

1/68

Lex

ECOLE NATIONALE
POLYTECHNIQUE

ALGER

1967 1968



PROJET
DE FIN D'ETUDE
BETON

sujet:
proposé par
MONSIEUR: DELAGE C.
Professeur ENPA

etudié par
l'élève
COULIBALY D.



SUJET

AUSCULTATION DYNAMIQUE
DU BETON

L'étude consiste à effectuer les mesures comparatives des résistances mécaniques et de la vitesse de propagation du son dans le béton.

La nature des agrégats et le dosage en ciment (400 kg/m^3) choisis pour la confection des éprouvettes de compression et de flexion sont identiques à ceux utilisés pour l'ossature de l'hôtel EL AURASSI en cours de construction.

Les paramètres à faire varier sont :

- la quantité d'eau : rapport $\frac{E}{C}$ variant de 0,4 à 0,6
- Le mode de conservation des éprouvettes : air et eau
- l'âge du béton lors des essais : 7, 14, 28 j et 2 mois.

Rapporter de manière concise et précise le principe, la technique et les conditions des essais effectués.

Les renseignements majeurs à déduire de l'étude expérimentale sont :

- évolution des résistances (σ_j, σ_j') et de la vitesse du son V en fonction du temps et de $\frac{E}{C}$.
- peut-on dégager une loi entre σ_j, σ_j' , et V (étalonnage du béton)? Par une évaluation correcte de l'influence du coefficient de Poisson sur V , peut-on proposer une loi du type $E = K (\sigma_j)^n$, E étant le module instantané d'élasticité du béton, et K et n étant 2 coefficients à déterminer?
- Autres enseignements significatifs ?

T A B L E . D E S M A T I E R E S

_ Introduction L'Auscultation dynamique_____	I
_ Le module d'élasticité dynamique_____	3
_ Principe et methode de la mesure de E et evaluation du coefficient de POISSON_____	7
_ L'appareil de mesure directe de la vitesse de propagation du son_____	II
_ Etude des agregats_____	I4
_ Programme_____	24
_ Essais sur ouvrage_____	36
_ Tableaux des resultats_____	4I

COMMENTAIRES

_ Affaissement du cône d'ABRAMS en fonction de E/C_____	42
_ Resistances à la compression et à la traction en fonction de E/C_____	u43
_ Evolution de σ , ν , et E avec l'age influence du milieu de conservation_____	45
_ Relation entre σ et σ' _____	46
_ Le coefficient de POISSON_____	47
_ Le module d'élasticité dynamique_____	49
_ Relation entre la resistance en compression et la vitesse_____	\$I
_ Resistance à la compression à 28 jours en fonction de C/E_____	53
_ Conclusion_____	\$4

E R R A T A

NOUS VOUS PRIONS DE BIEN VOULOIR LIRE:

_ à la page 52 $\bar{\sigma} = 0,190V - 617$ au lieu de $0,165V-488$

- " - à la 6^e ligne 3250 m/s au lieu de 3000

- " - à la 9^e ligne Ce qui concorde au lieu de

Ce qui nous concorde

_ à la page 55 à la 4^e ligne 309 au lieu de 199

_ à la page 56 formules de gauche : la 4^e à partir du bas,

$$\bar{\sigma} = 0,190 V - 617 \text{ au lieu de } 0,165 V - 488$$

_ à la page 47 à la 7^e ligne à partir du bas: Ces valeurs de $\bar{\sigma}$

_ à la page 48 à la 6^e ligne : $\nu = 0,2$

_ à la page 5 à la 5^e ligne: $E_m = E_M \left(1 - 0,15 \frac{t - 40}{100} \right)$

où t est le taux de travail

_graphiques page 51 à gauche:

-sur la figure 8 $\bar{\sigma} = 0,190V - 617$

Pour V 3250

- sur la figure 9 $\bar{\sigma} = 0,206V - 697$

Pour V 3380

_graphiques page 46

- sur la figure 2 les graduations de $\bar{\sigma}$ commencent par

15 k/cm^2

_____ooooOoooo_____
ooooOoooo

B I B L I O G R A P H I E

-----oOo-----

- Annales de l'I.T.B.T.P. n° 140 Juillet Août 1950
- Annales de l'I.T.B.T.P. n° 238 Octobre 1967
- Annales de l'I.T.B.T.P. n° 206 Février 1965
- Bulletin RILEM n° 15 Août 1953
- RILEM : Colloque international (sur l'essai non destructif des (Tome I et II (matériaux et des constructions (
- Contrôle et essais des (
 - Ciment (Par Michel VENUAT (
 - Mortiers (et (
 - Bétons (Michel PAPADAKIS (

-----oOo-----

L'AUSCULTATION DYNAMIQUE DU BETON

L'auscultation dynamique est l'une des nouvelles méthodes pour l'évaluation de la qualité du béton.

Les procédés de vérifications des propriétés mécaniques des bétons sont nombreux. Parmi eux on distingue :

- Les méthodes classiques de détermination des caractéristiques du béton (résistance à la compression par écrasement d'éprouvettes, résistance à la traction en soumettant l'éprouvette à la flexion où à la traction pure).

Ces méthodes sont dites destructives. En effet, ces méthodes de détermination de la qualité du béton ne peuvent être effectuées seulement que sur des échantillons voués à la destruction.

Les résultats obtenus par ces méthodes sont bien loin d'être satisfaisants de part le nombre considérable des facteurs qui les influent (mode de surfaçage, vitesse de mise en charge etc.....).

Lorsqu'on veut contrôler les qualités d'un béton en oeuvre ou a très longtemps procédé par prélèvement d'échantillons; on a pu constater que les qualités de prélèvements c'est à dire des cubes, prismes, ne correspondaient pas forcément aux qualités du béton en oeuvre.

Des expériences faites aux Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics de Paris sous la direction de Monsieur l'HERMITE ont mis en évidence que si l'on taille des éprouvettes dans un massifs de béton, les résultats des essais à la compression obtenus sur ces éprouvettes sont différents des résultats d'essais à la compression obtenus sur des cubes de béton moulés séparément.

Pour essayer d'apporter des solutions aux problèmes posés par l'insuffisance des essais mécaniques classiques , on a entrepris des recherches vers d'autres méthodes. Ces recherches entreprises depuis plusieurs années dans plusieurs pays, notamment en France aux Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics (PARIS), ont permis la mise au point d'une méthode d'essai non destructive du béton connue sur le nom : Auscultation dynamique.

Par cette méthode on arrive à évaluer les caractéristiques du béton :

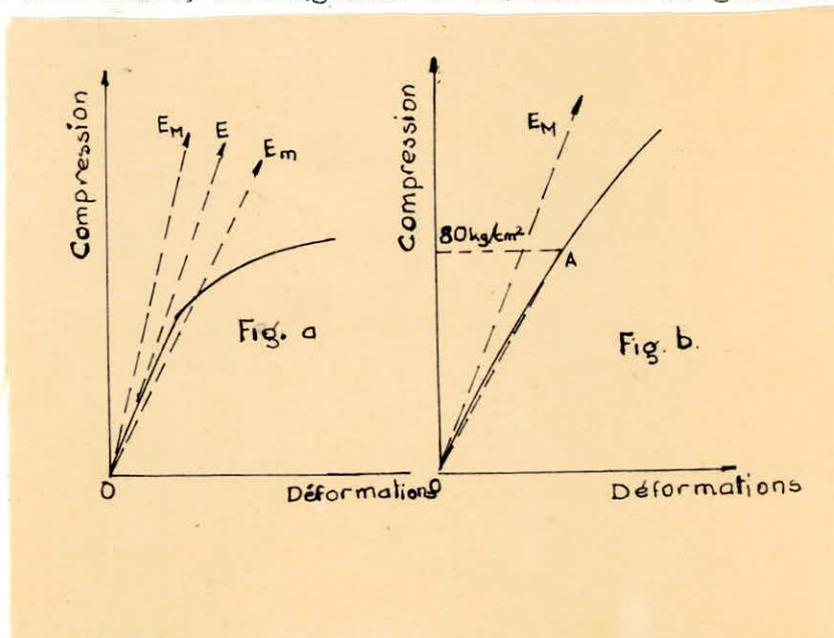
1°) Par mesure de la fréquence propre (vibration longitudinale d'une éprouvette prismatique.

2°) Par la mesure directe de la vitesse de propagation du son.

Par l'un et l'autre de ces deux procédés, on détermine le module d'élasticité dynamique du béton.

LE MODULE D'ELASTICITE DYNAMIQUE

Si nous prenons une pièce de béton telle qu'un cube et que nous la soumettons à une compression simple aussi uniforme que possible, nous avons, un diagramme de déformation du genre de la figure 1.



Ce diagramme obtenu pour une vitesse de chargement déterminée comprend d'abord une partie sensiblement droite qui s'incurve ensuite et qui, à l'origine est tangente à une certaine droite OE dont la pente correspond au module d'élasticité.

Or, si l'on fait des essais à des vitesses différentes on constate que cette pente à l'origine varie légèrement.

Pour une matière comme le béton, nous trouvons à l'origine une pente OE_M plus grande pour une grande vitesse que la pente OE_m obtenue pour une vitesse très faible. Si donc on fait des essais à vitesses variables, on constate que l'on peut obtenir toutes sortes d'inclinaisons à l'origine mais elles sont toujours comprises entre deux limites, une limite supérieure E_M pour les mises en charge très rapides et une limite inférieure E_m pour les mises en charge très lentes.

Le chiffre déduit d'une mesure de module par auscultation dynamique correspond à une mise en charge extrêmement rapide et s'identifie pratiquement avec le module d'élasticité maximum. Il ne peut donner aucune indication sur le coefficient minimum. En pratique dans le cas du béton durci et pour des faibles pressions, l'expérience prouve que le coefficient minimum est très voisin du coefficient maximum, cette différence ayant été exagérée sur les figure a et b.

Module d'élasticité "global" ou statique.-

Nous voyons que le diagramme de déformation du béton n'est pas une droite jusqu'à la rupture. Il s'incurve, c'est-à-dire que si nous prenons un taux de travail de 80 Kg/cm² et que nous joignons le point A correspondant à l'origine, cette droite aura une pente inférieure à la tangente à l'origine (fig.b). Ce sera le coefficient de déformation que nous utiliserons dans les calculs du béton armé, plus faible que le module d'élasticité dynamique.

Le module d'élasticité **statique** est le quotient de la charge appliquée et de la déformation élastique correspondante. Il est fonction de cette charge et diminue généralement avec elle.

Voilà pourquoi la méthode dynamique qui fait agir des chargements de très faible amplitude mais très rapides donne un module d'élasticité constant et indépendant de la grandeur de la compression tant que celle-ci n'a pas produit des ruptures internes. Ceci est d'ailleurs heureux et s'il en était autrement, l'auscultation dynamique d'un ouvrage deviendrait beaucoup plus délicate car elle exigerait la connaissance des contraintes.

Par contre, le module d'élasticité tiré de ce genre de mesure ne peut être utilisé directement dans les calculs de l'Ingénieur que pour les taux de travail faibles où l'erreur négligeable. Il pourra encore être employé pour les efforts dynamiques. Mais pour les charges statiques élevées, on devra appliquer un coefficient de correction

qui dépend du taux de travail. On peut, à cet effet, employer la formule empirique suivante établie en 1945 par M. LE CAMUS à la suite d'essais faits au Laboratoire:

$$\begin{aligned} \text{jusqu'à } 40 \text{ kg/cm}^2 &= E_m \text{ peu différent de } E_M \text{ (à moins de 5\%);} \\ \text{au delà : } E_m &= E_M \left(1 - 0,15 \frac{t - 40}{100} \right) \end{aligned}$$

Les variations du module d'élasticité dynamique (vitesse du son) s'effectuant dans le même sens que celles des résistances mécaniques, on a cherché à établir une relation entre ce module et les résistances à la compression et à la traction. Les formules proposées sont à peu près toutes de la forme suivante :

$$E = K \sqrt[n]{R}$$

E = module d'élasticité dynamique

R = la résistance à la compression

K et n sont des coefficients qui dépendent de la nature des agrégats du béton du liant, mais restent constants pour un béton exécuté dans les mêmes conditions.

Dans l'étude qui nous a été proposée, nous avons effectué les mesures de E et R' R' sur des bétons de composition granulométrique, constante. Nous avons opéré sur les paramètres qui ont le plus une influence grande sur les caractéristiques mécaniques d'un béton. Ces paramètres sont les suivants :

- la quantité d'eau de gâchage
- le mode de conservation
- l'âge.

Nous disposons ainsi d'une "gamme" suffisamment large de béton sur lesquels nous avons cherché à comparer et à lier les résultats donnés par l'auscultation dynamique et ceux obtenus par les méthodes classiques (écrasement des cubes et rupture par traction-flexion des prismes).

Nous terminons cet exposé en mentionnant ci-dessous l'éta-
lonnage établi par LESLIE et CHESMAN. D'après eux, "l'états d'un béton
totalement inconnu, peut se déterminer approximativement d'après la
vitesse du son mesuré dans ce béton".

Vitesse (en m/s)	Qualité du béton
> 4.500	Excellent
3.500 à 4.500	Bon
3.000 à 3.500	Assez bon
2.000 à 3.000	Médiocre
< 2000	Très mauvais

PRINCIPE ET METHODE DE LA MESURE
DE E (ET EVALUATION DU COEFFI-
CIENT DE POISSON).

Le but initial des mesures non destructives faites sur bétons est la détermination du module d'élasticité dynamique.

