9e SESSION D'ETUDE

SUR

LES TECHNIQUES DE SAUTAGE

" EXPLOITATION DES PARAMETRES DU FORAGE POUR FINS DE CARACTERISATION GEOLOGIQUE ET REALISATION DES TRAVAUX "

par:

Maurice Garzon, ing.
Géocontrol ltée

9e SESSION D'ETUDE
SUR
LES TECHNIQUES DE SAUTAGE

EXPLOITATION DES PARAMETRES DE FORAGE DE LA METHODE ENPASOL NUMERIQUE POUR LA CARACTERISATION GEOLOGIQUE ET LE CONTROLE DES TRAVAUX

HUGHES GIRARD
CEMAGREF, Bordeaux, France
PIERRE MORLIER
Université de Bordeaux 1, France
OLIVIER PUVILLAND
SOLETANCHE Entreprise
MAURICE GARZON
Consultant Géocontrol Ltée

Représentation au Canada par Consultant Géocontrol Ltée
2725, Paulus, Ville St-Laurent, Québec, H4S IE9 (514) 337-5362

Octobre 1986

RÉSUMÉ

Des cas d'applications courantes des diagraphies instantanées des paramètres de forage sont présentés. Ils illustrent la diversité des utilisations: détection des cavités, reconnaissances, planification et contrôle des travaux d'injection, choix des méthodes d'excavation, prévision d'échéancier et de coût d'exécution.

Les résultats d'une étude expérimentale en vue du calibrage de la méthode ENPASOL Numérique (SOLETANCHE Entreprise) pour quantifier la résistance du milieu foré sont exposés. Cette étude exécutée sur 6 plots d'essais de 2 m d'épaisseur (mortiers et bétons) et 2 blocs rocheux, à l'aide d'une foreuse de puissance moyenne, permet de proposer pour des forages en rotation, une relation entre les paramètres de forage et une "résistance au forage Rf" de la forme: $Rf = k \times \frac{P \times W}{V \times D}$. Dans les conditions de l'expérimentation et pour la gamme des matériaux testés, cette résistance Rf est assez bien corrélée avec la résistance à la compression simple.

L'application de la méthode ENPASOL Numérique à la planification du dérochement des massifs rocheux par moyens mécaniques ou par dynamitage est présentée.

PRÉSENTATION- GÉNÉRALITÉS

Introduction

Les forages destructifs avec enregistrements des paramètres (ou diagraphies instantanées) sont utilisés dans les travaux du Génie Minier et du Génie Civil depuis les années 1970, et de nombreux exemples peuvent être donnés: détection des cavités, reconnaissances, travaux d'injection, travaux d'excavation...Ce procédé a tout d'abord permis de valoriser les forages destructifs, rapides et peu coûteux, le plus souvent réalisés à d'autres fins que la reconnaissance des terrains forés.

Les enregistreurs graphiques, malgré leurs inconvénients liés à l'enregistrement sur une bande de papier unique, ont été à l'origine du développement de la méthode, l'interprétation restant toutefois essentiellement qualitative avec ce type d'appareil. Afin de remédier à ces inconvénients, SOLETANCHE Entreprise a été la première société à développer un enregistreur numérique et des logiciels informatiques associés; cet enregistreur (ENPASOL Numérique) comporte une centrale informatisée de saisies de mesures et stocke les données sur cassettes magnétiques. Ce type d'appareil permet d'envisager de nouveaux développements susceptibles de faire de la méthode un essai de reconnaissance "in-situ" à part entière. Toutefois, le traitement des données est encore largement empirique, et l'objectif de la présente étude est d'améliorer la connaissance et l'exploitation des paramètres de forage en vue d'une interprétation quantitative des résultats.

Pour cela, on a recherché dans le domaine pétrolier, où l'enregistrement des paramètres de forage est en usage depuis longtemps, les enseignements qui pourraient être adaptés aux travaux de construction ou d'excavation. À la suite de ces recherches bibliographiques et d'une première étude sur des chantiers de reconnaissances sur des matériaux naturels hétérogènes, il est apparu nécessaire de réaliser une campagne d'essais à l'aide de forages en grandeur réelle sur des matériaux artificiels, dans des conditions aussi bien contrôlées que possible, afin d'étudier le rôle et l'interaction des différents paramètres, d'examiner l'influence de la machine de forage, de rechercher des relations entre les paramètres de forage et les caractéristiques géotechniques des terrains forés.

Foreuse et outils utilisés- Processus de forage

La présente étude concerne essentiellement les forages destructifs en rotation réalisés à l'aide d'outils "tricônes" car ce procédé de forage qui permet de traverser tous les types de terrains, utilisé très fréquemment en Génie Civil ou Minier, paraît actuellement donner les meilleurs résultats pour l'exploitation des paramètres de forage.

- paramètres liés au matériel: machine, tiges, outil,...,

- paramètres liés au fonctionnement de la foreuse: poids sur l'outil, vitesse de rotation, débit et éventuellement nature du fluide de forage; ce sont les trois éléments essentiels sur lesquels le foreur peut interve-

nir dans la limite des possibilités du matériel,

- paramètres liés à la réponse du terrain:vitesse d'avance, couple, pression du fluide de forage, vibrations réfléchies par le train de tiges; ces paramètres sont fonction, pour des conditions de forage données, de la "résistance au forage" du sol.

Enregistrement des paramètres de forage

Enregistreurs analogiques (graphiques)

En Génie Civil, les premiers appareils d'enregistrements sont apparus dans les années 1970; le nombre de paramètres mesurés ne dépassait pas 4, et il s'agissait d'un enregistrement graphique sur bande de papier unique. Malgré leurs inconvénients (un seul document fragile et difficile à reproduire, choix des échelles à priori plus ou moins bien adapté, interprétation délicate, traitement des nombreuses données sur calculateurs pratiquement impossible...), les enregistreurs graphiques ont permis de démontrer tout l'intérêt des diagraphies instantanées:

- valorisation des forages destructifs réalisés en cours de travaux (injections, tirants,...) par la détection possible des principales couches de terrain,

- utilisation possible des forages destructifs, rapides et peu coûteux, pour la reconnaissance des terrains, à condition de réaliser un étalonnage sur quelques forages carottés.

Enregistreurs numériques (sur cassette magnétique)

Les résultats très encourageants obtenus avec les appareils analogiques ont conduit SOLETANCHE Entreprise au développement de l'ENPASOL Numérique en 1981.

Les enregistreurs numériques suppriment la plupart des inconvénients des enregistreurs graphiques et apportent de nombreux avantages:

- nombre de paramètres stockés plus important (stockage sur cassette magnétique),

- précision nettement améliorée (profondeur et valeurs des paramètres),

- possibilités de traitements des données sur micro-ordinateurs (combinaisons de paramètres, traitements statistiques,...),

- possibilités de représentations graphiques aussi variées que nécessaires (choix des échelles, des paramètres représentatifs,...),

- utilisation de programmes de traitement et d'interprétation automatique permettant de relier les paramètres de forage soit à la nature des terrains et à leurs caractéristiques, soit aux améliorations apportées par les traitements de sol.

Présentation de l'ENPASOL Numérique (figure 1)

L'étude expérimentale a été réalisée avec l'ENPASOL (pour ENregistrement des PAramètres SOLetanche). Cet appareil permet d'enregistrer sur cassettes magnétiques huit paramètres indépendants avec une résolution de 0,5 cm en profondeur. Il se compose essentiellement:

- d'une "électronique" qui assure la saisie et le contrôle des données analogiques fournies par les capteurs et les convertit en données numériques

- d'un micro-ordinateur chargé du stockage des données numériques sur la cassette magnétique et

- d'un enregistreur graphique qui permet de visualiser sur le terrain, au cours du forage, quatre paramètres à savoir la vitesse d'avance visualisée obligatoirement plus trois paramètres sélectionnés par l'utilisateur parmi les huit paramètres.

Les huit paramètres mesurés habituellement sont:

. P1 : Pression du fluide de perforation, Pf,

. P2 : Couple de rotation, C,

. P3 : Poussée sur l'outil, Pression P O

. P4 : Vitesse d'avance,V,

. P5 : Vitesse de rotation, w,

. P6 : Retenue sur l'outil, Pression Pr,

. P7 : Vibration réfléchie (VIBRASOL),

. P8 : Temps de perforation pour 5 mm de profondeur,T.

Le couple de rotation est mesuré à l'aide d'un capteur de pression placé sur le circuit hydraulique de la machine, à l'entrée du moteur hydraulique.

De même, les mesures de la poussée sur l'outil et de la retenue correspondent aux pressions hydrauliques régnant de part et d'autre du piston dans le vérin d'avance. La mesure de la retenue est nécessaire pour calculer la poussée réelle sur l'outil.

L'avance est déterminée à l'aide d'une cablette qui transmet les mouvements de la tête du train de tiges à un tambour. Les mouvements de rotation de ce tambour permettent de mesurer la vitesse d'avance instantanée (un dispositif interdit la saisie des données lors des mouvements ascendants de l'outil: nettoyage du forage, rebondissements sur terrains durs) et déclenchent la prise de mesure tous les 5 millimètres de profondeur. Il est possible de réduire l'intervalle de prise de lectures par modification du programme de saisie des données.

Le VIBRASOL mesure les accélérations en tête du train de tiges; il est surtout réservé aux forages en percussion et roto-percussion.

Les valeurs des paramètres sont stockées brutes sur les cassettes magnétiques. Une cassette permet de stocker les mesures correspondant à environ 100 mètres de forage, à raison de 8 mesures tous les 5 millimètres de profondeur. Les valeurs brutes stockées peuvent être transformées,lors du traitement par micro-ordinateur de bureau, en valeurs réelles (poussées, couple,...) en fonction des constantes propres à la foreuse utilisée. (Figure 2)

DOMAINES D'EMPLOIS COURANTS DES DIAGRAPHIES INSTANTANÉES

Les quelques exemples donnés ci-après,tirés pour la plupart de publications, permettent de préciser les domaines d'emplois actuellement reconnus des diagraphies instantanées mais aussi les limites de la méthode. Ces exemples ne représentent bien entendu qu'une infime partie des chantiers sur lesquels les diagraphies instantanées ont été utilisées depuis leur introduction en Génie Minier ou Civil. (Photos 1 et 2).

Recherches de cavités

C'est le domaine d'utilisation priviligié des diagraphies instantanées. Dans ce cas, le paramètre essentiel est évidemment la vitesse d'avance de l'outil: très faible dans le rocher encaissant,elle augmente considérablement à la rencontre d'une fissure ou d'une cavité; la valeur de la vitesse atteinte peut également renseigner sur la nature du remplissage éventuel. Dans un vide, la vitesse atteint une valeur limite fonction du système hydraulique de la machine.

