d'hétérogénéité.

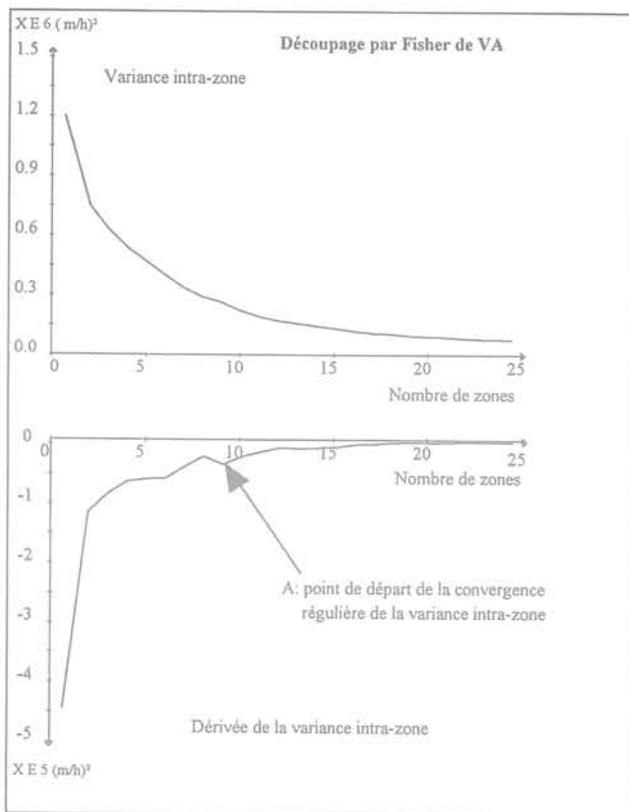


FIG. 6a

#### Évolution de la variance intra-zone en fonction du nombre de classes.

Evolution of the sub-zone variance versus the number of classes.

#### • Découpage du forage 12 avec l'algorithme de Fisher

Le découpage du forage 12 avec l'algorithme de Fisher est présenté figure 6b. L'algorithme de Fisher permet de déterminer le nombre optimal de zones (point A sur la figure 6a) qui correspond sur la courbe de variance intra-zone, en fonction du nombre de zones, au point de stabilisation de la convergence de cette variance vers la valeur nulle. Ce point apparaît souvent plus facilement sur la dérivée de cette courbe.

### 3.2.3

#### Comparaison des deux méthodes de découpage

Les difficultés qui apparaissent lors de la mise en œuvre de ces deux méthodes mettent en évidence que le découpage automatique des enregistrements demeure une perspective lointaine: le bon déroulement de ces deux méthodes fait pleinement appel à la perspicacité de l'opérateur.

Bien qu'en théorie l'algorithme de Fisher fonctionne avec un critère de découpage objectif, en pratique, son utilisation fait appel à une donnée subjective qui est la décision de reprendre certaines zones et d'y appliquer une seconde fois l'algorithme. En effet, les grandes uni-

