



COMPORTEMENT D'UN DOUBLE-RIDEAU EN PALPLANCHES AU PORT AUTONOME DU HAVRE

J.-C. Blivet ; Ph. Rivière
C. E. T. E. Rouen ; Port Autonome du Havre

ABSTRACT

The design of simple structures as a sheet-pile wall or a diaphragm wall anchored by one or several tie-rods is nowadays easily possible through elastoplastic calculation methods.

But the design of a double sheet-pile wall is much more difficult. During the achievement of new container berth quai des Amériques, Port of Le Havre Authority decided to carry out tests in the eastern end of the berth where the structure is a double sheet-pile wall.

For that purpose, the sheet-piles were equipped with inclinometers and the tie-rods were equipped with strain-gauges in order to record the deflections in the sheet piles and the stresses in the tie-rods.

Though many of the equipments were damaged, it is obvious that the experimental results are far from the figures given by computerized calculation method.

It is the aim of Port of Le Havre Authority to go through the study using a computerized calculation method based on the recorded deflection of the rear sheet-pile wall which looks reliable. Provided that such new simulation would meet the stresses measured on tie-rods, a new simple method to design double sheet pile wall could be proposed by Port of Le Havre Authority.

I - INTRODUCTION

Le quai des Amériques est un quai situé au Nord du Bassin René Coty. Ce Bassin à l'ouest de l'Ecluse François Ier est soumis aux fluctuations de la marée. Le quai d'une longueur utile de 500 m est constitué de deux parties, la partie ouest de 400 m environ est composée de caissons en béton armé, alors que pour la partie est ainsi que le retour vers l'Ecluse François Ier, un double-rideau métallique a été mis en place pour des raisons techniques de réalisation.

II - BUT DE L'EXPERIMENTATION

Le dimensionnement d'un ouvrage simple comme un rideau de palplanches ou une paroi moulée avec un ou plusieurs niveaux tirants est à l'heure actuelle assez aisé par les méthodes du calcul élastoplastique, par contre le dimensionnement d'un double-rideau s'avère beaucoup plus délicat. Le dimensionnement du double-rideau du quai des Amériques a été élaboré à partir d'un calcul aux

éléments finis. Le but de l'expérimentation est donc de comparer les efforts et déformées réellement mesurés aux résultats du calcul théorique, puis d'établir une méthode simplifiée de prédimensionnement basée sur l'exploitation des mesures et des calculs.

III - DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Partie est du quai des Amériques (fig 1)

Les deux rideaux sont espacés de 21,50 m et sont constitués de :

- rideau avant : caissons de palplanches Larssen VS 700 x 12 E430, espacé de 1,85 m entre axes et reliés par des palplanches L. 31.
- rideau arrière : caissons de palplanches Larssen VS 800 x 14 E 430 combinaison 1/4 avec palplanches L 31.

Les deux rideaux sont fichés à la cote (-27,00), pour les caissons (21,50) et pour les palplanches intermédiaire, et arasés à (+5,50). Ils sont surmontés de poutres en béton armé supportant les rails de portique.

Tirants :

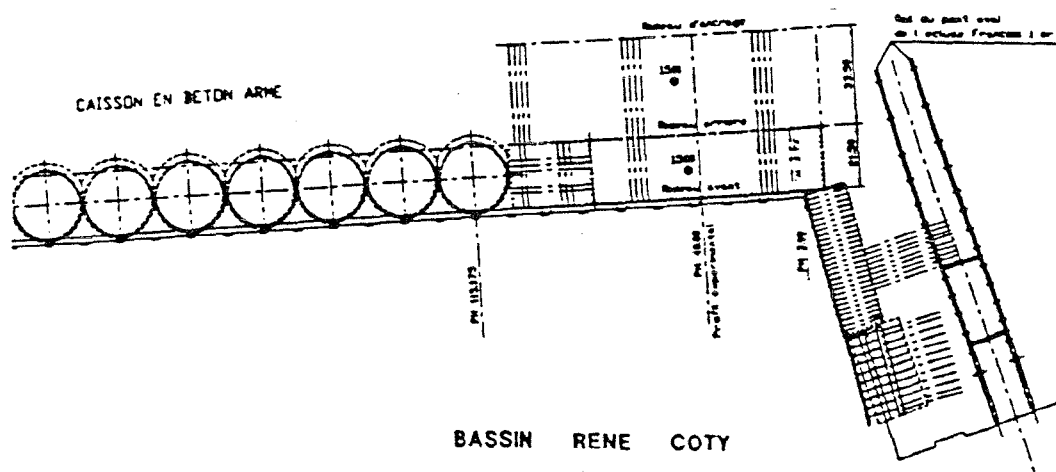
Les tirants passifs entre les rideaux, ancrés sur les caissons, sont disposés en trois nappes de niveaux (+5,00), (-3,00) et (-9,00) avec un espacement de 1,85 m dans chaque nappe.