Les autres paramètres permettent alors le contrôle du fonctionnement du forage et peuvent apporter des informations complémentaires:

- la poussée sur l'outil chute très rapidement,
- les mesures de la pression du fluide, des vibrations réfléchies et du couple réagissent également en fonction de la nature du remplissage.

Les diagraphies instantanées permettent, dans le rocher, la détection d'anomalies de dimensions de l'ordre de 1 à 2 cm, (Pfister,(1)).On obtient plus de précision en augmentant la fréquence des lectures.

Reconnaissances

Interprétations qualitatives à partir d'enregistrements graphiques

Durant le forage, chaque changement de couche se traduit par la variation d'un ou plusieurs paramètres; à la plupart des formations correspond un paramètre prépondérant, mais ce paramètre peut être le même pour deux formations différentes (par exemple, deux types de rochers, ou marne et argile).

Il est donc indispensable pour préciser l'interprétation des diagraphies instantanées sur un site donné d'effectuer un étalonnage préalable en réalisant au moins un forage destructif avec enregistrement à proximité immédiate d'un sondage carotté. En l'absence de sondage carotté d'étalonnage, il n'est pas possible de définir la nature des formations; mais l'image du terrain donnée par les diagraphies instantanées permet de connaître son homogénéité, de choisir des niveaux d'essais pontuels ou de prélèvement d'échantillons et de dégager des "tendances".

Sur un site donné, l'observation de 4 paramètres (amplitudes et allures des tracés), et l'examen d'un sondage carotté étalon permettent dans la majorité des cas de distinguer les principaux types de terrains. Parmi les nombreux exemples publiés, on peut citer l'article de Richez(2)

qui présente plusieurs cas d'application (reconnaissances géologiques et recherches des passages injectables), dont celui de la reconnaissance du site de la centrale nucléaire (E.D.F.) de Cruas-Meysse (1978).

Premières interprétations quantitatives à partir d'enregistrements graphiques

L'intérêt des graphiques obtenus a conduit rapidement un certain nombre d'utilisateurs à valoriser leur exploitation en essayant d'en tirer des informations quantitatives basées sur des relations empiriques. (Bru et al. (3),Hamelin et al.(4), Flepp et al.(5)).

Mais une telle utilisation des graphiques suppose un travail manuel laborieux et très long et nécessite une simplification des tracés; ceci a conduit, en vue d'une exploitation plus rationnelle de la quantité importante d'informations recueillies lors des diagraphies instantanées,à la construction des enregistreurs numériques.

Apports des enregistreurs numériques pour l'interprétation

- sorties automatiques de coupes géologiques:

Dans des cas simples, le dépouillement automatique des données est possible; selon Pfister et al(6),"le programme, sur la base de tables de décision, détermine seul le nom de la formation et l'imprime automatiquement ".

- combinaison de paramètres:

Comme cela a déjà été souligné, l'intérêt essentiel des données numériques est de se prêter aisément à tous les calculs sur ordinateur et notamment aux combinaisons de paramètres.

Actuellement, 3 combinaisons empiriques utilisées par SOLETANCHE Entreprise se sont révélées être plus particulièrement intéressantes (Pfister et al, (6)).

- travail du couple de forage:

$$D = \frac{C \times w}{V}$$

C = couple d'entraînement,
V = vitesse d'avance,
w = vitesse de rotation.

ou encore, D = C x w x Dt avec Dt = temps nécessaire pour forer 5 mm.

Cette combinaison s'est révélée plutôt adaptée aux terrains durs.

- indice d'altération:

$$A = 1 + \frac{P}{P_o} - \frac{V}{V_o}$$

avec P = poussée sur l'outil:
Poussée - Retenue + Poids des tiges
V = vitesse d'avance instantanée
P_o, V_o = maximum théorique de P et V

- résistance au forage (Somerton (7))

$Sd = P\sqrt{\frac{w}{V}}$ (P, w et V étant définis comme ci dessus)

Exemples d'applications de l'ENPASOL Numérique

- Centrale nucléaire de Civaux (Hamelin (4),Pfister (1))

Sur ce site un plot d'essai a été réalisé pour choisir une méthode d'injection pour la consolidation de la fondation naturelle de calcaire et pour mettre au point une méthode de contrôle de la performance réalisée par l'injection.

Le socle naturel est constitué d'un calcaire jurassique sévèrement fracturé et affecté par érosion karstique, avec présence de cavités. Les objectifs de l'injection étaient de réduire au minimum la présence des zones sous consolidées et d'augmenter la résistance et la capacité globales du massif rocheux.

L'ENPASOL Numérique a été utilisé intensivement durant le programme d'essai d'injection et s'est révélé d'une grande efficacité à la fois pour caractériser la formation complexe du rocher ainsi que pour assurer un contrôle étroit de la performance achevée par l'injection.

L'utilisation des paramètres combinés A et B et de la pression du fluide Pf a permis de classer le substratum calcaire en six catégories (C0 à C5), ceci automatiquement à partir des paramètres enregistrés, sur la base de seuils donnés par le géologue au vu d'un sondage carotté étalon. Un résultat de ce traitement automatique est montré sur la figure 3.

L'analyse comparative des mesures de l'ENPASOL Numérique durant les forages destructifs réalisés pour les phases subséquentes d'injection ou en fin de travaux, a permis d'établir la performance de la consolidation du rocher réussie par l'injection et la qualité finale du roc traité.

L'exploitation des données de l'ENPASOL pour le choix des mélanges de coulis, la planification des pressions et des volumes d'injection et le contrôle de la performance réalisée constituent des applications logiques puisqu'elles utilisent avantageusement les nombreux forages destructifs réalisés pour l'exécution des injections. L'addition de quelques forages supplémentaires après la dernière injection permet d'établir l'amélioration du terrain à la fois qualitativement et quantivement. (Jendoubi et al, (8)). (Figures 4 et 5)

- Opéra Bastille, Paris.

Durant la réalisation d'une paroi moulée profonde à l'Hydrofraise (SOLETANCHE), des strates de calcaire siliceux très dur et abrasif ont été rencontrées à diverses profondeurs. Cette roche très dure a considérablement ralenti la construction des panneaux et causé l'usure rapide des outils de coupe.

Suite au développement de ces difficultés, l'ENPASOL Numérique fut

requis sur le chantier et des forages destructifs par rotation avec enregistrement continu des paramètres de forage étaient entrepris sur l'axe de la paroi projetée. Le traitement des données a permis de préciser rapidement la puissance, la position et les caractéristiques des strates dures. Une corrélation établie entre la dureté du milieu et les taux d'avancement et d'usure des fraises à partir des performances réalisées durant l'excavation d'un panneau témoin a permis de prédire rapidement un nouvel échéancier de réalisation et les coûts revisés du contrat en utilisant le logiciel des traitements statistiques de l'ENPASOL Numérique.

- Fontvieille, Monaco (Hamelin et al. (9))

Dans cette région séismique d'intensité moyenne, le potentiel de liquéfaction des sables devait être déterminé et diverses méthodes de traitement ont été mises en oeuvre pour réduire ce potentiel à un seuil tolérable. Une compaction statique horizontale par injection a été employée pour augmenter la densité en place des dépots de sables et le coefficient de poussée des terres au repos.

L'ENPASOL Numérique a été impliqué pour respectivement: (Figure 6)

. établir un paramètre combiné de forage "β" présentant une corrélation satisfaisante avec le module pressiométrique E.

. concevoir les quantités à injecter en utilisant le paramètre β comme critère principal, et

. contrôler l'amélioration des sols au cours des phases successives d'injection, de façon à obtenir une valeur du paramètre β correspondant à un module pressiométrique supérieur à 80 bars.

- Métro de Caracas

Plusieurs unités d'ENPASOL Numérique sont actuellement utilisées par l'entreprise conjointe SOLETANCHE-BACHY pour la planification et le contrôle de la performance des injections de la couronne des sols autour de la structure du tunnel en construction pour le Métro de Caracas.

La cartographie spatiale des sols pour les fins du traitement autour du tunnel est rapidement dérivée des données produites par l'ENPASOL Numérique à partir des auscultations des paramètres de forage réalisées à même le réseau des forages exécutés pour l'injection.

Des corrélations relativement intéressantes ont été observées entre les profils des paramètres combinés de l'ENPASOL Numérique et les résultats des essais de pénétration standard dans le cas de forages adjacents.(Figure 7) On se souviendra que l'essai de pénétration standard présente une moyenne de résistance à l'avancement de la cuillère fendue sur une pénétration de 30 cm tandis que les résultats de l'ENPASOL sont ponctuels (0.5 cm) et peuvent être groupés en couches homogènes d'épaisseurs variables en fonction des caractéristiques des matériaux traversés.

- Projet de terrassement- Moyen Orient

La planification des méthodes d'excavation sur un projet couvrant une superficie d'environ 5 km x 5 km a été réalisée à l'aide de forages équipés à l'ENPASOL Numérique. Il était essentiel pour ce projet d'établir les types

et nombres de pièces d'équipement requis pour la réalisation des travaux et de zoner les secteurs susceptibles d'être terrassés par les méthodes les plus rentables afin de minimiser les pertes et délais associés aux impossibilités d'exécution ou au contraire le recours à une méthode d'excavation trop onéreuse vis à vis des milieux plus faibles.

Suite à une calibration sur le site des données de l'ENPASOL à la rippabilité du rocher, les enregistrements provenant d'un réseau de forages rapides sur le site furent systématiquement traités et permirent de préciser les zones à excaver par pelle, rippage ou dynamitage.

Les applications et les résultats présentés ci haut sont témoins de la performance pratique de l'ENPASOL Numérique à générer des données représentatives et fiables sur les propriétés et les caractéristiques des terrains. Des corrélations intéressantes ont aussi été obtenues entre les résultats d'essai de pénétration du cône CPT et les profils de forage à l'ENPASOL Numérique.

L'intérêt croissant suscité en Génie Civil et Minier par l'enregistrement des paramètres de forage a encouragé l'Université de Bordeaux I (France) à entreprendre une recherche expérimentale sur le sujet. Les résultats principaux sont présentés ci-après.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

But

L'étude expérimentale du procédé "ENPASOL" sur des matériaux artificiels de caractéristiques connues avait pour but:

- d'étudier l'influence des différents paramètres sur le forage,
- d'examiner les interactions éventuelles entre les différents paramètres et
- de rechercher des relations entre ces paramètres et les caractéristiques des matériaux forés en vue d'une exploitation quantitative des paramètres de forage.

Matériaux retenus

La phase expérimentale de l'étude s'est déroulée au début de l'année 1985. 6 matériaux et 2 roches naturelles ont été soumis aux essais réalisés avec une seule foreuse.

