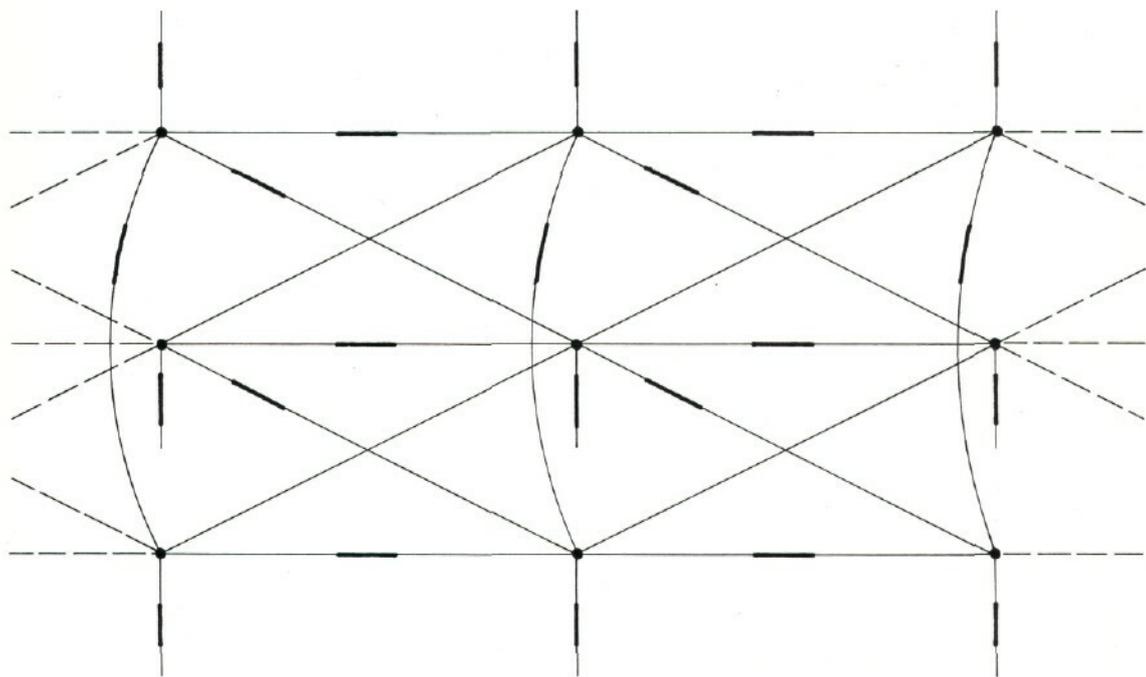


calcul de structure par la méthode analogique

SETRA
DIVISION DES
OUVRAGES D'ART-B

MAN 77



MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT

Direction des routes et de la circulation routière

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT

SERVICE D'**É**TUDES **T**ECHNIQUES DES **R**OUTES ET **A**UTOROUTES

DIVISIONS DES **O**UVRAGES D'**A**RT **B**

CENTRE DE CALCUL

46, AVENUE ARISTIDE BRIAND - 92223 BAGNEUX - TÉLÉPHONE 655 - 42 42

MAN 77

CALCUL DE LA STRUCTURE PAR LA MÉTHODE ANALOGIQUE

Cette brochure a été rédigée par Mr. NGUYEN Vanke, Centre de Calcul, DOA. B, qui en est également le gestionnaire.

Mai 1977

Table des matières

	Pages
1 - INTRODUCTION.	2
2 - LA METHODE DE CALCUL ANALOGIQUE.	3
2.1 - Principe de la méthode.	3
2.2 - Application de la méthode.	3
2.3 - Réalisation pratique de la méthode.	4
2.4 - Limites d'application pratique en calcul de structures de la méthode à l'heure actuelle.	4
2.4.1 - Eléments ayant actuellement fait l'objet d'une représentation analogique.	5
2.4.2 - Associations de divers éléments centre eux.	6
2.4.3 - Sollicitations statiques.	6
2.4.4 - Sollicitations dynamiques.	7
2.4.5 - Résultats.	7
2.4.6 - Vérifications.	8
3 - EXEMPLE DU PONT EN Y.	9
3.1 - Description de l'ouvrage.	9
3.2 - Tableaux de résultats. Comparaison avec la méthode des éléments finis.	10
4 - PROBLEMES DE PRECISION.	13
5 - UTILISATION PRATIQUE.	14
6 - CONCLUSIONS.	15
Adresses utiles.	16
Référence.	17
FIGURES	18 - 23

CALCUL DE STRUCTURE PAR LA METHODE ANALOGIQUE

I - INTRODUCTION -

Il s'agit d'une méthode de calcul analogique basé sur un réseau électrique mise en oeuvre au bureau d'études LAMBOLEY (Compagnie Générale de Calcul) à Lyon, à la suite d'une recherche fondamentale effectuée par le professeur Alais (Université Paris VI) : références 2 et 3.

Cette méthode est destinée essentiellement à l'application au calcul de structure et d'une manière générale au calcul du génie civil.

Dans cet exposé, après avoir évoqué succinctement le principe de la méthode et signalé globalement le domaine d'application ainsi que les réalisations pratiques de la méthode, nous présentons, à titre d'exemple, l'application de cette méthode au calcul d'une structure particulière : un pont en Y. A titre indicatif, les résultats fournis par la méthode analogique sont ensuite comparés avec ceux fournis par la méthode des éléments finis.

Signalons, pour mémoire, d'autres méthodes d'analogie électrique, particulièrement celle mise en oeuvre à la C.I.S.I (Compagnie Internationale de Services en Informatique). Cette méthode est en fait celle qui existait originellement au C.E.A. (Commissariat à l'Energie Atomique) dont l'application était orientée principalement vers les problèmes des réacteurs nucléaires.

Tandis que la méthode analogique LAMBOLEY est spécialisée dans le calcul de structure, la méthode de calcul de la C.I.S.I. est orientée plutôt vers les problèmes physiques généraux tels que la simulation, le contrôle, etc...

Le principe de la méthode de la C.I.S.I consiste à résoudre les équations différentielles ordinaires (équations différentielles à une variable indépendante) à l'aide de l'intégrateur analogique habituel. Or, le plus souvent, les systèmes physiques sont réglés par des équations aux dérivées partielles sur lesquelles une transformation est donc nécessaire.

Pour se ramener aux équations différentielles ordinaires, on transforme les équations aux dérivées partielles de n variables : par exemple, pour fixer les idées, au moyen de la méthode aux différences finies sur chacune de $n-1$ variables. On obtient ainsi un système d'équations différentielles ordinaires par rapport à la dernière variable choisie comme la variable d'intégration analogique.

Il faut préciser que la C.I.S.I. n'a pas l'habitude de traiter, au moyen du calcul analogique, des calculs de structure et qu'en conséquence la transformation d'équations aux dérivées partielles de l'élasticité en équations différentielles ordinaires doit être faite par l'utilisateur.

D'autre part, tous les calculateurs analogiques dont il a été question précédemment sont associés à un ordinateur pour constituer une machine hybride dont le but est de rendre l'utilisation du calculateur analogique plus souple à l'aide de la mémoire et de la logique de l'ordinateur.

2 - LA METHODE DE CALCUL ANALOGIQUE -

2.1. - Principe de la méthode.

Le principe de cette analogie connu depuis longtemps est basé sur la loi d'OHM et se fait à l'aide des résistances. Cependant, les analogies utilisant des résistances sont limitées par la réalisation pratique difficile et onéreuse des résistances négatives.