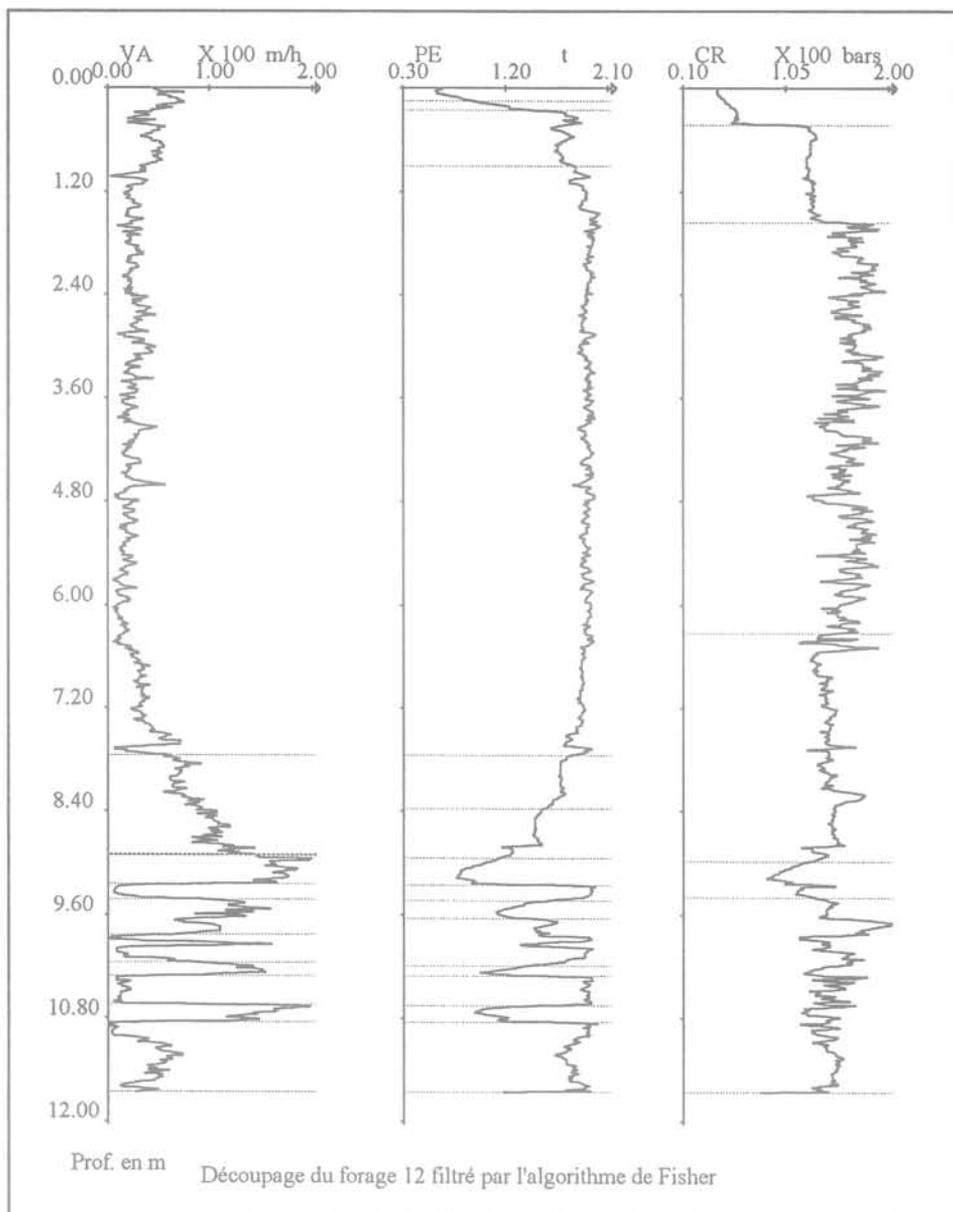


FIG. 6b Découpage obtenu en utilisant le nombre de classes donné par le point A (Fig. 6a). Classification in sub-domains with the number of classes given by the point A (Fig. 6a).

tés géologiques ne sont pas toujours discernées lors de la première étape. Or, on peut difficilement considérer comme homogène une zone définie en partie dans une formation sableuse et en partie dans une formation calcaire. Ce problème est dû à la focalisation du découpage sur la zone qui présente une très forte variabilité (ici, la zone argilo-sableuse). C'est donc l'interpréteur qui, connaissant la nature géologique des milieux présents, doit faire le choix d'arrêter le découpage de la zone la plus variable qu'il sait être une zone d'hétérogénéité (zone argilo-sableuse) et de le relancer dans les zones moins variables.

Par comparaison, l'entropie semble plus efficace pour résoudre le problème posé par une zone de forte variabilité dans la mesure où les écarts par rapport à la linéarité de l'entropie peuvent encore être considérés

comme stationnaires d'ordre 2. Par contre, les variations de pentes les plus marquées ne correspondent pas toujours aux limites de couches géologiques : elles peuvent être dues à des hétérogénéités locales. La couche argilo-sableuse fait apparaître ce phénomène : les écarts par rapport à la linéarité de cette couche sont plus apparents que la rupture de pente à l'interface calcaire/sable.

4

## Combinaison des paramètres

L'interprétation d'un forage en terme de caractérisation géotechnique des milieux traversés est difficile à faire à partir des logs constitués par chacun des

découpages des enregistrements de paramètres. En effet, comme il n'existe pas de relation directe entre un paramètre et une caractéristique géotechnique, on ne peut savoir lequel des découpages est le plus significatif.

