

GEOSTATISTIQUE ET GEOTECHNIQUE

C. BACCONNET

Université BLAISE PASCAL

Laboratoire de Génie Civil

C.U.S.T.

B.P. 206 F-63174 AUBIERE CEDEX

R.S. AZZOUZ

Université de SAVOIE

Laboratoire de Génie Civil et Sciences de l'Habitat

E.S.I.G.E.C.

B.P. 1104 F-73011 CHAMBERY CEDEX

RESUME. Si la géostatistique a fait son apparition depuis une dizaine d'années dans le domaine de la géotechnique, les applications sont souvent restées limitées. Les paramètres ont été, la plupart du temps, estimés pour eux-mêmes et la recherche des structures horizontales s'est rarement opérée de manière satisfaisante. Nous avons donc procédé à des campagnes à pas constants dans le plan et quelques résultats sont présentés. Nous confirmons d'une part l'existence d'une première structure verticale de l'ordre du demi-mètre obtenue par d'autres auteurs. D'autre part, une structure d'échelle horizontale décamétrique est révélée par plusieurs sites de reconnaissance. Cette échelle coïncide précisément avec la taille de la majorité des constructions et a donc une influence non négligeable sur celles-ci.

ABSTRACT. Ten years ago, geostatistics was appearing in geotechnical practice but its applications have been limited. The parameters have been estimated for themselves most of the time, and the search of horizontal structures has been rarely made satisfactorily. So, we have made specific plannings with constant spacings, and some results are presented. On the one hand, we confirm the existence of a first, half-metric, vertical structure as other authors did, on the other hand, a decametric, horizontal structure has been revealed on several sites. Such a scale coincides with the dimensions of the majority of the foundations and has a non-negligible influence on them.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION

2. ORIGINE DES DONNEES

3. LES ESSAIS DE PENETRATION

I. Pénétrromètre statique GOUDA de 25 kN

II. Etude de la mesure

III. Erreur géométrique

4. ETUDE VARIOGRAPHIQUE

I. Variabilité verticale

II. Variabilité horizontale

5. CONCLUSION

1. INTRODUCTION

Ces dernières décennies ont été marquées par l'apparition de méthodes d'analyse dans le domaine du Génie Civil basées sur la théorie des probabilités. La nécessité d'assurer la sécurité des ouvrages, le développement des modélisations basées sur la fiabilité et la prise de conscience de l'effet désastreux des dispersions des caractéristiques mécaniques ont entraîné le recours à des formulations semi-probabilistes pour l'élaboration des textes réglementaires de la construction. Les caractéristiques physiques et mécaniques du sol présentent, du fait de leur histoire, une variabilité spatiale dont une première approche a été celle des variables aléatoires. Des auteurs comme CASSAN ou FAVRE ont proposé des coefficients de variation, des formes de lois de distribution ou des corrélations entre différents paramètres de manière à proposer des caractéristiques représentatives de couches, de formations ou de sites. La prise en compte de l'aspect spatial de la variabilité a montré, par la suite, le rôle essentiel joué par celui-ci pour apprécier l'importance de l'effet des régularisations sur les volumes concernés par les fondations (BOULEF-KHAD, FAVRE, GENEVOIS, MAGNAN), et par conséquent sur les calculs de fiabilité. Les premières applications de la géostatistique en géotechnique datent d'une dizaine d'années et l'on doit souligner le rôle de précurseurs joué par BEACHER, MAGNAN, PINEAU et SOULIE. Si la recherche de grandeurs représentatives d'un volume de sol est bien un problème commun, au moins dans son libellé, aux domaines minier et géotechnique, chacun des auteurs a souligné les spécificités du domaine géotechnique qui sont de nature à limiter le développement des méthodes géostatistiques :

- les données sont en nombre souvent insuffisant et leur implantation dans le plan est rarement régulière ;
- les paramètres mesurés ne sont pas toujours additifs et donc les changements de supports sont difficilement possibles autrement que par expérimentation ;
- les détails géologiques influencent plus les performances mécaniques des constructions que les valeurs moyennes des paramètres ;
- les transformations opérées lors des calculs de stabilité ou de déformabilité sont non linéaires.

Par ailleurs, dans la grande majorité des cas, il est impossible de vérifier la qualité des modèles structuraux retenus et l'opportunité même de la modélisation probabiliste, par une observation a posteriori. C'est à notre avis la différence fondamentale qui existe entre l'estimation minière et les études géotechniques.

2. ORIGINE DES DONNEES

Il est très difficile de se procurer des données en grand nombre et réparties suivant un réseau régulier d'implantations, car ces campagnes sont assez rares. La pratique courante, loin de multiplier les essais de même type, privilégie le pluralisme et l'on trouve très souvent des investigations géologiques, géophysiques, physiques et mécaniques fournissant des ensembles de paramètres divers et complémentaires. Pour quelques constructions exceptionnelles des campagnes peuvent être réalisées avec une densité suffisamment importante pour offrir des échantillons de grande taille dont les points sont répartis de manière homogène, mais bien souvent les localisations d'essais sont choisies de manière préférentielles. Certaines zones sont privilégiées et la construction des variogrammes sur de telles campagnes s'accompagne de biais importants.

Par conséquent, nous avons procédé à l'exécution de campagnes spécifiques qui n'étaient rattachées à aucun projet de construction. Le choix de la résistance de pointe pénétrométrique a été fait en raison de la rapidité avec laquelle les essais sont réalisés, ce qui nous a permis d'en effectuer un nombre important, à l'aide d'un pénétromètre statique GOUDA de 25 kN. Les deux campagnes de 50 et 54 sondages sont présentées sur

la figure -1-. Le sol est composé d'une faible couche d'argile plastique à toit horizontal surmontée par 3 mètres de sable-argileux et 90 centimètres de terre organique.

Nous avons pu par ailleurs analyser une campagne d'essais sur un site EDF qui comportait entre autres deux ensembles de sondages réalisés l'un avec un pénétromètre vibrostatique de type GOUDA et l'autre avec un pénétromètre stato-dynamique de type ANDINA (voir figure -2-). Le sol rencontré est un sable très dense, localement grésifié et d'une puissance de 20 mètres.