L'analogie proposée ici fait usage de composants purement réactifs (1) (inductances et capacités) se comportant comme des résistances positives ou négatives au déphasage de $\pi/2$ des tensions par rapport aux intensités.

Il est donc possible de réaliser un réseau purement réactif analogue de n'importe quel système linéaire et en particulier de n'importe quelle structure élastique en déformation statique ou en vibration harmonique.

Le principe de la méthode est donc assez général. Théoriquement, il permet donc de résoudre tous les problèmes linéaires.

2.2. - Application de la méthode.

Sans entrer dans les détails de l'exposé scientifique dont la référence 1 signalée dans la bibliographie constitue un document théorique assez détaillé et complet, nous indiquons quelques domaines d'application de la méthode.

- * La méthode s'applique à tous les systèmes physiques obéissant à des lois linéaires. En particulier, en calcul de structure, un milieu continu élastique est dit linéaire si les lois de comportement (relations entre les tenseurs de contrainte et de déformation) sont linéaires et si les déplacements restent petits (en particulier ils peuvent être négligés dans le calcul des sollicitations).
- * En particulier, en génie civil, la méthode s'applique couramment au comportement statique et dynamique des structures mécaniques. Eventuellement, cette méthode peut traiter certaines structures dont certains points entrent dans le domaine plastique (problème des rotules plastiques).

(1) L'introduction de composants purement réactifs est l'essentiel de la contribution propre apportée au calcul analogique par le professeur Alais, l'application commerciale étant effectuée par la Compagnie Générale de Calcul dirigée par M.Lamboley.

- * Dans le cas de structures à comportement non linéaire, des modèles "différentiels" peuvent rendre compte en quelques itérations du comportement des ouvrages (référence 1, page 100, chapitre II.4), il s'agit en quelque sorte d'une généralisation de la méthode de Newton de résolution d'une équation à une seule variable.

Elle peut traiter aussi certaines structures menacées d'instabilité élastique. Ce dernier problème est matérialisé par des moments dus à l'excentrement des compressions et il existe une correspondance entre une instabilité mécanique et une instabilité électrique.

2.3. - Réalisation pratique de la méthode.

En ce qui concerne la réalisation pratique de la méthode, vu le nombre important des résultats obtenus, il est nécessaire de coupler un ordinateur aux réseaux du calcul analogique. Cet ordinateur effectue et traite tous les calculs matériels indispensables.

L'ensemble ordinateur-réseaux électriques analogiques constitue donc un calculateur hybride original capable de résoudre un grand nombre de problèmes. Certains de ces problèmes sont assez particuliers et n'ont pas trouvé jusqu'à présent de solution pratique.

Dans une étude d'un problème quelconque par la méthode, les opérations se déroulent ainsi :

- * Analyse du phénomène et choix de sa représentation.
- * Calcul automatique des composants électriques destinés à cette représentation.
- * Ajustage des composants sur un appareil de mesure spécial, et ceci au millième de l'unité de base.
- * Affichage des composants sur un réseau pré-câblé.
- * Lecture automatique par ordinateur des composants réellement affichés.
- * Epreuves de fonctionnement : on impose à la structure des déplacements correspondant à tous ses degrés de liberté et l'on vérifie que tous les éléments se déplacent correctement. On soumet la structure à des chargements tests, etc...
- * Affichage des charges.
- * Les résultats en chaque point (efforts et déformations) sont livrés sur table traçante.

2.4. - Limites d'application pratique en calcul de structure de la méthode à l'heure actuelle.

2.4.1. - Eléments ayant actuellement fait l'objet d'une représentation analogique.

Nous signalons ci-après à titre indicatif la liste des éléments ayant actuellement fait l'objet d'une représentation analogique. Il est entendu que cette liste des éléments est évolutive et enrichie avec le temps.

* Poutres droites à plan moyen.

- Géométrie : âmes pleines ou non, caissons, inertie variable de façon quelconque.

- Caractéristiques mécaniques : prise en compte des raideurs de flexion, torsion, compression et cisaillement si besoin est.

- Représentation globale ou par éléments discrets.

* Poutres courbes chargées perpendiculairement à leur plan.

- Géométrie : inertie et courbure variable de façon quelconque.

- Caractéristiques mécaniques : les mêmes que pour les poutres droites.

- Représentation par éléments discrets.

La méthode peut tenir compte de la différence des positions du centre de torsion et du centre de gravité.

* Plaques.

- Représentation discrète de plaques de formes quelconques, d'épaisseur variable, de coefficient de Poisson quelconque, selon la théorie classique où les cisaillements d'effort tranchant sont négligés (on peut cependant les introduire éventuellement).

* Appuis et liaisons.

- Géométrie quelconque : appuis ponctuels éparpillés, appuis continus.

- Caractéristiques mécaniques quelconques : liaisons simples, encastrement sous diverses sollicitations, liaisons élastiques.

* Fondations.

- Ces appuis particuliers peuvent être introduits de façon rigide ou élastique. La représentation analogique permet par itération rapide d'éliminer les réactions négatives du sol, donc de déterminer la véritable surface d'appuis et les réactions correctes.

2.4.2. - Associations de divers éléments entre eux.

Les associations peuvent s'effectuer de façon quelconque.

* Poutres entre elles : réseaux de poutres, poutres et poteaux, ossatures à trois dimensions. Les angles de liaison sont quelconques.

* Dalles entre elles : poutres caissons et dalles associées, galeries, cadres, profils en U.

* Dalles et poutres : poutres caissons représentées globalement en section avec dalles associées, dalles associées à des réseaux de poutres et entretoises. Les angles de liaison entre la dalle et la poutre sont quelconques.

Deux exemples de liaison ont été effectués à l'aide de cette méthode :

- Ponts à haubans, composés de poteaux, de suspentes inclinées et d'un tablier travaillant en flexion et compression.

- Ouvrages construits par phases multiples. L'analogie permet une représentation des dénivellations artificielles d'appuis, de la suppression de palées provisoires, du clavage de poutres en encorbellement. Dans ce dernier cas, une représentation des déformations avec fluage est possible au fur et à mesure de la construction et après liaison au cours de la vie de l'ouvrage.

Il faut cependant préciser que, compte tenu de la méconnaissance des lois exactes de fluage, une prise en compte forfaitaire des redistributions d'efforts internes due à ce phénomène est, en général, suffisante ; la circulaire du 2 Avril 1975 de Monsieur le Directeur des Routes et de la Circulation Routière fournit une telle règle forfaitaire pour les ponts construits par encorbellement.

2.4.3. - Sollicitations statiques.

On peut simuler des cas de charges complets ou déterminer des lignes et des surfaces d'influence.

Les sollicitations telles que forces, couples, effet de câblage de précontrainte avec variation de tension le long des câbles, dilatations dues au retrait ou à la température peuvent être simulées.

Les plaques peuvent être sollicitées en élasticité plane, les déformations planes d'un solide à trois dimensions peuvent également être représentées.

2.4.4. - Sollicitations dynamiques.

Elles peuvent être envisagées ainsi que le calcul des oscillations forcées correspondantes (référence 1, chapitre VII.2, page 132).

2.4.5. - Résultats.

Les résultats fournis sont assez clairs et suffisamment explicites.