De nombreux travaux ont été réalisés sur la corrélation entre les paramètres de forage et sur leur relation avec une caractéristique géotechnique. La thèse de H. Girard (1985) présente différentes relations qui ont été proposées. Il définit une grandeur appelée résistance au forage sous la forme :

$$RF = \frac{PE \times VR}{VA \times D} \quad (D: \text{diamètre de l'outil})$$

qui se corrèle bien avec la résistance à la compression simple dans le cas d'essais sur des plots en mortier. E. Detournay et D. Defourny (1992) proposent une interprétation du processus de forage en terme d'énergie spécifique du milieu définie par :

$$E = \frac{CR \times VA}{A \times VR}$$

et de résistance au forage :

$$RF = \frac{PE \times VR}{VA \times A} \quad (A: \text{surface de contact outil-milieu foré}).$$

La caractérisation du milieu se fait à partir du diagramme RF en fonction de E.

#### 4.1

### Analyse en composantes principales

En se basant sur les résultats proposés dans la littérature, la vitesse d'avance VA, la pression effective sur l'outil PE, la vitesse de rotation VR, le couple CR semblent permettre de caractériser le milieu foré à travers une variable s'exprimant sous la forme du produit de ces paramètres, chacun affecté d'un exposant. On a donc essayé de retrouver cette variable en utilisant une analyse en composante principale (ACP) non linéaire (c'est-à-dire à partir des logarithmes des paramètres).

La vitesse de rotation VR étant dans notre cas constante, l'analyse est faite à partir des trois enregistrements VA, PE (PO dans le cas de Joinville où la retenue n'a pas été enregistrée<sup>1</sup>) et CR. L'analyse non linéaire est faite à partir des variables centrées réduites qui sont ici appelées LVA, LPE, LCR telles que :

$$LVA = \frac{\ln(VA) - E[\ln(VA)]}{\sigma[\ln(VA)]},$$

$$LPE = \frac{\ln(PE) - E[\ln(PE)]}{\sigma[\ln(PE)]},$$

$$LCR = \frac{\ln(CR) - E[\ln(CR)]}{\sigma[\ln(CR)]}$$

L'analyse fournit alors trois combinaisons linéaires de logs. La première composante principale correspond à la combinaison qui est la plus représentative (appelée LA) du comportement du logarithme des enregistrements. Elle peut s'écrire :

$$LA = a \times LVA + b \times LPE + c \times LCR.$$

Notre paramètre composé A est l'exponentielle de LA et s'exprime sous la forme

$$A = VA^\alpha \times PE^\beta \times CR^\gamma.$$

Les trois coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sont donc tels que :

$$\alpha = \frac{a}{\sigma[\ln(VA)]}, \quad \beta = \frac{b}{\sigma[\ln(PE)]}, \quad \gamma = \frac{c}{\sigma[\ln(VA)]}$$

où  $\sigma(x)$  désigne l'écart type de x.

L'ACP non linéaire a été faite en considérant séparément chacun des trente forages de chaque campagne. Elle consiste à diagonaliser la matrice de corrélation entre LVA, LPE, LCR qui donne trois valeurs propres  $\lambda_i$  et trois vecteurs propres  $V_i$ . La représentativité de chaque variable est donnée par son pourcentage d'inertie  $I_i$  tel que :

$$I_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (i = 1, 2, 3),$$

et à la corrélation entre les variables et les enregistrements est donnée par :

$$c(V_i, LVA) = v_{i1} \sqrt{\lambda_i},$$

$$c(V_i, LPE) = v_{i2} \sqrt{\lambda_i},$$

$$c(V_i, LCR) = v_{i3} \sqrt{\lambda_i}$$

$$\text{avec : } V_i = v_{i1} LVA + v_{i2} LPE + v_{i3} LCR.$$

Les coefficients de corrélation moyens (la moyenne est faite sur 30 forages) et les inerties de l'ACP des trois variables LVA, LPE, LCR sont donnés dans le tableau I.

**TABLEAU I** Les inerties et des coefficients de corrélation moyens entre les vecteurs propres obtenus V1, V2, V3 et LVA, LPE, LCR.

The average inertia and correlations' coefficients of the eigen vectors (V1, V2, V3) and LVA, LPE, LCR.