La valeur de ce module est déduite de la mesure de la vitesse de propagation d'un ébranlement dans le matériau. La mesure de cette vitesse de propagation (appelée aussi vitesse du son) peut s'effectuer aussi bien sur des éprouvettes que sur des constructions existantes.

MESURES DE E PAR MISE EN VIBRATION

La méthode consiste à chercher la fréquence de résonance en vibration longitudinale d'un prisme de matériau à essayer.

Les différents modes de vibrations possibles d'une tige mise en vibration longitudinale sont donnés par :

$$\frac{V_1}{2nL} = f \quad (1)$$

où f est la fréquence de vibration;

L la longueur de la tige,

V₁ la vitesse du son dans un milieu à une dimension

n un nombre entier.

On déduit la vitesse du son d'une mesure de temps et d'une mesure de longueur.

On déduit le module d'élasticité du matériau par application de la formule :

$$V_1 = \sqrt{\frac{E \cdot g}{\rho}} \quad (2)$$

où E est le module d'élasticité longitudinal,
et $\bar{\omega}$ le poids spécifique du matériau.

Le module peut être obtenu directement par application de la formule déduite de (1) et (2).

$$E = 4 f^2 L^2 \frac{\bar{\omega}}{g}$$

Cette formule ne peut être utilisée que lorsque les éprouvettes ont des dimensions transversales au moins 2 fois inférieures à leur longueur, faute de quoi, il faut apporter une correction faisant intervenir le coefficient de Poisson dont nous parlerons plus loin.

DETERMINATION DE E PAR MESURE DIRECTE DE LA VITESSE DU SON

Dans cette méthode, on mesure le temps d'écoulement entre le passage d'un ébranlement en deux points distants d'une longueur connue. On obtient ainsi directement la vitesse du son.

Cette vitesse mesurée sur des cubes et des prismes en travers dont les dimensions transversales sont grandes, n'est plus comme dans le cas précédent V_1 , mais est affecté d'une correction pouvant atteindre 15 à 20 % faisant intervenir le coefficient de Poisson ν :

$$V_3 = \sqrt{\frac{E.g}{\bar{\omega} (1+\nu)(1-2\nu)}}$$

De V_3 on peut déduire E .

EVALUATION DU COEFFICIENT DE POISSON

D'après M. DAWANCE (Chef de service aux Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics Paris) "la correction dont est effectuée V_3 est produite par l'augmentation de rigidité due à ce que les déformations transversales sont gênées par les régions voisines dans un milieu tridimensionnel".

Le calcul du coefficient de Poisson admet que la vitesse mesurée en travers sur prisme ou sur cube est la même^{que} celle qui peut être mesurée sur un volume à trois dimensions. Il peut être calculé en comparant les mesures par vibration longitudinale (V_1) et par propagation (V_3) L.E.A faites sur une même éprouvette prismatique.

D'après les expériences du L.B.T.P. (Annales Juillet-Août 1955, Essais et mesures n° 33) sur du béton au ciment Portland C.P.A.

$$250.315 \frac{\text{eau}}{\text{ciment}} = 0,44$$

$$\sigma_b = 450 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{\sigma_i}{b} = 50 \text{ kg/cm}^2$$

ν suivrait, à 1% près, la loi suivante :

$$\nu = \frac{0,8}{j + 24} + 0,226$$

j désignant l'âge du béton en jours,

Cette loi a été déduite de la comparaison de V_1 variant de 7 à 28 jours entre 3.800 et 4.080 m/s et de V_3 variant dans le même temps entre 4.280 et 4.480 m/s, sur une moyenne de 20 éprouvettes.

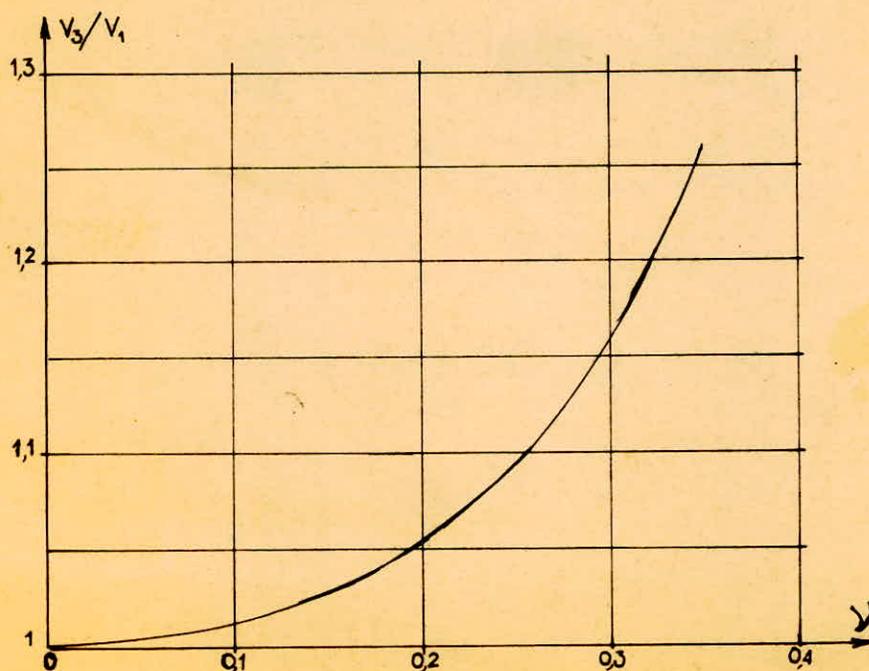
La courbe ci-dessous représente la fonction :

$$\frac{V_3}{V_1} = \sqrt{\frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

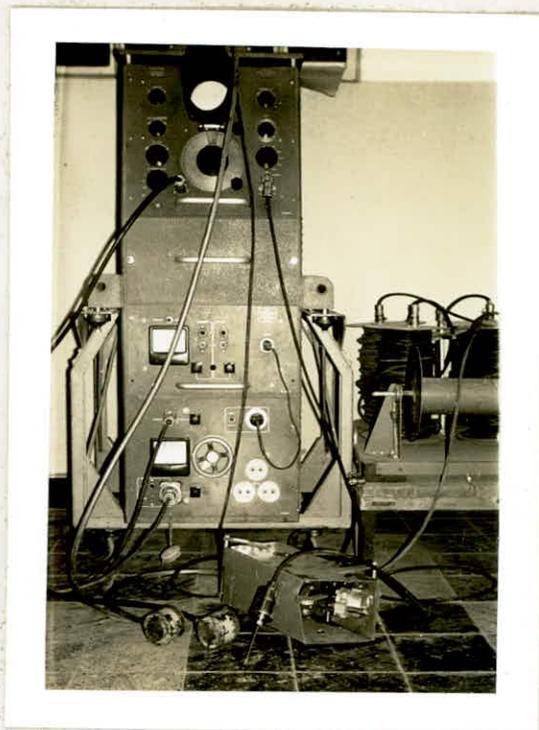
Au cours de nos manipulations nous avons procédé aux mesures de V_3 sur cubes et sur prismes en travers. L'appareil (Bouchet) permettant d'effectuer la mesure de V_1 par vibration, étant hors d'usage nous n'avons pas pu procéder à cette mesure.

Afin de pouvoir évaluer le coefficient de Poisson de nos bétons, nous avons effectué des mesures de vitesse suivant la longueur de prismes. Cette vitesse ne correspond pas tout a fait à V_1 (vitesse mesurée par vibration) mais est intermédiaire entre cette dernière et la vitesse mesurée par transmission.

D'après nos mesures cette vitesse que nous appellerons V_1' s'approcherait plus de V_1 que de V_3 .



L'APPAREIL DE MESURE DIRECTE DE LA VITESSE DE PROPAGATION
DU SON



C'est un appareil du type S.B.C.4 du Laboratoire Electro-Acoustique 5, rue Jules PARENT, RUEIL (S et O).

I - DESCRIPTION :

L'installation utilisable aussi bien au Laboratoire que sur le chantier se compose de :

- d'une alimentation stabilisée et un dispositif de réglage, permettant l'adaptation à n'importe quelle source d'énergie entre 90 et 250 Volts, 50 périodes,
- d'un berceau de suspension élastique,
- d'un marteau automatique avec détecteur de déclenchement,

- d'un détecteur à magnétostriction,
- d'un complément SB.P.1 avec émetteur et récepteur piézoélectrique avec dispositif électronique,
- d'un détecteur d'étalonnage,
- de deux barres de nickel d'étalonnage,
- d'une bobine de câble de 50 m pour alimentation
- " " " pour l'émetteur
- " " " pour le capteur de déclenchement
- d'une bobine de câble de 50 m pour le récepteur magnétostrictif.

II - PRINCIPE DE MESURE ET FONCTIONNEMENT:

a) Mesures sur les éprouvettes ou pièces de faible épaisseur (de 7 cm à 100 cm environ).

On envoie ~~que~~ ^{sur} un quartz une impulsion électrique qui est transformée en ébranlement mécanique. Cet émetteur est placé à l'extrémité de l'éprouvette, de l'autre côté, un capteur à quartz détecte l'arrivée de l'impulsion. Le signal du capteur, superposé à celui d'un marqueur de temps est observé sur un oscillographe cathodique.

On mesure le temps s'écoulant entre le départ et l'arrivée des impulsions.

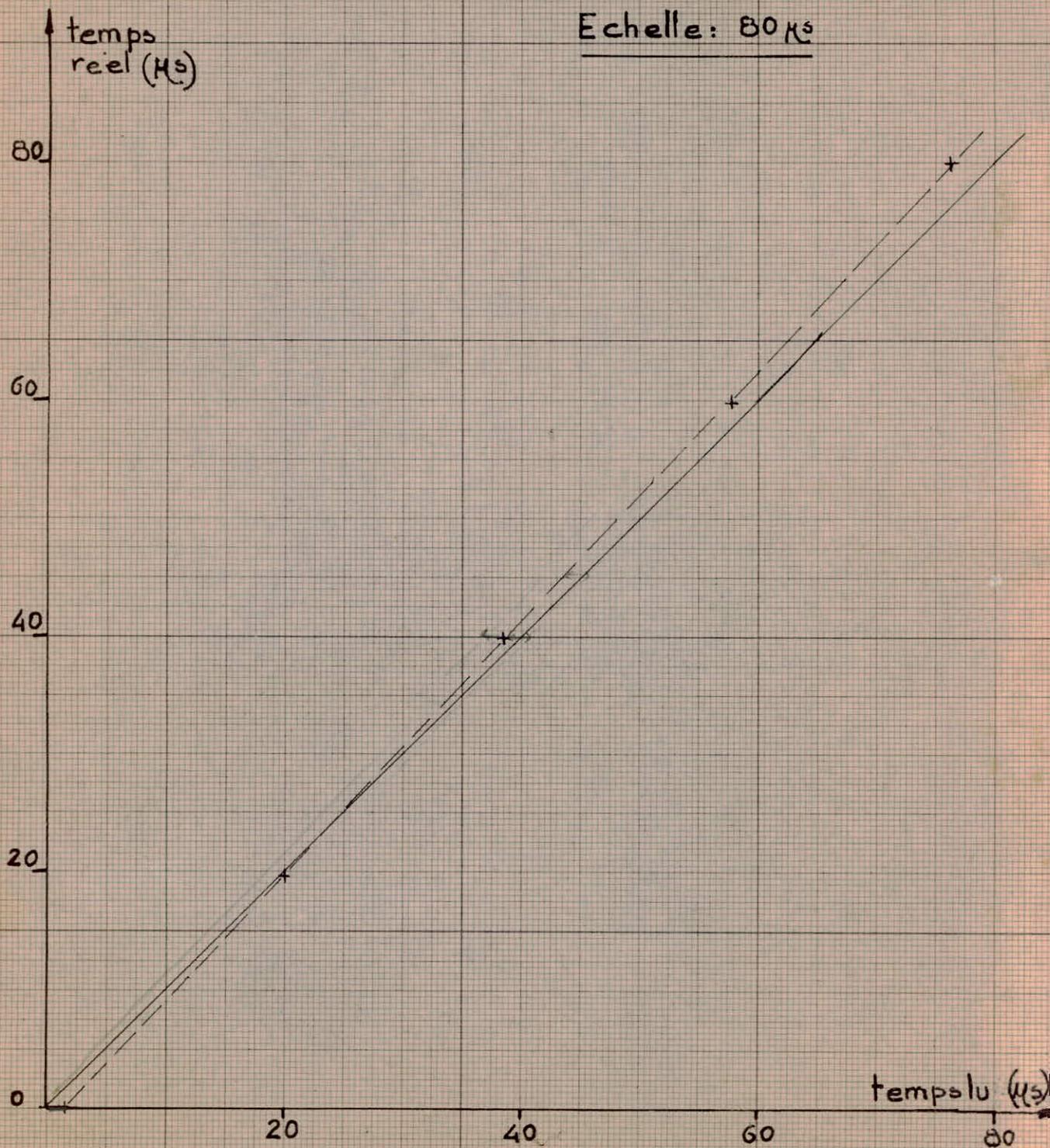
La mesure est faite en faisant coïncider le créneau fourni par le marqueur avec le début du signal. C'est de l'acuité de cette appréciation que dépend la précision de la mesure.

Sur le bâti une graduation en microsecondes permet la lecture du temps.

L'origine des mesures est déterminé en mettant en contact émetteur et récepteur.

Etalonnage LEA 20-4-68

Echelle: 80 μ s



b) Mesures sur les pièces de grande dimension

(construction, poutre et poteau de 0,3 à 6 m environ).

