

## REASONS FOR THE SUCCESS OF MENARD PRESSUREMETER LE SUCCES DU PRESSIOMETRE MENARD

M. GAMBIN

FOURTH INTERNATIONAL  
SYMPOSIUM ON  
PRESSUREMETERS  
May 17-19, 1995  
Sherbrooke (Québec) Canada

Forty years after Louis Ménard first patented his pressuremeter, we can try to understand why this instrument for in situ measurement of stress-strain soil behaviour parameters has met with such success in France.

The basic reason is that Ménard used this indisputably superior instrument as a basis for a rational foundation design philosophy. Furthermore, the Ménard pressuremeter provides the designer with one of his few means of in situ soil testing that can quickly check soil improvement after it has been treated by mechanical techniques.

### 1. UNDISPUTED TECHNOLOGICAL ADVANTAGES

The oldest geotechnical field test is certainly the plate loading test which applies incremental loads to the soil to determine both its deformation parameter and its failure parameter. It is in effect a means of simulating the soil/structure interaction.

Unfortunately, technology subsequently dictated a move towards strain-controlled instead of stress-controlled testing. This change occurred both in the laboratory, with unconfined compression testing, and in field investigations, in the form of the so-called static penetrometer.

There also appeared the problem of providing a reaction in the form of suitable kentledge for plate tests or static cone testing. This was a costly item, and preference accordingly went to dynamic penetration testing. Driving a bar, rail or steel I-beam into the ground is another very old approach. Terzaghi standardised it in the more sophisticated form of the Raymond standard test, adding a soil sampler to the foot. This subsequently became known as the Standard Penetration Test. Nearly all the other dynamic penetration tests have since been standardised.

Where does the Ménard pressuremeter (Fig. 1) stand in this catalogue?

Quarante ans après le dépôt du premier brevet de Louis Ménard sur le pressiomètre, on peut essayer de répondre à la question: pourquoi cet appareil de mesure in situ des caractéristiques mécaniques du sol a-t-il eu un tel succès en France?

Parce qu'autour d'un instrument dont les avantages sont incontestables, Ménard a su bâtir une philosophie du dimensionnement rationnel des fondations des ouvrages. Parce qu'en plus, le pressiomètre est l'un des rares essais in situ qui permette le contrôle des sols soumis à un traitement d'amélioration dans un temps très court.

### 1. DES AVANTAGES TECHNOLOGIQUES INCONTESTABLES

Le plus ancien des essais in situ en géotechnique est certainement l'essai de chargement à la plaque. Par un chargement par paliers, il permet de déterminer et une caractéristique de déformation et une caractéristique de rupture. C'est une véritable simulation de l'interaction sol-structure.

Malheureusement, pour des raisons de facilité technologique, on est passé ensuite à des essais en déformations imposées au lieu et en place d'essais en contraintes imposées, que ce soit in situ (le pénétromètre dit "statique") ou en laboratoire (les essais de compression simple ou en contraintes triaxiales).

De plus, la matérialisation de la réaction indispensable aux opérations de chargement ou de vérinage sur la tige du pénétromètre étant coûteuse, on s'est souvent orienté vers des essais de pénétration dynamique in situ. Le battage d'une barre, d'un rail ou d'un profilé est un procédé lui aussi très ancien. Terzaghi l'avait normalisé lorsque l'essai est rendu plus sophistiqué par l'emploi d'un carottier en bout, sous le nom d'essai de pénétration standard (SPT en Anglais). Depuis, la plupart des autres essais de pénétration dynamique ont été normalisés.

Comment se place l'essai pressiométrique Ménard (Fig.1) dans cette panoplie?

1.1. *L'essai pressiométrique est réalisé dans un forage créé à l'avance.*



Fig. 1. Le pressiomètre Ménard avec enregistreur automatique des lectures  
Menard pressuremeter with automatic data logger

1.1. *The pressuremeter test is performed in a pre-drilled borehole.*

Except in certain special cases like investigating sands and gravels below the water table, the Ménard pressuremeter is inserted into a previously drilled hole. The test can thus always be successfully performed, unlike the case with cone tests which too often meet refusal. In a data base built up by the French Laboratoire Central des Ponts et Chaussées correlating pile loading test results with design predictions based either on the Ménard pressuremeter or on static cone tests, only 36 per cent of the correlations were possible when the tests were performed by static cone, as against 99 per cent when they were done with the Ménard pressuremeter [1].

The Ménard test can always be successfully performed at any depth. There are examples of tests carried out at a depth of more than 120m [2]. Also shallow holes can be drilled in loose or soft soils with a post hole hand auger.

Testing sands and gravels below the water table usually involves driving the probe inside a slotted tube (the slits are now generally helical segments instead of being straight). Sometimes, drilling a smaller diameter pilot hole is a prerequisite.

Sauf dans certains cas particuliers, comme dans celui des essais des sables et graviers sous le niveau de la nappe phréatique, la sonde du pressiomètre Ménard est descendue dans un forage pratiqué à l'avance. Il s'ensuit que l'utilisateur ne peut rencontrer d'impossibilité de faire l'essai, comme cela peut être le cas pour les essais de pénétration. Dans un fichier que le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Paris a établi pour corréler les résultats d'essais de chargement de pieu aux résultats des calculs de dimensionnement basés soit sur des essais au pressiomètre Ménard, soit sur des essais au pénétromètre statique, seulement 36 pour cent des corrélations ont pu être menées à bien lorsque les essais préalables ont été exécutés au pénétromètre statique, contre 99 pour cent lorsque les essais ont été réalisés au pressiomètre Ménard [1].

Ces essais peuvent être exécutés à n'importe quelle profondeur. Des essais ont été ainsi conduits à plus de 120 m de profondeur [2]. Dans les terrains meubles, les forages peuvent même être réalisés à la tarière à main.

Dans le cas des essais dans les sables et graviers noyés, on procède généralement, après un avant-trou en plus petit diamètre si nécessaire, à la mise en place de la sonde par battage d'un tube fendu selon plusieurs génératrices (ou, désormais, selon plusieurs sections d'hélices).

1.2. *L'essai pressiométrique Ménard est un essai de chargement qui assure sa propre réaction.*

Habituellement les essais de chargement nécessitent la mise en oeuvre d'une réaction, soit sous forme d'une charge, soit par l'intermédiaire d'ancrages installés dans le sol environnant. Ces 2 solutions sont également utilisées pour assurer la pénétration de la pointe du pénétromètre dit statique.

L'essai pressiométrique Ménard est un essai de chargement à contraintes imposées sur les parois du forage, essai dans lequel la pression exercée par une génératrice de la sonde a pour réaction la pression exercée par la génératrice de la sonde diamétralement opposée. Il n'est pas nécessaire de matérialiser une réaction extérieure coûteuse.

On a dit quelquefois que l'essai pressiométrique était cher, mais c'est lorsque l'essai au pressiomètre Ménard est confondu avec l'essai au pressiomètre

### 1.2. *The Ménard pressuremeter test is a loading test providing its own reaction*

Loading tests habitually require some sort of reaction, in the form of kentledge or tie-downs in the surrounding ground. One of these two alternatives is also required when pushing the static cone into the ground.

The Ménard pressuremeter test on the other hand is a stress-controlled test in which the load is applied to the walls of the borehole. The pressure applied by one side of the probe finds an equal reaction from the pressure exerted by the diametrically opposite side. No costly extraneous reaction is needed.

The pressuremeter test has been said to be costly to perform, but this accusation comes from confusing the Ménard pressuremeter test with the self-boring pressuremeter, which requires an external reaction to counterbalance soil friction against the cell membrane when pushing the probe to the desired test level.

This particular feature of the Ménard pressuremeter appears to be the greatest advantage for seabed and other underwater tests from floating platforms, since there is no need for a stiff linkage between the probe and the drilling platform.

### 1.3. *The Ménard pressuremeter test involves a large volume of ground*

Laboratory tests can only be performed on samples up to a few cubic centimetres in size, and static cone tests measure the resistance of the soil against displacement by a cone measuring only 10cm<sup>2</sup> at its widest section. The Ménard pressuremeter applies a load of up to 850 kN (85 tonnes) to a developed area of 850cm<sup>2</sup>.