Les diamètres des tirants sont les suivants :

au niveau	(+5.00)	$\phi = 0 - 68$ mm refoulé 85
au niveau	(-3.00)	$\phi = 0 - 68$ mm refoulé 85
au niveau	(-9.00)	$\phi = 0 - 100$ mm refoulé 105

Les tirants d'ancrage arrière, d'une longueur de 33,5 m, sont disposés tous les 1,85m au niveau (+5,00) ; ils sont prétendus à 250 kN/m et ancrés sur le rideau arrière. Le diamètre de ces tirants est de 73 mm.

Fig 1 - Quai des Amériques - vue en plan de l'extrémité Est du quai



IV - ETUDES PREALABLES DE DIMENSIONNEMENT DU DOUBLE-RIDEAU

Diverses approches ont été faites au stade de l'appel d'offres pour tenter de simuler au plus près le fonctionnement réel de l'ouvrage parmi celles qui sont dimensionnantes on peut noter le calcul de stabilité générale en service.

Cette approche consiste à considérer les 2 rideaux de palplanches de la partie Est du quai nord ancrés l'un sur l'autre et le massif de sol intermédiaire, comme un ouvrage de soutènement massif, soumis à renversement, et ancré à (+5,50).

On a admis que la stabilité générale exigeait une réaction d'ancrage externe au moins égale à celle qui fait passer la résultante des efforts appliqués à l'ouvrage poids, à la limite du tiers central de sa base à (-27,010). Cela conduit, en phase finale, à une réaction de 76t/m, soit 141 t par tirant.

Des calculs élastoplastiques séparés pour les 2 rideaux ont également été effectués.

Une autre approche par calcul global a également été réalisée en admettant que les deux rideaux, d'inertie voisine, subissent la même déformation et, par suite, le même moment, c'est-à-dire la moitié du moment global subi par l'ensemble des 2 rideaux supposés accolés et ancrés à (+5,00).

1) Etudes d'exécution du double-rideau par la méthode des éléments finis.

L'objet de ces études réalisées avec le programme Gefdyn, a été de vérifier le dimensionnement global préalablement fixé, de répartir la matière au mieux entre rideaux et entre tirants et de connaître les déformations.

Hypothèses et données générales :

Le modèle est bidimensionnel. Il comporte 2068 nœuds et 867 éléments.

Les sols se comportent selon la loi élastoplastique de Druker-Prager. Les modules pris en compte sont ceux d'un comportement non drainé.

2) Résultats des calculs

Le tableau ci-dessous donne les résultats essentiels des calculs. Les calculs 1, 2 et 4 correspondent à des sections ouest centrales et est du double-rideau.

Tableau des résultats des calculs

DOUBLE-RIDEAU	Efforts tirants			Moments	Rideaux		Efforts	Observations
Résultats calculs	+5,00	-3,00	-9,00	AV	AR	cir. AR	/m	
Calculs préalables	T	T	T	T _m	T _m	T		
le = 15 m								
(entre rideaux)								
Ouvrage poids	-	-	-	-	-	76		
Calculs séparés	34	58	106	108	232	70		
Calcul global	-	-	-	225	225	135		Tirants intermédia- ires non considérés
Calculs d'exécution								
EF								
le = 21,5 m								
Calcul 1	48	48	94	162	175	47,5		
Calcul 2	33	52	104	160	185	44		
Calcul 4	51	48,5	95	170	181	49		

V - DESCRIPTION DE L'EXPERIMENTATION (fig 2)

L'instrumentation mise en place vise à déterminer la déformée des rideaux avant et arrière, celle du sol ainsi que la tension dans les tirants.

1) Implantation du profil expérimental

Le profil "expérimental" a été réalisé au PM 40.