Le dispositif utilisé pour ces mesures diffère peu du précédent. L'émetteur et le capteur piézoélectrique étant remplacés par : un marteau mécanique qui donne des chocs qui sont transmis au béton par l'intermédiaire d'une petite enclume. Sur cette enclume est fixé un détecteur qui poursuit le signal de déclenchement de la base de temps.

Un détecteur à magnétostriktion sorte de tige dont l'extrémité qui s'appuie sur le béton est taillée en bizot.

III - ETALONNAGE

Afin de nous assurer de son bon fonctionnement nous avons procédé à l'étalonnage de l'appareil.

Le dispositif d'étalonnage est constitué par une barre de nickel graduée, dont on connaît la vitesse de propagation. L'extrémité de la barre appliquée sur l'émetteur piézoélectrique, on fait coulisser le long de la barre, de graduation en graduation le capteur à magnétostriktion.

L'appareil comporte quatre gammes 80, 400, 2000, 8000 microsecondes, que nous avons étalonnées.

La gamme de 80 microsecondes était la plus précise et c'est sur elle que nous avons travaillé.

Ces résultats d'analyse nous ont été fournis par le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics.

La livraison des agrégats était assurée par le L.B.T.P.A et ils furent stockés dans le hall du Labo de béton de L'ENEA. Les graviers avaient des teneurs en eau voisine de zéro, par contre le sable de dune et le sable de Baraki avaient respectivement des teneurs en eau de 3 et 4%. Avant chaque gâché, nous prenons soins de déterminer cette teneur en eau afin d'apporter la correction nécessaire sur les quantités d'eau déterminées pour la confection du M3 de béton.

2) Etudes des propriétés essentielles

Les agrégats employés pour la confection du béton doivent satisfaire à un certain nombre de conditions visant particulièrement :

- les caractéristiques physiques
- la proportion et la pureté des mélanges
- la forme des grains.

L'AFNOR a défini la plupart de ces conditions dans des normes relatives aux "agrégats pour béton de construction" ainsi que des méthodes d'essais normalisées permettant de mesurer les caractéristiques essentielles des agrégats et la teneur des impuretés nuisibles qu'ils contiennent.

A ce propos, la normalisation française a établi une distinction entre 3 types généraux d'agrégats et définie les propriétés requises pour chacun d'eux.

- Le type A, convient en principe pour un béton dont les résistances mécaniques doivent être particulièrement élevées.
- Le type B, s'applique à un béton dont la perméabilité doit être aussi faible que possible.
- Le type C, correspondant à un béton pour lequel les valeurs de ses résistances et de son imperméabilité sont relatives.

Mode opératoire : on prélève un échantillon (90 cm³ d'agrégats passés au tamis de 5 mm; seul le tamisat du tamis de 5 mm est utilisé). On le lave avec une solution normalisée très active de manière à séparer le sable des matières fines. On laisse l'ensemble au repos environ 20 mn.

La floculation se produit au niveau h₁. On introduit très lentement un piston d'essai de 1 kg jusqu'à ce qu'il repose sur le lit de sable. On note la hauteur h₂ et on en déduit l'équivalent de sable.

Sont considérés comme bons les agrégats ayant un E.S. supérieur à 75%. Nos sables ont tous des E.S. supérieurs à cette limite (81 et 96%) le sable de dune est un sable relativement très propre.

2.3. Formes des agrégats (Coefficient volumétrique).

La forme des éléments des agrégats influe beaucoup sur les qualités du béton, sur le pourcentage d'eau demandé sur l'ouvrabilité, donc finalement sur les résistances mécaniques des bétons confectionnés.

La normalisation française a défini la qualité de la forme d'un grain par son coefficient volumétrique. C'est le rapport du volume du grain à celui de la sphère dont le diamètre est égal à la plus grande distance diamétrale de l'élément:

si V est le volume de l'élément

d la plus grande distance diamétrale, le coefficient

$$\text{volumétrique est } C = \frac{V}{\frac{\pi d^3}{6}}$$

La valeur de C est faible pour une plaquette 0,07 par exemple et est plus médiocre encore pour une aiguille soit 0,01 environ.

Le coefficient volumétrique d'un mélange est égal au rapport du volume d'un certain nombre de grains à la somme de πd^3 de chacun d'eux.

$$C = \frac{\sum v}{\frac{\sum \pi d^3}{6}}$$

moins importants.

Dans le tableau ci-dessous nous avons porté les différentes mesures de propriété effectuées sur nos agrégats.

Agrégats	Densités apparentes	Poids spécifique	équivalent de sable %	coefficient de forme %	essais propreté %
Gravier 15/25	1,46	2,69		0,147	1,2
Gravillon 5/15	1,51	2,69		0,149	0,95
Sable de Baraki	1,57	2,67	81		
Sable de dune	1,54	2,59	96		

Les valeurs portées dans ce tableau sont les moyennes arithmétiques de 3 séries de mesures.

2.1. Densité apparente et poids spécifique

L'étude granulométrique pour la confection d'un béton permet de connaître les proportions d'emploi des agrégats en volume absolu.

Ces données ne peuvent être utilisées telles quelles. Ce qu'il importe de connaître pratiquement, ce sont les volumes apparents, en litres, des agrégats nécessaires pour confectionner le mètre cube du béton. A cet effet, il faut connaître les poids spécifiques et les densités apparentes des agrégats.

- a) Le poids spécifique ρ
est donné par :

$$\rho = \frac{\text{Poids d'agrégat sec}}{\text{Volume absolu de cet agrégat}}$$

Plusieurs méthodes permettant de déterminer le poids spécifique nous avons choisi la méthode dite du flacon.

On utilise un flacon ou un cristalliseur, soit P_0 son poids lorsqu'il est rempli d'eau et surmonté d'une plaque de verre le recouvrant entièrement. L'agrégat sec est placé au fond du cristalliseur vide. On fait couler ensuite lentement un filet d'eau en remuant l'agrégat de façon à évacuer les bulles d'air. La plaque de verre est ensuite disposée sur le cristalliseur de manière à s'appuyer sur les bords. L'ensemble est essuyé et pesé soit P_2 ce poids. On déduit le poids spécifique

$$\rho = \frac{P_1}{P_0 + P_1 - P_2} = \frac{\text{Poids de l'échantillon sec}}{\text{Poids du même volume d'eau}}$$

b) Densité apparente d

Elle est donnée par :

$$d = \frac{\text{Poids d'agrégats secs}}{\text{volume du récipient rempli}}$$

La méthode de mesure est la suivante :

On prélève une certaine quantité d'agrégat séché à l'étude. L'agrégat est ensuite versé sans tassement et par couches horizontales successives dans un récipient dont on connaît le volume et qui est d'autant plus grand que la dimension maximum des agrégats est élevée. L'arrasement du récipient s'effectue à l'aide d'une réglette.

2.2. Essai de propreté et équivalent de sable

Ces essais ont pour but la détermination des proportions de matières nuisibles pouvant diminuer les propriétés essentielles du béton .

a) Essai de propreté :

Le degré de propreté d'un agrégat est donné par

$$\frac{P}{P_2} = \frac{\text{Poids des impuretés}}{\text{Poids de l'échantillon propre et sec}}$$

Le mode opératoire est le suivant : on prélève un échantillon au milieu d'un tas d'agrégats dont on doit se servir, on le fait passer à l'étuve, on le pèse et soit P1 son poids. Il est ensuite lavé à grande eau, on arrête lorsque l'eau de lavage reste limpide , on le sèche de nouveau puis on le repèse soit P2 le poids de l'échantillon lavé et séché.

La quantité d'impureté = $P_1 - P_2 = P$

Le degré de propreté est $\frac{P}{P_2}$ en pourcent.

Les pourcentages limités en poids prescrits par la norme P.I8-30I suivant les types d'agrégats sont les suivants :

2% pour agrégats du type (A)

3% pour agrégats du type (B)

5% pour agrégats du type (C)

Nos agrégats ont un pourcentage maximal d'impureté de 1,2% inférieur à la limite inférieure prescrite.

b) Equivalent de sable : Il renseigne sur le pourcentage effectif de sable, est donné par :

$$ES = 100 \frac{h_2}{h_1}$$

h_2 = niveau supérieur du sable

h_1 = niveau des matières fines.

Mode opératoire : l'essai est effectué sur des grains de taille supérieure à 6,3 mm (norme P I8-30I) . On utilise un calibre à échancrure restangulaire.

On prélève, au hasard, un certain nombre de grains dans l'agrégat, et on les engage successivement, avec une orientation convenable dans les échancrures. La plus grande échancrure sur le bord de laquelle un élément peut demeurer accrocher permet de connaître le $\frac{\pi d^3}{6}$ de celui-ci.

On détermine par ailleurs, les volumes des grains en les immergeant tous à la fois dans une éprouvette graduée contenant de l'eau, ce qui donne immédiatement la Σv .

Le tableau ci-dessous indique les coefficients volumétriques moyens minima suivant le type de béton à confectionner (norme P.I8 - 30I).

Type de béton	Gravillons	Cailloux
A	0,15	0,20
B		
C	0,12	0,15

Nos agrégats ont des C voisin de 0,15.

2.4. Courbes granulométriques

L'analyse granulométrique d'un agrégat a pour but de déterminer les proportions des différentes grosseurs de grains qui le composent. Cette opération consiste :

1°) à prélever un échantillon du mélange ;

2°) à tamiser le prélèvement à l'aide d'un jeu de passoirs, de façon à classer les grains en catégories de grosseurs distinctes;

3°) à déterminer à l'aide d'une balance, la proportion de chaque classe ainsi séparée.

Les données de l'analyse granulométrique ont une importance primordiale. Elles servent, en effet, à l'étude granulométrique proprement dite, c'est à dire à la **recherches** des proportions optima d'emploi des matériaux pour obtenir le meilleur béton en oeuvre.

B - Etude du ciment.

Le ciment que nous avons utilisé pour nos bétons provenait de l'usine de ciment LAFARGE (Pointe Pescade) c'est un C.P.A. (ciment Portland Artificiel) qui appartient à la classe 325. Il est important de noter que cette classe qui est celle indiquée sur l'emballage n'est que théorique. En effet, nous avons demandé à l'usine d'effectuer quelques prélèvements du contrôle, le ciment présente les caractéristiques moyennes suivantes :

<u>USINE DE POINTE PESCADE</u>		<u>E.N.P.A.</u>		
<u>Traction</u>	<u>Compression</u>	<u>Traction</u>	<u>Compression</u>	
41	160			2 jours
58	285	49,9	224,5	7 jour
		61,4	369	14 jours
73	380		445	28 jours

Les essais ont été effectués suivant les normes françaises. Nous avons eu l'occasion de visiter le Laboratoire de l'usine entièrement équipée à cet effet.

Nous avons nous mêmes effectué des prélèvements sur un certain nombre de sacs et grâce aux quelques appareils normalisés dont nous disposons dans notre Laboratoire de béton, nous avons procédé à quelques essais.

A partir du sable normal, du ciment et de l'eau, nous avons confectionné avec des moules normalisés 9 éprouvettes 4 x 4 x 16. Ces éprouvettes étaient destinées aux essais de traction-flexion et compression à 7, 14, et 28 jours.

Remarques : Les différences de valeurs que l'on peut constater entre nos essais et ceux du Laboratoire de ciment peuvent s'expliquer par :

- Le fait que la qualité des ciments peuvent varier d'une livraison à l'autre (nos prélèvements n'étaient pas effectués sur les mêmes sacs).

- Le fait que contrairement au Laboratoire nous n'avons pas rempli toutes les conditions requises pour les essais. Nous ne disposions pas d'appareil de chocs destiné à la mise en place dans les moules du mortier, de malaxeur normalisé pour la confection du mortier, de même les conditions de température et de degré d'hygrométrie ne sont pas réalisées.

La "classe vraie" d'un ciment est sa résistance réelle à la compression à 28 jours, et elle est nettement supérieure à sa classe théorique. Elle varie d'un ciment 325 à un autre ciment 325. Il serait bon de la déterminer à chaque confection de béton surtout **quant** on veut réaliser des séries de béton de qualité toujours constantes (cela réduirait les dispersion que l'on obtient généralement au cours des essais sur béton). Car la résistance dépend **et varie** avec la **classe** du ciment. Comme nous le verrons plus tard on peut prévoir avec une bonne approximation la résistance d'un béton à partir de la classe vraie du ciment ayant servi pour sa confection.

P R O G R A M M E

Nous avons établi un programme que nous avons essayé de suivre. Malheureusement les difficultés d'ordre matériel qui se sont posées nous ont obligés parfois à y apporter quelques modifications sur le plan technique. Cependant dans l'ensemble nous pouvons dire que nous avons réussi.

Il a été conçu compte tenu des moyens et du temps dont nous disposions et des conditions de travail dans lesquelles nous opérons.

I - PARAMETRES ETUDIES :

Les paramètres que l'on peut chercher à étudier dans le béton sont nombreux. Une étude de tous ces paramètres étaient au-dessus de nos moyens vu le temps dont nous disposions. Nous nous sommes limités à ceux ci-dessous cités :

- Rapports $\frac{E}{C}$
- Le mode de conservation
- L'âge du béton lors des essais.