La caractéristique principale de ces matériaux utilisée dans la suite de l'étude est leur résistance à la compression simple à 28 jours (éprouvettes 16 x 32 cm), donnée par le tableau ci-après:

PLOTS	1	2	3	4	5	6	7	8
MATÉRIAU	Mortier	Mortier	Mortier	Béton	Béton	Béton	Roche	Roche
Rc moyenne (bar)	7.3	66	232	234	318	237	520	650

Dimensions des plots

Pour des raisons de facilité de mise en oeuvre et de réalisation des forages, ces matériaux (1 à 6) ont été coulés dans des tranchées de 2,00 m de profondeur dont les dimensions utiles sont (0,90 m x 3,70 m) pour les plots 1 à 4 et (0,90 m x 2,10 m) pour les plots 5 et 6. Ces dimensions ont été fixées pour avoir des espacements entre les forages de 0,40 m.

Les blocs de roches, de formes irrégulières, ont des dimensions comprises entre 0,50 et 1,00 m.Ils ont été également placés dans des tranchées et immobilisés par du béton.

Foreuse utilisée

La foreuse utilisée lors de l'étude expérimentale est une foreuse " Mobile Drill", type B 50; c'est une machine de puissance moyenne (100 CV).

Compte-rendu de la campagne d'essais

Les forages ont été exécutés 28 jours après la réalisation des plots. Pour chaque plot, on a fait varier les deux paramètres liés au fonctionnement de la machine sur lesquels le foreur peut intervenir, c'est-à-dire, la poussée et la vitesse de rotation; en outre, plusieurs diamètres d'outils ont été testés.L'influence de l'usure de l'outil sur les paramètres de forage a été vérifiée.

POUSSÉE	VITESSE DE ROTATION	DIAMÈTRE DE L'OUTIL
Pb 1,2 t	wx 60 t/mn	outil 1 : D = 2"7/8
Pc 1,8 t	wy 120 t/mn	outil 2 : D = 3"1/2
Pd 2,4 t	wz 180 t/mn	outil 3 : D = 4"1/2

Résultats obtenus

Les résultats bruts obtenus sont donc stockés sur des cassettes magnétiques sous forme numérique.

Le programme de tracé assure les fonctions suivantes:

- lecture et impression de l'identification du forage,
- mise à l'échelle des différents paramètres, calcul éventuel des valeurs réelles à partir des constantes de la foreuse utilisée.
- choix des paramètres à représenter,
- calcul et représentation possibles de combinaisons de paramètres,
- calcul éventuel de valeur moyenne des paramètres sur un nombre de pas de profondeur donné (Np).

Pour cette étude, il a été choisi de représenter les valeurs brutes de 6 paramètres seulement car la retenue et la pression du fluide étaient négligeables. Les variations des 6 paramètres retenus ont ainsi été tracés en fonction de la profondeur (diagraphies) pour les 71 forages réalisés

(soient 114 mètres forés). La figure 8 est un exemple de graphique obtenu pour un forage

En vue de l'exploitation des résultats de ces forages, des niveaux (ou tranches) homogènes pour les 6 paramètres ont été déterminés visuellement sur les tracés.

Un deuxième programme a alors permis pour chaque niveau sélectionné et pour chaque paramètre, de calculer:

- la valeur moyenne (Moy.),
- l'écart-type (Eq)
- un indice d'homogénéité (Ih),
- les valeurs maximum et minimum (Max et Min),

de tracer les limites des différents niveaux et de stocker les résultats sur cassettes. Par exemple, trois niveaux ont été retenus pour le forage 134 (Figure 8).

EXPLOITATION DES RÉSULTATS (Girard (10))

Présentation de la méthode

Les données à traiter correspondent aux 195 "tranches" de matériaux homogènes sélectionnées au vu des diagraphies, sur lesquelles ont été calculées les valeurs moyennes des 6 paramètres retenus. Pour chaque tranche, le diamètre de l'outil utilisé et la résistance à la compression simple du plot intéressé sont ajoutées comme données supplémentaires.

Un troisième programme a été mis au point sur le micro-ordinateur HP 9835 A pour traiter ces données (195 "tranches", 8 données/tranches); ce programme effectue les tâches principales suivantes:

- lecture des données, mise à l'échelle, calcul de valeurs "réelles" (poussée et couple par exemple), prise en compte éventuelle de l'usure. Les valeurs réelles de la poussée et du couple ont été calculées à partir des mesures de pression dans les circuits hydrauliques de la foreuse et des caractéristiques de ces circuits donnés par le constructeur. Les valeurs de poussées ont été contrôlées à l'aide d'un dynamomètre; les valeurs du couple réel estimées à partir de la pression à l'entrée du moteur hydraulique restent relativement imprécises.
- calculs de régressions linéaires de Y en X; X et Y peuvent être soit un des 8 paramètres simples, soit une combinaison quelconque (ou fonction mathématique) des 8 paramètres de base.
- représentation graphique (X,Y) des relations obtenues.

Ce programme a été utilisé pour choisir un paramètre "vitesse d'avance", étudier l'influence de l'usure de l'outil et des divers paramètres et rechercher une relation entre les paramètres de forage introduisant la résistance au forage.

Choix de la vitesse d'avance

Le paramètre Vt (Vt = 5/T; vitesse moyenne sur 5 mm) a été préféré à V (vitesse instantanée) comme mesure de la vitesse d'avance, car pour les matériaux durs testés Vt est beaucoup plus homogène que V qui présente des variations très importantes. Une bonne corrélation a par ailleurs été trouvée entre Vt et V.

Prise en compte de l'usure de l'outil

Afin d'étudier l'influence de l'usure de l'outil sur la vitesse d'avance, deux forages voisins ont été effectués dans les mêmes conditions (P = Pc, w = wy) sur le plot 4, l'un avec un outil usé (forage 64, outil 2a) et l'autre avec un outil neuf (forage 65, outil 2b).

La figure 9 relative au plot 4 (Vt = f(P)) illustre les résultats obtenus sans prise en compte de l'usure de l'outil. L'examen des forages 64 et 65 montre que le rapport entre la vitesse obtenue avec l'outil usé (64) et la vitesse mesurée avec l'outil neuf (65) est égal à 0,45 (pour les valeurs moyennes). Pour l'outil 2a, l'usure avait réduit la longueur des dents de 8 mm (longueur initiale) à 2 mm, soit un degré d'usure U de 75%:
U = (ho-h)/ho = (8 - 2)/8.

Au vu de ce résultat, il paraît donc indispensable de tenir compte de l'usure de l'outil pour l'exploitation des résultats. Pour cela, nous avons retenu une méthode simplifiée, inspirée de la solution proposée par Choquin (11) qui a été définie empiriquement après de nombreux essais. Cette méthode est basée sur une évaluation de l'usure proportionnelle à la vitesse de rotation, à la poussée et au temps de forage et inversement proportionnelle au degré d'usure de l'outil. Cette méthode a été utilisée pour calculer les valeurs de Vt,V et C retenues pour la suite de l'étude (estimation des valeurs correspondant à un outil neuf).

Des observations ont été faites sur la précision des mesures de la poussée, du couple et de la vitesse d'avance; mais il apparaît que l'usure de l'outil peut avoir une influence encore plus importante, au moins dans le cas de matériaux résistants tels que ceux testés ici. La prise en compte de l'usure doit donc être envisagée pour la plupart des chantiers. La méthode présentée a l'avantage de pouvoir être facilement intégrée dans les programmes de calculs établis pour l'ENPASOL; il convient pour cela de noter sur le chantier le nombre de mètres forés avec un outil donné et de lui attribuer un coefficient final d'usure. Ce coefficient devrait être le plus souvent voisin de 0,50 (d'après nos essais et la bibliographie) lorsque le foreur estime qu'un outil est usé.

Influence des paramètres de fonctionnement (P,w,D) sur la vitesse d'avance

L'influence de chaque paramètre a été examinée séparément en maintenant les autres paramètres constants.

- Poussée sur l'outil: pour les 6 plots, on a pu constater que la vitesse d'avance augmente linéairement avec la poussée et qu'une relation de la forme Vt = k x P paraît acceptable (exemple: figure 10 qui montre les résultats obtenus pour le plot 3).

- Vitesse de rotation: les mêmes observations ont été faites pour l'influence de la vitesse de rotation de l'outil (Vt = k x w).

- Influence du diamètre: pour les plots en mortier, la relation se rapproche de la forme Vt = k/D, mais le nombre de points est beaucoup plus faible que dans les deux autres cas et on ne peut pas avoir les mêmes garanties sur la relation observée.

Influence des paramètres de fonctionnement (P,w,D) sur le couple

Les mesures du couple apparaissent plus dispersées et la gamme de variation du couple est faible, (rapport 1 à 4) lorsqu'on passe du plot le plus résistant au plot le moins résistant. Le couple est donc un paramètre beaucoup moins sensible aux variations de résistance du terrain foré que la vitesse d'avance, ce qui est confirmé par le paragraphe ci-après.

Influence de la résistance à la compression simple des matériaux forés

L'influence de la résistance à la compression simple (Rc) sur la vitesse d'avance est illustrée par la figure 11 pour différentes conditions de poussées et de vitesse de rotation (Plots 1,2,3- mortiers et 7,8 roches).

Les courbes obtenues confirment la plus grande amplitude des variations de Vt (par rapport au couple) lorsque Rc passe de 7,3 à 650 bars et l'existence d'une relation Vt = k/Rc (la pente des droites obtenues est voisine de 1).

Recherche d'une résistance au forage

L'ensemble des résultats précédents conduit à rechercher une "résistance au forage" Rf de la forme:

$$Rf = k \times \frac{P \times w}{Vt \times D}$$

Nous avons calculé pour chaque mesure une valeur Rf; le coefficient k a été déterminé en étalonnant cette relation sur le plot 3. Ce plot a été choisi car sa résistance est de l'ordre de grandeur de la moyenne des résistances des matériaux testés et il s'agit d'un plot en mortier. La valeur de k adoptée est celle qui donne à Rf, pour le plot 3, une moyenne égale à 232 bars, équivalente à la résistance à la compression de ce plot; on trouve k = 40; d'où:

$$Rf = 40 \times \frac{P(t) \times w(tr/mn)}{V(mm/s) \times D(cm)} \quad , Rf \text{ en } kg/cm^2$$

Cette relation a ensuite été appliquée aux autres plots, et les résistances aux forages obtenues peuvent être comparées aux résistances à la compression simple dans le tableau ci-après:

PLOTS	1	2	3	4	5	6	7	8
Rc	7,3	66	232	234	318	237	520	650
Rf	9,9	61,5	232	318	331	412	531	798

Ces résultats montrent que les valeurs moyennes pour Rf sont voisines de Rc pour les plots en mortier 1,2 et 3 et le plot 7 (pierre no 1); l'écart est plus important pour le plot 8 mais cette pierre no 2 est hétérogène et trois mesures de Rf (sur 5) se situent aux environs de 700 bars. Comme on pouvait s'y attendre, les écarts les plus importants sont observés sur les plots en bétons.

