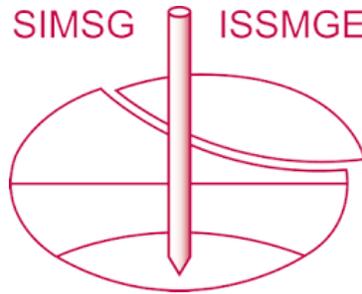


# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

## PREVISION DE TASSEMENT AU PRESSIOMETRE ET CONSTATATIONS

PREVISION OF SETTLEMENT BY PRESSIOMETER AND ASCERTAINING OF FACTS  
ПРОГНОЗ ОСАДОК С ПОМОЩЬЮ ПРЕССИОМЕТРА И НА ОСНОВЕ ФАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

J.P. BRU, Ingénieur ENSAIS-Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC de Bordeaux)

F. BAGUELIN, Ingénieur des P.C. - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC Paris)

G. GOULET, LRPC de Saint-Brienc

G. JAECK, LRPC de Bordeaux

J. JEZEQUEL, Ingénieur ENSM-LRPC de Saint-Brieuc (France)

RESUME. Après le rappel de la méthode pressiométrique et des méthodes classiques pour l'évaluation des tassements des fondations superficielles on présente les principaux résultats obtenus sur 9 chantiers étudiés où l'on a comparé les tassements mesurés aux tassements calculés. La validité et l'utilisation pratique de la méthode pressiométrique sont discutées. La méthode donne en général des prévisions de tassements satisfaisantes bien que le plus souvent supérieures aux tassements mesurés.

## INTRODUCTION

La limitation des tassements constitue le deuxième critère de calcul des fondations superficielles. Pour sa prévision on dispose actuellement de plusieurs méthodes. Celles qui semblent les plus satisfaisantes du point de vue théorique présentent le plus souvent deux inconvénients :

- Difficultés ou impossibilités de prélèvement d'échantillons intacts dans certains sols
- Coût de l'étude souvent disproportionné avec celui des ouvrages.

Aussi on a vu se développer depuis plusieurs années des méthodes semi-empiriques à partir des résultats d'essais in-situ : pénétromètre statique et pressiomètre.

Ce dernier présente l'avantage de fournir une caractéristique de déformation et non pas seulement une caractéristique limite. C'est pourquoi on s'est penché sur la validité des prévisions ainsi effectuées, au sein des Laboratoires des Ponts et Chaussées.

## METHODES DE PREVISION

## 1°) - Méthode pressiométrique

Selon MENARD (Ménard, I 1971) le tassement  $\omega$  peut être prévu à partir du module pressiométrique  $E_M$  par la formule (1)

$$\omega = \frac{1,33}{3 E_M} p R \alpha \left( \lambda_1 \frac{R}{R_0} \right)^\alpha + \frac{\alpha p}{4,5 E_M} R \lambda_2 \quad (1)$$

Cette dernière est issue de la théorie de l'élasticité corrigée empiriquement par un coefficient  $\alpha$  dépendant de la nature et de l'état du sol. Il permet d'une part de tenir compte de la non linéarité de l'influence de la dimension telle qu'elle a été étudiée antérieurement (Terzaghi & Peck 1948), et tente d'autre part d'approcher les phénomènes de consolidation (2ème terme).

-  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont des coefficients de forme utilisés par ailleurs par d'autres auteurs (Caquot, A - KERISEL, J

1956) bien que légèrement différents.

-  $R_0$  une dimension de référence = 30 cm (1 pied)

-  $p$  est la pression moyenne ajoutée sur le sol.

Dans nos évaluations, elle correspond aux charges permanentes.

## 2°) - Méthodes classiques

Elles utilisent les distributions de contraintes données par les théories de l'élasticité et des caractéristiques d'échantillons prélevés, analysés en laboratoire.

La méthode oedométrique de Terzaghi permet d'évaluer le tassement de consolidation en prenant en compte les variations de volume élémentaire sous l'effet des contraintes verticales seules, et en négligeant les déformations latérales. Le calcul est conduit sur l'axe de symétrie de la fondation.

Une correction proposée par Skempton (Skempton, AW et Bjerrum, L 1957) permet dans une certaine mesure de tenir compte de l'effet des variations des contraintes horizontales. On a :

$$\omega_s = \mu \omega_0 \quad (\omega_0 = \text{tassement oedométrique})$$

$\mu$  étant fonction du coefficient  $A$  (Skempton, AW 1954) et du rapport  $H/B$  de l'épaisseur de la couche  $H$  à la largeur de la fondation  $B$ .