	Charron			Joinville				
	$I_i$ en %	LVA	LPE	LCR	$I_i$ en %	LVA	LPE	LCR
V1	67,7	-0,80	0,94	0,66	60,3	-0,87	0,91	0,23
V2	25,7	0,55	0,01	0,64	31,3	0,31	0,06	0,85
V3	6,3	0,21	0,32	-0,18	8,3	0,28	0,30	0,24

La composante principale LVI est largement dominante, elle représente 68 % d'inertie du nuage de points pour la campagne de Charron et 60 % pour celle de Joinville. Elle est très fortement corrélée à LPO (ou LPE), anticorrélée avec LVA et montre une corrélation variable et plus faible avec LCR dans le cas de Joinville que dans celui de Charron. La contribution à cette composante de LVA et LPO sont stables, par contre pour LCR la variabilité n'est plus négligeable dans le cas de Joinville. La deuxième composante représente environ 30 % de l'inertie du nuage de points, elle est indépendante de LPO (ou LPE). LV2 est non corrélée avec LPO (ou LPE), se caractérise par une corrélation également répartie entre LVA et LCR dans le cas de Charron et par une contribution fortement dominante de LCR dans le cas de Joinville. La troisième composante explique moins de 10 % de l'inertie des données.

1. On utilise en général dans la suite (pour simplifier les notations) PE, bien que, dans le cas de Joinville, ce soit PO.

**TABEAU II** Les caractéristiques moyennes de la première composante principale.  
The average characteristics of the first principal component.

Joinville	$\lambda_1$	a	b	c	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$	Charron	$\lambda_1$	a	b	c	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$
moy.	1,81	-0,65	0,68	0,17	-0,87	4,64	1,29	moy	2,07	-0,54	0,66	0,52	-0,73	2,98	2,56
sigma	0,24	0,06	0,04	0,29	0,27	1,19	2,25	sigma	0,15	0,05	0,03	0,04	0,11	0,71	0,54
cv	0,13	0,09	0,05	1,70	0,31	0,26	1,75	cv	0,07	0,09	0,04	0,08	0,14	0,24	0,21

L'analyse en composantes principales a pour but de diminuer le nombre de variables à traiter. La première composante représente à elle seule plus de 60 % de l'information contenue dans les paramètres. On peut donc se limiter à cette variable, si on veut une caractérisation plus précise, il faut aussi introduire la deuxième composante principale, on obtient alors 90 % de l'information. La dernière composante est négligeable.

Ici, on a choisi de ne garder que la première composante principale. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau II.

Pour chaque campagne, la variable la plus explicative est donc :

$$\text{Joinville : } A = \frac{VA^{0,9}}{PO^{4,6} \times CR^{1,3}}$$

$$\text{Charron : } A = \frac{VA^{0,7}}{PO^{3,0} \times CR^{2,6}}$$

Si ces deux variables ne sont pas très éloignées l'une de l'autre, leur variabilité est différente. Les valeurs des coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$  sont stables et peuvent donc être considérées comme fiables dans le cas de la campagne de Charron, mais ce n'est pas le cas de la campagne de Joinville. L'information contenue dans ces variables concerne l'exécution d'un forage complet, elle est donc dépendante du fonctionnement de la machine et des terrains traversés. Dans le cas de la campagne de Charron, tous les forages rencontrent les mêmes couches géologiques dans des proportions voisines. A Joinville, l'environnement géologique varie. Par ailleurs, l'instrumentation de la foreuse utilisée lors de la campagne de Charron a été effectuée de façon complète et rigoureuse (enregistrement de la retenue par exemple), et le déroulement a été suivi sur le terrain, ce qui nous a permis d'éliminer les forages pendant lesquels l'outil a cassé.

## 4.2

### Découpage du paramètre composé en zones homogènes

Ayant à notre disposition une variable A, représentative de 60 % de l'information contenue dans les trois paramètres VA, PE et CR, il faut maintenant la découper en zones homogènes qui permettent de retrouver la géologie des milieux traversés et leur comportement par rapport à l'action de forage.

L'outil utilisé pour le découpage est l'algorithme de Fisher. Le découpage présenté (Fig. 7) est celui du

forage 12 de la campagne de Charron. Il s'est déroulé en deux temps.

Tout d'abord un découpage global sur la totalité du forage qui permet une première partition. Celle-ci fait apparaître quatre comportements :

- le premier au début du sondage, caractérisé par une moyenne très élevée et une dispersion très élevée, est associé à la couche de terre végétale de surface ;
- le deuxième, caractérisé par une moyenne faible et une dispersion faible, est associé à des matériaux plus compacts de type rocheux ;
- le troisième, caractérisé par une moyenne forte et une dispersion faible, est associé à des matériaux non consolidés ;
- le quatrième, caractérisé par une moyenne intermédiaire et une dispersion forte, est associé à des matériaux argileux.