Il comprend l'équipement du caisson n° 93 à l'avant, et le caisson n° 34 à l'arrière, ainsi que les tirants entre les rideaux et le tirant arrière.

Les caissons sont constitués de deux profils de palplanches V S reliées entre elles par deux plats, de largeur 800 ou 700 mm suivant qu'il s'agit du rideau arrière ou du rideau avant.

2) Mesure de la déformée de l'ouvrage

La déformée des rideaux avant et arrière ainsi que celle du sol compris à l'intérieur des deux rideaux a été déterminée à partir des mesures inclinométriques.

Pour le rideau avant : inclinomètre I1

Pour le rideau arrière : inclinomètre I2

Pour le massif du sol : inclinomètre I3

SESSION 1

3) Mesure de la tension dans les tirants

La mesure de la tension dans les tirants a été déterminée par des capteurs à cordes vibrantes, étanches, disposés en différentes sections des tirants.

Les capteurs ont été protégés contre les chocs par des boîtiers cylindriques, fixés sur les tirants.

Le principe de la corde vibrante repose sur le fait que l'allongement relatif est proportionnel au carré de la fréquence de vibration.

$$\frac{\Delta L}{L} = k (f^2 - f_0^2)$$

f = fréquence mesurée

f_0 = fréquence du capteur non sollicité

Afin de déterminer l'effort normal et le moment, chaque section de tirant étudiée, est équipée de trois capteurs répartis à 120° le long de la circonférence. L'implantation précise est reportée sur le schéma n° 4.

Le tirant T2 (-3,00) a été équipé de trois séries de 3 jauges afin de pouvoir évaluer le frottement sol/tirant.

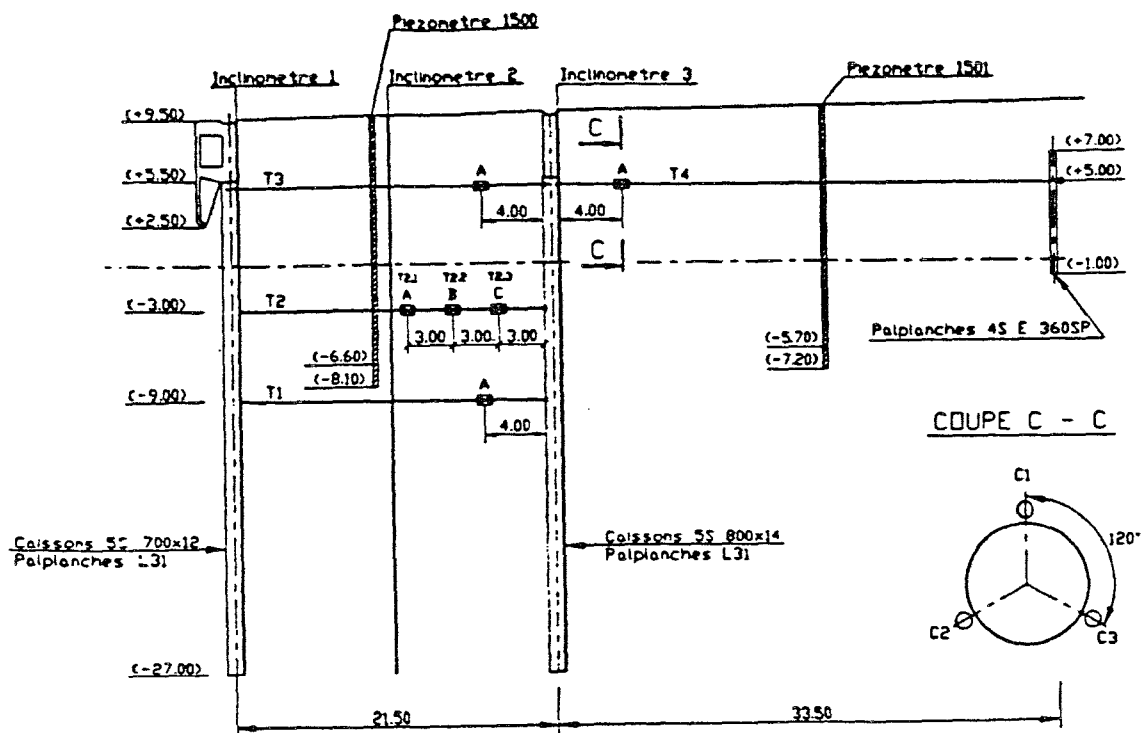


Fig. 2 - Implantation de l'appareillage.

