

Série : SOLS ET FONDATIONS (57)

SEMELLES SUR PIEUX

**Méthodes de calculs
Compte rendu d'essais
Dispositions constructives**

par **J. BLEVOT**

Ingénieur E. C. P.
Professeur à l'École Centrale et au CHEBAP,
Directeur Général adjoint de la SOCOTEC

et **R. FRÉMY**

Ingénieur E.N.P.C.,
Ingénieur attaché à la Direction de la SOCOTEC

RÉSUMÉ

Le calcul des semelles sur pieux par la « méthode des bielles » est une extension de la méthode des bielles pour le calcul des semelles sur sol, proposé par M. Lebellet en 1935.

Différentes hypothèses peuvent être adoptées pour définir les bielles assurant la transmission des efforts et deux méthodes sont exposées ci-après :

- « la méthode des bielles » sous la forme simplifiée où on l'applique normalement,
- et une extension de la méthode des bielles conduisant à une forme moins restrictive, due à M. Frémy.

Il est ensuite donné un compte rendu des essais sur modèles réduits et sur semelles en vraie grandeur, effectués depuis plusieurs années au Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics.

En conclusion, les dispositions constructives préconisées en pratique par la Socotec sont exposées.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Berechnung von Pfahlgründungen nach der sogenannten « Schubstangenmethode », bei der die Lastverteilung unter Zuhilfenahme fiktiver Schubstangen, deren Horizontalkomponente die Zugkraft bestimmt, bewertet wird, stellt nur eine Erweiterung der gleichen Methode für die Berechnung der Flachgründungen dar, wie sie 1935 von Lebellet vorgeschlagen wurde.

Zur Definition der die Kraftübertragung gewährleistenden Schubstangen können verschiedene Hypothesen aufgestellt werden :

- Die « Schubstangenmethode » in vereinfachter Form, wie sie normalerweise zur Anwendung gelangt —
- und eine Erweiterung dieser Methode, die zu einer weniger einschränkenden Form führt, wie sie Frémy entwickelt hat.

Anschliessend wird über Versuche, sowohl am Kleinmodell als auch an Fundamenten in wirklicher Grösse berichtet, wie sie seit einigen Jahren vom « Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics » (Versuchs — und Forschungszentrum für das Bauwesen und öffentliche Arbeiten) durchgeführt werden. Zum Schluss werden die erdbaulichen Massnahmen erwähnt, die in der Baupraxis der Socotec befürwortet werden.

SUMMARY

The calculation of footings on piles by the "connecting rod method" is an extension of the connecting rod method for the calculation of footings on the ground, proposed by Mr. Lebellet in 1935.

Various assumptions may be adopted to define the connecting rods providing the transmission of stresses, and two methods are described below :

- "the connecting rod method" in the simplified form in which it is normally applied,
- and an extension of the connecting rod method leading to a less restrictive form, developed by Mr. Frémy.

A report is then given of tests on scale models and on full-size footings that have been carried out for several years at the Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics (Experimental Building and Public Works Research and Study Center).

In conclusion, the constructive arrangements recommended in practice by the Socotec are described.

RESUMEN

El cálculo de las zapatas sobre pilotes por el « método de las bielias », constituye una ampliación del método de las bielias para el cálculo de las zapatas sobre el suelo, ya propuesto por el Señor Lebellet en 1935.

Pueden ser adoptadas distintas hipótesis para definir las bielias que permiten la transmisión de los esfuerzos y dos métodos son expuestos, a saber :

- «el método de las bielias», en la forma simplificada en que se aplica normalmente,
- y una ampliación del método de las bielias que conduce a una forma menos restrictiva, debida al Señor Frémy.

A continuación figura un informe de los ensayos mediante modelos reducidos y mediante zapatas a escala real, que se han efectuado desde hace varios años por el Centro Expérimental de Investigaciones y Estudios de la Edificación y Obras Públicas.

Como conclusión, se exponen las disposiciones constructivas preconizadas en la práctica por la Socotec.

Les thèses et la méthode d'exposition adoptées par les auteurs peuvent parfois heurter certains points de vue habituellement admis. Mais il doit être compris que ces thèses, à l'égard desquelles l'Institut Technique ne saurait prendre parti, ne visent en rien les personnes ni le principe des Institutions.

I. — GÉNÉRALITÉS ET MÉTHODE SIMPLIFIÉE

par J. BLÉVOT

Les semelles sur pieux des bâtiments ⁽¹⁾ sont usuellement calculées dans les bureaux d'études français par une méthode communément désignée sous la dénomination de « méthode des bielles ».

Antérieurement, cette méthode des bielles avait été proposée par M. Lebel pour le calcul des semelles sur sol à la suite des essais effectués sous sa direction au Bureau Securitas en 1934-1935. Elle a été exposée notamment dans le fascicule de décembre 1934 des Comptes rendus de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics et dans le quatrième volume (1935) des Mémoires de l'Association Internationale des Ponts et Charpentes.

Il paraissait *a priori* judicieux d'étendre le principe de cette méthode aux semelles sur pieux. La charge du poteau est alors supposée transmise aux pieux dans l'épaisseur de la semelle par des bielles inclinées; les efforts horizontaux de traction résultant de la décomposition des forces transmises par les bielles sont équilibrés par des armatures placées à la partie inférieure des semelles et pour lesquelles diverses dispositions sont possibles.

Différentes hypothèses peuvent être adoptées pour définir les bielles assurant la transmission des efforts. Nous exposerons d'abord la « méthode des bielles » sous la forme simplifiée où on l'applique normalement. Sous cette forme, la méthode ne s'applique qu'au prix de certaines extrapolations aux cas des semelles sous poteaux de section rectangulaire allongée ou sous points d'appui sollicités par des couples de flexion. M. Frémy a proposé une extension de la méthode des bielles conduisant à une forme moins restrictive qui permet de traiter de tels cas. L'exposé de la « méthode simplifiée » sera donc suivi de celui de la méthode due à M. Frémy.

Nous donnerons ensuite le compte rendu des essais sur modèles réduits et sur semelles en vraie grandeur qui ont été effectués depuis plusieurs années au Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics dans le cadre des recherches entreprises par la Socotec et nous indiquerons les nombreux enseignements à tirer de ces essais.

Enfin, nous exposerons les dispositions constructives que nous sommes en mesure de préconiser en pratique.

EXPOSÉ DE LA MÉTHODE SIMPLIFIÉE

Pour définir le tracé des bielles, il faut préciser :

- leur origine à la partie supérieure, au niveau de la base du poteau;
- leur extrémité à la partie inférieure.

(1) Nous visons essentiellement dans cet exposé les semelles sur pieux assurant la transmission des charges à un nombre relativement réduit de pieux, à l'exclusion des massifs sur un grand nombre de pieux rencontrés dans les fondations d'ouvrages d'art (culées de ponts en arc, par exemple).

La présente circulaire complète et annule celle parue en mars-avril 1957 sous le n° 111-112. J. Blévoit : *Semelles en béton armé sur pieux*. Premières conclusions tirées des essais en cours de réalisation au C.E.B.T.P. série BBA 44.

Les extrémités inférieures des bielles ne peuvent être logiquement que les points d'intersection des axes des pieux et du plan moyen des armatures de traction disposées à la partie inférieure des semelles; toute autre hypothèse conduirait à admettre *a priori* des efforts de flexion dans les pieux, ce qui n'est pas admissible.

Au niveau de la base du poteau (collet de la semelle), on pourrait évidemment envisager de prendre comme origine des bielles le point d'intersection de l'axe du poteau et du plan du collet, mais c'est là une hypothèse défavorable qui néglige la répartition de la charge sur la surface du poteau. Il semble que l'on puisse adopter des hypothèses différentes, que nous indiquons ci-après, dans les cas correspondant aux semelles sur deux, trois et quatre pieux.

1. Semelles sur deux pieux (fig. 1).

Considérons une semelle transmettant la charge d'un poteau de section rectangulaire à deux pieux distants entre axes de l_t . La charge Q du poteau est supposée centrée; soit a la dimension du poteau dans le plan vertical moyen de la semelle.

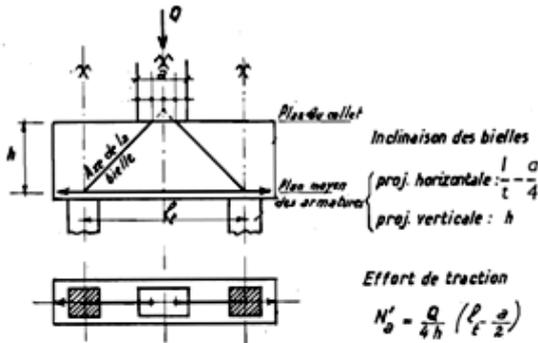


FIG. 1.

L'origine des bielles dans la section du collet peut être choisie aux deux points situés à la distance $\frac{a}{4}$ de l'axe du poteau. Dans ces conditions, si h est la hauteur utile ($h = h_t - d'$), l'effort normal de traction que doivent équilibrer les armatures a pour valeur

$$N'_a = \frac{Q}{4h} \left(l_t - \frac{a}{2} \right) = \frac{Ql_t}{4h} \left(1 - \frac{a}{2l_t} \right)$$

Remarque 1. L'application des méthodes de la Résistance des Matériaux à une semelle sur deux pieux considérée comme une poutre sur deux appuis simples supportant une charge centrée répartie sur la longueur a conduit à une valeur maximale du moment de flexion égale à $\frac{Q}{4} \left(l_t - \frac{a}{2} \right)$. L'application de la méthode des bielles revient donc à déterminer l'effort de traction dans les armatures en prenant pour bras de levier la hauteur utile. Il faut noter que les semelles sur deux pieux sont généralement des poutres de grande hauteur relative, auxquelles les méthodes usuelles de la Résistance des Matériaux ne sont pas applicables sans restriction.

Remarque 2. Les prescriptions des Règles BA visant les charges appliquées au voisinage des appuis (art. 4,2352) permettraient de se dispenser de toute armature transversale (cadres ou barres pliées) si la condition

$$h \geq \frac{2}{3} (l_t - a_1)$$

était vérifiée, a_1 étant la dimension des pieux en béton armé dans le plan vertical passant par les axes du poteau et des pieux. Nous verrons que des considérations de construction conduisent à disposer de toute façon des armatures transversales dans les semelles sur deux pieux.

2. Semelles sur trois pieux (fig. 2).

On suppose que les centres des trois pieux sont les sommets d'un triangle équilatéral de côté l_t . Le poteau est de section carrée de côté a ; son centre coïncide avec

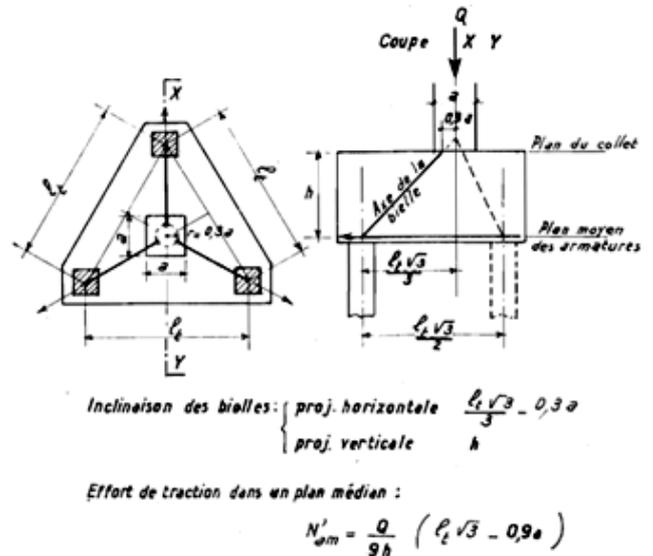


FIG. 2.

le centre de gravité du triangle formé par les pieux. La charge Q du poteau est transmise aux pieux par trois bielles dont les axes sont situés dans les plans bissecteurs (ou médians). Il paraît possible d'admettre que les origines des bielles dans le plan du collet sont des points situés à une distance égale à $0,3 a$ de l'axe commun du poteau et de la semelle.

Les efforts horizontaux de traction peuvent être équilibrés par des armatures disposées suivant les médianes du triangle équilatéral formé par les axes des pieux ou suivant les côtés dudit triangle.

Des armatures disposées suivant les médianes doivent équilibrer un effort

$$N'_{am} = \frac{Q}{9h} (l_t \sqrt{3} - 0,9 a) \approx \frac{Ql_t \sqrt{3}}{9h} \left(1 - \frac{a}{2l_t} \right)$$

Des armatures disposées suivant les côtés doivent équilibrer un effort

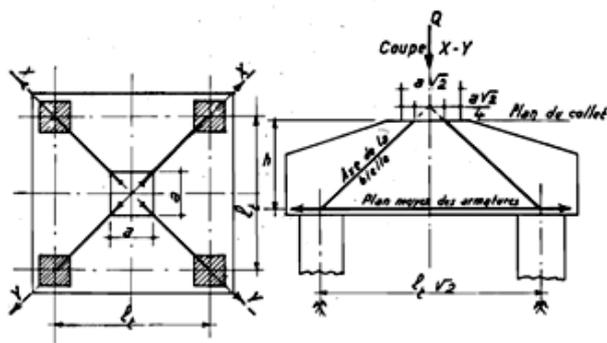
$$N'_{ac} = \frac{N'_{am}}{\sqrt{3}} \approx \frac{Ql_t}{9h} \left(1 - \frac{a}{2l_t} \right)$$

3. Semelles sur quatre pieux (fig. 3).

Nous supposons que les centres des quatre pieux sont les sommets d'un carré de côté l_t . Le poteau présente une section carrée de côté a , dont le centre coïncide avec celui du carré formé par les pieux. La transmission de la charge Q du poteau aux pieux est assurée par des bielles dont les axes sont situés dans les plans diagonaux.

Il paraît plausible d'admettre que les origines des bielles dans le plan du collet de la semelle sont les centres des quatre carrés dans lesquels les plans de symétrie partagent le poteau et la semelle.

Les efforts horizontaux de traction peuvent être équilibrés par des armatures disposées suivant les diagonales du carré formé par les axes des pieux ou suivant les côtés dudit carré.



$$\text{Inclinaison des bielles} \begin{cases} \text{proj. horizontale} & \frac{l_t \sqrt{2} - a \sqrt{2}}{2} \\ \text{proj. verticale} & h \end{cases}$$

Effort de traction dans un plan diagonal :

$$N'_{ad} = \frac{Q \sqrt{2}}{8 h} \left(l_t - \frac{a}{2} \right)$$

FIG. 3.

Des armatures disposées suivant les diagonales doivent équilibrer un effort

$$N'_{ad} = \frac{Q l_t \sqrt{2}}{8 h} \left(1 - \frac{a}{2 l_t} \right)$$

Des armatures disposées suivant les côtés doivent équilibrer un effort

$$N'_{ac} = \frac{N'_{ad}}{\sqrt{2}} = \frac{Q l_t}{8 h} \left(1 - \frac{a}{2 l_t} \right)$$

La méthode des bielles ainsi définie n'est qu'un « schéma » qui ne saurait prétendre à une représentation des phénomènes conforme à la réalité. Elle choque souvent certains ingénieurs par la simplicité même de ses principes. Il faut toutefois remarquer que des méthodes plus complexes ne conduiraient pas forcément à des résultats plus exacts.

Le calcul des pièces dont les dimensions transversales sont du même ordre de grandeur que les portées ne relève pas des méthodes de la Résistance des Matériaux classique. Il serait illusoire d'attendre de l'application de ces méthodes au calcul des semelles une précision comparable à celle atteinte dans les applications aux pièces longues.

On serait tenté d'accorder plus de valeur à l'application de la Théorie mathématique de l'Élasticité, mais celle-ci conduirait à des développements mathématiques d'une très grande complexité en raison de la forme même des semelles à plus de deux pieux et à des dispositions d'armatures compliquées et, en définitive, on n'aurait aucune idée des coefficients de sécurité réels des semelles ainsi calculées.

Seuls des essais systématiques poussés jusqu'à rupture peuvent donc donner des renseignements valables sur le coefficient de sécurité que présentent des semelles calculées par une méthode quelconque et sur l'efficacité comparée des différents systèmes d'armatures utilisés.

III. — COMPTE RENDU DES ESSAIS EFFECTUÉS

par J. BLÉVOT

Nous avons déjà indiqué que seuls des essais systématiques poussés jusqu'à rupture pouvaient donner des renseignements valables sur les coefficients de sécurité que présentent des semelles calculées par une méthode quelconque et sur l'efficacité comparée des différents systèmes d'armatures utilisés.

Il faut aussi remarquer que des semelles peuvent périr non seulement par écrasement des bielles comprimées ou insuffisance des armatures tendues mais également par effet de poinçonnement; de telles ruptures — qui paraissent surtout à craindre pour les semelles de faible hauteur — peuvent *a priori* se produire de deux façons différentes :

— soit par poinçonnement du centre de la semelle sous l'effet de la charge du poteau;

— soit par rupture d'un angle de la semelle, suivant des surfaces inclinées, sous l'effet de la réaction d'un pieu.

Sur ces dernières questions, comme sur les précédentes, seuls des essais poussés jusqu'à rupture peuvent conduire à des conclusions valables.

C'est dans ces conditions qu'un programme d'essais systématiques sur des semelles sur pieux a été entrepris au Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics dans le cadre des recherches d'ordre général effectuées par le Bureau Securitas et la Socotec.

Ce programme a comporté deux parties :

— la première, réalisée de 1955 à 1958, a porté sur des semelles qui peuvent être considérées comme des modèles réduits à une échelle comprise entre $1/2$ et $1/3$ de semelles sur pieux réelles; il s'agissait de semelles sur quatre pieux, sur trois pieux et de quelques semelles sur deux pieux;

— la seconde, réalisée de 1958 à 1961, a porté sur des semelles à deux pieux, trois pieux et quatre pieux en vraie grandeur.

I. PREMIÈRE SÉRIE D'ESSAIS

Les essais de la première partie du programme avaient plus spécialement pour objets :

1° de déterminer à quel coefficient de sécurité conduit l'application de la méthode des bielles (sous sa forme simplifiée) en regard des ruptures par insuffisance des armatures inférieures;

2° de rechercher si les diverses dispositions d'armatures théoriquement équivalentes ont une efficacité comparable au double point de vue de la sécurité à la rupture et de la sécurité à la fissuration,

d'en déduire éventuellement les dispositions qui sont à utiliser de préférence et celles qui sont à rejeter;

3° de chercher à déterminer dans quelles conditions peuvent se produire les ruptures par effet de poinçonnement au centre de la semelle ou dans les angles.

Dans ces essais, la plus grande dimension en plan des semelles à trois et quatre pieux était de 60 cm; cette

limite était imposée par l'utilisation de la presse Trayvou de 500 t du C.E.R.E.B.T.P.

Les pieux de section carrée sur lesquels reposaient les semelles avaient 14 cm de côté; les poteaux — de section également carrée — avaient en général 15 cm de côté, quelquefois 18 cm pour éviter des ruptures prématurées par écrasement des poteaux. La distance entre axes des pieux était en général de 42 cm, soit trois fois le côté du pieu, ce qui correspond à une proportion courante.

Les semelles essayées peuvent donc être considérées, ainsi que nous l'avons déjà dit, comme des modèles réduits dans des rapports compris entre $1/2$ et $1/3$ de semelles usuelles avec des charges de 50 à 100 t par pieu.

Pour qu'il soit possible d'interpréter correctement les résultats des essais, il était nécessaire de centrer aussi rigoureusement que possible la charge agissant sur le poteau; ceci ne soulevait pas de difficultés majeures : on intercalait une bille de diamètre suffisant entre deux plaques épaisses, l'une au contact du poteau, l'autre au contact du plateau supérieur de la presse.

Il fallait également assurer :

a) la liberté de rotation des sections inférieures des pieux obligatoirement constitués dans les essais par des pièces très courtes;

b) la liberté de déplacement de ces sections dans le plan horizontal afin d'éliminer tout effet d'encastrement et de frottement susceptible de réduire les efforts de traction à la partie inférieure des semelles, ce qui aurait faussé complètement les conclusions tirées des résultats des essais.

Pour réaliser ces dernières conditions, nous avons disposé, dans les premiers essais, une bille unique sous chaque pieu entre deux plaques métalliques, mais ce dispositif s'est révélé inefficace car les billes étaient de diamètre trop faible et le métal des plaques de dureté insuffisante et l'on a constaté des empreintes de profondeur appréciable créant une résistance certaine aux déplacements horizontaux.

Par la suite, tout en conservant le dispositif à bille unique permettant la libre rotation des sections inférieures des pieux, nous avons réalisé sous chaque pieu, pour assurer la liberté de déplacement horizontal, un appui comportant un grand nombre de billes interposées entre deux plaques de métal convenablement traité; le double dispositif représenté sur la figure 30 a donné satisfaction.

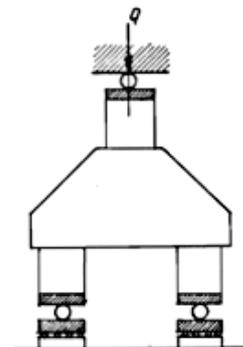


FIG. 30.

Les essais ont porté sur 51 semelles à quatre pieux ;
 37 — à trois pieux ;
 6 — à deux pieux.

Pour les semelles à trois et quatre pieux que nous allons étudier plus spécialement, nous avons fait varier successivement la hauteur des semelles, la disposition des armatures, la nature des armatures (acier doux ou acier Tor) et leur section.

Les qualités des matériaux mis en œuvre étaient soigneusement contrôlées :

— pour le béton, par essais sur éprouvettes cubiques (alors réglementaires) et sur éprouvettes prismatiques prélevées au bétonnage de la semelle et rompues par écrasement ou par flexion le jour même de l'épreuve de la semelle correspondante ;

— pour le métal, par essais d'éprouvettes de traction prélevées sur les barres utilisées au ferrailage des différentes semelles.

Les essais ont été effectués sous charge croissante. On observait le développement des fissures dont on notait la longueur et l'ouverture. Toutefois, les dispositifs d'essai permettaient seulement de repérer en cours de chargement les fissures sur les faces latérales des semelles et non en sous-face, celle-ci n'étant pas accessible à l'observation. Bien entendu, on notait la charge de rupture et les circonstances accompagnant la ruine de la semelle. Après rupture, les semelles, retirées de la presse, étaient photographiées (faces latérales et sous-face) et, dans la plupart des cas, on a repéré la position des armatures par rapport à la face inférieure dans les sections de rupture.

L'ensemble des renseignements relevés au cours des essais et postérieurement à ceux-ci et des documents photographiques annexes est réuni dans des procès-verbaux qui représentent plus de 700 pages. Il ne saurait donc être question de donner dans ce fascicule le compte rendu complet des essais. On trouvera en annexes 4, 5 et 6 les tableaux donnant les caractéristiques des semelles essayées, les caractères mécaniques des matériaux béton et acier, les charges de rupture et diverses charges de calcul comparées aux charges de rupture, l'indication succincte du processus de rupture. Quelques photographies de semelles en cours d'essais ou après rupture sont données dans le texte à titre d'exemples.

L'interprétation des résultats des essais soulève certaines difficultés en raison de la complexité des phénomènes observés très souvent au moment de la rupture, difficultés dont certaines photographies annexées donnent une idée. La raison essentielle en est la suivante : Dans les essais de poutres, il est souvent possible d'étudier séparément les effets du moment de flexion et ceux de l'effort tranchant en hypertrophiant successivement par exemple la résistance aux effets du moment ou aux effets de l'effort tranchant. Dans le cas des semelles — pièces massives de petite portée — nous avons bien cherché à séparer ainsi les facteurs, mais nous nous sommes heurtés à de grandes difficultés car l'accroissement de la section des armatures inférieures correspond également à une augmentation de la résistance au poinçonnement.

Nous nous sommes ainsi trouvés, dans de nombreux cas, en présence de phénomènes de rupture extrêmement complexes, difficiles à analyser.

Nous allons exposer les conclusions que nous estimons être en mesure de tirer des essais effectués, en examinant successivement le cas des semelles à quatre pieux, puis celui des semelles à trois pieux.

A. SEMELLES SUR QUATRE PIEUX

Nous avons essayé des semelles de différentes hauteurs présentant les dispositions d'armatures suivantes (fig. 31) :

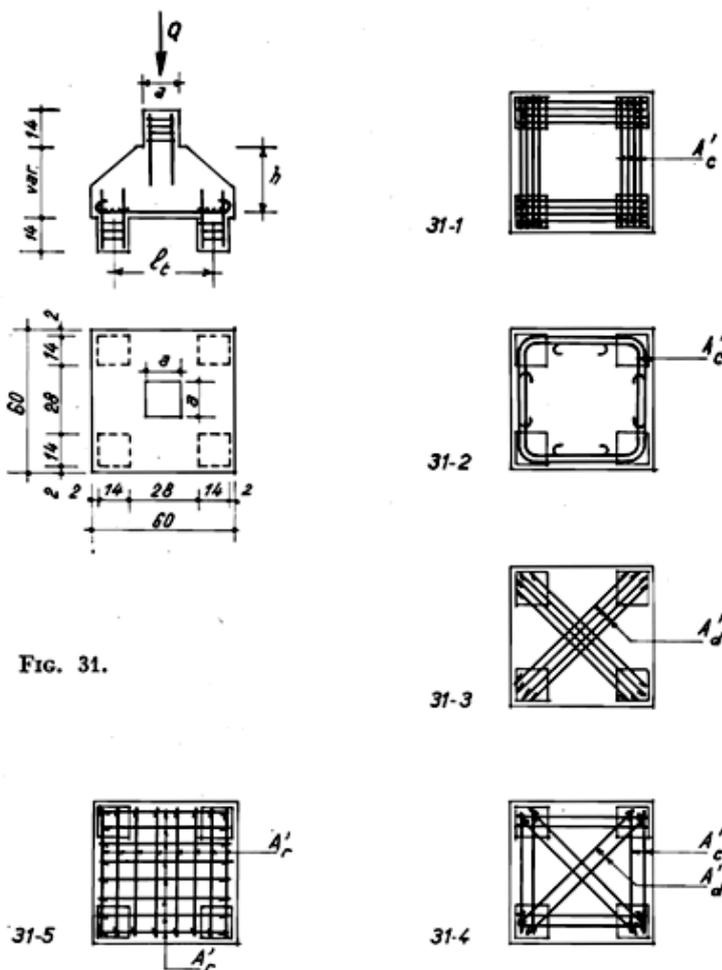


FIG. 31.

1° Armatures disposées suivant les quatre côtés du carré ayant pour sommets les centres des sections des pieux. Ces armatures de section A'_{ec} équilibrent un effort de traction

$$N'_{ec} = \frac{Ql_c}{8h} \left(1 - \frac{a}{2l_c} \right).$$

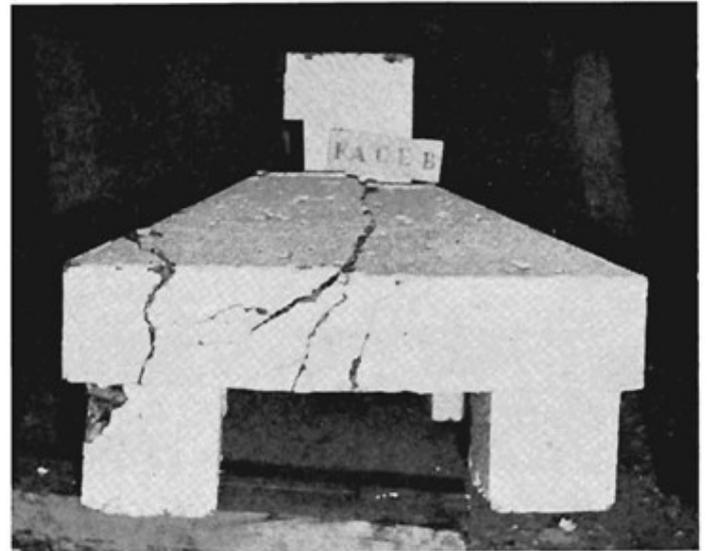
2° Armatures disposées en cerces suivant les quatre côtés de la semelle. Ces armatures, de même section que les précédentes, équilibrent le même effort N'_{ec} . La seule différence réside dans la disposition des ancrages; il n'y a, en principe, qu'un recouvrement pour chacune des cerces alors que, dans le premier cas, chaque barre doit être ancrée isolément à ses deux extrémités.

