

**ANALYSE DES PONTS CADRES
FERMES
BIAIS PAR LA METHODE DES
ELEMENTS FINIS.**

**Mr. A. ACHARHABI.
DIRECTEUR DU CERS**

**Mr. A. RMILI. ing. E.N.P.C.
Chef de la Division Technique**

**A. CHERRABI Ing. E.N.P.C.
Professeur à l'EHTP
Chercheur associé au LPÉE.**

**A. EL MOUADEN.
Chercheur Université Hassan II Ain chock**

1 / INTRODUCTION

Les ponts cadres biais fermés en béton armé sont utilisés pour des ouvrages d'ouverture assez faible ou lorsque la capacité portante du sol est relativement faible. Ces types d'ouvrages ne sont pas recommandés dans les deux cas limites: un sol trop médiocre et un sol de bonne portance. La méthode de calcul disponible d'un pont cadre fermé biais est celle définie par le dossier CAD90, elle est basée sur celle d'un cadre fermé droit fictif dont la géométrie est fonction de la portée et la largeur biaise. Sa limitation principale est l'angle biais qui doit être modéré (70 grade paraît comme une limite à ne pas dépasser). C'est une méthode approximative dont on ne maîtrise pas les incertitudes induites par certaines hypothèses et en particulier la distribution trapézoïdale des réactions du sol appliquée au radier par conséquent, l'influence de la déformation différentielle du sol est négligée; en plus les efforts internes dans les traverses supérieures, pieds droits, montants et radiers sont calculés en utilisant des portiques fermés unitaires soumis à leur part de charges qui leurs sont appliquées.

Pour mieux appréhender le comportement d'un pont cadre fermé biais, palier aux effets des approximations utilisées dans le dossier CAD90 et étendre le domaine d'application aux biais prononcés, trois méthodes rationnelles d'analyse des structures tridimensionnelles ont été envisagées.

- La méthode des équivalences.
- La méthode des différences finies.
- La méthode des éléments finis.

a) Méthode des équivalences

Cette méthode consiste à représenter les traverses supérieures, les pieds droits et les radiers par une grille de poutres dont les rigidités à la flexion et à la torsion sont équivalentes à celles des dalles correspondantes. Lors de l'étude préliminaire, un programme de calcul des structures en poutres tridimensionnelles a été adapté au calcul des ponts cadres fermés biais en considérant comme caractéristiques mécaniques des éléments structuraux celles obtenues par la méthode des équivalences appliquée au pont cadre. Cette technique a été testée

sur une dalle biaise pour évaluer la précision et la convergence des résultats en fonction du nombre de noeuds de jonctions entre les poutres. Les efforts dans la structure pont cadre s'obtiennent en effectuant une démarche inverse en utilisant les efforts calculés dans la structure fictive grille. Il s'est avéré lors du test de convergence que pour avoir plus d'informations sur le comportement de l'ouvrage réel, il fallait procéder à un maillage très dense en poutres, ceci limite l'utilisation de cette technique pour analyser les ponts cadres à plusieurs travées. En plus, une étude comparative des résultats de la méthode des équivalences et la méthode des éléments finis faite sur une dalle biaise a montré que les moments de torsions et de flexions aux coins de la dalle, obtenus par la méthode des équivalences sont erronés et que la dalle se comporte d'une manière plus rigide comparée à celle étudiée par éléments finis.

Finalement, cette méthode présente des insuffisances en ce qui concerne le traitement des charges routières et les réactions induites par le sol.

b) Méthode des différences finies:

Cette méthode a été largement utilisée pour analyser le comportement des dalles soumises à des charges transversales en particulier pour analyser et dimensionner les portiques ouverts. Pour analyser les cadres fermés cette méthode s'adapte mal, car le radier se comporte différemment d'une semelle et la technique adoptée pour les portiques ouverts ne peut pas être adoptée pour les cadres fermés biaisés à cause de la présence du radier.

c) Méthode des éléments finis:

Cette méthode consiste à subdiviser la structure du pont en éléments finis qui représentent exactement le comportement réel de la structure. En effet, la structure du pont cadre fermé biaisé est constituée d'une part de traverses supérieures et de radier qui se comportent comme des dalles dont le comportement est parfaitement décrit par la théorie des plaques, d'autre part, par les pieds droits qui se comportent comme une dalle vis-à-vis des poussées des terres et des surcharges des remblais d'accès, et comme un voile en état de contraintes planes vis-à-vis des efforts normaux transmis par les traverses au niveau des jonctions piedroit-traverses. Cette méthode s'avère plus intéressante et plus précise que les deux autres méthodes citées ci-dessus, en effet:

* En utilisant la méthode des éléments finis, on ne procède pas à établir une équivalence entre les traverses, radiers et piédroits et une structure fictive tridimensionnelle de poutres. Par conséquent, les déformées, les déformations et les contraintes calculées sont exactement les mêmes dans la structure réelle pont cadre.