Pour le dimensionnement des ouvrages, la piézométrie entre les rideaux ou en arrière du double-rideau a dû être estimée. Dès que les travaux l'ont permis deux piézomètres, l'un situé entre les deux rideaux, l'autre en arrière du rideau arrière ont donc été mis en place afin de vérifier les hypothèses de calcul. Les niveaux de crépinage des deux piézomètres ont été choisis de façon à ce que seule la nappe supérieure soit intéressée.

VI - RESULTATS DES MESURES

1) Mesures inclinométriques

L'analyse porte exclusivement sur l'inclinomètre I2 du rideau arrière, en effet le tube de réservation du rideau avant n'a pu être utilisé qu'à la troisième tentative, et l'inclinomètre I3 entre les rideaux posé très tardivement et endommagé partiellement ne donne actuellement aucun renseignement intéressant.

2) Mesures inclinométriques sur le rideau arrière

Les résultats des mesures sont reportés sur la figure 3 ci-contre.

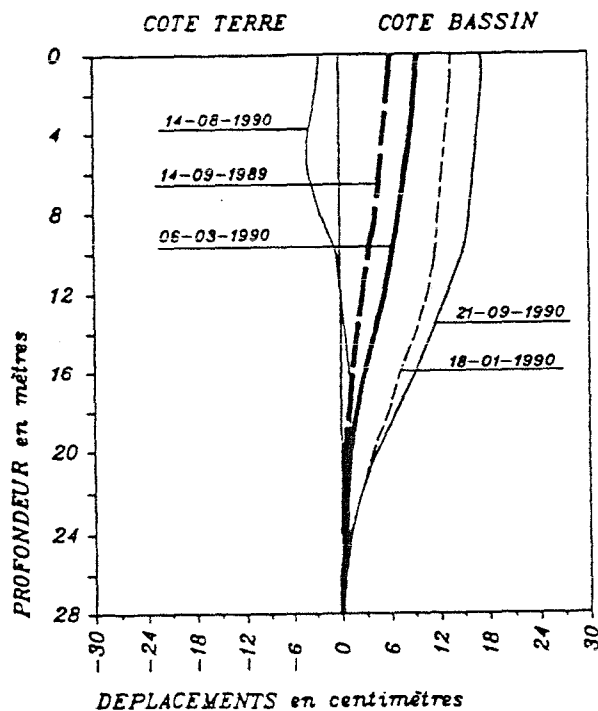


Fig 3 - Déformée du rideau arrière Mesures inclinométriques I2

SESSION 1

L'exploitation s'est faite en considérant un encastrement sur trois mètres en pied. L'inclinomètre qui rend compte des déformations du rideau arrière est l'inclinomètre I2. Pour plus de précision l'analyse et la comparaison ont été faites sur les mesures limitées à la cote (+5,50). Au-dessus de cette cote, il a fallu rallonger les tubes inclinométriques pour traverser la poutre de roulement arrière en béton armé. Une exploitation rigoureuse des mesures aurait alors nécessité d'établir une nouvelle référence à partir de cette date et de cumuler les déplacements relatifs ainsi obtenus aux anciennes mesures. Nous nous sommes contentés dans ce premier rapport de l'analyse des déplacements allant jusqu'à la phase de construction des poutres soit (+5, 50) . La mesure du 21/09/90 à marée basse puis à marée haute ne traduit aucun déplacement de l'ouvrage.

3) Mesures topographiques

La figure n°4 traduit les déplacements mesurés des rideaux avant et arrière à la cote (+5,50) des caissons 33 et 92 situés à 1,85 m des caissons expérimentés.

Dans les premiers mois on constate un resserrement des rideaux avant et arrière puis une stabilisation des déplacements.

Une hypothèse a cependant été prise lors de l'exploitation des mesures, en effet, le relevé des géomètres indiquait une brusque rentrée du rideau arrière vers les terres, inexplicable si l'on se réfère aux phases de travaux à cette époque. Cette "anomalie" a été corrigée en opérant une translation d'ensemble de 7 cm vers le bassin.