3° Armatures disposées suivant les diagonales du carré ayant pour sommet les centres des sections des pieux. Ces armatures de section A'_{ed} équilibrent un effort de traction

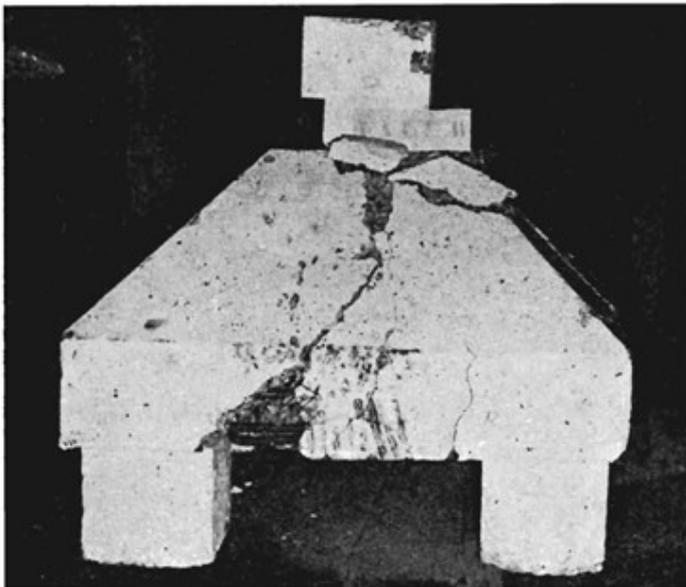
$$N'_{ed} = \frac{Ql_c \sqrt{2}}{8h} \left(1 - \frac{a}{2l_c} \right).$$



2,3. Fissure de rupture d'allure verticale.



3,1. Fissure de rupture inclinée.



2,4. Rupture complexe.

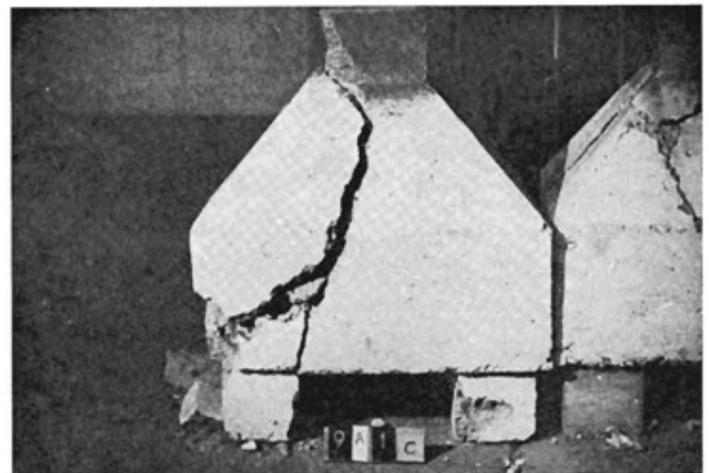


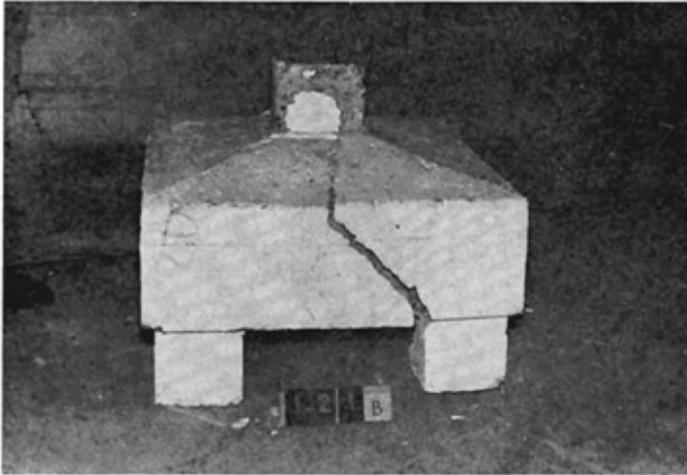
6,4. Rupture avec fissure inclinée et écrasement du béton à la partie supérieure.

4° Armatures disposées suivant un système mixte, les unes suivant les côtés, les autres suivant les diagonales du carré formé par les axes des pieux.

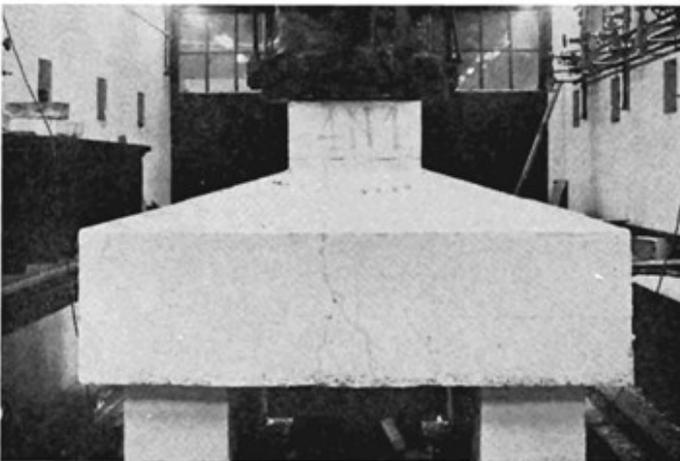
On peut remarquer que pour une même charge Q et une même hauteur utile h , le poids théorique des armatures est le même dans les quatre cas visés ci-dessus.

5° Nous avons enfin prévu des semelles comportant des armatures disposées suivant un quadrillage régulier parallèle aux côtés. La détermination des armatures de ce dernier système ne relève pas de la méthode des bielles; nous avons fait les comparaisons à égalité de poids d'armatures avec les semelles du type I.

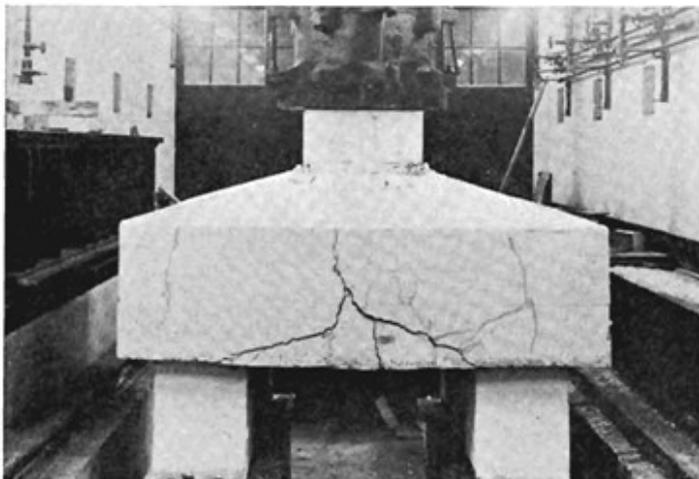
9 A 1. Rupture avec décollement d'une bielle ($\theta = 62^\circ$).



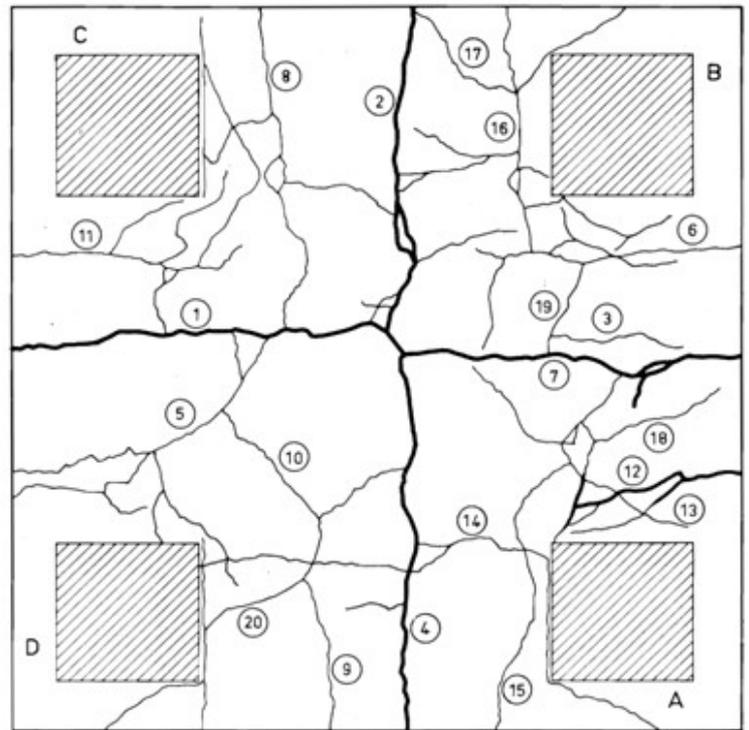
12,1 b. Rupture avec glissement sur un appui (armatures sans crochets).



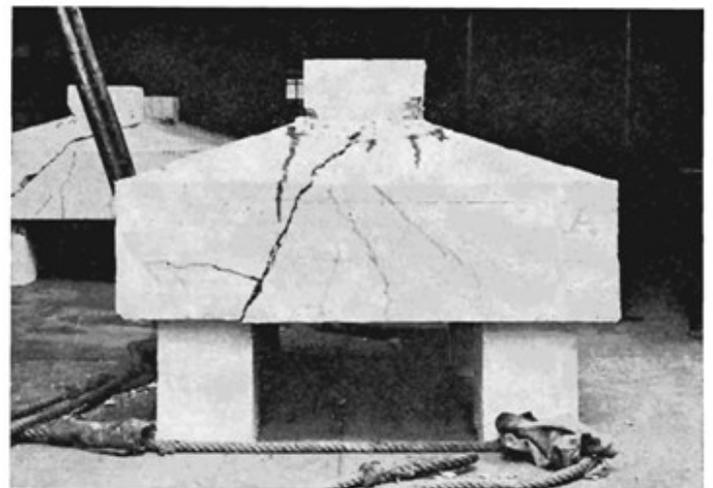
4 N 1. Fissures en cours de chargement.



4 N 1. Fissures de rupture.



4 N 1. Fissuration en sous-face - Rupture à 700 t.

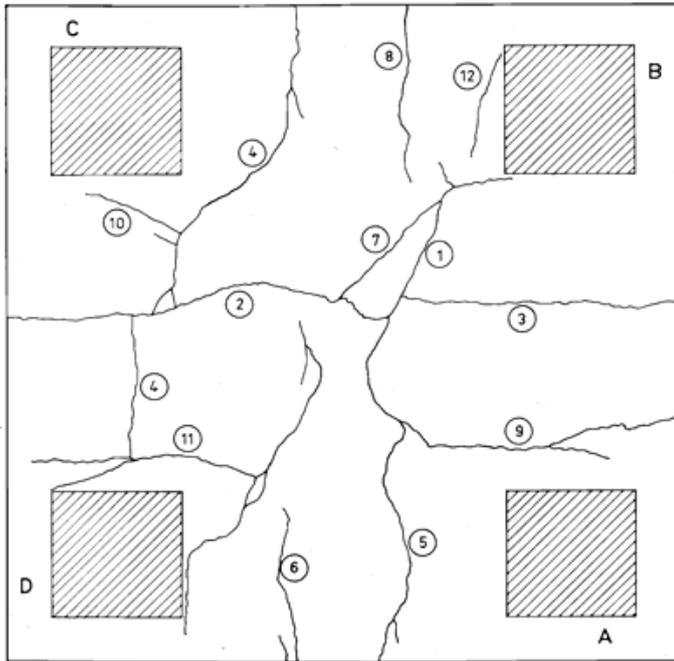


4 N 2. Fissure de rupture inclinée à partir d'un pieu.

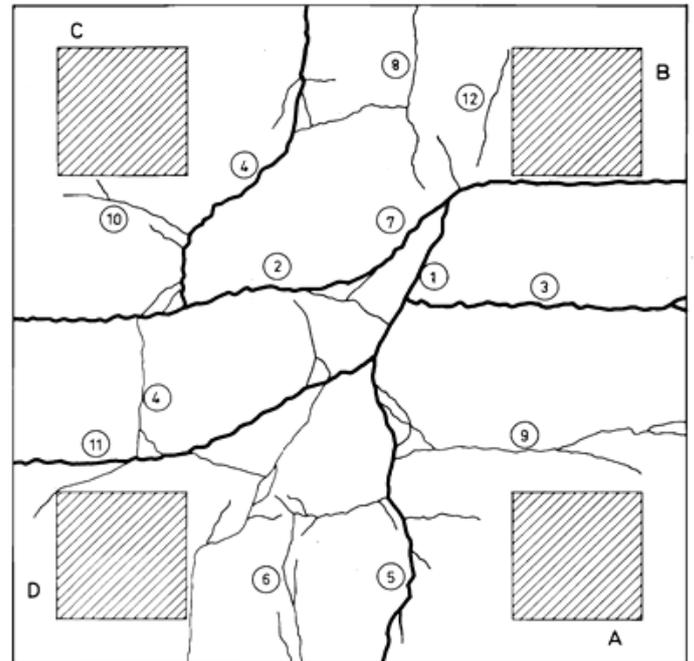
A 1. Sécurité à rupture.

Au point de vue de la sécurité à rupture, les systèmes (1), (2), (3) et (4) se sont révélés sensiblement équivalents. Le système (5) avec armatures réparties en quadrillage donne, à poids égal, une sécurité un peu plus faible (charge de rupture réduite d'environ 20 %).

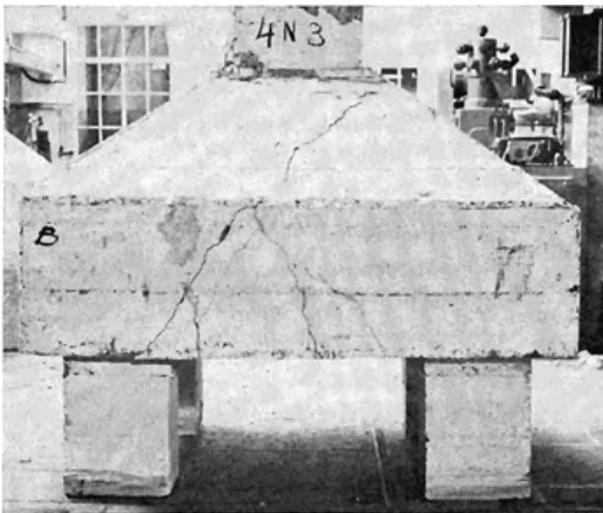
Si nous définissons le coefficient de sécurité comme le rapport de la charge Q_u ayant déterminé la rupture de la semelle à la charge calculée par application de la méthode des bielles — sous sa forme simplifiée — pour une contrainte des armatures égale aux 6/10 de la limite



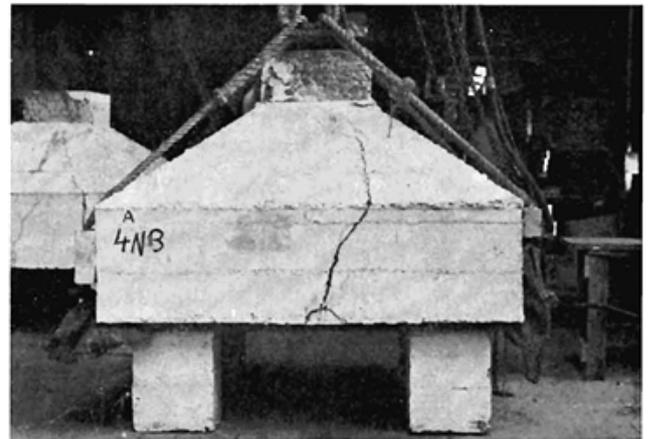
4 N 2. Fissuration en sous-face - Charge 500 t.



4 N 2. Fissuration en sous-face - Charge 658 t (rupture).



4 N 3. Fissuration de tendance parallèle à une diagonale.



4 N 3. Fissure de rupture presque verticale.

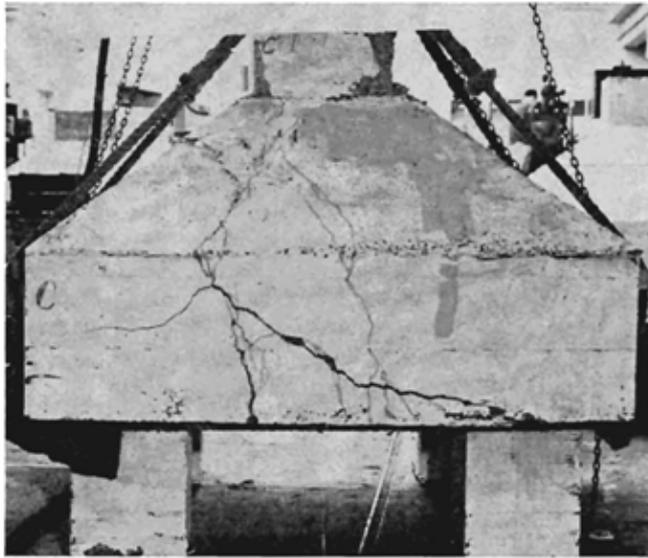
élastique du métal ($\bar{\sigma}_s' = 0,6 \sigma_s'$), conformément aux Règles BA 1960, on peut tirer des essais les conclusions suivantes :

a) Pour des inclinaisons des axes des bielles fictives sur l'horizontale voisines de 45° — comprises par exemple entre 35° et 55° , les coefficients de sécurité pour les

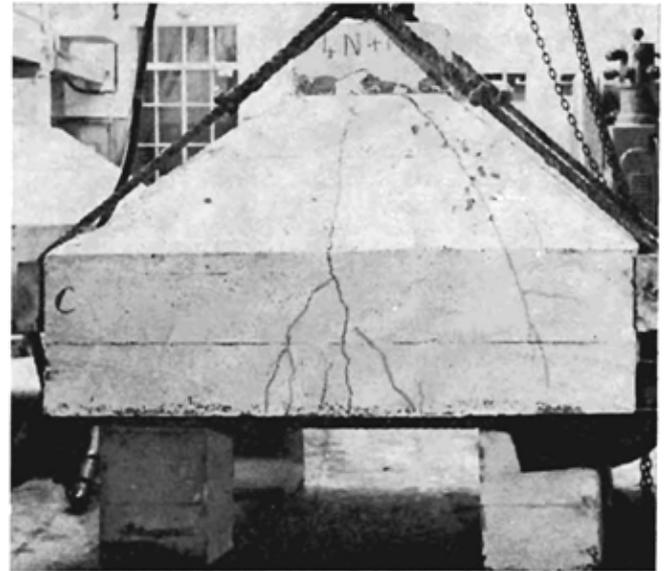
systèmes d'armatures (1), (2), (3) et (4) (*) varient dans d'assez larges limites mais restent compris entre 1,6 et 2,4 — sauf cas exceptionnels sur lesquels nous reviendrons plus loin en d).

b) Pour des inclinaisons sur l'horizontale inférieures à 35° (semelles très plates), nous avons constaté des

(*) Les résultats des essais avec dispositif d'essai imparfait ont été éliminés, de même ceux correspondant à des semelles où les armatures ne comportaient pas de crochets aux extrémités.



4 N 4. Fissuration de rupture d'allure diagonale.



4 N 4 bis. A rupture, fissure centrale presque verticale et fissure inclinée partant d'un pieu.

coefficients de sécurité nettement plus faibles correspondant à des phénomènes de rupture complexes difficiles à analyser.

c) Pour des inclinaisons sur l'horizontale supérieures à 55° (semelles relativement hautes), nous avons également constaté des coefficients de sécurité réduits, dus, semble-t-il, au glissement des bielles de béton inclinées — trop inclinées — au voisinage du collet de la semelle. Il s'agit là d'un phénomène voisin de celui qui a été signalé par M. Caquot pour des consoles courtes par rapport à la hauteur de section (2). La trop forte obliquité des bielles ne permet pas d'utiliser totalement la résistance des armatures disposées à la partie inférieure de la semelle.

d) Même pour des hauteurs correspondant à des inclinaisons de bielles voisines de 45°, nous avons obtenu des coefficients de sécurité notablement inférieurs à ceux indiqués en a) pour des sections d'armatures relativement importantes, correspondant à des pourcentages d'armatures que l'on peut considérer comme anormaux. Mais comme il est difficile de définir d'une façon précise les pourcentages d'armatures dans des semelles sur quatre pieux, nous avons cru pouvoir nous référer à une limitation de la validité d'application de la méthode des bielles liée à une contrainte fictive de compression dans les bielles pour éliminer ces cas où la méthode ne conduirait pas à une sécurité normale. Ces limitations sont indiquées au chapitre des dispositions constructives; elles conduisent à des coefficients de sécurité au moins égaux à $\frac{5}{3}$ pour $\bar{\sigma}_a = \frac{3}{5} \sigma'_a$.

A 2. Fissuration.

En ce qui concerne les conditions de fissuration, il semble que l'on puisse tirer des essais les conclusions suivantes :

a) D'une façon générale, sous des charges déterminant dans les armatures des contraintes égales aux contraintes

(2) Voir notamment Formulaire du Béton Armé, de R. Cham-
baud et P. Lebel, p. 383.

admissibles, on observe déjà des fissures. Dans certains cas, sous des charges égales aux charges de service, nous avons observé des fissures relativement ouvertes. Nous verrons plus loin quelles améliorations peuvent être apportées à certaines dispositions de ferrailage.

b) Les essais ont montré que les semelles du type (3) avec armatures disposées uniquement suivant les diagonales sont nettement moins favorables que les autres, les fissures sur les faces latérales s'ouvrent assez rapidement, comme on le conçoit aisément puisqu'il n'y a pas d'armatures au voisinage des faces latérales de la semelle.

c) Les semelles avec armatures du type (1) suivant les quatre côtés, et plus encore celles du type (2) avec cerces, sont affectées par des fissures moins importantes sur les faces latérales, mais l'absence d'armatures au centre de la semelle permet un développement assez net de la fissuration en sous-face à partir d'une certaine charge.

Il apparaît que ces dispositions sont susceptibles d'être améliorées par l'adjonction d'un quadrillage d'armatures. Ce quadrillage (5) pourrait d'ailleurs être pris en compte dans les calculs, sous réserve de lui attribuer une efficacité de 80 % par rapport au même poids d'armatures disposées suivant les quatre côtés du carré.

Bien entendu, pour que le système mixte ainsi réalisé (1) + (5) ou (2) + (5) reste économique, il convient d'équilibrer par le système principal (1) ou (2) la majeure partie de la charge.

d) Les semelles du type (4) avec armatures disposées à la fois suivant les côtés et les diagonales du carré formé par les pieux paraissent présenter un certain avantage du point de vue de la fissuration, ce qui est somme toute assez logique puisque les armatures sont réparties à la fois sur les faces latérales de la semelle et en sous-face.

A 3. Résistance aux effets de poinçonnement.

Comme nous l'avons déjà indiqué, la complexité des phénomènes observés au voisinage de la rupture sur la plupart des semelles relativement plates ne nous a pas

permis de définir avec précision les conditions de résistance aux effets de poinçonnement. Ces conditions sont liées à l'intensité des contraintes normales et dépendent, par suite, de la section des armatures inférieures et de leurs caractères mécaniques.

Il convient d'ailleurs de signaler que nous n'avons jamais obtenu de ruptures par poinçonnement au centre de la semelle, même pour des semelles assez plates. Nous avons observé, par contre, des ruptures au voisinage d'un des angles des semelles sous l'effet de la réaction du pieu correspondant avec apparition de surfaces de fissuration obliques dont la forme est d'ailleurs variable.

Nous estimons toutefois être en mesure d'affirmer que des semelles calculées par la méthode des bielles ne présentent pas de risques anormaux de rupture par effet de poinçonnement si les conditions que nous précisons plus loin relativement à l'obliquité des bielles et aux contraintes du béton sont satisfaites.

B. SEMELLES SUR TROIS PIEUX

Ces essais ont porté sur des semelles de différentes hauteurs présentant les dispositions suivantes :

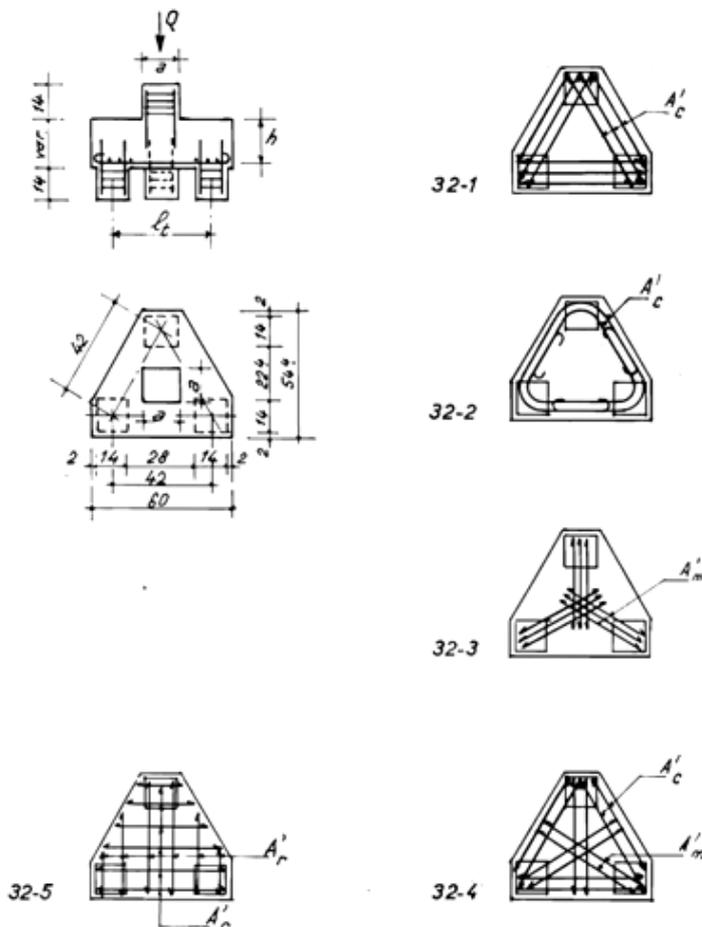


FIG. 32.

1° Armatures disposées suivant les trois côtés du triangle équilatéral ayant pour sommets les centres des sections des pieux. Ces armatures de section A'_c équilibrent un effort de traction

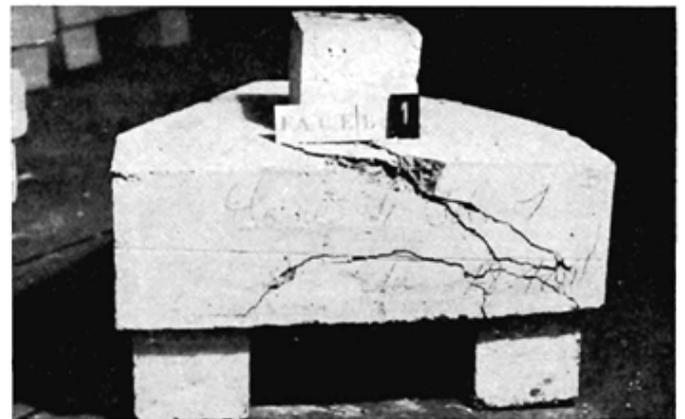
$$N'_{ac} = \frac{Ql_t}{9h} \left(1 - \frac{a}{2l_t}\right).$$

2° Armatures disposées en cerces suivant le contour latéral de la semelle. Ces armatures, de même section que les précédentes, équilibrent le même effort N'_{ac} . Comme indiqué pour les semelles à quatre pieux, la seule différence réside dans la disposition des ancrages; il n'y a qu'un recouvrement pour chacune des cerces alors que, dans le premier cas, chaque barre doit être ancrée isolément à ses deux extrémités.

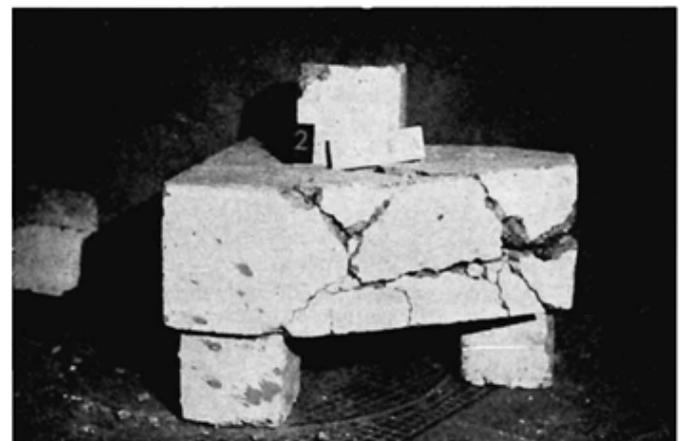
3° Armatures disposées suivant les trois médianes du triangle formé par les centres des sections des pieux. Ces armatures de section A'_m équilibrent un effort de traction

$$N'_{am} = \frac{Ql_t \sqrt{3}}{9h} \left(1 - \frac{a}{2l_t}\right).$$

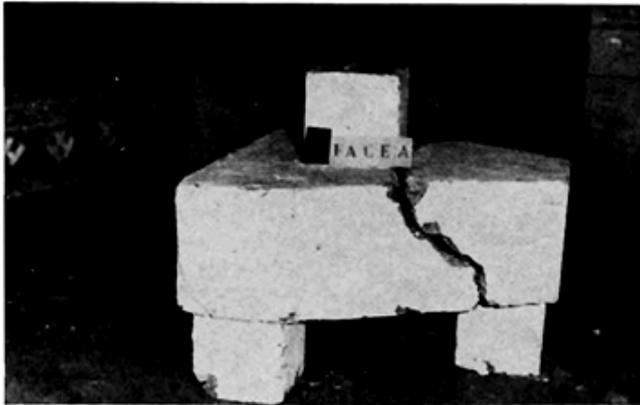
Ce système peu usité est théoriquement logique; les armatures transmettent à un noyau central de béton armé sous le poteau trois forces concourantes égales à N'_{am} qui sont en équilibre.