3. LES ESSAIS DE PENETRATION

Les essais de pénétration sont parmi les essais de type mécanique les plus anciens puisqu'ils datent des années trente et les plus utilisés tant dans la communauté européenne que dans le monde. Le principe simple de la mesure de la résistance qu'oppose le sol à l'enfoncement d'une pointe est sensible à un grand nombre de facteurs et les différents appareillages disponibles à travers le monde conduisent à des mesures notablement différentes. Certains appareils permettent de mesurer le frottement exercé par le sol sur le train de tiges ou plus localement sur un manchon désolidarisé du train (type BEGEMANN utilisé sur le site EDF par exemple). Nous présentons dans un premier temps le matériel utilisé sur le site de RIOM ainsi que le mode opératoire. Les autres matériels en diffèrent par la forme de la pointe qui est sans jupe pour le pénétromètre ANDINA, par la discontinuité de l'enfoncement utilisé sur le site EDF.

I. Pénétromètre statique GOUDA de 25 kN

Le dispositif de pénétration est constitué d'une pointe de 10cm^2 à jupe arrière conique, mobile par rapport au train de tiges. La résistance de pointe est alors mesurée par l'intermédiaire d'un piston hydraulique sur lequel deux manomètres donnent directement la valeur de Q_c . Le chargement manuel est fait par un vérin à crémaillère et le dispositif de réaction est assuré par un camion tout-terrain que l'on peut éventuellement lester. Chaque essai est alors mené comme suit :

- un repérage préalable des points de sondages est matérialisé sur le site. On réduit ainsi les erreurs de positionnement qui ne sont en général pas très importantes : le cumul des erreurs d'implantation et de positionnement ne dépasse pas 20 à 30 cm ce qui reste faible par rapport aux mailles d'implantation horizontales. Par ailleurs, l'estimation des variogrammes par classes de distances occulte de fait cette incertitude.

- après la mise en station du pénétromètre et le réglage de sa verticalité, le zéro de la profondeur est pris à partir de l'appareillage et non sur le sol : on assure ainsi un lissage des aspérités de la surface naturelle du site. L'erreur de positionnement vertical est de l'ordre de 10 cm.

- la pénétration s'effectue de manière continue par tronçons de 1m avec une mesure de l'effort de pointe uniquement. Ce procédé permet d'assurer une homogénéité dans la vitesse de pénétration qui est l'un des facteurs les plus influents sur les résultats des essais. Nous n'avons noté aucune variation significative des mesures lors des changements de tiges.

II. Etude de la mesure

La mesure de la résistance de pointe est sensible à de nombreux facteurs. Parmi ces facteurs, la vitesse de pénétration, notamment dans les argiles, est celui qui influe le plus sur les résultats d'essais, avec la forme de la pointe (pointe seule de type ANDINA ou pointe à jupe de type GOUDA). La discontinuité de l'enfoncement est

aussi à l'origine de disparités sur les mesures dans une proportion pouvant atteindre plus de 30% de la même mesure faite en continu. Enfin, le diamètre des pointes induit un effet d'échelle, mais seulement à faible profondeur. Les travaux de GRESILLON-1970, PUECH-1974 ont montré l'existence d'une profondeur critique D_c au delà de laquelle, dans un milieu pulvérulent, la résistance de pointe est constante et fonction de la densité relative du matériau en place dans un volume situé autour de la pointe. La standardisation des matériels et modes opératoires devrait donner à la résistance de pointe une valeur plus liée aux caractéristiques du sol : CASSAN-1988 n'hésite pas à parler pour Q_c de « nouvelle caractéristique intrinsèque du sol ».

La première conséquence à tirer pour ce qui concerne nos propres données est l'élimination des points de mesures au dessus de la profondeur critique que l'on évalue à 25 fois le diamètre de la pointe soit 90 cm pour le site de RIOM. Le second enseignement concerne l'existence d'un volume limité autour de la pointe, sur lequel s'effectue la mesure. TCHENG (cité par FAVRE) montre que ce volume évolue entre $3B$ et $5B$ en hauteur et en largeur (Figure -3-).

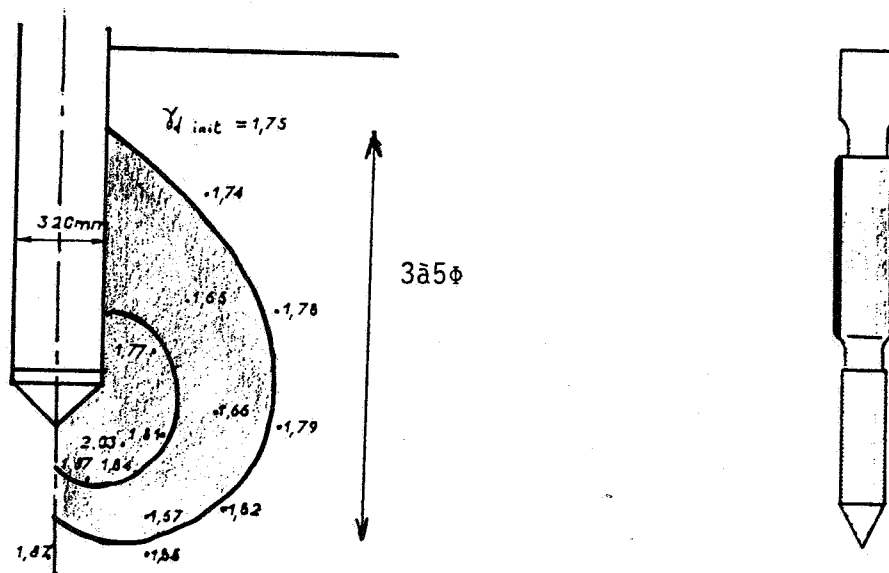


Figure -3- : Volumes de mesure de la résistance de pointe et du frottement latéral

Pour les pénétromètres que nous avons cités, B valant 3.6 cm et 3.9 cm, le volume de mesure offre des dimensions comprises entre 10 et 20 cm. Les pénétrogrammes sont l'image d'un champ de moyenne locale d'une caractéristique du sol intégrée sur le volume de mesure. L'effet régularisateur se traduit, au niveau des variogrammes par une réduction de ceux-ci (réduction de variance) et une augmentation de la portée apparente, si elle existe.

En direction horizontale, les pas de mesure sont de quelques mètres et le volume de mesure, à cette échelle, peut être considéré comme ponctuel. Par contre, les portées verticales sont plutôt métriques, voire inférieures au mètre. L'extension verticale du volume de mesure n'est donc plus négligeable. La portée de la variable régionalisée ponctuelle peut être grossièrement approchée en retranchant la hauteur du volume de mesure à la portée expérimentale en retenant en première approche un modèle de régularisation par carottes.