Remarquons qu'avec ces deux méthodes le tassement instantané  $\omega_i$  doit être évalué indépendamment. On utilise généralement un module sécant déduit d'un essai au triaxial non drainé.

Une méthode récente proposée par Kerisel (Kerisel, J et QUATRE, M 1966) cherche à mieux prendre en compte l'effet des contraintes et des déformations latérales. Des essais particuliers du type drainé sont menés à l'appareil triaxial.

## METHODES D'OBSERVATIONS

Les constatations effectuées sur un certain nombre de chantiers portent essentiellement sur les tassements

qui sont mesurés par deux méthodes :

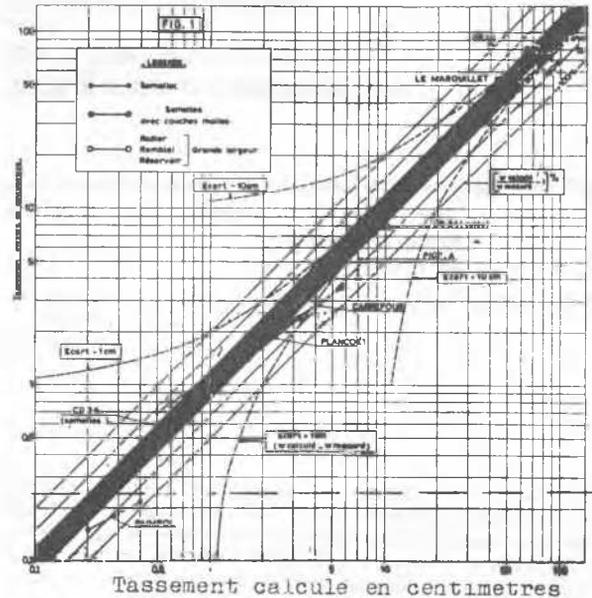
- 1) - le nivellement, qui n'est possible qu'après qu'une certaine partie de la fondation ait été exécutée (semelle). La précision obtenue est de 1/10 mm (niveau automatique de précision)
- 2) - la mesure par tassomètre (Laboratoires des Ponts et Chaussées 1970) dont la précision est de l'ordre de  $\pm 2$  mm, les cellules pouvant être placées dès l'ouverture des fouilles. Tout le tassement peut donc être suivi.
- 3) - Une autre méthode peut être également employée pour la mesure notamment de tassements lorsque les conditions de mise en place le permettent (Bru, J.P. 1967).

L'appareil utilisé est basé sur le principe des vases communicants. La précision atteinte est de l'ordre du mm.

#### PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS

Les résultats obtenus pour 9 chantiers étudiés sont reproduits dans le tableau I

La comparaison des tassements mesurés et des tassements calculés par la méthode pressiométrique est illustrée à la figure 1.



N° de site étudié	Nom et désignation de l'ouvrage	Largeur des fondations	Profondeur en m	Nature du sol	Tassements calculés		Tassements mesurés		Observations		
					PRESSIOMETRIE	OED. TERZAGHI	VALEUR EN cm	METHODE	OED. SHREPTON	TRIAxiaL KERISEL	
1	PLANCOET (PT) Batiment R+1	Semelles filantes 0,90m à 1,80m	0,80m	Silts 7m	1,7cm à 3,2cm	1,7cm à 2,1cm	1,4cm à 2,4cm	NIVELLEMENT et TASSOMETRE	0,75 à 0,95cm	0,4cm à 0,5cm	* COMPTE TENU DES VALEURS DE 0,8cm INITIALES DUES VRAISEMBLABLEMENT AU REMANEMENT
2	PÂIMPOL Batiment R+1	Semelles filantes 0,80m	0,80m	Limon des plateaux 7m	0,2cm à 0,4cm		0,15cm à 0,22cm	NIVELLEMENT			
3	Pont (PS) du C.D 34	Semelles de 2,50m x 9,50m	1,50m	Graves + Faluns	0,4 à 0,9 cm * 9,6 cm		0,4 à 0,8 cm * 8 cm	NIVELLEMENT et TASSOMETRE			* CULÉE (REMBLAI)
4	CARREFOUR MERIGNAC (PSBP à 5 travées)	Semelles de 3,50m x 10,00m	2,00m	Grave + Argile molle	0,5 cm à 5,7 cm (piles)		0,7cm à 3,6cm (piles)	TASSOMETRE			* NON COMPTE TENU DES DES REMANEMENTS EN FOND DE FOUILLE (Voir fig 4 b)
5	ROCADE BORDEAUX (PICF N°A)	Radier de 3m x 37,50m	2,50m	Vase 4,00m	7cm		4cm à 8cm	TASSOMETRE			
6	Réservoir métallique ROUEN (SNPA. PEC)	Ø 27m sur matelas de gravier de Ø 30m	matelas de 1m	5,50m silts 2,50m tourbe	79cm	64cm à 73cm	70cm à 75cm	NIVELLEMENT			* TASSEMENTS SUR LA PERIPHERIE DU RESERVOIR (+ 40cm POUR LE CENTRE)
7	CRAN Remblai routier de 4m			Argile molle 17m	40cm	75cm	85cm	TASSOMETRE			
8	LE MAROUILLET Remblai routier de 5m	Largeur à la base de 40m		2m Argile 2,50m Limon 3,50m Vase	44cm	65cm à 75cm	55cm	TASSOMETRE			* VALEUR DU TASSEMENT AU BOUT DE 9 MOIS DE CHARGEMENT
9	TARTIFUME (PS N°H) Remblai d'accès de 8,50m	Largeur à la base de 80m		Argile (Op-Or) 7,50m	130cm	78cm	80cm	TASSOMETRE			