### 1.4. *Probe size and design eliminates many kinds of error and facilitates use*

The theory on which the interpretation of test results is based has been developed for the expansion of a cylinder of infinite length subjected to a uniform internal pressure. Total probe length was therefore selected such that the discrepancy with theory will be negligible. For example, for a probe length to diameter ratio of around 2 as used on some other instruments, the measured limit pressure will be closer to the limit pressure for spherical expansion than for cylindrical expansion, and therefore higher. Similarly, in order to obtain a uniform applied pressure over the whole length of the hole tested and avoid end effects, the probe has a central measurement cell and a pair of flanking guard cells. The guard cells also allow the test fluid to be sent back to the surface volumeter at the

autoforeur qui nécessite quant à lui une réaction extérieure pour vaincre les frottements du sol sur la gaine en vue de mettre en place la sonde au niveau souhaité pour l'essai.

Cette particularité de l'essai Ménard est exploitée au mieux dans les essais en site marin ou aquatique en général puisqu'elle évite qu'aucun liaison rigide ne soit nécessaire entre la sonde et la plateforme de sondage qui peut donc être flottante.

### 1.3. *L'essai pressiométrique Ménard sollicite un volume de sol important*

Tandis que les essais en laboratoire ne peuvent intéresser qu'une centaine de cm<sup>3</sup>, que les essais de pénétration statique mesurent la résistance au refoulement du sol devant le déplacement d'un cône de 10 cm<sup>2</sup> de maître couple, les essais au pressiomètre Ménard sollicitent le sol sur une surface développée de 850 cm<sup>2</sup>, avec un effort total appliqué pouvant atteindre 850 kN (85 tonnes).

### 1.4. *Les dimensions et la conception de la sonde éliminent toutes sortes d'erreurs et facilitent la mise en oeuvre*

Les théories sur lesquelles sont basées l'interprétation des résultats des essais ont été développées pour l'expansion d'un cylindre de longueur infinie soumis à une pression intérieure uniforme. Ainsi, la longueur totale de la sonde Ménard a été choisie de manière que l'erreur commise par rapport à la théorie soit négligeable. Par exemple, pour des rapports de longueur de sonde à leur diamètre de l'ordre de 2 que l'on observe sur certains autres appareils, la pression limite mesurée sera plus proche de la valeur de la pression limite en expansion sphérique qu'en expansion cylindrique, donc plus élevée. De même, pour avoir une pression appliquée uniforme tout le long de la paroi du tronçon de forage testé et pour éviter les effets d'extrémité, la sonde possède une cellule centrale de mesure et 2 cellules de garde. Les cellules de garde, de par leur conception, permettent de plus de renvoyer en fin d'essai le fluide depuis la cellule centrale vers le volumètre en surface.

Du fait que, dans le cas du pressiomètre Ménard, la réponse du sol est mesurée par l'augmentation du volume de la cavité du forage sous l'effet de la sollicitation et non pas comme dans d'autres appareils par le déplacement de palpeurs selon un certain nombre de rayons de cette cavité, les résultats obtenus lisseront les faiblesses localisées du sol testé. Cette réponse moyenne du sol intégrant la réaction

end of the test.

In the Ménard pressuremeter test, soil response is measured from the volume expansion of the test cavity under load, unlike other devices, which record movements of displacement sensors on a certain number of radii. The Ménard test data therefore smoothes out any localised weaknesses in the soil. The averaged soil response of a soil volume of not less than 1/100th of a cubic metre and sometimes up to one-half a cubic metre is usually more useful to the practising geotechnical engineer than an unrepresentative displacement sensor output by reason of the lack of local soil uniformity.

1.5. *Readings are suitable for automatic recording*

In the SPT and other dynamic penetration tests, automatic recording of the number of blows to achieve the pre-set penetration depth is still unusual. Automatic recording was on the other hand essential with the static cone to shorten the time between readings of point resistance and skin friction (one reading of each type is only possible every 120mm penetration, i.e. every six seconds with a Begeman point).

With the G pressuremeter requiring a pressure differential to be established and maintained throughout the test between the central measuring cell in the probe and the guard cells, it was advantageous to provide for automatic recording of pressures and volumes over time for each test and also for the calibrations for system compliance. It is an assurance of freedom from errors both for the geotechnical engineer and for the project manager [3].

A few years ago, a manufacturer developed a computerised recording system suitable for subsequent interpretation of the test results to calculate the pressuremeter modulus and limit pressure. It can be used with software codes currently available in Western Europe [4] for computer-aided preliminary design of foundations using the method described below.

2. SIMPLE MEASURED PROPERTIES

The Ménard test is a true static soil loading test and must therefore yield the two characteristic parameters of the soil tested, i.e. a deformation parameter and a failure parameter.

These two parameters are amenable to simple response modelling, i.e. elastic theory and elastoplastic theory, the only models that were available at the time the apparatus appeared.

d'un volume d'au moins 1/100 m<sup>3</sup> et d'au plus 1/2 m<sup>3</sup> est généralement plus importante pour le géotechnicien professionnel que les lectures non représentatives de certains palpeurs face à des hétérogénéités ponctuelles dans la structure du sol.

1.5. *Les lectures peuvent être enregistrées automatiquement*

Si pour l'essai de pénétration standard (SPT) et les divers essais de pénétration dynamique les enregistrements automatiques du nombre de coups pour un enfoncement donné sont encore rares, il n'en est pas de même pour les essais au pénétromètre statique pour lequel l'enregistrement s'imposait en vue de réduire l'intervalle entre les lectures de la résistance de pointe et de la résistance de frottement (une lecture de chaque résistance n'est possible que tous les 120 mm de pénétration, soit toutes les 6 secondes avec une pointe Begeman).

Avec les pressiomètres de type G pour lesquels il faut établir puis maintenir constante tout au long de l'essai une pression différentielle entre la cellule centrale de mesure et les cellules de garde de la sonde, il était préférable de prévoir l'enregistrement des lectures de pression et de volume en fonction du temps ainsi que celles des différents étalonnages des réactions parasites du système. Cet enregistrement est une gage de qualité de l'essai tant pour le géotechnicien que pour le Maître d'Oeuvre responsable du projet [3].

C'est pourquoi l'un des fabricants a mis au point il y a quelques années un système d'enregistrement qui permet ensuite une interprétation assistée par ordinateur des résultats pour obtenir module et pression limite pressiométrique. Le programme peut être couplé avec les logiciels d'exploitation existant actuellement en Europe de l'Ouest [4], lesquels permettent un prédimensionnement des fondation selon la méthode décrite plus loin.

2. DES CARACTERISTIQUES MESUREES SIMPLES

Puisque l'essai pressiométrique Ménard est un véritable essai de chargement statique du sol, il doit permettre d'obtenir 2 caractéristiques de ce sol, l'une de déformation, l'autre de rupture.

Ces 2 caractéristiques mécaniques seront liées à des modèles simples de comportement: théorie de l'élasticité, théorie de l'élastoplasticité, seuls modèles disponibles à l'époque du lancement de l'appareil.

De plus, l'essai pressiométrique est le seul essai in

Furthermore, the pressuremeter test is the only in situ test in which the boundary conditions are fully known theoretically, apart from the remoulding of the borehole walls caused by the drilling operation and the time elapsing between drilling and testing.

This is far different from the empirical properties measured by other instruments, which are all strain-controlled:

- a) The standard penetration test (SPT) only yields the number of blows  $N$  needed to advance a specified sampler one unit distance.
- b) The static penetration test only yields the force needed to drive a cone divided by the cone area, this  $q_c$  ratio<sup>1</sup> having no theoretical foundation [5, 6].
- c) The shear vane test, confined to soft clays, yields the ratio between a torque divided by a lever arm and an arbitrary surface, assumed to be the surface on which slip occurs during the test, called  $c_u$ , which is in fact a conventional concept [7].

Using the in situ test classification recently proposed [8], which recognises three categories, i.e.

*Category I:* entirely empirical tests yielding a number (dynamic cone test, SPT) or a quantity having no theoretical basis (so-called static cone),

*Category II:* tests interpreted on the basis of a simple theoretical model and yielding meaningful engineering quantities, as with the Ménard pressuremeter and self-boring pressuremeter,

*Category III:* special tests based on a well-defined stress path, for which an elaborate theory exists,

then the Ménard pressuremeter tests clearly belongs to the second category.

### 2.1. Meaning of Ménard pressuremeter modulus

The Ménard pressuremeter modulus is calculated on the near-linear part of the pressuremeter curve (Fig.2), drawn by plotting the reduced data (i.e. after correction for system compliance) derived from the pressuremeter pressure-volume monitor readings.