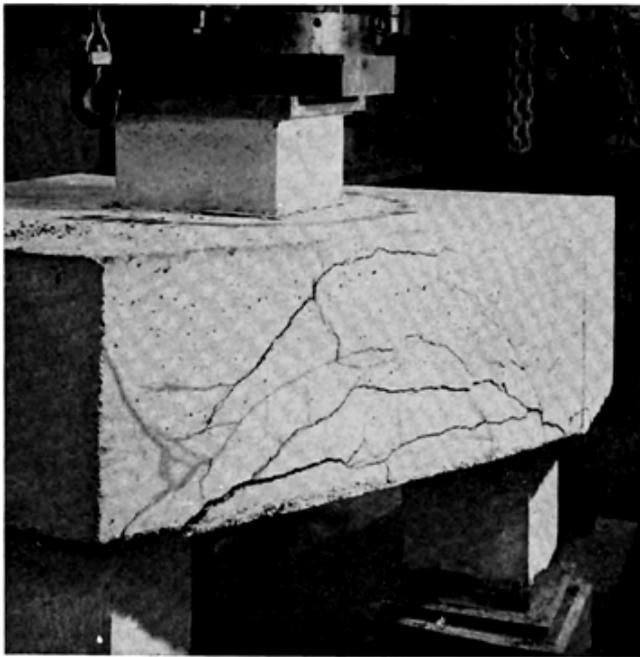
4.1. Surfaces de rupture inclinées à partir d'un pieu.



4.2. Phénomènes de rupture très complexes avec désorganisation complète de la semelle.



4,4. Rupture très brutale (armatures uniquement en quadrillage).



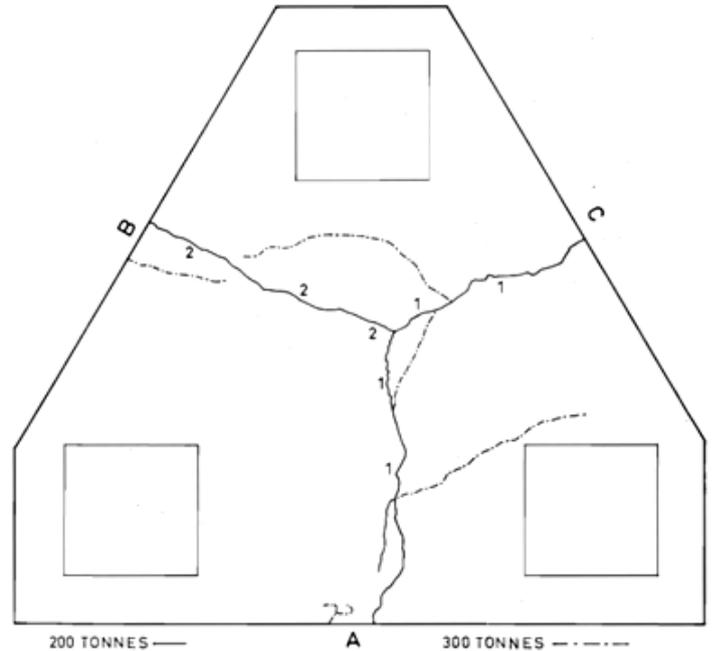
3 N 1. Les fissures dessinent les traces des voûtes de transmission des charges - Rupture par ouverture des fissures en partie basse et en sous-face.

4° Armatures disposées suivant un système mixte, les unes suivant les côtés, les autres suivant les médianes du triangle équilatéral formé par les centres des pieux.

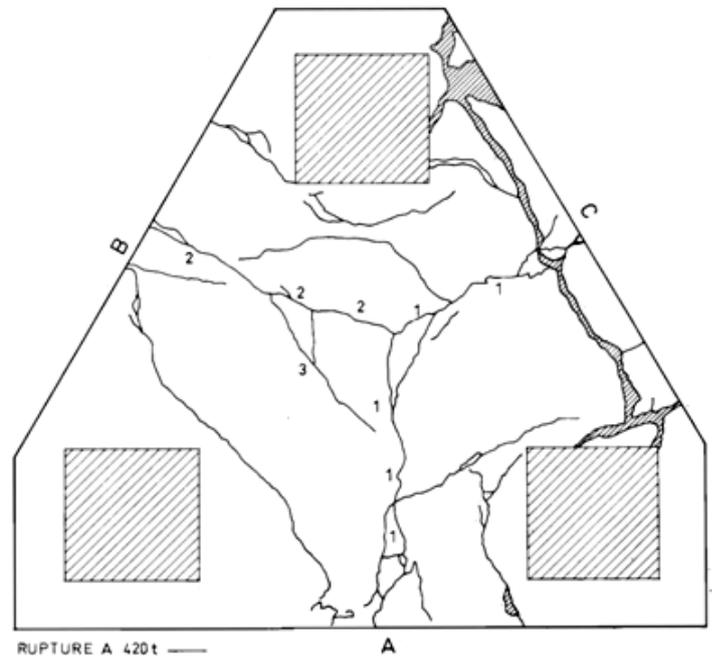
On peut encore remarquer que les poids d'armatures sont théoriquement les mêmes dans les quatre cas envisagés ci-dessus.

5° Nous avons enfin essayé une semelle comportant des armatures disposées suivant un quadrillage régulier avec des barres parallèles à un côté du triangle formé par les centres des pieux et à la hauteur correspondante.

Un tel système est *a priori* illogique dans une semelle à trois pieux; nous avons toutefois tenu à l'essayer car



3 N 1. Relevé des fissures à 200 t, 300 t.

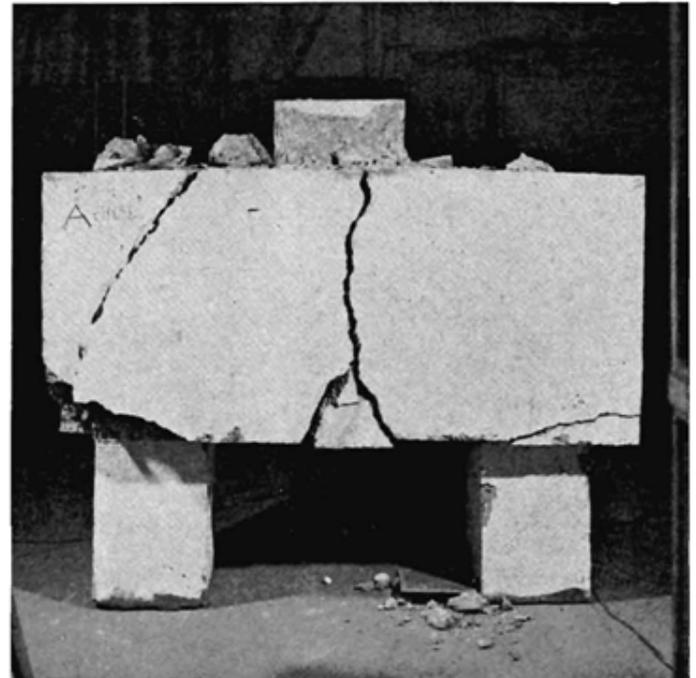


3 N 1. Relevé des fissures à 420 t (rupture).

cette solution est quelquefois proposée. La détermination des armatures ne relève pas alors de la méthode des bielles; nous avons adopté le même poids d'acier que dans les semelles de la série correspondante.



3 N 2 bis. Vue générale de la fissuration à rupture.



3 N 3 bis. Cette photographie donne une idée de la complexité des phénomènes observés lors de la rupture de certaines semelles

B 1. Sécurité à rupture.

a) En regard de la sécurité à rupture, les systèmes (1), (2) et (4) se sont révélés sensiblement équivalents, sous réserve — en ce qui concerne le système (4) — que les armatures disposées suivant les côtés soient prépondérantes.

Lorsque les armatures suivant les médianes sont prépondérantes, les charges de rupture des semelles du type (4) sont un peu plus faibles — toutes conditions égales par ailleurs — que celles des semelles (1) et (2).

b) Les semelles du type (3) avec armatures disposées uniquement suivant les médianes ont présenté des coefficients de sécurité nettement plus faibles que ceux correspondant aux semelles des types (1) et (2). Comme nous l'avons indiqué, le système considéré est théoriquement en équilibre mais il ne l'est plus dès que, pour une cause quelconque, la charge n'est pas rigoureusement centrée sur les trois pieux; c'est là sans doute l'explication de la réduction du coefficient de sécurité correspondant à cette disposition d'armatures.

c) La semelle du type (5) avec quadrillage d'armatures réparties s'est rompue sous une charge sensiblement moitié de celle des autres semelles de la même série. La rupture a été extrêmement brutale et a failli provoquer un accident. Une surface de fissuration s'est brusquement produite autour d'un des pieux et les deux armatures traversant la surface en question étaient insuffisantes pour équilibrer les efforts de traction jusqu'alors équilibrés par la résistance du béton; il en est résulté une rupture très brutale avec éjection d'une partie de la semelle.

Il apparaît donc que ce système avec quadrillage d'armatures réparties est en principe à rejeter pour les semelles à trois pieux.

d) Pour des inclinaisons de bielle sur l'horizontale voisines de 45° , les coefficients de sécurité obtenus pour

les types d'armatures (1), (2) et (4) varient dans d'assez larges limites mais restent compris entre 1,6 et 2,4 sauf cas exceptionnels sur lesquels nous reviendrons ci-après.

Les limites de validité de cette constatation nous semblent pouvoir être fixées dans le cas des semelles à trois pieux à 40° , d'une part, et 55° de l'autre.

Pour des inclinaisons des bielles fictives sur l'horizontale inférieures à 40° , on observe des coefficients de sécurité réduits correspondant à des phénomènes de rupture complexes. Pour des inclinaisons de bielles sur l'horizontale supérieures à 55° , on constate souvent un glissement des bielles de béton (effet de console courte) et la résistance des armatures n'est pas utilisée avec la pleine efficacité correspondant à la hauteur de la semelle.

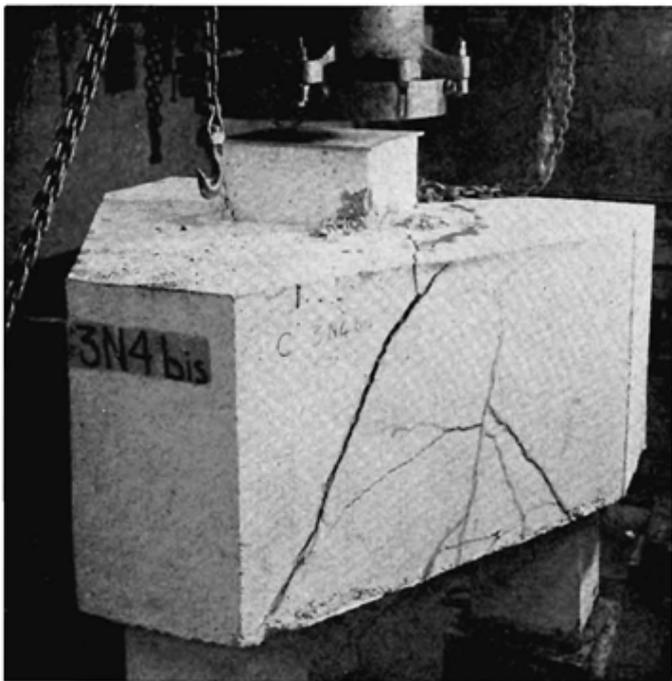
e) Même pour des hauteurs correspondant à des inclinaisons de bielles comprises entre les limites ci-dessus, on a quelquefois obtenu des coefficients de sécurité nettement inférieurs à ceux indiqués ci-dessus en d) pour des semelles comportant des sections d'armatures relativement élevées. Là encore, nous pensons être en mesure d'affirmer que de telles ruptures ne peuvent se produire si la contrainte du béton des bielles ne dépasse pas certaines limites fixées au chapitre des dispositions constructives.

B 2. Fissuration.

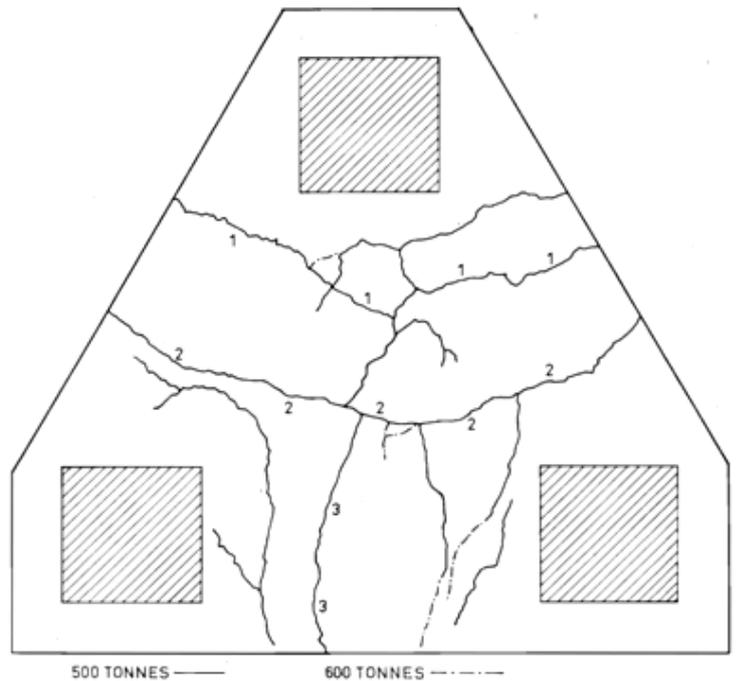
En ce qui concerne la fissuration des faces latérales, le système (1) a donné des résultats moins bons que le système (2) car les barres disposées suivant les côtés du triangle formé par les pieux sont plus éloignées des faces latérales que les armatures en cerces.

Pour la même raison, le système (3) a donné des résultats très défavorables.

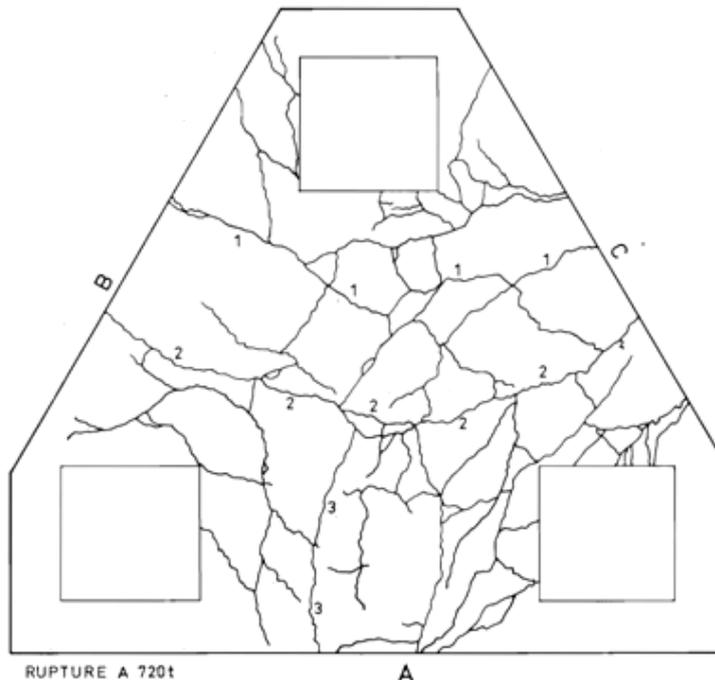
Le système le plus favorable est le système (4) qui comporte à la fois des armatures sur les faces latérales et des barres se croisant au centre de la semelle.



3 N 4 bis. Rupture par fissure inclinée.



3 N 4 bis. Relevé des fissures à 500 t et 600 t.



3 N 4 bis. Relevé des fissures à 720 t (rupture).

Les systèmes (1) et (2) peuvent être améliorés par l'adjonction d'un quadrillage d'armatures au milieu de la semelle qui a pour effet de retarder ou limiter la fissuration en sous-face.

B 3. Conditions de résistance aux effets de poinçonnement.

Comme pour les semelles à quatre pieux, nous n'avons pas observé de poinçonnement au centre des semelles

mais plutôt des fissurations suivant des surfaces inclinées au voisinage d'un angle de la semelle, par l'effet de la réaction du pieu correspondant.

Plus encore que pour les semelles à quatre pieux, les essais que nous avons effectués ne nous ont pas permis de préciser les conditions de résistance à ces effets de poinçonnement. Même avec des semelles relativement hautes correspondant à des inclinaisons de bielles supérieures à 45°, nous avons observé des fissures suivant des surfaces inclinées partant du voisinage d'un pieu. Tou-

tefois, nous estimons être en mesure d'affirmer que des semelles calculées par la méthode des bielles ne présentent pas de risques anormaux de rupture par effet de poinçonnement si les conditions que nous précisons plus loin relativement à l'obliquité des bielles et aux contraintes du béton sont satisfaites.

C. SEMELLES SUR DEUX PIEUX

L'étude de ces semelles est reportée au chapitre suivant concernant les essais en vraie grandeur, en raison du nombre restreint d'essais sur modèles réduits.

II. SECONDE SÉRIE D'ESSAIS SUR SEMELLES EN VRAIE GRANDEUR

Les premières séries d'essais effectuées sur des modèles réduits de semelles nous ont permis de procéder à un nombre relativement important d'essais; une fois le dispositif expérimental mis au point, les dépenses se trouvaient limitées en raison du coût peu élevé de différentes semelles et des facilités de mise en place.

Il est apparu toutefois aux membres des Commissions des organismes professionnels chargés de promouvoir les recherches appliquées qu'il convenait de compléter ces premiers essais par d'autres, effectués cette fois sur des semelles en vraie grandeur. C'est l'objet de la deuxième série d'essais exécutés de 1958 à 1961.

Il ne pouvait être question, dans ce second programme, de procéder à des séries aussi complètes que dans le premier en raison du coût élevé des éléments d'essai et des essais eux-mêmes; ce n'était d'ailleurs pas indispensable, les essais sur modèles réduits ayant déjà permis de répondre à certaines questions, notamment à celles concernant l'efficacité des différents systèmes d'armatures.

Nous avons en définitive essayé :

- 8 semelles sur quatre pieux;
- 8 semelles sur trois pieux;
- 6 semelles sur deux pieux.

Les résultats des essais sont donnés dans les tableaux 4, 5 et 6 en annexe.

A. ESSAIS DE SEMELLES SUR QUATRE PIEUX

Cette série de huit semelles comprenait :

- un premier groupe de quatre semelles dont la hauteur correspondait à une inclinaison des bielles fictives sensiblement égale à 45° :
 - deux avec armatures suivant les quatre côtés complétées par un quadrillage au centre de la semelle;
 - deux avec système mixte : armatures suivant les quatre côtés et suivant les diagonales;
- un second groupe de quatre semelles dont la hauteur correspondait à une inclinaison des bielles fictives voisine de 55° avec les deux mêmes systèmes d'armatures que ci-dessus.

Dans chaque cas, une première semelle était armée d'acier doux, une seconde d'acier crénelé.

Les dimensions des semelles ont été définies pour assurer la transmission de la charge d'un poteau carré de $50 \times 50 \text{ cm}^2$ à quatre pieux de section carrée $35 \times 35 \text{ cm}^2$

distants entre axes de 1,20 m. Le cube de béton de chaque semelle était de l'ordre de $2,6 \text{ m}^3$ et leur poids dépassait 6,5 t.

Les semelles ont été essayées à l'intérieur du tunnel précontraint de la « machine de charge » du C.E.R.E.B.T.P. Les charges ont été appliquées à l'aide du vérin de 2 000 t.

Pour permettre la libre rotation et le libre déplacement des sections inférieures des pieux, nous avons prévu initialement d'utiliser des rotules constituées par de grosses billes en acier traité et des roulements à billes suivant un dispositif analogue à celui employé dans les essais sur modèles réduits, mais cette solution soulevait de nombreuses difficultés. Finalement, sur les conseils de M. Lebel, nous avons prévu sous chaque pieu quatre feuilles de Néoprène de 8 mm d'épaisseur. Ce dispositif, beaucoup plus simple que le dispositif initial, s'est révélé efficace et a donné satisfaction.

Au cours des essais, on a relevé le développement des fissures non seulement sur les faces latérales, mais également sur la face inférieure de la semelle qui était accessible.

On a noté pour différentes valeurs de la charge la longueur des fissures et leur ouverture mesurée à l'aide d'un oculaire micrométrique. A différents paliers de chargement, des calques de la fissuration en sous-face ont été relevés.

On a évidemment noté les processus de rupture et les charges ultimes qui ont été comprises entre 650 et 900 t. Après essais, les semelles ont été photographiées sur les quatre faces, dans leur état de rupture.

Bien entendu, des prélèvements de béton sous forme d'éprouvettes cubiques et prismatiques ont été effectués lors du bétonnage et ont été rompus par écrasement ou flexion le jour même des essais de la semelle.

De même, des éprouvettes ont été prélevées dans les différentes barres d'armatures et soumises aux essais de traction afin que les caractères mécaniques du métal des armatures soient correctement repérés pour permettre l'interprétation des essais. A la suite d'un incident qui s'est produit au sujet de certains essais, nous ne saurions trop recommander aux ingénieurs qui entreprennent des études expérimentales sur des éléments de béton armé de passer commande des barres avec des surlongueurs permettant le prélèvement direct d'éprouvettes sur les barres destinées à la fabrication des éléments; sinon, on risque de procéder à des essais de traction sur des « chutes » qui n'ont rien de commun avec le métal des armatures utilisées!

Les résultats obtenus ont confirmé, dans leur ensemble, ceux des essais sur modèles réduits.

Les coefficients de sécurité définis comme précédemment en tant que rapport de la charge correspondant à la rupture à la charge calculée par la méthode simplifiée des bielles pour une contrainte des armatures égales à $\frac{3}{5}$ de la limite élastique, conformément aux Règles BA 1960, varient entre 1,67 et 2,15, la valeur moyenne étant de 1,87, chiffre un peu plus faible que ceux obtenus en moyenne dans les essais sur modèles réduits (1).

(1) Si l'on se réfère non plus à la méthode simplifiée mais à la méthode de M. Frémy les coefficients de sécurité ci-dessus

doivent être multipliés par le rapport $\frac{1 - \frac{1}{3} \left(\frac{a}{l}\right)^2}{1 - \frac{1}{2} \frac{a}{l}}$; ils deviennent donc compris entre 1,99 et 2,56 avec moyenne de 2,23.

Les résultats obtenus avec la disposition « armatures suivant les quatre côtés » et « armatures en quadrillage » sont légèrement supérieurs à ceux correspondant à la disposition « mixte » « armatures suivant les côtés et armatures suivant les diagonales » (1,95 contre 1,79).

De même, les coefficients de sécurité obtenus avec les barres crénelées ont été légèrement supérieurs à ceux obtenus avec les aciers lisses (1,92 contre 1,81).

En ce qui concerne la fissuration, il faut noter que, sous des charges qui sont de l'ordre des charges de service, on a relevé des fissures atteignant — et même dans certains cas dépassant — le demi-millimètre, malgré l'excellente qualité des bétons à la traction. Cette constatation pose un grave problème, d'autant plus que les semelles sur pieux sont généralement enterrées et donc en milieu humide. Il faudra donc rechercher des améliorations de ferrailage qui permettent de réduire l'importance des phénomènes de fissuration observés au cours de ces essais.

Nous devons signaler que les semelles avec armatures à haute adhérence (ronds crénelés) n'ont pas présenté d'avantages par rapport aux semelles avec armatures en acier lisse, sous leurs charges d'utilisation respectives; on serait même tenté de conclure que les armatures à haute adhérence sont moins favorables que les armatures en acier lisse; il est vrai que les premières ne comportaient pas de dispositifs d'ancrage et qu'il a dû se produire de légers glissements des barres.

Nous rappelons que les dispositions d'armatures étaient de deux types :

1° armatures disposées suivant les côtés + quadrillage uniformément réparti placé sur les armatures précédentes;

2° armatures disposées suivant les côtés + armatures disposées suivant les diagonales au-dessus des précédentes.

Nous n'avons pas noté d'avantages d'un système par rapport à l'autre.

Les premières fissures apparaissant sur les faces latérales étaient généralement verticales et se produisaient sensiblement au milieu de l'intervalle entre les pieux. La charge croissant, on a vu apparaître d'autres fissures souvent inclinées et qui venaient se raccorder avec les premières.

En sous-face, on a souvent relevé des fissures principales en croix, conformément à la théorie de rupture des plaques reposant sur quatre points d'appui; dans d'autres cas, on a observé des fissures sensiblement parallèles à la direction d'une des diagonales de la semelle.

Les charges de rupture Q_u observées ont toujours été supérieures à celles Q_e calculées par application de la méthode des bielles pour une contrainte des armatures égale à la valeur moyenne de la limite élastique⁽¹⁾; on peut donc dire que la rupture des semelles s'est produite par excès de contrainte des armatures inférieures. Toutefois, les phénomènes observés au moment de la rupture sont très complexes, surtout pour les semelles les moins hautes (bielles inclinées à 45°) comme le montrent certaines photographies annexées. Souvent, il s'est produit brusquement, en fin d'essai, des fissures inclinées

(1) Sauf pour la semelle 4 N 4 où le rapport $\frac{Q_u}{Q_e}$ ressort à 0,998, soit pratiquement l'unité. Le rapport $\frac{Q_u}{Q_e}$ varie entre 1,66 et 2,135 un seul résultat est supérieur à 2.

et, dans certains cas, il semble que des glissements des armatures se soient manifestés, avec des armatures crénelées qui, rappelons-le, ne comportaient pas de dispositifs d'ancrage à leurs extrémités.

B. ESSAIS DE SEMELLES SUR TROIS PIEUX

Cette série de huit semelles comprenait :

— un premier groupe de quatre semelles dont la hauteur correspondait à une inclinaison des bielles fictives voisine de 40° :

— deux avec armatures suivant les côtés (ou en cerces), complétées par un quadrillage au centre de la semelle;

— deux avec système mixte : armatures suivant les côtés (ou en cerces) et suivant les médianes;

— un second groupe de quatre semelles dont la hauteur correspondait à une inclinaison des bielles fictives voisine de 52° avec les deux mêmes systèmes d'armatures que ci-dessus.

Dans chaque cas, une première semelle était armée d'acier doux, une seconde d'acier « Tor à verrous ». Mais il importe de noter une différence essentielle. Avec les barres en acier doux lisses, devant la quasi-impossibilité que nous avons rencontrée de disposer des barres suivant les côtés en les ancrant au droit de chaque pieu en raison de l'enchevêtrement des ancrages, nous avons prévu des armatures en « cerces » dont les recouvrements se faisaient plus commodément dans les parties entre les pieux. Par contre, pour les armatures à haute adhérence (Tor à verrous), nous avons conservé la disposition des armatures suivant les côtés, les barres étant ancrées par scellement droit.

Les dimensions des semelles ont été définies pour assurer la transmission de la charge d'un poteau carré de 45 × 45 cm² à trois pieux de section carrée 35 × 35 cm² distants entre axes de 1,20 m. Le cube de béton de chaque semelle était de l'ordre de 1,6 m³ pour les semelles hautes et leur poids de 4 t.

Comme pour les semelles sur quatre pieux, les essais ont eu lieu à l'intérieur du tunnel précontraint de la machine de charge du C.E.R.E.B.T.P., les charges étant appliquées à l'aide du vérin de 2 000 t.

Le dispositif d'appui sur feuilles de Néoprène qui avait donné satisfaction pour la semelle à quatre pieux a été conservé.

Les résultats obtenus ont, dans leur ensemble, confirmé ceux des essais sur modèles réduits.

Les coefficients de sécurité définis comme précédemment varient entre 1,638 et 2,585; la valeur moyenne est de 2,05, chiffre légèrement supérieur à celui trouvé dans les essais sur modèle réduits et avec les semelles à quatre pieux⁽¹⁾.

(1) Si l'on se réfère non plus à la méthode simplifiée des bielles mais à la méthode de M. Frémy, les coefficients de sécurité indi-

qués ci-dessus doivent être multipliés par le rapport $\frac{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{a}{l_i}\right)^2}{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{a}{l_e}\right)^2}$;

ils deviennent donc compris entre 1,87 et 2,96 avec moyenne de 2,34.

Les résultats obtenus avec des armatures disposées en cerces (barres lisses) ont été nettement supérieurs à ceux correspondant aux armatures disposées suivant les trois côtés (barres Tor) coefficients de sécurité 2,25 contre 1,85. Cette constatation ne doit pas être imputée à la qualité de l'acier mais au fait que les recouvrements assez largement prévus donnaient sur une certaine longueur entre les pieux une section utile supérieure à celle prise en compte dans les calculs.

Les charges de rupture des semelles comportant des armatures suivant les côtés ou en cerces et un quadrillage réparti ont donné des coefficients de sécurité plus élevés que celles comportant des armatures suivant les côtés ou en cerces et des armatures suivant les médianes (2,20 contre 1,86). Il faut noter que, dans les premières, les armatures du quadrillage ne sont pas mises en compte dans les calculs.

En ce qui concerne la fissuration, on peut encore noter que, sous des charges de l'ordre des charges de service, on a relevé des fissures dont l'ouverture atteint le demi-millimètre. Il convient donc de rechercher des améliorations de ferrailage susceptibles de réduire l'importance des phénomènes de fissuration observés aux essais.

