

P15

PREMIER CONGRES INTERNATIONAL
DE GEOLOGIE DE L'INGENIEUR

Paris 1970

FRANCE

J.-P. DAGNAUX
Y. LEMOINE

Cartographie géotechnique en milieu côtier vaseux
par sismique réfraction et pénétromètres.

RESUME

La reconnaissance géotechnique des zones de remplissage sablo-vaseux en milieu d'estuaires ou de certaines côtes basses n'est guère abordable par l'observation géologique. Elle ne peut non plus être facilement menée par les moyens classiques de reconnaissance des sols : forages et échantillonnage. Les auteurs présentent ici une méthode légère et rapide basée sur la mise en oeuvre conjuguée de la sismique réfraction et du pénétromètre statique portable. Ils montrent, sur l'exemple de l'étude d'une station touristique au Cap d'Agde sur la côte du Languedoc-Roussillon, comment ces deux techniques se complètent et se contrôlent mutuellement en permettant d'aboutir économiquement à une carte géotechnique détaillée.

SUMMARY

Geotechnical mapping of coastal marsh lands, estuaries and lagoons can difficultly be carried out by purely geological observations. Classical drilling and sampling are costly due to transportation problems. The authors propose a light and rapid method using simultaneously seismic refraction and a portable static penetrometer. The example of the Cap d'Agde touristic zone on the Languedoc-Roussillon coast shows how these two methods complete each other and how an economical geotechnical map was made.

I - INTRODUCTION

La reconnaissance géotechnique des zones de remplissage sablo-vaseux en bordure des côtes en voie de comblement ou dans les zones d'estuaires pose fréquemment des problèmes techniques et économiques très sérieux. Tout d'abord de tels sites échappent pratiquement à une investigation géologique utile : on ne peut pas ici dresser de carte géotechnique préliminaire par l'observation de la nature des affleurements, ni prévoir les épaisseurs probables de vase et encore moins leurs qualités mécaniques en profondeur. Tout au plus peut-on localiser les terrains compressibles en surface et avertir le maître d'oeuvre pour qu'une suite d'étude sérieuse soit donnée vis à vis de ces formations. La très faible portance des terrains, ou la présence d'un plan d'eau rend généralement très difficile, voire impossible, l'amenée d'engins de reconnaissance classique, en général lourds. L'utilisation de voies aménagées ou de pontons se répercute fortement sur le coût de l'opération. De plus, la nature des terrains se prête très mal au prélèvement d'échantillons significatifs pour la détermination des qualités mécaniques des formations en présence.

Nous présentons ici une méthode de reconnaissance rapide et légère basée sur l'utilisation conjuguée de la sismique réfraction et des essais au pénétromètre statique portable de 2,5 tonnes.

Cette technique a été largement mise en oeuvre par la Compagnie de Prospection Géophysique Française lors de nombreuses études sur le littoral du Languedoc et tout particulièrement sur le site du Cap d'Agde, que nous prendrons ici comme exemple, compte tenu du caractère très complet de cette reconnaissance.

II - BUT ET INTERET DE LA METHODE

Cette méthode se propose de préciser l'extension, la profondeur et la qualité des dépôts vaseux par l'utilisation de deux techniques rapides et assez peu coûteuses : la sismique réfraction et le pénétromètre statique léger.

La sismique réfraction permet d'effectuer un premier "survol" de la zone à étudier. Sa mise en oeuvre se révèle très souple et rapide puisque les mesures peuvent aussi bien être effectuées sur la terre ferme que sous quelques mètres d'eau. Ainsi dispose-t-on d'un outil très intéressant pour une reconnaissance préliminaire rapide, qui fournira de précieuses indications sur la structure générale du site : profondeur du substratum, qualité approximative du matériau de remplissage. Cette qualité se traduit dans les valeurs de la vitesse de propagation des ondes dans les terrains. Ainsi, il ressort de nombreuses études faites par la C.P.G.F. sur le littoral Languedoc-Roussillon, une corrélation statistique du type suivant : 300 à 1000 m/s = vases ; 1000 à 1600 m/s = argiles molles ou sables vaseux, 1600 à 1800 m/s = sables. Une vitesse supérieure à 2000 m/s traduit des terrains rocheux en général. Ces premiers renseignements se révèlent très utiles pour guider la suite de l'étude à l'aide du pénétrromètre statique.