Pour le cas des poutres, les courbes d'efforts et de déformations correspondant à chaque cas de charge *, les courbes enveloppes sont données sous forme de dessins graphiques automatiques.

Pour le cas des dalles, le dessin graphique automatique fournit le plan de la dalle et donne aux frontières des éléments discrets les flèches et moments de flexion, au centre de ces éléments les moments de torsion. De même les lignes d'influence, les lignes enveloppes des efforts et des contraintes peuvent être dessinées. Actuellement, l'automatisation du calcul des surfaces d'influence n'est pas possible. Cette automatisation constitue néanmoins l'un des objectifs du développement futur de la Compagnie Générale de Calcul. Signalons que les effets de A (l), Bc, etc... sont pris en compte dans ces traitements des lignes d'influence.

Pour la précontrainte, la Compagnie Générale de Calcul propose de la représenter par les moments d'extrémité et des forces verticales ; si l'on calculait seulement ces dernières par la formule F/r , on risquerait de commettre des erreurs non négligeables, du fait que la force de précontrainte varie d'une section à une autre, que le rayon peut varier et qu'un élément discret n'est pas infinitésimal ; la méthode utilisée a pour base théorique l'obtention de valeurs correctes du moment isostatique F_e dans les différentes sections de discrétisations. Les valeurs des forces verticales F_i sont donc :

$$F_i = \frac{(F_p e)_{i+1} - (F_p e)_i}{x_{i+1} - x_i} - \sum_{j=1}^{i-1} F_j$$

F_p Force due à la précontrainte

e excentricité de cette force

Dans les cas courants (câblage d'une structure analogue à une poutre-dalle continue), l'erreur commise en calculant les forces verticales représentant la précontrainte par la formule F/r serait comprise entre 1 % et 10 %.

Avec les améliorations apportées par l'utilisation des formules écrites ci-dessus, la précision est bien meilleure d'après les tests que nous avons effectués (de l'ordre du pourcent.).

.../...

* Il s'agit de cas de charge choisis par l'utilisateur : par exemple charge permanente, gradient thermique.

2.4.6. - Vérifications.

En ce qui concerne les opérations préliminaires, le principe même de la méthode permet de la considérer comme un moyen relativement sûr. En effet, prenons par exemple les déplacements des points d'une structure. Si cette dernière est non équilibrée, les déplacements de ses points deviennent insaisissables et les lectures électriques sont par conséquent impossibles.

La méthode détecte également les structures mal conçues. Un système mécanique aberrant correspondant à un système électrique également aberrant.

D'autre part, pour vérifier les positions géométriques des mailles d'une dalle, il suffit de "basculer" électriquement la structure. Cette opération consiste à brancher par exemple deux potentiels différents aux deux extrémités de la structure formant la direction à mesurer. L'abscisse de chaque maille dans la direction considérée est ainsi déterminée par le potentiel mesuré. On répète l'opération pour une autre direction perpendiculaire à la précédente, les coordonnées de chaque maille sont donc déterminées électriquement et vérifiées par comparaison avec les données.

Ces diverses vérifications sont assurées par les soins de la Compagnie Générale de Calcul elle-même ; le client n'a pas à s'occuper des opérations de mise en place des éléments analogiques ni des vérifications précédemment décrites. D'ailleurs, le client n'est généralement pas en mesure de faire (ni de faire faire) des interventions manuelles directes dans le déroulement d'une étude. Il peut par contre exiger de la Compagnie Générale de Calcul qu'elle lui fournisse un document écrit indiquant quelles vérifications ont été effectuées.

En ce qui concerne les résultats finaux, le principe de la méthode exclut la possibilité d'une vérification directe *. La vérification par calculs parallèles est évidemment toujours possible, mais son emploi risque de n'être possible que de façon globale (ce qui est une restriction pratique très importante) dans la mesure où il ne peut être produit suffisamment de résultats intermédiaires. Il reste donc essentiellement une possibilité de vérification par sondages et recoupements, consistant par exemple à s'assurer de l'équilibre d'une partie de l'ouvrage; un exemple en est fourni en annexe (figure 6) **.

Il est à noter que cette méthode s'apparente à la méthode des différences finies. Ainsi dans le cas d'une plaque, toutes les valeurs des composantes de flexion M_x , M_{xy} , M_y ainsi que les réactions d'appui sont calculées à partir des seules valeurs, en différents points, des flèches et des rotations autour des axes ox et oy . Un recoupement tel que celui qui est fourni en annexe peut ne pas permettre de déceler une erreur sur une valeur de la flèche ou de rotation en un point de la dalle, erreur qui serait due au mauvais fonctionnement d'un

../..

* Voir document type VEE 77.

** Dans cet exemple, une valeur moyenne du moment a été prise en compte, parce que les différentes valeurs individuelles sont voisines; si ce n'était pas le cas, il y aurait lieu de procéder à une intégration numérique (méthode des trapèzes ou de Simpson).

appareil de mesure : ce serait le cas si la section suivant laquelle on a effectué une coupure et vérifié l'équilibre est proche d'un appui ; en effet la réaction d'appui et les moments dans la section considérée seraient calculés à partir de la même valeur erronée. Par contre, il permet toujours de déceler :

- une insuffisance dans la finesse du maillage retenu,
- une erreur dans la construction du modèle électrique tel qu'il ne représente pas les propriétés géométriques et mécaniques de la structure.

Dans tous les cas, il convient d'examiner si la consistance des calculs qui ont été effectués est suffisante (exemple liste des cas de charge).

3 - EXEMPLE DU PONT EN Y -

3.1. - Description de l'ouvrage.

Il s'agit d'un pont-dalle en Y d'épaisseur constante en béton précontraint dont les caractéristiques sont indiquées dans le croquis ci-après (figure 1).

Caractéristiques géométriques :

Distance AB = 25 mètres

Les dimensions de chaque branche du pont sont détaillées sur la figure 1.

Epaisseur (ou hauteur) de la dalle = 1 mètre

Angle = 10 degrés.

Caractéristiques du matériau :

Module d'Young : $E = 4.238 \times 10^6$ t/m²

Coefficient de Poisson = 0

Densité du béton = 2.50 t/m³

Conditions d'appui :

Le pont se repose aux extrémités des trois branches sur des appuis rigides à la torsion.

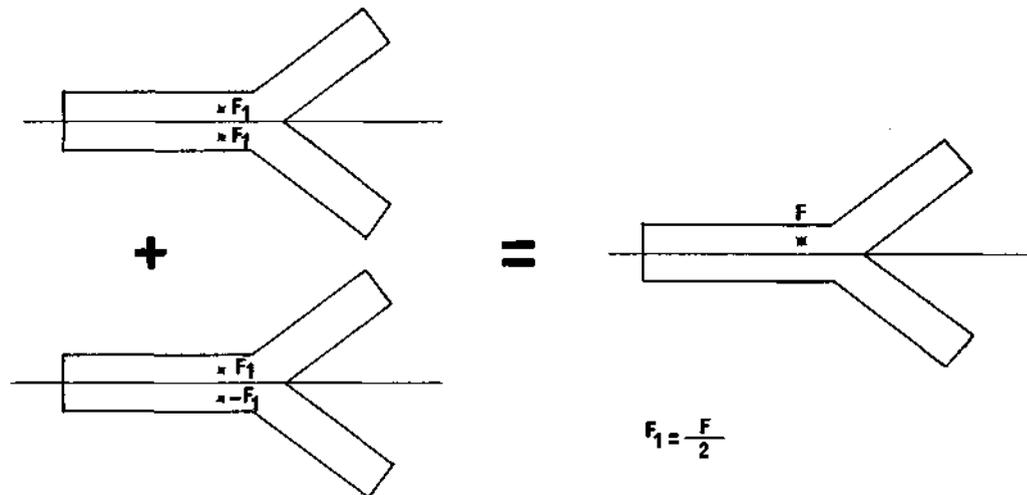
Cas de charge envisagés :

1er cas de charge : charge uniforme de densité 1 tonne/m² couvrant la totalité de la structure.