Dans certains cas, l'apparition et le développement des fissures ont été progressifs; dans d'autres, les fissures sont apparues brusquement après quelques minutes de chargement sous une charge déterminée; elles présentaient une grandeur et une ouverture notables.

Il est difficile de déduire des constatations faites, assez dispersées, des conclusions générales motivées. Il apparaît cependant que les armatures en cerces présentent un certain avantage par rapport aux armatures suivant les côtés en ce qui concerne les fissures des faces latérales, ce qui est d'ailleurs normal puisque les armatures en cerces sont plus proches de ces faces.

En ce qui concerne la fissuration en sous-face, les armatures en quadrillage réparti paraissent présenter un léger avantage par rapport aux armatures suivant les médianes, sans doute en raison du fait que les premières sont plus proches de la face inférieure de la semelle.

Les phénomènes observés à la rupture sont extrêmement complexes. Les premières fissures apparues sur les faces latérales sont en général sensiblement verticales, celles apparaissant en sous-face sont normales aux côtés de la semelle.

Par la suite, il se produit des fissures inclinées partant d'un angle de la semelle et s'étendant vers la partie supérieure.

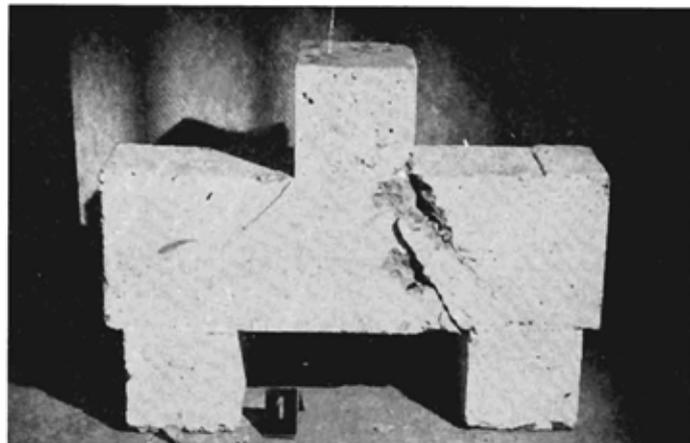
Dans certains cas, la rupture affecte un angle de la semelle sous l'effet de la réaction d'un pieu. Il y a eu souvent, avec les armatures à haute adhérence qui ne comportaient pas de dispositifs d'ancrages courbes à leurs extrémités, glissement relatif des armatures et du béton. Dans d'autres cas, avec des armatures en cerces, il semble que se soient formées à l'intérieur de la semelle des voûtes sous-tendues par les armatures inférieures (apparition de fissures de courbure très tendue entre les pieux). Quoi qu'il en soit, les charges correspondant à la rupture sont telles que la contrainte des armatures calculée par la méthode des bielles atteint la limite élastique du métal; on peut donc admettre que les ruptures se sont produites alors que la résistance du métal était épuisée.

C. ESSAIS DE SEMELLES SUR DEUX PIEUX

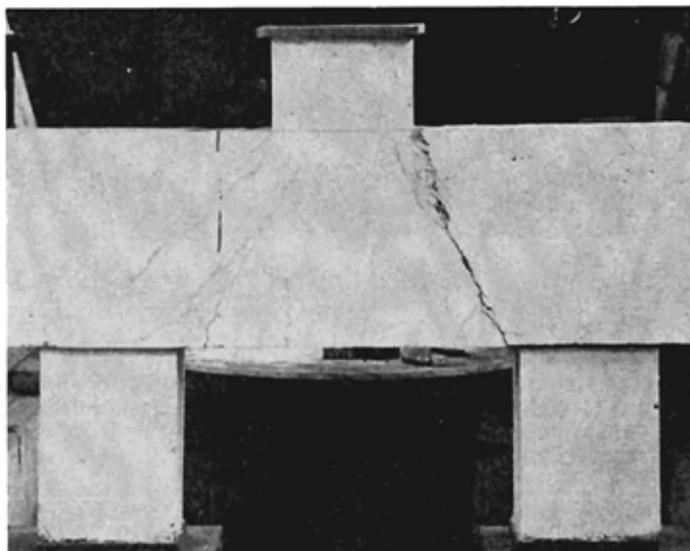
Les essais ont porté sur six semelles :

- deux de 55 cm de hauteur totale (inclinaison des bielles voisine de 45°);
- deux de 75 cm de hauteur (inclinaison des bielles voisine de 55°);
- deux de 95 cm de hauteur (inclinaison des bielles voisine de 60°).

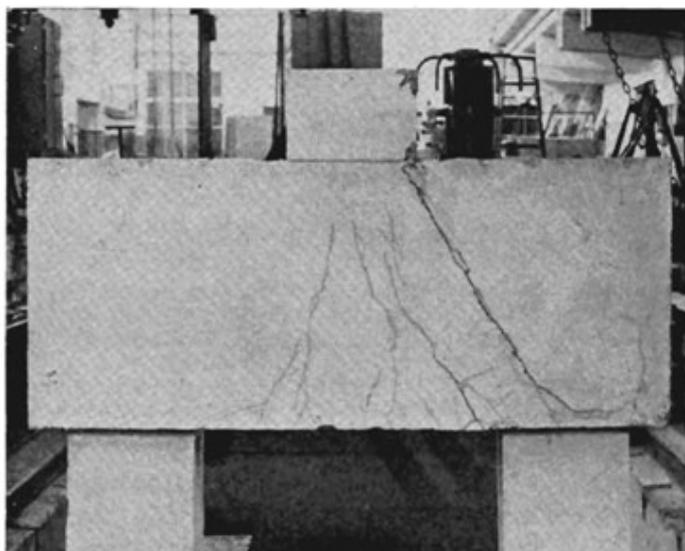
Dans chaque série, une semelle était armée de 6 \varnothing 32 doux lisses terminés par des crosses, une deuxième de 5 \varnothing 32 crénelé sans crochets aux extrémités. Les semelles assuraient la transmission de la charge d'un poteau de section carrée ($35 \times 35 \text{ cm}^2$) à deux pieux également de section carrée ($35 \times 35 \text{ cm}^2$); la largeur des semelles était de 40 cm. La portée entre axes des pieux était de 1,20 m; les armatures supérieures étaient constituées de 2 \varnothing 8; il n'y avait pas d'armatures transversales, sauf 2 cadres \varnothing 8 au droit de chaque pieu.



5 a. Fissures de rupture dessinant la bielle écrasée en tête.



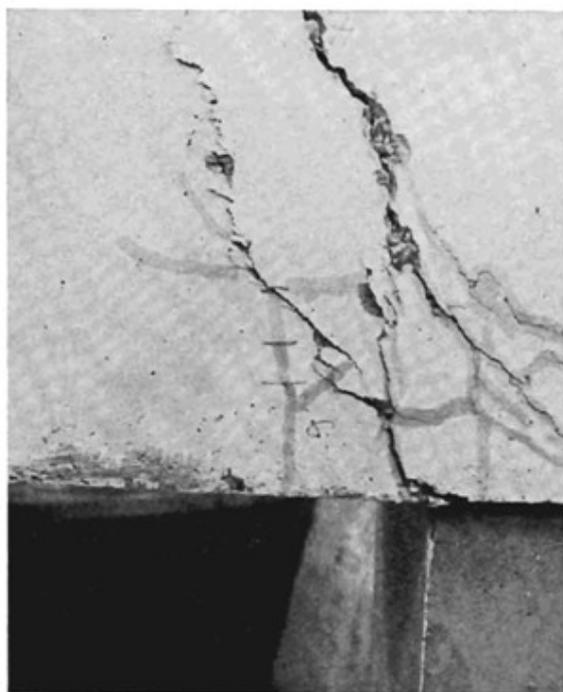
2 N 1. Rupture par écrasement d'une bielle près du poteau ($\theta = 44^\circ$).



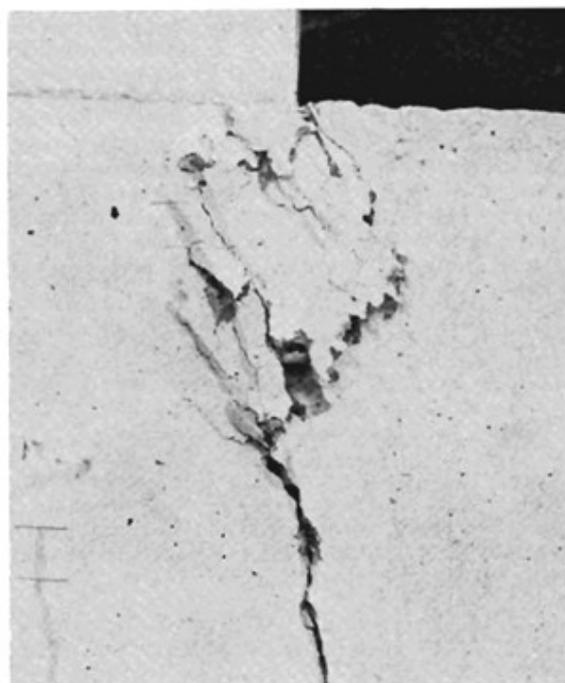
2 N 2. Rupture par écrasement d'une bielle près du poteau ($\theta = 54^\circ$).



2 N 3. Écrasement simultané de la bielle en haut et en bas ($\theta = 60^\circ$).



2 N 3. Détail écrasement près du pieu.



2 N 3. Détail écrasement près du poteau.

Les charges de rupture sont indiquées sur le tableau.

Les valeurs des rapports charges de rupture / charge calculée par la méthode simplifiée des bielles pour une contrainte de l'acier égale à la limite élastique ($\sigma'_s = \sigma_{e'}$) sont pratiquement comprises entre 0,89 et 1,01 (moyenne 0,94).

Les valeurs sont donc au plus égales à l'unité et l'on peut dire que la résistance à la traction de l'armature n'a pas été totalement épuisée; la méthode des bielles sous sa forme simplifiée ne paraît donc pas s'appliquer sans réserve aux semelles sur deux pieux.

L'application de la méthode de M. Fremy conduit à un effort dans les armatures égal à

$$\frac{Ql_t}{4h} \left(1 - \frac{a^2}{3l_t^2}\right) \text{ au lieu de } \frac{Ql_t}{4h} \left(1 - \frac{a}{2l_t}\right).$$

Avec les données correspondant aux essais $a = 0,35$, $l_t = 1,20$, la méthode de M. Fremy conduit à un effort dans les armatures qui est 1,13 fois celui trouvé par la méthode simplifiée.

Si donc on considère les rapports charge de rupture / charge calculée par la méthode de M. Fremy pour

$\sigma'_s = \sigma'_s$, leurs valeurs sont comprises entre 1,02 et 1,15.

A l'exception d'une seule, toutes les ruptures se sont produites par écrasement du béton le long d'une fissure inclinée joignant une face du poteau au pieu voisin; la fissure aboutit soit au nu intérieur du pieu, soit dans l'axe du pieu, soit vers la face extérieure du pieu. La seule rupture faisant exception est celle de la semelle de plus faible hauteur armée de ronds crénelés; il s'est produit un décollement des armatures inférieures dont la longueur d'ancrage à partir du nu intérieur du pieu était de l'ordre de $12 \varnothing$ seulement; ce décollement a provoqué une fissure sensiblement inclinée à 45° et a entraîné la ruine de la semelle.

On peut noter que les contraintes de cisaillement τ_u calculées pour la charge de rupture par la formule classique $\tau_u = \frac{T_u}{b_0 z} = \frac{Q_u}{2 b_0 z}$ avec $z = \frac{7}{8} h$ sont en moyenne très élevées; elles varient de 60 kg/cm^2 à 107 kg/cm^2 , donc dans de larges limites; il est vrai que les résistances des

bétons à la traction, dans l'ensemble très bonnes, sont elles-mêmes très variables — les rapports $\frac{\tau_u}{\sigma}$ varient de 2,27 à 3,48.

Comme les ruptures se sont généralement produites par écrasement des bielles de béton assurant la transmission de la charge, nous avons calculé la contrainte de compression correspondante par la formule

$$\sigma_{bu} = \frac{Q_u}{B \sin^2 \theta}$$

(θ angle d'inclinaison de l'axe de la bielle sur l'horizontale) et nous l'avons comparée à la résistance à la compression mesurée sur cubes. Nous avons trouvé des valeurs du

rapport $\frac{\sigma_{bu}}{\sigma_{j \text{ cubes}}}$ comprises entre 0,856 et 1,281 avec valeur moyenne légèrement supérieure à 1. Si l'on se réfère à la résistance sur cylindres, les valeurs du rapport $\frac{\sigma_{bu}}{\sigma_{j \text{ cylindres}}}$ sont en moyenne de 1,20.

Avant de clore ce compte rendu des essais, nous tenons à rendre un hommage ému à la mémoire de J. Chefdeville, Chef de Service au C.E.R.E.B.T.P., qui a dirigé ces différents programmes d'essais avec sa conscience et sa compétence habituelles. Nous adressons nos remerciements à M. Festa et à ses collaborateurs qui ont assumé la lourde tâche de la réalisation de ces essais et de la rédaction des procès-verbaux ainsi qu'à M. Czitrom, Ingénieur de la Socotec qui nous a aidé à dépouiller les résultats.

IV. — DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

IV. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Généralités

1. Les efforts transmis aux semelles sur pieux sont assez fréquemment évalués au début de l'étude du projet d'un bâtiment avec une certaine imprécision. Celle-ci résulte du fait que le système de poutraison assurant la transmission des charges verticales n'est pas toujours parfaitement défini au moment de l'étude d'avant-projet, tant dans ses dispositions que dans l'équarrissage des éléments. Certaines surcharges permanentes sont fréquemment sous-estimées par les calculateurs (forme de pente des terrasses, cloisons de distribution). Par contre, les surcharges agissant sur les fondations sont généralement plus faibles que celles prises en compte, même en application des règles usuelles de « dégression » des charges, tout au moins dans les bâtiments autres que les bâtiments industriels.

2. Il convient de tenir compte des écarts qui résultent de l'implantation réelle des pieux par rapport à l'implantation théorique. Il n'est pas besoin d'insister sur ce point; il suffit de réfléchir aux conditions dans lesquelles sont mis en fiche et battus les pieux, qu'ils soient moulés d'avance ou moulés dans le sol, pour concevoir qu'en fin de battage le centre d'un pieu peut se trouver à quelque 10 ou 15 cm du centre d'implantation théorique.

Or les semelles sur pieux sont des pièces relativement courtes et les écarts d'implantation se trouvent avoir des répercussions importantes sur la détermination des semelles, et en particulier sur la section d'armatures.

Il n'existe, pour remédier à ces inconvénients, qu'une solution : il convient de faire un relevé de l'implantation réelle et d'établir le projet des semelles à partir de ce relevé.

3. Dans la méthode des bielles, les armatures sont déterminées pour équilibrer les efforts de traction résultant de la décomposition des forces obliques transmises par les bielles. Si l'on se réfère aux Règles BA 1960, il convient donc d'adopter comme contrainte admissible des armatures celle relative à la sollicitation de traction simple, soit $\bar{\sigma}_a = \frac{3}{5} \sigma'_{ak}$ et non celle relative à la sollicitation de

flexion simple, soit $\bar{\sigma}_a = \frac{2}{3} \sigma'_{ak}$; Les essais ont montré que si les semelles dont les armatures sont calculées par la méthode des bielles avec la contrainte $\bar{\sigma}_a = \frac{3}{5} \sigma'_{ak}$ présentent, en général, des coefficients de sécurité au moins

(*) Si l'on se réfère au titre VI du fascicule 61 du C.P.C. du Ministère des Travaux Publics on est autorisé à adopter comme contrainte admissible des armatures tendues $\bar{\sigma}_a = \frac{2}{3} \sigma'_{ak}$, aussi bien dans les pièces sollicitées en traction simple que dans les pièces sollicitées en flexion simple. Il ne faut alors pas perdre de vue que les coefficients de sécurité à la rupture des semelles ainsi calculées pourraient ne pas être supérieurs à 3/2. La même remarque s'appliquera sans doute lorsqu'on se référera au règlement unifié du béton armé en cours de rédaction qui reprendra les mêmes contraintes admissibles que le fascicule 61.

égaux à $\frac{5}{3}$, il risquerait de ne pas en être ainsi pour des semelles calculées avec $\bar{\sigma}_a = \frac{2}{3} \sigma'_{ak}$ (*).

4. Nous pensons également qu'il convient d'appeler l'attention des projeteurs sur l'importance relative des valeurs de la distance d'entre le niveau moyen des armatures et la face inférieure de la semelle — en raison de la superposition, dans la majorité des cas, de plusieurs lits de barres de gros diamètre.

5. Il convient donc de ne pas sous-estimer la valeur de d' à prendre en compte; si l'on adopte une valeur d' trop faible, on a des bielles plus inclinées qu'on ne le suppose et la contrainte des armatures risque d'être assez notablement supérieure à celle admise.

Nous avons vu que certains essais avaient été effectués sur des semelles en vraie grandeur avec armatures à haute adhérence, sans crochets à leurs extrémités; des décollements ont alors été observés dans certains cas; nous estimons donc qu'il convient de prévoir systématiquement des crochets aux extrémités des barres, aussi bien avec les armatures à haute adhérence qu'avec les armatures en acier doux lisse. Par « crochets », nous entendons des « crochets normaux » ou « crosses » et des « crochets avec retours à 45° »; sauf justifications particulières, les rayons de courbure des parties courbes doivent être d'au moins 3 \varnothing pour les barres en acier doux et 5 \varnothing pour les barres de caractères mécaniques plus élevés.

Nous pensons qu'il convient d'éviter, dans les barres très sollicitées des semelles, des ancrages par simple coude à 90° en raison du risque d'éclatement du béton à l'extrémité de la partie courbe (*), à moins que les coudes ne se trouvent à l'intérieur d'une zone armée transversalement par des cerces.

6. Pour réduire le diamètre des barres et gagner ainsi quelques centimètres sur la valeur de d' , il y a généralement intérêt à utiliser dans les semelles des barres à haute limite élastique; mais, comme nous l'avons vu, il convient que ces barres puissent facilement être façonnées à leurs extrémités.

Ces principes généraux étant rappelés, nous passons en revue les dispositions à adopter pour les différents types de semelles.

Semelles sur deux pieux

Nous avons vu que la stricte application de la méthode simplifiée peut conduire à des coefficients de sécurité inférieurs à ceux requis. Il convient donc de déterminer l'effort N'_a que doivent équilibrer les armatures inférieures

— soit en appliquant la formule

$$N'_a = \frac{Ql_t}{4h} \left(1 - \frac{a^2}{3l_t^2} \right)$$

résultant de l'étude de M. Frémy,

(*) Le titre VI du fascicule 61 appelle maintenant l'attention des ingénieurs sur les inconvénients de cette disposition aux commentaires (39-3,3).

— soit si l'on veut se référer à la théorie simplifiée en majorant forfaitairement l'effort

$$N'_s = \frac{Q l_t}{4 h} \left(1 - \frac{a}{2 l_t} \right)$$

de 15 %, cette valeur correspondant aux dispositions les plus usuelles^(*).

La hauteur de la semelle doit être telle que l'inclinaison sur l'horizontale des bielles fictives (en méthode simplifiée) soit au moins égale à 45°. On doit donc avoir

$$h \geq 0,50 \left(l_t - \frac{a}{2} \right)$$

En réalité, des semelles avec bielles à 45° sont très plates et il est préférable de choisir une hauteur plus grande, à moins d'impossibilité absolue.

Nous avons vu toutefois qu'avec des semelles relativement hautes on risque le glissement des bielles de béton au voisinage du poteau. On peut admettre qu'il convient de limiter l'inclinaison des bielles à 55° sur l'horizontale.

Nous conseillons donc de prendre comme hauteur utile de la semelle une valeur voisine de

$$h = 0,70 \left(l_t - \frac{a}{2} \right)$$

Nous donnons ci-après, pour différentes valeurs du rapport $\frac{a}{l_t}$ les valeurs de h en fonction de l_t et celles de N'_s en fonction de Q par la formule de M. Frémy :

$\frac{a}{l_t}$	0,2	0,3	0,4	0,5
$h =$	$0,63 l_t$	$0,595 l_t$	$0,56 l_t$	$0,525 l_t$
$N'_s =$	$\frac{Q}{2,55}$	$\frac{Q}{2,45}$	$\frac{Q}{2,36}$	$\frac{Q}{2,29}$

Il est évidemment possible de prévoir des semelles de hauteur supérieure à $h = 0,70 \left(l_t - \frac{a}{2} \right)$, mais il est alors prudent de déterminer la valeur de N'_s par les formules correspondant à $h = 0,70 \left(l_t - \frac{a}{2} \right)$ car, avec des bielles trop inclinées, la résistance des barres peut ne pas être utilisée en totalité.

Deux autres conditions doivent être vérifiées :

1) La contrainte de cisaillement $\tau_s = \frac{T}{b_0 z} = \frac{Q}{2 b_0 z}$

(*) Cette majoration de la valeur de N'_s résultant de l'application de la méthode simplifiée pourrait ne pas s'avérer nécessaire, en certains cas, si des essais complémentaires, effectués notamment sur des semelles comportant des pourcentages d'armatures plus réduits légitimaient la méthode simplifiée, mais en attendant les résultats de tels essais complémentaires nous pensons qu'il est prudent de s'en tenir aux règles annoncées. Il convient d'ailleurs de noter que les sections d'armatures ainsi déterminées sont inférieures à celles auxquelles conduirait l'application des méthodes de calcul concernant les poutres de grande hauteur définies par les Règles BA 1960.

(b largeur de la semelle, z bras de levier pris égal à $\frac{7}{8} h$) peut atteindre une valeur élevée mais ne doit pas dépasser $1,2 \sigma'_t$ (σ'_t , résistance à la traction du béton)^(*).

Si cette condition n'est pas vérifiée, il faut disposer des barres pliées si l'on ne peut accroître la hauteur de la semelle.

2) La contrainte du béton dans les bielles doit être limitée par les inégalités suivantes :

$$\sigma_b = \frac{Q}{B \sin^2 \theta} < 0,6 \sigma_c$$

$$\sigma_{b_1} = \frac{Q}{2 B_1 \sin^2 \theta} < 0,6 \sigma_c$$

dans lesquelles B est l'aire de la section du poteau ;

B_1 l'aire de la section d'un pieu ;

θ l'inclinaison de l'axe des bielles fictives en théorie simplifiée sur l'horizontale ;

σ_c la résistance à la compression mesurée sur éprouvettes cylindriques ($h = 2 \varnothing$)

On prendra en principe $\sigma_c = \sigma_{28}$.

En raison des écarts possibles d'implantation, les axes des pieux et du poteau peuvent ne pas être dans un même plan vertical ; il est de bonne construction de disposer des longrines perpendiculaires au plan vertical moyen de la semelle pour équilibrer, par leur résistance à la flexion, les moments que produirait l'excentricité de la charge par rapport au plan vertical contenant les axes des pieux.

De toute façon, il est bon de conférer à ces semelles une certaine résistance à la torsion en disposant :

1° des armatures supérieures (fig. 33) dont la section doit être de l'ordre de $1/8$ à $1/5$ de celle des armatures inférieures, la valeur la plus faible ne devant être admise que lorsque les conditions d'exécution sont très rigoureuses en ce qui concerne la précision des implantations (pieux forés de grands diamètres) ;

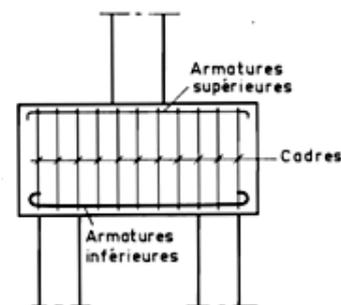


FIG. 33.

2° des cadres entourant barres inférieures et barres supérieures sur toute la longueur de la semelle (fig. 33). Il nous semble que pour les semelles les moins chargées il convienne de prévoir au minimum des cadres en $\varnothing 10$ tous les 12 cm ; pour des semelles transmettant des charges de l'ordre de 80 t par pieu, il faudrait au moins des doubles cadres de $\varnothing 10$ tous les 10 cm et pour des semelles

(*) Calculée par la formule $\frac{3,6 M_u}{b^2}$ à partir du moment de rupture M_u par flexion d'éprouvettes prismatiques.

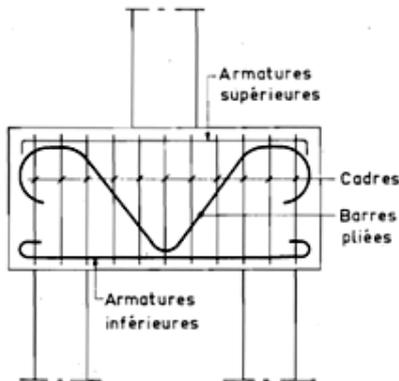


FIG. 34.

transmettant des charges supérieures des triples ou quadruples cadres. Ces cadres ont certainement une influence très favorable sur la tenue de la semelle; ils réalisent, de surcroît, un certain frettage de la zone des ancrages.

Il serait certainement de bonne construction de prévoir à mi-hauteur de la semelle une barre filante sur chaque face dont la section pourrait être de l'ordre de celle des armatures supérieures. Ces barres seraient réunies transversalement à la semelle par des épingles au même espacement que les cadres.

Dans le cas de semelles très chargées, si l'une des conditions — contrainte de cisaillement ou contrainte de compression des bielles — n'est pas vérifiée, on peut accroître la résistance de la semelle en disposant des barres pliées suivant le tracé indiqué sur la figure 34.

Bien que nous n'ayons pas fait d'essai sur des semelles comportant des barres pliées, de telles barres sont certainement efficaces pour retarder la fissuration inclinée et accroître la résistance de la semelle. On peut admettre que si A'_p est la section des barres relevées à 45° , elles assurent la transmission d'une partie de la charge égale à $A'_p \sigma'_c \sqrt{2}$.

Semelles sur trois pieux

Considérons d'abord le cas où le poteau supporté par la semelle est de section sensiblement carrée.

Nous avons donné comme limite de validité d'application de la méthode des bielles

$$40 < \theta < 55^\circ$$

mais nous estimons que les valeurs $\theta < 45^\circ$ doivent être évitées dans toute la mesure du possible car elles correspondent à des sections d'acier relativement importantes.

Il est donc préférable de s'en tenir à la condition

$$\theta \geq 45^\circ$$

à laquelle correspond

$$h \geq 0,58 \left(l_t - \frac{a}{2} \right)$$

Il y a intérêt à prendre une hauteur utile correspondant à une inclinaison de bielles de 55° , soit

$$h \sim 0,825 \left(l_t - \frac{a}{2} \right)$$

Dans ces conditions, les efforts de traction dans les armatures ont pour valeur

— armatures disposées suivant les médianes : $N'_{am} = \frac{Q}{4,3}$

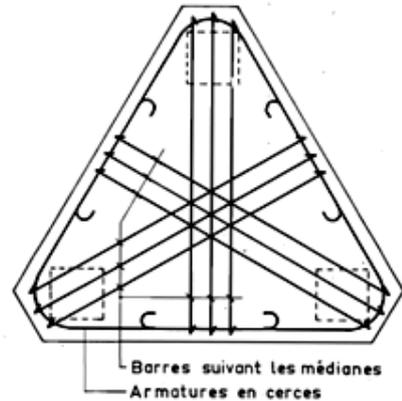


FIG. 35.

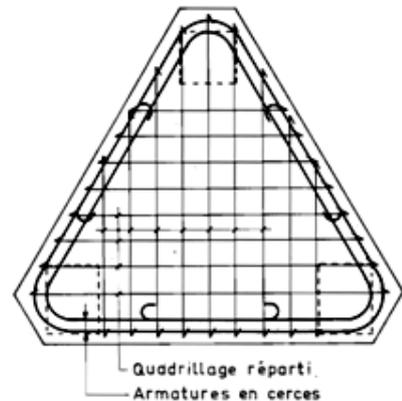


FIG. 36.

— armatures disposées suivant les côtés : $N'_{ac} = \frac{Q}{7,4}$

Si l'on adopte une hauteur utile supérieure à

$$0,825 \left(l_t - \frac{a}{2} \right)$$

il est prudent de conserver, pour calculer les efforts dans les armatures, les valeurs écrites ci-dessus.

Il ne paraît pas indiqué de prévoir, pour les semelles à trois pieux, une hauteur variable; en principe, ces semelles ont donc une hauteur constante, la même sur le pourtour et au collet.

Deux systèmes d'armatures sont à recommander :

1° armatures en cerces (1) et armatures suivant les médianes (fig. 35);

2° armatures en cerces (1) et quadrillage réparti (fig. 36).