En effet, on peut à partir de ces données, obtenues rapidement et à peu de frais, tracer un programme détaillé et précis de la campagne au pénétrromètre. Cette première connaissance du site permet d'étayer l'étude économique du devis, et, sur le plan technique, conduit à une meilleure interprétation des pénétrromètres. En effet, dans le cas d'un remplissage récent plus ou moins hétérogène et doublé d'une sédimentation lenticulaire ou entrecroisée, une couche mince résistante (sable graveleux) enserrée dans une épaisse formation à caractéristiques plus faibles (vase, sable limoneux, argile molle) ne sera pas décelée en sismique réfraction, mais pourra provoquer un "faux refus" du pénétrromètre. Dans un tel cas, la comparaison des "tranches de terrains" distinguées par la sismique et de la ligne moyenne de refus au pénétrromètre mettra en lumière l'existence d'un tel niveau, qui peut se révéler illusoire en matière de fondations.

Les résultats des essais au pénétrromètre statique fourniront ensuite des valeurs chiffrées des caractéristiques mécaniques, permettant une étude de portance des fondations et une estimation de l'ordre de grandeur des tassements à craindre. Dans quelques cas, la corrélation entre les valeurs de résistance à la pointe et les vitesses sismiques enregistrées pourra se révéler suffisamment précise pour permettre des extrapolations ou interpolations rapides et une extension économique de la prospection.

III - EXEMPLE DU CAP D'AGDE

Le site de l'Etang de Luno au Cap d'Agde se trouve au pied de formations volcaniques du Pleistocène moyen constituées essentiellement de tufs et lapilli. Cette zone correspond à un ancien golfe coupé de la mer à la faveur des produits volcaniques ayant fait écran aux courants marins venus du Sud-Est. Après sa fermeture par un cordon littoral sableux, l'étang s'est progressivement comblé par des dépôts fins vaso-sableux venus se sédimenter par dessus les formations volcaniques de tufs. L'aménagement d'une station touristique nécessitait d'étudier l'épaisseur, l'extension et les qualités mécaniques des terrains constituant la bordure et le fond de l'Etang de Luno.

L'étude a donc été entreprise en deux phases :

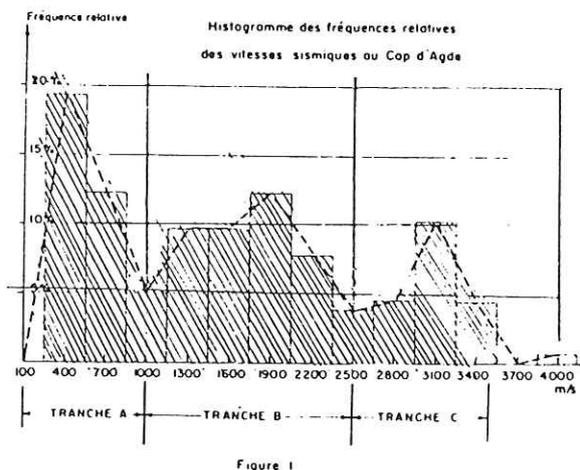
- a) la réalisation de profils sismiques partant de la limite des affleurements

volcaniques et en direction de l'étang. Cette implantation a permis de suivre le plongement du bed-rock sous les sédiments de remplissage et de vérifier simultanément sa continuité et sa qualité.

b) La réalisation d'une importante campagne au pénétromètre statique Gouda de 2,5 tonnes : les essais ont été disposés suivant une maille carrée de 50 m x 50 m concordant avec l'implantation des profils sismiques dans les zones où les deux types de mesures ont été menés.