2e cas de charge : charge unité verticale concentrée appliquée au point P (voir figure 1).

NOTA - Dans le premier cas de charge, le système est symétrique, l'étude peut se ramener à la moitié de la structure. Tandis que dans le deuxième cas de charge, le système n'est plus symétrique, il faut donc étudier la totalité de la structure.

Toutefois dans ce dernier cas, moyennant d'un artifice sur la symétrie et l'antisymétrie de charge, on peut se ramener à l'étude de la moitié de la structure. Les schémas ci-après détaillent assez bien cet artifice :



Calculs demandés :

Pour chaque cas de charge, nous demandons les calculs de :

- la déformée verticale de la dalle.
- le moment fléchissant longitudinal.
- le moment fléchissant transversal.
- le moment de torsion.

3.2. - Tableaux de résultats - Comparaison avec la méthode des éléments finis.

../..

1er Tableau de comparaison des résultats.

Valeurs des quantités M_y * - Cas de charge uniformément répartie

Points d'étude	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7
Eléments finis	22.11	59.57	86.22	82.13	71.66	49.74	29.27
Calcul analogique	23.53	63.66	90.21	79.05	65.77	45.80	27.30

* Nous avons repris ici la notation de la Compagnie Générale de Calcul. M_y est le moment fléchissant d'axe parallèle à Oy qui s'exerce sur une facette perpendiculaire à Ox .

.../...

2e Tableau de comparaisons des résultats.

Valeurs des quantités M_y^* - Cas de charge ponctuelle.

Points d'étude	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7
Eléments finis	0.11	0.33	0.56	0.55	0.48	0.20	0.10
Calcul analogique	0.11	0.34	0.55	0.57	0.47	0.19	0.12

Dans l'ensemble, les résultats concordent d'une manière assez satisfaisante, avec une différence de l'ordre de quelques pour-cent.

Un maillage plus serré et une modélisation plus fine permettent d'améliorer les résultats.

Nous trouvons dans les figures 3 et 4 les exemples des résultats fournis par la méthode de calcul analogique.

La figure 5 indique les emplacements des points d'étude M_i ($i = 1, \dots, 7$).

NOTA - Les résultats numériques du calcul analogique figurés dans le dernier tableau (cas de charge ponctuelle) sont les seuls significatifs et bien représentatifs de la méthode analogique. Car ce sont les résultats sûrs après une vérification attentive et soigneuse du modèle de montage tant au point de vue géométrique que mécanique. Par contre, les résultats du calcul analogique du premier tableau (cas de charge uniformément répartie) sont représentés à titre indicatif et doivent être consultés avec réserve. Car ces résultats ont été obtenus au moyen de corrections sur des résultats initiaux bruts qui ont été fournis avec des erreurs sur les positions exactes des mailles. Il faut retenir que cette erreur est due à la manipulation humaine et ne conduit nullement à mettre en cause la méthode analogique elle-même. (Cet exemple avait été traité par du personnel en cours de formation).

* Voir nota page précédente.

4 - PROBLEMES DE PRECISION -

La Compagnie Générale de Calcul n'a pu nous assurer du degré de précision fourni par la méthode analogique. Elle nous a cependant indiqué que la précision obtenue devait être de l'ordre de quelque pour-cent à condition que l'on respecte certaines règles relatives à la finesse du maillage.

Dans le cas de pont-dalle, ces règles sont :

- 5 mailles transversalement au minimum
- 8 mailles par portée au minimum
- rapport de la longueur à la largeur d'une maille limité à 2.

De plus, il est préférable pour obtenir une bonne précision, de ne pas trop fractionner les cas de charge ; en particulier pour un ouvrage en béton précontraint, il y a lieu de grouper en un seul cas la précontrainte et les charges permanentes ; il faudra bien entendu rajouter le terme F/B (contrainte moyenne de compression).

Si l'on dispose de résultats d'un calcul relatifs à un ouvrage plus complexe effectués avec un découpage donné, on peut seulement affirmer que si entre deux mailles contigües les directions des moments principaux varient peu et s'il en est de même des valeurs relatives de leurs intensités (d'une manière plus approximative, on peut s'en rendre compte en vérifiant que d'une maille à sa voisine la variation des composantes du tenseur de flexion M_x , M_y , M_{xy} , est faible, quelques pour-cent, devant la valeur moyenne de ces trois quantités) la précision est bonne.

En l'absence de règle générale (comme pour d'autres méthodes d'ailleurs et vu les relations qui existent entre le nombre des mailles (et le nombre des cas de charge) d'une part, le coût du calcul d'autre part, il est clair que l'on ne peut :

- discuter de la précision de la méthode en soi, mais seulement de la précision de la méthode compte tenu du maillage et du nombre de cas de charge retenus,

- comparer les coûts de cette méthode avec d'autres méthodes en soi, mais seulement compte tenu de ces mêmes paramètres et de la consistance et de la convenance des résultats fournis (ou susceptibles d'être fournis).

Lorsqu'on commandera un calcul par cette méthode, on pourra discuter utilement avec la Compagnie Générale de Calcul les choix à effectuer, et ceux-ci devront être spécifiés dans le devis et la commande.

Lorsqu'on recevra d'une entreprise ou d'un B.E.T. un note de calcul établie par cette méthode, on devra, en un stade préliminaire, porter son attention sur le choix du maillage et des cas de charge.

Dans l'un et l'autre cas, on pourra aussi consulter utilement le gestionnaire du présent document.

5 - UTILISATION PRATIQUE -

L'utilisation pratique de la méthode analogique LAMBOLEY est largement facilitée par les sorties graphiques claires et complètes des résultats bien définis par la légende (voir les exemples de sorties sur les figures 3 et 4 en pages 16 et 17). L'exploitation des résultats ne présente donc aucune difficulté.

Il est à noter que le client de la Compagnie Générale de Calcul a la possibilité de modifier les hypothèses en cours d'étude, ce qui revient à modifier l'étude entreprise d'après les premiers résultats obtenus ; par exemple si l'on étudie une structure comportant des poutres et une dalle, le client peut modifier les caractéristiques mécaniques de la poutre d'après les premiers résultats obtenus.

Si on désire reprendre une étude au bout d'un certain temps plus ou moins long, plus tard, pour effectuer un calcul supplémentaire, les gains sur le délai et sur le prix par rapport à la première étude sont toujours appréciables. Toutefois, les gains sont moins importants que dans le cas des calculateurs numériques. Car dans le cas du calculateur analogique, les travaux de mise en oeuvre ne sont pas tous automatiques.

Enfin, en ce qui concerne le coût du calcul, qui évolue naturellement avec le temps, une estimation globale, au moment de la parution de ce document est comme suit (hors taxes) :

- 50 francs par maille (coût d'établissement du modèle)
- 8 francs par cas de charge (coût de lecture des résultats) et par maille pour des ouvrages courants (tels qu'une dalle de forme quelconque).