1) Le rapport $\frac{E}{C}$

Pour un dosage constant en ciment, 400 kg/m³, nous avons choisi de faire varier la quantité d'eau de gâchage de manière à avoir les rapport suivants :

0,425 - 0,45 - 0,5 - 0,6

Ces différents rapports de E/C nous ont donné les valeurs d'affaissement mesurés sur le cône d'Abrams suivantes:

E/C	Affaissement du cône
0,425	0 cm
0,45	2,5 cm
0,5	7 cm
0,6	25 cm

2) Le mode de conservation

La conservation des éprouvettes a été assurée dans les conditions suivantes :

- Conservation à l'air : les éprouvettes étaient transportées après démoulage et conservées dans une salle à atmosphère conditionnée.

La température et le degré d'hygrométrie étaient à peu près constants dans la salle. Des relevés effectués durant la période de conservation des éprouvettes ont donné les valeurs suivantes :

Date	Température sèche	Température humide	Différence	Degré hygrométrie
19.4.68	21	17	4	68%
22.4.68	21	18	3	75%
23.4.68	21	18	3	75%
30.4.68	21,2	18,2	3	75%
3.5.68	21	17,4	3,6	72%
10.5.68	20,8	17,2	3,6	72%
20.5.68	21,4	17,6	3,8	69%

La dite salle se trouve au Laboratoire de mécanique des sols de l'E.N.P.A.. Elle est équipée d'un climatiseur.

- Conservation à l'eau. Nous avons fait aménager un réduit dans une des salles du Laboratoire de béton. La salle a à peu près une

température constante (voisine de 20°). Les éprouvettes sont recouvertes de la toile de jute et étaient régulièrement aspergées d'eau jusqu'à leur date d'essai.



3) Les âges des éprouvettes à l'essai.

Nos essais étaient effectués à =
7 - I4 - 28j - 2 mois

II - NUMEROTATION DES EPROUVETTES

A fin de repérer nos éprouvettes, nous les avons numérotées de manière à indiquer :

- leur mode de conservation
- le type de béton auquel ils appartiennent (E/C)
- leur âge d'essai.

A cet effet, nous avons adopté les conventions suivantes:

- les lettres A et E indiquent les modes de conserva-
./.

tions , respectivement air et eau,

- les chiffres 1,2,3,4 désignent les différents rapports E/C, respectivement 0,4, 0,45, 0,5, 0,6.

- Les chiffres 1,2,3,4 désignent les âges d'essai respectivement 7, 14, 28 j , et 2 mois.

En indice et en première position figure le chiffre indiquant le rapport E/C et en seconde position, celui indiquant l'âge d'essai. Ainsi les éprouvettes de 7 jours confectionnées un béton de rapport E/C = 0,5 et conservées à l'air ont été numérotées comme suit :

A₃₁

Celles conservées dans l'eau E₃₁

III - CONFECTION ET NOMBRE D'ÉPROUVETTE

Les éprouvettes confectionnées étaient de deux sortes :

- cubes pour essai de compression 20x20x20
- prismes pour essais de traction-flexion 7,1 x 7,1 x 28,5

Le nombre d'éprouvettes par essai était de 6

- compte tenu de 2 sortes d'essai traction et compression
6 x 2 = 12

- compte tenu des rapports $\frac{E}{C}$

$$12 \times 4 = 48$$

- compte tenu du nombre d'âge

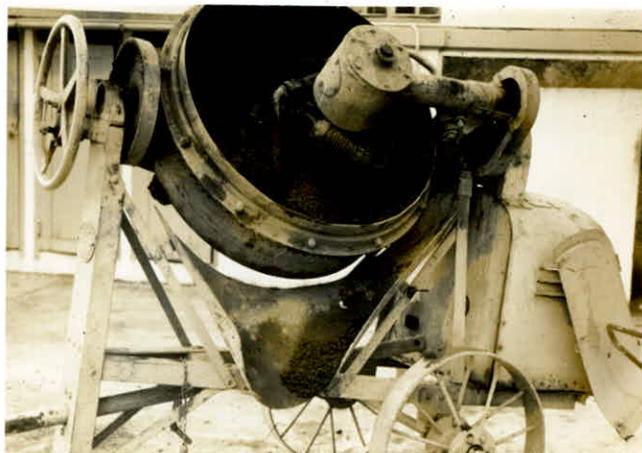
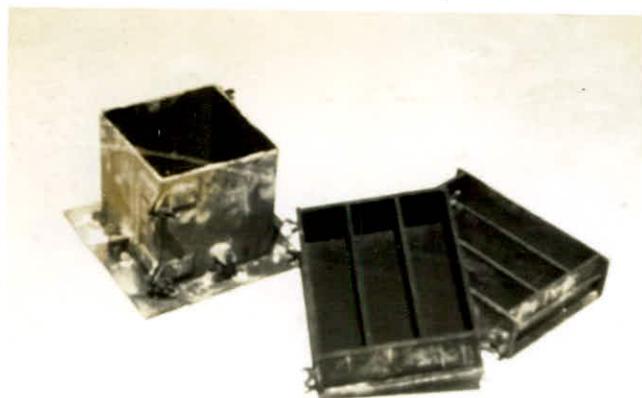
$$48 \times 4 = 192$$

- compte tenu des types de conservation

$$192 \times 2 = 384$$

soit au total 384 éprouvettes.

Nous disposions d'une bétonnière de capacité 125 litres ce qui a donné lieu à la confection de 12 cubes et 12 prismes par béton .



IV - METHODE UTILISEE POUR LA CONFECTION DE NOS BETONS ET MESURE FAITES SUR LES BETONS FRAIS

Le but essentiel de toute étude granulométrique est de rechercher les proportions théoriques du mélange optimum des agrégats pour un cas d'emploi bien déterminé, les éléments dont dépend ces proportions sont :

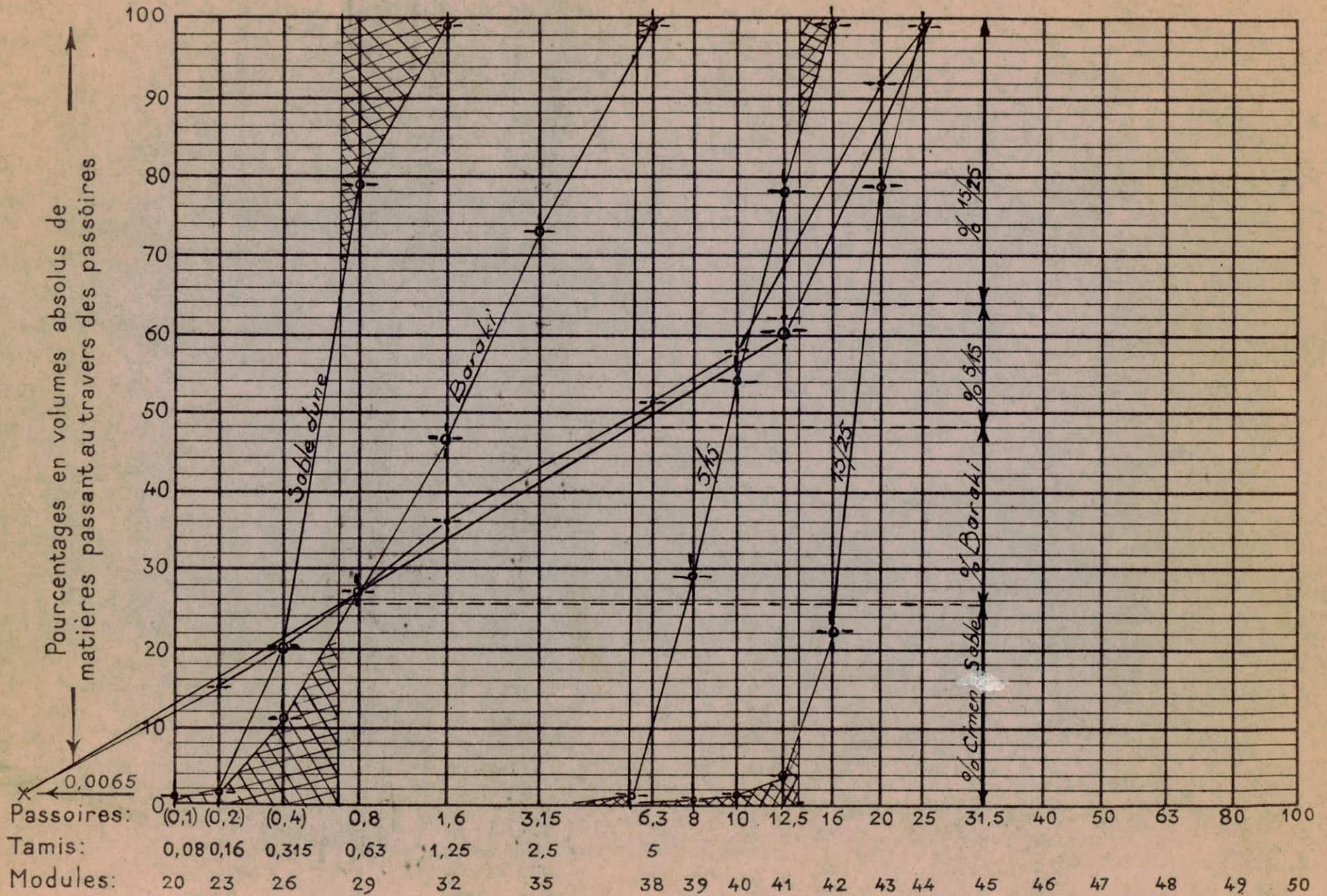
- la nature des matériaux employés et la composition de chaque agrégat
- le dosage en liant
- les conditions de mise en oeuvre à savoir :

COURBES GRANULOMÉTRIQUES

Selon M. FAURY

DOSSIER:

ESSAI n°:



— Echelle proportionnelle à $\sqrt[5]{D}$ —

d'une part, le procédé de mise en place, duquel dépend la consistance requise pour le béton,
et d'autre part, les caractéristiques de volume et de surface des pièces à exécuter.

La méthode Faury semble être la méthode qui tient compte de toutes ces impératives. En effet, c'est une méthode à "granulométrie continue" c'est à dire que la courbe de granulométrie du mélange constituant le béton s'élève d'une façon continue.

Elle a le mérite de tenir compte non seulement de la granulométrie des agrégats, mais aussi de leur nature, des moyens de serrage de la plasticité recherchée, et surtout de l'effet de paroi. En effet le béton, au contact du ferrailage et des parois du moule à une certaine difficulté à se mettre en place.

C'est actuellement la méthode la plus adéquate permettant de déterminer un béton à l'aide des courbes et de coefficients.

Nous avons adopté cette méthode parallèlement aux Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics.

Nous indiquons ci-dessous la composition du béton optimum obtenu à partir de cette méthode :

Constituants	% en volume absolu	Volume absolu en l.	PS	Poids Kg	IO
Ciment	15	129	3,1	400	
Sable	10,2	87	2,50	224	
Baraki	23,2	199	2,07	538	
5/15	15,6	134	2,69	360	
15/25	36	309	2,69	830	
Totaux	100,	858		2.347	

COMPOSITION DU M3 DE BETON

Gravier 15/25	830 kg
Gravier 5/15	360 kg
Baraki	538 kg
Sable	224 kg
Ciment	400 kg

La quantité d'eau théorique est égale à 170 l.

A cette quantité d'eau optimum correspond un rapport
E/C = 0,425.

Nous avons ensuite fait varier la quantité d'eau de béton
afin d'obtenir les rapports 0,45 - 0,5 - 0,6
soit respectivement 180 - 200 - 240 l

Nous avons ensuite à chaque fois mesuré la plasticité
des bétons obtenus à partir de ces quantités d'eau à l'aide du cône
d'ABRAMS.

IV - OPERATIONS EFFECTUEES SUR LE BETON DURCI.

a) Surfaçage : Afin de parer aux imperfections des faces
des moules, nous avons procédé au surfaçage de nos cubes. Le surfaçage
était fait sur du marbre dans l'horizontalité a été contrôlée à l'aide
d'un niveau. Nous utilisons du ciment fondu et du ciment naturel. Il
faut noter que vu le nombre important (12) des cubes à surfacer, nos
épreuves étaient sorties de leur lieu de conservation pour environ
24 heures

b) Mesure de la vitesse du son : Elle était faite sur les éprouvettes cubiques sur les faces non surfacées et sur les éprouvettes prismatiques suivant leur plus long côté. Cela à l'aide d'un appareil d'auscultation dynamique par vitesse du son.

c) Densité du béton : nous procédions à la mesure de la densité moyenne de nos cubes et prismes . Cela juste après les avoir sortis de leur lieu de conservation. Les mesures étaient faites sur trois éprouvettes prises au hasard de chaque série et nous prenions comme densité moyenne de cette série la moyenne des densités des trois éprouvettes.

d) Résistance en compression : Les résistances à la compression étaient mesurées par écrasement des éprouvettes cubiques de 20cm de côté. L'utilisation des cubes étant autorisée à condition de prendre comme valeur de la résistance 0,83 fois la valeur donnée par la formule classique $\frac{F}{S}$ F étant la charge, S la section du cube (B.A.60 B.314).