1 - Résultats de la campagne de sismique réfraction

L'examen de l'ensemble des enregistrements montre que la sismique réfraction permet de distinguer quatre horizons. Sur l'ensemble des vitesses sismiques mesurées, 35 % se rangent dans la coupure 300 à 1000 m/s, 32 % dans la coupure 1000 à 2000 m/s, 11 % dans la coupure 2000 à 2500 m/s, et 20 % dans la coupure 2500 à 3500 m/s. La courbe de fréquence des vitesses sismiques, groupées en treize classes égales de 200 m/s, montre en fait trois pointes caractéristiques (voir figure 1)



La première traduit l'existence des terrains superficiels peu compacts : vase, limon sableux, sable peu dense ; nous la nommerons par la suite tranche A. La seconde montre une dispersion assez grande des vitesses sismiques comprises entre 1000 et 2500 m/s, ce qui est le reflet de l'hétérogénéité des matériaux : sables, tufs volcaniques dont la compacité ou le degré de cimentation peut notablement varier (tranche B).

La troisième pointe individualise nettement le substratum profond se marquant par un pic pour la classe 3000 à 3200 m/s : il s'agit essentiellement de tuf volcanique fin et compact (tranche C).

On a pu noter quelquefois des "vitesses de fond" très élevées (4000 à 4500 m/s) qui révèlent vraisemblablement des coulées ou intrusions basaltiques, au

sein des tufs profonds, analogues à celles qui constituent certains plateaux autour du volcan d'Agde.

2 - Corrélation avec les essais au pénétromètre statique

La réalisation de sondages au pénétromètre statique le long des profils de sismique réfraction a permis de dégager des corrélations nettes, dont l'utilisation ultérieure a accru la rapidité et l'économie dans la suite de l'étude.

On a constaté que les terrains de la tranche A sont traversés intégralement par le pénétromètre et que les résistances en pointe notées sont généralement très faibles : de 1 à 20 bars avec une nette dominance statistique entre 1 et 5 bars.

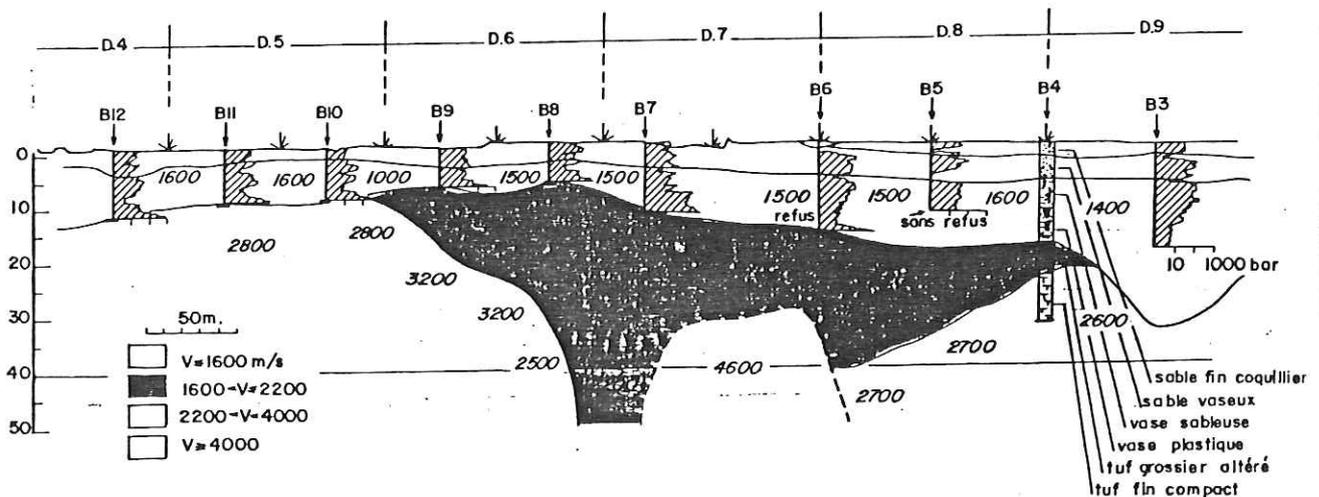
Les terrains de la tranche B représentent les formations dans lesquelles survient le refus du pénétromètre utilisé (soit pour une résistance en pointe de 250 bars) après une pénétration sur une épaisseur variable. Cette fourchette de vitesses sismiques caractérise donc l'épaisseur des terrains correspondant à du tuf en place altéré au toit ou à des formations détritiques, sableuses ou graveleuses, formées par remaniement des terrains volcaniques. On remarque en général, par comparaison des couches résolues par sismique réfraction et de la ligne moyenne de refus des sondages péné-
ométriques, que la pénétration dans cette tranche B est très faible, voire nulle, dès que la vitesse sismique est supérieure à 1600 - 1800 m/s.