Pour ce qui concerne le frottement latéral, le volume de mesure est une surface de frottement qui est celle du manchon. Sa hauteur limitée à 13 cm pour le manchon BE-GEMANN donne directement l'étendue verticale de celui-ci. La mesure est assimilable

à la valeur moyenne du frottement latéral sur le manchon : la courbe obtenue est encore l'image d'un champ de moyennes locales.

III. Erreur géométrique

L'erreur géométrique commise sur l'évaluation de l'origine de chaque sondage, erreur d'implantation et erreur sur la profondeur, a une influence toute relative sur le calcul des variogrammes compte-tenu de son étendue assez faible en général. En direction verticale, celle-ci peut être considérée comme nulle ; en direction horizontale, l'erreur d'implantation est négligeable par rapport aux classes de distances supérieures au mètre (voire très supérieures). La topographie du site introduit une erreur liée au fait que deux points provenant de deux sondages différents ne sont pas en général à la même profondeur et que par ailleurs la mesure de profondeur s'accompagne d'une incertitude. Pour les mesures au pénétromètre statique GOUDA de 25 kN, la précision est évaluée à 10 cm qui est la maille de reconnaissance verticale. Ainsi, si la variabilité verticale est importante pour les faibles distances, cette erreur sera de nature à modifier de manière importante le variogramme horizontal. Dans le cas contraire, c'est-à-dire celui d'une continuité de la variable régionalisée, l'influence de l'erreur géométrique sera amoindrie.

4. ETUDE VARIOGRAPHIQUE

I. Variabilité verticale

I-A. Comparaison des Campagnes de RIOM.

Après avoir enlevé les 90 premiers centimètres de terre organique, l'ensemble des deux couches de sable argileux et d'argile plastique a été étudié. Les variogrammes relatifs, c'est-à-dire rapportés à la variance expérimentale ont été choisis dans le but de comparer les résultats obtenus sur les deux campagnes. Les variogrammes bruts expérimentaux calculés en moyenne sur l'ensemble des sondages d'une campagne, sont supposés représentatifs de la variabilité verticale sur le site. Les variogrammes verticaux moyens relatifs sont tracés sur la figure -4- et montrent une correspondance presque parfaite, notamment pour les premiers points, entre les deux campagnes tant pour la couche de sable que pour la couche d'argile. Chaque point des variogrammes est estimé à partir d'un nombre de couples très important. Ceux-ci varient en effet de 400 à plus de 1500.

Les variogrammes calculés sur chacune des deux couches définies précédemment montrent deux formes différentes. La couche de sable argileux, dont l'épaisseur moyenne de 3 m a permis la construction correcte des variogrammes verticaux, montre une structure stationnaire de portée 0.5 m. Celle-ci n'apparaît pas pour la couche d'argile qui montre un comportement linéaire. Différentes interprétations sont possibles.

L'épaisseur trop faible de la couche d'argile n'a pas permis d'observer cette hétérogénéité et par conséquent elle ne peut pas apparaître sur le variogramme. L'existence d'une dérive peut masquer la structure ce qui est peut-être le cas ici : les résistances de pointe ayant tendance à diminuer systématiquement en traversant la couche d'argile. Enfin, cette structure n'existe pas dans cette couche si elle est une caractéristique de la formation sablo-argileuse. Il faut alors remonter à la genèse de ces couches qui mettent en jeu deux types de dépôts : l'argile d'origine lacustre et les colluvions sablo-argileux déposés par ruissellement n'ont vraisemblablement pas de structure commune. Le second présente un ensemble plutôt lenticulaire formé en milieu terrestre alors que le premier est issu d'une sédimentation continue en milieu aquatique.

I-B. Comparaison des Deux Types d'Appareils sur le Site EDF.

Trois couches ont été distinguées : le complexe sablo-graveleux de surface, une première couche de sable fin puis une deuxième couche de sable qui se distingue de la première par la présence de passages indurés ou grésifiés répartis sur sa hauteur. Sur chacune de ces couches, un variogramme vertical moyen a pu être tracé. Si le variogramme de la couche de grave est difficilement modélisable, ceux issus des couches de sable ont montré une allure régulière comme en témoigne la figure -5-. Les portées verticales se situent autour de 1 mètre. Un modèle sphérique de portée 0.8 m conviendrait pour le variogramme de la première couche de sable, alors qu'un modèle exponentiel de portée pratique 1.5 m semble représenter plus fidèlement le variogramme de la seconde couche de sable. Le modèle exponentiel peut être remplacé par un modèle gigogne sphérique dont les deux portées seraient de 0.8 m et de 2.0 m. La portée de 0.8 m se retrouve et l'on peut être tenté de relier celle-ci au mode de dépôt, alors que la deuxième structure, qui n'apparaît que dans la couche localement grésifiée, est peut-être précisément liée à ce dernier phénomène.

En outre, des essais au pénétromètre statique ANDINA ont permis la confrontation des variogrammes verticaux moyens sur la couche de sable. La similitude entre les deux courbes est importante (Figure -6-). La même structure verticale de portée 80 cm environ a été révélée par deux types d'essais pénétrométriques présentant des différences dans le mode d'exécution de l'essai. Pour le pénétromètre vibro-statique, la pointe est à jupe arrière ce qui mobilise du frottement en plus du terme de pointe, l'enfoncement est dynamique puis statique pour la mesure (donc discontinu); pour le pénétromètre ANDINA, la résistance de pointe est conventionnelle et représente l'effort de pointe uniquement, la pénétration s'effectue en statique et de manière continue.

Malgré ces différences qui peuvent entraîner des valeurs de résistance de pointe allant du simple au double (en moyenne, les essais vibro-statiques donnent une résistance de pointe deux fois supérieure au pénétromètre ANDINA), ces essais n'en restent pas moins des essais de pénétration, sensibles aux mêmes paramètres du sol. En cela, on peut en attendre une sensibilité aux mêmes structures. Cette constatation est loin d'être inintéressante puisque c'est la première fois qu'il est possible de vérifier la stabilité d'une structure de variabilité au travers de différents procédés.

Finalement, entre les sites EDF et de RIOM, entre les types d'essais réalisés, un point fondamental a été vérifié : la structure révélée par les variogrammes de résistance de pointe pénétrométrique est une caractéristique propre au sol. Si l'on observe le variogramme vertical moyen du frottement latéral mesuré sur la couche de sable (Figure -7-), on remarque que la partie croissante sensiblement linéaire à l'origine, qui est tout de même reconnue par quatre points, atteint le palier pour la valeur 80 cm. Est-on en droit de tirer des conclusions définitives ? Certainement pas mais la persistance de cette structure est un fait qu'on ne peut pas ignorer.