On remarquera la linéarité du coût en fonction du nombre de mailles, ce qui n'est pas le cas pour d'autres méthodes (éléments finis, programmes de réseaux de poutres) dont le logiciel comporte la résolution d'un système d'équations linéaires : sans être proportionnel au carré du nombre d'équations, comme ce serait le cas si la matrice des inconnues était pleine, le coût d'un tel calcul effectué sur ordinateur croît plus vite que le nombre d'inconnues (en fait le coût dépend également de la largeur de bande de cette matrice).

Ainsi pour un ouvrage donné, on peut donc à priori estimer le coût approximatif du calcul, compte tenu des règles données ci-dessus en 4. Ainsi le coût du calcul qui fait l'objet du § 3 ci-dessus s'établirait comme suit : (coût hors taxes)

Nombre de mailles : 90

Coût d'établissement du modèle :

$$50,00 \text{ frs} \times 90 = 4.500,00 \text{ frs}$$

Coût par cas de charge :

+ Cas de charge uniformément répartie

$$8,00 \text{ frs} \times 90 = 720,00 \text{ frs}$$

+ Cas de charge ponctuelle non symétrique :

$$8,00 \text{ frs} \times 180 = 1.440,00 \text{ frs}$$

Coût total du calcul = 7.380,00 frs. (hors taxes).

.../...

De ces taux de calcul résulte la possibilité d'employer cette méthode (de même que les méthodes décrites dans les documents PRP et PEF) avec un maillage assez grossier, comme moyen de vérification par calcul parallèle d'une autre note de calcul. Toutefois la linéarité du coût n'est pas très favorable pour un tel usage.

6 - CONCLUSIONS -

La méthode de calcul analogique par réseau électrique purement réactif de la Compagnie Générale de Calcul, constitue un moyen original pour calculer et étudier des structures mécaniques. Elle permet de calculer des structures spéciales dont les calculs sont impossibles avec les méthodes classiques. Toutefois, pour une structure particulière, la méthode nécessite une étude préliminaire assez approfondie et une mise en oeuvre assez longue.

Quant à la précision de la méthode, elle peut toujours être améliorée en ressermant le maillage. Un optimum est évidemment à rechercher dans chaque cas d'espèce, car ce resserrement entraîne une augmentation du coût. La recherche à priori de cet optimum nécessite normalement la consultation de spécialistes. La précision réellement obtenue peut par contre être appréciée directement dans une certaine mesure.

Cette méthode est donc concurrente de la méthode des éléments finis pour les dalles ou des programmes de calculs de réseaux de poutres, ou d'autres programmes informatiques tels qu'EUGENE. Il y a lieu de remarquer :

- que l'utilisateur (plus précisément le client de la Compagnie Générale de calcul) ne peut guère vérifier que le montage électrique a été correctement effectué, alors qu'il peut vérifier les données d'un programme informatique d'éléments finis ou de réseaux de poutres par exemple,

- qu'à l'inverse, il y a moins de chance que des erreurs énormes soient commises lors d'un montage électrique que lors de la préparation des données (à cause de l'aspect physique d'un montage électrique).

ADRESSES UTILES

- COMPAGNIE GENERALE DE CALCUL
Boite Postale 9142
69263 - LYON CEDEX 1

Tél. (78) 47.24.02 et 37.69.11

Agence dans la région parisienne :

4, rue Mademoiselle
78000 - VERSAILLES

Tél. 951.55.39

- Laboratoire de Physique Mécanique de l'Université de Paris
2 place de la gare de Ceinture
78210 - SAINT CYR L'ECOLE

Tél. 045.06.85

- C. I. S. I.
35, Boulevard Brune
75680 - PARIS CEDEX 14

Tél. 539.25.10

Nous signalons à titre indicatif le C E T I M qui possède aussi un département de calcul analogique et hybride (semblable à celui de la C.I.S.I.)

- C E T I M
Boite Postale 67
60304 - SENLIS CEDEX

Tél. (4) 453.32.66 Tél'ex 1140006 CETIM-SENLIS

REFERENCE -

1 - P. ALAIS et G. LAMBOLEY

Etude de systèmes physiques par analogie avec un réseau électrique purement réactif. Application au comportement statique et dynamique des structures mécaniques.

Annales I.T.B.T.P. - Supplément au n° 299 - Novembre 1972.

2 - P. ALAIS

Calcul analogique de systèmes physiques linéaires.

Journal de Mécan. vol. II, n° 3 - Septembre 1963.

3 - P. ALAIS

Simulation du comportement dynamique de structures au moyen de réseaux de selfs et capacités.

Journal de Mécan. vol. III, n° 1 - Mars 1964.

4 - L. MALAVARD et L. GYERGYEK

Calculateur analogique à éléments réactifs pour la résolution automatique des systèmes d'équations algébriques linéaires. Actes des 3e journées internationales de calcul analogique.

Presses Académiques Européennes, Bruxelles, 1962, pages 46-51.

Figure 1

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE (vue en plan)