Tableau I Principaux résultats récapitulatifs des sites étudiés

Les profils pressiométriques des ouvrages autres que Plancoët et Carrefour sont donnés dans la figure 2. Les figures 3 et 4 donnent les résultats détaillés obtenus sur les sites N° 1 et N° 4. Ces 2 cas présentent

la particularité d'avoir une couche molle située sous la fondation.

Le calcul du tassement est alors mené de façon plus détaillée qu'à la formule (1), la part de tassement

Profondeur (mètres)	SITE N°2 PNAH-POL		SITE N°3 C.O. 34		SITE N°5 Recede de BORDEAUX (P.I.C.F. N°4)		SITE N°6 Réservoir métallique S.H.A. ROUEN		Site N°7 Bâtiment de Cren		SITE N°8 Bâtiment le Haroullier		SITE N°9 Bâtiment d'accès au PS N°H		
	Nature des sols	E bars	PI bars	Nature des sols	E bars	PI bars	Nature des sols	E bars	PI bars	Nature des sols	E bars	PI bars	Nature des sols	E bars	PI bars
1	Terre végétale (56)	3,3		Terre végétale (55)	5,4		Argile plastique (21)	2,3							
2	Limon peu plastique (100)	4,8		Grave argileuse compacte à partir de 1,50 m (540)	13,5		SUR VASEUX VERTICALE (5,5)	1					Argile peu plastique contenant des graviers 15 < W% < 30 (33)	1,4	
3							de couches de sable de 0 à 2 m (15)	1,5					Limon peu plastique (5)	0,6	
4							Vase grise (8,5)	1,8					Argile grise (8)	2,2	
5	Limon sableux humide (23)	3,8		Faïence (sable cailloux compact) (182)	6,0		40 < W% < 80 1 < Cq% < 8 1 < Cq < 2,3 (8,5)	2,3					Argile organique très plastique (8)	2	
6							Tourbe marron W = 200 % 25 < MO% < 35 Wp = 3,0 (12)	2					très plastique (16)	2,85	
7	Schiste altéré (115)	14,1					Grave (25)	2,8					44 < W% < 64 Wp = 1,65 MO% = 4,5 (14)	2,7	
8							Arrêt du forage à 7 m (110)						4,9 < Cc < 10 (9,8)	3,1	
9	Arrêt du forage à 8,50 m (115)	14,5					Sable (limons) (12)	8,5					Calcaire laminé (12)	8,5	
10							Grave (Aluvions modernes anciennes) (530)	2,0					Arrêt du forage à 8,50 m (19)	2,9	
11													Sable fin (19)	3,6	
12													Marne (Aluvion du substratum) (56)	3,7	
13													Marne (Aluvion du substratum) (82)	3,8	
14													Marne calcaire (stampier) (115)	3,8	
15													Marne calcaire (stampier) (110)	4,1	

FIG. 1 Profils géotechniques et caractéristiques des sites N° 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9

due à la couche molle étant séparée compte tenu des phénomènes de consolidation.

La formule devient alors : (voir figure 5)

Formule (2)

Le supplément représente 50 à 60 % du tassement calculé dans le cas de Blancoët et pratiquement la totalité dans le cas de Carrefour.