II. Variabilité horizontale

La campagne de reconnaissance de 1985 n'a pas permis d'accéder à une description de la variabilité spatiale à l'échelle décimétrique qui semble être une échelle privilégiée de variabilité dans le plan. L'implantation de 54 sondages espacés de 5 m le long d'un axe a permis la recherche des structures horizontales dans chacune des couches, mais pour une seule direction horizontale. Les variogrammes bruts moyens montrent une structure stationnaire remarquable dont la portée se situe autour de 20 m pour la couche de sable et de 10 m pour la couche d'argile (Figure -8-). Pour tenter d'affiner le comportement à l'origine des variogrammes, les deux campagnes ont été mixées de la manière suivante. Les deux variogrammes horizontaux ont été reportés sur la même figure en valeur relative (c'est-à-dire rapportée à la variance expérimentale). La position des points proches de l'origine permet de préciser les effets de pépite qu'il est possible de retenir.

Dans notre cas, nous constatons que les deux variogrammes à faible et à grande

échelle se correspondent et qu'ils sont bien dans la continuité l'un de l'autre. L'effet de pépite pour la couche de sable est vraisemblablement dû à une microstructure d'échelle inférieure ou égale au mètre : une erreur de mesure s'observerait à la fois en direction verticale et horizontale.

Le variogramme horizontal sur la couche de sable du site de EDF (Figure -9-) se stabilisent en apparence pour une portée de l'ordre de 35 m environ. Or, il est difficile de porter un jugement objectif sur l'estimation de celle-ci car notre choix est très largement influencé par le premier point du variogramme. Celui-ci, issu des couples de points provenant du triplet de sondages (1, 17, 18) donne une information locale qui n'est pas représentative de l'ensemble du site. Par conséquent, si le premier point n'est pas pris en compte, l'ensemble des points restants montre plutôt un aspect d'effet de pépite pur. Cette interprétation suppose une hypothèse d'indépendance spatiale qui est très forte : en pratique, il semble plus opportun de retenir l'existence d'une structure spatiale dont la portée de 35 m est au moins en accord avec ce que l'on connaît du phénomène.

La portée verticale de 0.8 m et la portée horizontale de 35 m semblent être des constantes pour la couche de sable. La résistance de pointe et le frottement latéral donnent des structures d'échelles comparables. Les structures spatiales de caractéristiques mécaniques du sol semblent liées à des structures géologiques.

5. CONCLUSION

Les échelles de variabilité verticale et horizontale trouvées lors de notre étude sont en accord avec les résultats annoncés par d'autres auteurs. SOULIE propose 30m pour la variabilité horizontale de la cohésion non drainée d'une argile lacustre, ALI trouve une structuration dont la portée varie de 15 à 45 mètres pour des caractéristiques physiques (poids volumiques, teneurs en eau, indice des vides ...) sur le bassin de TUCKSON. En direction verticale, l'échelle du demi-mètre est avancée depuis longtemps par plusieurs chercheurs. Il semble donc que ces grandeurs varient dans de faibles proportions et une confrontation de ces résultats avec des études de géomorphologie des sites est prometteuse.

L'analyse structurale présentée met en évidence l'aspect structuré de la variabilité spatiale de paramètres mécaniques du sol, indépendamment du type d'essai réalisé (dans la limite de ceux présentés). Si cette structuration est bien intrinsèque au sol, il devient intéressant de promouvoir l'emploi d'essais rapides et peu onéreux que l'on peut réaliser en grand nombre comme essais palliatifs, complémentaires d'essais plus sophistiqués. L'accès à une modélisation de la variabilité spatiale des paramètres rhéologiques sur les sites de construction fournit une base solide à des méthodes de calcul basés sur des concepts fiabilistes.

Par ailleurs, le développement et la multiplication des codes de calcul nécessite aujourd'hui la mise en œuvre de procédures de calibration et de validation sur les ouvrages réels. Ces méthodes offriront une réponse convenable dans la mesure où elles prendront en compte la variabilité spatiale. Ces méthodes voient le jour au sein du GRECO GEOMATERIAUX.

REMERCIEMENTS.

Ce travail a été réalisé avec le soutien du GRECO GEOMATERIAUX, dans le cadre du groupe de travail sur les méthodes statistiques et probabilistes. Les auteurs remercient EDF pour leur avoir fourni les données analysées.

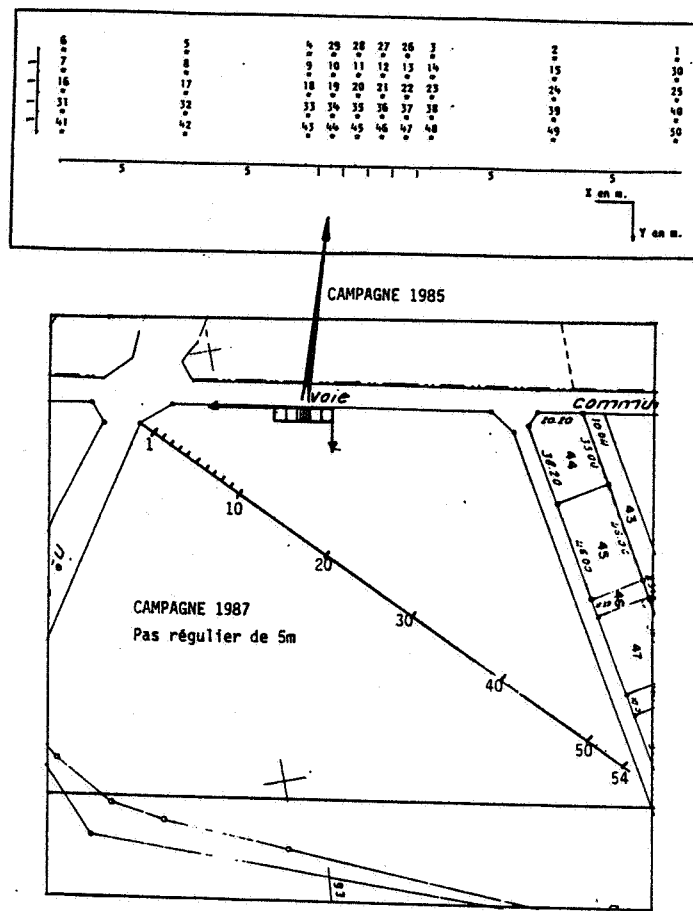


Figure -1- : Implantation des sondages pénétrométriques sur le site de RIOM.