Pour les 6 plots, environ 70% des points se situent dans l'intervalle "Rf moyen ± 20%" et 95% dans l'intervalle "Rf moyen ± 40%", ce qui constitue un résultat intéressant en matière de reconnaissance de sols.

La figure 12 illustre ces résultats concernant la "résistance au forage" (Rf): elle confirme la corrélation assez bonne obtenue entre Rf et Rc (à noter toutefois que les 2 valeurs les plus élevées de Rf pour le plot 8 ne sont pas représentées).

APPLICATION DE L'ENPASOL AU DÉROCHEMENT

Choix des méthodes d'excavation

La caractérisation des méthodes de terrassement en fonction des propriétés des terrains, établies sur la base des paramètres de forage, s'est avérée une réussite sur le projet précité, au Moyen Orient. La résistance du milieu et sa condition de fracturation (distribution stastistique et espacement des fractures, zones altérées et autres horizons faibles) présentées par l'ENPASOL permettent d'analyser la faisabilité d'une opération d'excavation compte tenu des caractéristiques de la méthode d'exploitation (énergie fournie, géométrie des outils...)

Dynamitage

Un certain nombre d'auteurs se sont penchés sur le développement de corrélations entre le facteur énergétique et un paramètre combiné de forage pour évaluer la sautabilité d'un massif rocheux. Leighton et al (12) et Guy Le Bel (13) présentent des relations intéressantes obtenues sur plusieurs sites miniers entre l'indice RQI tel que défini ci-après et le facteur énergétique (Figures 13 et 14).

$$RQI = \frac{\text{Poids appliqué sur foret (W)}}{\text{taux de pénétration (PR)}}$$

Ces résultats sont obtenus respectivement dans le cas de sautages de périmètre et de sautages de masse. Ces auteurs reconnaissent néanmoins la nécessité de mieux contrôler plusieurs facteurs opérationnels affectant la représentativité de l'indice RQI, qui coincident incidemment avec les raisons du développement de l'ENPASOL Numérique. Les résultats empiriques rapportés par les auteurs et la confiance acquise dans la représentativité des paramètres de la Méthode ENPASOL Numérique permettent de concevoir son intervention dans l'exploitation minière pour optimiser le coût et le rendement de l'opération de dynamitage, tout en offrant un meilleur contrôle des risques d'accident par la détection des sites de conditions géologiques problématiques pour le chargement.

CONCLUSION

La méthode ENPASOL Numérique de diagraphies instantanées pour les études de terrain et le contrôle de la performance des opérations réalisées sur un milieu, a été appliquée avec beaucoup de succès sur un grand nombre de projets.

Les applications sont variées et se multiplient. La diversité des informations enregistrées sur les milieux traversés, la capacité de traitement et de transformation rapides des paramètres de forage en caractéristiques représentatives des matériaux, permettent d'établir une caractérisation adéquate du site. La méthode ENPASOL rend accessible l'exploitation des forages destructifs économiques, effectués pour l'exécution des travaux, transformant chacun d'entre eux en ligne de reconnaissance. Les possibilités d'exploitation des données numériques sont nombreuses et fort loin d'être épuisées.

Réalisée dans le but d'une exploitation quantitative des paramètres de forage, sur des matériaux artificiels, homogènes et contrôlés, la campagne d'essais décrite dans la présente étude a permis de mieux connaître le processus de forage.

Malgré les causes d'imprécision qui ont été discutées, l'étude expérimentale a également montré tout l'intérêt du procédé et a fourni des résultats très intéressants:

- l'influence des paramètres de fonctionnement (P,w,D) sur la vitesse d'avance et le couple est mise en évidence,

- la vitesse d'avance apparaît beaucoup plus sensible que le couple aux variations de résistance du terrain foré,

- une résistance au forage (Rf), de la forme:

$$Rf = k \times \frac{P \times w}{Vt \times D}$$

peut être définie; sa valeur moyenne déterminée pour chaque plot est assez bien corrélée avec la résistance à la compression simple dans le cas des mortiers et des deux pierres. La dispersion plus importante observée sur les plots en béton peut correspondre au fait que la résistance au forage prend en compte un mode de destruction différent et plus complexe que la résistance à la compression simple.

Des corrélations empiriques intéressantes ont été rapportées par différents auteurs sur plusieurs opérations minières, entre l'indice de qualité du roc RQI et le facteur énergétique pour le dérochement des massifs. Ces auteurs ont néammoins soulevé les difficultés inhérentes à la détermination de l'indice RQI à moins d'un processus plus fidèle d'enregistrement des paramètres de forage. Ainsi, la méthode ENPASOL Numérique qui permet d'établir avec précision les paramètres de forage et de dériver des indices de qualité du rocher représente donc un moyen attrayant pour l'optimisation du rendement des sautages tout en assurant une sécurité accrue des travaux grâce à un meilleur contrôle géologique.

BIBLIOGRAPHIE

1 Pfister, P., Drilling Parameters Recording in Soil Engineering. Ground Engineering, avril 1985.

2 Richez,P., L'enregistrement des paramètres de forage dans les travaux de reconnaissance et de Génie Civil. Travaux, no 552, p.77-83, 1981.

3 Bru,J., Ledoux,J.L., Ménard,J., Waschkowski E., Les diagraphies et les essais de mécanique des sols en place. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, no 26-27,p. 25-32, 1982-83.

4 Hamelin,J.P., Levallois,J., Pfister,P., Enregistrements des paramètres de forage: nouveaux développements. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, no 26-27, p.83-88,1982-1983.

5 Flepp,G., Goguel,B., Utilisation de corrélations entre paramètres pour une reconnaissance de site plus efficace au barrage du CHELIFF (Algérie). Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, no 26-27, p. 71-75, 1982-1983.

6 Pfister, P., Hamelin, J.P., Enregistrement numérique des paramètres de forage. 11e Congrès International de mécanique des sols, San Francisco 1985.

7 Somerton, W.H., A Laboratory Study of Rock Breakage by Rotary Drilling. Journal of Petroleum Technology, mai 1959.

8 Jendoubi,F., Girard,H., Morlier, P., Contrôle d'injection par diagraphies instantanées. Neuvième Colloque International de Diagraphies, Paris 1984.

9 Hamelin,J.P., Pfister,P., Garzon,M., Enpasol Method in Marine Geotechnical Engineering. Third Canadian Conference on Marine Geotechnical Engineering, St John's, Newfoundland, p.233-251, 1986.

10 Girard, H., Contribution à l'exploitation des paramètres de forage en génie civil. Thèse no 388, Université de Bordeaux I, 1985.

11 Choquin, A., Paramètres et contrôle du forage. Ed. Technip,1982.

12 Leighton, J.C., Brawner,C.O., Stewart,D., Development and Controlled Blasting Powder Factors. C.I.M. Bulletin, août 1982.

13 Le Bel,G., Étude sur une relation entre l'indice RQI et le facteur énergétique dans les mines à ciel ouvert. 8e Session d'Étude sur les Techniques de Sautage, Université Laval, Québec 1985.

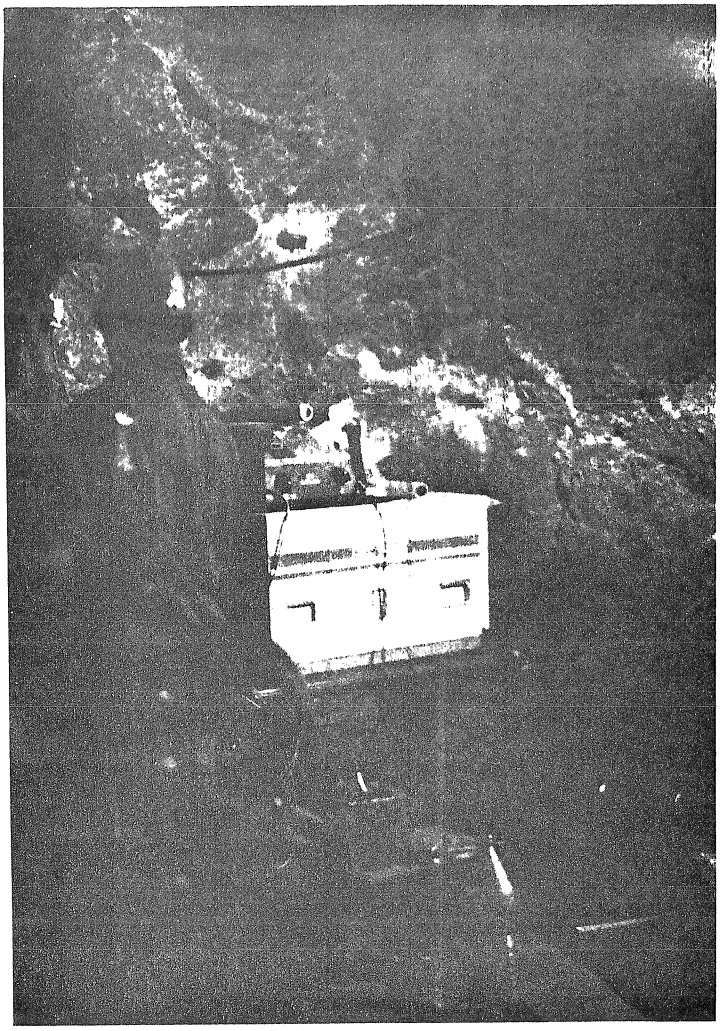


Photo 1- Moutiers, Italie
Reconnaissances des travaux d'injection en tunnel.
(Rodio, Milan).