* La représentation du comportement réel du pont biais au niveau des coins ne pose pas de problèmes comparée, à celle qui consiste à introduire des poutres diagonales dans la méthode des équivalences.

* Les charges permanentes et routières sont mieux représentées.

* La convergence des résultats de la méthode des éléments finis nécessite moins de noeuds.

* Le calcul des flèches, des déformations et des contraintes ne nécessite pas un calcul retour induit par la méthode des équivalences.

* La méthode des éléments finis donne plus d'informations sur le comportement réel de l'ouvrage. En conclusion, La méthode des éléments finis a été retenue pour analyser les ponts cadres fermés biais.

2/ Modélisation de la structure porteuse du pont en éléments finis.

La structure porteuse du pont est constituée de :

- Traverses supérieures:

Les traverses supérieures (tablier) soumises aux charges transversales (charges permanentes et routières) fonctionnent comme des dalles en flexion dans les deux directions du tablier. Ces dalles transmettent les charges aux pieds droits et aux montants par l'intermédiaire des efforts internes de jonctions rigides.

- Pieds droits et montants

Ces éléments structurels sont soumis aux efforts internes de jonction avec les traverses et aux poussées des terres et se comportent comme des dalles en flexion composée.

-Radier

Il est soumis, aux efforts qui lui sont transmis par les pieds droits et par les montants au niveau des angles inférieurs, à la pression du sol dont la répartition dépend de la rigidité relative entre celle du radier et du sol, et à une charge répartie (cas d'un radier enterré). Ainsi le radier se comporte comme une dalle en flexion. En conclusion, l'analyse de comportement de la structure du pont se ramène à celle d'une dalle en flexion ou en flexion composée.

a) Comportement d'une dalle en flexion

Le calcul élastique d'une dalle chargée transversalement est basé sur la théorie des plaques minces ou épaisses selon que l'on tient compte ou non des déformations dues aux efforts tranchants. Les équations connues qui régissent le comportement d'une dalle ne sont pas abordées. En résumé, les efforts internes et les déformations sont fonction de la déformée du plan moyen de la dalle et de la rigidité à la flexion D définie par : $D = \frac{Et^3}{12(1-K^2)}$

E: module d'young instantanée ou différé du matériau béton.

K: Coefficient de poisson du béton.

t : Epaisseur de la dalle.

Les efforts internes appliqués à une section de la dalle sont :

- deux moments de flexion : longitudinal et transversal .
- un moment de torsion. -
- deux efforts tranchants: longitudinal et transversal.

b) Comportement d'une dalle chargée dans son plan:

Une dalle chargée dans son plan est en état de contraintes planes. Les contraintes résultantes ne créent pas de flexion (pas de risque de flambement) et peuvent être calculées indépendamment de celles de flexion. L'état de contraintes planes est défini par deux déplacements dans le plan de la dalle. Les équations bien connues qui régissent ce comportement ne sont pas abordées. Finalement, une dalle en flexion composée est analysée en utilisant la superposition des résultats de a) et b).

c) Discrétisation de la structure du pont en éléments finis

- Élément plaque en flexion

Les traverses supérieures, les pieds droits et montants, et le radier sont discrétisés en éléments quadrilatères plaques à quatre nœuds. La matrice de rigidité de l'élément en flexion est obtenue en assemblant celles des quatre triangles appuyés sur les côtés du quadrilatère et ayant le même sommet: le centre de gravité du quadrilatère. La matrice de rigidité de l'élément triangulaire est obtenue en considérant trois degrés de liberté en chaque nœud i : la flèche W_i et deux rotations suivent les deux axes de l'élément: Les fonctions de forme considérées assurent la continuité de la déformée et des rotations le long du plan moyen des traverses, des pieds droits ou du radier.

- Élément en état de contraintes planes.