Lamé's theory [9] is used. It concerns the deformation of a circular cavity in a two-dimensional elastic continuum under the effect of an increasing internal pressure.

While it would have been preferable in this case to derive the shear modulus  $G$  as avoiding the need to make an assumption on the value of the Poisson's ratio, Ménard in fact derived an equivalent Young's elastic modulus from his test. It is said to be an equivalent modulus because experience has since shown that the modulus of elasticity obtained from

in situ dans lequel les conditions aux limites sont parfaitement connues théoriquement, c'est-à-dire mis à part le remaniement toujours possible des parois du forage pendant la réalisation de ce forage et durant le temps d'attente entre la réalisation du forage et celle de l'essai.

On est donc loin du caractère empirique des caractéristiques mesurées avec les autres appareils, tous manipulés, quant à eux, en déformations imposées:

- a) l'essai de pénétration standard (SPT) ne donne qu'un nombre  $N$  (celui des coups de mouton qu'il faut donner pour un enfoncement convenu d'un carottier défini)
- b) l'essai au pénétromètre statique ne donne que le rapport de la force de fonçage d'un cône divisée par la maître couple de ce cône, rapport<sup>1</sup> dénommé  $q_c$  qui n'a aucun justification théorique [5, 6]
- c) l'essai au scissomètre, limité à l'étude des argiles peu consistantes, donne le rapport d'un couple à une surface supposée être celle sur laquelle s'effectue le glissement de l'argile sur elle-même pendant l'essai, ce rapport dénommé  $c_u$  étant finalement très conventionnel [7].

Si on retient la classification des essais in situ qui a été récemment proposée [8] et qui divise ces essais en trois catégories:

*Catégorie I:* les essais totalement empiriques qui ne fournissent qu'un nombre (pénétromètre dynamique, SPT) ou une grandeur n'ayant pas de base théorique (pénétromètre dit statique),

*Catégorie II:* les essais dont l'exploitation est basée sur une théorie simple et qui fournissent donc des grandeurs mécaniques ayant un sens, c'est le cas des essais au pressiomètre Ménard ou au pressiomètre autoforeur,

*Catégorie III:* les essais spéciaux basés sur un chemin de contrainte bien défini et pour lesquels il existe une théorie élaborée,

on constate que l'essai au pressiomètre Ménard appartient bien à la deuxième catégorie.

### 2.1. Signification du module pressiométrique Ménard

Ce module est calculé sur la partie quasi-linéaire de la courbe pressiométrique (Fig.2) qui relie les points de coordonnées  $p$  et  $v$ , valeurs déduites des lectures sur le contrôleur pression-volume de l'appareil, après avoir éliminé les réactions parasites du système.

On utilise la théorie de Lamé [9] qui a pour objet la

any type of dilatometer test is not the same as the elastic modulus determined from a uniaxial compression test [10]. Furthermore, since (according to elastic theory at least)  $G$  has the same value in total stresses or effective stresses, the fact of the soil being drained or undrained is no reason for disputing the validity of this modulus.

As early as 1962 [11], Ménard had shown that soil

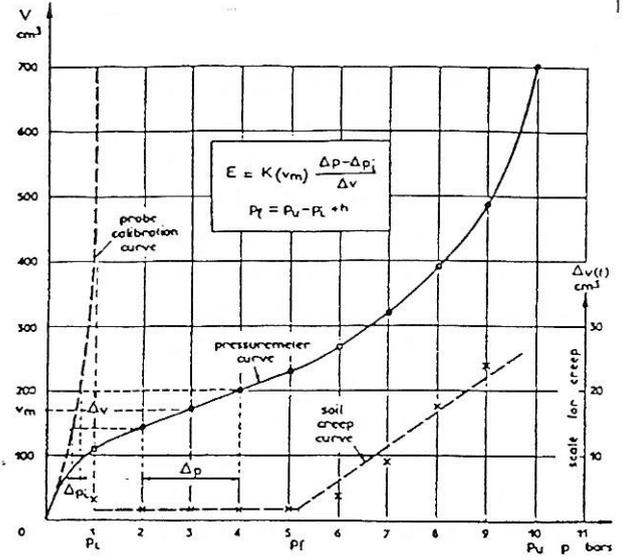


Fig.2. La courbe pressiométrique Ménard et la courbe de fluage  
Ménard pressuremeter curve and creep curve

could not display a purely elastic response. Since that time, research has confirmed that elastic soil behaviour is only applicable to very small strains, which tend to be smaller as the stress field becomes more deviatoric [12]. With the help of our figures 3 and 4 from Ref.11, we can retrace Ménard's demonstration.

Consider two grains of a granular soil in equilibrium. The contact force where they touch, which is the resultant of the stresses acting on the contact area between the two grains, is represented by vector 1, whose component in the tangent plane is too small to make one grain move with respect to the other. Consequently, vector 1 lies within the Coulomb cone associated with the contact surface  $S$ . If the forces and moments acting on the soil increase, vector 1 will change. So long as it does not pass the position of vector 2 (Phase 1 on Fig.4), the two grains remain in contact at the same place. But if the vector moves outside the Coulomb cone (Phase 2 on Fig. 4), the grains will move relative to each other and the vector takes up position 3 right on the Coulomb cone associated with the new contact area where the two

déformation d'une cavité de section circulaire dans un milieu élastique à deux dimensions sous l'effet d'une augmentation de pression interne.

Bien que la détermination du module de cisaillement  $G$  eut été préférable ici puisqu'elle aurait évité de faire une hypothèse sur la valeur du coefficient de Poisson, Ménard a déduit de l'essai l'équivalent d'un module d'Young  $E$ . Nous disons l'équivalent, car l'expérience a montré depuis que quel que soit le type d'essai dilatométrique employé, le module d'Young obtenu n'est pas égal à celui déterminé par un essai de compression simple [10]. De plus, comme, tout au moins selon la théorie de l'élasticité,  $G$  est le même en contraintes totales ou effectives, on n'aurait pu contester la validité du module selon que le sol est drainé ou non.

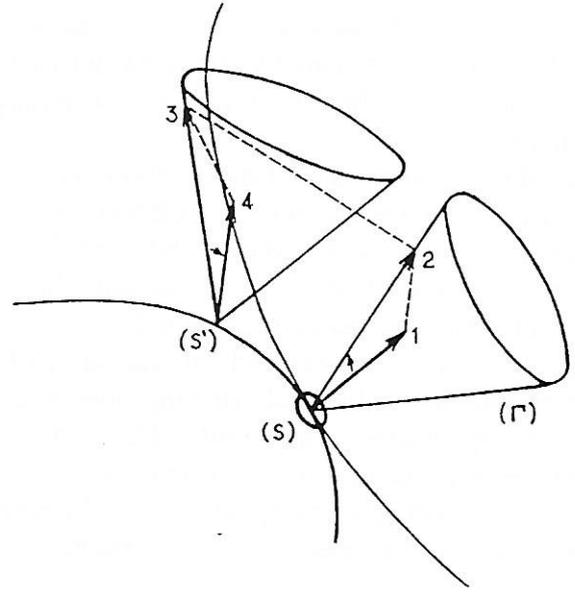


Fig.3. Equilibres successifs d'une liaison intergranulaire (d'après Ménard et Rousseau)  
Intergranular contact equilibrium states (after Menard & Rousseau)

Ménard, dès 1962 [11], avait montré que le sol ne pouvait avoir un comportement purement élastique. Depuis, les chercheurs ont confirmé que le comportement élastique des sols est limité à un domaine de très petites déformations, d'autant plus petit que le champ de contraintes est à plus forte tendance déviatoire [12]. Si nous reprenons les figures données dans la référence [11] (Fig. 3 et 4), on peut reprendre la démonstration de Louis Ménard.