Dans le premier cas, les armatures en cerces de section A'_c sont calculées pour équilibrer un effort

$$N'_{ac} = \frac{Q' l_t}{9 h} \left(1 - \frac{a}{2 l_t} \right)$$

(1) Comme nous l'avons vu, dans le cas des semelles sur trois pieux il est préférable de disposer des cerces plutôt que des armatures suivant les côtés; les cerces donnent une sécurité supérieure, limitent les fissurations sur les faces latérales et surtout permettent d'éviter l'enchevêtrement de dispositifs d'ancrages au droit de chaque pieu.

$$\left(\text{soit } N'_{am} = \frac{Q'}{7,4} \text{ pour } h \geq 0,825 \left(l_t - \frac{a}{2} \right) \right)$$

avec Q' compris entre $\frac{2}{3} Q$ et $\frac{4}{5} Q$ — les armatures suivant les médianes sont alors déterminées pour équilibrer un effort $N'_{am} = \frac{(Q - Q') l_t \sqrt{3}}{9 h} \left(1 - \frac{a}{2 l_t} \right)$.

Dans le second cas, les armatures en cerces de section A'_c doivent équilibrer un effort

$$N'_{am} = \frac{Q l_t}{9 h} \left(1 - \frac{a}{2 l_t} \right)$$

correspondant à la charge totale Q du poteau. La section des armatures disposées en quadrillage réparti ne peut être déterminée qu'empiriquement; nous estimons que si l'on veut limiter la fissuration en sous-face, il convient de disposer dans chaque sens une section d'armatures de l'ordre de 20 % de la section des cerces.

Les conditions relatives aux contraintes de compression des bielles sont les suivantes :

$$1^{\circ) \quad \sigma_b = \frac{Q}{B \sin^2 \theta} < 0,75 \sigma_c$$

$$2^{\circ) \quad \sigma_{b1} = \frac{Q}{3 B_1 \sin^2 \theta} < 0,75 \sigma_c$$

où B est la section du poteau;

B_1 la section de chacun des pieux;

θ l'angle d'inclinaison des bielles sur l'horizontale;

σ_c la résistance du béton à la compression mesurée sur cylindres.

Pour $\theta = 55^\circ$, les conditions ci-dessus s'écrivent sous la forme

$$\frac{Q}{B} < 0,50 \sigma_c$$

$$\frac{Q}{3 B_1} < 0,50 \sigma_c$$

Ces conditions sont généralement satisfaites puisque la contrainte admissible de compression simple est normalement limitée dans le poteau à $0,30 \sigma_c$.

Toutes les armatures doivent être terminées par des crochets (crochets normaux ou crochets à 45°). À moins de justifications spéciales, les recouvrements des cerces doivent avoir une longueur d'au moins $35 \varnothing$. Il est avantageux de constituer les cerces par trois barres superposées, ce qui ne donne pas un d' excessif et permet de disposer un recouvrement sur chaque côté de la semelle.

Lorsqu'on est conduit à disposer plusieurs cerces dans un même plan horizontal, il convient d'étudier avec soin les dispositions de ferrailage (tracé des barres, courbures au droit des pieux, recouvrement des barres situées dans un même plan et des barres superposées).

On améliore certainement la tenue de la semelle en disposant à mi-hauteur une cerce supplémentaire dont la section, non prise en compte dans les calculs, peut être de section nettement inférieure à celle de chacune des cerces inférieures.

Dans le cas où le poteau supporté par la semelle a une section s'éloignant de la forme carrée, on peut encore appliquer la méthode des bielles sous sa forme simplifiée en prenant pour « a » la plus petite dimension du poteau.

On peut aussi appliquer la méthode de M. Frémy pour déterminer la section des armatures. Dans le cas de poteaux de section rectangulaire allongée, sollicités ou non par des couples de flexion, la méthode conduit à des armatures différentes suivant les trois côtés du triangle formé par les centres des pieux; il est bien évident que si l'on adopte la disposition d'armatures en cerces, il faudra ou prendre comme section des cerces celle correspondant au maximum ou bien compléter les cerces par des armatures de section appropriée disposées suivant certains côtés de la semelle.

Semelles sur quatre pieux

Considérons d'abord le cas où le poteau supporté par la semelle est de section sensiblement carrée.

Nous avons donné comme limite de validité d'application de la méthode des bielles

$$40^\circ < \theta < 55^\circ$$

mais les valeurs $\theta < 45^\circ$ doivent être évitées dans toute la mesure du possible car elles correspondent à des sections d'acier relativement importantes.

Il est donc préférable de s'en tenir à la condition

$$\theta \geq 45^\circ$$

à laquelle correspond

$$h \geq 0,71 \left(l_t - \frac{a}{2} \right)$$

Il y a intérêt à prendre une hauteur correspondant à une inclinaison de bielles de 55° , soit

$$h \sim \left(l_t - \frac{a}{2} \right)$$

Dans ces conditions, les efforts de traction dans les armatures ont pour valeur

— armatures disposées suivant les diagonales :

$$N'_{am} = \frac{Q \sqrt{2}}{8} = \frac{Q}{5,65}$$

— armatures disposées suivant les côtés :

$$N'_{am} = \frac{Q}{8}$$

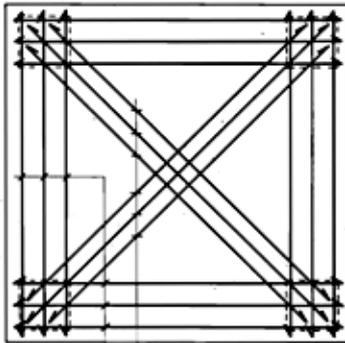
Si on adopte une hauteur utile supérieure à $\left(l_t - \frac{a}{2} \right)$, il convient de conserver, pour calculer les efforts dans les armatures, les valeurs indiquées ci-dessus.

On peut donner aux semelles à quatre pieux une hauteur variable, mais il ne nous paraît pas prudent d'adopter une hauteur sur le pourtour de la semelle inférieure aux $\frac{2}{3}$ de la hauteur au collet.

Les conditions relatives aux contraintes de compression des bielles sont les suivantes :

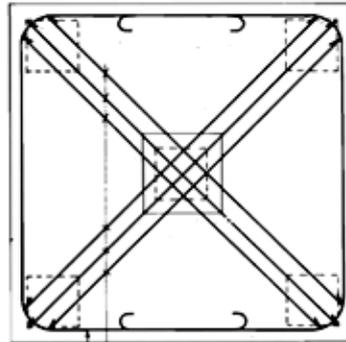
$$1) \quad \sigma_b = \frac{Q}{B \sin^2 \theta} < 0,9 \sigma_c$$

$$2) \quad \sigma_{b1} = \frac{Q}{4 B_1 \sin^2 \theta} < 0,9 \sigma_c$$



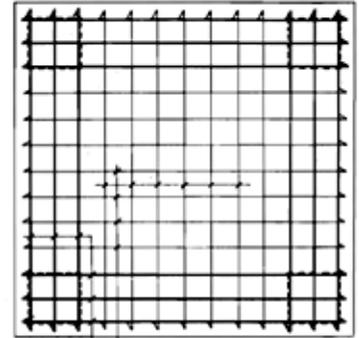
Barres suivant les diagonales
Barres suivant les côtés

FIG. 37.



Barres suivant les diagonales
Barres en cerces

FIG. 38.



Quadrillage réparti
Barres suivant les côtés

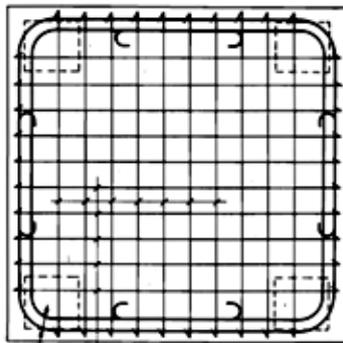
FIG. 39.

où B est la section du poteau;
 B_1 est la section de chacun des pieux;
 θ est l'angle d'inclinaison des bielles fictives sur l'horizontale;
 σ , la résistance du béton à la compression mesurée sur cylindres.

Pour $\theta \geq 45^\circ$, ces conditions sont généralement satisfaites lorsque les contraintes à la base du poteau et en tête des pieux sont limitées aux contraintes admissibles.

Les systèmes d'armatures à recommander sont les suivants :

- 1 : armatures suivant les côtés + armatures suivant les diagonales (fig. 37);
- 1 bis : armatures en cerces + armatures suivant les diagonales (fig. 38);
- 2 : armatures suivant les côtés + armatures en quadrillage réparti (fig. 39);
- 2 bis : armatures en cerces + armatures en quadrillage réparti (fig. 42).



Quadrillage réparti
Armatures en cerces

FIG. 40.

— Dans les systèmes 1 et 1 bis, les armatures suivant les côtés ou les cerces doivent équilibrer un effort

$$N_{\sigma} = \frac{Q'}{8h} l_t \left(1 - \frac{a}{2l_t}\right)$$

les armatures suivant les diagonales un effort

$$N_{\sigma} = \frac{(Q - Q') \sqrt{2}}{8h} l_t \left(1 - \frac{a}{2l_t}\right)$$

Q' et $Q'' = Q - Q'$ peuvent être du même ordre; on peut prendre, par exemple : $0,5 Q < Q' < 0,65 Q$.

— Dans les systèmes 2 et 2 bis, les armatures suivant les côtés ou les cerces doivent équilibrer un effort

$$N_{\sigma} = \frac{Q'}{8h} l_t \left(1 - \frac{a}{2l_t}\right)$$

Q' doit être une fraction relativement importante de Q ; on doit prendre $0,75 Q < Q' < 0,85 Q$.

Les armatures en quadrillage doivent équilibrer dans chaque sens un effort

$$N_{\sigma} = 2,4 \frac{Q - Q'}{8h} l_t \left(1 - \frac{a}{2l_t}\right)$$

le coefficient 2,4 (au lieu de 2) est introduit pour tenir compte de l'efficacité réduite que présentent les barres disposées en quadrillage (voir chapitre essais).

Dans le cas des semelles à quatre pieux, les armatures disposées suivant les côtés ne présentent pas les mêmes inconvénients quasi réhilitoires que dans le cas des semelles à trois pieux. Les armatures en cerces nous paraissent toutefois, là encore, préférables car plus proches des faces latérales; elles limitent l'ouverture des fissures sur ces faces; elles évitent l'accumulation d'ancrages au droit des pieux; elles permettent de disposer les armatures suivant les diagonales ou le quadrillage plus près de la sous-face, donc dans des conditions de meilleure efficacité.

Comme pour les semelles à trois pieux, toutes les barres doivent être terminées par des crochets normaux ou à 45° et, à moins de justifications spéciales, les recouvrements des cerces doivent avoir une longueur d'au moins $35 \varnothing$. Les cerces peuvent avantageusement être constituées par des \varnothing superposés (quatre au maximum). On peut être conduit à disposer plusieurs cerces dans un même plan horizontal; il faut alors étudier avec soin la disposition des barres.

On améliore certainement la tenue de la semelle en disposant à mi-hauteur une cerce supplémentaire.

Dans le cas où le poteau supporté par la semelle a une section s'éloignant de la forme carrée, on peut appliquer

la méthode des bielles sous sa forme simplifiée en prenant pour « a » la plus petite dimension du poteau.

On peut aussi appliquer la méthode de M. Frémy pour déterminer la section des armatures suivant les quatre côtés : dans le cas de poteaux de section rectangulaire allongée, sollicités ou non par des couples de flexion, la méthode conduit à des sections d'armatures différentes suivant les différents côtés de la semelle; il est bien évident que si l'on adopte la disposition d'armatures en cerces, il faut prendre comme section des cerces celle correspondant au maximum.

Semelles sur cinq pieux

Deux dispositions sont usuellement rencontrées. Bien que de telles semelles n'aient pas donné lieu à des essais systématiques, on peut extrapoler la méthode des bielles dans les conditions ci-après :

1° Semelle comportant quatre pieux disposés en carré et un pieu central.

En raison de la rigidité de la semelle, on peut admettre que les cinq pieux sont également chargés et supportent une charge $\frac{Q}{5}$.

On peut admettre que la transmission de la charge au pieu central se fait directement et que la transmission des charges aux pieux périphériques s'effectue suivant des bielles inclinées. Il convient alors de calculer la semelle comme une semelle à quatre pieux supportant une charge égale à $\frac{4Q}{5}$.

Il paraît logique d'armer la semelle (fig. 41).

— par des barres en cerces pour équilibrer les efforts dus à une partie de la charge;

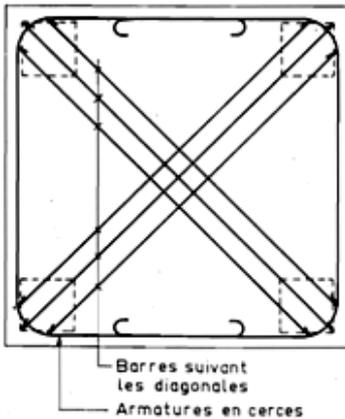


FIG. 41.

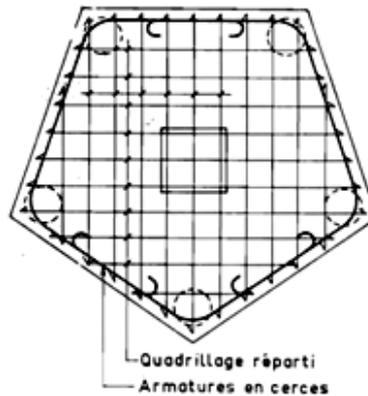


FIG. 42.



FIG. 43.

— par des barres suivant les diagonales pour équilibrer les efforts dus au complément de la charge.

Les efforts équilibrés par les deux systèmes d'armatures peuvent être du même ordre de grandeur.

2° Semelle comportant cinq pieux disposés au sommet d'un polygone régulier de côté A.

On peut admettre que la transmission de la charge aux pieux s'effectue par l'intermédiaire de bielles situées dans des plans verticaux passant par le centre de la

semelle (centre du cercle circonscrit au pentagone) et par les axes des différents pieux. Les efforts de traction résultant de la décomposition des forces sont équilibrés par des armatures disposées en cerces, c'est-à-dire suivant les côtés du pentagone formé par les pieux.

Si l'on admet que les bielles sont issues, dans la section du collet, de points distants de $\frac{a}{4}$ du centre du poteau supposé de section carrée de côté a, il est facile d'établir l'expression de N'_{ac} , effort de traction dans les armatures en cerces. On trouve

$$N'_{ac} = \frac{0,725 Q l_t}{5 h} \left(1 - \frac{a}{3,4 l_t} \right).$$

Nous admettrons que la hauteur minimale correspond à l'inclinaison des bielles à 45°; on doit donc avoir

$$h > 0,851 l_t \left(1 - \frac{a}{3,4 l_t} \right).$$

Il est certainement préférable d'avoir une hauteur de semelle correspondant à une inclinaison des bielles fictives de 55° sur l'horizontale, soit

$$h > 1,20 l_t \left(1 - \frac{a}{3,4 l_t} \right).$$

Dans ces conditions, l'effort dans les cerces a pour valeur

$$N'_{ac} = \frac{Q}{8,3}.$$

Les armatures en cerces doivent, en principe, équilibrer les efforts dus à la charge totale Q. Mais, pour éviter des fissurations excessives au centre de la semelle, il convient de prévoir un quadrillage d'armatures en sous-face, la section de chacune des nappes d'armatures de ce quadrillage doit être d'au moins 20 % la section des cerces (fig. 42).

Il serait évidemment possible de disposer dans les semelles sur cinq pieux, en plus des armatures en cerces, des armatures disposées suivant les côtés du pentagone étoilé ayant pour sommets les centres des pieux (fig. 43). On pourrait prendre en compte ces armatures dans les calculs de la semelle; si Q' est la partie de Q équilibrée par des armatures en cerces de section

$$A'_c = \frac{0,725 Q' l_t}{5 h \bar{\sigma}_a} \left(1 - \frac{a}{3,4 l_t} \right),$$

le complément $Q'' = Q - Q'$ doit être équilibré par des armatures disposées suivant les côtés du pentagone étoilé de section

$$A'_s = \frac{1,8 Q'' l_t}{5 h \sigma_s} \left(1 - \frac{a}{3,4 l_t}\right)$$

soit dans le cas particulier où $h = 1,20 l_t \left(1 - \frac{a}{3,4 l_t}\right)$

$$A'_s = \frac{Q''}{3,34 \sigma_s} = \frac{0,3 Q''}{\sigma_s}$$

Cette disposition présente toutefois un inconvénient sérieux : la superposition au centre de la semelle de cinq lits d'armatures qui se croisent. Elle semble à éviter pour cette raison, dans toute la mesure du possible.

Semelles sur six pieux

Deux dispositions sont usuellement rencontrées. Il nous semble possible d'extrapoler la méthode des bielles dans les conditions suivantes :

1° Semelle comportant cinq pieux disposés suivant un pentagone régulier et un pieu central.

Là encore, en raison de la rigidité de la semelle, on peut admettre que les six pieux sont également chargés et qu'ils supportent chacun une charge $\frac{Q}{6}$.

On peut calculer la semelle comme une semelle sur cinq pieux supportant une charge égale à $\frac{5Q}{6}$.

Il paraît logique d'armer la semelle

- par des barres en cerces;
- par des barres suivant les côtés du pentagone étoilé ou, plus simplement, par des barres en quadrillage.

2° Semelle comportant six pieux disposés aux sommets d'un hexagone régulier de côtés A.

On peut admettre que la transmission de la charge aux pieux s'effectue dans les plans verticaux diamétraux passant par les axes des pieux. Les efforts de traction résultant de la décomposition des forces sont équilibrés normalement par des armatures disposées en cerces, c'est-à-dire suivant les côtés de l'hexagone formé par les pieux et par trois groupes d'armatures disposées suivant les plans diamétraux passant par les axes des pieux (fig. 44).

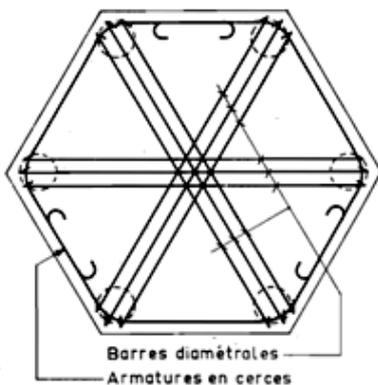


FIG. 44.

Si l'on admet que les bielles sont issues, dans la section du sommet, de points distants de $\frac{a}{4}$ du centre du poteau supposé de section carrée de côté a , il est facile d'obtenir les expressions de N'_{sc} , effort de traction dans les armatures en cerces

$$N'_{sc} = \frac{Q l_t}{6 h} \left(1 - \frac{a}{4 l_t}\right)$$

et de N'_{sd} , effort de traction dans les armatures diamétrales

$$N'_{sd} = N'_{sc} = \frac{Q l_t}{6 h} \left(1 - \frac{a}{4 l_t}\right)$$

Nous admettrons, là encore, que la hauteur minimale correspond à l'inclinaison des bielles à 45°; on doit donc avoir

$$h > l_t \left(1 - \frac{a}{4 l_t}\right)$$

Il est certainement préférable d'avoir une hauteur de semelle correspondant à une inclinaison des bielles fictives de 55° sur l'horizontale, soit

$$h = 1,428 l_t \left(1 - \frac{a}{4 l_t}\right)$$

Dans ces conditions, les efforts N'_{sc} et N'_{sd} ont pour valeur commune

$$N'_{sc} = N'_{sd} = \frac{Q}{8,6}$$

Pratiquement, on peut équilibrer les efforts de traction sensiblement par moitié par des cerces et des armatures diamétrales; la section des cerces et celle des armatures diamétrales sont alors égales. $(A'_s = A'_d = \frac{Q}{17,2 \sigma_s})$

Semelles sur sept pieux

Nous examinerons seulement le cas des semelles reposant sur six pieux disposés suivant un hexagone régulier de côté A et sur un pieu central.

La semelle est alors calculée suivant les mêmes principes que précédemment comme une semelle à six pieux supportant une charge $\frac{6Q}{7}$.

Semelles sur plus de sept pieux

Il est exceptionnel que l'on puisse appliquer la méthode des bielles à de telles semelles d'ailleurs très rares dans les bâtiments. On considère alors des consoles ou des poutres fictives dont on détermine les armatures par les méthodes usuelles de Résistance des Matériaux. Il faut alors calculer les armatures transversales pour équilibrer l'effort tranchant dans les conditions réglementaires.

Remarques sur l'application de la méthode de M. Frémy

Dans ce qui précède, nous avons plus spécialement considéré le cas de semelles supportant un poteau de section sensiblement carrée soumis à une charge centrée. Si le poteau est de section rectangulaire, on peut encore utiliser la méthode simplifiée des bielles en appliquant les formules précédentes mais en prenant pour a la plus petite dimension du poteau.

Lorsque le poteau est sollicité dans sa section de base par un couple de flexion, certains ingénieurs appliquent encore la méthode des bielles, mais en calculant les armatures comme si la semelle supportait une charge centrée égale à $n Q_{1 \max}$, n étant le nombre de pieux, $Q_{1 \max}$ étant la charge maximale sous un pieu calculée en tenant compte de N et de M et en supposant la semelle infiniment rigide.

Ces extrapolations conduisent sans doute à une sécurité plus grande et il semblerait logique d'appliquer, dans ces cas, la méthode de M. Frémy qui constitue un ensemble cohérent. Mais on peut reprocher à cette méthode de conduire à des sections d'armatures plus importantes que la méthode simplifiée dans les cas où cette dernière a vu sa validité confirmée par des essais pour les semelles à trois et quatre pieux.

Tableau résumé des dispositions constructives

Pour faciliter le travail des ingénieurs d'études, nous avons résumé dans le tableau de l'annexe 7 les différentes formules à utiliser dans l'étude des projets.

NOTA : Il faut noter que la dénomination de « cerces » s'applique toujours, dans ce qui précède comme dans les annexes, à des armatures disposées parallèlement aux côtés du polygone régulier ayant pour sommets les centres des pieux, au voisinage du parement extérieur de la semelle, les parties droites des armatures étant raccordées par des parties courbes au rayon de courbure suffisant.

ÉDITÉ PAR LA SOCIÉTÉ DE DIFFUSION DES TECHNIQUES
DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS
9, RUE LA PÉROUSE, PARIS-XVI^e.

(Ann. I. T. B. T. P.)

3832-2-67. IMPRIMERIE FIRMIN-DIDOT. - PARIS - MESNIL - IVRY
Dépôt légal : 1^{er} trimestre 1967.

Le Directeur-Gérant : P. GUÉRIN.

Code 2701.

En dépliants (pages 274 à 294).

Em folhetos

— Annexe 4

Semelles à 4 pieux.

— Annexe 5

Semelles à 3 pieux.

— Annexe 6

Semelles à 2 pieux.

— Tableau résumé des dispositions constructives.

Semelles sur 4 pieux

1	2	3	4	5				6				7		8	9
				Caractères mécaniques du béton				Caractères mécaniques de l'acier				Hauteur utile mesurée ou estimée	Inclinaison des bielles fictives sur l'horizontale θ		
				σ_{jw} (sur cubes)	σ_{jcyt} (sur cylindres)	σ_j (sur prismes)	$\sigma_j = \frac{3,6M}{b^3}$	Valeur moyenne de l'effort dans une barre à la limite élastique (kg)	Valeur moyenne de la limite élastique $\sigma_{e,2}$ (kg/mm^2)	Valeur moyenne de l'effort dans une barre à la rupture (kg)	Valeur moyenne de la résistance à la traction (kg/mm^2)				
Disposition des armatures Section nominale A' (en cm^2)								Hauteur utile mesurée ou estimée		Inclinaison des bielles fictives sur l'horizontale θ		Charge Q_e calculée par la méthode des bielles pour $\sigma'_e = \sigma'_e$ (ou $\sigma'_{0,2}$) (t)			
1	HN1	75	Deux	4x4 ϕ 32 côtés 2x7 ϕ 16 quadrillage	32,17 14,07	447,5	372,5	32,8	22 217 5 623	27,62 27,93	32 283 8 067	40,15 40,10	68 65	45°15'	598,5
2	HN2bis	75	Grésilles	4x4 ϕ 25 côtés 2x7 ϕ 12 quadrillage	20,00 8,24	488,9	408	39,5	21 750 5 840	44,30 51,87	37 500 9 300	76,40 82,27	68,5 66,5	45,27	546,3
3	HN2	75	Deux	4x3 ϕ 32 côtés 2x4 ϕ 25 diagonales	24,13 19,83	445,7	371	27,5	22 400 14 750	27,85 30,03	32 767 21 200	40,15 43,17	68 62,5	45,27	603,5
4	HN2bis	75	Grésilles	4x3 ϕ 25 côtés 2x4 ϕ 20 diagonales	15,00 12,84	409,7	341,5	37,5	24 450 14 900	44,80 47,45	40 200 24 400	81,90 77,65	68,5 64,5	44,54	651,5
5	HN3	100	Deux	4x(2 ϕ 32 + 2 ϕ 25) côtés 2x8 ϕ 12 quadrillage	25,90 9,05	409,9	341,5	29,9	20 140 13 822 3 305	25,06 28,12 29,31	29 830 19 722 4 493	37,15 40,10 39,74	93 90	54,00	614,3
6	HN3bis	100	Grésilles	4x(2 ϕ 25 + 2 ϕ 20) côtés 2x8 ϕ 10 quadrillage	16,42 6,57	592	493	33,9	23 850 15 450 3 370	48,45 44,60 42,95	39 900 27 450 5 370	81,25 74,35 68,25	93,5 91	54,13	702,9
7	HN4	100	Deux	4x4 ϕ 25 côtés 2x4 ϕ 25 diagonales	19,53 19,63	424,3	353,5	22,4	14 300	29,14	20 314	41,29	94 89	53,48	755
8	HN4bis	100	Grésilles	4x4 ϕ 20 côtés 2x4 ϕ 20 diagonales	12,84 12,84	508,6	423	36,4	15 280	48,64	25 490	81,13	94 90,5	54,03	811
9	1,1	30	TOR	4x4 T 8 côtés	4,02	350	291	33,7	2047	43,97	2859	61,33	25,03	45,45	47,4
10	1,2	30	TOR	2x4 T 10 diagonales	3,14	335,7	278,5	36,7	3547	45,17	4640	59,13	26,79	47,40	62,2
11	1,3	30	TOR	4x2 T 8 côtés 2x2 T 10 diagonales	1,01 1,57	375,3	313	34,4	2047 3547	43,97 45,17	2859 4640	61,33 59,13	26,20	47,05	55,25
12	1,4	30	TOR	2x1 T 8 cercles	1,01	383,8	318,5	37,6	2047	43,97	2859	61,33	27,0	47,54	25,55
13	1,4	30	TOR	4x1 T 8 cercles	2,02	350,2	291	28,0	2113	47,8	2833	64,1	25,5	46,24	50,1
14	2,1	30	Deux	4x4 ϕ 10 côtés	3,14	392,7	326	32,2	2225	28,35	3215	40,95	27,81	48,45	57,2
15	2,2	30	Deux	2x4 ϕ 12 diagonales	4,52	395,8	328,2	30,1	4010	35,50	4830	42,75	27,65	48,36	72,5
16	2,3	30	Deux	4x2 ϕ 10 côtés 2x2 ϕ 12 diagonales	1,57 2,25	380,5	316	30,1	2280 3790	29,05 33,35	3115 4750	39,70 42,00	26,94	47,50	61,8
17	2,4	30	Deux	4 ϕ 10 cercles	3,14	373,2	309,5	28,6	2590	33,00	3345	42,50	26,06	46,54	62,3
18	2,5	30	-	sans armature	-	406,5	337,5	33,1	-	-	-	-	-	-	-

ANEXE 4 - 59 SEMELLES À 4 PIEUX

1	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
										1	2
N° d'identification de la semelle	Charge Q_a calculée par la méthode des bielles pour $\sigma'_a = \sigma'_c$ (ou $\sigma'_{0,2}$) (t)	Charge de rupture observée Q_u (t)	Valeurs de $\frac{Q_u}{Q_c}$	Charge d'ult. limitation Q_a correspond. à une contrainte moyenne des armatures $\sigma'_a = \frac{3}{5} \sigma'_c$ (ou $\sigma'_{0,2}$) (t)	Valeurs de $\frac{Q_u}{Q_a}$	Charge d'ult. limitation Q_b correspond. à la condition de contrainte limite des bielles (t)	Valeurs de $\frac{Q_u}{Q_b}$	Charge de rupture observée, exprimée en fonction du minimum des valeurs respectives de Q_a et Q_b	Charge correspond. à l'apparition de la première fissure observée (t)	Charge correspondant à l'apparition d'une fissure d'ouverture égale à 0,2 mm (t)	Charge correspondant à l'apparition d'une fissure d'ouverture égale à 0,3 mm (t)
1 HN1	598,5	700	1,17	359	1,95	423	1,655	1,95 Q_a	150	300	350
2 HN1 ^{bis}	546,3	670	1,123	358	1,87	467	1,435	1,87 Q_a	150	200	< 250
3 HN2	603,5	558	1,09	362	1,818	409	1,608	1,818 Q_a	150	300	< 350
4 HN2 ^{bis}	651,5	739	1,133	391	1,89	383,5	1,925	1,925 Q_a	150	300	< 350
5 HN3	614,3	650	1,06	368	1,765	502	1,295	1,765 Q_a	200	300	< 350
6 HN3 ^{bis}	702,9	900	1,28	421,5	2,135	730	1,232	2,135 Q_a	200	< 350	< 350
7 HN4	755	753	0,998	453	1,652	515,5	1,457	1,662 Q_a	150	300	350
8 HN4 ^{bis}	811	875	1,08	486,5	1,798	619	1,413	1,798 Q_a	300	< 500	500
9 1,1	47,4	85	1,795	28,5	2,98	30,4	2,80	2,98 Q_a	35	50	60
10 1,2	62,2	88 (rupture à 165t)	1,415	37,3	2,36	31	2,84	2,84 Q_b	33	Absence de fissures in complètes	
11 1,3	55,25 (rupture à 65t avec rupture)	87-65t	1,575 (1,36)	33,2	2,62 (2,25)	34,1	2,55 (2,20)	2,62 Q_a (2,26 Q_a)	35	50	60
12 1,4	25,55	63,5	2,485	15,3	4,16	35,5	1,79	4,16 Q_a	30	35	40
13 1,4	50,1	71,75	1,433	30	2,39	30,9	2,32	2,39 Q_a	10	< 40	40
14 2,1	57,2	74,75	1,308	34,3	2,18	37,4	2,00	2,18 Q_a	25	< 50	50
15 2,2	72,5	81	1,119	43,5	1,863	37,5	2,16	2,16 Q_b	20	50	< 60
16 2,3	61,8	74	1,198	37,1	1,995	35,1	2,11	2,11 Q_b	25	60	< 65
17 2,4	62,3	70,5	1,132	37,4	1,885	33,5	2,105	2,105 Q_b	25	55	< 50
18 2,5	-	27	-	-	-	-	-	-	relevée	Absence de fissures à 25t	