En ce qui concerne les pieds droits et montants, les éléments quadrilatères sont utilisés aussi en contraintes planes et par conséquent, les nœuds des éléments structuraux ont en plus des trois degrés de liberté W_i , O_{xi} , O_{yi} , deux déplacements U_i et V_i dans leurs plans. Les déplacements dans le sens transversal V_i peuvent être bloqués si on considère que les pieds droits et montants se comportent comme des tranches de poteaux verticaux et indépendants. Remarquons que les traverses supérieures, les pieds droits et montants, et le radier ne sont pas situés dans le même plan et par conséquent, les matrices de rigidité des éléments sont calculées dans un repère global de la

structure du pont, avant de procéder à l'assemblage des efforts aux noeuds pour établir l'équilibre. Remarquons aussi, que la formulation en éléments finis ne transforme pas, ni la géométrie de l'ouvrage ni la répartition des charges. En plus aucune restriction sur le biais n'a été considérée. L'ouvrage est considéré dans son fonctionnement réel.

-Elément sol.

Pour tenir compte de l'effet des déformations différentielles du sol sur le comportement du pont, le sol est modélisé par une nappe continue de ressorts dont la rigidité $K(t/m^3)$ est déterminée à partir des essais géotechniques. Cette nappe est représentée par des ressorts équivalents appliqués aux noeuds du radier et dont la rigidité linéaire $K_i (t/m)$ est donnée par $K_i = K S_i$: Si la surface d'influence du noeud i qui dépend de sa position par rapport aux autres noeuds qui lui sont adjacents; Ce modèle permet d'approcher la réaction du sol par une répartition constante par morceau.

3) Détermination des charges extérieures

a) Les charges permanentes:

- Le poids propre du pont:

Il est calculé en fonction de la densité du béton et de la géométrie de l'ouvrage.

- Les poussées des terres:

Elles sont calculées en fonction de la hauteur du remblai mesurée à partir de la côte du plan moyen du radier, de sa densité et des coefficients de poussées limites $K_p = 0.25$ et $K_p = 0.5$.

- Le poids du remblai sur les traverses:

Il est calculé comme une pression transversale appliquée au tablier en fonction de la hauteur, des pentes du remblai et des coefficients de majoration d correspondants à K_p .

soit $K_p = 0,25$, $d = 1,30$; $K_p = 0,5$, $d = 1,40$.

Selon les poussées considérées le poids du remblai est majoré de 30 à 40%.

-Le poids des superstructures

Il est considéré comme une pression uniforme agissante sur le tablier (prise généralement 0.24 t/m^2).

b- Les charges routières

Elles sont définies dans le fascicule 61 titre II.

Les charges considérées sont:

- A(l)
- Bc 30.
- Charges militaires $Mc(120)$ et $Me(120)$.
- Surcharges de remblai (lt/m^2).

Dans le cas où la hauteur du remblai est supérieure à 1m , les charges Bc, Mc et Me sont diffusées longitudinalement à 45% sur le tablier. Les surfaces d'impact des charges et la possibilité de chevauchement des charges diffusées sont prises en compte.

4/ ORGANISATION DU PROGRAMME DE CALCUL EN ELEMENTS FINIS

Le logiciel CADMEF est développé par le CERS dans le cadre d'un projet de recherche proposé par la DRCR au LPEE . Ce logiciel est constitué de trois modules.

a)PCFDAT: module de préparation des données .

- génère les coordonnées des noeuds du pont à partir des "pas" choisis suivant les portées et la largeur . Les pas peuvent être différents pour les différents éléments structurels (traverses, pieds droits, montants et radiers)

- génère la numérotation des noeuds.

- génère les différents éléments finis de flexion ou en état de contraintes planes.

- Calcul automatiquement les pressions appliquées à la structure pour les différents cas de charges.

- génère les pressions appliquées aux éléments finis et leurs effets aux noeuds pour les différentes combinaisons de charges

A ce niveau , un fichier de données cinq.dat est généré.

. Notons que le nombre maximal de portées considérées est 3

b)BAND: Module de réduction de la bande de la matrice de rigidité.

La numérotation imposée par PCFDAT est faite de telle façon à générer facilement les données citées ci-dessus. Cependant , cette numérotation n'est pas optimale et, pour réduire le temps de calcul et pour pouvoir soulager la mémoire centrale en vue de traiter des problèmes de grandes tailles, ce logiciel permet de rénuméroter les noeuds et transformer le fichier CINQ.DAT en fichier optimal CINQR.DAT.

c) PCFB EF:

Ce module est le "cœur" du logiciel CADMEF. Il calcule pour chaque cas de charge (y compris les combinaisons considérées):

- La déformée de l'ouvrage,
- Les efforts par unité de longueur aux centres de tous les éléments: moments fléchissants, moments de torsion, efforts tranchants.
- Les moments principaux aux centres de tous les éléments.
- Les efforts normaux aux centres de tous les éléments des pieds droits et des montants.
- Les moments principaux maxima et minima correspondants au cas de charge la plus défavorable. Ces résultats sont données en fonction de l'ancienne numérotation.

d)PCFBEN: Module de tracé de l'enveloppe des moments
(en cours de développement).