Soit deux grains d'un sol granulaires en équilibre. La force de contact entre ces 2 grains, résultante des contraintes que s'exercent sur la surface de contact entre les 2 grains, est représentée par le vecteur 1

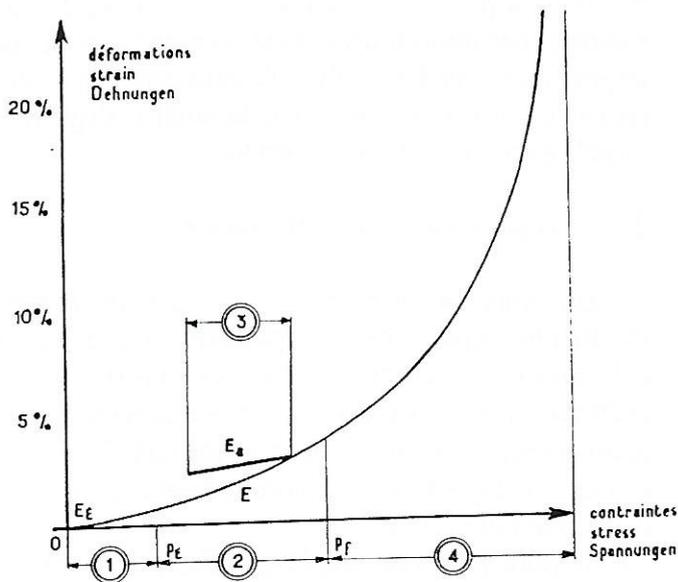


Fig. 4. La réponse du sol à un champ de contrainte déviatoire  
 1. phase des déformations élastiques vraies 2. phase des déformations micro-plastiques (encore appelées pseudo-plastiques) 3. phase des déformations cycliques 4. phase des grandes déformations

Soil response to deviatoric stress field

1. True elastic strain phase 2. Microplastic strain phase (still sometimes called pseudo-elastic strain) 3. Cyclic strain phase 4. Large strain phase

grains become stationary. When the applied forces and moments revert to their initial values, the contact force will be represented by vector 4, which cannot coincide with vector 1. Irrecoverable plastic strain has occurred (Phase 3 on Fig.4). The very small Phase 1 movement cannot be measured by the Ménard pressuremeter. Only displacement during Phase 2, the microplastic soil response, is measurable.

This did not prevent Ménard from retaining the same way of calculating the E-modulus for convenience, even though he was well aware that it was an equivalent modulus. Inserting the test probe into a pre-drilled hole even offered him a further opportunity: In the self-boring pressuremeter test, the curvature of the 'pressuremeter curve' constantly changes (Fig.4) and therefore, so does the shear modulus, as a function of the deformation. The pressuremeter modulus on the other hand (Fig.2) remains relatively constant throughout the microplastic soil response range because two curves of opposite curvature are joined. These are the curve for first contact between the probe sheath with the borehole wall, and the soil pressure vs strain curve proper. Some computer codes are in fact based on finding the slope of the curve at the inflection point and it has been shown that this interpretation yields accurate and reliable results.

dont la composante dans le plan tangent ne permet pas le déplacement d'un grain par rapport à l'autre: le vecteur 1 est à l'intérieur du cône de Coulomb associé à la surface de contact S. Si les forces et les moments appliqués au sol s'accroissent, le vecteur 1 va changer. Tant qu'il ne dépasse pas la position du vecteur 2 (Phase 1 sur Fig.4), les deux grains restent en contact au même endroit. Par contre, si le vecteur sort du cône de Coulomb (Phase 2 sur Fig.4), les 2 grains vont avoir un mouvement relatif de déplacement et le vecteur viendra dans la position 3, sur le cône de Coulomb associé à la nouvelle surface de contact où les 2 grains s'immobilisent. Quand les forces et moments extérieurs reprendront leurs valeurs initiales, la force de contact sera représentée par le vecteur 4, en aucun cas confondu avec le vecteur 1. Il y aura une déformation rémanente (Phase 3 sur Fig.4). La phase 1 de très faible amplitude ne peut être mesurée avec un pressiomètre Ménard. Seule la phase 2 dite de réponse du sol en microplasticité est mesurable.

Tout cela n'a pas empêché Louis Ménard de conserver par commodité le calcul du module de déformation qu'il avait proposé auparavant, sachant bien qu'il s'agissaient d'un module apparent. La méthode de mise en place de la sonde de mesure dans un trou de forage réalisé à l'avance lui donne même une chance supplémentaire. Dans les essais au pressiomètre autoforeur, la courbure de la "courbe pressiométrique" varie constamment (Fig.4) donc concomitamment le module de déformation (ou plus exactement le module de cisaillement) varie aussi en fonction de cette déformation. Au contraire (Fig.2), le module pressiométrique reste relativement constant tout au long du domaine de réponse microplastique du sol en raison du raccordement de 2 courbes à courbures opposées: la courbe de mise en contact de la gaine de la sonde avec les parois du forage et la courbe de pression-déformation du sol proprement dite. Certains logiciels de calcul sont d'ailleurs basés sur la recherche de la pente de la courbe au point d'inflexion et on a pu montrer qu'une telle interprétation conduit à des résultats justes et fidèles.

Reste que la valeur de ces modules n'est pas celle du module d'Young mesuré en compression simple ou triaxiale. Louis Ménard a d'abord voulu justifier cette constatation par le fait que le module varie en fonction de l'amplitude des déformations [13], mais en fait la même différence se retrouve avec les dilatomètres à plaque rigides pour lesquels il est recommandé de multiplier par 2,5 les valeurs obtenues in situ pour comparer à celles obtenues en compression simple [14, 15]. Et pour ces

This does not alter the fact that the modulus is not equal to the elastic modulus obtained in uniaxial or triaxial compression. Ménard tried to justify this by remarking that the modulus alters at different strain amplitudes [13], but this discrepancy also occurs with soft membrane or stiff plate dilatometers, whose in situ moduli must be multiplied by a factor of 2.5 for comparison with moduli obtained in unconfined compression [14, 15]. This has nothing to do with the effect of the reduction coefficient called the 'mass effect factor', which may be as small as 0.2 in well jointed rock, because the volume affected by the test in this case is small compared with the sizes of the blocks bounded by the joints; it again comes from some inadequacy in the theory used.

## 2.2. Pressuremeter Limit Pressure

It can be shown that elastoplastic theories of the expansion of a circular cylindrical cavity predict an asymptotic limit pressure. This limit pressure, defined for an infinite volume change ( $\Delta V/V = 1$ ) is difficult to determine experimentally except in the most simple cases [16].

Accordingly, Ménard soon defined a conventional limit pressure for  $\Delta V/V_0 = 1$ , in which  $V_0$  is the cavity volume for  $p = 0$ . This approach gave a definition of the limit pressure which is close to the definition of the failure stress in a plate or pile loading test in which the failure stress is the stress at which the plate (or pile) sinks a depth equal to one-tenth of the side dimension of the plate (or pile).

By now, Ménard had a coherent specification for his loading test and the two conventional parameters that could be derived from it by simple means. The test was much cheaper and simpler to perform than the plate loading test and much more elaborate than the so-called 'static' cone test (with a 20mm/sec penetration rate) in which the chief parameter measured is the soil's resistance to penetration, with no basis in theory. But Ménard went even further, to marry his overall conception of the procedure with foundation design methods.

## 3. SIMPLE FOUNDATION DESIGN RULES

In many tests, there is no close tie between instrument selection, installation (instrument installation for a field test or installation of the sample for a laboratory test) and test method. With the Ménard pressuremeter test, on the other hand, these three steps are closely associated and also linked to the two following steps:

- obtaining the stress-strain parameters, and
- designing the foundation.

dilatromètres, il ne s'agit pas du jeu du coefficient minorateur du module appelé "facteur d'effet de masse" qui peut descendre à 0,2 dans un rocher très fracturé, car les volumes testés sont cette fois-ci peu importants vis-à-vis des dimensions des blocs rocheux entre fractures, mais là aussi il s'agit d'une insuffisance de la théorie utilisée.

## 2.2. La pression limite pressiométrique

Il est possible de montrer que dans les théories élasto-plastiques de l'expansion d'une cavité cylindrique circulaire, il existe une pression limite asymptotique. Cette pression limite définie pour un accroissement volumétrique infini ( $\Delta V/V = 1$ ) est difficile à déterminer expérimentalement sauf dans des cas simples [16].

C'est pourquoi très vite, Louis Ménard a défini une pression limite conventionnelle pour  $\Delta V/V_0 = 1$ , formule dans laquelle  $V_0$  désigne le volume de la cavité pour  $p = 0$ . Cette façon de faire rapprochait la définition de la pression limite de celle de la pression de rupture lors d'un essai de chargement de plaque (ou de pieu) pour lequel cette pression de rupture est celle qui correspond à un enfoncement du dixième du côté de cette plaque (ou de ce pieu).