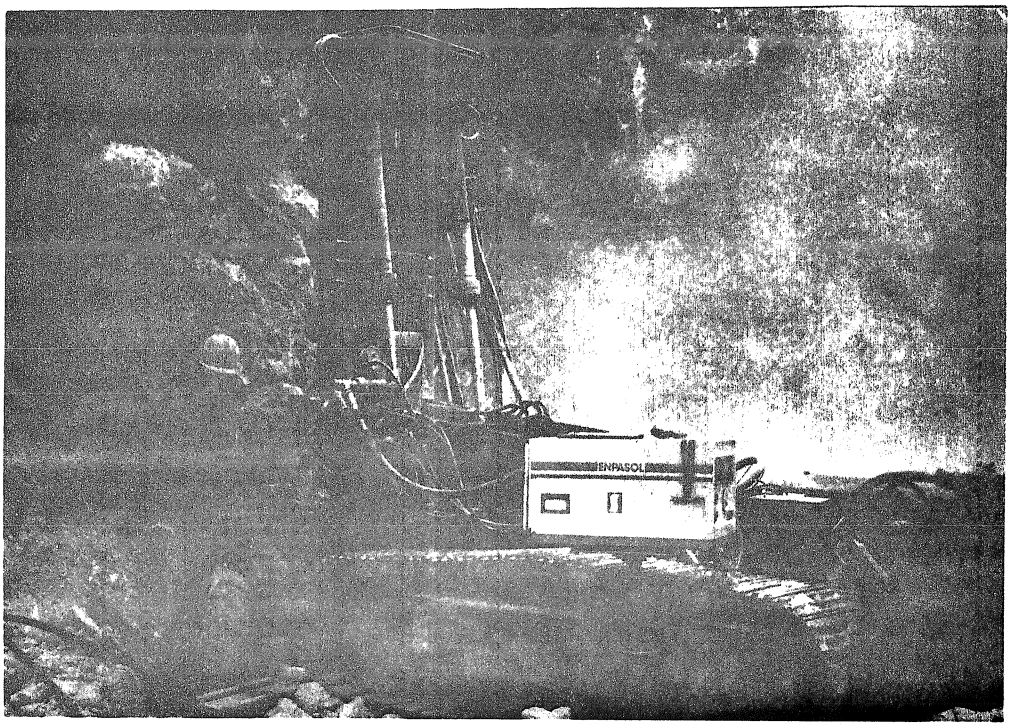


Photo 2- Monaco- Georges Sand.
Reconnaissance pour micropieux injectés dans formation de calcaire fracturé.

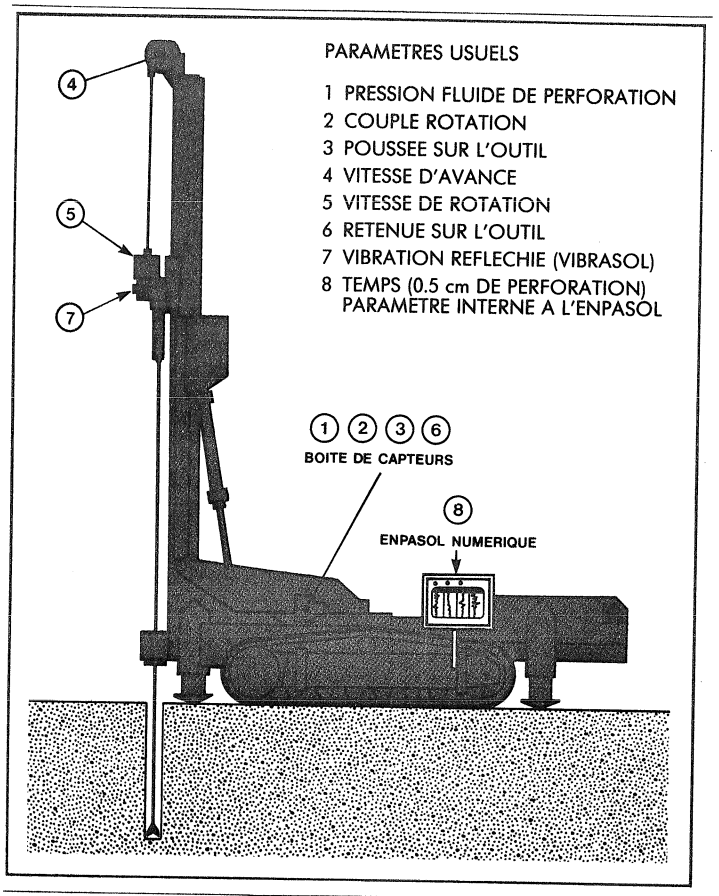
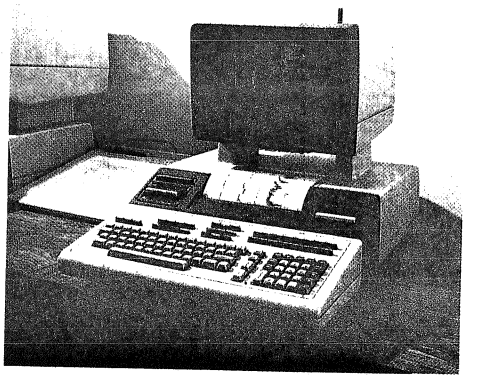


Figure 1-
Foreuse équipée de l'ENPASOL Numérique et traitement des données.



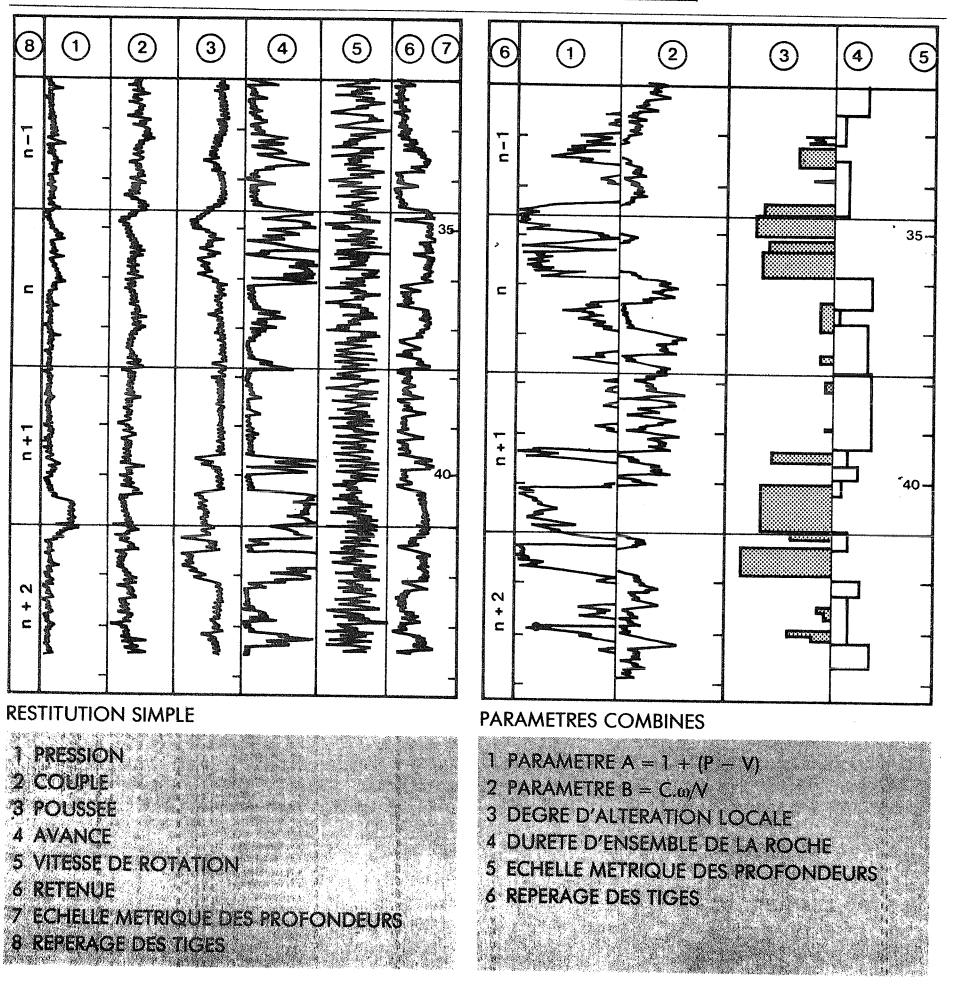
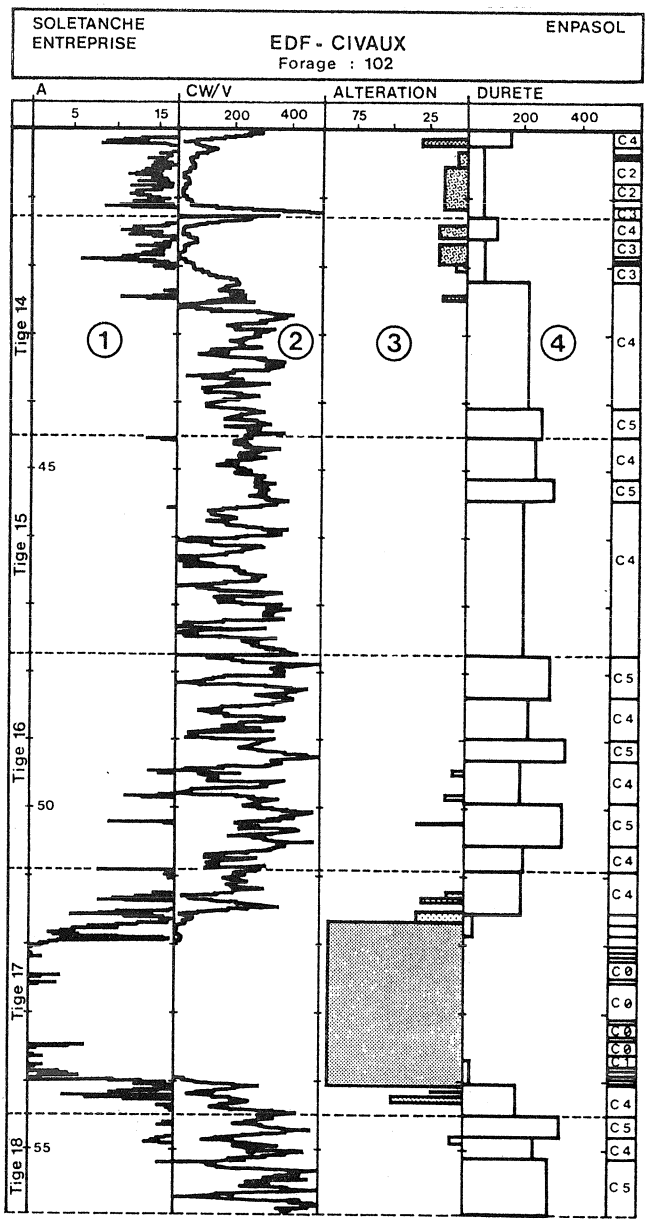


Figure 2-
ENPASOL Numérique
Tracés simples et combinés.



Définition des types de sols

Type	Description	%	Paramètre B	Pression Pf
CØ	Terrain décomprimé (chute d'outil)	4,9	Inférieur à 10	Faible
C1	Terrain décomprimé (chute d'outil) avec bourrage argileux	1,44	Inférieur à 10	Élevée
C2	Calcaire fragmenté	27,63	10 à 100	Faible
C3	Calcaire fragmenté avec joints argileux	1,27	10 à 100	Élevée
C4	Calcaire morcelé	54,75	100 à 250	
C5	Calcaire massif sain	10,02	Supérieur à 250	

Figure 3- Civaux. Interprétation par l'ordinateur à partir des paramètres enregistrés. (Hamelin et al,(4)).