Sur les diverses courbes de la figure 4b qui donnent les tassements mesurés en cm en fonction du nombre de jours, on remarquera la valeur très variable, et qui peut être très importante, du tassement initial sous le seul coulage de la semelle (Phase P<sub>4</sub>) au point

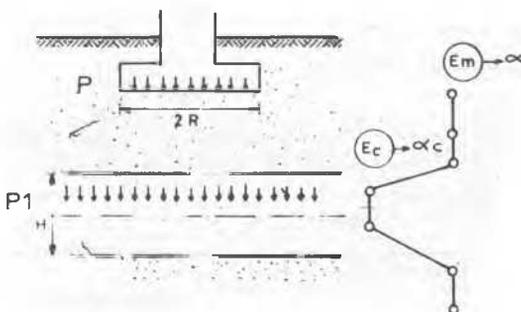


FIG. 5 Calcul du tassement d'une couche molle

d'entraîner une véritable rotation de la fondation telle que celle enregistrée à l'appui 6.

A notre avis, ceci est imputable au remaniement en fond de fouille, d'autres observations, par exemple celles effectuées sur l'ouvrage de PACE (Jezequel J et Henault P 1970) montrent que ce phénomène est effectivement important (Figure 6).

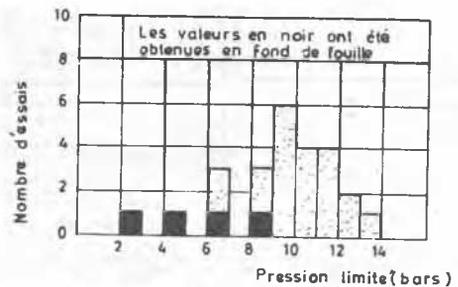
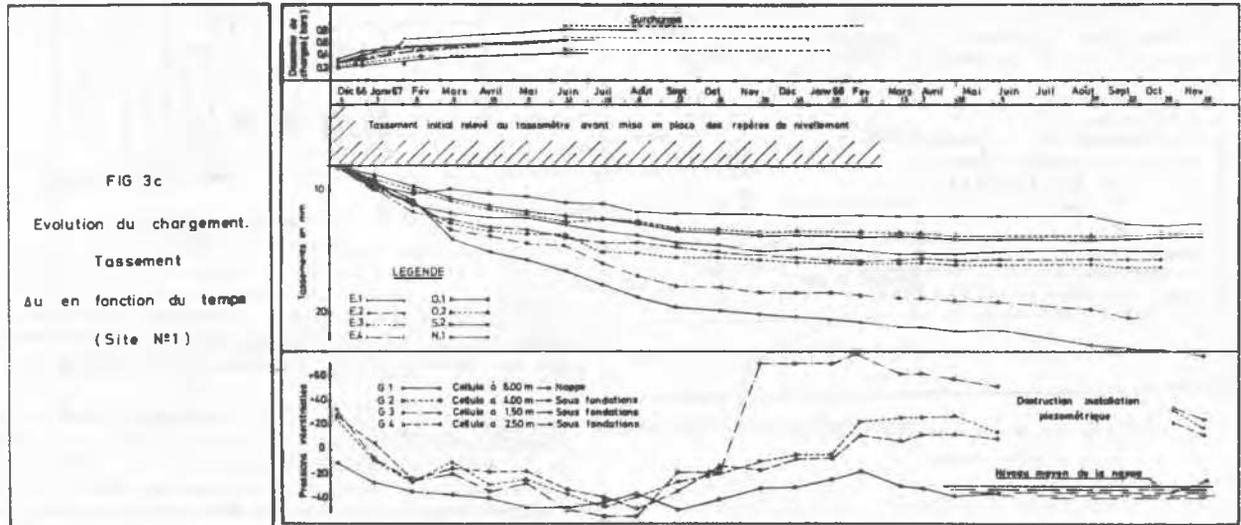
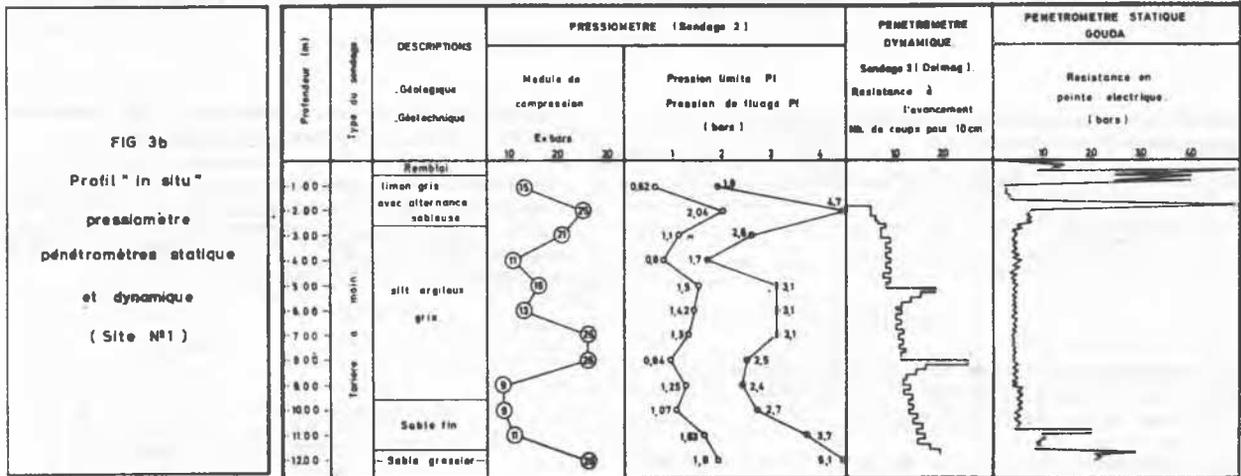
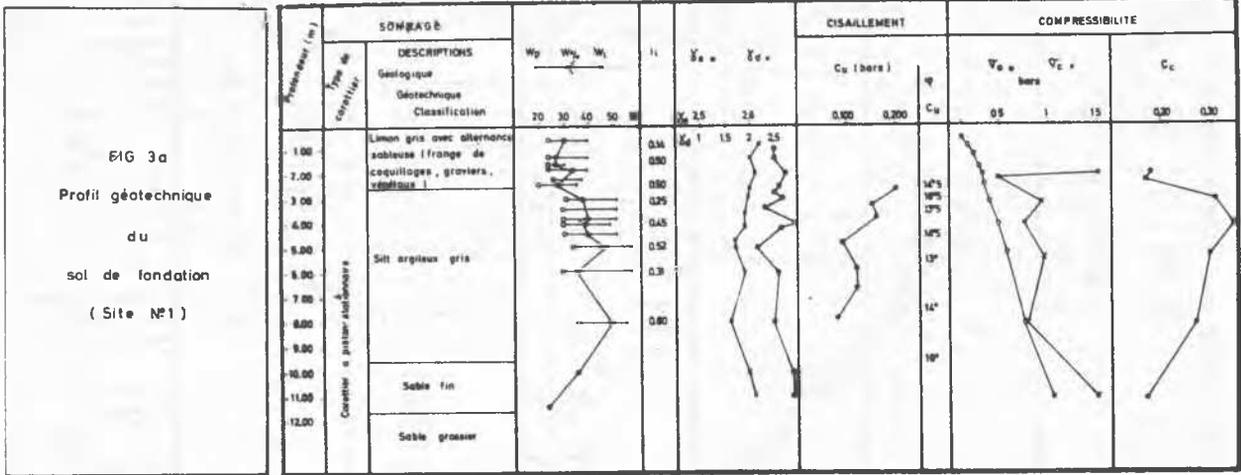


