Thème 1

Fondations et ancrages en sols marin et côtier

Rapport général

par

J.P. Couprie

Directeur de la recherche et du développement
Solétanche, Nanterre

Mesdames, Messieurs,

Je prends la suite de notre Président pour traiter d'un sujet qui, à première vue, n'est pas tout à fait de l'hydraulique maritime car c'est une technologie un peu différente : la mécanique des sols.

Je voudrais — et je m'excuse auprès de ceux qui sont au courant de ce qu'est la mécanique des sols — insister sur certaines spécificités de cette discipline, pour que vous situiez bien l'intérêt et l'importance de ce domaine, pour le sujet qui est le notre aujourd'hui : actualité et avenir de l'hydraulique maritime.

Je ne pense pas que ce soit par hasard que le sujet ait été choisi. De même, pour les grenoblois c'est bien connu, vous savez tous qu'aussi bien à la SOGREAH qu'à l'Université, les équipes qui font de l'hydraulique maritime sont assez proches des outils de travail dans le domaine de la mécanique des sols. C'est donc une tendance qui, je crois, peut s'expliquer en profondeur.

Ce que l'on peut dire de l'objet de la mécanique des sols c'est bien évidemment les sols, mais en présentant la chose de cette façon, on occulte le fait fondamental qu'il n'y a de mécanique des sols que parce qu'il y a de l'eau dans le sol. La société à laquelle j'appartiens s'appelle Solétanche. Sur la lune, il n'y a pas de mécanique des sols, cela n'aurait aucun intérêt : tous les problèmes de la mécanique des sols viennent de l'eau dans le sol et de l'interaction de l'eau et du sol.

On peut dire que le fondateur de la mécanique des sols, Terzaghi, l'a fondée parce qu'il est le premier à avoir traité un cas classique : la consolidation des sols, question d'interaction entre eau et sol.

Je pense donc, si vous voulez, qu'il y a une filière commune entre les hydrauliciens et les mécaniciens du sol, c'est cette présence du fluide, avec la notion par exemple de pression interstitielle, c'est-à-dire pression du fluide à

l'intérieur des sols. Cette notion s'est dégagée dans les années 20 et je sais qu'une des choses qui m'a beaucoup surpris c'est de lire un article publié dans les Annales des Ponts et Chaussées, dans les années 1913, qui traitait d'une rupture qui s'était produite sur un barrage en terre dans la région de Dijon. Vous savez en effet qu'il y a beaucoup de barrages en terre pour l'alimentation des canaux qui séparent le Bassin de la Méditerranée de l'Atlantique. Dans cette région, il y avait eu un accident et l'article ne fait pas référence à la notion de pression interstitielle. On a envie de souffler à l'auteur : introduisez cette notion, vous comprendrez ce qui se passe.

Pour être beaucoup plus d'actualité, je dois vous signaler qu'actuellement se constitue un Gréco, c'est-à-dire un « groupement de recherche et d'études coordonnées » sur les problèmes posés par les milieux formés de grains et remplis de fluides, c'est-à-dire le domaine de la mécanique des sols, des bétons bitumineux qui sont des produits que les ingénieurs utilisent beaucoup dans leurs travaux qui sont tous régis par ces mêmes phénomènes d'interaction d'un fluide et d'une collection de grains relativement rigides individuellement, mais dont l'ensemble, leur squelette, leurs contacts mutuels sont loin d'être aussi rigides que des grains.

Donc, si vous voulez, je pense que la mécanique des sols n'est pas une discipline tout à fait indépendante de l'hydraulique.

Je crois que la seconde raison pour laquelle la mécanique des sols est toujours aussi présente à l'ordre du jour, c'est que les structures que l'homme met en œuvre, principalement sur les mers, sont ou bien en ancrages dynamiques — alors là les hydrauliciens sont seuls maîtres à bord — ou bien à l'ancre, bien en interaction avec le sol, ou bien enfin des structures fixes. Alors là, on tombe bien dans les problèmes de mécanique des sols et l'on ne peut pas séparer l'interaction eau-structures de l'interaction

structures-sol. La structure est le lien entre une interaction de l'eau principalement liée au phénomène de la houle et le sol et il n'est pas possible de traiter le sujet de l'interaction eau-structures sans immédiatement aborder le problème structures-sol. Donc, si vous voulez, la liaison est profonde, même pour une digue en enrochement. On s'inquiète de plus en plus des conditions de liquéfaction du sol devant la digue, liquéfaction qui peut se produire par montée de la pression interstitielle dans les pores du sol, sous l'effet des sollicitations cycliques qu'engendre la houle sur le fond lui-même.