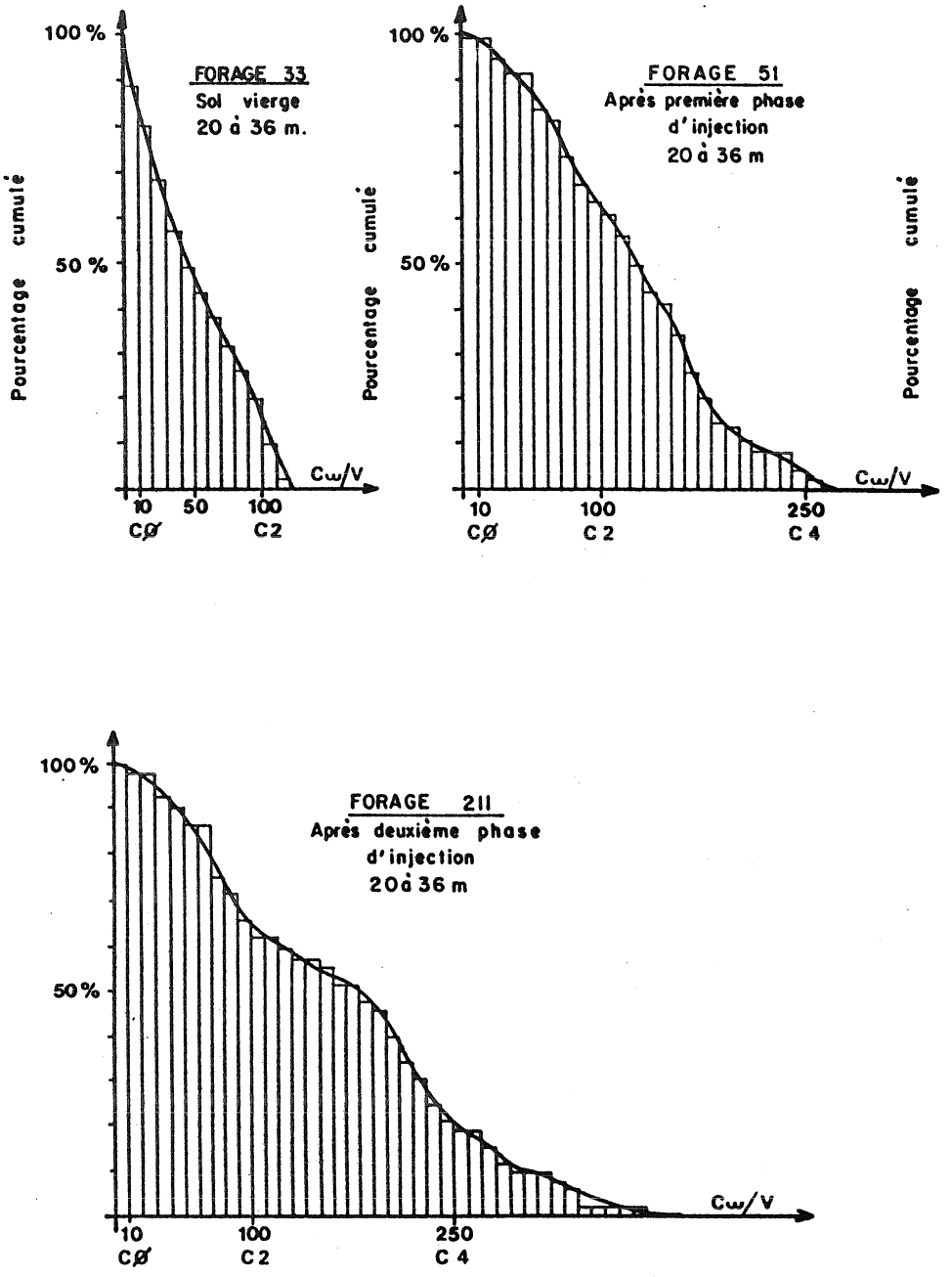
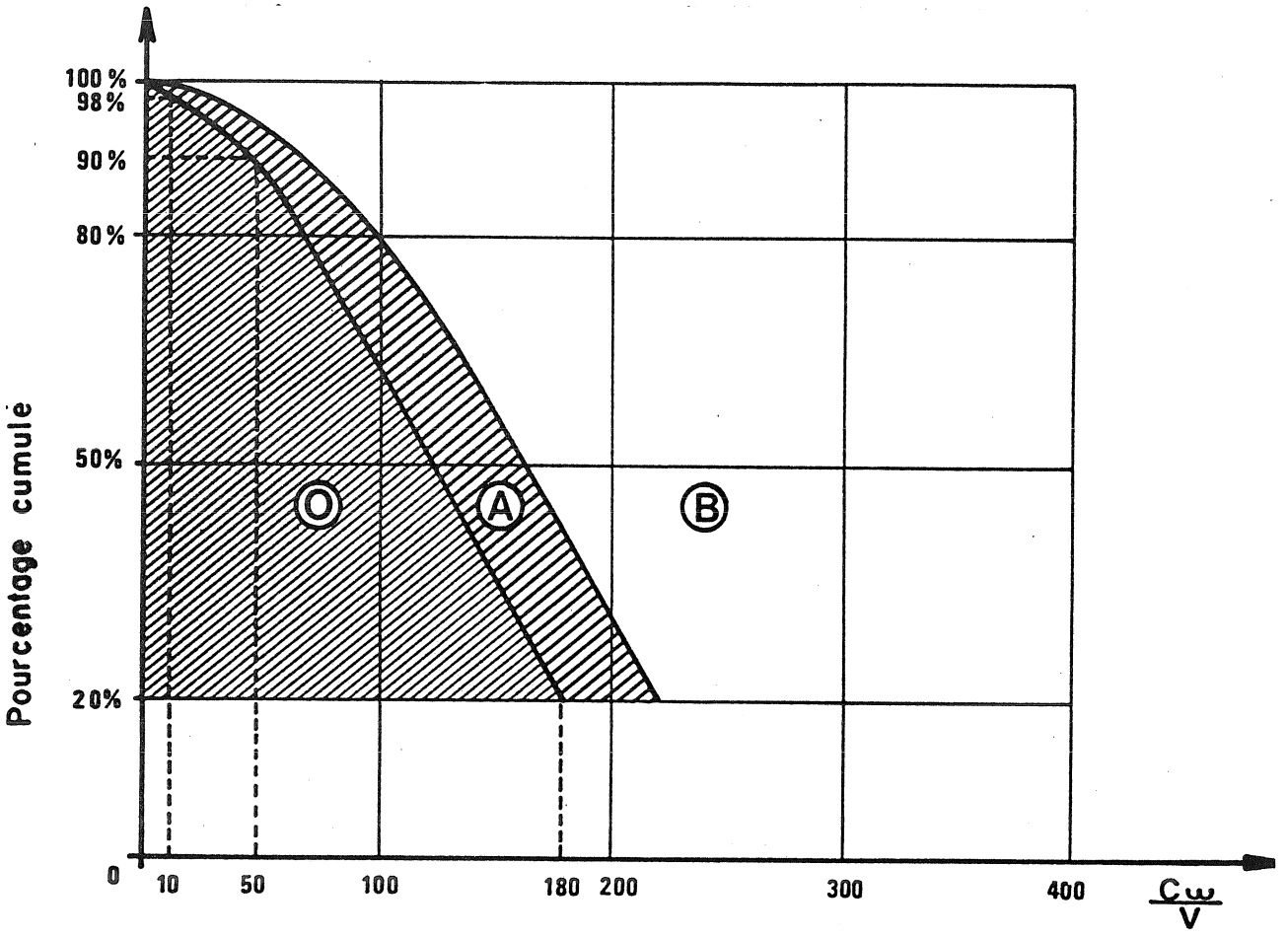


Figure 4- Civaux- Distribution du paramètre $\frac{C \times w}{V}$ des forages adjacents, avant et après les phases successives d'injection- (Pfister,(1))



Zone O : Injection insuffisante

Zone A : Injection satisfaisante

Zone B : Injection excellente

Figure 5- Civaux- Critères d'acceptation des injections (Pfister(1))

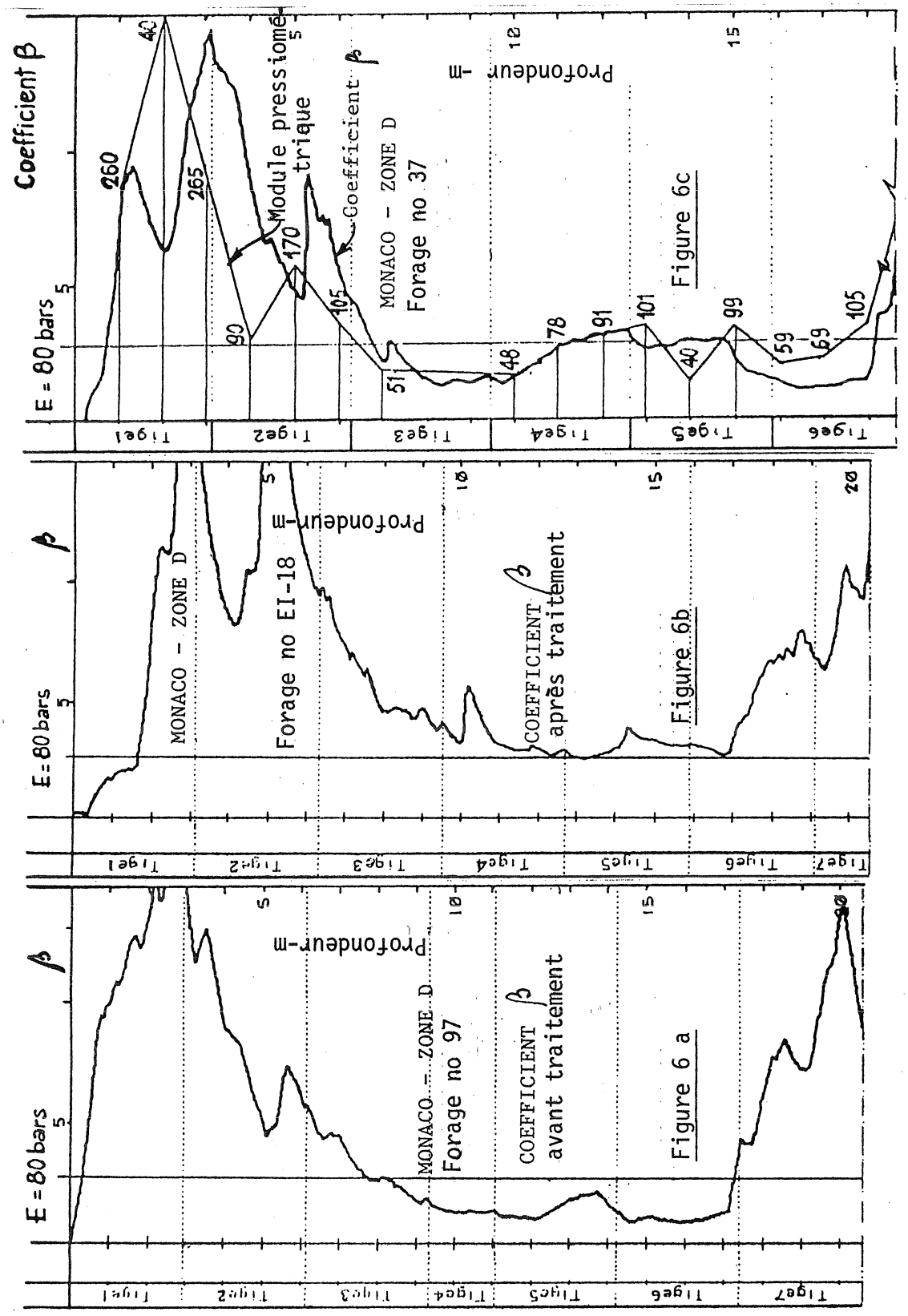


Figure 6- Fontvieille, Monaco- Zone D- (Hamelin et al,(9))
Contrôle de la performance du traitement (Fig. 6a et 6b)
Correlation linéaire entre le coefficient β (ENPASOL) et le module pressiométrique E. (Fig.6c)