ANEXE 4 - 59 SEMELLES À 4 PIEUX

		19	Remarques
1	4N1	350	Rupture avec fissures en croix largement ouvertes en sous-face et fissures verticales et très inclinées sur les faces
2	4N1bis	< 350	Fissuration en sous-face parallèle à une diagonale Rupture suivant surface inclinée à partir d'un des pieux
3	4N2	< 350	Fissuration en sous-face dans l'ensemble parallèle aux côtés Rupture suivant surface inclinée à partir d'un des pieux
4	4N2bis	< 350	Fissuration en sous-face dans l'ensemble parallèle aux côtés Rupture comme 4N2
5	4N3	< 350	Fissuration en sous-face dans l'ensemble parallèle à une diagonale Rupture avec fissure verticale très ouverte sur une face
6	4N3bis	< 350	Fissuration en sous-face comme 4N3 Rupture suivant surface de fissuration très inclinée à partir d'un pieu
7	4N4	350	Fissuration en sous-face comme 4N3 Rupture avec fissures très largement ouvertes sur appuis à la partie inférieure
8	4N4bis	500	Fissuration comme 4N2 bis Rupture avec surface de fissuration très inclinée à partir d'un pieu
9	1,1	60	Dispositif d'essai imparfait Fissure diagonale très importante en sous-face Rupture suivant surface inclinée à partir d'un pieu
10	1,2	des fissures pléthes	Dispositif d'essai imparfait sans une première phase, écrasement du poteau sous 70t. Reprise de l'essai après arasement de la partie supérieure. Fissures en sous-face parallèles aux côtés Rupture suivant surface inclinée
11	1,3	60	Dispositif d'essai imparfait dans une première phase, écrasement du poteau sous 87t. Reprise de l'essai après arasement de la partie supérieure de la semelle. Fissures en sous-face parallèles aux côtés. Rupture avec ouverture des fissures sur les faces latérales
12	1,4	40	Dispositif d'essai imparfait Large fissure en sous-face sensiblement parallèles aux côtés. On constate à la rupture de la semelle la rupture d'une ceinture.
13	1,4	40	Dispositif d'essai imparfait Fissure en sous-face accentuée suivant une diagonale Rupture avec ouverture des fissures
14	2,1	50	Dispositif d'essai imparfait En sous-face, très large fissure en croix Rupture avec fissures verticales très importantes sur les faces
15	2,2	< 60	En sous-face, large fissure en croix à partir d'un pieu Rupture avec fissures verticales très largement ouvertes sur sous-face
16	2,3	< 65	En sous-face, fissures en croix. Rupture avec fissures largement ouvertes sur les faces latérales
17	2,4	< 50	En sous-face, large fissure parallèle à un côté. Rupture complexe avec fissures inclinées largement ouvertes partant d'un pieu
18	2,5	fissure asc	Rupture brutale de la semelle non armée refermée sur les barres

ANEXE 4 - 59 SEMELLES À 4 PIEUX

Semelles sur 4 pieux

	4				5				6				7		8	9
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	4	1	2		
19	3,1	20	Tor	4x4T8 côtés	2,01	387	321	37,5	2073	4679	2540	64,27	18,08		36,30	34,7
20	3,2	20	Tor	2x4T10 diagonals	3,14	447,3	372	30,1	3510	4473	4623	58,87	17,68		35,50	40,6
21	3,3	20	Tor	4x2T8 côtés 2x2T10 diagonals	1,01 1,57	372	309	28,4	2170 5540	43,17 45,13	2487 4600	59,47 58,50	17,32		35,20	37,5
22	3,4	20	Tor	4T8 cerces	2,01	342	325,5	34,4	2097	47,43	2810	63,75	15,36		32,12	29,8
23	3,5	20	-	Sans armatures	-	424,5	352	30,8	-	-	-	-	-		-	-
24	1A,1	30	Tor	4x(2T10+2T12) côtés	3,83	320,8	266	28,8	3917 5467	50,5 48,4	4600 6450	59,37 57,23		27	49,10	122,9
26	1A,2	30	Tor	2x(2T12+2T14) diagonales	5,34	444,3	368	37,5	5534 7900	49,23 51,40	6300 8300	56,13 57,20		27	49,10	124,2
26	1A,2 ^{bi}	30	Tor	2x(2T12+2T14) diagonales	5,34	401	332,5	33,5	Pas d'essai sur les aciers, on a admis les valeurs de 1A,2					27	49,10	124,2
27	1A,3	30	Tor	4x(1T10+1T12) côtés 2x(1T10+1T12) diagonales	1,92 1,92	441	366	34	4100 5453	52,30 48,57	4070 6477	59,50 56,80		27	49,10	106,9
28	1A,4	30	Tor	2T10 } cerces 2T12 }	3,83	396,6	329	32,4	4000 5550	50,95 49,15	4675 6175	59,60 54,75		27	49,10	125
29	3A,1	20	Tor	4x(2T10+2T12) côtés	3,83	351,2	291,5	34,4	4133 5500	52,97 48,90	4667 6383	59,83 56,77		17	36,00	79,1
30	3A,2	20	Tor	2(2T12+2T14) diagonales	5,34	472,3	392	35	5533 7933	49,07 51,50	6450 9033	57,27 53,69		17	36,00	78,2
31	3A,3	20	Tor	4x(1T10+1T12) côtés 2x(1T10+1T12) diag	1,92 1,92	385,7	320	32,8	4000 5484	50,80 48,53	4567 6283	58,27 55,60	17,2		36,20	67,3
32	3A,3 ^{bi}	20	Tor	4x(1T10+1T12) côtés 2x(1T10+1T12) diag	1,92 1,92	555	461	42,66	Pas d'essai sur les aciers, on a admis les valeurs de 3A,3					17,2	36,20	67,3
33	3A,4	20	Tor	2T10 } cerces 2T12 }	3,83	390	324	34	4025 5425	51,15 48,05	4600 6325	58,95 56,00		17	36,00	77,6
34	Q,1	20	Tor	2x8T8 quadrillage	4,03	408,5	339	31	2310	45,95	3058	60,78	17,4		35,25	34,2
35	Q,2	30	Doux	2x8φ10 quadrillage	6,30	370,7	307,5	31,3	2683	34,23	3467	44,20	27,23		48,00	62,0
36	Q,2 ^{bi}	30	Doux	2x8φ8 quadrillage	4,03	373,5	210	22,3	1647	32,53	2530	46,40		27,33	48,00	34,2
37	6,1	14	Tor	4x4T10 côtés	3,14	158,3	131,5	17,5	3412	44,8	4660	54,2	10,68		23,40	28,6
38	6,2	14	Tor	4x4T14 côtés	6,16	158,3	131,5	17,5	7100	44,1	8240	53,45	10,55		23,20	69,3
39	6,3	20	Tor	4x4T10 côtés	3,14	165,8	220,5	18,3	4016	51,2	4650	59,3	18,03		35,24	67,1
40	6,4	20	Tor	4x4T14 côtés	6,16	308,1	306	22,5	7330	47,6	8500	55,8	17,05		34,54	115,6
41	6,5	30	Tor	4x4T12 côtés	4,52	221,8	184	18,2	5550	51,75	6475	61,75	20,4		47,10	143
42	6,6	30	Tor	4x4T16 côtés	5,04	221,8	184	18,2	7400	52,8	8500	65,5	20,75		48,10	241,5

ANEXE 4 - 59 SEMELLES À 4 PIEUX

	1	9	10	11	12	13	14	15	15	17	18	
											1	2
19	3,1	34,7	47,5	1,37	20,8	2,235	23,1	2,06	2,265 _{2a}	15	18	21
20	3,2	40,6	54	1,33	24,3	2,225	25,9	2,085	2,225 _{2a}	18	24	27
21	3,3	37,5	51	1,35	22,5	2,255	20,9	2,44	2,44 _{2b}	18	30	33
22	3,4	29,6	43,5	1,46	17,9	2,43	18,8	2,31	2,43 _{2a}	18	<27	<27
23	3,5	—	15	—	—	—	—	—	—	Aucune fissure jusqu'à la rupture		
24	1A,1	122,9	115	0,937	73,7	1,56	44,3	2,59	2,59 _{2b}	15	65	70
26	1A,2	124,2	90	0,724	74,5	1,21	61,3	1,47	1,47 _{2b}	25	45	<55
26	1A,2 ^{ba}	124,2	117,75	0,947	74,5	1,58	55,3	2,13	2,13 _{2b}	30	<50	<50
27	1A,3	106,9	118,5	1,109	64,1	1,85	60,9	1,945	1,945 _{2b}	35	60	70
28	1A,4	125	115,75	0,926	75,0	1,543	54,8	2,11	2,11 _{2b}	45	50	55
29	3A,1	79,1	81,50	1,03	47,4	1,72	29,4	2,775	2,775 _{2b}	30	45	50
30	3A,2	78,2	90	1,15	46,9	1,92	39,6	2,275	2,275 _{2b}	15	35	40
31	3A,3	67,3	66,5	0,989	40,3	1,65	32,8	2,095	2,095 _{2b}	20	25	<35
32	3A,3 ^{ba}	67,3	84,25	1,251	40,3 adr	2,09	47,2	1,785	2,09 _{2a}	20	30	40
33	3A,4	77,6	84,5	1,09	46,5	1,82	32,75	2,58	2,58 _{2b}	20	<35	35
34	Q,1	34,2	40,8	1,192	20,5	1,99	23,1	1,768	1,99 _{2a}	15	20	25
35	Q,2	62,0	65	1,05	37,2	1,748	34,4	1,89	1,89 _{2b}	15	<50	50
36	Q,2 ^{ba}	34,2	51	1,30	23,5	2,17	34,65	1,472	2,17 _{2a}	25	35	<40
37	G,1	28,6	25	0,648	23,15	1,08	4,28	5,84	5,84 _{2b}	10	<20	<20
38	G,2	69,3	29	0,419	41,5	0,677	4,16	6,97	6,97 _{2b}	10	0,2 mm n'est pas atteint à la rupture	
39	G,3	67,1	65	0,969	40,2	1,618	15,7	4,14	4,14 _{2b}	15	<30	<30
40	G,4	115,6	135	0,736	69,4	1,225	20,25	14,20	14,20 _{2b}	20	60	70
41	G,5	143	84,25	0,589	85,8	0,783	20,15	7,78	4,78 _{2b}	20	65	<80
42	G,6	24,5	—	0,036	45,0	—	—	—	—	—	—	—

ANEXE 4 - 59 SEMELLES À 4 PIEUX

	1	18		19	Remarques
		1	2		
19	3,1	18	21	Fissure accentuée en sous-face suivant une diagonale suivant une surface inclinée.	Rupture avec ouverture de fissures
20	3,2	24	27	Fissuration en croix en sous-face. Rupture avec ouverture de fissures suivant la verticale et suivant surface inclinée.	
21	3,3	30	33	Fissure accentuée en sous-face suivant une diagonale	Rupture comme 3,1
22	3,4	<27	<27	Fissuration sans direction privilégiée en sous-face.	Rupture comme 3,1
23	3,5	fissure jusqu'à rupture		Rupture brutale de la semelle sans armatures, la semelle se partageant en deux parties avec large fissure en sous-face parallèle à deux côtés	
24	1A,1	65	70	Dans une première phase, écrasement du poteau sous 118t. Reprise de l'essai après arasement de la partie supérieure de la semelle. Rupture sous 115t avec fissures suivant surface inclinée.	
26	1A,2	45	<55	La charge de rupture notée $Q_u = 90t$ doit être corrigée. L'essai a été repris avec 1A2 bis identique à 1A2. Rupture brutale avec éclatement d'une brique dans un angle de la semelle.	
26	1A,2 ^{bis}	<50	<50	Rupture par ouverture de fissures verticales et, comme ci-dessus, décollement d'une brique dans un angle de la semelle.	
27	1A,3	60	70	Fissures en croix peu accentuées en sous-face. Rupture avec ouverture d'ailleurs peu marquée de fissures des faces.	
28	1A,4	50	55	Fissures irrégulières en sous-face. Rupture avec décollement et éclatement de deux briques	
29	3A,1	45	50	Rupture avec ouverture d'ailleurs peu marquée de fissures.	
30	3A,2	35	40	comme 3A,1	
31	3A,3	25	<35	comme 3A,1	

ANNEE 4 - 59 SEMELLES À 4 PIEUX

1	18		19	Remarques
	1	2		
32	3A,3 ^{bis}	30	40	Semelle identique à 3A3. Rupture avec fissure ouverte suivant une surface peu inclinée dans un angle.
33	3A,4	< 35	35	Rupture avec fissure suivant surface inclinée.
34	Q,1	20	25	Rupture avec ouverture de fissures verticales et inclinées.
35	Q,2	< 50	50	Rupture avec ouverture très marquée de fissures suivant surface très inclinée.
36	Q,2 ^{bis}	35	< 46	Rupture avec ouverture de fissures sensiblement verticales sur les faces latérales.
37	G,1	< 20	< 20	Résultats de essais de béton faibles ? Rupture par ouverture de fissures (certaines dessinant une arc de décharge entre deux pieux).
38	G,2	0,2 mm n'est pas et n'est à la base		Comme G,1
39	G,3	< 30	< 30	Fissure en sous-face suivant une diagonale. Rupture avec ouverture de fissures verticales ou inclinées.
40	G,4	60	70	Rupture à 85° par écrasement du béton. Après arasement de la partie supérieure de la semelle, reprise de l'essai. Rupture sous 85° de la semelle suivant fissure inclinée largement ouverte et avec écrasement du béton à la partie supérieure.
41	G,5	65	< 80	Rupture avec fissure inclinée et décollement dans une dalle adhéssive à un angle de la semelle.
42	G,6	35	41	Rupture avec décollement de deux dalles.

ANEXE 4 - 59 SEMELLES À 4 PIEUX

Semelles sur 4 pieux

	1	2	3	4	5				6				7	8		
					1	2	3	4	1	2	3	4		1	2	
43	9,A1	50	Tor	4x4T12 cõt	4,52	25	272,7	226	24,7	5200	45,9	7200	63,6	47,39	27,15	62,45
44	9,A2	50	Tor	4x4T16 cõt	8,04	24	408,1	339	28,2	9400	46,7	12000	59,5	47,08	27,25	62,35
45	9,A3	50	Tor	4x4T12 cõt (2x8T12 quadr. 5 m. hauteur)	4,52 (9,05)	27	344	285,5	24,6	5267 (4925)	46,53 (43,52)	7300 (6650)	64,42 (58,72)	47,37	27,18	62,42
46	10,1a	25	Tor	4x4T12 cõt	4,52	24	346	287	27,9	5050	44,60	6850	60,5	22,62	47,12	42,48
47	10,1b	25	Tor	4x2T12 cõt 2x2T14 diagonals	2,26 3,08	28	431,1	358	26,9	5167 7405	45,6 48,0	6966 8762	61,6 56,82	22,11	47,50	42,10
48	10,2a	25	Tor	4x4T12 cõt	4,52	30	339,3	281,5	26,1	5133	45,33	6967	61,53	21,79	48,15	41,45
49	10,2b	25	Tor	4x2T12 cõt 2x2T14 diagonals	2,26 3,08	27	344,3	264	24,6	5233 7405	46,2 48,0	6967 8762	61,53 56,82	22,02	48,00	42,00
50	10,3a	25	Tor	4x4T12 cõt	4,52	34	283,8	235,5	23	5233	46,2	7133	63,0	22,31	47,35	42,24
51	10,3b	25	Tor	4x2T12 cõt 2x2T14 diagonals	2,26 3,08	32	333,8	277	26	5250 7405	46,15 48,0	7150 8762	63,15 56,82	21,54	48,36	41,24
52	11,1a	30	Doux	4x4φ12 cõt avec crochets	4,52	25	268,8	223	24,4	3517	31,1	4867	43,1	27,16	41,57	48,03
53	11,1b	30	Doux	4x4φ12 cõt sans crochets	4,52	24	194,8	161,7	24,8	3517	31,1	4867	43,1	27,16	42,48	47,12
54	11,2a	30	Tor	4x4T10 cõt avec crochets	3,14	29	308,6	256	20,6	3490	44,47	4280	54,53	28,18	40,54	49,06
55	11,2b	30	Tor	4x4T10 cõt sans crochets	3,14	28	300	249	18,8	3460	44,07	4287	54,60	27,46	41,36	45,24
56	12,1a	20	Doux	4x4φ12 cõt avec crochets	4,52	25	267,8	172,5	22,2	3603	31,87	4927	43,60	17,12	55,00	35,00
57	12,1b	20	Doux	4x4φ12 cõt sans crochets	4,52	25	218,8	181,7	19,2	3603 (?)	31,87 (?)	4927 (?)	43,60 (?)	17,12	55,06	34,54
58	12,2a	20	Tor	4x4T10 cõt avec crochets	3,14	35	324,3	269,5	24,2	3420	43,57	4247	54,06	17,29	54,45	35,15
59	12,2b	20	Tor	4x4T10 cõt sans crochets	3,14	27	261	216,5	21,4	33,90	43,17	4260	54,26	17,02	55,12	34,48

ANEEXE 4 - 59 SEMELLES À 4 PIEUX

	1	8		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
		1	2										1	2
43	9,A1	27.15	62.45	228,5	120	0,525	137	0,875	36	3,34	3,34 Q ₆	60	< 90	90
44	9,A2	27.25	62.35	409,5	190	0,464	246	0,772	53,9	3,53	3,53 Q ₆	90	120	130
45	9,A3	27.18	62.42	231	170	0,735	138,8	1,225	45,5	3,74	3,74 Q ₆	85	< 160	< 170
46	10,1a	47.12	42.48	105,8	85	0,805	63,4	1,341	28,9	3,16	3,16 Q ₆	25	35	40
47	10,1b	47.50	42.10	106,4	80	0,751	63,9	1,251	32,8	2,44	2,44 Q ₆	25	45	50
48	10,2a	48.15	41.45	103,5	75	0,725	62,1	1,21	25,2	2,98	2,98 Q ₆	25	40	45
49	10,2b	48.00	42.00	106,7	80	0,751	64,0	1,25	23,7	3,38	3,38 Q ₆	25	45	50
50	10,3a	47.35	42.24	108	76	0,704	64,8	1,172	21,8	3,49	3,49 Q ₆	25	45	< 55
51	10,3b	48.36	41.24	104,6	74	0,708	62,7	1,18	24,6	3,01	3,01 Q ₆	20	40	50
52	11,1a	41.57	48.03	88,2	58,25	0,638	52,9	1,062	25,05	2,245	2,245 Q ₆	20	40	50
53	11,1b	42.48	47.12	88,5	49,25	0,556	53,1	0,93	17,65	2,79	2,79 Q ₆	20	45	0,3 mm h; pas atten- tion à la rupture
54	11,2a	40.54	49.06	91	55,75	0,613	54,6	1,02	29,7	1,88	1,88 Q ₆	20	35	< 40
55	11,2b	41.36	45.24	87,9	58,50	0,666	52,7	1,11	28,25	2,075	2,075 Q ₆	20	30	35
56	12,1a	55.00	35.00	57,1	84	1,472	34,2	2,46	11,49	7,32	7,32 Q ₆	35	55	60
57	12,1b	55.06	34.54	57,2	69,25	1,21	34,4	2,02	12,03	5,76	5,76 Q ₆	35	50	< 65
58	12,2a	54.45	35.15	54,7	75	1,372	32,8	2,282	18,2	4,12	4,12 Q ₆	20	35	40
59	12,2b	55.12	34.48	53,4	64	1,198	32,1	1,995	14,3	4,48	4,48 Q ₆	30	45	50

ANEXE 4 - 59 SEMELLES À 4 PIEUX

	1	18		19	Remarques
		1	2		
43	9, A1	< 90	90		Rupture avec décollement d'une <u>bielle</u>
44	9, A2	120	130		Rupture avec ouvertures très grande des fissures à mi-hauteur et décollement des bielles.
45	9, A3	< 160	< 170		Rupture avec décollement et écrasement de <u>bielles</u> - fissures largement ouvertes
46	10, 1a	35	40		Rupture très complexe avec fissures largement ouvertes suivant des surfaces inclinées.
47	10, 1b	45	50		Comme 10, 1a.
48	10, 2a	40	45		Poteau excentré par rapport à un des axes de la semelle : Rupture très complexe avec distorsion de la semelle dans 2 des angles.
49	10, 2b	45	50		Poteau excentré par rapport à un des axes de la semelle. Rupture complexe avec écrasement à la partie supérieure de la semelle.
50	10, 3a	45	< 55		Poteau excentré par rapport aux 2 axes de la semelle - Rupture complexe avec fissures et écrasement à la partie supérieure de la semelle.
51	10, 3b	40	50		Poteau excentré par rapport aux 2 axes de la semelle. Rupture complexe comme 10, 3a, mais avec écrasement et fissures moins accentuées.
52	11, 1a	40	50		Rupture avec ouvertures de fissures verticales et inclinées.
53	11, 1b	45	0,3 mm d'épaisseur des arêtes fissures		Rupture avec ouvertures de fissures beaucoup larges qu'avec 11, 1a
54	11, 2a	35	< 40		Rupture avec ouvertures de fissures très inclinées.
55	11, 2b	30	35		Rupture comme 11, 2a
56	12, 1a	55	60		Fissures très ouvertes en sous-face suivant diagonale. Rupture avec ouvertures de fissures verticales et inclinées.
57	12, 1b	50	< 65		Comme ci-dessus, avec fissure très ouverte entraînant un glissement de l'armature.
58	12, 2a	35	40		Rupture complexe avec fissures inclinées largement ouvertes sur certaines faces latérales.
59	12, 2b	45	50		Rupture complexe avec fissures inclinées largement ouvertes et glissement sur un appui.

ANEXE 5 - 45 SEMELLES À 3 PIEUX

Semelles sur 3 pieux

1	2	3	4	5			6				7		8	9	
				Caractères mécaniques du BÉTON			Caractères mécaniques des ACIERS				Hauteur utile mesurée ou estimée	Inclinaison des barres sur l'horizontale			Charge Q_u calculée en fonction des barres $\sigma_1 = \sigma_2$ (ou $\sigma_{0.2}$)
				σ_{jm}	σ_{jcy}	σ_j	Valeur moyenne de l'effort de la limite élastique	Valeur moyenne de la limite de rupture	Valeur moyenne de la résistance à la traction	Valeur moyenne de la résistance à la traction					
(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(cm)	(cm)	(°)	(t)								
1	3N1	55	2 axes	3 ϕ 32 cercles 3 \times 4 ϕ 20 médianes	24,13 12,57	549	455,5	35,4	20267 8125	25,2 27,7	30400 12150	37,9 38,7	43,5 48,5	38 41	334
2	3N1 bis	55	Tot	3 \times 4 T 25 côtés 3 \times 2 T 20 médianes	19,63 6,28	547	453,5	35,1	21900 14050	44,5 44,7	27800 17525	50,6 55,8	49,0 46,5	41 40	465
3	3N2	55	Deux	3 ϕ 32 cercles 2 \times 6 ϕ 16 quadrillage	24,13 (12,06)	454	376,5	31,7	20467	25,5	30500	38,0	43,5 (49,0)	38	245
4	3N2 bis	55	Tot	3 \times 4 T 25 côtés (2 \times 6 T 12 quadrillage)	19,63 (6,79)	525	437	33,9	21700	44,2	27650	56,3	49,0 (47,0)	41	392
5	3N3	80	Deux	2 ϕ 32 } cercles 1 ϕ 25 } 3 \times 4 ϕ 20 médianes	20,99 12,57	558	463	34,4	21400 16200 9150	26,6 33,1 29,1	31200 22800 12275	38,9 46,5 39,1	69 73,5	51 53	520
6	3N3 bis	80	Tot	3 \times 4 T 25 côtés 3 \times 2 T 20 médianes	19,63 6,28	493	409	31,5	21400 14300	43,6 45,6	27400 18700	55,8 59,5	74 71,5	53 52	693
7	3N4	80	Deux	2 ϕ 32 } cercles 1 ϕ 25 } (2 \times 6 ϕ 16 quadrillage)	20,99 (12,06)	394	326,5	30	20950 16300	26,1 33,3	30450 22900	37,9 46,7	69 (74)	51	371
8	3N4 bis	80	Tot	3 \times 4 T 25 côtés (2 \times 6 T 12 quadrillage)	19,63 (6,79)	511	424,5	32,1	21575	43,9	27400	55,8	74 (72)	53	589
9	4,1	20	Tot	3 \times 3 T 10 côtés	2,36	418,2	347	31,3	3497	43,9	4513	57,43	17,4	41	47,1
10	4,2	20	Tot	3 T 10 cercles	2,36 (3,14)	441,2	356	35	3420	43,57	4453	56,73	15,47	38	47,4
11	4,3	20	Tot	3 \times 2 T 10 côtés 3 \times 2 T 8 médianes	1,57 1,04	447,2	371	34,2	3500 2110	44,6 41,95	4460 3020	56,8 60,2	17,35	41	42,8
12	4,4	20	Tot	2 \times 7 T 10 quadrillage	—	440,8	331	32	3473	44,27	4530	57,37	17,55	—	—
13	6,1	30	Tot	3 \times 3 T 12 côtés	3,39	450	374	33,9	5333	47,43	5967	53,2	28,33	55,09	118
14	6,2	30	Tot	3 T 12 cercles	3,39 4,52	591,7	325	33,4	5433	48,13	6250	55,27	27,0	53,54	115
15	6,3	30	Tot	3 \times 2 T 12 côtés 3 \times 2 T 10 médianes	2,26 1,57	439	364	29,2	5463 3967	48,38 50,46	6438 4600	57,13 58,7	25,46	52,33	104
16	6,3 bis	30	Tot	3 \times 2 T 10 côtés 3 \times 2 T 12 médianes	1,57 2,26	301,2	250	23,8	3967 5463	50,46 48,38	4600 6438	58,7 57,13	26,11	52,57	97
17	6,5	30	—	Sans armatures	—	420	—	30,2	—	—	—	—	—	—	—

ANEEXE 5 - 45 SEMELLES À 3 PIEUX

1	18	14	
No d'identification de la semelle	Coursif, date préité, d'une d'ouverture à c, 3 ^{ème} (r)	Remarques	
1	3N1	200	Rupture par ouverture de fissures en sous-face et à la partie inférieure des faces latérales (fissures dessinant un arc de transmission des charges)
2	3N1 bis	280	Rupture suivant surface inclinée
3	3N2	260	Comme 3N1
4	3N2 bis	200	Comme 3N1 bis
5	3N3	420	Rupture suivant surface inclinée
6	3N3 bis	380	Rupture complexe suivant fissure verticale largement ouverte et suivant surface inclinée à partir d'un pieu
7	3NH	340	Rupture complexe avec fissures très largement ouvertes en sous-face et suivant une surface inclinée
8	3N4 bis	400	Rupture suivant surfaces inclinées avec éclatement au droit d'un pieu
9	4,1	42	Rupture suivant surface inclinée à partir d'un pieu
10	4,2	45	Rupture très complexe suivant surface inclinée et éclatement du béton
11	4,3	48	Rupture complexe suivant surfaces inclinées et éclatement du béton
12	4,4	—	Rupture très brutale consécutive à la rupture des armatures traversant la surface de rupture
13	6,1	75	Après rupture du poteau, l'essai a été poursuivi après arasement de la surface supérieure de la semelle en interposant une plaque métallique - Rupture définitive avec fissures peu inclinées
14	6,2	95	Rupture avec éclatement de béton sur une des faces
15	6,3	80	Rupture avec fissures peu inclinées
16	6,3 bis	80	Comme 6,1
17	6,5	—	Rupture brutale, la semelle sans armatures se partageant en deux