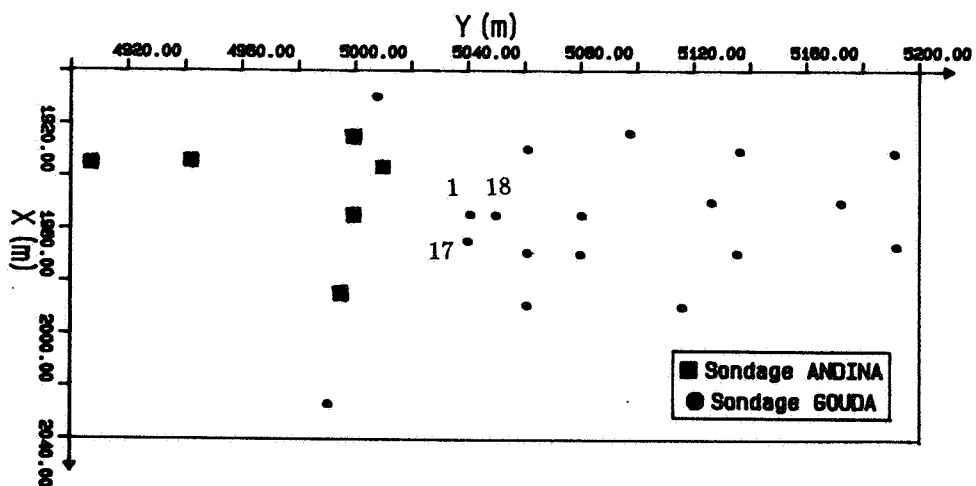


Figure -2- : Implantation des sondages pénétrométriques sur le site EDF.

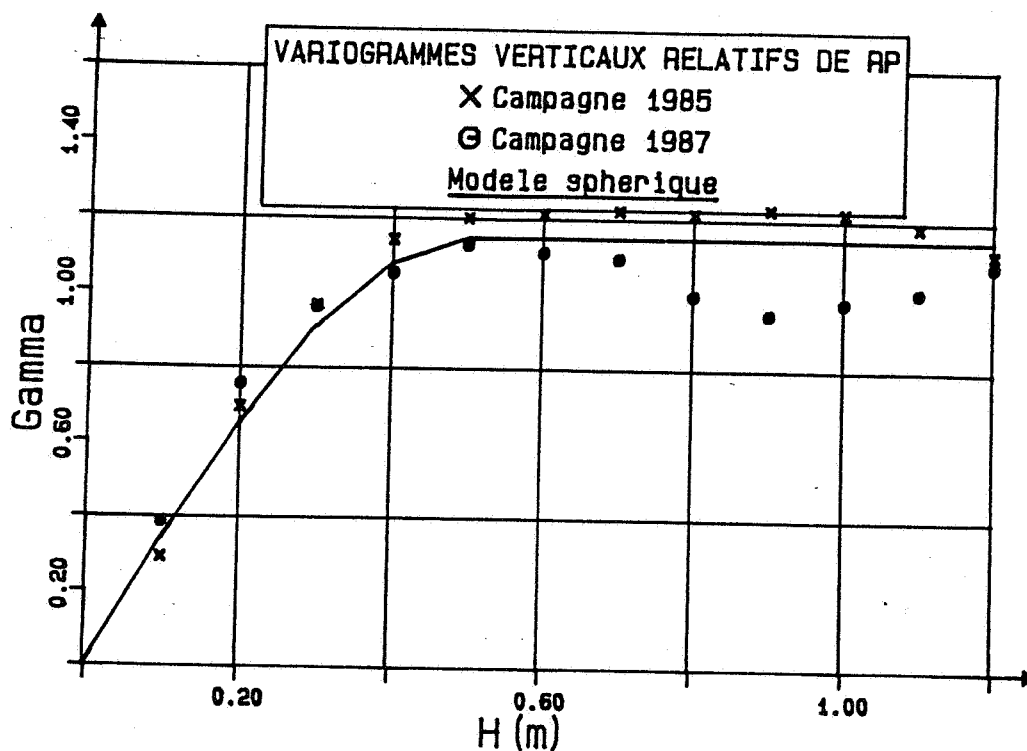


Figure -4a- : Variogramme moyen sur la couche de sable argileux.

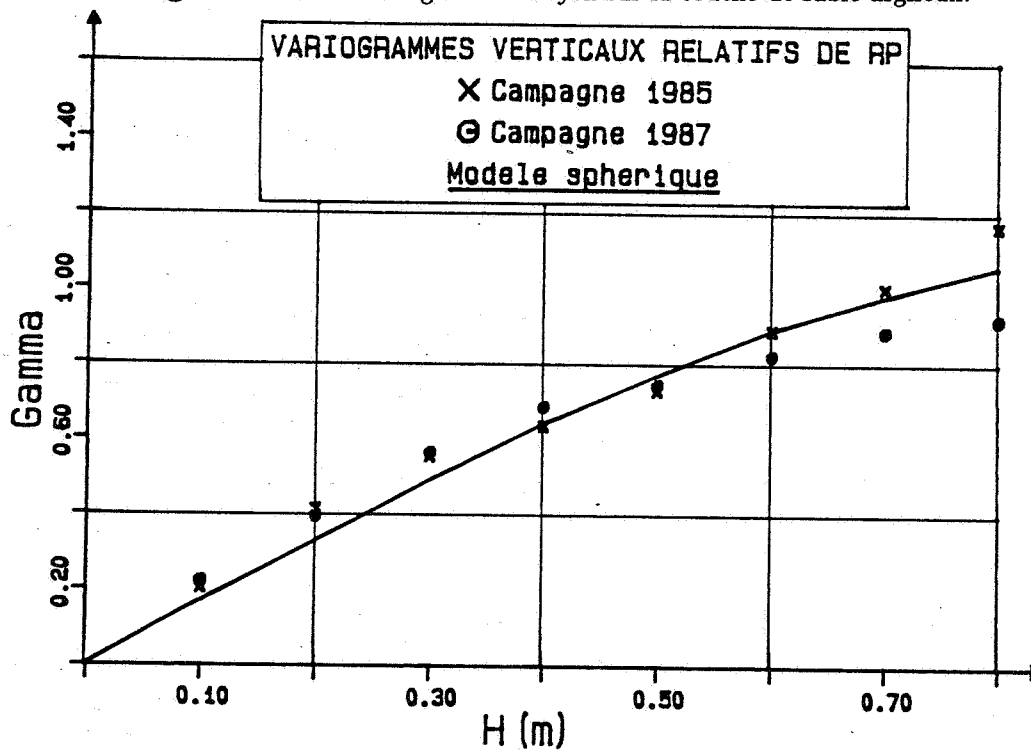


Figure -4b- : Variogramme moyen sur la couche d'argile.