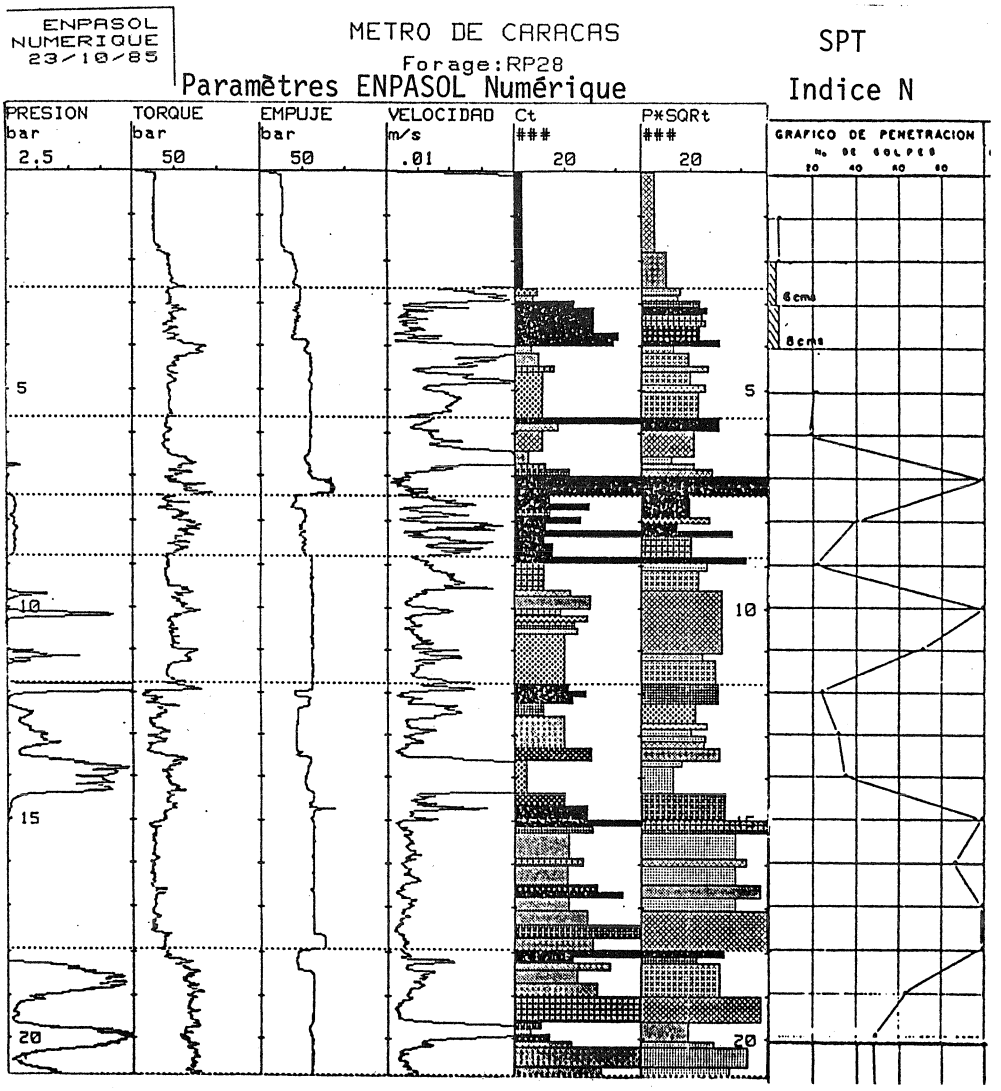


Figure 7- Métro de Caracas- Comparaison des profils des paramètres de l'ENPASOL Numérique et de l'essai de Pénétration Standard.

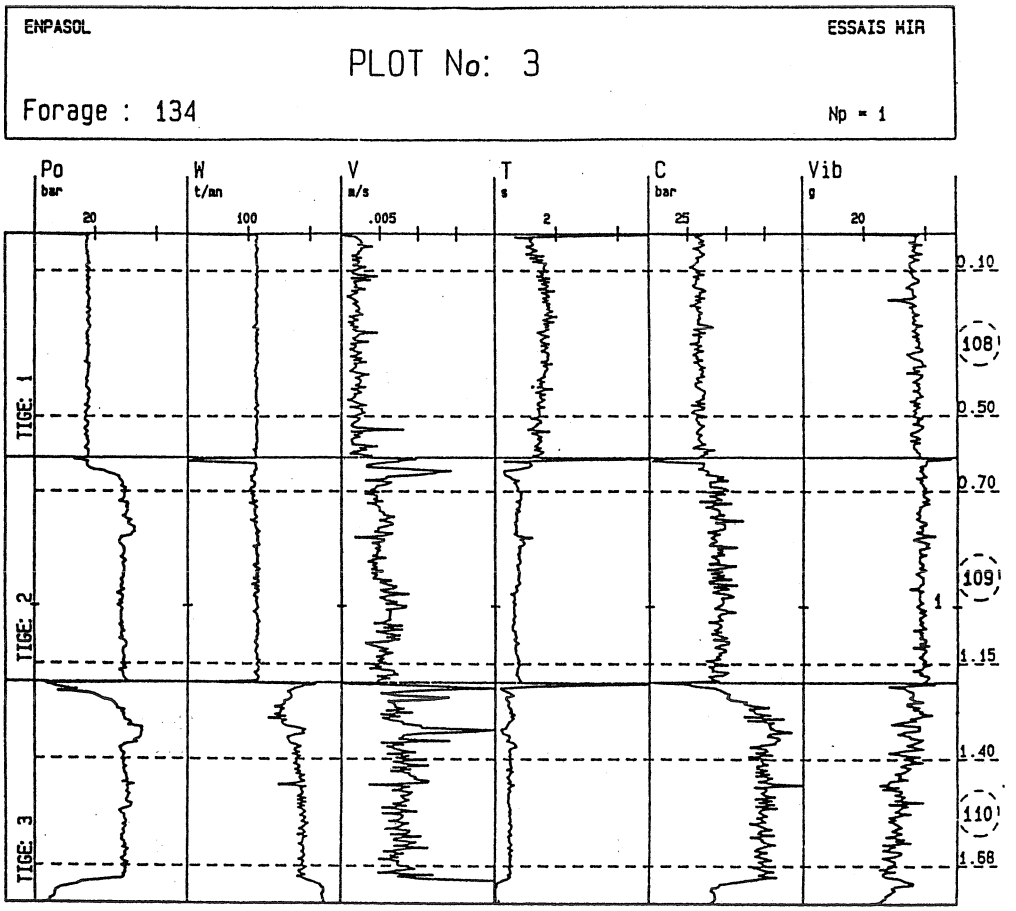


Figure 8- Exemple d'enregistrement à l'ENPASOL Numérique sur le banc d'essai no 3 de mortier. (Girard (10))

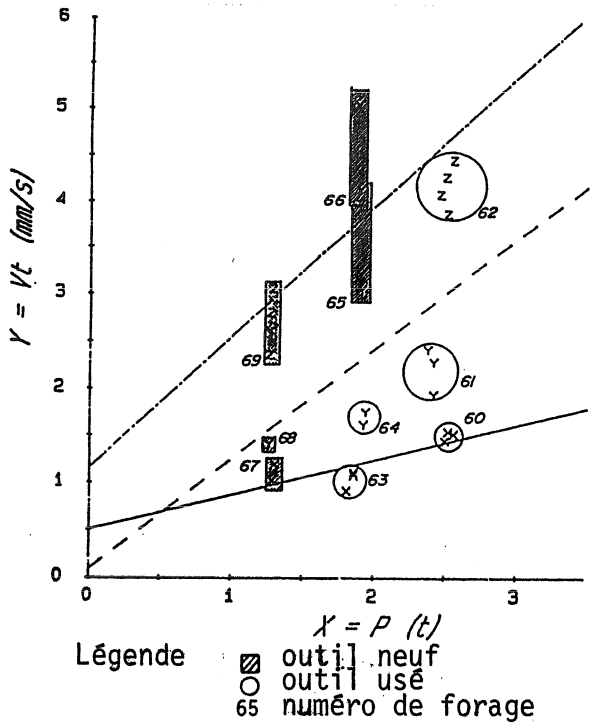


Figure 9- Influence de l'usure du tricône sur la vitesse d'avance.

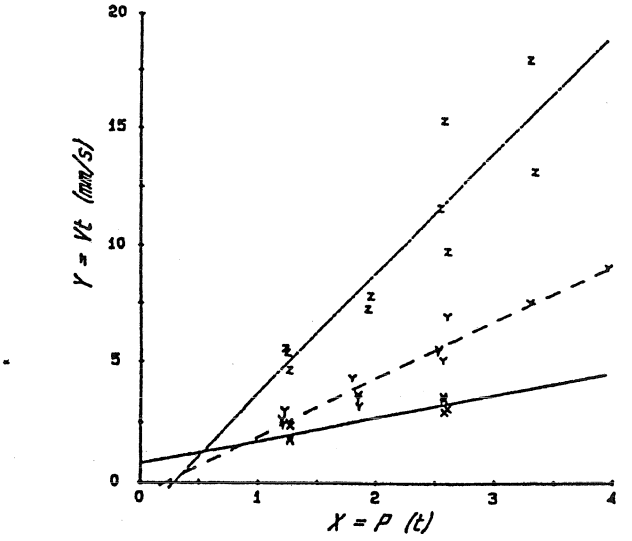


Figure 10- Influence de la poussée sur la vitesse d'avance.