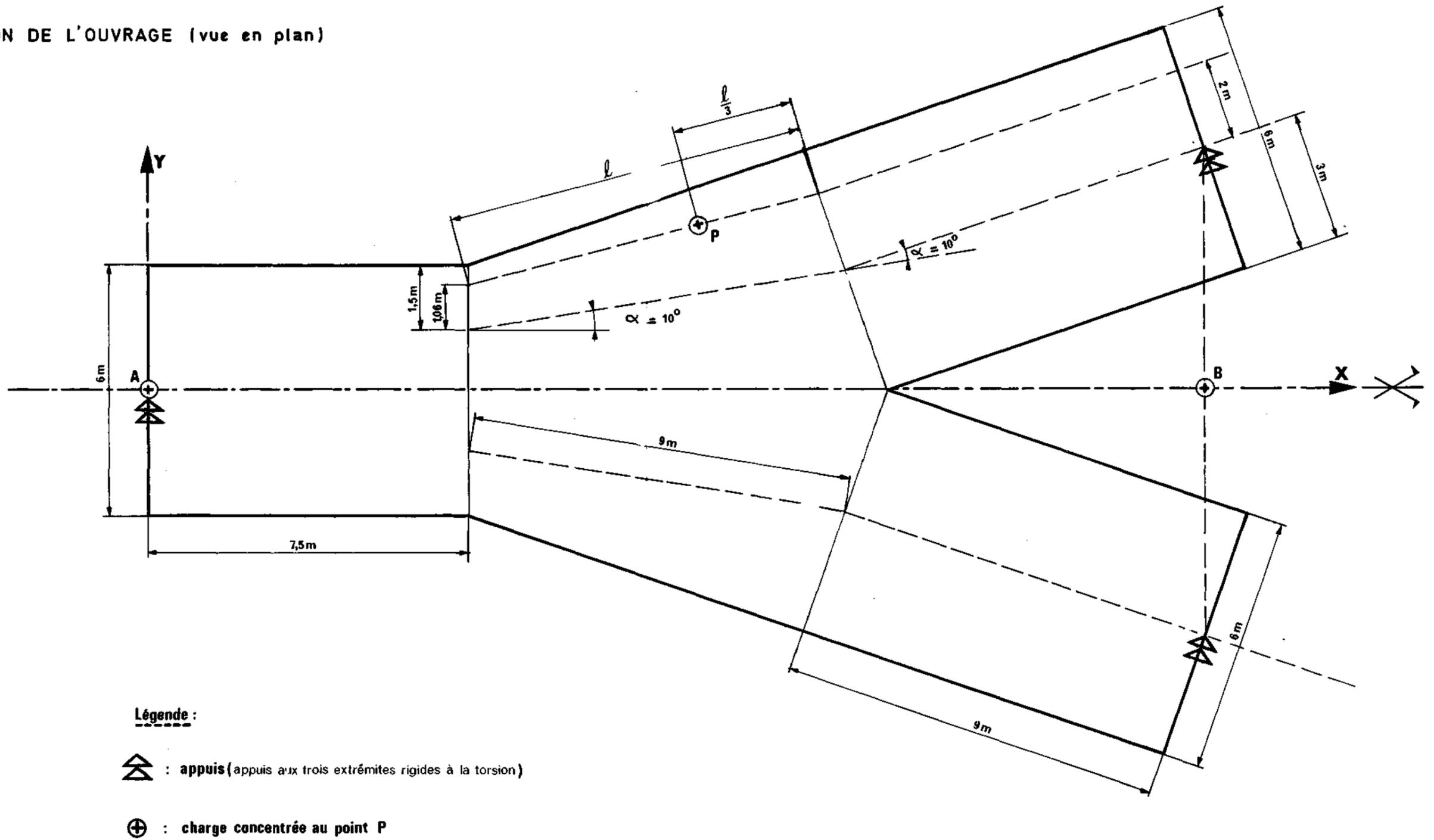


Figure 2

EMPLACEMENT DE LA ZONE EXTRAITE COMME EXEMPLE DE SORTIE
GRAPHIQUE DE LA MÉTHODE ANALOGIQUE

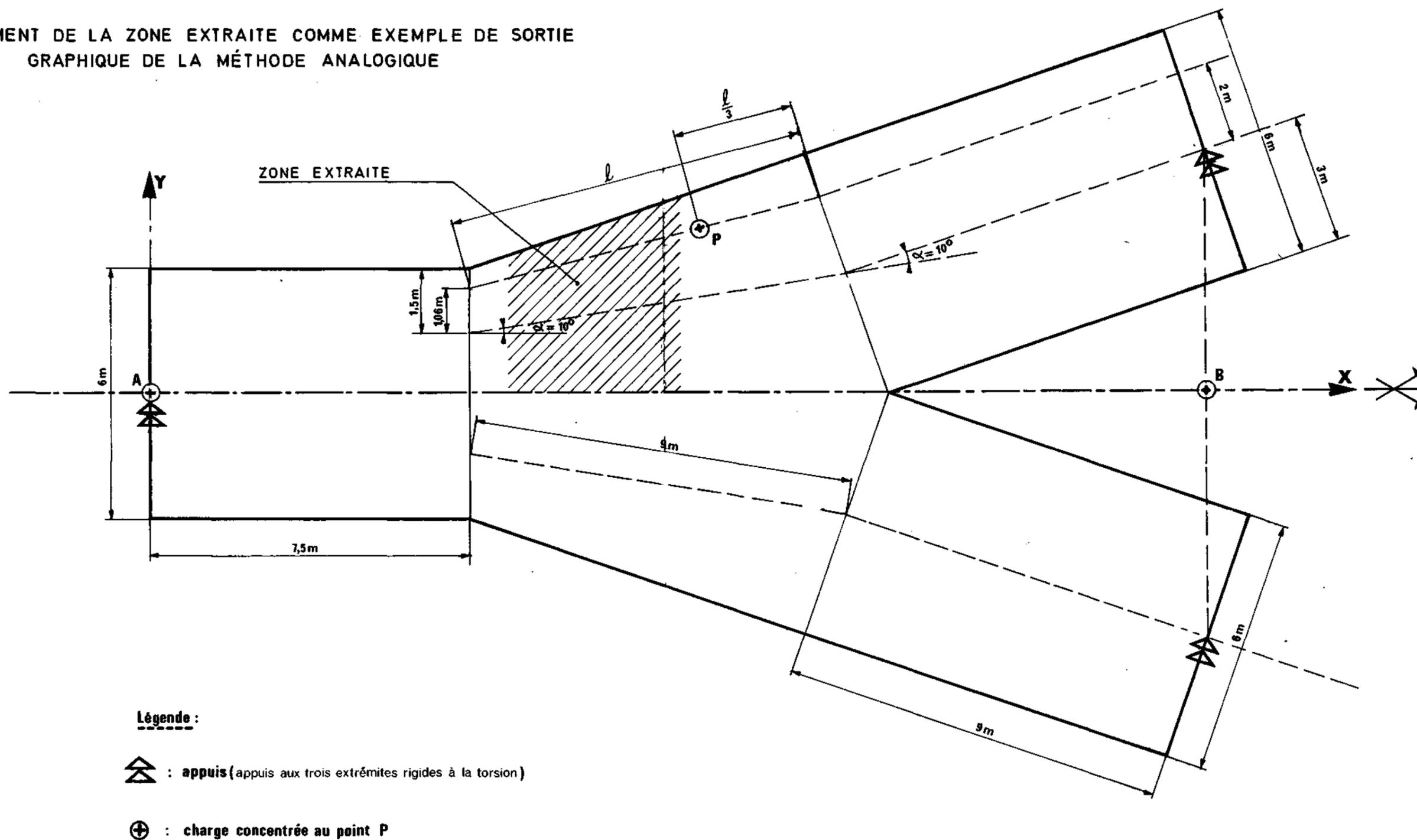


Figure 3

PREMIER EXEMPLE DE RÉSULTATS (sortie graphique)
fournis par la méthode analogique

Une partie du pont en Y (cf. fig. 2) — Cas de charge uniformément répartie

Légende :

(fournie par la Cie G^{ate} de Calcul)