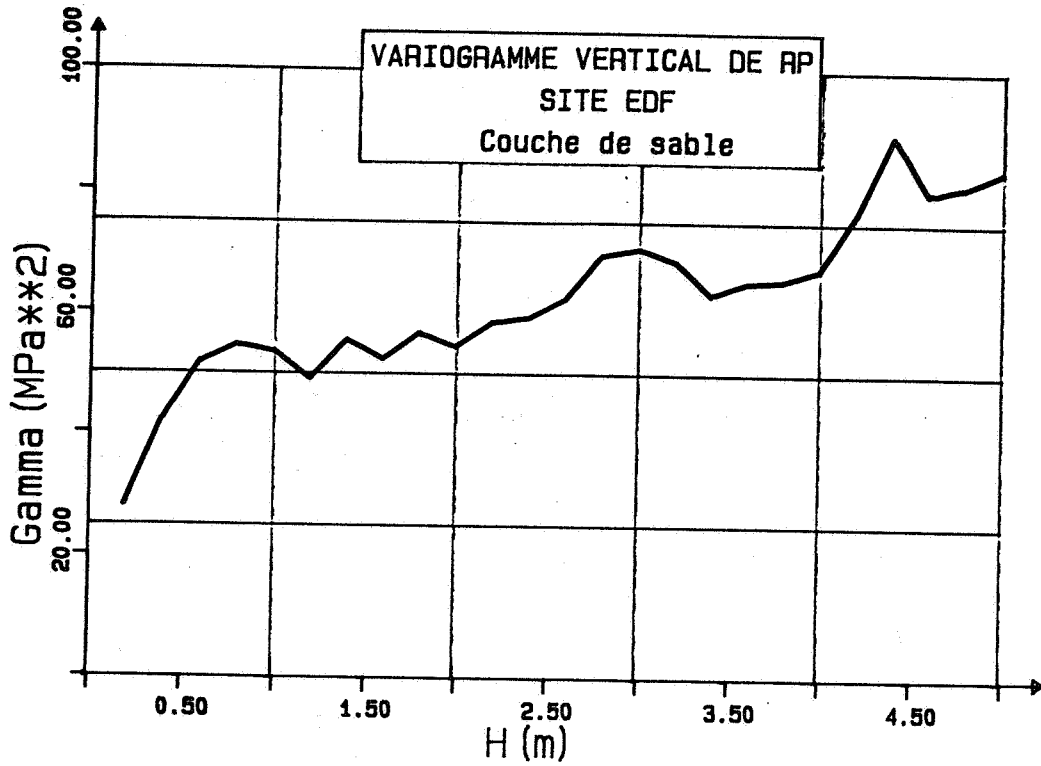


Figure -5a-

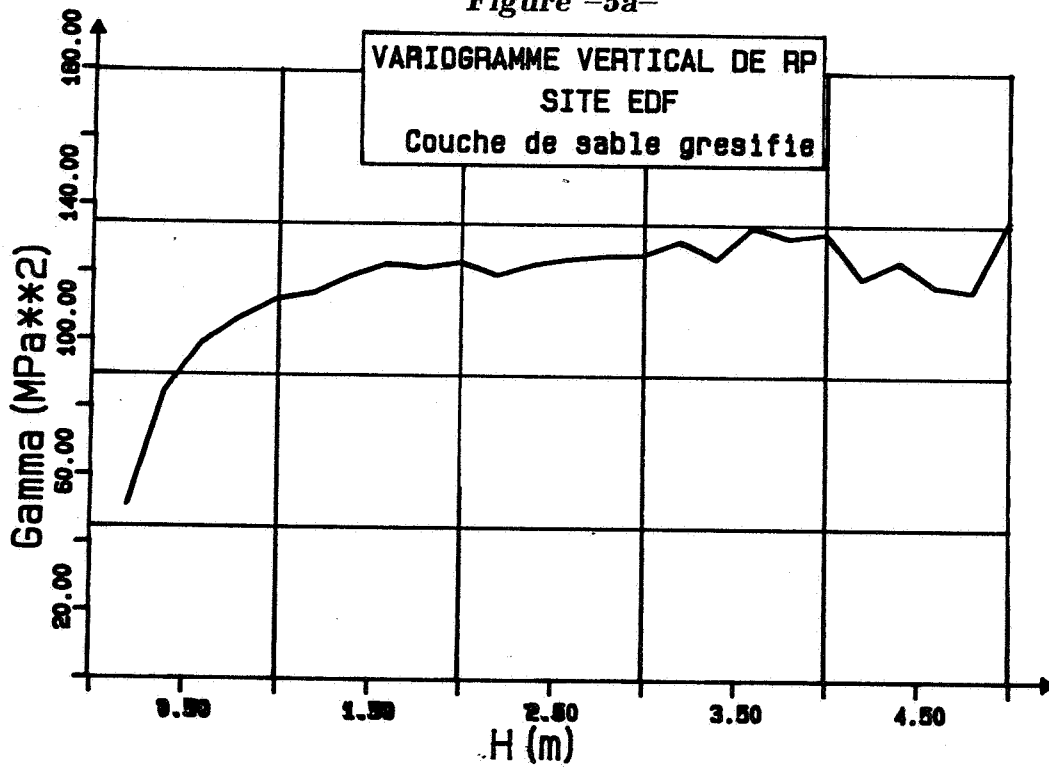


Figure -5b-

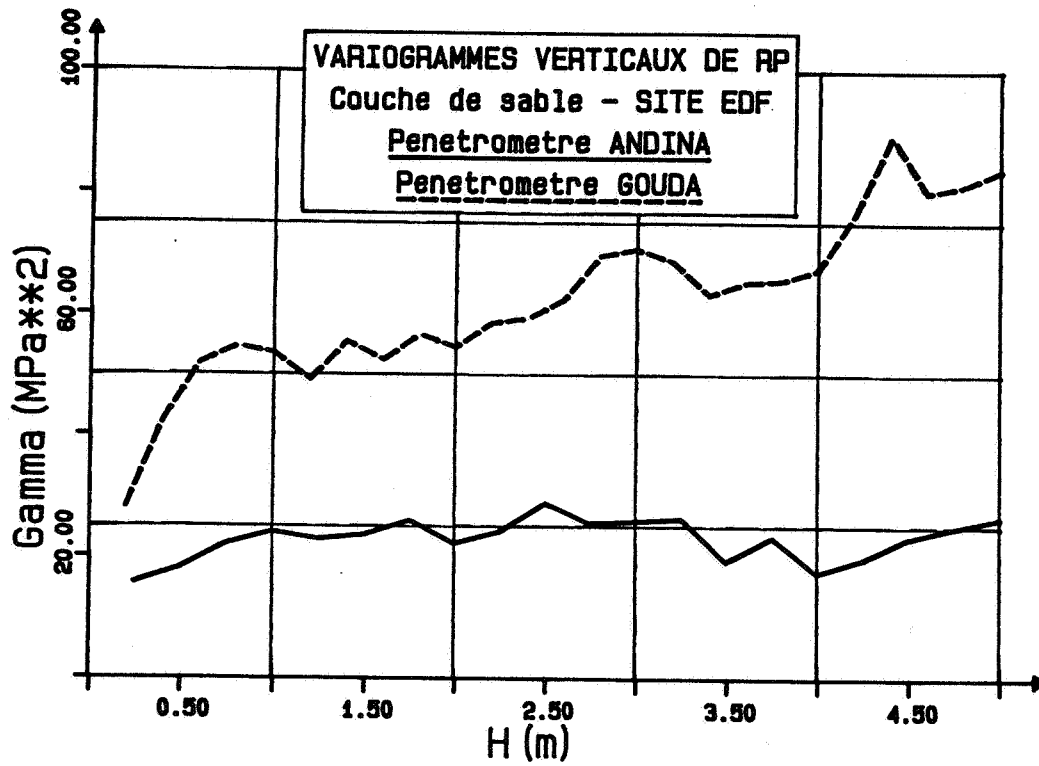


Figure -6- : Comparaison des variogrammes verticaux