L'algorithme de Fisher permet d'identifier les trois premiers comportements. Le quatrième pose plus de problèmes. En effet, le site étudié comporte une couche argilo-sableuse qui se traduit sur la composante principale par une alternance de valeurs fortes et faibles. Cette couche n'est pas homogène et ne peut donc être identifiée par l'algorithme qui fait apparaître les alternances comme celles-ci sont trop variables pour être corrélées d'un sondage à l'autre, il nous a paru préférable de les regrouper.

La seconde étape consiste à recommencer le découpage sur les zones de type rocheux identifiées à l'étape précédente, ce qui permet de les caractériser de façon plus précise.

Les résultats sont ensuite proposés pour chaque sondage sous forme de logs figurés. Pour le premier figuré, sa largeur, pour chaque zone, est fonction de la moyenne de la variable composée. Cette valeur a été normalisée de façon à varier de 0 à 1 dans les formations autres que la terre végétale. La largeur du figuré traduit donc la facilité avec laquelle le milieu est foré. Une augmentation de la largeur dans les niveaux calcaires signifie donc un calcaire moins résistant au forage. Un deuxième log figuré est tracé où la largeur dépend de l'écart-type de la variable A. Il donne une information sur le degré d'homogénéité des différentes zones. La figure 7 présente les figurés obtenus pour le forage 12.

## 5

### Conclusion

Plusieurs conclusions s'imposent à la suite de cette étude.

La première est qu'avant tout, pour faire une bonne interprétation, il faut de bonnes données et donc avoir