ANEEXE 5 - 45 SEMELLES À 3 PIEUX

Semelles sur 3 pieux

	4			5			6				7		8	9	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	1	2			
18	7N,1	14	Tot	3x3T10 cōts	2,36	340,8	283	17,1	3775	48,1	4400	56,15	10,5	28	30,8
19	7N,2	14	Tot	3x3T14 cōts	4,62	543,1	235	18,7	7400	48,05	8800	57,2	11,36	30	65,6
20	7N,3	20	Tot	3x3T10 cōts	2,36	264,6	220	11,8	3700	47,15	4400	56,1	16,6	40	48,1
21	7N,4	20	Tot	3x3T14 cōts	4,62	213,1	177	14,6	7450	48,35	3750	56,85	17,27	41	100,9
22	7N,5	30	Tot	3x3T12 cōts	3,39	286,8	238	17,4	5575	49,35	6500	57,55	26,6	53,30	116
23	7N,6	30	Tot	3x3T16 cōts	6,03	286,8	238	17,4	9350	46,55	11200	55,8	26,46	53,30	193,2
24	8,1	25	Deux	3x2φ10 } cōts 3x2φ8 }	2,58	279,1	232	17,7	2625 1800	33,45 35,90	3375 2350	43,0 46,8	23,1	49,30	53,3
25	8,2	25	Deux	3x4φ12 médianes	4,52	279,1	232	17,7	3800	34,15	4675	41,35	22,62	49	51,9
26	8,3	25	Deux	3x1φ8 } cōts 3x1φ10 } 3x2φ12 médianes	1,29 2,26	331	275	17,1	1900 2450 3600	37,8 31,6 31,85	2400 3150 4625	47,7 40,1 40,95	22,03	48	49,1
27	8bis,1	25	Tot	3x2T10 } cōts 3x2T8 }	2,58	355,8	295	19,0	3500 2280	44,6 45,3	4460 2435	56,8 58,33	23,1	49,30	69,7
28	8bis,2	25	Tot	3x4T12 médianes	4,52	351,2	291	17,0	5223	46,23	6483	57,4	22,62	49	71,3
29	8bis,3	25	Tot	3x1T8 } cōts 3x1T10 } 3x2T12 médianes	1,29 2,26	355,8	295	19,0	2295 3610 5245	45,60 45,95 46,40	2945 4430 6500	53,5 56,45 57,5	22,03	48	69,0
30	13,a	22	Deux	3x4φ12 cōts avec crochets	4,52	490,5	407	28,2	3626	32,23	5073	44,87	19,49	44	74,0
31	13,b	22	Deux	3x4φ12 cōts sans crochets	4,52	467,3	388	28,4	3660	32,36	5083	44,93	19,68	45	75,0
32	13,c	22	Tot	3x4T10 cōts avec crochets	3,14	479,0	398	27,2	3600	45,80	4480	57,10	19,81	45	74,4
33	13,d	22	Tot	3x4T10 cōts sans crochets	3,14	476,3	376	30,3	3540	45,70	4490	57,20	19,72	45	73,8
34	13,e	22	Deux	3x2φ12 cōts 3x2φ12 médianes avec crochets	2,26 2,26	458,3	330	30,2	3573	32,50	5073	45,10	19,62	45	59,4
35	13,f	22	Deux	3x2φ12 cōts 3x2φ12 médianes sans crochets	2,26 2,26	401,5	333	24,3	3573	31,77	5040	44,60	19,69	45	58,4
36	13,g	22	Tot	3x2T10 cōts 3x2T10 médianes avec crochets	1,57 1,57	446,6	371	26,7	3600	45,80	4501	57,43	20,51	46	60,7
37	13,h	22	Tot	3x2T10 cōts 3x2T10 médianes sans crochets	1,57 1,57	287,8	234	24,3	3587	45,67	4470	57,20	19,40	44,30	57,2

ANEEXE 5 - 45 SEMELLES À 3 PIEUX

	1	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
											1	2	
18	7N,1	30,8	34,0	1,268	18,5	2,110	10,6	3,68	3,68 Q _e	15	25	30	Rupte à par
19	7N,2	65,6	44,75	0,682	39,4	1,138	12,0	3,73	3,73 Q _e	15	35	40	comm
20	7N,3	48,1	59,5	1,238	28,8	2,065	15,55	3,83	3,83 Q _e	20	40	50	comm in cpi
21	7N,4	100,9	54,75	0,642	60,5	1,070	12,98	4,99	4,99 Q _e	20	50	55	comm
22	7N,5	116	90	0,776	69,6	1,293	26,0	3,460	3,46 Q _e	50	85		Rupte mes
23	7N,6	193,2	105	0,543	116	0,905	25,8	4,065	4,065 Q _e	50	90		com
24	8,1	53,3	58,75	1,102	32,0	1,838	22,7	2,59	2,59 Q _e	35	50	55	Rupte in cpi
25	8,2	51,9	44,0	0,848	31,15	1,413	22,3	1,975	1,975 Q _e	30	< 35	35	Rupte ou pa
26	8,3	49,1	45	0,916	29,45	1,528	25,8	1,745	1,745 Q _e	30	< 45	< 45	com
27	8 ^{bis} ,1	69,7	75	1,077	41,85	1,792	28,85	2,60	2,60 Q _e	35	55	60	Rupte sur va
28	8 ^{bis} ,2	71,3	54,25	0,761	42,8	1,270	28,0	1,94	1,94 Q _e	35	40	45	Rupte pisse
29	8 ^{bis} ,3	69,0	68,25	0,990	41,4	1,650	27,75	2,46	2,46 Q _e	35	50	60	com
30	12,a	74,0	75,0	1,014	44,4	1,690	34,0	2,270	2,21 Q _e	30	60	< 70	Rupte in cpi
31	13,b	75,0	53,5	0,714	45,0	1,190	32,8	1,631	1,631 Q _e	25	0,2mm n'est pas atteint à la rupture	—	Rupte part
32	13,c	74,0	69,25	0,932	44,6	1,555	33,9	2,045	2,045 Q _e	30	50	55	com
33	13,d	73,8	64,0	0,867	44,3	1,445	33,4	1,920	1,920 Q _e	25	50	55	Rupte in cpi d'au
34	13,e	59,4	66,75	1,123	35,6	1,875	31,9	2,095	2,095 Q _e	25	< 55	55	Rupte verti.
35	13,f	58,4	50	0,856	35,0	1,430	28,1	1,780	1,780 Q _e	20	< 50	50	Rupte à par
36	13,g	60,7	63	1,039	35,4	1,730	32,6	1,935	1,935 Q _e	20	40	45	comm
37	13,h	57,2	45,1	0,789	34,3	1,317	19,85	2,275	2,275 Q _e	20	35	< 45	com

ANEEXE 5 - 45 SEMELLES À 3 PIEUX

	1	18		19
		1	2	
18	7 N, 1	25	30	Rupture suivant surface inclinée à partir d'un pieu.
19	7 N, 2	35	40	comme 7 N, 1
20	7 N, 3	40	50	comme 7 N, 1, mais avec fissure inclinée moins ouverte.
21	7 N, 4	50	55	comme 7 N, 3
22	7 N, 5	85	pas de mesures possibles avant rupture	Rupture très complexe avec éclatement d'une brique de béton.
23	7 N, 6	90	0.3 mm n'est pas atteint jusqu'à la rupture	comme 7 N, 1
24	8, 1	50	55	Rupture suivant surface inclinée à partir d'un pieu.
25	8, 2	< 35	35	Rupture avec fissures verticales ou peu inclinées.
26	8, 3	< 45	< 45	comme 8, 2
27	8 bis, 1	55	60	Rupture avec fissures peu inclinées et suivant surface inclinée sur un pieu
28	8 bis, 2	40	45	Rupture avec ouverture des fissures à la partie inférieure
29	8 bis, 3	50	60	comme 8 bis 2
30	13, a	60	< 70	Rupture complexe suivant surfaces inclinées partant de 2 pieux
31	13, b	0.2 mm n'est pas atteint à la rupture	—	Rupture avec glissement de la partie sur un pieu.
32	13, c	50	55	comme 13, a
33	13, d	50	55	Rupture complexe suivant surfaces inclinées à partir et au droit d'un pieu.
34	13, e	< 55	55	Rupture avec ouverture des fissures verticales et inclinées.
35	13, f	< 50	50	Rupture suivant surface inclinée à partir d'un pieu et glissement
36	13, g	40	45	comme 13, a et 13, c
37	13, h	35	< 45	comme 13, e

Semelles sur 3 pieux

	1	2	3	H	5			6				7	8	9	10	
					1	2	3	1	2	3	4					
38	17a	30	Doux	3x4φ12 côtés avec crochets	4,52	382,7	318	27,3	353,7	31,70	5073	44,87	27,73	54,40	104	106,75
39	14, b	30	Doux	3x4φ12 côtés sans crochets	4,52	389,3	323,5	28,1	3593	31,77	5120	45,30	28,46	53,20	99,2	90,25
40	14, c	30	Tor	3x4T10 côtés avec crochets	3,14	402,7	334,5	26,4	3653	46,53	4553	57,97	27,60	54,30	105,2	80
41	14, d	30	Tor	3x4T10 côtés sans crochets	3,14	414	344	24,6	3660	46,50	4490	57,20	27,01	54	103,3	80,25
42	14, e	30	Doux	3x2φ12 côtés 3x2φ12 médians avec crochets	2,26 2,26	348,8	290	23,7	3637	32,17	5113	45,23	28,36	53,12	78,6	90,25
43	14, f	30	Doux	3x2φ12 côtés 3x2φ12 médians sans crochets	2,26 2,26	353,7	277	24,6	3660	32,40	5127	45,34	26,64	53,33	80,2	85
44	14, g	30	Tor	3x2φ10 côtés 3x2φ10 médians avec crochets	1,57 1,57	325,7	270	23,4	3710	47,13	4540	57,83	27,40	54,15	83,5	85,25
45	14, h	30	Tor	3x2φ10 côtés 3x2φ10 médians sans crochets	1,57 1,57	347,8	288,5	20,9	3893	49,60	4704	59,90	27,91	54,48	89,2	81,75

10	11	12	13	14	15	16	17	18		19
								1	2	Remarques
106,75	1,021	62,4	1,709	35,4	3,01	3,01 Q ₂	55	85	90	Dans une première phase, écrasement du béton - travail repris après écrasement de la partie supérieure de la semelle et intervention d'une plaque de renfort. Dislocation sur un talon.
90,25	0,91	59,5	1,518	35,1	2,575	2,575 Q ₂	40	80	0,3 mm n°5 pas atteint pour rupture	Rupture complexe avec fissures largement ouvertes à la partie inférieure.
80	0,761	63,4	1,270	37,2	2,15	2,15 Q ₂	40	70	80	Rupture par dislocation sur un appui suivant surface inclinée et éclatement transversal.
80,25	0,776	62,0	1,295	37,5	2,135	2,135 Q ₂	55	75	0,3 mm n°5 pas atteint pour rupture	Rupture avec fissures largement ouvertes en tous sens et à la partie inférieure.
90,25	1,149	41,15	1,913	31,35	2,88	2,88 Q ₂	45	70	80	comme 13, d.
85	1,06	48,1	1,77	30,1	2,83	2,83 Q ₂	40	65	75	Rupture complexe avec fissures verticales et inclinées très ouvertes.
85,25	1,021	50,1	1,702	30	2,84	2,84 Q ₂	50	70	75	Rupture complexe suivant surface inclinée à partir d'un appui.
81,75	0,716	53,5	1,53	32,2	2,54	2,54 Q ₂	45	65	75	Rupture avec ouvertures de fissures à la partie inférieure.

ANEEXE 6 - 12 SEMELLES À 2 PIEUX

Semelles sur 2 pieux

1	2	3	4	5			6				7		8	
				Caractéristiques méc. du BÉTON			Caractéristiques méc. des ACIERS				Hauteur utile			
				1	2	3	1	2	3	4	1	2		
N° d'iden- tification de la semelle	Hauteur de la semelle h_E (cm)	Nuance des arma- tures	Disposition des armatures section nominale A' (en cm ²)	σ_j (sur cubes) mesure	σ_j cyl. (sur cylindres) calculé	σ_j (sur prismes) $(\sigma_j = \frac{3.5M}{b^3})$	Valeur moye- ne de l'effort dans une barre à la limite élas- tique	Valeur moyenne de la limite élastique σ_e ou $\sigma_{0,2}$	Valeur moy. de l'effort dans une barre à la rupture	Valeur moy. de la résist. à la traction	Hauteur utile mesurée ou estimée $h_{mes.}$ $h_{est.}$	Incli- naison des bielles sur l'hor- izontale θ		
				(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg)	(kg/mm ²)	(kg)	(kg/mm ²)	(cm)	(cm)	(°)	
1	2N1	55	Deux lisses	6 ϕ 32 longitudinaux	48,25	233,6	235,5	23,6	18.700	23,23	27.850	34,60	49,5	44
2	2N1 ^{bis}	55	Câblés	5 ϕ 32 longitudinaux	40,21	528,8	440	31,1	37.720	46,88	64.620	80,34	49,5	44
3	2N2	75	Deux lisses	6 ϕ 32 longitudinaux	48,25	334,5	278	26,9	19.256	23,98	28.917	35,97	70,3	54
4	2N2 ^{bis}	75	Câblés	5 ϕ 32 longitudinaux	40,21	547,5	455	30,8	38.080	47,38	64.800	80,56	69,3	53,30
5	2N3	95	Deux lisses	6 ϕ 32 longitudinaux	48,25	393,1	327	28,7	23.517	29,27	38.733	48,23	89,4	60
6	2N3 ^{bis}	95	Câblés	5 ϕ 32 longitudinaux	40,21	565,5	470	31,8	37.760	46,96	63.960	79,62	89,2	60
7	5,a	20	Tot	3 ϕ 12 longitudinaux	3,39	454,3	376	31,1	5.550	49,15	6.375	56,50	15,13	46,06
8	5,b	20	Tot	3 ϕ 12 longitudinaux	3,39	438,2	364	33,0	5.450	48,55	6.325	56,45	15,27	43,51
9	5 ^{bis} ,a	20	Tot	3 ϕ 16 longitudinaux	6,03	285	237	20,2	9.466	47,13	10.800	53,80	15,13	37,39
10	5 ^{bis} ,b	20	Tot	3 ϕ 16 longitudinaux	6,03	298,3	248	20,0	8.900	44,33	10.600	52,80	17,9	32,36
11	5 ^{bis} ,c	20	Tot	3 ϕ 16 longitudinaux	6,03	236,8	238	16,7	9.500	47,30	11.033	55,00	17,8	39
12	5 ^{bis} ,d	20	Tot	3 ϕ 16 longitudinaux	6,03	286,8	238	16,7	9.533	47,47	11.100	55,30	18,17	34,24

ANNEE 6 - 12 SEMELLES À 2 PIEUX

1	8	9		10	11		12		13		14	15	16	17	18	
		1	2		1	2	1	2	1	2						
N° d'identification de la semelle	Inclinaison des bielles sur l'horizontale θ (°)	Charge Q_e calculée par la méthode des bielles pour $\sigma_a = \sigma_e$ ou $\sigma_{0,2}$ par la méthode simplifiée		Charge de rupture observée Q_u (t)	valeurs de $\frac{Q_u}{Q_e}$ par la méthode simplifiée		charge d'utilisation Q_a correspondant à une contrainte moyenne des armatures $\sigma_a = \frac{3}{5} \sigma_e$ (ou $\sigma_{0,2}$) par la méthode simplifiée		Valeurs de $\frac{Q_u}{Q_a}$ par la méthode simplifiée		Charge d'utilisation Q_b correspondant à la condition de contrainte limite des bielles (t)	Valeur de $\frac{Q_u}{Q_b}$	Charge de rupture observée, exprimée en fonction du minimum des valeurs respectives de Q_a et Q_b (t)	Charge correspondante à l'apparition de la fissure observée (t)	Ch d'	
1	2N1	44	215,5	190,5	210	0,970	1,105	130	114,5	1,615	1,840	95,5	2,200	2,20 Q_b	25	/
2	2N1 ^{bis}	44	363,5	320	325	0,894	1,020	218	192	1,490	1,700	178	1,830	1,83 Q_b	80	/
3	2N2	54	316,5	275	300	0,947	1,080	190	167	1,580	1,800	152	1,975	1,975 Q_b	100	/
4	2N2 ^{bis}	53,30	515	453	520	1,010	1,150	309	272	1,685	1,920	247,5	2,100	2,10 Q_b	100	/
5	2N3	60	492	433	450	0,915	1,042	295	259,5	1,525	1,740	206,2	2,180	2,18 Q_b	100	/
6	2N3 ^{bis}	60	556	577	600	0,915	1,042	393,5	346	1,525	1,740	297	2,020	2,02 Q_b	180	/
7	5,a	46,06	34,55	29,9	38,5	1,115	1,290	20,75	17,95	1,860	2,150	22,9	1,58	2,15 Q_u	10	/
8	5,b	43,51	31,40	27,4	33,75	1,075	1,232	18,85	16,45	1,790	2,055	21,0	1,61	2,055 Q_u	5	/
9	5 ^{bis} ,a	37,39	43,80	39,0	24,75	0,565	0,535	26,30	23,40	0,941	1,058	10,4	2,38	2,38 Q_b	10	/
10	5 ^{bis} ,b	32,36	34,20	30,9	19,25	0,563	0,623	20,50	18,55	0,938	1,040	8,46	2,28	2,28 Q_b	5	/
11	5 ^{bis} ,c	39	46,10	40,8	27,5	0,547	0,673	27,65	24,50	0,995	1,122	11,1	2,48	2,48 Q_b	10	/
12	5 ^{bis} ,d	34,24	39,20	35,2	20	0,511	0,568	23,50	21,10	0,851	0,946	8,93	2,24	2,24 Q_b	10	/

ANEEUXE 6 - 12 SEMELLES À 2 PIEUX

1	17	18		19
		1	2	
N° d'identification de la semelle	Charge correspond à l'apparition de la fissure observée	Charge correspondant à l'apparition d'une fissure d'ouverture égale à 0,2 mm	Charge correspondant à l'apparition d'une fissure d'ouverture égale à 0,3 mm	Remarques
	(t)	(t)	(t)	
1 2N1	25	100	120	Rupture par écrasement d'une bielle de béton. (partie supérieure).
2 2N1 ^{bis}	80	160	180	Rupture par écrasement de la bielle de béton et rupture d'ancrage à une extrémité.
3 2N2	100	200	240	Rupture par écrasement d'une bielle de béton (partie supérieure).
4 2N2 ^{bis}	100	200	260	Rupture par écrasement de la bielle de béton à la partie supérieure et à mi-hauteur.
5 2N3	100	180	220	Rupture par écrasement de la bielle de béton (partie supérieure et partie inférieure).
6 2N3 ^{bis}	180	260	320	Rupture par écrasement du béton comprimé à la partie supérieure et à mi-hauteur.
7 5,a	10	25	30	Rupture par écrasement de la bielle.
8 5,b	5	20	25	Rupture par écrasement de bielles.
9 5 ^{bis} ,a	10	17,5	22,5	Rupture par fissures inclinées.
10 5 ^{bis} ,b	5	12,5	15	Rupture par fissures inclinées.
11 5 ^{bis} ,c	10	20	0,3 mm pas atteint jusqu'à la rupture	Rupture par fissures inclinées.
12 5 ^{bis} ,d	10	15	pas de mesures	Rupture par écrasement d'un pieu.

BLÉVOT - 1957 - Relatório Preliminar

INSTITUT DE RECHERCHES APPLIQUÉES DU BÉTON ARMÉ

Semelles en béton armé sur pieux

Premières conclusions tirées des essais en cours de réalisation
au Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics

PAR

J. BLÉVOT

Délégué général adjoint du *Bureau Securitas*
Professeur à l'École Centrale

Cahier N° 5.



SUPPLÉMENT AUX

ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

MARS-AVRIL 1957

Dixième Année, N^{os} 111-112Série : **BÉTON. BÉTON ARMÉ (44)****PREMIÈRE ET DEUXIÈME SESSIONS D'ÉTUDES ET DE PERFECTIONNEMENT
DE L'INSTITUT DE RECHERCHES APPLIQUÉES DU BÉTON ARMÉ (IRABA)**

SÉANCES DES 9 AVRIL ET 19 NOVEMBRE 1956

SEMELLES EN BÉTON ARMÉ SUR PIEUX*Premières conclusions tirées des essais en cours de réalisation*
au Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publicspar **M. J. BLÉVOT.**Délégué général adjoint du *Bureau Securitas*,
Professeur à l'École Centrale

RÉSUMÉ

L'auteur rend compte des résultats des essais effectués au C.E.B.T.P., à l'instigation du *Bureau Securitas*, sur des semelles en béton armé sur pieux. Ces essais avaient pour objet de définir expérimentalement les conditions de validité de la « méthode des bielles », usuellement appliquée au calcul de telles semelles. Ils ont montré que l'application de cette méthode de calcul conduit à des coefficients de sécurité normaux lorsque l'inclinaison des bielles fictives est voisine de 45°; pour des inclinaisons sensiblement plus faibles ou plus fortes, les coefficients de sécurité sont réduits. Les essais ont porté sur des semelles à trois et quatre pieux comportant différents systèmes d'armatures: la plupart des systèmes logiques sont sensiblement équivalents en ce qui concerne la sécurité à rupture mais, parmi eux, certains sont préférables du point de vue des risques de fissuration. D'autres essais sont prévus, pour compléter l'étude expérimentale entreprise.

SUMMARY

The author gives an account of the results of tests on reinforced concrete footings on piles carried out at the C.E.B.T.P. at the instigation of the *Bureau Securitas*. The object of these tests was to define experimentally the conditions of validity of the «strut method» of calculation usually applied to footings of this kind. The tests have shown that this method of calculation gives normal safety factors when the incline of the imaginary struts is near 45° but, that for inclines appreciably higher or lower, the factors of safety are reduced. The tests were carried out on footings on three and four piles using different reinforcing systems. Most of the logical systems give about the same safety to rupture but, amongst them, some offer less risks of cracking. Other tests are envisaged, to complete the study.

INSTITUT DE RECHERCHES APPLIQUÉES DU BÉTON ARMÉ
ASSOCIATION PROFESSIONNELLE POUR L'ACCROISSEMENT DE LA PRODUCTIVITÉ
DANS L'INDUSTRIE DU BATIMENT
CHAMBRE SYNDICALE DES CONSTRUCTEURS EN CIMENT ARMÉ

SEMELLES EN BÉTON ARMÉ SUR PIEUX

Premières conclusions tirées des essais en cours de réalisation

au Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics

Introduction.

Les semelles sur pieux sont en général calculées, dans les bureaux d'études, par application de la « méthode des bielles ». Cette méthode a été exposée par M. LEBELLE pour les semelles sur sol, à la suite des essais effectués sous sa direction au *Bureau Securitas* en 1934-1935. On peut évidemment en étendre le principe aux semelles sur pieux : la charge du poteau est supposée transmise aux pieux dans la hauteur de la semelle par des bielles inclinées; les efforts horizontaux de traction résultant de la décomposition des forces transmises par les bielles sont équilibrés par des armatures pour lesquelles différentes dispositions peuvent être adoptées.

Dans les schémas donnés en annexe p. 247 et 248, nous avons indiqué les sections des armatures requises par application de la méthode des bielles dans les cas suivants :

- Pour les semelles à quatre pieux :
dispositions d'armatures (1), (2), (3), (4);
- Pour les semelles à trois pieux :
dispositions d'armatures (1), (2), (3) et (4).

A notre connaissance, il n'y a pas eu d'essais systématiques effectués sur des semelles sur pieux.

Cependant, seuls de tels essais poussés jusqu'à rupture, peuvent donner des renseignements valables sur le coefficient de sécurité que présentent des semelles calculées par la méthode des bielles et sur l'efficacité comparée des différents systèmes d'armatures utilisés.

Par ailleurs, les semelles de hauteur réduite peuvent périr par poinçonnement ou par effets de l'effort tranchant; *a priori*, de telles ruptures peuvent se produire de deux façons différentes :

- Soit par poinçonnement du centre de la semelle sous l'effet de la charge du poteau;
- Soit par rupture d'un angle de la semelle sous l'effet de la réaction d'un pieu suivant des surfaces plus ou moins inclinées sur la verticale.

Sur ces dernières questions, comme sur les précédentes, seuls des essais poussés jusqu'à rupture peuvent conduire à des conclusions valables.

C'est dans ces conditions qu'un programme d'essais systématiques sur des semelles sur pieux a été entrepris dans le cadre des recherches d'ordre général effectuées par le *Bureau Securitas* et par la *SOCOTEC*. Ce programme est actuellement en cours de réalisation. Ces essais ont donc spécialement pour objet :

- 1° De déterminer à quel coefficient de sécurité conduit l'application de la méthode des bielles;
- 2° De rechercher si les diverses dispositions d'armatures théoriquement équivalentes ont une efficacité comparable au double point de vue de la sécurité à la rupture et de la sécurité à la fissuration et d'en déduire

éventuellement les dispositions qui sont à utiliser de préférence;

3° De chercher à déterminer dans quelles conditions peuvent se produire les ruptures par poinçonnement ou par effets de l'effort tranchant.

Nous devons signaler, dès maintenant, que les essais effectués à ce jour ne nous ont pas permis d'atteindre tous les objectifs que nous nous étions fixés. Si dans les essais de poutres, il n'est pas toujours facile de distinguer les effets des couples de flexion et ceux de l'effort tranchant, une pareille discrimination est encore beaucoup plus difficile dans le cas des semelles, pièces massives de petite portée. Dans de nombreux essais, nous nous sommes trouvés en présence de phénomènes de rupture extrêmement complexes difficiles à analyser.

Nous donnerons dans ce qui suit les conclusions limitées que nous estimons être en mesure de tirer des essais effectués; des essais complémentaires sont à notre avis nécessaires pour conduire d'une façon certaine à des conclusions plus générales. Auparavant, nous donnerons quelques indications sur les conditions de réalisation des essais.

Conditions de réalisation des essais.

Les essais ont porté sur des semelles à quatre pieux et à trois pieux et sur quelques semelles à deux pieux.

La plus grande dimension en plan des semelles à quatre et trois pieux était de 60 cm, cette limite étant imposée par l'utilisation de la machine Trayvou de 500 t du *Centre Expérimental*. Les pieux de section carrée sur lesquels reposaient les semelles avaient 14 cm de côté; les poteaux de section également carrée, avaient en général 15 cm de côté, quelquefois 18 cm, pour éviter des ruptures prématurées par écrasement des poteaux.

La distance entre axes des pieux était de 42 cm, soit trois fois le côté du pieu, c'est là une proportion qui, bien que n'ayant pas un caractère absolu, est souvent adoptée.

Les semelles essayées peuvent être considérées comme des modèles réduits dans des rapports compris entre 1/2 et 1/3 de semelles usuelles avec des charges de 40 à 100 t par pieu.

Il était nécessaire de centrer correctement la charge, mais ceci ne présentait pas de difficultés majeures. Il fallait également assurer :

- a) La liberté de rotation des sections inférieures des pieux;
- b) La liberté de déplacement de ces sections dans le plan horizontal;

afin d'éliminer les effets favorables d'encastrement ou de frottement susceptibles de réduire les efforts de traction à la partie inférieure des semelles.

Dans les premiers essais, nous avons disposé une bille unique sous chaque pieu, mais ce dispositif s'est avéré inefficace car les billes étaient de diamètre trop réduit et le métal des plaques interposées de dureté insuffisante et l'on a constaté des empreintes de profondeur appréciable opposant une résistance certaine aux déplacements horizontaux.

Par la suite, tout en conservant le dispositif à bille unique permettant la libre rotation des sections inférieures des pieux, nous avons réalisé sous chaque pieu, pour assurer la liberté de déplacement horizontal, un appui comportant un grand nombre de billes interposées entre deux plaques de métal convenablement traité : ce double dispositif a donné satisfaction (voir croquis annexés p. 247 et 248).

Compte rendu des essais effectués et résultats actuellement acquis.

A. Semelles sur quatre pieux.

Nous avons, pour différentes hauteurs, essayé des semelles présentant les dispositions d'armatures suivantes (voir croquis annexés p. 247) :

- 1° Armatures suivant les côtés du carré ayant pour sommets les centres de section des pieux;
- 2° Armatures suivant les diagonales du même carré;
- 3° Système mixte avec armatures disposées sensiblement par moitié suivant les côtés et suivant les diagonales du carré formé par les centres des sections des pieux;
- 4° Armatures en cerces;
- 5° Armatures disposées suivant un quadrillage régulier.

La détermination des armatures de ce dernier système ne relève pas de la méthode des bielles, nous avons adopté le même poids total d'armatures que dans la disposition (1). On peut remarquer que les poids théoriques d'armatures correspondant aux quatre premières dispositions sont égaux.

A1. Sécurité à rupture.