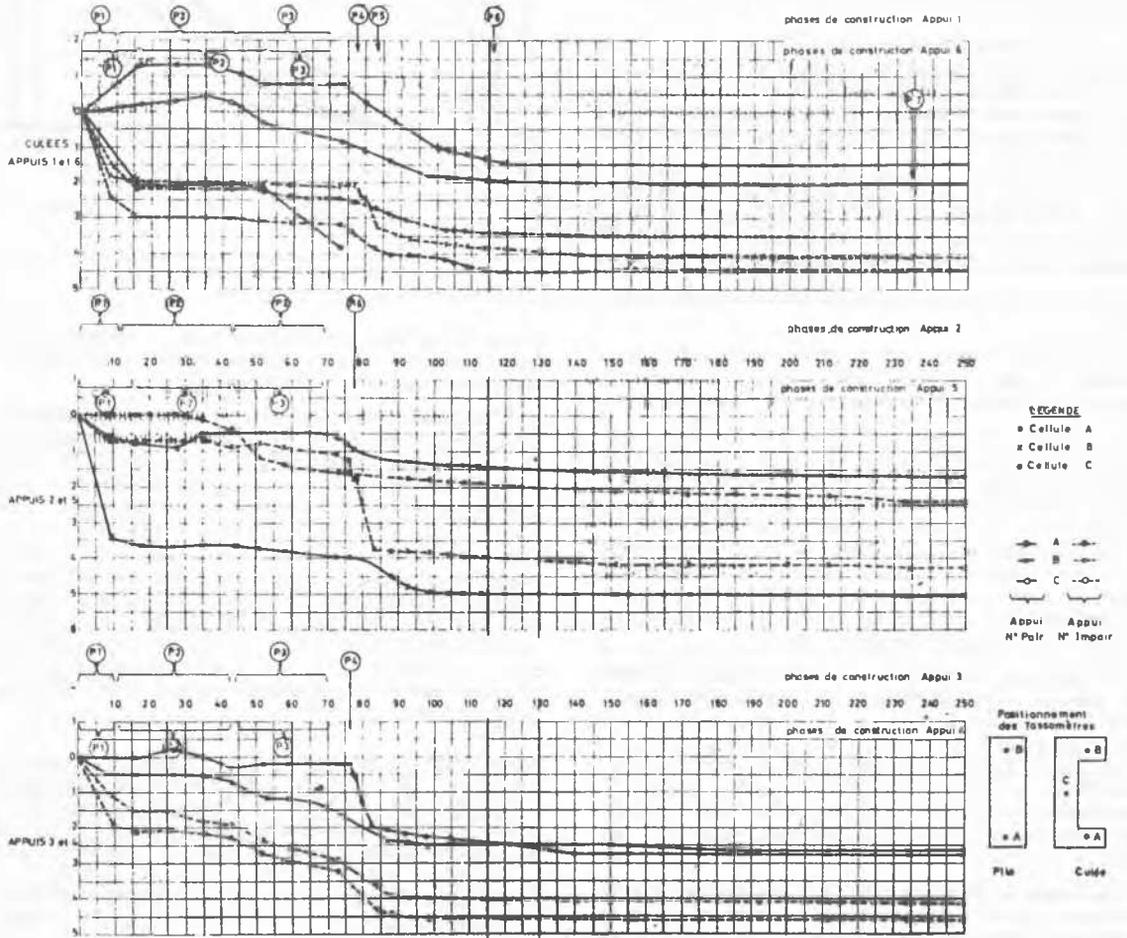
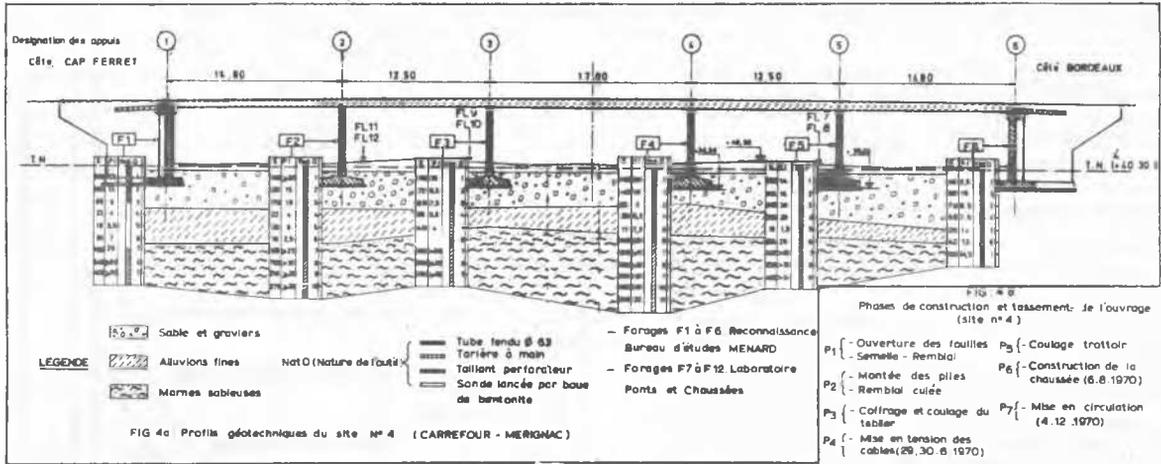
FIG. 6 Remaniement, Histogramme des pressions limites