5/ VALIDATION DES RESULTATS DU LOGICIEL

Cas d'un pont cadre fermé droit

- Géométrie: voir Fig(1)
- Matériaux:

Béton : . densité $K_b = 2.5 \text{ t/m}^3$.

. contrainte de compression admissible du béton 135 kg/m^2

. modules d'young : $E_i = 1138500 \text{ t/m}^2$

$E_d = 379500 \text{ t/m}^2$.

.coefficient de poisson $K_b = 0.15$

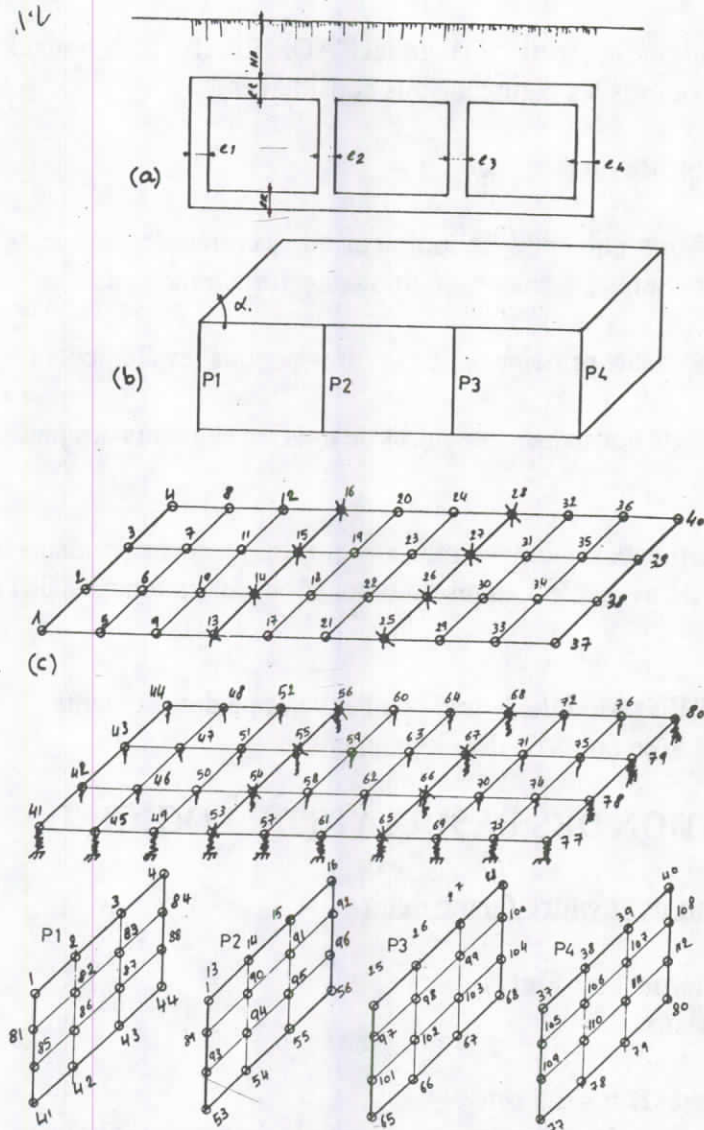


Fig. 1 : a) profil en long d'un pont cadre triple.
 b) Trace des plans moyens de l'ouvrage.
 c) Discrétisation en éléments finis : Tablier, radier, pieds droits et montants

Remblai: densité = 1.8 t/m^3

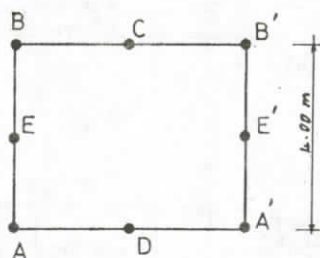
Sol : puisqu'on ne dispose pas des caractéristiques géotechniques du sol de fondation pour l'exemple considéré, la rigidité du sol est prise de telle façon que la pression maximale au sol est celle donnée par le dossier CAD :
 $P_{ax} = 10.92 \text{ t/m}^2$