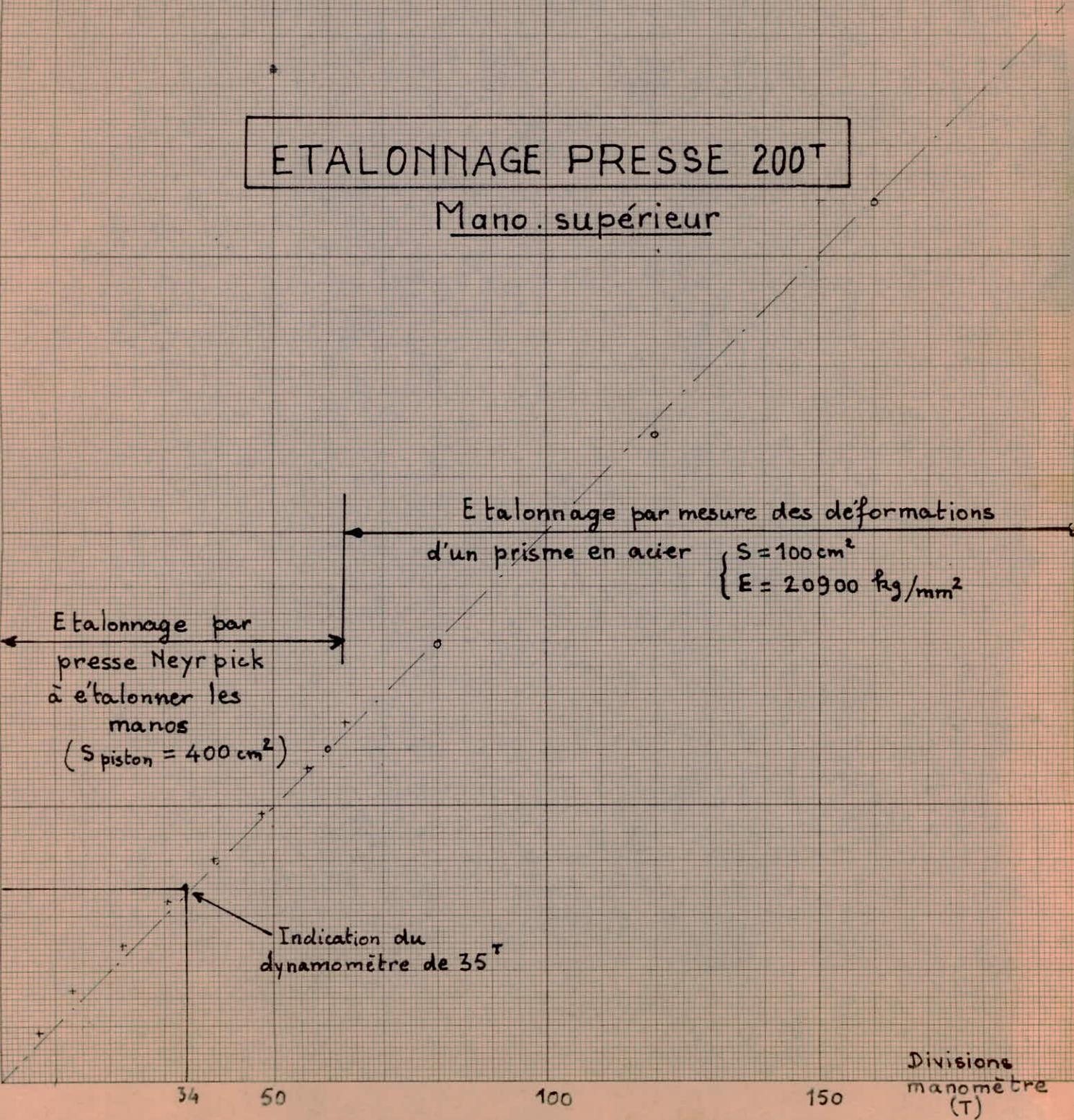
L'appareil de compression est une presse du type Huromat à commande manuelle.

Date étalonnage : mai 68

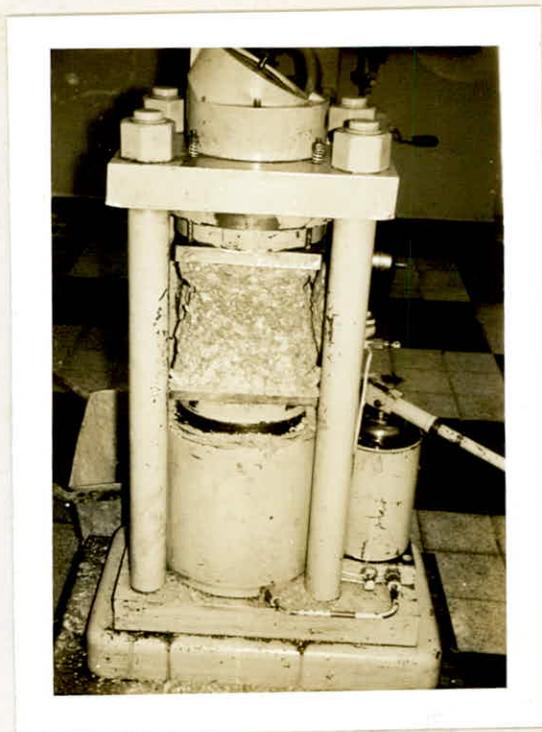
Force réelle (T)

ETALONNAGE PRESSE 200T

Mano. supérieur



Divisions manomètre (T)



Cette appareil est muni de deux manomètres gradués en tonnes. Les graduations sont de 10 en 10 sur le grand et de 2 en 2 sur le petit. La charge limite étant pour le premier de 200 T. et 140 T. pour le second. Pour nos essais à 14 et 28 jours, nous avons utilisé le grand manomètre et le petit pour ceux de 7 jours.

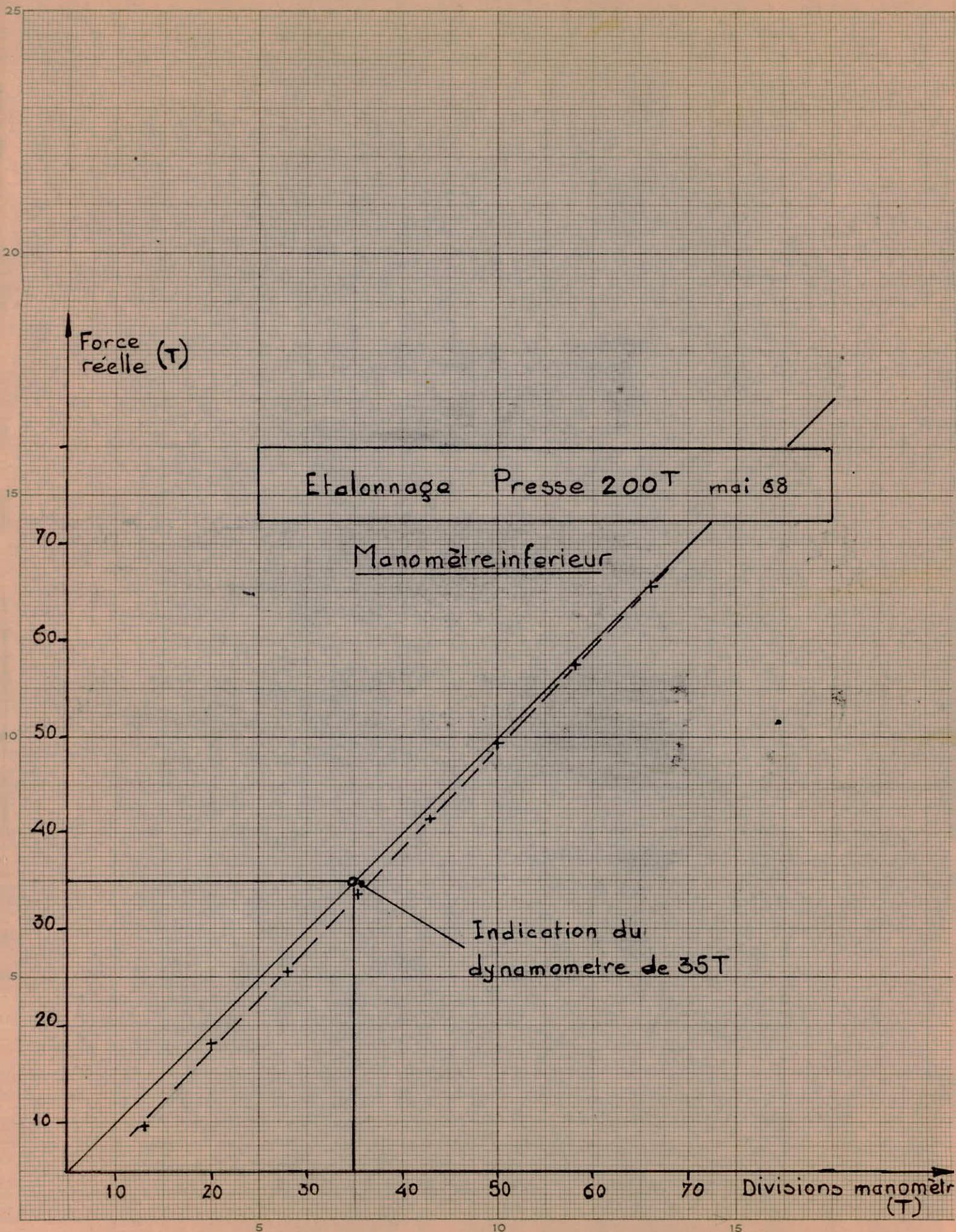
Afin d'avoir une précision sur nos lectures nous avons étalonné les manomètres. Il s'est avéré que les lectures faites sur le petit manomètre devaient être minorées par un coefficient égal à

Par contre celles faites sur le grand manomètre restaient telles. Le manomètre s'étant avéré précis (voir courbe d'étalonnage).

Compte tenu du coefficient 0,83 du B.A. 60 et ceux introduits par les manomètres :

les résistances à la compression de nos cubes étaient données par les formules suivantes :

$$\sigma_j = \frac{F}{20 \times 20} \times 0,83 \quad (\text{kg/cm}^2) \quad ./.$$



pour les cubes de 14 et 28 jours

$$\sigma_j = \frac{F}{20 \times 20} \times 0,83 \quad C' = \text{kg/cm}^2$$

pour les cubes de 7 jours

Le coefficient C étant donné par lecture sur la courbe d'échelonnement du petit manomètre pour chaque F lue .

Pour nos cubes de 2 mois vu la limite qui nous a été imposée par la presse (200 T) et l'énergie que nous serions amenés à dépenser pour écraser ces cubes à la main, nous les avons transporté à l'I.T.E.B.A. afin de les écraser sur une presse à manoeuvre électrique.

e) Résistance à la traction Elle est mesurée par rupture en flexion d'éprouvettes prismatiques 7,1 x 7,1 x 28 . D'après BA 60 les essais des flexions seront effectués sur des éprouvettes prismatiques de section droite carrée de côté b et de longueur égale à 5b. Il ajoute cependant, que : "toutefois les éprouvettes de longueur égale à 4b seront tolérées provisoirement, sous réserve de prendre en compte dans les calculs les 95% de la résistance à la traction ainsi déterminée.

Nous avons utilisé deux machines :

- la première étant la machine FERRET

c'est un appareil de flexion sous moment constant. L'éprouvette disposée verticalement est prise entre deux mâchoires, une inférieure et l'autre supérieure est terminée par un levier horizontal auquel on applique un effort vertical par introduction des poids dans un plateau suspendu à ce levier.

REMARQUES

Le BA 60 prescrit pour la vitesse de mise en charge :

"la charge sera appliquée sans chocs; uniformément, de manière à provoquer sur les fibres les plus sollicitées en traction une augmentation de contrainte de $0,3 \pm 0,2$ kg/cm² par seconde ". Soit environ 450 grs par seconde. Nous n'avons pas pu réaliser cette condition. Nous ne disposons que de poids de 5 kg et de très peu de limaille de plomb.

Nous placions quelques poids dans le plateau, l'éprouvette était portée à la rupture par coulée de la grenaille de plomb.

- Nous avons par la suite pu remédier à cette manoeuvre qui aurait certe influé nos résultats en empruntant une machine de flexion traction à l'I.T.E.B.A.

Elle est basée sur les mêmes principes que la machine FERRET avec cet avantage de donner directement la valeur de la résistance à la traction. Elle est équipée d'un cadran gradué en face duquel tourne une aiguille qui nous indique la valeur de la résistance. Une manivelle assure la transmission du moment à l'éprouvette, on peut grâce à ce système contrôler la vitesse de mise en charge.

La formule qui donne la valeur de la résistance à la traction en fonction de la charge appliquée dans le cas de la machine FERRET est la suivante :

Moment de flexion :

$$M^t = P \times l$$

$$\frac{I}{v} = \frac{b^3}{6}$$

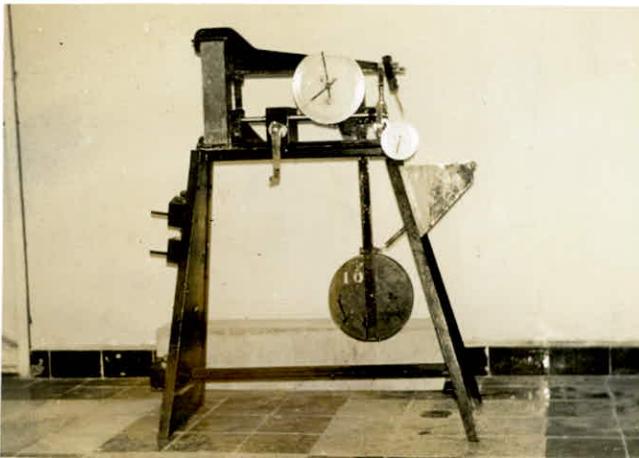
$$\text{et } \sigma'_j = \frac{Mv}{I} = \frac{6 \times P \times l}{b^3}$$

Les résultats par traction pures ont montré que ces valeurs sont inférieures aux valeurs trouvées par flexion. Les règles BA 60 (B. 324) affectent les résultats trouvés par un coefficient 0,6 ; on aura alors :

$$\sigma'_j = \frac{3,6 P l}{b^3} \text{ avec } l = 71,5 \text{ cm et } b = 7,1 \text{ cm et en tenant compte}$$

du coefficient 0,95 (B.A. 60 - B 321) :

$$\sigma'_j = 0,685 P$$



ESSAIS SUR OUVRAGE

Nous avons eu l'occasion de suivre plusieurs fois les travaux de l'I.T.E.B.A. qui consistaient à tester des piliers de la construction hôtel EL AURASSI et nous avons pu nous rendre compte de certains faits très importants.