Les sollicitations cycliques, c'est la grande nouveauté ! Il faut bien voir que les ouvrages off shore, tous les ouvrages en mer, plus les ouvrages côtiers, mais surtout off shore, ont révélé aux mécaniciens du sol une nouvelle classe de problèmes : les sollicitations cycliques répétées. On était habitué à construire des ponts, des ouvrages où la charge, le poids mort était l'élément prépondérant. Les effets du vent sont faibles, les données sismiques en général peu abordées elles aussi entraînent des sollicitations cycliques, mais beaucoup moins répétitives que celles dues à la houle. Le nombre de vagues qui peuvent aborder une structure dans une année est infiniment supérieur au nombre des oscillations cycliques de structure qu'elle peut subir, même dans un site très sismique. Donc la sollicitation cyclique répétée c'est, peut-on dire, le point focal, le problème nouveau. Des chapitres entiers de la mécanique des sols, complètement blancs il y a dix ou quinze ans, se sont remplis et nous allons traiter de certains d'entre eux aujourd'hui.

Je dois dire que les deux principaux problèmes qui ont été réglés sont, d'une part, les problèmes de structures fondées directement au fond par une grande semelle, une grande structure en béton; la structure oscille sur le fond, comme un diapason en quelque sorte. Il se passe des choses dans le sol. Mais nous ne traiterons pas ce sujet aujourd'hui. Aussi j'ai préféré choisir, puisqu'il s'agissait de parler d'actualité et de l'avenir, le problème des pieux, car l'on rencontre les pieux dans presque toutes les structures et ce sont des pieux qui sont sollicités en flexion, en traction et en compression. C'est assez complexe.

Le problème des pieux est, par certains côtés, plus simple que le problème des semelles car dans une semelle vous voyez que la double interaction, sol-structure d'une part, structure-mer d'autre part, se complique d'une interaction directe au voisinage de la périphérie de la structure, d'une interaction au sol directe, qui modifie les conditions de sol au voisinage immédiat, à l'embase de la structure. Or, dans le cas des pieux, on est rapidement en profondeur; les pieux utilisés en off shore sont extrêmement longs. Il est rare qu'il aient moins de cinquante mètres de longueur dans le fond et ils atteignent quelquefois 150 à 200 mètres; donc ce qui se passe tout à fait en surface dans le sol n'est pas le plus important.

Voilà donc, si vous voulez, comment la mécanique des sols se situe par rapport à l'hydraulique. Si l'on voulait rétablir un peu l'histoire, la mécanique des sols est une science qui a démarré dans les années 20, avec Terzaghi et qui est encore à la recherche de sa maturité. Je pense que les études de Prandtl correspondent à la même époque que la fondation de la mécanique des sols, mais avec une différence, de même qu'il y avait un passé très ancien pour

le cadre théorique général de l'hydraulique, celle-ci est une science plus facile que celle de la mécanique des sols, car les fluides, les liquides sont tout de même plus faciles à décrire et à analyser que les sols plus ou moins solides; les sols ne sont pas en effet des corps vraiment solides.

Alors que peut-on dire des problèmes que vous allez avoir à aborder aujourd'hui c'est-à-dire du comportement des pieux ?

Comment se comportent ces pieux sous l'effet de plusieurs milliers de cycles ? M. Le Tirant va vous expliquer cela. Lorsque l'on passe à 1 000 cycles, il se passe des choses toutes nouvelles, tout à fait surprenantes, pas du tout une stabilisation. On atterrit là sur une terre nouvelle. On ne s'y attendait pas et l'on n'a pas été très content. On aurait préféré que cela se stabilise, mais il y a un effort qui a été entrepris qui n'est pas achevé.

Le deuxième effet tout à fait particulier c'est que certains sols, qui forment les fonds de la mer, ont des structures instables. On les appelle les « sols carbonatés »; j'y reviendrai tout à l'heure.