Discretisation en éléments finis:

La discretisation du pont en éléments finis est présentée sur la Fig.(2)

Présentation des résultats :

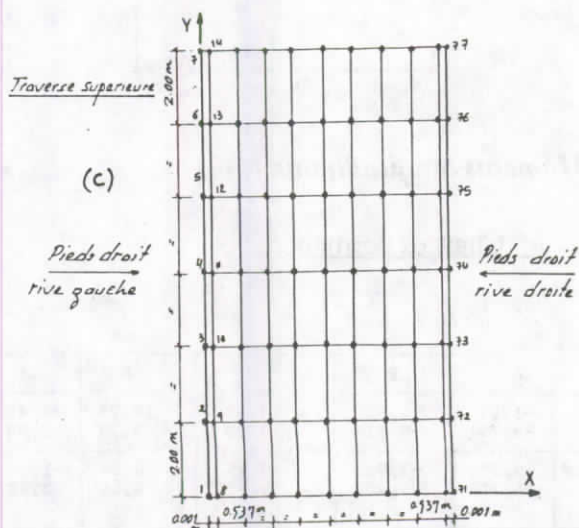
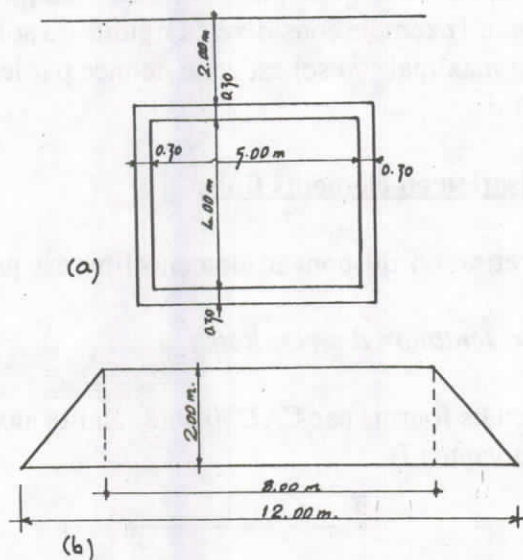
Les résultats fournis par CAD90 sont relatifs aux sections indiquées sur la figure suivante : B



- Moments longitudinaux (t.m)

* Charges permanentes.

	A	B	C	D	E
CAD90	-8,03 -9,75	-7,91 -9,51	10,41 10,03	10,29 9,79	-1,49 -3,90
CADMEF	-9,28 -11,21	-7,71 -9,40	10,25 9,68	10,57 10,06	-1,16 -3,92



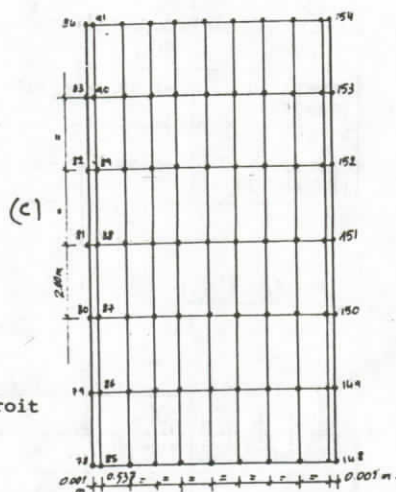
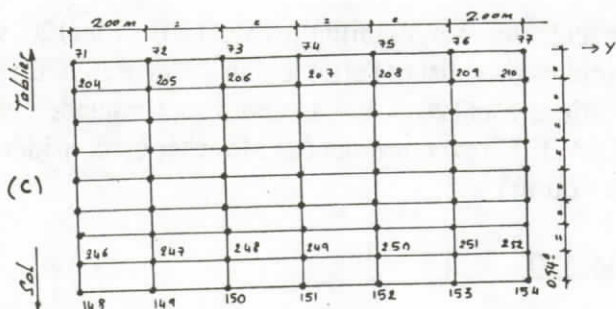
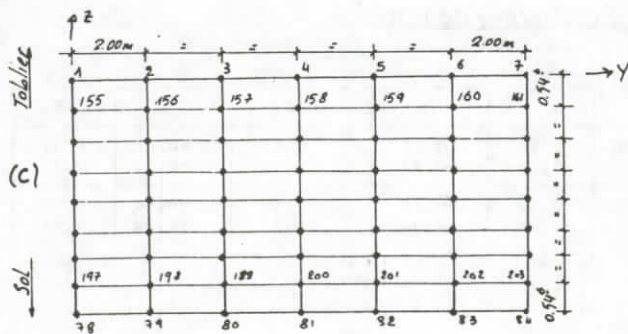


Fig. 2 :
 a) profil en long : cadre simple droit
 b) profil en travers
 c) discrétisation éléments finis.