Ainsi donc Ménard avait défini un essai de chargement et les 2 caractéristiques conventionnelles qu'on pouvait en déduire simplement. C'était un essai beaucoup plus économique et plus simple de réalisation que l'essai de plaque et bien plus élaboré qu'un essai de pénétration même du type dit statique (dont la vitesse de descente est de 20mm/sec) qui ne donne qu'une résistance à l'avancement comme caractéristique principale sans faire intervenir aucune théorie. Mais Ménard allait encore plus loin, intégrant dans sa conception globale du procédé les méthodes de dimensionnement des fondations.

## 3. DES REGLES SIMPLES DE DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS

Alors que bien souvent dans un type d'essai donné il n'y a pas de lien étroit entre le choix de l'instrument, son installation (dans le cas d'essai in situ, ou l'installation de l'échantillon dans le cas d'essai de laboratoire) et la méthode d'essai, dans le cas du pressiomètre Ménard, d'une part ces 3 étapes sont liées entre elles, d'autre part elles sont liées avec les 2 étapes suivantes:

- l'obtention des caractéristiques mécaniques
- la conception des fondations.

Nous avons vu les bases de l'obtention des

We have already seen how the conventional parameters are obtained. Let us now look at the foundation design process. Rather than reverting to rules based on what are called the fundamental soil parameters  $c$  and  $\phi$  which are frequently difficult to determine for in situ soil conditions, Ménard was committed to keeping his empirical outlook: there are theories, there are known responses, and we must adapt our conclusions to similarities between the behaviour of a soil during the pressuremeter test and when acting as a foundation bed.

He was convinced that a foundation design must simultaneously meet two conditions, an overall stability criterion and an acceptable settlement (usually differential settlement) criterion, and had the two parameters needed to reach his target, his limit pressure and his E-modulus.

### 3.1. Overall Vertical Stability Criterion

Ménard was neither the first [17] nor last [18] to compare soil reaction at a pile tip with that around an expanding spherical cavity but he was the only one to have apparatus for making in situ comparisons between (i) soil reaction around a cylindrical pressuremeter and a spherical pressuremeter, and (ii) a foundation and a cylindrical pressuremeter.

His theoretical and experimental position is presented in an article [19] which was subsequently expanded regarding rules for designing shallow and deep foundations [20]. Experimental comparisons have been pursued up to the present time, among others by the Laboratoires des Ponts et Chaussées group, recently enabling the design rules to be refined [21]; a review of these rules is included in the papers to the Sherbrooke International Symposium [22].

The basic idea (Fig.5) is that as the depth of a pile tip increases, soil compressibility becomes preponderant as compared with its shear strength in determining failure stress. This means that Terzaghi's theory on the bearing capacity of a pile tip based on a rigid then plastic soil behaviour must yield to an elastoplastic theory.

Rather than build such an elastoplastic theory, Ménard preferred to proceed by correlation and experiment.

He argued that at a given depth, there is a correlation between the Ménard pressuremeter limit pressure and the limit pressure measured during expansion of a sphere in the same soil.

At the same depth, there is a correlation between failure stress under a pile tip and the expanding sphere limit pressure.

This means that there is a correlation between the

caractéristiques pressiométriques conventionnelles. Il nous reste à voir la conception des fondations. Plutôt que de revenir à des règles en  $c$  et  $\phi$ , paramètres dits intrinsèques du sol, mais bien souvent impossibles à déterminer dans les conditions du sol in situ, Louis Ménard a voulu conserver un regard empirique: il existe des théories, on peut faire des observations, il faut réaliser des adaptations en tenant compte des similitudes entre le comportement d'un sol au cours d'un essai pressiométrique et son comportement vis-à-vis d'une fondation.

Convaincu que le dimensionnement d'une fondation doit satisfaire à la fois une condition de stabilité générale et une condition de tassement (différentiel la plupart du temps) admissible, Ménard dispose des 2 caractéristiques nécessaires pour boucler son objectif: une pression limite et un module de déformation.

### 3.1. Condition de stabilité générale verticale

Ménard n'a pas été le premier [17] ni le dernier [18] à comparer la réaction du sol à la base d'un pieu avec celle autour d'une cavité sphérique en expansion, mais il a été le seul à disposer d'un appareillage permettant d'effectuer les comparaisons in situ, d'une part entre la réaction du sol autour d'un pressiomètre cylindrique et d'un pressiomètre sphérique, d'autre part entre une fondation et un pressiomètre cylindrique.

Théorie et expérimentation ont été présentées dans un article [19] lequel a été ultérieurement complété en ce qui concerne les règles d'utilisation tant pour la conception des fondations superficielles que pour celles des fondations profondes [20]. Les comparaisons expérimentales ont été continuées jusqu'à maintenant, en particulier par le groupe des Laboratoires des Ponts et Chaussées, ce qui a permis récemment d'affiner ces règles de conception [21] dont une revue en anglais a été donnée au Colloque International de Sherbrooke [22].

L'idée part du fait (Fig.5) que plus la profondeur de la pointe d'un pieu augmente, plus la compressibilité du sol devient prépondérante vis-à-vis de la résistance au cisaillement du sol. De la sorte, la théorie de Terzaghi sur la force portante de la pointe d'un pieu basée sur un comportement du sol plastique rigide doit faire place à une théorie élastoplastique.

Plutôt que de bâtir cette théorie, Ménard a préféré procéder par corrélations et expérimentations.

A une profondeur donnée, il y a une corrélation entre la pression limite mesurée au pressiomètre Ménard et la pression limite mesurée au cours de

failure stress under a pile tip and the pressuremeter limit pressure. This can be written in mnemonic form

$$q_1 - q_0 = k(p_1 - p_0)$$

in which  $q_1$  is the ultimate stress under the pile tip,  $q_0$  is the vertical stress due to overburden at the same level,  $k$  is the Ménard bearing factor,  $p_1$  is the pressuremeter limit pressure, and  $p_0$  is the horizontal earth pressure at rest, still at the same level.

The present  $k$  values derived from the Laboratoire des Ponts et Chaussées data base are quoted in Ref. 21 alongside soil types and pile insertion methods, since the piling technique governs how much remoulding of the soil occurs under the tip - and around the shaft.

The values of skin friction, known to be related to soil shear strength, are given versus pressuremeter limit pressure, soil and pile type [21, 22].

l'expansion d'une sphère dans le même sol.

A la même profondeur, il y a corrélation entre la contrainte ultime sous la pointe d'un pieu et la pression limite de l'expansion d'une sphère.

Donc il y a corrélation entre la contrainte ultime sous la pointe d'un pieu et la pression limite pressiométrique. Ce qui peut s'écrire sous une forme mnémorique:

$$q_1 - q_0 = k(p_1 - p_0)$$

où

- $q_1$  est cette contrainte ultime sous la pointe du pieu,
- $q_0$  est la contrainte verticale due au poids des terres au même niveau,
- $k$  est le coefficient de portance de Ménard,
- $p_1$  est la pression limite pressiométrique,
- $p_0$  est la contrainte horizontale des terres au repos.

Ce sont les valeurs de  $k$  déduite de la base de données des Laboratoires des Ponts et Chaussées qui sont données dans la référence [21] en fonction du