Les mesures de la vitesse du son sur ouvrages peuvent s'effectuer de deux manières :

1) les mesures sont faites à la surface de la construction à étudier:

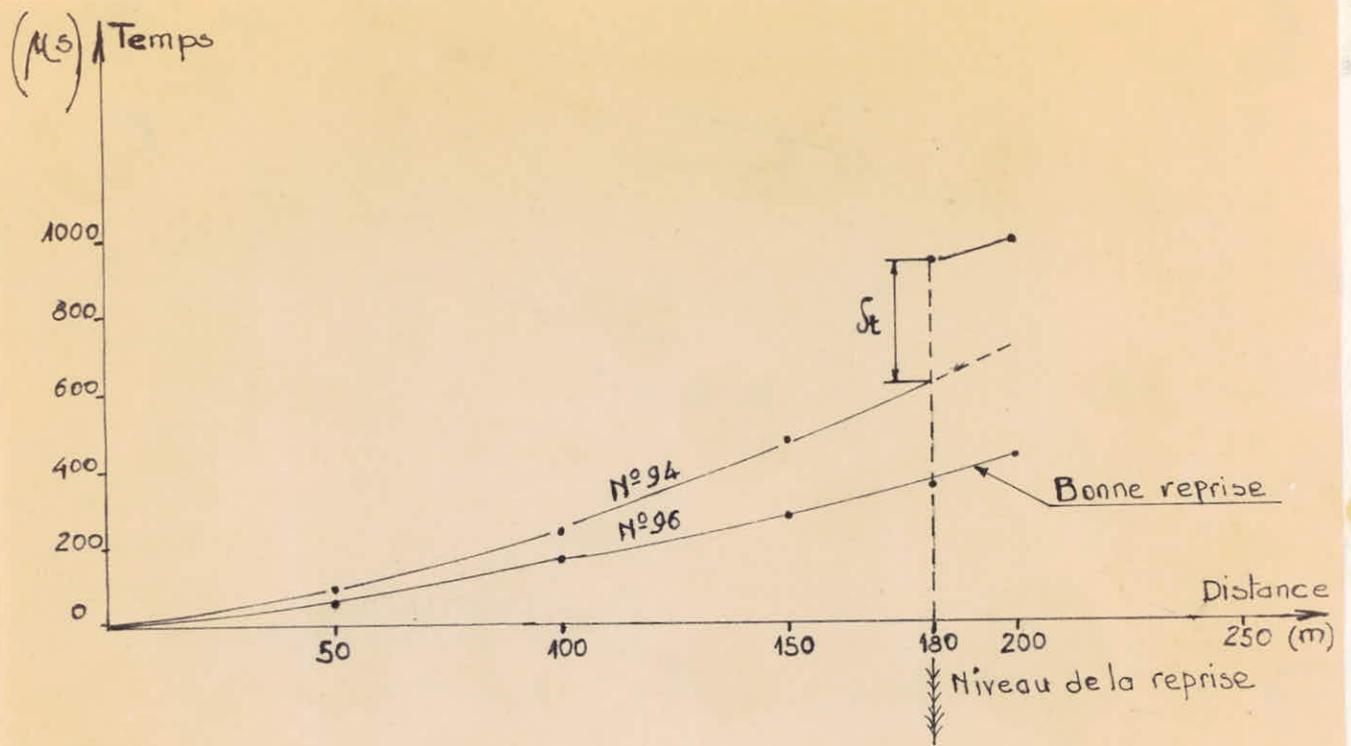
Le marteau transmet ses chocs tangentiellement à la surface. Le capteur est posé à des distances connues du marteau.

SI l'on relève les mesures se rapportant à des points équidistants, les diagrammes espace-temps donnent des renseignements sur l'état de surface du béton même si celui-ci se trouve crépi de même on peut déceler les fissures même peu profondes.

Nous avons, au cours de nos essais rencontré très souvent des difficultés de mesures : la forme des signaux était très souvent altérée. Cela provenait de l'état de surface de nos piliers ; en effet, sous le crépissage destiné à donner un aspect extérieur convenable, il existait des surfaces rugueuses.

Nous avons pu également déceler une mauvaise reprise de bétonnage.

En effet, en traçant le diagramme espace-temps les mesures faites en surface sur le pilier n° 94 ont donné l'allure suivante :



EXPLICATION

A partir d'un point A, origine des ébranlements, mesurons les temps t nécessaires pour que le front de l'onde émise atteigne un point x . Si la vitesse de propagation est constante : $t = vx$ est la vitesse de propagation. La courbe représentant le temps en fonction x est une droite. Si, en un point B, le béton change (cas d'une reprise de bétonnage), la vitesse v change et ce point est marqué par une brisure sur la ligne $t(x)$.

Supposons maintenant qu'il existe une fissure en B. Lorsque le point de mesure se trouve entre A et B, la courbe $t(x)$ est

./.

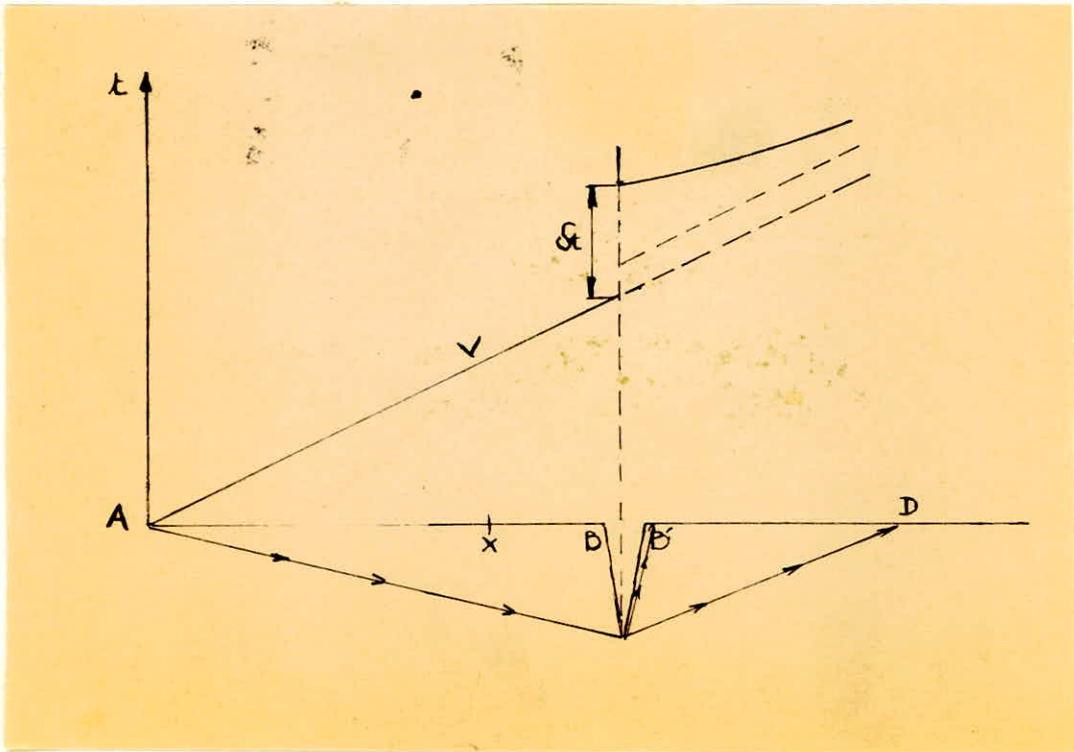
une droite et ceci jusqu'à ce que x arrive en B . Lorsque le point de mesure B' se trouve de l'autre côté de la fissure, le chemin le plus court que peut suivre l'ébranlement fait le tour de celle-ci, il est $ACB' > AB$. Il existe donc une discontinuité entre les temps t pris de part et d'autre. Ce temps est :

$$\frac{AC + CB - AB}{v} = \delta t$$

et l'on a :

$$v\delta t = \sqrt{AB^2 + BC^2} + BC - AB$$

d'où il est facile de tirer la valeur BC , profondeur de la fissure, Au delà de celle-ci, à droite de B' le retard δt diminue en même temps que le rapport entre la longueur et la ligne brisée ACD et la droite AD et tend vers une asymptote légèrement décalée, représentant la différence entre les temps de parcours AB et AC .



2) Les mesures sont faites suivant l'épaisseur de la pièce
c'est à dire que le marteau frappant d'un côté du pillier, et le cap-
teur se trouve sur l'autre face.



Là aussi nous avons rencontré sur certains pilliers des
difficultés. Les signaux arrivaient mal où quand ils arrivaient ils
étaient déformés. En ces endroits la présence de creux et de fissures int-
ernes pou expliquer le phénomène.

Nous avons également pu tester une plaque de béton.
C'est une plaque de répartition pour culot d'encrage pour tirant
de précontrainte : c'est une des plaques utilisée pour la mise en
précontrainte des piles et culées du barrage de Fergoug dans la région
de Mascara.

De par sa destination on pouvait prévoir la qualité du
béton qui devait servir à la confection de cette plaque.

Avant les mesures, il a été procédé à la localisation des
armatures (afin de pouvoir tester le béton seul). La plaque était
ainsi divisée en régions (raillure sur la plaque) au travers desquelles



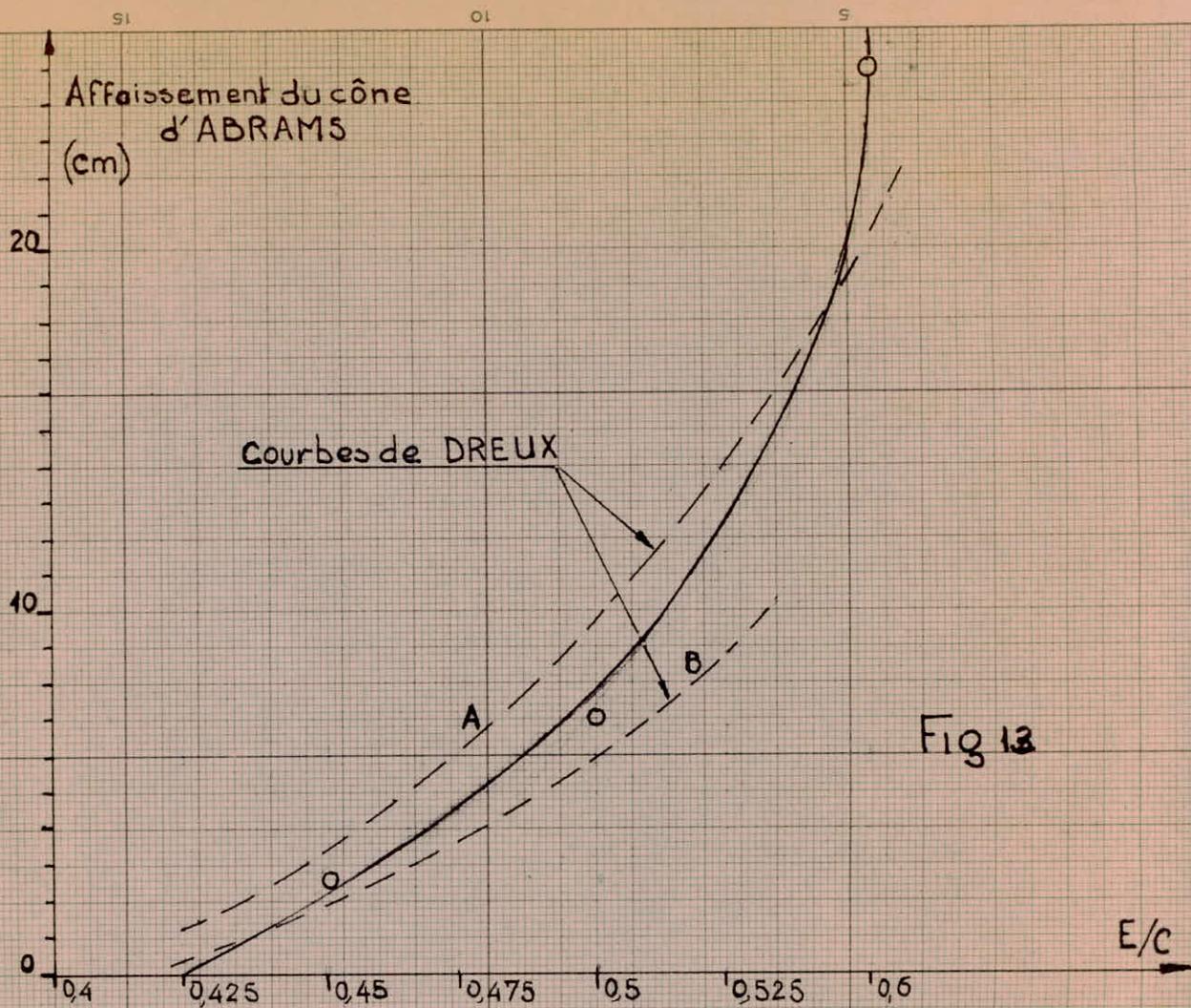
CCOMMENTAIRES--- GRAPHIQUES---TABLEAUX DES RESULTATS

(Les cases laissées en blanc representent les deux dernierres series des betons de 7jours qui n'ont pu être coulées par manques de temps)