Au point de vue de la *sécurité à rupture*, les systèmes (1), (2), (3) et (4) se sont révélés sensiblement équivalents. Le système (5) avec armatures réparties en quadrillage donne, à poids égal, une sécurité un peu plus faible.

Si nous définissons le coefficient de sécurité comme rapport de la charge ayant déterminé la rupture de la semelle à la charge calculée par application de la méthode des bielles pour une contrainte des armatures égale aux $6/10$ de la limite élastique du métal ($R'_a = 0,6 R'_e$) nous pouvons tirer des essais les conclusions suivantes :

a) Si l'on élimine les résultats obtenus dans les premiers essais avec le système imparfait à bille unique, les coefficients de sécurité sont de l'ordre de 2 pour les systèmes d'armatures (1) à (4). Ces coefficients varient entre 1,7 et 2,3. Mais ces conclusions ne sont valables que pour des inclinaisons des bielles fictives sur l'horizontale voisines de 45° , les limites de validité nous paraissent pouvoir être fixées provisoirement à 35° d'une part et 50° d'autre part.

b) Pour des inclinaisons sur l'horizontale inférieures à 35° , nous avons constaté des coefficients de sécurité nettement plus faibles, correspondant à des phénomènes de rupture complexes que nous ne sommes pas parvenus à analyser suffisamment pour en tirer des conclusions générales.

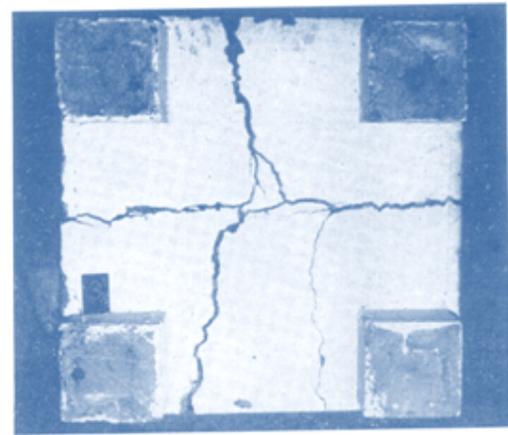
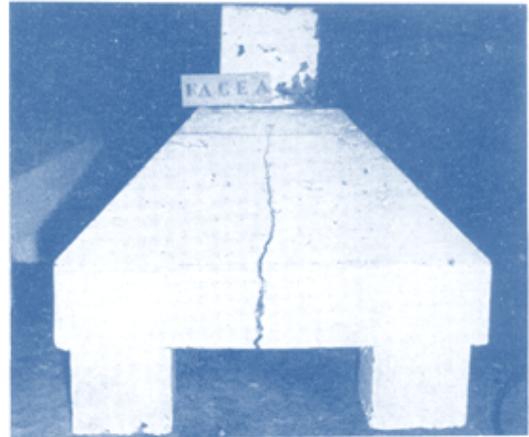


FIG. 1 et 2. — Semelle sur quatre pieux. $h = 30$ cm. Système mixte d'armatures suivant côtés et diagonales. Armatures en acier doux. Sous-face et face latérale A après rupture. (Rupture type par insuffisance des armatures inférieures.)

c) Pour des inclinaisons sur l'horizontale supérieures à 50° , donc avec des semelles relativement hautes, nous avons observé des glissements des bielles comprimées de béton au voisinage du collet, il s'agit là d'un phénomène voisin de celui qui a déjà été signalé pour les consoles courtes par rapport à la hauteur de section (voir notamment *Formulaire du béton armé* de R. CHAMBAUD et P. LEBELLE, p. 383). La trop forte obliquité des bielles ne permet pas d'utiliser totalement la résistance des armatures disposées à la partie inférieure.

Nous comptons entreprendre des essais complémentaires pour étudier le comportement des semelles de hauteur réduite et de grande hauteur.

d) Même pour des hauteurs correspondant à des inclinaisons de bielles voisines de 45° , nous avons obtenu des coefficients de sécurité très notablement inférieurs à 2 pour des sections d'armatures relativement très importantes, mais il ne semble pas que de tels cas se rencontrent en pratique car ils correspondent à un pourcentage anormal d'armatures. Il serait intéressant, néanmoins, de fixer éventuellement la valeur d'un pourcentage limite au-dessus duquel le coefficient de sécurité deviendrait insuffisant, ce sera l'objet d'essais ultérieurs.

A2. Fissuration.

En ce qui concerne les conditions de fissuration, il semble que l'on puisse tirer des essais les conclusions suivantes :

a) D'une façon générale, sous des charges déterminant dans les armatures des contraintes calculées égales aux contraintes admissibles, on observe déjà des fissures, mais l'ouverture de celles-ci est très faible et on peut considérer que ces fissures sont pratiquement sans inconvénient pour la tenue des ouvrages. Les premières fissures apparaissent, en général, sur les faces latérales des semelles, on voit apparaître ensuite des fissures en sous-face.

b) Les semelles du type (2) avec armatures disposées *uniquement* suivant les diagonales sont moins favorables que les autres car les fissures sur les faces latérales s'ouvrent assez rapidement.

c) Les semelles avec armatures du type (1) suivant les quatre côtés du carré formé par les centres des sections des pieux et celles du type (4) avec cerces sont affectées par des fissures moins importantes sur les faces latérales, mais l'absence d'armature au centre de la semelle permet un développement de la fissuration en sous-face lorsque les charges augmentent. Bien que nous n'ayons pas fait d'essais directs dans ce sens, nous pensons que ces dispositions (1) et (4) pourraient être améliorées par l'adjonction d'un quadrillage d'armatures (de préférence sous forme de quadrillage soudé). Le système mixte (1) + (5) ou (4) + (5) ainsi réalisé ne correspondrait pas à un coefficient de sécurité à la rupture sensiblement réduit par rapport à une semelle du type (1) ou du type (4) de même poids total d'armatures sous réserve que les armatures (1) ou (4) soient nettement prépondérantes (par exemple 80 % des armatures en système (1) ou (4) et seulement 20 % en quadrillage régulier).

d) Les semelles du type (3) avec armatures mixtes suivant les diagonales et suivant les côtés du carré paraissent présenter un certain avantage au point de vue de la fissuration, ce qui est somme toute assez logique puisque les armatures sont réparties à la fois sur le contour de la semelle et au centre de celle-ci.

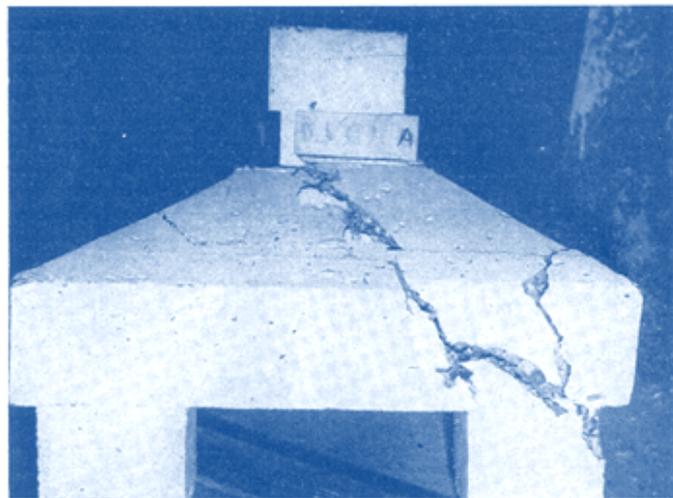


FIG. 3. — Semelle sur quatre pieux. $h = 20$ cm. Armatures suivant les quatre côtés. Acier Tor. Face latérale A après rupture. (Rupture suivant un plan incliné.)

A3. Résistance aux effets de poinçonnement et d'effort tranchant.

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, la complexité des phénomènes observés ne nous a pas permis de définir, jusqu'à maintenant les conditions de résistance au poinçonnement et aux effets de l'effort tranchant. Ces conditions sont liées à l'intensité des contraintes normales et dépendent, par suite, de la section des armatures inférieures de la semelle et de leurs caractéristiques mécaniques. Nous estimons toutefois être en mesure d'affirmer que des semelles pour lesquelles l'inclinaison des bielles fictives sur l'horizontale est au moins égale à 35° et dont les armatures sont déterminées par la méthode des bielles ne présentent pas de risques anormaux de rupture par poinçonnement ou effets de l'effort tranchant*.

A4. Conclusions.

Nous avons vu que les essais légitimaient l'application de la méthode des bielles aux semelles sur quatre pieux, sous réserve que les bielles fictives considérées aient une inclinaison voisine de 45° .

Des limites provisoirement admises, il résulterait que la hauteur utile au collet h_1 devrait satisfaire aux conditions résultant des doubles inégalités ci-après :

$$0,70 < \frac{h_1}{\left(\frac{A}{2} - \frac{a}{4}\right) \sqrt{2}} < 1,20$$

ou $0,50 \left(A - \frac{a}{2}\right) < h_1 < 0,85 \left(A - \frac{a}{2}\right)$

Toutefois, il convient de signaler que, dans ces limites, du double point de vue de l'économie d'acier et de la facilité de ferrailage, il est préférable de prévoir des semelles relativement hautes, avec des bielles fictives ayant une inclinaison sur l'horizontale au moins égale à 45° .

En résumé, on peut conseiller d'adopter, pour la hauteur utile au collet h_1 , une valeur satisfaisant à la double inégalité

$$0,70 \left(A - \frac{a}{2}\right) < h_1 < 0,85 \left(A - \frac{a}{2}\right).$$

Il est possible de réduire l'épaisseur sur les bords de la semelle aux $2/3$ de la hauteur au collet.

Les armatures peuvent, dans ces conditions, être calculées par la méthode des bielles (formules des schémas annexés).

Les dispositions d'armatures à préconiser sont les suivantes :

— Soit système mixte (type 3) avec armatures suivant les côtés et suivant les diagonales du carré formé par les centres des sections des pieux — les sections des armatures suivant les côtés et celles des armatures suivant les diagonales étant du même ordre ;

— soit système mixte avec armatures suivant les côtés type (1) ou en cerces type (A) complétées par un quadrillage régulièrement réparti ; les sections d'armatures étant calculées par les formules donnant ω_1 ou ω_4 du tableau annexé, on disposera au moins les 80/100 en armatures suivant les côtés ou en cerces et le complément (inférieur à 20/100) en quadrillage régulier.

* Il convient de signaler que nous n'avons pas obtenu, jusqu'à maintenant, de rupture par poinçonnement au centre de la semelle, même pour des semelles plates, mais plutôt des ruptures au voisinage des angles des semelles.

REMARQUES

Il convient de noter que, dans les semelles transmettant une charge importante, il y a intérêt à utiliser des armatures à *caractéristiques mécaniques élevées* pour réduire les diamètres des barres. Il faut également noter qu'en raison de l'importance des diamètres de barres auxquels on est normalement conduit et de la superposition des différents lits, les valeurs de la distance d' du centre de gravité des barres à la sous-face des semelles ($d' = h - h_1$) sont relativement grandes et ne doivent pas être sous-estimées. Elles sont rarement inférieures à 6 cm pour des pieux de 25×25 et peuvent atteindre 8 et même dépasser 10 cm pour des pieux de plus forte section.

Enfin, nous croyons devoir signaler que, dans les systèmes de ferrailage mixtes préconisés, il peut être commode, pour faciliter l'ancrage des barres et éviter l'enchevêtrement des dispositifs d'ancrage des différents lits, de prévoir des dispositifs d'ancrage différents pour ces lits, ou au moins d'adopter des rayons de courbure différents pour la confection des crosses.

B. Semelles sur trois pieux.

Pour différentes hauteurs de semelles, nous avons étudié les trois systèmes de ferrailage suivants (voir croquis annexés p. 248) :

1° Armatures disposées suivant les trois côtés du triangle ayant pour sommets les centres des sections des pieux;

2° Armatures en cerces;

3° Armatures disposées suivant les médianes et suivant les côtés du triangle formé par les pieux.

Nous avons également essayé deux semelles avec la disposition suivante :

4° Armatures uniquement suivant les médianes. Un tel système est logique, sous réserve que les armatures soient ancrées du côté opposé aux pieux.

Nous avons enfin effectué un essai sur une semelle avec des armatures disposées suivant un quadrillage uniformément réparti en plan (disposition 5). Cette disposition est, *a priori*, illogique mais il nous a paru nécessaire de la soumettre à un essai car certains bureaux d'études la préconisent.

Les armatures dont la détermination ne relève pas de l'application de la méthode des bielles avaient été fixées par la condition que leur poids soit sensiblement le même que celui des armatures des types (1), (2) et (3).

Cette semelle s'est rompue, d'une façon d'ailleurs extrêmement brutale, sous une charge sensiblement moitié de celles correspondant aux semelles de mêmes dimensions et de même poids d'armatures. Il apparaît donc que ce système est à rejeter.

B1. Sécurité à la rupture.

En ce qui concerne la *sécurité à la rupture* des autres systèmes, les essais effectués permettent de tirer les conclusions suivantes :

a) Les systèmes (1), (2) et (3) présentent des coefficients de sécurité sensiblement égaux sous réserve, en ce qui concerne le système (3), que les armatures suivant les côtés représentent plus de la moitié de la totalité des armatures. Lorsque les armatures suivant les médianes sont prépondérantes, les charges de rupture des semelles (3) sont plus faibles, toutes conditions égales d'ailleurs, que celles de semelles des types (1) et (2);

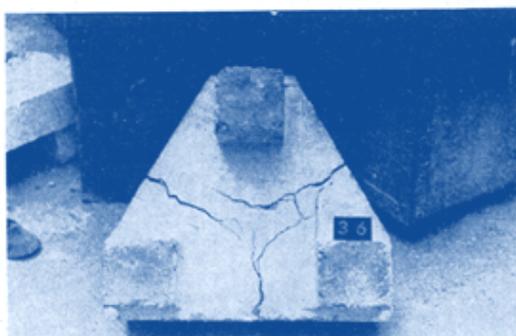
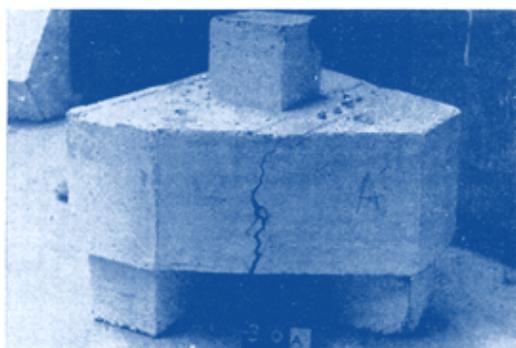


FIG. 4 et 5. — Semelle sur trois pieux. $h = 25$ cm. Armatures en acier doux suivant côtés et médianes. Sous-face et face A après rupture. (Rupture type par insuffisance des armatures inférieures.)

b) Les semelles du type (4) avec armatures uniquement suivant les médianes et ancrées au centre de la semelle ont présenté des coefficients de sécurité assez nettement plus faibles que ceux correspondant aux semelles des types (1) et (2).

Il convient de noter que les coefficients de sécurité obtenus pour les types d'armatures (1), (2) et (3) sont en moyenne légèrement plus faibles pour les semelles à trois pieux que ceux des semelles à quatre pieux. Avec la même définition du coefficient de sécurité que celle indiquée plus haut, on trouve des valeurs comprises entre 1,6 et 2,25.

Ces conclusions ne sont valables que pour des inclinaisons des bielles fictives voisines de 45° . Signalons d'ailleurs que la détermination de ces bielles présente un aléa qui n'existe pas avec les semelles à quatre pieux et qui provient du fait que le contour du poteau et le triangle ayant pour sommets les centres des pieux ne sont pas des figures homothétiques et ne présentent pas les mêmes axes de symétrie. Cette dissymétrie est peut-être une explication de la réduction des coefficients de sécurité par rapport à ceux constatés avec les semelles à quatre pieux, notamment avec la disposition de ferrailage (4).

B2. Fissuration.

En ce qui concerne la *sécurité à la fissuration*, le système (1) a donné des résultats moins favorables que le système (2) car les barres étaient souvent éloignées des faces latérales de la semelle.

Le système le plus favorable est le système (3) qui comporte des armatures se croisant au centre de la semelle.

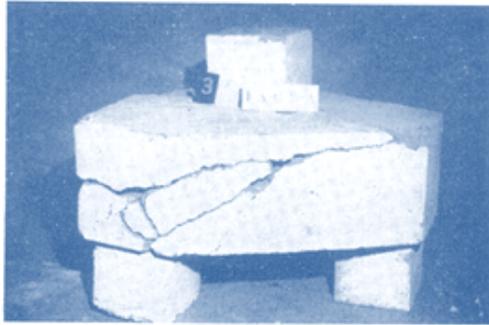


FIG. 6. — Semelle sur trois pieux. $h = 20$ cm. Armatures en acier Tor suivant côtés et médianes. Face A après rupture. (Cette vue met en évidence la complexité des phénomènes correspondant à certaines ruptures.)

B3. Conditions de résistance aux effets du poinçonnement et de l'effort tranchant.

Les essais que nous avons effectués ne nous ont pas encore permis de préciser les conditions de résistance au poinçonnement et aux effets de l'effort tranchant. Même avec des semelles relativement hautes, nous avons observé des fissures inclinées partant du voisinage d'un pieu.

B4. Conclusions.

Les essais légitimes, comme nous l'avons vu, l'application de la méthode des bielles aux semelles à trois pieux, sous réserve que les bielles fictives considérées aient une inclinaison voisine de 45° .

Des limites admises provisoirement (40 et 50°), on pourrait conclure que la hauteur utile h_1 des semelles sur trois pieux devrait satisfaire aux doubles inégalités ci-après :

$$0,85 < \frac{h_1}{\frac{(A \sqrt{3} - 0,9 a)}{3}} < 1,20$$

ou $0,28 (A \sqrt{3} - 0,9 a) < h_1 < 0,40 (A \sqrt{3} - 0,9 a)$

mais, comme pour les semelles à quatre pieux et pour les mêmes raisons, il est préférable de prévoir des semelles relativement hautes, avec des bielles fictives ayant une inclinaison sur l'horizontale au moins égale à 45° .

En résumé, on peut conseiller d'adopter, pour la hauteur utile h_1 , une valeur satisfaisant à la double inégalité

$$0,33 (A \sqrt{3} - 0,9 a) < h_1 < 0,40 (A \sqrt{3} - 0,9 a)$$

La hauteur doit être constante sur toute la surface de la semelle.

Les armatures peuvent alors être calculées par la méthode des bielles (formules des schémas annexés).

La disposition d'armature suivante est à préconiser :
Système mixte de type (3) ou analogue avec :

— Des armatures suivant les côtés du triangle ou des armatures en cerces susceptibles d'équilibrer les efforts correspondant à une fraction importante de la charge (par ex. $3/4 P$) ;

— Des armatures suivant les médianes pour équilibrer les efforts correspondant au complément de la charge ($1/4 P$).

Il n'y a pas intérêt à attribuer une part importante au système suivant les médianes car la valeur du coefficient

de sécurité est alors réduite et, d'ailleurs, la nécessité pratique de prolonger les armatures suivant les médianes jusqu'aux barres disposées suivant les côtés, conduit à un supplément de poids d'acier par rapport au poids théorique.

Les remarques déjà faites pour les semelles à quatre pieux concernant l'intérêt des armatures à caractéristiques mécaniques élevées, la nécessité de ne pas sous-estimer les valeurs de d' qui sont relativement importantes et d'étudier les dispositifs d'ancrage s'appliquent intégralement aux semelles sur trois pieux.

C. Semelles sur deux pieux.

Le nombre réduit d'essais auquel nous avons procédé ne nous permet pas de tirer des conclusions générales. Nous avons seulement noté des valeurs très élevées des contraintes théoriques de cisaillement calculées en section rectangulaire homogène, valeurs de l'ordre de 100 kg/cm^2 . L'application de l'article 3,52734 des Règles BA 1945 permettant de déterminer les armatures transversales ou de fixer les conditions pour qu'il ne soit pas nécessaire de prévoir de telles armatures, conduit vraisemblablement à une assez large sécurité.

Poursuite du programme d'essais.

Les conclusions que nous avons pu tirer des essais effectués sont encore très limitées et souvent insuffisamment précises. Pour les compléter et les préciser, il est nécessaire de poursuivre notre programme notamment en vue d'élucider les conditions de résistance aux effets de poinçonnement et d'effort tranchant.

Par ailleurs, d'autres questions restent à résoudre, et particulièrement les suivantes :

1° Dans les essais que nous avons faits jusqu'à ce jour, les différentes barres en acier doux ou Tor étaient ancrées à leurs extrémités à l'aide de crochets normaux en crosses. Avec les barres lisses, il semble bien que de tels ancrages soient indispensables. Il serait intéressant de savoir s'ils le sont aussi avec les barres à adhérence améliorée, car même avec les barres susceptibles d'être façonnées telles que les barres Tor, Tentor ou Caron, il serait économique de réaliser les ancrages par scellement droit. La question est certainement liée à celle de l'obliquité des bielles. En attendant les résultats d'essais complémentaires, il nous paraît prudent de prévoir de sérieux ancrages sur lesquels les bielles viennent « buter » à leur partie inférieure.

2° Dans les essais effectués, nous avons cherché à centrer la charge du poteau sur l'ensemble des pieux des semelles. Pratiquement les écarts d'implantation des axes des pieux par rapport à leur position théorique dépassent souvent 10 cm . Il est légitime de se demander quelle est la répercussion sur le comportement des semelles, et en particulier sur le coefficient de sécurité, d'une excentricité relative de la charge par rapport à l'ensemble des pieux.

Enfin, il serait utile d'étudier expérimentalement le cas des poteaux soumis à des couples de flexion.

Notre programme d'essais est donc loin d'être achevé; il serait nécessaire de le poursuivre pour arriver à une connaissance plus précise et plus complète du comportement de ces semelles sur pieux, comportement qui apparaît singulièrement complexe.

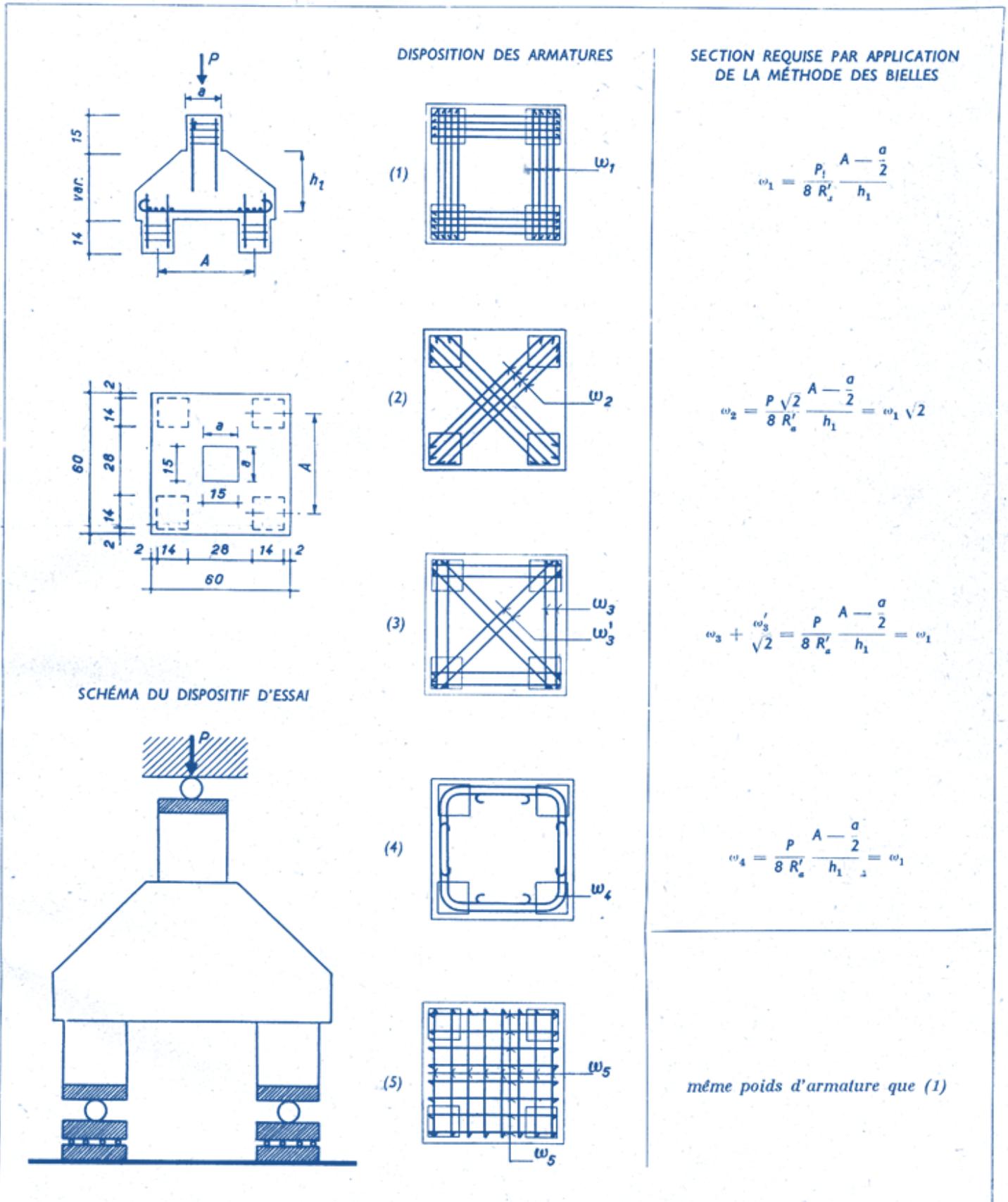


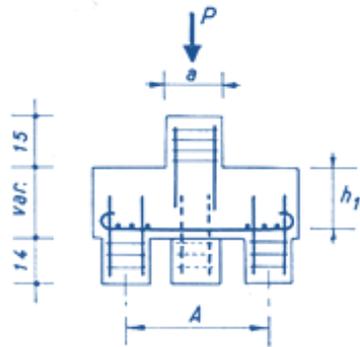
FIG. 7. — Semelle sur quatre pieux.

BLÉVOT - 1957 - Relatório Preliminar

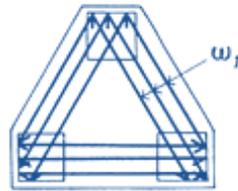
Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics — Nos 111-112, mars-avril 1957

DISPOSITION DES ARMATURES

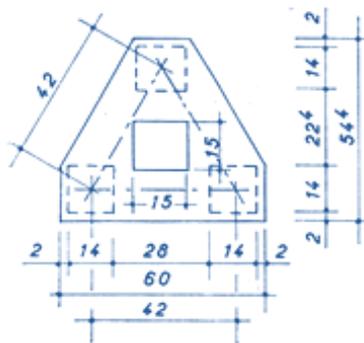
SECTION REQUISE PAR APPLICATION DE LA MÉTHODE DES BIELLES



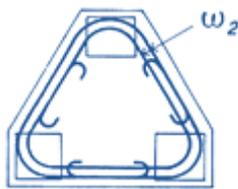
(1)



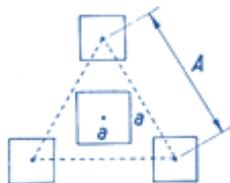
$$\omega_1 = \frac{P}{9 \sqrt{3} R'_a} A \sqrt{3} - \frac{0,9 a}{h_1}$$



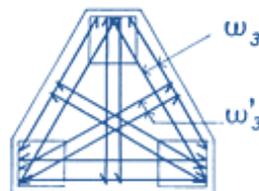
(2)



$$\omega_2 = \omega$$

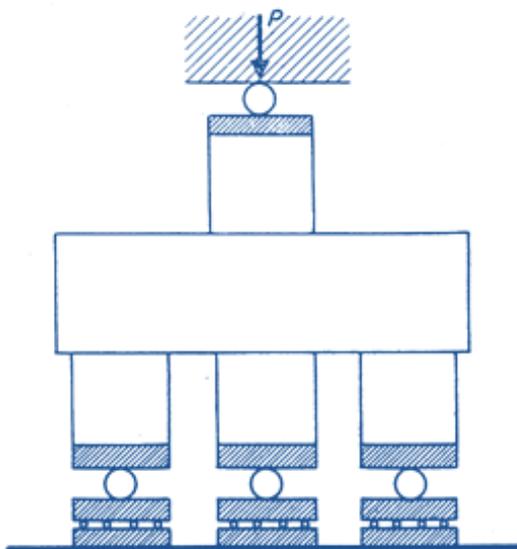


(3)

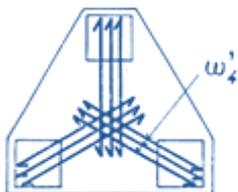


$$\omega_3 + \frac{\omega'_3}{\sqrt{3}} = \omega_1$$

SCHÉMA DU DISPOSITIF D'ESSAI

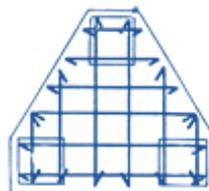


(4)



$$\omega'_4 = \frac{P}{9 R'_a} A \sqrt{3} - \frac{0,9 a}{h_1}$$

(5)



même poids d'armature que (1)

FIG. 8. — Semelle sur trois pieux.

(Reproduction interdite)