* Surcharges de remblai.

T12

	A	B	C	D	E
CAD90	-0,16 -0,33	-0,16 -0,33	0,16 -0,33	-0,16 -0,33	0,39 0,77
CADMEF	-0,19 -0,38	-0,18 -0,36	-0,18 -0,35	-0,16 -0,32	0,29 0,59

* Charges militaires

On rappelle que seules les charges militaires Mc(120) et Me(120) sont considérées par CAD90, car elles produisent l'effet le plus défavorable. En ce qui concerne ce cas d'application, Mc(120). Les charges sont considérées centrées pour CAD90 et CADMEF. Un excentrement de Mc et Me est considéré par CADMEF (située à 1m du trottoir).

* Mc120

	A	B	C	D	E
CAD90	-4,21	-4,21	7,21	7,21	-4,21
CADMER (CENTRE)	-1,59	-2,84	3,62	2,30	-1,78
CADMEF (EXCENTREE)	-1,66	-2,85	3,65	2,35	-1,83

* Me (120)

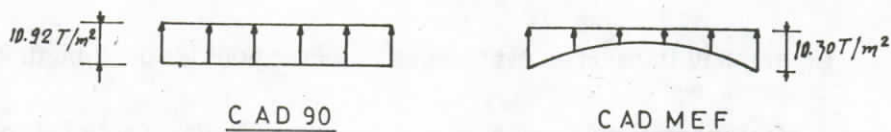
	A	B	C	D	E
CAD90	*	*	*	*	*
CADMER (CENTRE)	-1,97	-4,06	4,84	2,42	-2,15
CADMEF (EXCENTREE)	-2,05	-4,08	4,88	2,47	-2,19

-Moment transversal

Le moment maximal transversal considéré par le CAD90 est celui au milieu de la traverse supérieure et qui est utilisé pour dimensionner les étriers de tout le pont.

	CHARGE DERM	MC120	ME120	COMBINAISON DEFAVORABLE
CAD90	* *	* *	* *	3,68 1,44
CADMEF	1,51 1,42	1,45 1,45	2,04 2,04	3,55 1.42

- Répartition de la pression maximale du sol



La répartition des moments fléchissants principaux est présentée sur les Figs: 3, 4, 5, 6, 7, 8.

CONCLUSIONS:

En ce qui concerne ce cas limite (pas de biais) on constate que :

- Pour les charges permanentes, les moments longitudinaux sont comparables, à part ceux des angles inférieurs.
- Pour les surcharges de remblai , les moments longitudinaux sont comparables.
- Pour les charges Mc120, les moments longitudinaux sont plus faibles que ceux du CAD90.
- En utilisant le calcul en éléments finis les charges ME(120) sont les plus défavorables mais induisent des moments longitudinaux plus faibles que ceux du CAD90. En plus, centrer la charge n'induit pas l'effet le plus défavorable.
- Le moment transversal est presque le même pour les deux méthodes.
- L'effort normal maximal appliqué aux pieds droits est sous estimé par le CAD90.
- La répartition de la pression du sol n'est pas uniforme ou trapézoïdale comme prévue par le CAD90, ce qui correspond à la participation de l'effet d'interaction sols - structures.

D'autres études de cas, sont en cours pour dégager des conclusions pertinentes, néanmoins le phénomène d'interaction sol-structure qui se produit au niveau de l'interface radier-sol affectent beaucoup les résultats surtout que ces ouvrages sont conçus sur des sols de qualité médiocre.