On note une bonne corrélation entre les mesures topographiques dont la précision en X, Y peut être estimée au cm et la mesure de déplacement par inclinomètre dont la précision en tête est de plus ou moins 3 cm.

Puisque les déplacements topographiques et inclinométriques sont assez voisins en tête, il paraît logique de considérer que l'ancrage en pied tel qu'il a été considéré, c'est-à-dire fixe, est tout à fait plausible.

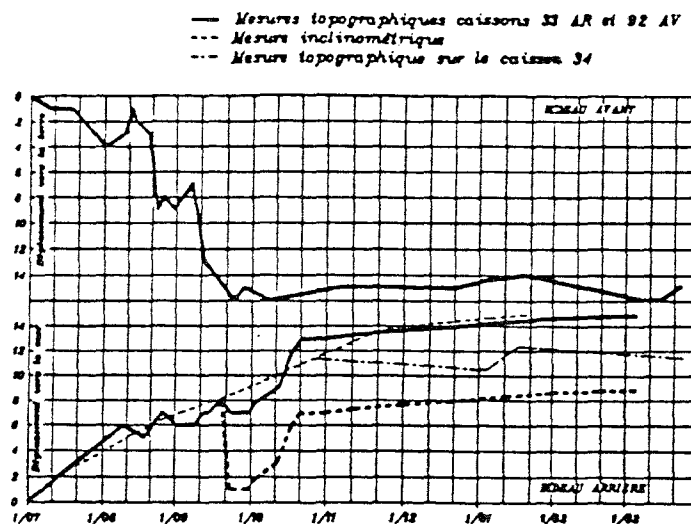


Fig 4 - Mesures topographiques de déplacements des rideaux avant et arrière à la cote (+5,50)

4) Mesure de la tension dans les tirants

L'exploitation des résultats des jauges à cordes vibrantes permet de déterminer un effort normal et un moment fléchissant. L'analyse qui suit ne porte que sur les efforts normaux agissant sur les tirants. Cet effort est généralement une traction.

Le tableau ci-après traduit les efforts normaux, traction ou compression, obtenus sur les différents tirants.

Tableau des efforts normaux en tonnes sur les tirants

DATES	15/09	10/10	28/11	19/01	05/03	25/08	21/09/90	21/09/90
REF	89	89	89	90	90	90	marée basse	marée haute
TIRANT							(+1,39)	(+8,05)
T1 (+5,00)				2,6	5,4			
T2 1				1,8	2,8	64,2	77,6	63,2
T2 2						96	101,3	82,9
T2 3 (-3,00)				-0,2	-0,1	67,7	41	34,2
T3 (-9,00)						32,8	53,4	29,8
T4 (+5,00)	3,3	17,5	30,0	33,6	35,2	80,6	81,9	75,7

SESSION I

Les valeurs soulignées correspondent à une évaluation de l'effort dans le tirant à partir de deux jauges seulement. Au total 18 jauges ont été installées, 4 sont détériorées, une répond de façon aléatoire (3 A 3 tirant T3). L'évolution de la tension suivant l'axe du tirant T2 n'a pu être étudiée du fait de la détérioration de certaines jauges sur ce tirant.

5) Mesures piézométriques (fig. 5 - 6)

Deux mesures piézométriques dans la nappe supérieure ont été programmées. L'une a eu lieu le 25/06/90 et l'autre le 31/05/90 pour des coefficients de marée respectivement égaux à 90 et 52.

Le niveau moyen est voisin de +5,50 ce qui confirme bien l'hypothèse prise en compte dans le calcul aux éléments finis.

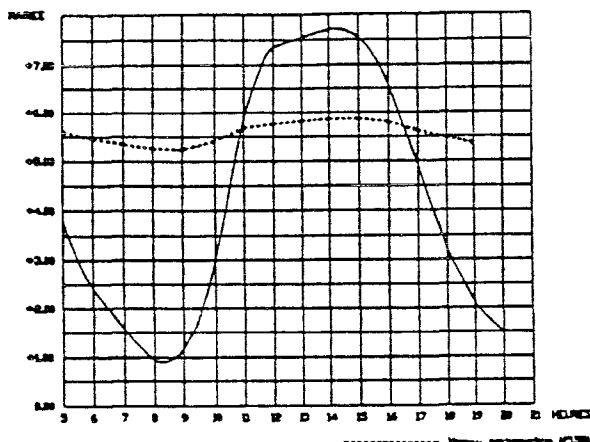


Fig. 5 - niveau piézométrique au 25/06/90 (coeff.90)