AGE	7j				14j				28j				2 MOIS							
	1		2		3		4		5		6		7		8					
E/C	CUBES		PRISMES		CUBES		PRISMES		CUBES		PRISMES		CUBES		PRISMES					
	V	T	V	T'	V	T	V	T'	V	T	V	T'	V	T	V	T'				
045 1	A	4800	257	4220	17	4690	334	4520	233	5170	342	4950	31,7	5130	38,3	4920	33			
		4825	290	4275	21,7	5020	332	4535	230	4930	325	4770	28,5	5070	39,1	4920	26			
		4825	287	4200	21,7	4980	330	4576	219,9	4970	336	4715	26,9	5070	358	4770	34			
		4700	295	4270	20,5	4950	244	4626	25,5	4980	328	4615	41,1	5150	363	4840	35			
		4770	218	4220	19,7	4690	292	4570	21,9	5025	320	5080	31,0	5125	342	4790	31,8			
	E	4700	290	4340	20,8	4790	302	4535	20,5	4930	325	4820	290	5070	360	4936	33			
		4770	282	4255	202	4853	313	4560	22,8	5040	329	4835	287	5102	366	4860	326			
		4870	314	4770	24,7	5000	339,8	4780	33	5200	374	4870	29,4	5260	44,8	5170	42			
		4770	330	4760	26	5000	336,9	4850	32,6	5200	369	4770	30,5	5170	44,7	5125	37			
		4930	386	4725	29,6	4860	336	4785	36,6	5201	363	4930	36	5080	430	5125	35			
045 2	A	4890	320	4700	30,2	5000	342	4790	31	5150	355	4890	33,6	5240	47,2	520	40,5			
		5025	310	4725	28,9	4900	337	4820	33,8	5170	361	5025	34,2	5200	47,8	530	43			
		4870	331	4830	29,8	5020	330	4790	34	5240	369	5070	36,2	5300	48,2	5125	41,5			
		4892	315	4750	28	4963	338	4802	33,3	5193	365	4892	34,9	5208	409	5176	39,8			
		4705	262	4200	18,5	4800	290	4500	22	4950	315	4600	26,3	4820	270	4620	30			
	E	4789	291	4225	19,2	4750	309	4472	23	4770	310	4525	24	4790	235	4535	30,4			
		4762	276	4240	11	4800	298	4450	20,2	4715	310	2660	25	4770	245	4620	28,4			
		4765	307	4150	23,6	4920	305	4480	21	4615	308	4500	24,2	5080	336	4770	30,2			
		4705	270	4200	17,5	4800	298	4420	20	4820	320	4500	25	5125	399	4570	23			
		4802	255	4200	21,1	4750	298	4510	22	5080	312	4400	29	5070	364	4535	30,5			
05 3	A	4738	377	4803	18,5	4803	300	4472	21,3	4835	312	4512	25,8	4942	391	4608	30,4			
		4900	320	4560	26,2	5010	314	4845	30,1	5100	338	4906	32,3	5100	325	4470	36			
		4800	250	4550	27,5	4885	330	4806	32,5	4980	352	4860	32,3	5100	357	5020	37,2			
		4800	328	4440	21,8	4885	286	4810	26,3	5125	353	4845	38,5	5225	372	5020	39			
		4750	314	4670	28,6	4900	320	4600	33	4930	353	4850	33	5100	357	5100	36,8			
	E	4750	330	4490	26,7	4960	310	4650	30,9	5025	360	4870	34	5100	402	5100	28			
		4920	320	4500	26,8	4930	332	4580	33,2	5070	358	4880	32	5260	327	5125	34,8			
		4803	310	4535	26,8	4928	318	4745	31	5038	340	4852	32	5147	358	5056	37,3			
		4450	224	4130	18	4600	280	4290	19,7	4650	288	4480	21,1	4800	288	4600	22,8			
		4475	176	4225	21,7	4530	260	4280	19	4650	290	4420	20,5	4770	274	4525	22,6			
06 4	A	4430	197	4240	11,4	4460	250	4250	17,4	4606	270	4425	11	4820	216	4560	20,4			
		4400	166	4070	12	4530	215	4270	17,7	4650	282	4475	33	4800	287	4500	21,6			
		4475	112	4150	22	4525	268	4290	20	4650	288	4350	34,8	4800	307	4500	23,2			
		4428	133	4100	17,1	4467	235	4350	20,8	4680	294	4420	32,3	4930	361	4400	23,3			
		4443	201	4455	17,1	4520	257	4288	19,1	4637	285	4438	20,8	4820	289	4612	22,3			
	E	4520	254	4490	24,3	4780	287	4620	24,7	4920	290	4700	29,8	5120	330	4950	30,3			
		4570	271	4400	23	4740	295	4740	26	4920	276	4700	27,8	5160	312	5100	33			
		4500	275	4370	22,5	4830	264	4770	29,6	4770	319	4860	26	5160	363	4080	34,7			
		4450	290	4560	25	4870	280	4740	30,2	4840	321	4775	29,6	5080	361	5040	32,7			
		4300	302	4420	23	4875	253	4770	27,8	4790	317	4920	30,2	5060	374	4950	34,5			
06 4	A	4550	371	4275	21	4770	287	4772	29,8	4935	298	4791	24,7	5060	295	4820	33			
		4481	277	4419	23,1	4811	278	4735	28	4862	303	4791	28	5106	350	4975	33			
		4350	182	4025	16	4260	205	4230	19,6	4260	205	4230	19,6	4500	270	4420	20,5			
		4190	116	4010	15,1	4360	196	4325	20,3	4360	196	4325	20,3	4560	285	4465	21,1			
		4260	186	4025	16,5	4360	205	4340	19,6	4360	205	4340	19,6	4675	253	4420	23			
	E	4350	172	3980	16	4360	218	4370	19,3	4370	193	4250	17,4	4630	262	4480	11			
		4350	180	4130	13,8	4370	193	4370	19,3	4370	193	4250	17,4	4630	262	4370	23,3			
		4310	177	4385	15,5	4300	201	4300	20,1	4300	201	4200	20,9	4610	268	4320	24,8			
		4301	179	4092	15,5	4335	200	4352	18,8	4636	259	4320	20,4	4636	259	4320	20,4			
		4760	236	4612	24,3	4610	22	4790	268	4700	308	4700	308	4400	30	4400	30			
PB00168 avant p.41	A ₁₁	4760	256	4600	23	4670	21	4670	21	4670	21	4760	253	4700	299	4780	34			
		4640	241	4600	23,5	4650	23	4710	24,9	4710	24,9	4860	319	4890	319	4890	319			
		4575	234	4690	25	4670	24,4	4830	207	4775	286	4775	286	4950	38	4950	38			
		4800	262	4675	23	4810	23,2	4800	280	4820	318	4820	318	4870	33	4870	33			
		4575	211	4690	21	4770	23,1	4850	251	4790	251	4790	251	4790	307	4870	31,4			
	A ₁₁	1685	246	4644	23,1	4701	23	4790	251	4790	251	4790	251	4790	307	4870	31,4			
		A ₁₂	V ₃	4970	5050	4840	5050	4970	4970	4975	5460	6400	5130	5300	4300	4300	5341			
			A ₁₂	V ₃	4180	4130	4335	4090	4570	4250	4242	4670	4460	4670	4700	4700	4700	4650		
				A ₁₃	V ₃	4340	4700	4520	4400	4460	4340	4460	5130	4990	5375	5300	5060	5300	5192	
					A ₁₄	V ₃	4840	4770	4700	4570	4650	4700	4705	4700	4920	4775	4990	4985	4985	4892
A ₁₄	V ₃					4840	4770	4700	4570	4650	4700	4705	4700	4920	4775	4990	4985	4985	4892	

VALEURS DES MODULES EN 10^4 KG/CM²

		7 j	14 j		28 j		60 j.	
A	45,2	36	51	46,1	57,25	52,7	58,4	53
E	47,65	45	54,4	51	60,6	53,7	61	60,2
A	44,7	35,2	51	44,1	52,5	45,7	53,6	47,7
E	46,2	40,8	53,5	49,6	57,1	53	59,45	57,4
A	39,2	34	45,1	47,5	48,3	44,2	52,1	45,6
E	40	38	52	49,25	53,1	51,6	58,5	55,7
A			40,8	37	42,2	40,6	48,2	43,75
E			48,35	47,5	49,7	51,7	53,2	51,7



AFFAISSEMENT DU CONE D'ABRAMS EN FONCTION DE E/C FIG. I3

Dans son livre intitulé "Connaissance du béton", Monsieur DREUX a présenté deux courbes donnant l'affaissement au cône en fonction de la quantité d'eau en litre/m³ de trois sortes de bétons :

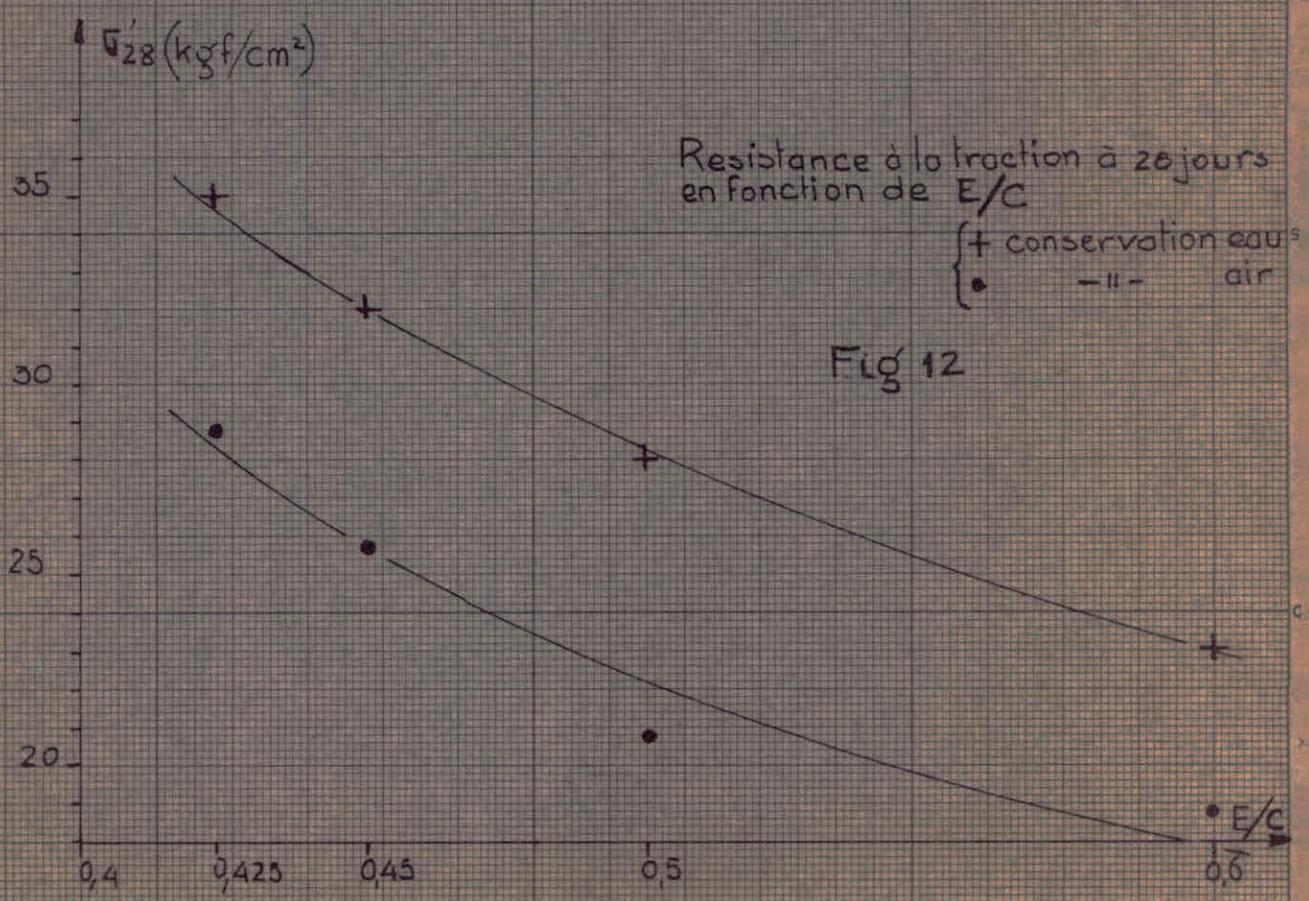
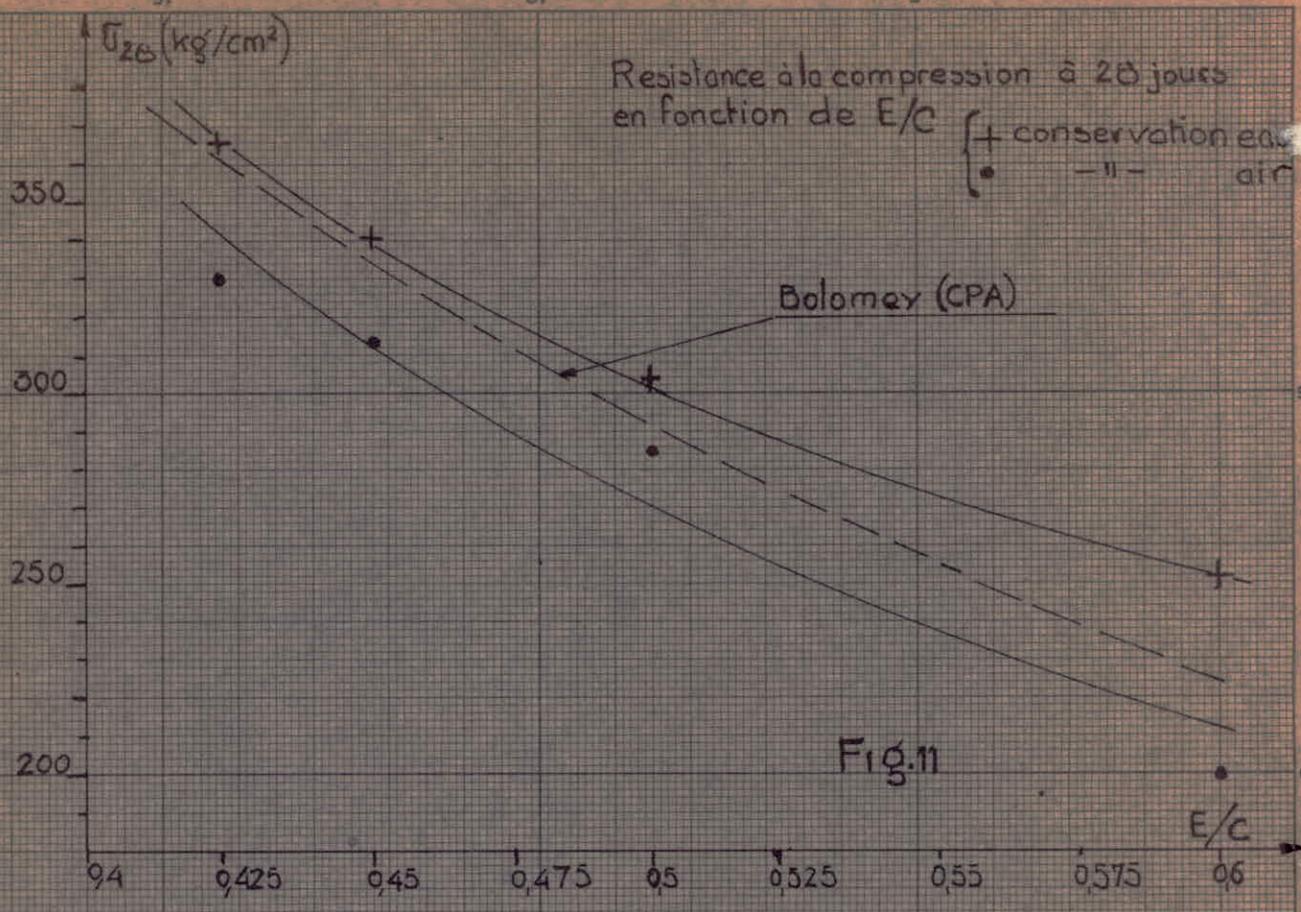
- béton A dosé en ciment HRI 315/400 à 400 kg/m³
- béton B dosé en ciment CPAL 210/325 à 350 kg/m³