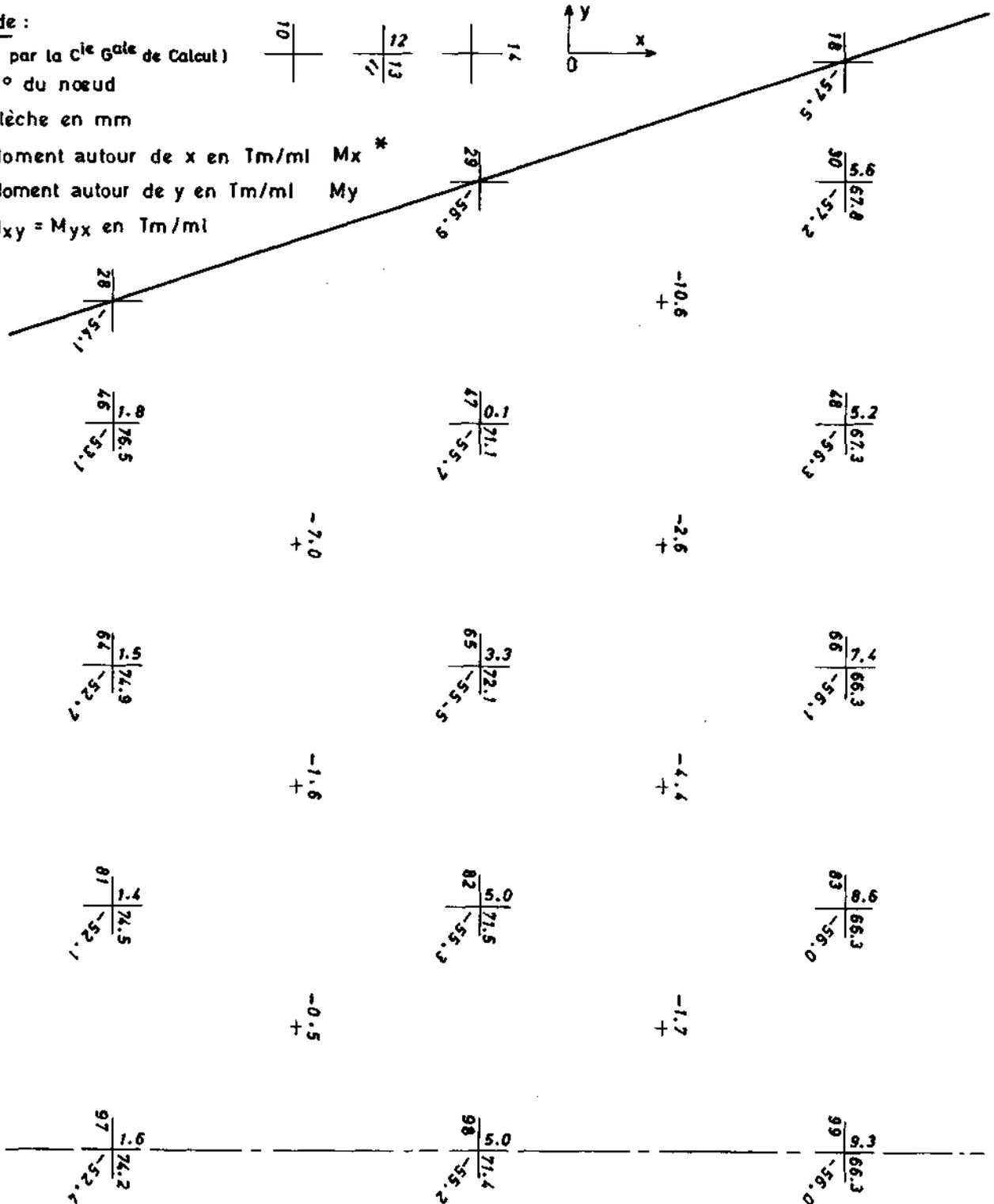
10 : N° du nœud

11 : Flèche en mm

12 : Moment autour de x en Tm/ml M_x *

13 : Moment autour de y en Tm/ml M_y

14 : $M_{xy} = M_{yx}$ en Tm/ml



* Il s'agit plus précisément du moment par unité de longueur d'axe parallèle à ox qui s'exerce sur une facette perpendiculaire à oy .

Figure 4

DEUXIÈME EXEMPLE DE RÉSULTATS (sortie graphique)
fournis par la méthode analogique

Une partie du pont en Y (cf. fig. 2)

Cas de charge concentrée au point P (100 tonnes) (cf. fig.1)

Légende :

(fournie par la Cie Gale de Calcul)