On peut donc en déduire que le seuil de 2000 m/s marque les tufs suffisamment compacts et sains pour être qualifiés de roches et constituer une assise sérieuse de fondations profondes.

Toutes ces observations sont à rapprocher de la loi de vitesses sismiques citée au paragraphe II.

Nous présentons ci-dessous, en figure n° 2, une coupe très caractéristique du site d'Agde, extraite d'un profil de 1 km 200 réalisé d'Ouest en Est par sismique réfraction avant l'implantation des sondages au pénétromètre statique

Figure 2. Corrélation entre sondages au pénétromètre statique et sismique réfraction au Cap d'Agde



Les enseignements tirés des corrélations exposées ci-dessus ont permis d'estimer le refus probable du pénétromètre aux alentours de la limite dessinée entre les terrains à vitesse sismique de l'ordre de 1500 m/s et ceux à vitesse supérieure à 2000 m/s. Cette indication a servi de ligne directrice pour tracer la suite de la reconnaissance et en établir un devis estimatif précis.

On peut constater sur cet exemple, où nous avons reporté les diagrammes d'essais de pénétration, l'excellente concordance des niveaux de refus avec la limite sismique 1500/2000 m/s.

Dans la conduite de l'étude, ceci a permis notamment d'espacer d'avantage les sondages pénétrométriques.

3 - Corrélation avec des sondages mécaniques

Une étude générale préliminaire de la zone d'aménagement a été conduite à partir des résultats fournis par des sondages mécaniques réalisés suivant une maille très lâche.

Nous avons pu établir une correspondance précise entre les diagrammes pénétrométriques et les coupes de terrains, connus par sondages. Chaque fois que cela était possible, nous avons effectué un essai pénétrométrique à l'emplacement d'un sondage mécanique (7 points).

La corrélation s'établit de façon très satisfaisante et peut s'étendre d'une façon homogène à l'ensemble du secteur étudié, sans singularité particulière. On remarque la concordance entre les zones à très faible résistance et les couches de limon, sable limoneux ou vase plus ou moins sableuse, tandis que les fortes résistances de pointe et le refus coïncident avec les tufs (ou les sables compacts) plus ou moins altérés formant le substratum de l'étang.

On peut ainsi distinguer les horizons suivants :

- Tuf subaffleurant : résistance à la pointe variable suivant son degré d'altération et la présence possible de lits de gravier basaltique.
 - . tuf sain ou graveleux : la résistance en pointe croit uniformément et rapidement de quelques bars au refus
 - . tuf altéré ; la résistance en pointe oscille entre 10 et 50 bars dans la frange altérée, puis croit jusqu'au refus.
- Sables marins coquillers : les résistances à la pointe dans ces dépôts varient de 10 à 50 bars, suivant la compacité ou la présence d'éléments grossiers (coquillages, graviers....).
- Limon sableux, vase molle ou sable fin limoneux : La résistance à la pointe est très faible (de l'ordre de un bar) pour ces matériaux.

Par ailleurs, à partir des analyses sur des échantillons, une corrélation a pu être établie entre la résistance à la pointe et la proportion en éléments fins (m = pourcentage d'éléments inférieurs à 0,05 mm).

$m \leq 25 \%$	$10 < R_p < 250$ bar :	sable grossier marin ou basaltique
$25 \% < m < 38 \%$	$2 < R_p < 10$ bar :	sable fin peu dense limo- neux
$m > 38 \%$	$0 < R_p < 2$ bar :	limon sableux et vase.