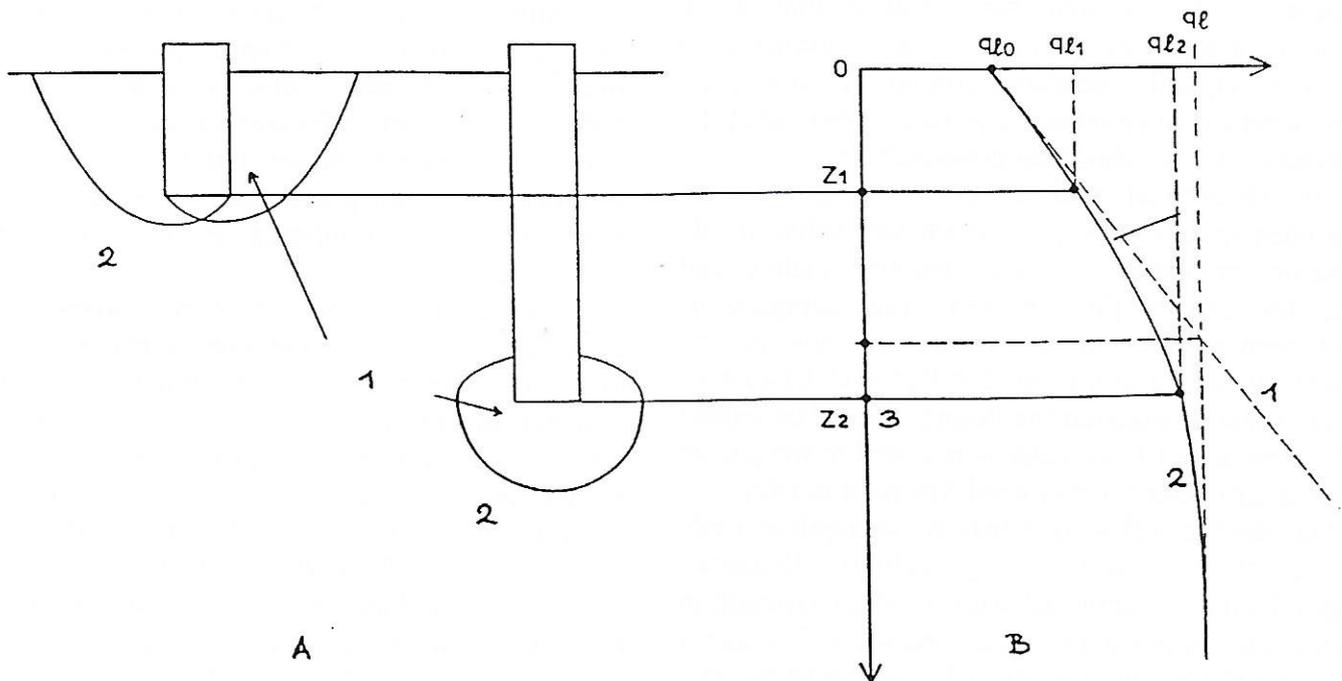


Fig.5. La théorie élastoplastique de la force portante d'une fondation

A) coupe verticale du sol autour des fondations

1. volumes cisailés

2. réaction élastique du sol autour de 1

B) variation de la contrainte de rupture en fonction de la profondeur

1. théorie plastique rigide

2. théorie élasto-plastique

3. profondeur critique

Elastoplastic Theory of Foundation Bearing Capacity

A) Vertical Section of Soil around Foundation

1. Sheared volume

2. Elastic reaction of soil around 1

B) Failure Stress vs Depth

1. Stiff plastic theory

2. Elastoplastic theory

3. Critical depth

### 3.2. Allowable Settlement Criterion

It is well known that Terzaghi was one of the first to stress the need for designing shallow footings for buildings on the basis of allowable differential settlement between adjacent footings. The basic rule was that settlement of the most heavily loaded footing (or foundation) should not be more than 25mm. For larger engineering structures, allowable secondary stresses due to different settlement between foundations determine allowable settlement.

Ménard had the pressuremeter modulus for estimating settlement. As already mentioned, the pressuremeter modulus is a shear modulus  $G$  disguised as an equivalent elastic modulus  $E_M$  in the form

$$E_M = 2(1 + \nu)G$$

in which  $\nu$  is the Poisson's ratio, conventionally taken as 0.33.

Rather than use the Boussinesq equation for estimating settlement or Terzaghi's one-dimensional consolidation theory (in which the stress path is opposite to the path in the pressuremeter test), Ménard broke the settlement of a soil under a shallow rigid foundation into two components [11, 20]:

- a) settlement caused by the spherical (or isotropic) tensor of the soil stresses, and
- b) settlement caused by the deviatoric tensors of the soil stresses.

Here again, Ménard was not the first to try this approach [23, 24] but he was the only one to systematise it.

The settlement due to deviatoric stress tensors can be referred to the pressuremeter modulus using the equation  $G = E_M/2(1 + \nu)$  and keeping  $\nu = 0.33$ .

The settlement due to the isotropic stress tensor can be assimilated to a compression modulus

$$E = E_M/\alpha$$

in which  $\alpha$  is a rheological coefficient determined by experiment and varies with soil type.

The method has already been subjected to theoretical scrutiny [25] showing the difficulties involved, but its strict use does lead to excellent agreement between predicted and observed settlement [26] as illustrated in Figure 6.

Gambin, Cassan and Frank have each shown that a method based on these principles can yield very satisfactory settlement estimates for piles.

Further information will be found in the state-of-the-art report by the ISSMFE European Committee [27].

type de sol, mais aussi du mode de réalisation du pieu, cette réalisation pouvant entraîner plus ou moins de remaniement au niveau de la pointe - et aussi du fût - du pieu.

Les valeurs du frottement latéral, connues pour être fonction de la résistance au cisaillement du sol, sont données en fonction de la pression limite pressiométrique et aussi du type de sol et du type de pieu [21].

### 3.2. Condition de tassement admissible

On sait que Terzaghi avait été parmi les premiers à insister sur la nécessité de concevoir les fondations des bâtiments sur semelles superficielles sur la base d'un critère de tassement différentiel admissible entre semelles voisines. La règle de base était que le tassement de la semelle la plus chargée ne devait pas dépasser 25 mm. Pour les ouvrages d'art, les efforts secondaires dus aux dénivelées d'appui définissent les tassements acceptables.

Pour faire l'estimation de ces tassements, Ménard dispose d'un module pressiométrique, qui comme nous l'avons vu, est un module de cisaillement  $G$  déguisé en module d'Young  $E_M$  apparent selon la formule

$$E_M = 2(1 + \nu)G$$

dans laquelle désigne le coefficient de Poisson, auquel on a attribué conventionnellement la valeur de 0,33.

Plutôt donc que d'utiliser la théorie de Boussinesq sur l'estimation des tassements ou la théorie de la consolidation unidimensionnelle de Terzaghi (dont le chemin de contrainte est à l'opposé de celui d'un essai pressiométrique), Ménard a préféré décomposer le tassement d'un sol sous une fondation rigide peu profonde en 2 tassements [11, 20]:

- un tassement provoqué par le tenseur sphérique (ou isotrope) des contraintes induites dans le sol,
- un tassement provoqué par les tenseurs déviatoires des mêmes contraintes.

Là non plus, Ménard n'était pas le seul à tenter cette démarche [23, 24] mais c'est le seul qui la systématisera.

Le tassement dû aux tenseurs déviatoires des contraintes peut être associé au module pressiométrique en considérant l'égalité  $G = E_M/2(1 + \nu)$  en sens inverse et en conservant la valeur  $\nu = 0,33$ .

Le tassement dû au tenseur isotrope des contraintes peut être associé à un module de compression

$$E = E_M/\alpha$$

### 3.3. Other Applications

Ménard and his colleagues also directed their efforts to other issues:

a) Design of laterally-loaded piles, for which the stress distribution around the piles can to some extent be considered as similar to the stress distribution around

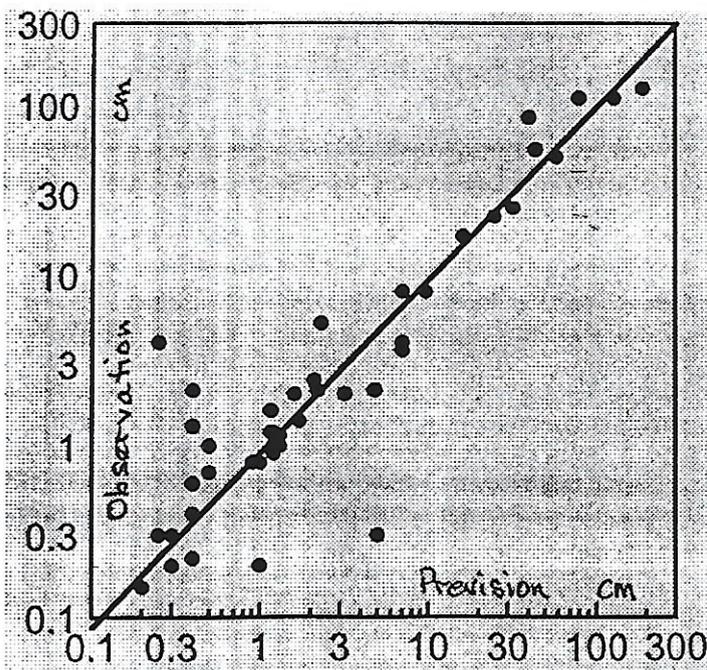
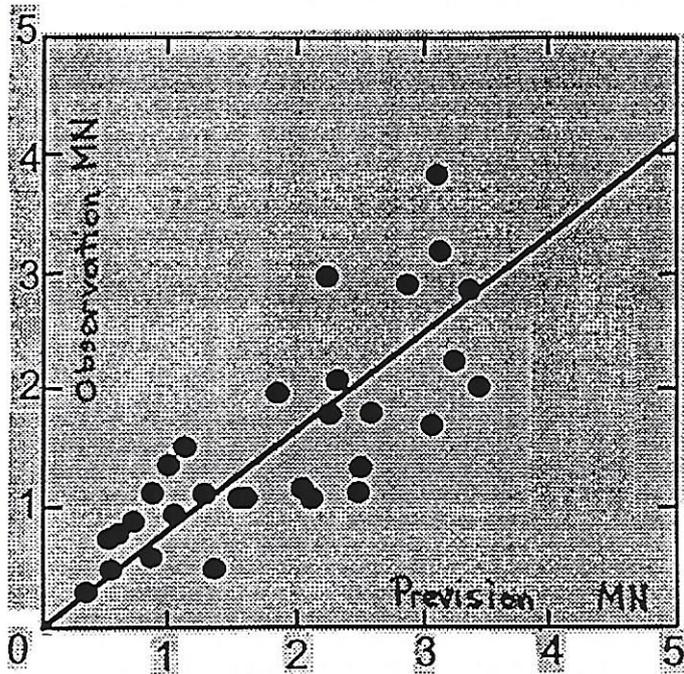