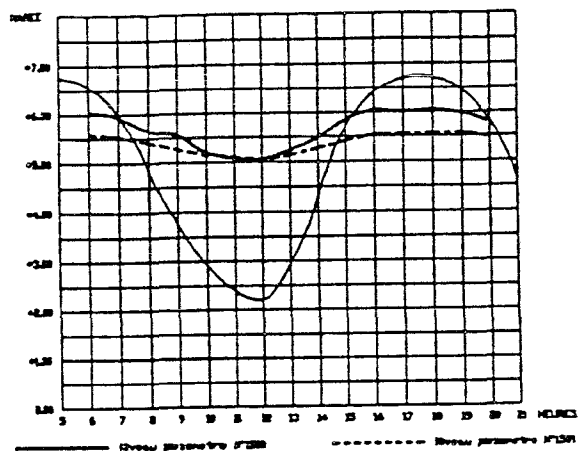


Fig. 6 - niveau piézométrique au 31/05/90 (coeff.52)

VII - COMPARAISONS : MESURES EXPERIMENTALES - CALCULS AU ELEMENTS FINIS

La comparaison porte uniquement sur la tension dans les tirants et sur les déformations du rideau arrière.

1) *Comparaison entre hypothèses de calcul et paramètres réels*

Le tableau ci-après indique les valeurs de certains paramètres prises en compte dans le calcul aux éléments finis et leurs valeurs expérimentales corrélatives.

ELEMENTS CONSIDERES	HYPOTHESES DE CALCUL	VALEURS EFFECTIVEMENT RELEVES
Basse mer	+ 0,30	+ 1,35
Haute mer	+ 8,30	+ 8,05
Niveaux entre les rideaux	+ 5,50	+ 5,00 à + 6,00
Niveau en arrière des rideaux	+ 5,50	+ 5,50
Niveau du dragage	- 15,50	-15,10
Surcharge	0	0
Remblais entre les rideaux	$\phi = 30$ $C' = 0$	ϕ estimé à 38° $C' = 0$

2) *Comparaisons entre tensions théoriques dans les tirants et tensions mesurées*

Les tableaux ci-après comparent les efforts mesurés dans les tirants et les tensions théoriques obtenues dans le calcul aux éléments finis sur l'ouvrage pour les phases 11 et 12 du calcul aux éléments finis.

La phase 11 correspond à l'ouvrage terminé à basse mer sans aucune surcharge, la phase 12 est relative à l'ouvrage terminé, haute mer sans surcharge.

SESSION I

2.1 - Ouvrage terminé - basse mer - phase de calcul 11.

	NIVEAUX DES TIRANTS			TIRANT ARRIERE + 5,00 (T4)
	+ 5,00 (T3)	- 3,00 (T2)	- 9,00 (T1)	
Tension calculée aux éléments finis (tonne)	35,1	86,6	181,7	41,6
Tension mesurée (tonne)	53,4 ou (32,8)	77,6 173,3 (moy)	-	81,9
RAPPORT : Tension calculée Tension mesurée	0,65 ou 1,07	1,12	-	0,5

2.2 - Ouvrage terminé - haute mer - phase de calcul 12

	NIVEAUX DES TIRANTS			TIRANT ARRIERE + 5,00 (T4)
	+ 5,00 (T3)	- 3,00 (T2)	- 9,00 (T1)	
Tension calculée aux éléments finis (tonne)	5,7	44,4	144,3	13,7
Tension mesurée (tonne)	29,8	63,2 60 (moy)	-	76
RAPPORT : Tension théorique Tension mesurée	0,20	0,7	-	0,28

Si l'on retient la valeur de 32,8 t à marée basse pour le tirant T3 les valeurs expérimentales et théoriques sont assez voisines comme le montre le rapport tension calculée sur tension mesurée.

Pour le tirant arrière il existe à marée basse un rapport de 2 entre tension expérimentale et tension théorique.

2.3 - Comparaison des écarts entre tensions théoriques et tensions mesurées à marée basse et marée haute

Le tableau ci-après résume les écarts de tensions observés entre la marée basse et la marée haute - phase 11 et 12 de calcul.