de RP mesurés avec les deux types d'appareils.

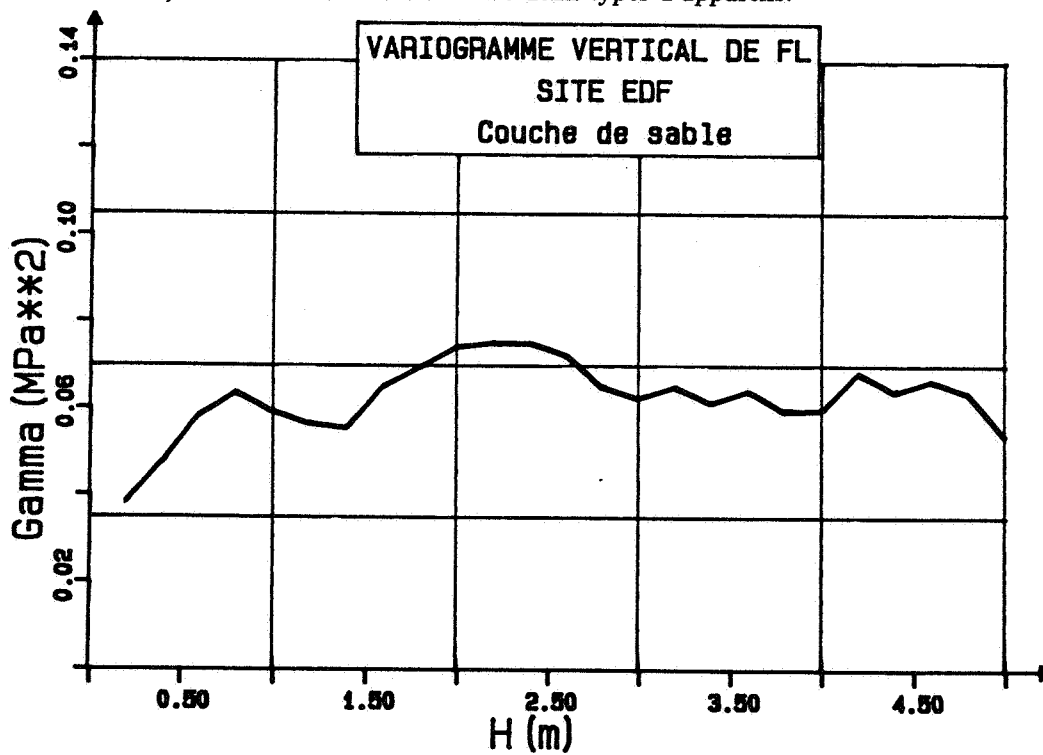


Figure -7- : Variogramme vertical moyen du frottement latéral mesuré sur manchon avec le pénétrömètre GOUDA.