Fig.6. Corrélation entre prévisions et observations

- a) charge limites des pieux pour un déplacement de  $B/10$  [32]  
 b) tassement de fondation dans le domaine des charges admissibles

#### Prediction/Observation Correlation

- a) Pile limit load for  $B/10$  displacement [32]  
 b) Foundation settlement in acceptable load range

où  $\alpha$  est un coefficient rhéologique déterminé par l'expérience, variable avec le type de sol.

Des études critiques théoriques de cette méthode ont déjà été faites [25] qui en montrent les difficultés, il n'en reste pas moins que sa stricte application conduit à un excellent accord entre les valeurs prévues et les valeurs observées des tassements [26] comme le montre la Fig.6.

Gambin, Cassan, Frank ont successivement montré qu'une méthode basée sur les mêmes principes permet d'estimer très correctement le tassement des pieux. On renvoie pour plus d'information sur ce sujet au rapport sur l'état des connaissances du comité Technique Européen de la SIMSTF [27].

### 3.3. Résolution des autres problèmes

Ménard, avec ses collègues, s'est aussi efforcé de donner des règles sur les problèmes suivants:

- dimensionnement des pieux sollicités horizontalement, pour lesquels on peut faire une certaine assimilation entre le champ de contraintes développé par ces pieux et celui créé par le pressiomètre,
- dimensionnement des ouvrages de soutènement pour lesquels on peut définir un coefficient de réaction en comparant la déformation du sol en butée devant l'écran et le tassement d'une fondation, par une rotation de  $90^\circ$  de la direction des efforts et des déplacements.

Ces problèmes sont facilement résolus en utilisant par exemple les programmes des Laboratoires des Ponts et Chaussées:

- PILAT pour les pieux isolés,
- GOUPIL pour les groupes de pieux,
- DENEbola pour les parois moulées.

La conception des projets d'amélioration des sols par colonnes ballastées ou par compactage statique horizontale (encore appelé injection solide) peut également s'effectuer aisément à partir des résultats pressiométriques en raison de la similitude de comportement du sol autour des colonnes ballastées en cours de chargement ou des colonnes de mortier sec au cours de leur formation.

Pour plus de détails sur tous ces problèmes, on renvoie encore à la référence 27<sup>2</sup>

## 4. UN OUTIL IDEAL POUR LE CONTROLE DE L'AMELIORATION DES SOLS

Il aurait sans doute été plus difficile à Ménard de lancer sa consolidation dynamique des sols s'il n'avait eu à sa disposition son pressiomètre.

Dans le colloque de Sherbrooke, un excellent

the pressuremeter.

b) Design of diaphragm walls where it is possible to define a coefficient of reaction by viewing movements in the passive soil at the toe of the wall as equivalent to footing settlement rotated through 90°.

These problems are easily solved with, for example, the computer codes produced by the Laboratoires des Ponts et Chaussées:

- PILAT for isolated piles
- GOUPIL for pile groups
- DENEbola for diaphragm walls.

Soil improvement projects based on stone columns or compaction grouting can also be conveniently designed from pressuremeter data because of the similar soil response around stone columns while they are being loaded and dry mortar columns while they are being expanded into the soil.

Readers requiring more information on these items should consult the above-mentioned report<sup>2</sup> [27].

#### 4. THE IDEAL TOOL FOR GROUND IMPROVEMENT QUALITY CONTROL

Ménard would undoubtedly have found it more difficult to launch his dynamic soil consolidation process if he had not had his pressuremeter to help him.

An excellent paper to the Sherbrooke Symposium [28] reviews the practical aspects of soil improvement quality control and describes the benefits of the pressuremeter test in this respect.

In more theoretical terms, it will be remembered that the most effective mechanical tests for controlling soil improvements must

- a) test as large a volume of soil as possible, which rules out laboratory testing, and
- b) not destroy the soil structure during the test, which would conceal the preconsolidation threshold and the effect of increasing post-treatment soil stiffness; this rules out over-energetic penetration tests, even 'static' types [29].

This only leaves static loading tests, in the form of (i) test embankments, (ii) loading prototype footings, or (iii) the stress-controlled Ménard pressuremeter test [30].

#### 5. CONCLUSION

Provided it is followed strictly, the method developed and advanced by Louis Ménard makes it possible to successfully design all sorts of foundations and soil improvement projects and provides an excellent

article a fait le tour de la question sur le plan pratique [28] et montre tout l'intérêt des essais pressiométriques dans un tel contexte.

Sur le plan théorique on pourra rappeler que les essais les plus efficaces pour contrôler l'amélioration d'un sol par une technique mécanique doivent

a) intéresser un volume de sol aussi grand que possible, ce qui élimine les essais mécaniques de laboratoire,

b) éviter de détruire la structure du sol pendant l'essai, - ce qui ferait disparaître le seuil de préconsolidation et l'effet d'augmentation de la raideur du sol avec le temps à partir de la fin du traitement, - ce qui élimine les essais de pénétration, même "statiques," trop brutaux [29].

Il ne reste donc comme moyen efficace que les essais de chargement statiques, soit les remblais d'essais, soit les essais de chargement de semelles prototypes, soit les essais au pressiomètre Ménard à contraintes imposées [30].

#### 5. CONCLUSION

A condition de suivre strictement la méthode mise au point et proposée par Louis Ménard, il est possible de concevoir et de dimensionner avec succès toutes sortes de projets de fondation ainsi que d'amélioration des sols et d'assurer un contrôle valable de ces derniers.

Cette méthode, sous-tendue par les théories simples de l'élasticité et de l'élasto-plasticité, ne néglige pas le fait que dès le début de sa sollicitation, le sol réagit en microplasticité. Les formules permettant soit d'obtenir les caractéristiques pressiométriques conventionnelles, soit de dimensionner les fondations à partir de celles-ci, forment un tout indissociable, basées qu'elles sont sur des corrélations essentiellement expérimentales, déduites d'observations s'étendant sur une période de 38 ans. Il ne faut pas perdre de vue que rien qu'en France, plus de 400 essais sont réalisés chaque jour ouvrable.

En France, 80 % des projets sous la juridiction des organismes constructeurs de l'Etat ont leurs fondations dimensionnées sur la base d'essais pressiométriques. Les fondations de toutes sortes d'ouvrages ont été dimensionnées uniquement sur la base des résultats des essais pressiométriques: pour ne citer que quelques uns: le réservoir d'eau de la Haye les Roses près de Paris (100 x 100 m, radier chargé à 200 kPa), plateformes de production de pétrole en mer au large de l'Afrique ou de l'Indonésie, etc...[31].

Tout écart partiel du cheminement de

means of quality control of the latter works.

The method, underpinned by simple elastic and elastoplastic theory, does not overlook the fact that as soon as a soil is subjected to load, its behaviour is microplastic. The equations for obtaining the conventional pressuremeter parameters and designing foundations from them form an indivisible whole, being based on essentially experimental correlations from thirty-eight years of observation. It must be remembered that more than 400 Ménard pressuremeter tests are performed every working day in France alone.