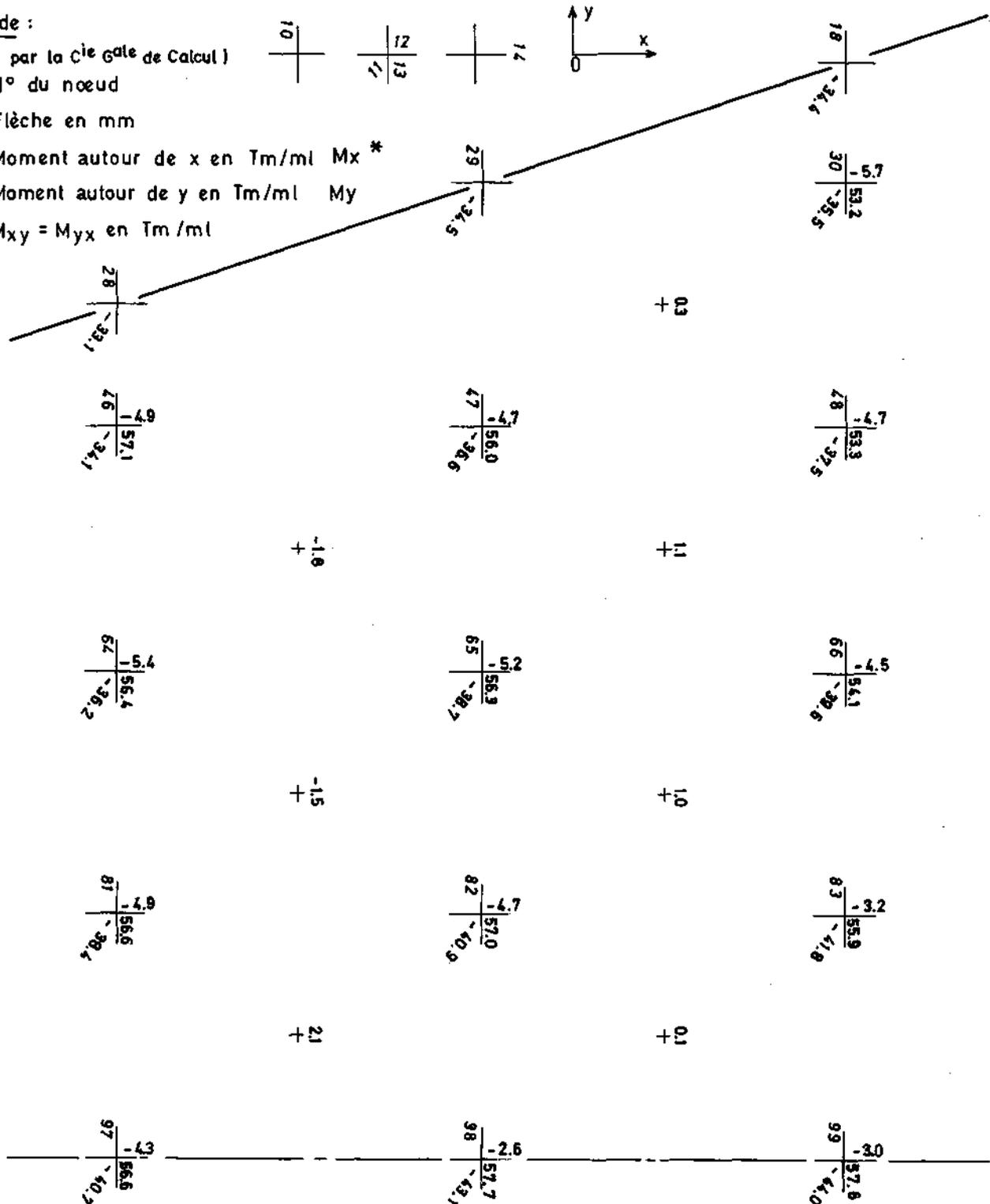
10 : N° du nœud

11 : Flèche en mm

12 : Moment autour de x en Tm/ml M_x^*

13 : Moment autour de y en Tm/ml M_y

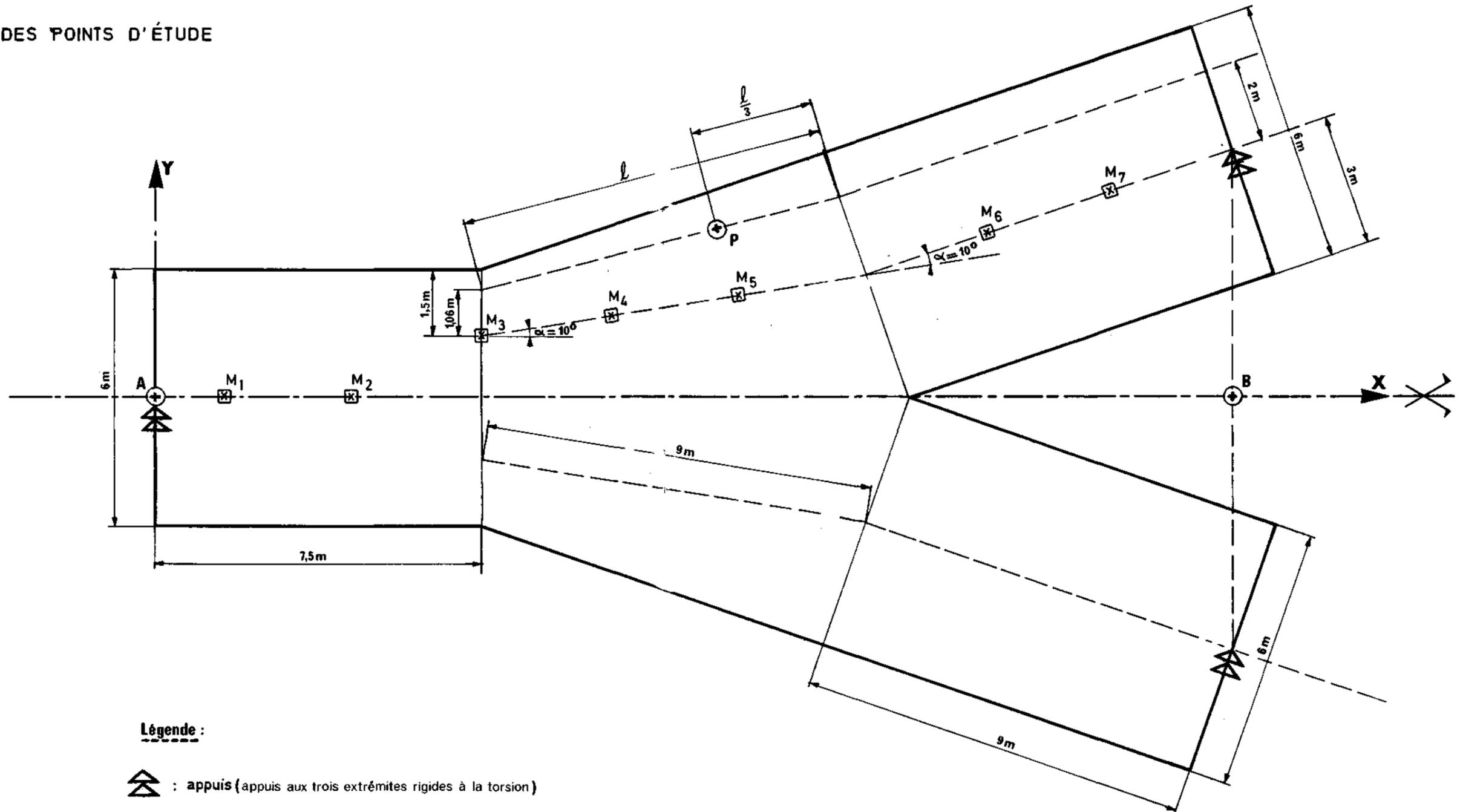
14 : $M_{xy} = M_{yx}$ en Tm/ml



* Il s'agit plus précisément du moment par unité de longueur d'axe parallèle à ox qui s'exerce sur une facette perpendiculaire à oy.

Figure 5

POSITIONS DES POINTS D'ÉTUDE



Légende :

 : appuis (appuis aux trois extrémités rigides à la torsion)

 : charge concentrée au point P

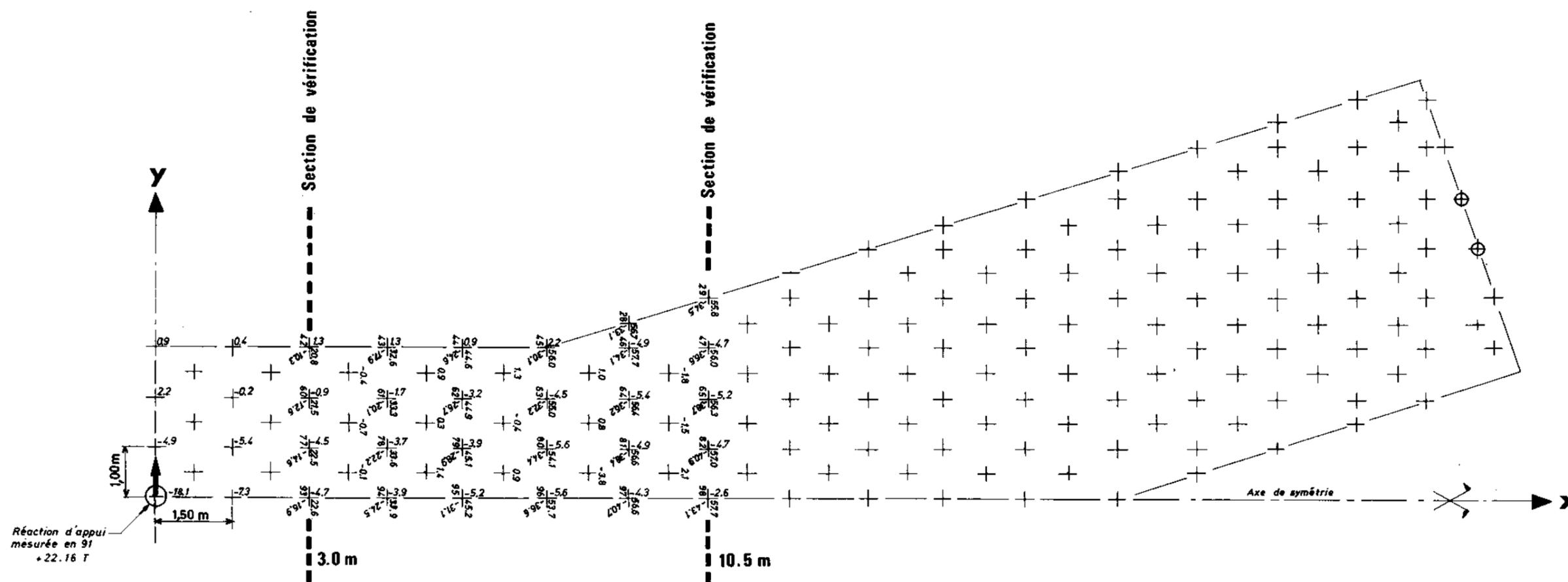
 : M_i ($i = 1, \dots, 7$) Points d'étude

FIGURE 6

TEST DE VÉRIFICATION

(Recoupeinent de moments fournis par la réaction d'appui fournie)

Cas de charge ponctuelle (cas figure 1)
 Calcul du moment par rapport à un axe parallèle à y .



moment calculé à l'aide	de la réaction d'appui	66.48 Tm	232.68 Tm
	des résultats fournis	65.55 Tm	226.24 Tm

Exemple de calcul dans la section d'abscisse 3,00m

$$\text{Moment moyen} = \frac{1}{4} (20,8 + 21,5 + 22,5 + 22,6) = 21,85$$

$$\text{Moment fléchissant sur l'ensemble de la section} = 21,85 \times 3 = 65,55 \text{ tm}$$