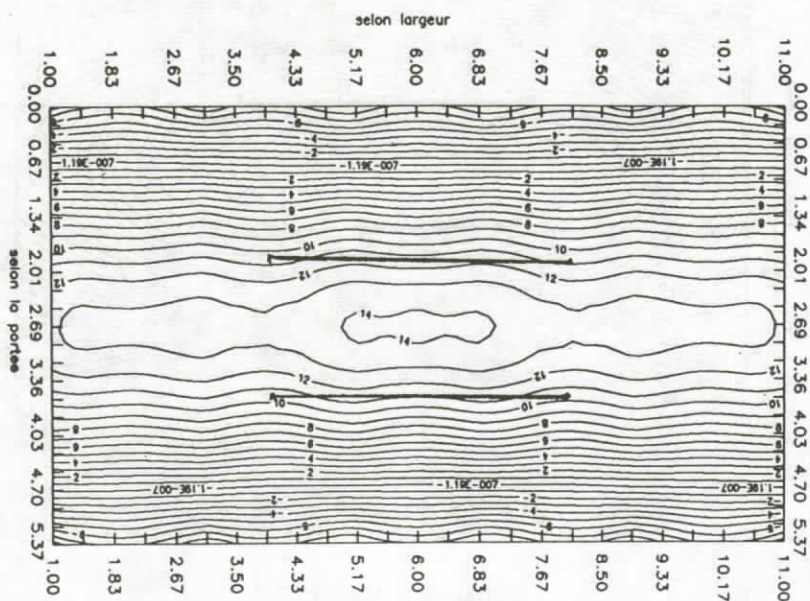


Fig.3: Tablier (0.25) : CP + SR + ME^(4.2)
moment longitudinal

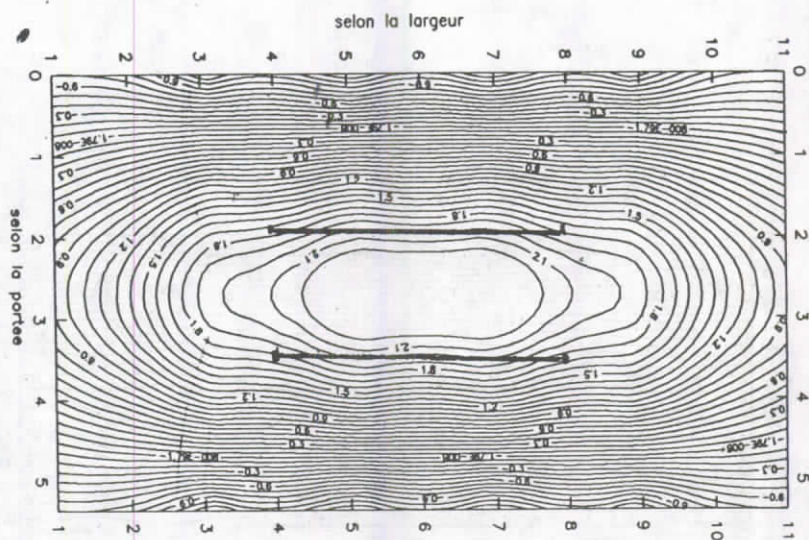


Fig. 4: Tablier (0.25) : CP + ME + SR (M_{12})