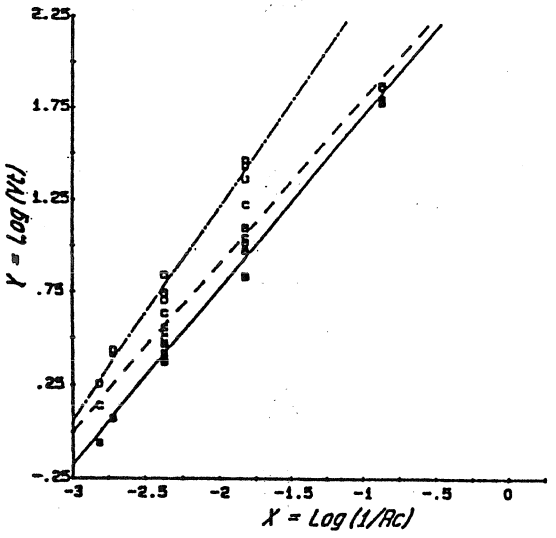


Figure 11- Influence de la résistance en compression simple Rc sur la vitesse d'avance.

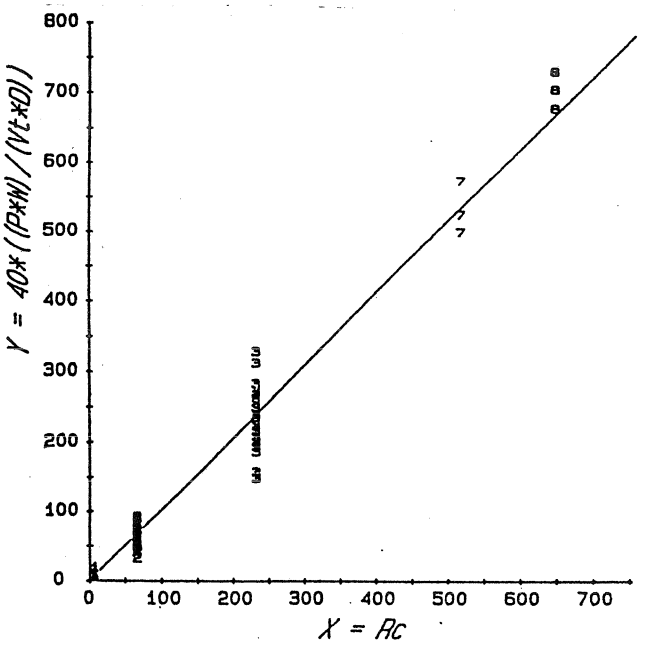


Figure 12- Relation entre la résistance au forage Rf et la résistance en compression simple Rc (Bancs de mortier et de roc). (Girard (10))

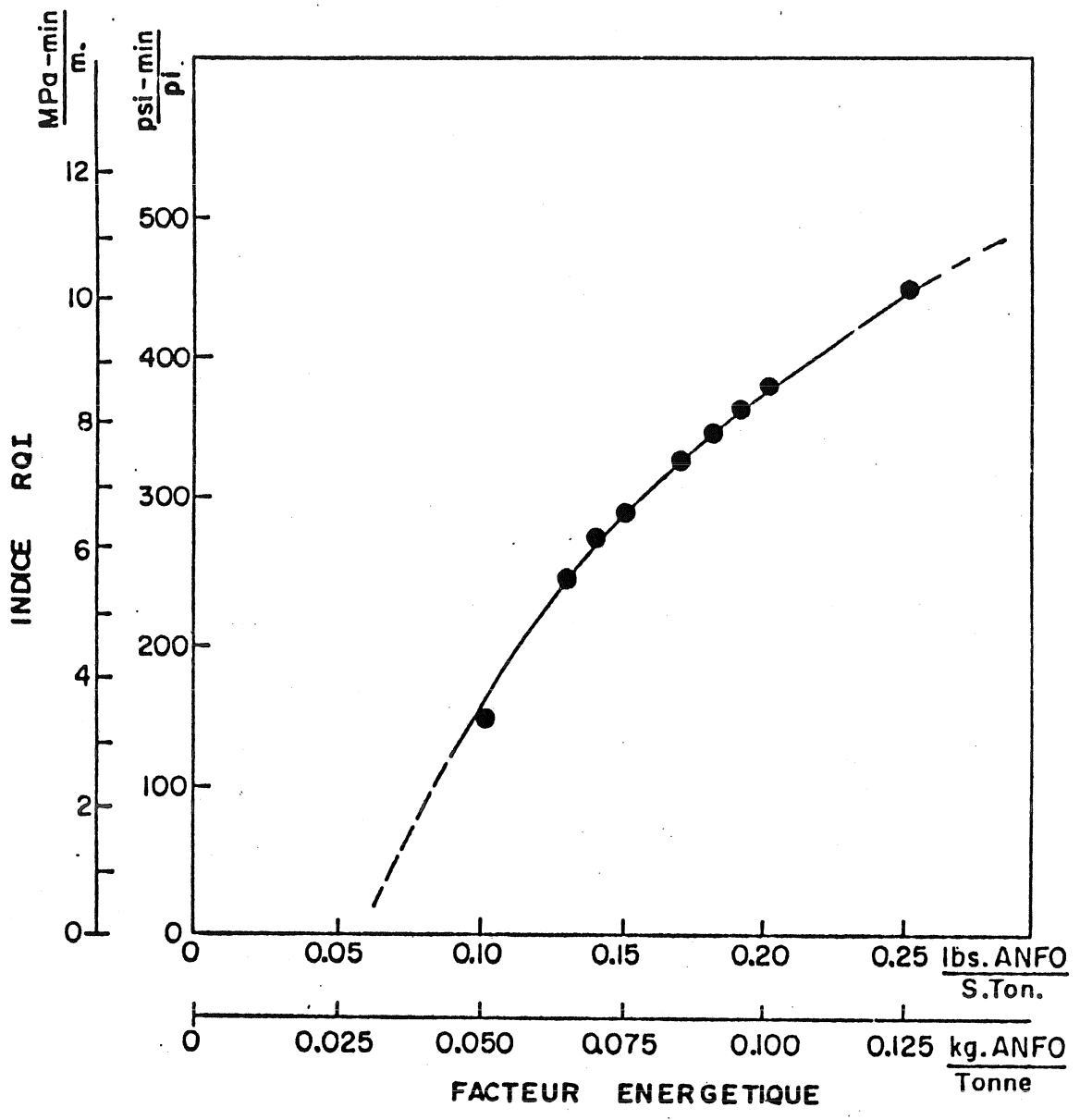


Figure 13- Correlation proposée entre l'indice RQI et la facteur énergétique à la mine Afton pour les sautages de périmètres (Leighton (12))

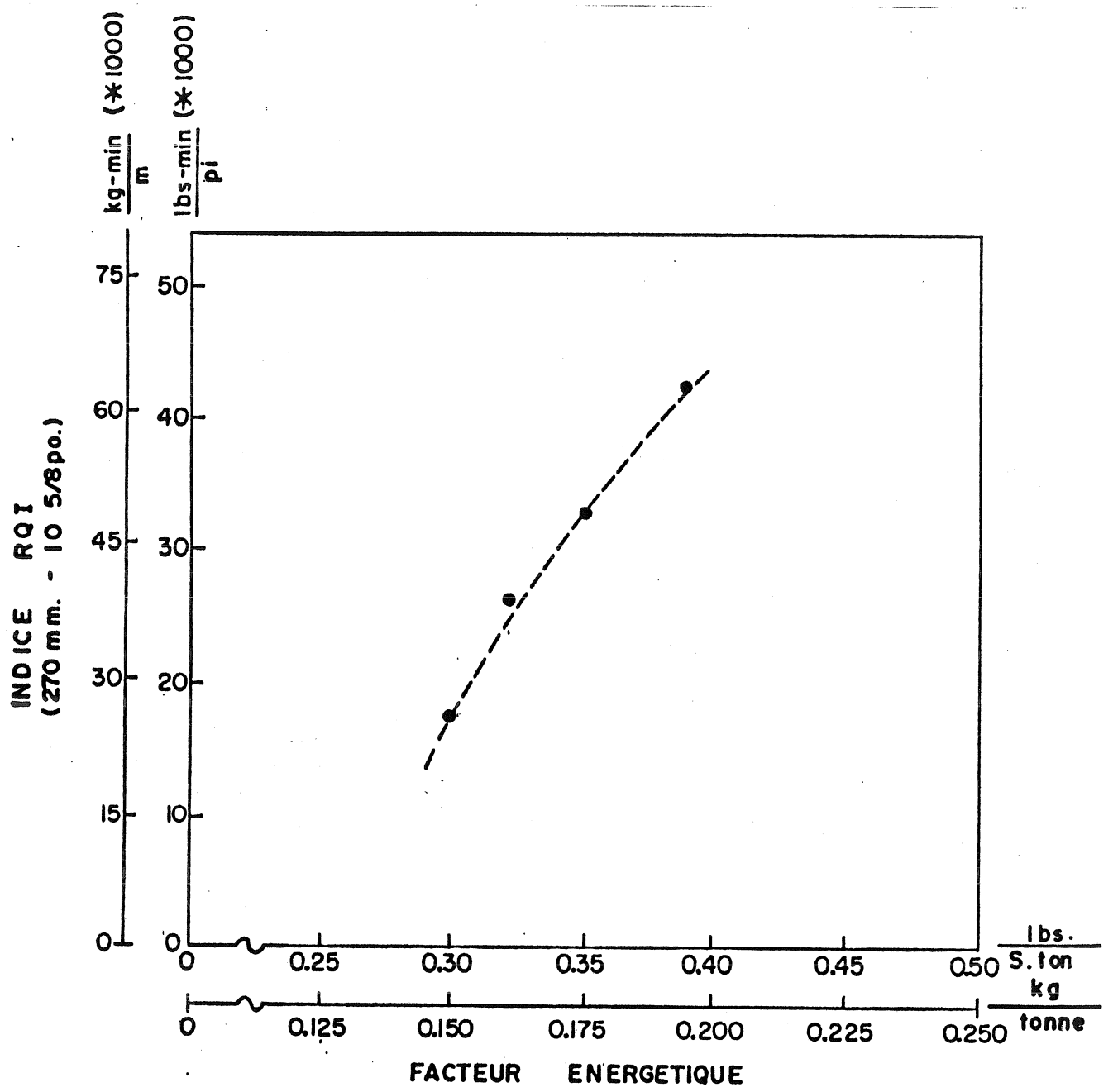


Figure 14- Correlation proposée entre l'indice RQI et le facteur énergétique à la mine Greenhills. (Le Bel (13))