Eighty per cent of French projects by State bodies have their foundations designed on the basis of pressuremeter test data. Foundations to all kinds of construction have been designed solely on the basis of Ménard pressuremeter results, of which the above-ground La Haye les Roses water reservoir near Paris (100m x 100m, foundation raft load 200 kPa) and offshore oil rigs in Africa and Indonesia are just a few examples [31].

Any partial deviation from the full Ménard design process can only lead to uncertainty on the finished product, or even errors. New apparatus for automatically recording instrumental data and computer codes for automatic data reduction, coupled with other software aids to foundation design offer better quality control of the full test-data reduction-design process.

dimensionnement ainsi défini ne peut entraîner que des incertitudes dans le produit fini, pour ne pas dire des erreurs. La mise au point d'appareillages permettant d'enregistrer automatiquement les lectures de mesures ainsi que de logiciels permettant le dépouillement automatique des essais couplés à d'autres logiciels facilitant le prédimensionnement des fondations permet au contraire un meilleur contrôle qualité sur la chaîne essai - dépouillement - prédimensionnement.

<sup>1</sup> The frequently strong oscillation of  $q_c$  with depth has been attributed to intermittent soil friction against the cone (cf. W. Cichy, M. Boulon & J. Desrues, Experimental Stereophotogrammetric Study of Soil Foundation Interfaces in Direct Shear Apparatus (in French), Grenoble Symposium, 1987).

<sup>2</sup> Note that the equation in para.9 should read

$$k_s = E_M [\alpha (a/2) + 0.13(9a)^\alpha]^{-1}$$

in the International System (kN/m<sup>3</sup>, kN/m<sup>2</sup>, m)

<sup>1</sup> La très grande oscillation de  $q_c$  en fonction de la profondeur qui est très souvent observée a été attribuée au phénomène de frottement du sol par à-coups sur le cône du pénétromètre (voir W. Cichy, M. Boulon & J. Desrues, Etude expérimentale stéréophotogramétrique des interfaces sols-fondations à la boîte de cisaillement directe, Colloque de Grenoble, 1987).

<sup>2</sup> Attention. La formule du paragraphe 9.4 doit se lire

$$k_s = E_M [\alpha (a/2) + 0.13(9a)^\alpha]^{-1}$$

dans le Système International (kN/m<sup>3</sup>, kN/m<sup>2</sup>, m).

## REFERENCES

- [1] M. Bustamante, L. Gianceselli, Calcul de la capacité des pieux à partir des essais au pénétromètre statique, *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, n° 127, Paris, Sept-Oct 1983
- [2] M. Gambin, Vingt ans d'usage du pressiomètre en France, *VII CEMSTF*, Brighton, A.A. Balkema, Rotterdam, 1979 (English translation in *Sol-Soils* No. 32, 1980)
- [3] M. Gambin, O. Plot, L'enregistrement des données au pressiomètre Ménard, un outil puissant de contrôle qualité et d'instruction du personnel, *Actes 4° CIP* à Sherbrooke, A.A. Balkema, Rotterdam, 1995
- [4] J. Nuyens, F. Barnoud, M. Gambin, Menard Pressuremeter to Foundation Design, An Integrated Concept, *Proc. Recent Advances in S.I. Practice*, Thomas Telford, London 1995
- [5] T. Komoto, Ultimate Bearing Capacity of Cones in Sand, *Penetration Testing*, 1988, A.A. Balkema
- [6] V. Silvestri, C. Tabib, Flow Field around a Cylindrical Pile during Steady Penetration, *Can Geotech Journal*, Vol. 30, pp 369-376, 1993
- [7] M. Roy, A. Leblanc, Facteurs influençant la mesure au scissomètre, *Bul. Liaison Labo P et C*, n° 144, Juillet-Août 1986
- [8] H. Stille, D. O'Neill, M. Topolnicki, Measurement of Soil and Soft Rock Properties, *Proc. XI ECSMFE*, Copenhagen, DGS
- [9] G. Lamé, Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides, Bachelier, Paris, 1852
- [10] R. Oliviera, V. Charrua Graça, In Situ Testing of Rocks, in *Ground Engineer's Reference Book*, Butterworth, London 1987
- [11] L. Ménard, J. Rousseau, l'évaluation des tassements, tendances nouvelles, *Sols-Soils* N° 1, Paris, 1962
- [12] B.O. Hardin, The Nature of Stress Strain Behaviour for Soils, *Earthquake Engineering & Soil Dynamics*, Vol.I, ASCE, N.Y., 1978
- [13] L. Ménard, Influence de l'amplitude et de l'histoire du champ de contraintes sur le tassement d'un sol de fondation, *Actes du 5° CIMSTF*, Paris, 1961
- [14] J. Le Rohellec, J. Wiancki, M. Becker, Etalonnage du nouveau géoextensomètre G.21.76, *Annales de l'ITBTP*, N° 250, Paris, Oct 1968
- [15] Standard Test Method for Determining the In Situ Deformation of Rock Using the Diametrically Loaded 76mm Borehole Jack, D4971-89, ASTM, Philadelphia, 1989
- [16] R.E. Gibson, W.F. Anderson, In Situ Measurement of Soil Properties with the Pressuremeter, *Civil Engineering*, London, May 1961
- [17] A.W. Skempton, A.A. Yassin, R.E. Gibson, Théorie de la force portante des pieux dans le sable, *Annales de l'ITBTP*, N° 63-64, Paris, Mars-Avril 1953
- [18] A.S. Vesic, Design of Pile Foundations, US Transportation Research Board, *NCRP Synthesis* No.42, Washington D.C., 1977
- [19] L. Ménard, Calcul de la force portante des fondations sur la base des résultats des essais pressiométriques, *Sols-Soils*, N° 5-6, Paris, 1963
- [20] L. Ménard, Interpretation and Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design, *Sols-Soils* N° 26, Paris, 1975 (disponible aussi en Français sous l'appellation "Brochure D60")
- [21] M.E.L.T. (Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports), Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de Génie Civil, Cahier des Clauses Techniques Générales applicables aux Marchés Publics de Travaux, Fascicule 62, Titre V, Textes Officiels 93-3, Imprimerie Nationale, Paris, 1993
- [22] M. Gambin, R. Frank, The Present Design Rules for Foundations Based on Menard PMT Results, *Proc. I.S.P. 4* at Sherbrooke, A.A. Balkema, Rotterdam 1995
- [23] L. Suklje, I. Sovinc, Fondations de réservoirs cylindriques métalliques sur un terrain compressible, *Gradevinar*, Vol. XV, n° 5-6, 1963 (en serbo-croate)
- [24] L. Suklje, I. Sovinc, An applied Analysis of Distortional Displacement of Normally Consolidated Clays, *SMFE European Congress*, Wiesbaden, 1963
- [25] D. Cordary, M. Gambin, A. Van Wambeke, Prévisions des tassements à l'aide du pressiomètre, *Actes du X° CIMSTF* à Stockholm, Vol.1, A.A. Balkema, Rotterdam, 1981
- [26] B. Clarke, Pressuremeter in Geotechnical Design, B.A.P. (Chapman & Hall Group) London, 1995

- [27] S. Amar, B. Clarke, M. Gambin, T. Orr, Utilisation des résultats des essais pressiométriques pour le dimensionnement des fondations (bilingual), A.A. Balkema, Rotterdam, 1991
- [28] J. Dumas, J.-F. Morel, Le pressiomètre Ménard, un outil efficace pour la vérification des travaux d'amélioration de mauvais terrains, *Actes du 4<sup>e</sup> C.I.P.* à Sherbrooke, A.A. Balkéma, Rotterdam, 1995
- [29] G.A. Leonards, J.D. Frost, Settlements of shallow Foundations on Granular Soils, *ASCE J. of Geotechn. Eng.*, Vol. 114, No. 7, July 1988
- [30] M. Gambin, Le pressiomètre Ménard, un excellent outil de contrôle de l'amélioration des sols, *Actes de la première journée Louis Ménard*, CFMS, 1995
- [31] C.N. Baker, T. Azam, L.S. Joseph, Settlement Analysis for 450 Meter Tall KLCC Towers, *Int Conf on Settlements*, Texas A&M University, 1994
- [32] J.L. Briaud, The Pressuremeter, A.A. Balkema, Rotterdam 1992