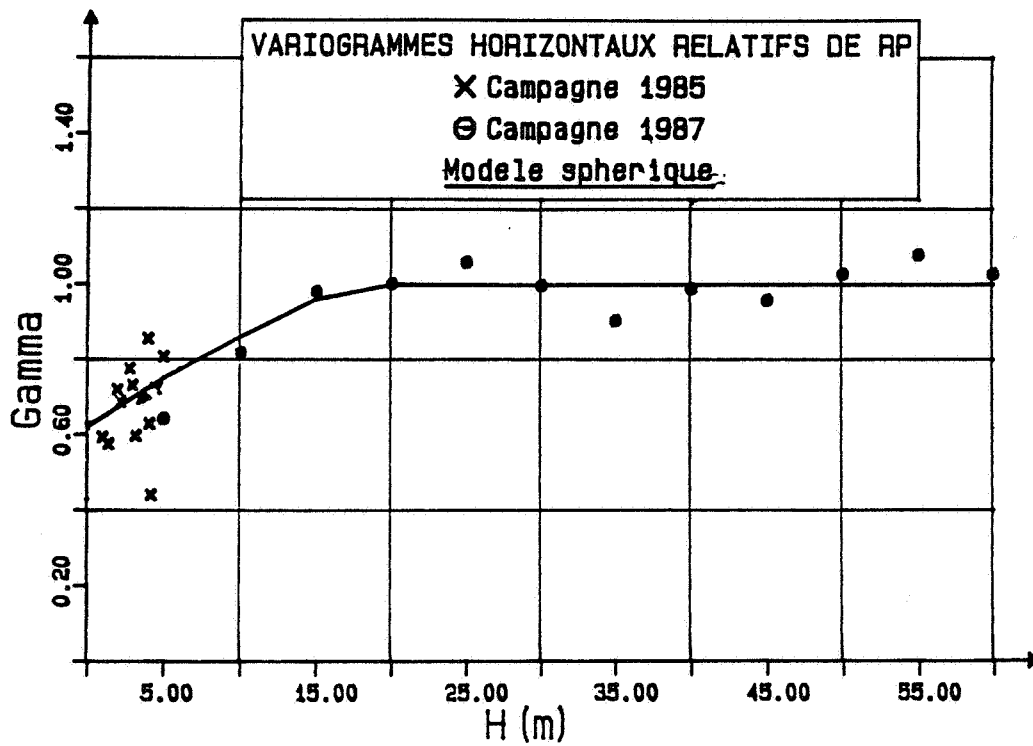


Figure -8a- : Variogramme horizontal de la résistance de pointe sur la couche de sable argileux.

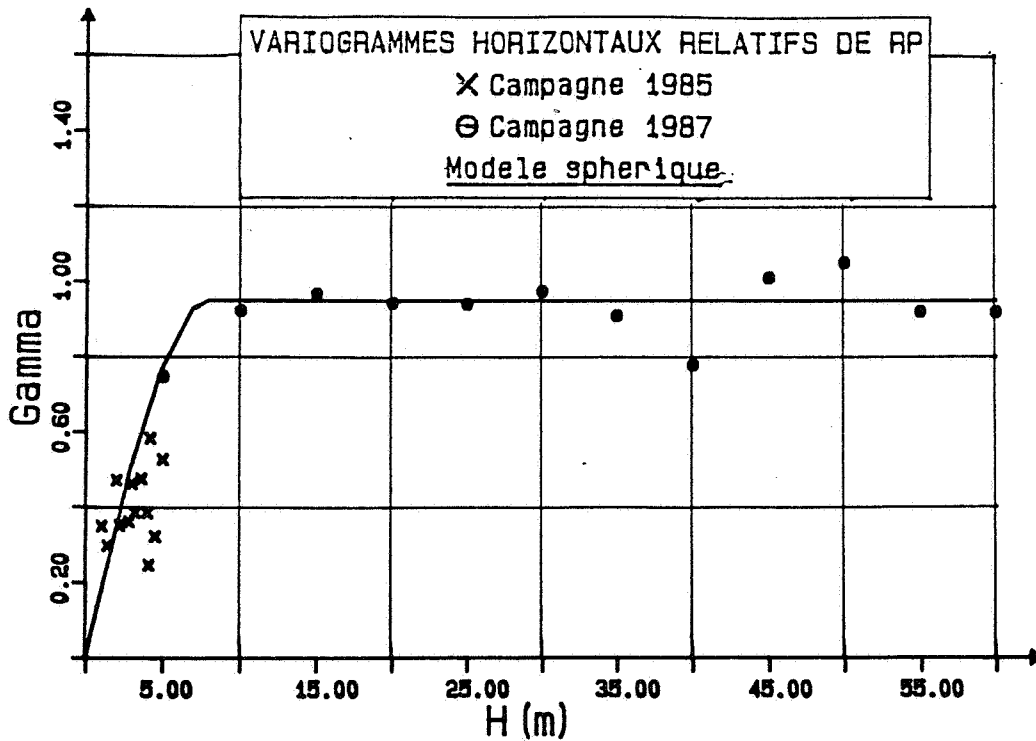


Figure -8b- : Variogramme horizontal de la résistance de pointe sur la couche d'argile.

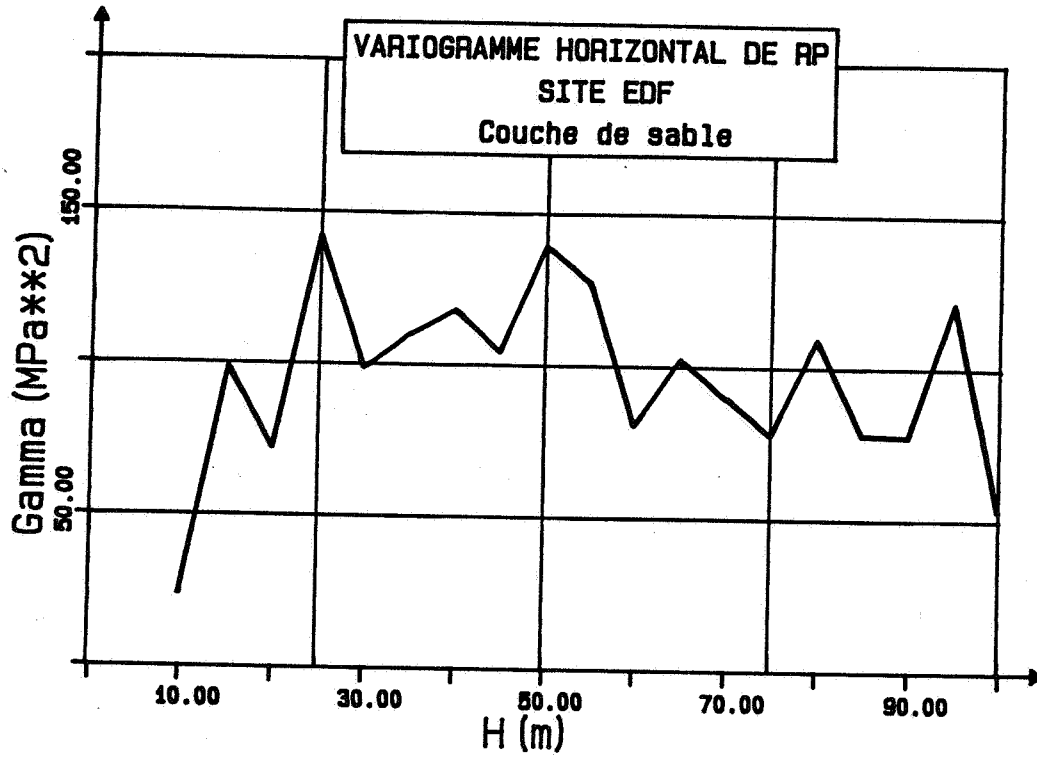


Figure -9-