Dans la comparaison, pour l'ouvrage de Carrefour, entre tassements calculés et observés, les tassements dus au remaniement ont été déduits des mesures globales.

Toujours sur la figure 4b on remarquera, dans les tassements mesurés au droit des divers appuis de l'ouvrage, l'influence également importante de la Phase P<sub>4</sub> correspondant à la mise en tension des câbles de précontrainte qui a reporté sur les appuis la charge totale du tablier précédemment supportée par les échafaudages.



6.5.9



6.5.3

## VALIDITE ET UTILISATION PRATIQUE DE LA METHODE PRESSIOMETRIQUE

La figure 1 montre que les prévisions de tassement par la méthode pressiométrique sont en général satisfaisantes, bien que généralement supérieures aux tassements mesurés. C'est donc une méthode à envisager sérieusement pour la résolution des problèmes pratiques bien que d'un point de vue fondamental, on puisse formuler certaines critiques :

1°) Certaines sont communes avec les méthodes classiques

a - Les ouvrages ne travaillent pas avec le même coefficient de sécurité vis à vis de la pression de poinçonnement. Pour les fondations de petite largeur (semelles), il est de 3 et l'on se trouve généralement en deçà de la pression de surconsolidation.

Pour les fondations de grande largeur (remblai, radier, réservoir), il peut descendre jusqu'à 1,5 voire moins, la pression de préconsolidation étant dépassée, et les phénomènes de consolidation étant prépondérants.

Le tassement est d'origine différente selon les ouvrages et les fondations, et généralement un essai de sol correspond préférentiellement à un type de tassement déterminé. Dans le cas du pressiomètre ce sont les déformations par distorsion qui sont surtout mises en évidence.

b - La théorie de l'élasticité linéaire et isotrope qui est à la base de ces méthodes, nécessite le choix d'un module sécant sur les courbes effort-déformations, lesquelles sont généralement incurvées.

2°) D'autres sont spécifiques à l'essai pressiométrique.

a - L'essai normal est du type rapide, donc non drainé dans le cas des sols fins saturés. Il ne met donc pas en évidence les phénomènes de consolidation.

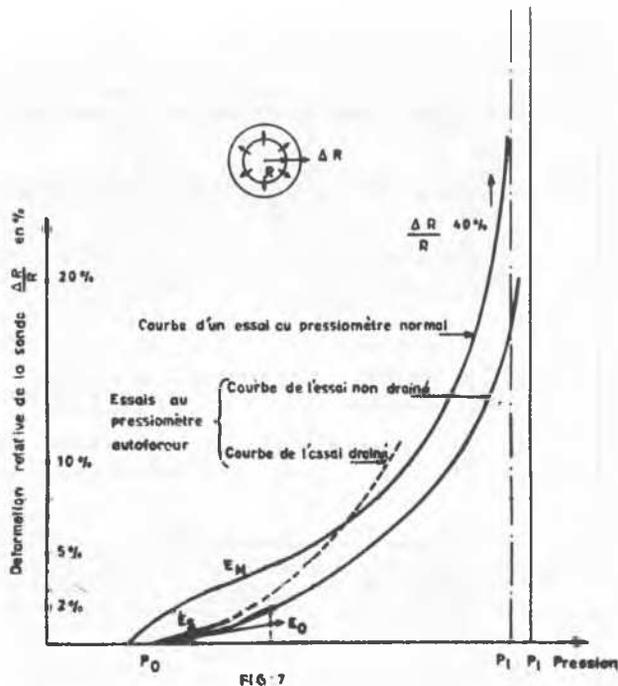
b - L'essai est pratiqué sur un sol présentant une zone remaniée au voisinage de la sonde. Ceci est dû à l'exécution du forage et à la mise en place de la sonde. Suivant la méthode de forage des modules variant du simple au double peuvent être obtenus (Jezequel.J - Lemasson.H et Touze.J 1968). C'est pourquoi il est d'abord nécessaire de respecter les mises en oeuvre décrites dans le mode opératoire de l'essai normal (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 1971), pour obtenir des modules fidèles.

Il faut remarquer que ces deux causes d'écart (absence de drainage et remaniement) dans l'évaluation des modules ont des effets de sens opposés. Ceci est illustré à la figure 7, où la courbe de l'essai pressiométrique normal ( $E_M$ ) est comparée aux courbes pressiométriques "drainé" et "non drainé" réalisées au pressiomètre autoforeur, c'est-à-dire sans remaniement (Baguelin.F - Goulet.G et Jezequel.J 1972) et (Jezequel.J 1972).

On constate que les modules "non drainé"  $E_o$  et  $E_s$  sont bien plus élevés que le module pressiométrique normal  $E_M$ , mais que le drainage et le fluage tendent à faire chuter les modules à des valeurs ayant le même ordre de grandeur que celle du pressiomètre normal.

3°) Par ailleurs, l'analyse du comportement des ouvrages présente aussi certaines difficultés :

- Méconnaissance des charges réellement appli-



quées (programme de construction - reports de charge entre appuis - charges permanentes et surcharges - influence exacte de remblai...).

- Existence du remaniement en fond de fouille difficilement prévisible et à isoler dans l'exploitation des courbes de tassement.

### CONCLUSIONS

Compte tenu des diverses difficultés précitées, il ne faut pas s'attendre à des corrélations extrêmement précises entre tassements calculés et mesurés. C'est pourquoi les résultats de la figure 1 nous ont semblés satisfaisants d'un point de vue pratique. En particulier, il semble qu'il y ait une compensation assez heureuse entre les diverses causes d'écart propres au pressiomètre.

Enfin, sur le plan pratique, il faut noter qu'il est possible d'obtenir des caractéristiques pressiométriques sur tous les types de terrains, et que l'on obtient suffisamment de résultats pour se faire une idée de l'hétérogénéité d'un site.