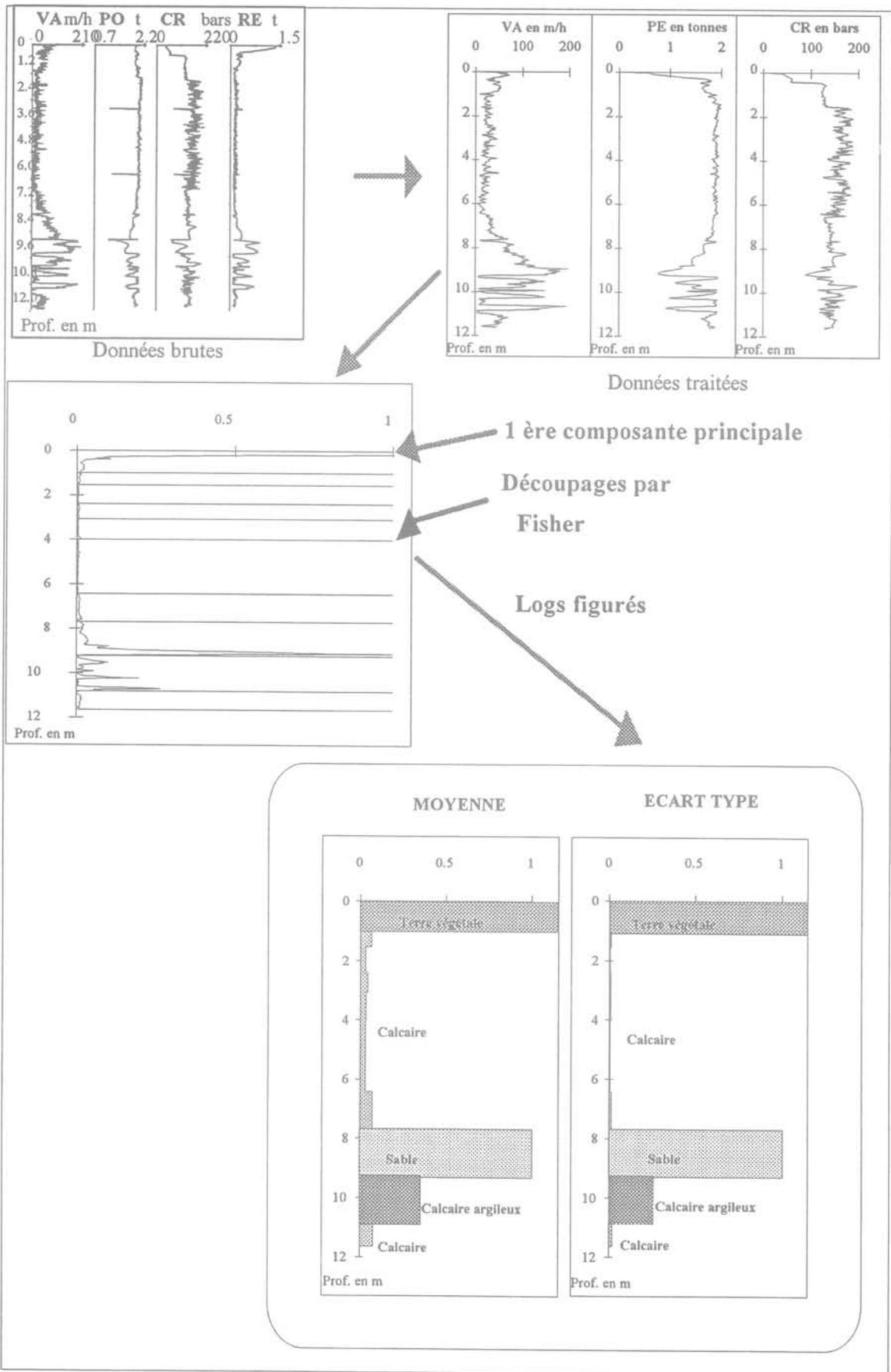


FIG. 7 Schéma de la méthode d'interprétation (appliquée au forage 12).  
Diagram of the semi-automatic methodology (applied to the drill 12).

des paramètres de forages bien choisis et fiables. Il faut, par exemple, utiliser des tiges de 3 m de longueur pour limiter les valeurs aberrantes qui apparaissent au niveau des changements de tige. Les paramètres que nous avons actuellement, et qui nous semblent les plus fiables, sont mesurés par l'intermédiaire de capteurs hydrauliques. L'étude des circuits hydrauliques de la foreuse dédriill 750 fait apparaître qu'ils ne sont pas toujours bien maîtrisés. Par exemple, pour les foreuses de retenue réglable, il faut que ce paramètre soit enregistré.

Deuxième conclusion : il est nécessaire tout d'abord d'éliminer les valeurs aberrantes (dues par exemple aux changements de tiges), puis de régulariser les paramètres avec un filtrage des hautes fréquences ou une moyenne mobile sur au moins 3 cm.

Le troisième aspect est que, lorsque les paramètres sont traités séparément, les résultats ne sont pas satisfaisants dans la mesure où des découpages différents apparaissent pour chacun des paramètres.

La quatrième conclusion est l'intérêt de l'analyse en composantes principales des enregistrements qui permet de limiter la quantité d'informations à considérer en faisant apparaître une variable porteuse de 68 % de l'information contenue dans chaque forage. Pour la campagne de Charron, l'utilisation de cette variable conduit à une bonne définition des couches géologiques.

Enfin, ces différentes observations nous amènent à proposer le schéma de traitement suivant qui est rappelé sur la figure 7 :

1. traitement des valeurs perturbatrices des paramètres de forages : valeurs aberrantes et régularisation ;
2. analyse en composante principale pour faire apparaître une variable globale A ;
3. découpage de cette variable ;
4. interprétation sous la forme de deux logs figurés.

Et ainsi une dernière observation : ce schéma décrit un processus de traitement lourd.

#### Remerciement

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une thèse financée par Scétauroute que nous remercions pour son soutien actif.

## Bibliographie

Bourget M. – *Contribution géostatistique à l'étude des diagraphies instantanées*, Thèse de docteur en mécanique, Université de Bordeaux I, décembre 1993.

Bourget M., Crémoux F. – *Entropy tool and drilling response*, ICOSSAR'93, 6th International Conference on Structural

Safety and Reliability, Innsbruck, août 1993.

Crémoux F., Morlier P. – *Une modélisation de l'effet d'échelle en géotechnique*, Colloque René Houpert, Nancy, septembre 1992.

Detournay E., Defourny D. – A phenome-

nological model for the drilling action of drag bits, *Int. Journ. of Rock Mech. and Min. Sciences*, Vol. 29, p. 13-23, 1992.

Girard H. – *Contribution à l'exploitation des paramètres de forage en génie civil*, Thèse de docteur ingénieur en génie mécanique, Université de Bordeaux I, 1985.