	NIVEAUX DES TIRANTS			TIRANT ARRIERE + 5,00
	+ 5,00	- 3,00	- 9,00	
Tension théorique (tonne)	30	42	37,7	28
Tension expérimentale (tonne)	23,6 ou 3	14		6

3) Comparaison des données théoriques et expérimentales

L'examen des courbes de déformées mesurées à marée basse et à marée haute montre qu'il n'y a aucun déplacements significatifs entre ces deux états. Par contre le calcul aux éléments finis montre une translation de 8 cm environ du rideau vers le terre-plein lorsque le niveau évolue de (+0,30) à (+8,30).

Au niveau de la déformée en phase 11, le calcul théorique montre une translation en pied du rideau de l'ordre de 7 cm. En tête le déplacement du rideau serait de 5 cm environ. Expérimentalement, en prenant l'hypothèse d'un pied qui ne bouge pas, le déplacement en tête serait de 16 cm environ (valeur extrapolée depuis la cote (+5,50)). S'il l'on prend en compte les mesures topographiques non corrigées, l'ouvrage serait alors rentré de 7 cm en pied vers les terre-pleins ce qui paraît difficile à comprendre. Ces déformées sont représentatives des moments dans l'ouvrage

$$y'' = \frac{M}{EI}$$

on peut donc raisonnablement penser que les sollicitations réelles sont différentes des sollicitations de calcul.

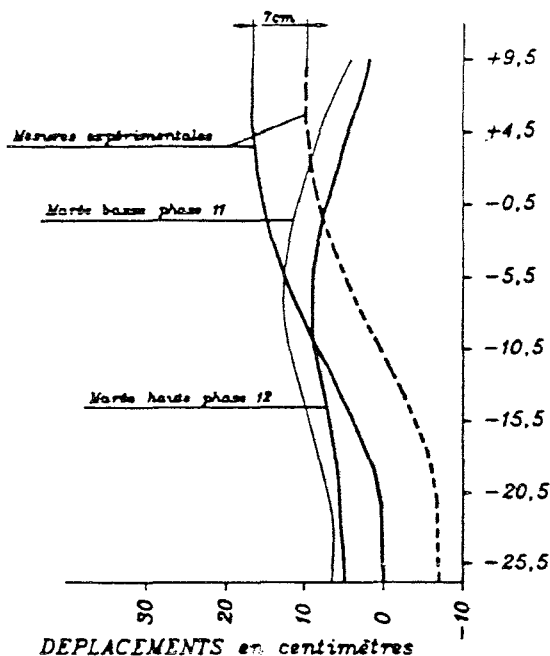


Fig 7 - Déformées théoriques et expérimentales du rideau arrière

VIII CONCLUSION GENERALE

Les nombreux problèmes matériels rencontrés au cours de cette expérimentation ont réduit de façon notable les informations que nous attendions sur le rideau avant ainsi que sur le massif de sol situé entre les deux rideaux.

Cependant les mesures sur la déformée du rideau arrière ainsi que les efforts de traction dans les tirants nous paraissent dignes d'intérêt.

La comparaison calcul aux éléments finis - mesures expérimentales présente une grande disparité aussi bien sur la déformée que sur l'effort dans le tirant arrière.

Pour la déformée de l'ouvrage à basse mer, sans surcharge, le calcul aux éléments finis montre une translation en pied de l'ouvrage de 7 cm environ avec un déplacement en tête de 5 cm, alors que les mesures conduisent à un pied fixe et un déplacement en tête de 16 cm environ, l'effet de la marée ne se traduit pas sur le plan expérimental, alors que d'après les calculs, il y aurait déplacement de l'ouvrage vers le terre-plein de 4 cm environ.

Les tensions de calcul et expérimentales sont assez proches pour les tirants situés entre les rideaux, par contre elles divergent de façon conséquente pour le tirant arrière.

Pour la tension dans le tirant arrière, le calcul donne 41,6 t à basse mer et 13,7 t à haute mer alors qu'il a été mesuré respectivement 82 t et 76 t.

Au vu de ces résultats, il y aurait lieu d'essayer de caler le modèle aux éléments finis sur la déformée expérimentale de l'ouvrage puis de comparer les nouvelles tensions théoriques aux tensions mesurées.

Si les résultats sont concordants ou voisins, l'élaboration d'une méthode de calcul simplifiée pourrait alors être envisagée.