Le tableau N° II, récapitule nos recommandations sur l'utilisation de la méthode en fonction des valeurs de module obtenues.

TYPE DE SOLS	MODULE PRESSIOMETRIQUE $E_M$ (Essai normal)	FONDATION ETROITE (Semelles)	FONDATION DE GRANDE LARGEUR (Remblai, Radier)
Sols très mous Vases - Tourbes - Argile Sables et silts lâches saturés	$0 < E_M < 25$ bars	Rechercher d'autres niveaux ou type de fondation de coût comparable. Si impossible faire une étude complémentaire à l'adomètre	Faire une étude complémentaire à l'adomètre
Sols mous Roches très altérées	$25 < E_M < 50$ bars	Si tassement $W < 5$ cm. Evaluation raisonnable. Si tassement $W > 5$ cm. Rechercher d'autres niveaux ou type de fondation de coût comparable. Si impossible faire une étude complémentaire à l'adomètre	Faire une étude complémentaire à l'adomètre
Sols fins consolidés Roches altérées Sables et gravés peu compacts	$50 < E_M < 100$ bars	Evaluation raisonnable par la méthode pressiométrique	Si tassement $< 10$ cm (ouvrage rigide) } Evaluation raisonnable Si tassement $< 20$ cm (ouvrage souple) } Si tassement supérieur. Etude complémentaire adométrique
Sable et grave compacts Marne raide et Argile très surconsolidée	$100 < E_M < 250$ bars	Evaluation correcte	Evaluation correcte
Sols très compacts Roches tendres	$250 < E_M < 1000$ bars	Pas de tassements ( Problèmes pour le battage de pieux, de palplanches et la réalisation de l'ancrage des pieux forés, mais pas pour les terrassements de feuilles de fondation )	
Roches	$E_M < 1000$ bars	Problèmes de terrassements des feuilles, du battage de pieux, palplanches et de l'ancrage des pieux forés ( Utilisation du trépan délicat )	

TABLEAU II - Utilisation de la méthode pressiométrique de prévision des tassements

## R E F E R E N C E S

BAGUELIN, F, GOULET, G et JEZEQUEL, J (1972) "Etude expérimentale du comportement d'un pieu sollicité horizontalement", 5ème congrès Européen de Mécanique des sols et des travaux de fondations, Madrid Avril 1972, Vol. I p. 317 à 324

BRU, J.P. (1967) "Contrôle du comportement de bac réservoir reposant sur sols compressibles. Mesure de tassements", bulletin de liaison Laboratoires Ponts et Chaussées, Paris, N° 24 p. I.11

CAQUOT, A, KERISEL, J (1956) "Traité de Mécanique des sols", Chapitre VI Calcul des tassements, 3ème édition Gauthier-Villars, Paris, p. 132 à 160

JEZEQUEL, J, LEMASSON, H et TOUZE, J (1968) "Le pressiomètre Louis Ménard", Bulletin de liaison Laboratoire Ponts et Chaussées, Paris, N° 32 p. 97 à 120

JEZEQUEL, J, HENAULT, P (1970) "Remaniement du sol en fond de fouille d'une fondation sur semelle", Bulletin de liaison Laboratoires Ponts et Chaussées, Paris, N° 49 p. 22 à 23

JEZEQUEL, J (1972) "Mesure du coefficient  $K_0$  en place au pressiomètre autoforeur", 5ème Congrès Européen de Mécanique des sols et des Travaux de Fondations, Madrid Avril 1972, Vol. "Discussions"

KERISEL, J et QUATRE, M (1966) "Tassements sous les Fondations", Annales des Ponts et Chaussées, Paris, Mai-Juin p. 143 à 164

LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES (1970), "Le tassomètre pour la mesure des tassements" projet de mode opératoire MS.IS. 1, Juillet 1970

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (1971) "Essai pressiométrique Normal. Mode opératoire MS.IS 2" Dunod, Paris, 1971

MENARD, L (1971) "Le tassement des fondations et les techniques pressiométriques", Annales de l'Institut Technique du bâtiment et des Travaux Publics, Série Sols et Fondations, Paris, N° 84 supplément au N° 288 de décembre 1971

SKEMPTON, A.W (1954) "The pore pressure coefficients A and B" Revue Géotechnique, London, Vol. IV p. 143

SKEMPTON, A.W and BJERRUM, L (1957) "A contribution to the settlement analysis of foundations on clay", Revue géotechnique, London, Vol. VII p. 168

TERZAGHI, K and PECK, R.B (1948) "Soil Mechanics in Engineering practice", John Wiley and sons, New-York.