moment transversal

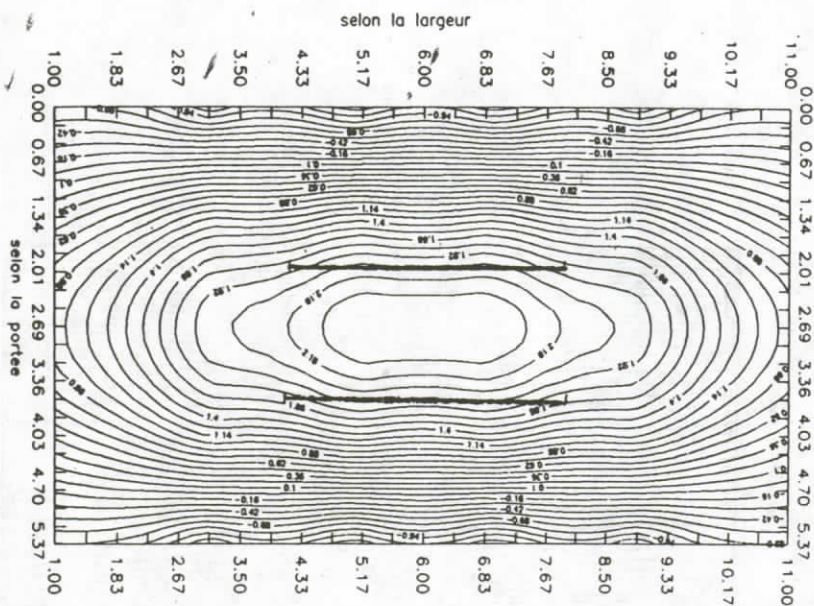


Fig. 6; Tablier (0.25) : CP + ME
moment transversal

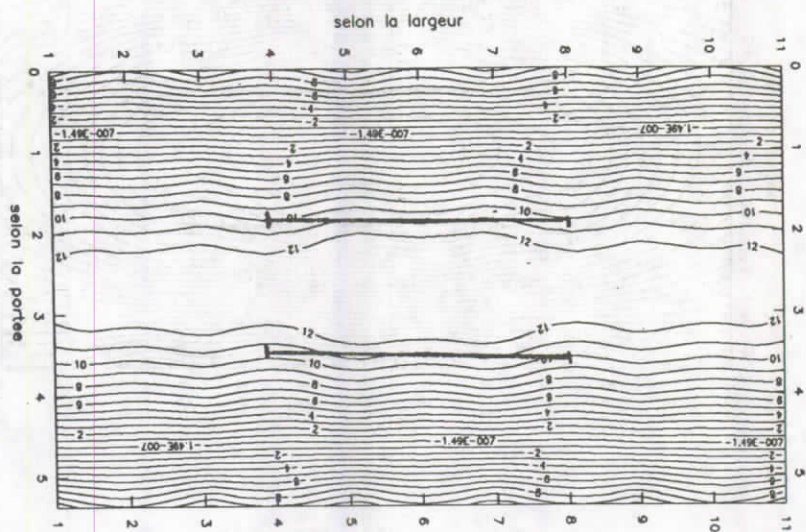


Fig. 71 Tablier (0.5) : CP + ME
moment transversal

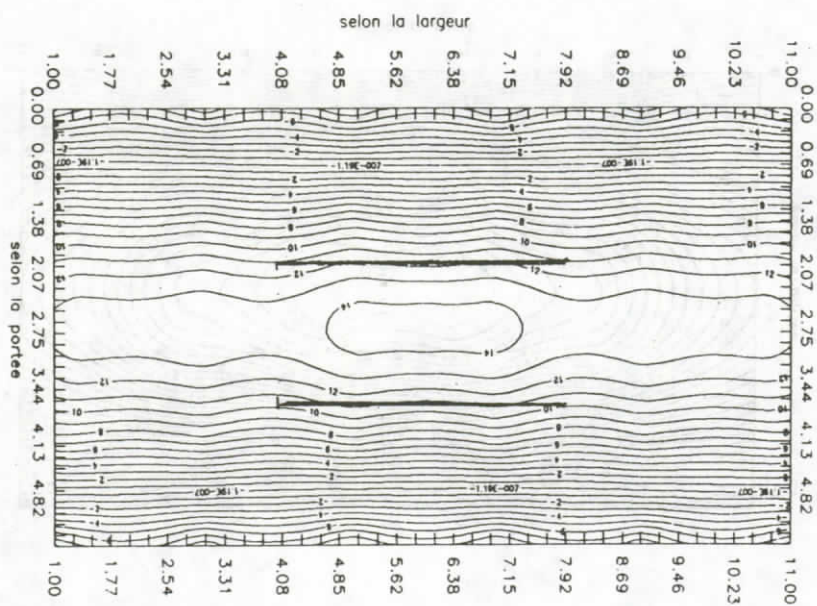


Fig. 5: Tablier (0.25) : PC+ ME
moment longitudinal

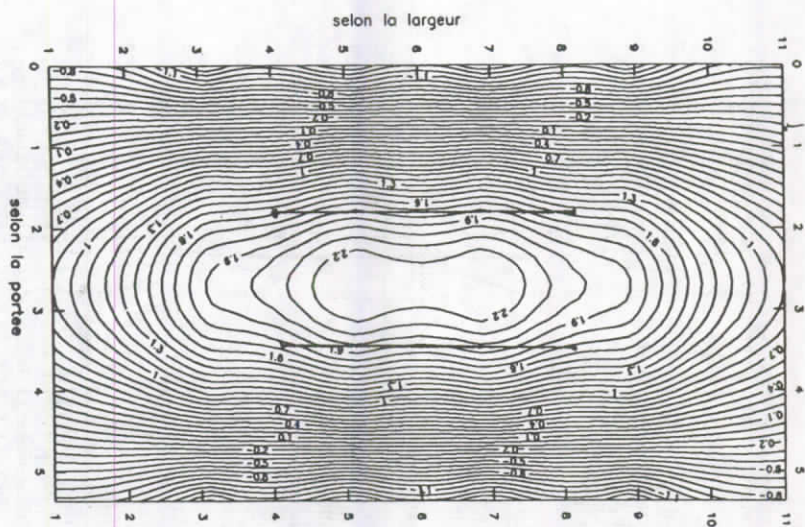


Fig.8: Tablier (0.5) : CP + ME
moment transversal