En ce qui concerne ces fondations les pieux, surtout les pieux battus, présentent des difficultés singulières. C'est ainsi que j'ai vu le compte rendu de l'installation d'un pieu pour une plateforme située dans le nord-est de l'Australie qui avait 100 m. On avait mis le tube au fond puis posé le marteau dessus, il est descendu de 40 m dans le fond. On a donné un coup de marteau et le tube était déjà 70 mètres au fond ! Comme le pieu à 100 m de long et qu'il est à 220 m sous le niveau de la mer, le propriétaire s'interroge sur la stabilité de sa plateforme et je participe à son inquiétude, mais il ne m'a pas encore passé de commande. C'est vous dire que les sols carbonatés posent un très grand problème. S'il y a des batteurs de pieux parmi vous, sachez que le pire problème pour un batteur de pieu, c'est le sol trop mou. Il m'est arrivé de battre un pieu que l'on a vu disparaître dans le sol et le marteau se casser; l'effet de choc, c'est le marteau qui l'encaisse, il se casse et l'on perd le pieu. Cela vous est-il déjà arrivé de planter un clou, de donner un coup de marteau, et le clou de traverser la planche, ceci c'est pour vous situer l'importance du problème. Je cherchais à vous faire sentir qu'il y avait là un problème très nouveau très difficile, d'autant plus qu'il faut que vous sachiez que 40 % du pétrole off shore se situent dans les mers tropicales, c'est-à-dire dans les sols carbonatés. Vous voyez donc que c'est un problème majeur.

Je voudrais poursuivre mon introduction en vous présentant quelques problèmes de méthodologie de notre recherche.

Dans la mécanique des sols — c'est assez général dans les méthodes des ingénieurs — les lois de comportement des solides sont assez complexes et ici l'on a affaire à deux phases, aussi ne s'est-on pas tellement fié à la théorie et l'on s'est lancé dans un vaste programme à l'échelle du monde entier. M. Le Tirant vous parlera des expériences montées en France, dans le cadre de l'ARGEMA (Association de Recherche en Géotechnique Marine) qui regroupe autour de l'Institut Français du Pétrole un certain nombre d'industriels français intéressés par l'off shore qui consacre un fonds d'investissements important chaque année à développer des études et des expérimentations sur des pieux dans des sols aussi proches que possible des conditions des fonds marins, si possible à terre parce que

l'expérimentation dans le fond de la mer n'est pas très commode et coûte très cher, expérimentations liées à la mise en théorie des résultats obtenus, mise en théorie qui va très loin et recourt évidemment aux ordinateurs. M. Banal disait que l'introduction de l'ordinateur changeait le paysage qu'il avait connu, eh bien je pense que l'ordinateur n'est qu'un moyen qui a rendu possible la théorisation des choses à fond et, actuellement, l'on est dans une phase où ces expérimentations renvoient à des théories et les théories aux expérimentations. C'était pour moi un petit problème que de savoir par qui commencer, la théorie ou l'expérimentation ? J'ai pensé que, devant votre auditoire, on commencerait par la théorie; cela honorerait les gens de Grenoble qui nous reçoivent, puisque c'est un représentant d'une équipe grenobloise qui parlera de théorie, M. Foray, et qui présentera les travaux faits par l'équipe M. Boulon-M. Foray.

Ensuite M. Le Tirant vous parlera des résultats expérimentaux.

Le troisième sujet, que je présenterai, a été traité par M. Legendre, de Solmarine, qui est une filiale de Solétanche, qui s'occupe des fondations offshore. M. Legendre n'a pu venir aujourd'hui, je vous présenterai donc ce sujet, mais vous avez trouvé dans les pièces du colloque déjà publiées des développements sur une nouvelle méthode d'exécution de pieux en cours de développement, car de même qu'un sujet nouveau suppose expérimentation et théorie cela suppose aussi que l'on mette au point des nouvelles manières d'intervenir.

Je ne veux pas beaucoup insister sur ce point mais je crois que c'est d'actualité et d'avenir. Tout problème nouveau engendre un flux de recherches car autour de machines telles que celle-là les choses ne sont pas simples; travailler à 1 000 mètres de profondeur ne va pas de soi.

Pour vous situer encore un peu le cadre de la mécanique des sols, il faut que je vous dise de quoi l'on parle lorsqu'il est question de sols. Pour les mécaniciens des fluides, il est clair que l'eau ou une suspension de grains dans l'eau ou de l'huile ce sont des fluides différents qu'il va falloir traiter de façon différente. Pour les mécaniciens des sols, il y a des types de sol, aussi je voulais vous mettre un peu en garde contre le discours propre aux mécaniciens du sol : lorsque l'on parle de sable et de silt, ce sont des grains peu collés entre eux; on dit alors qu'il n'y a pas de cohésion mais du frottement interne entre les grains. C'est une première classe de sols, qui est fort importante et dont l'état de densité peut être très variable. On peut serrer des grains de sable plus ou moins et les lois de comportement vont être différentes.