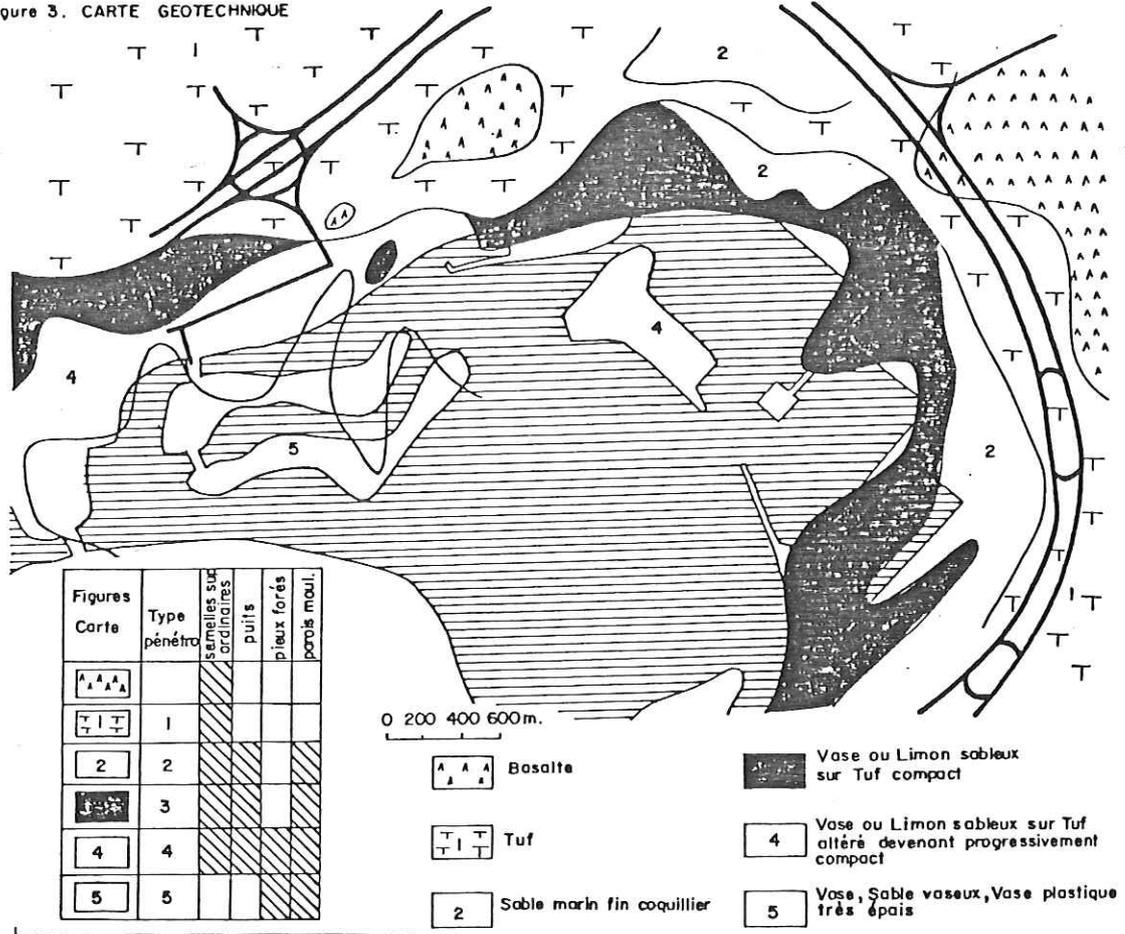
4 - Etablissement d'une carte géotechnique

L'analyse des 150 sondages au pénétromètre statique réalisés dans la partie Nord-Est de l'Etang de Luno a permis de classer les diagrammes en plusieurs familles définies comme suit :