Ensuite il y a les groupes « argile » normalement consolidés. Vous verrez que les mécaniciens du sol emploient toujours le mot « normalement » et il faut que je vous explique pourquoi. Il y a en effet des conditions anormales de consolidation. Est-ce la normale lorsqu'elles sont excessives, c'est-à-dire qu'il y a eu chargement très fort dans les temps géologiques anciens dont l'argile se souvient. C'est l'exemple des argiles surconsolidées qui ont des propriétés très raides et qui comme des ressorts bandés, lorsque vous les déchargez, libèrent beaucoup d'énergie. En fait on en rencontre peu dans les fonds de la mer où les sols sont plutôt d'origine récente et ce que l'on trouve plutôt ce sont des argiles non consolidées, c'est-à-dire qu'elles sont déposées depuis une époque si

récente que le phénomène de tassement, sous l'effet du propre poids de l'argile, n'a pas eu le temps de se dérouler complètement. Il faut savoir que, pour des sols très fins, le temps de consolidation peut atteindre 1 000 ans; donc vous avez au voisinage d'un delta quantité de manières déposées récemment.

Enfin vous avez la classe des sols carbonatés dont je vous ai parlé tout à l'heure, qui proviennent des résidus de coraux. Ce sont des formations qui sont très liées à la biologie, dans les eaux chaudes des mers tropicales, et qui donnent lieu à des structures que l'on connaît mal et restent un problème majeur.

Le second aspect des choses très important en mécanique des sols c'est que les problèmes d'hystérésis, d'hérédité dans le sol ne peuvent pas être ignorés : du point de vue théorique, il est difficile d'en tenir compte. Vous savez que tous les systèmes à hérédité sont des systèmes difficiles à traiter, mais en mécanique des sols, il est indiscutable que cela se produit et les effets cycliques, les cumuls qui ont lieu à l'occasion des sollicitations cycliques sont bien la preuve de ce que j'avance, à savoir que l'histoire du chargement est importante pour le comportement de l'ouvrage.

Parmi les faits d'histoire qui constituent la base de départ de l'analyse, il y a toutes les circonstances qui ont abouti à la construction même de l'ouvrage; je parle en particulier des pieux. Batre un pieu dans le sol, c'est créer une perturbation assez violente dans le sol au voisinage immédiat du pieu. Je ne veux pas rentrer dans le détail, mais de la façon dont le pieu a été fait dépend son comportement. C'est pourquoi entre un pieu battu et un pieu foré, il y a une différence de comportement. Cet aspect d'une hérédité dans le comportement — hérédité dont il est toujours très difficile de tenir compte dans une analyse — est bien conçu par les mécaniciens du sol; même s'ils ne l'explicitent pas aussi brutalement que je viens de le faire, mais je tenais, dans cette introduction, à vous situer un peu les points sur lesquels le langage des mécaniciens du sol n'a pas l'habitude de revenir car c'est une donnée acquise. Nous avons en effet un langage un peu éloigné de technique à technique. Vous savez que, personnellement, j'ai consacré une partie de ma carrière à construire des digues. Je suis plutôt de formation hydraulicien. Mais j'ai passé une autre partie de ma vie à faire de la mécanique des sols et je suis personnellement habitué au langage des deux techniques. Je me suis donc dit qu'il fallait que je vous mette un peu en garde contre les problèmes de langage.

Je voudrais maintenant, si vous le voulez bien, demander à M. Foray de présenter ce qui est déjà publié.

M. Le Tirant, qui n'avait pas remis de feuillets, fera un exposé.

Ensuite, je prendrai quelques instants la parole pour parler de « l'hydrofraise ».

Je dégagerai ensuite les conclusions, étant entendu que là je vous ai présenté d'où l'on vient, où l'on en est actuellement et dans mon point de conclusion, je chercherai plutôt à souligner ce qui n'est pas expliqué et ce qui reste à faire.

Je serai très heureux qu'il y ait ensuite peut-être quelques échanges entre nous pour savoir si certains parmi vous voient des problèmes d'avenir que nous n'aurions pas soulevés.