- A) Pénétromètres à refus rapide : presque immédiat sur des tufs compacts et peu altérés ou progressif dans des tufs plus ou moins altérés et décomposés en argile dans les premiers mètres.
- B) Sondages pénétrométriques traversant des sables marins fins coquilliers recouvrant directement des tufs plus ou moins altérés au toit ou par l'intermédiaire d'une couche de vase de l'étang, biseauté entre sable et tuf.
- C) - Sondages traversant une couche de vase ou limon sableux, à caractéristiques mécaniques très faibles, reposant directement sur du tuf compact très altéré au toit, se marquant par un refus très tranché.
- D) Cette famille présente des traits semblables à ceux de la précédente en ce qui concerne les couches supérieures faibles. Elle s'en distingue par une pénétration nettement plus importante dans le toit des tufs, qui sont beaucoup plus altérés et transformés souvent en sables grossiers plus ou moins limoneux. Après la traversée de la vase, la résistance à la pointe oscille mais la moyenne est croissante sur une tranche de 1 à 4 m avant d'atteindre le refus.
- E) Il s'agit là de sondages pénétrométriques très profonds, traversant d'épaisses formations à caractéristiques mécaniques très faibles (vase, sable vaseux et vase plastique). Ce type de diagramme se caractérise essentiellement par des valeurs de résistance à la pointe oscillantes, mais toujours décroissantes dans les derniers mètres, avant d'atteindre le refus, qui survient généralement brutalement.

En portant sur la carte l'indice de la famille, dans laquelle on range chaque essai, on constate que les cinq types distingués se groupent suivant des auréoles homogènes épousant sensiblement les contours de l'étang comme on peut l'observer sur la figure n° 3 ci-dessous :

Figure 3. CARTE GEOTECHNIQUE



Les indices sont croissants de la périphérie vers le centre de l'étang et correspondent donc à des formations de qualité géotechnique décroissante, nécessitant une profondeur de fondation accrue. Nous avons pu ainsi tracer l'extension de ces sols sur le secteur étudié. On peut en déduire aisément les problèmes de fondations relatifs à chaque lot en fonction de sa situation géographique.

- Groupe 1 : fondations superficielles ordinaires
- Groupe 2 : fondations superficielles ou puits (suivant type de bâtiment)
- Groupe 3 : fondations sur puits ou parois moulées
- Groupe 4 : fondations sur puits, pieux ou parois moulées
- Groupe 5 : fondations sur pieux ou parois moulées.

Au stade de l'étude, il ne s'agit évidemment que d'options générales pour des bâtiments de type courant pouvant comprendre jusqu'à quatre ou cinq niveaux.

Les indications de la sismique réfraction se sont révélées extrêmement précieuses dans ce travail en affirmant la validité du niveau de

refus. Elles nous ont montré qu'il s'agissait bien d'un horizon rocheux, continu et relativement homogène, pouvant constituer une bonne assise pour des fondations.

IV - CONCLUSIONS

A la lumière de cet exemple, il apparaît possible de proposer une méthodologie de travail pour l'établissement de cartes géotechniques de détail des zones cotières vaseuses.

En dehors du littoral du Languedoc, ce type de prospection a également été employé aux Antilles Françaises, en particulier pour la carte géotechnique de Pointe à Pitre, dont l'étude est en cours sous la direction du B.R.G.M. Il est possible d'envisager plusieurs stades dans l'étude géotechnique de tels sites :

- Reconnaissance préliminaire du site : géologie, géomorphologie, enquête géotechnique
- Prospection sismique.

Les buts sont multiples :

- préciser la structure générale : qualité approximative du matériau de remplissage, profondeur du substratum ;
- vérifier l'existence, la continuité, l'homogénéité et la qualité d'un substratum "consistant", rocheux ou non ;
- permettre une meilleure interprétation des essais pénétrométriques en décelant les "faux refus".

- Reconnaissance pénétrométrique

Suivant le but poursuivi et les constructions envisagées, les reconnaissances à l'aide du pénétromètre seront plus ou moins denses et plus ou moins profondes. Ces reconnaissances pourront être complétées par quelques sondages mécaniques et essais de laboratoire.

Les renseignements fournis par une telle campagne devront permettre de dégager les différentes unités géotechniques, les différents types de fondations possibles, et de guider l'élaboration du plan masse.

Il faut bien souligner qu'une telle étude d'ensemble ne saurait se substituer à une étude de sol spécifique, en vue de la construction d'un bâtiment.