Nos bétons étaient dosés à 400 kg/m³ en ciment C.P.A. 325. Nous avons retracé sur le même graphique les deux courbes de DREUX.

Notre courbe donne des affaissements au cône supérieur à courbe du béton B mais reste inférieure en grande partie à celle du béton A.

Nous pouvons dire que nos bétons étaient de maniabilité moyenne.

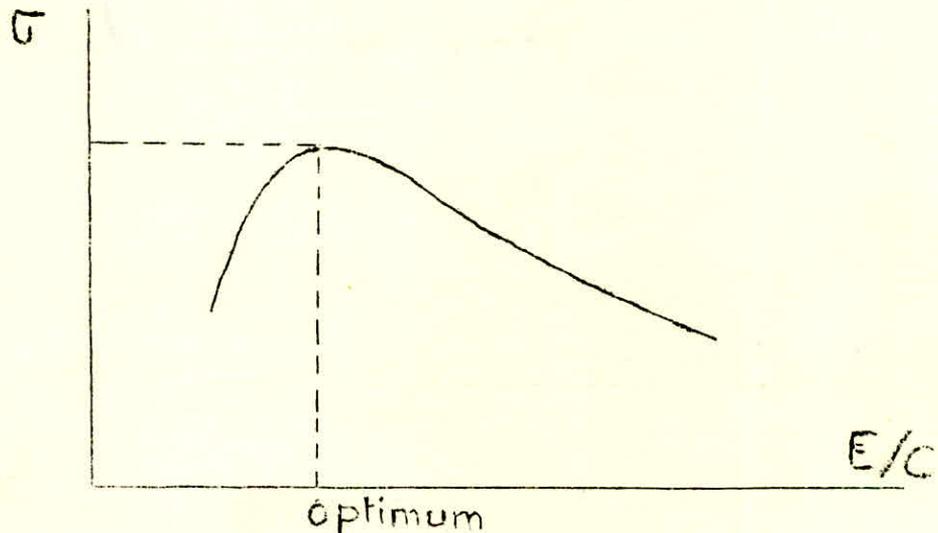
La maniabilité est liée surtout à la forme des grains des sables. Elle est d'autant plus élevée que les grains sont roulés



RESISTANCE A LA COMPRESSION ET A LA TRACTION A 28 JOURS
EN FONCTION DE E/C

Les figures II et I2 représentent les courbes σ et f_t (1,3) sur chaque figure nous avons tracé les courbes pour les conservations à l'eau et à l'air.

La courbe classique donnant la qualité du béton en fonction du rapport E/C à la forme suivante :

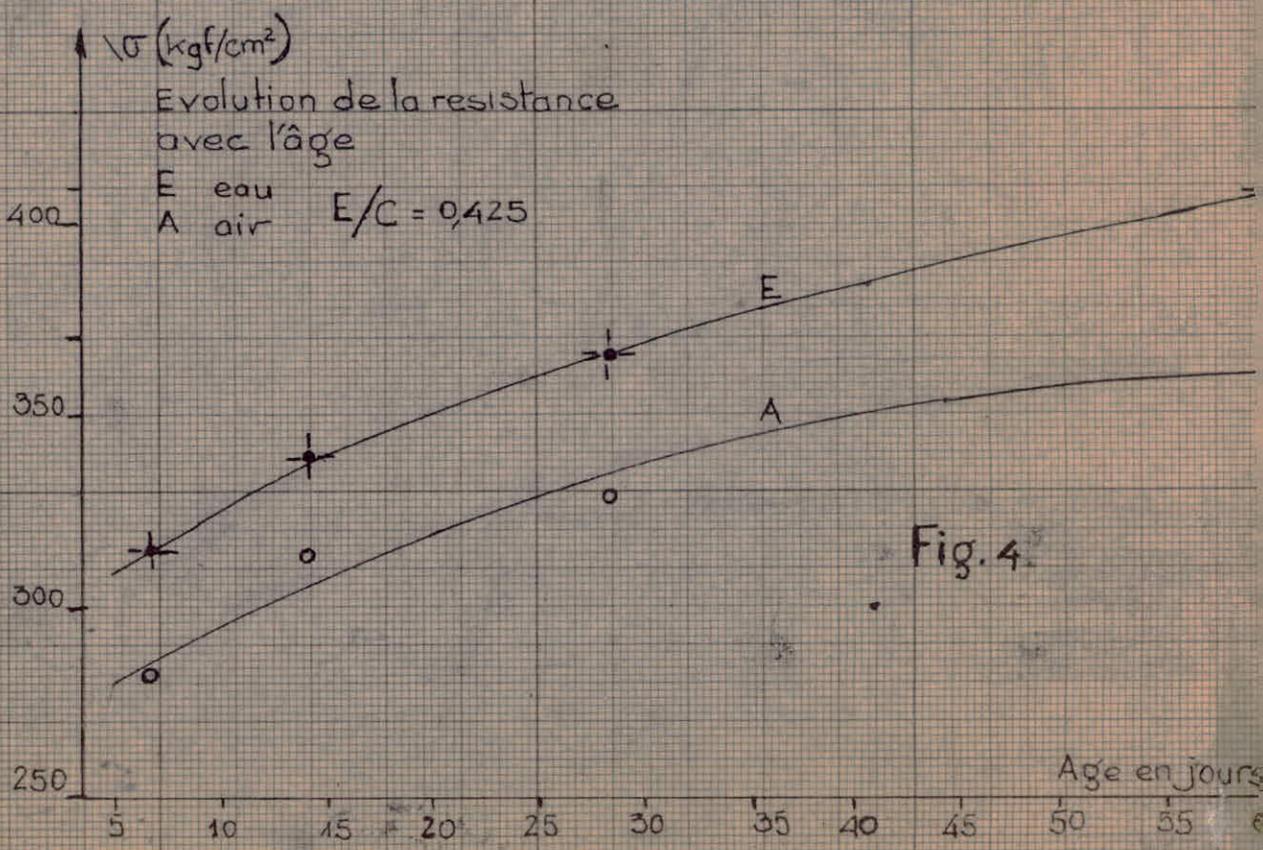
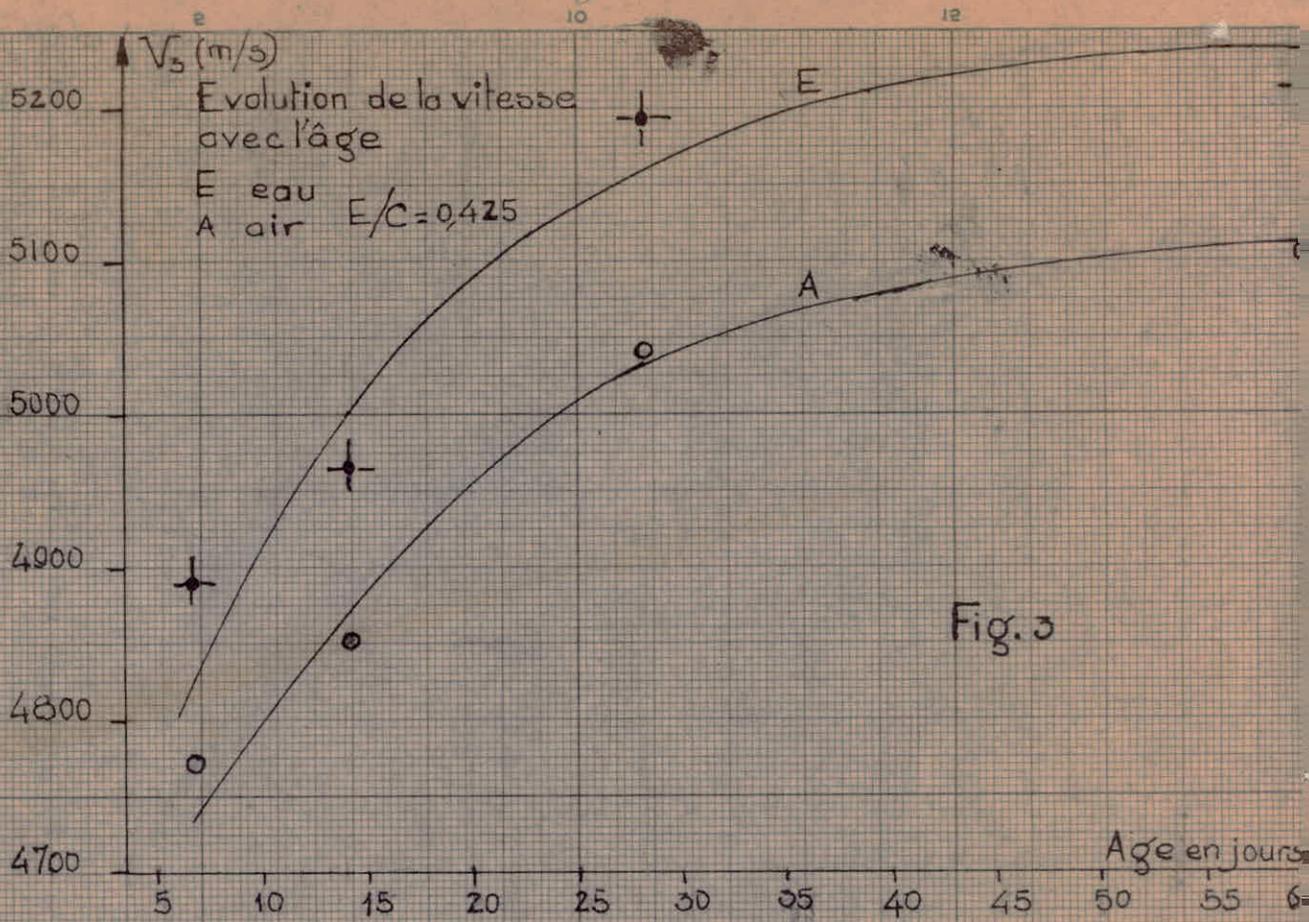


Elle est d'une extrême importance. Elle permet de comprendre un grand nombre de propriétés du béton. Elle montre en particulier que :

- à serrage égal, une augmentation de la quantité à partir du dosage optimum diminue la résistance,
- à serrage égal; une diminution de l'eau à partir de l'optimum fait baisser très rapidement la résistance, comme l'on peut le constater sur nos figures.

- REMARQUE

En pratique on se trouve rarement placé à l'optimum .
A partir de l'optimum théorique de E/C calculé, il est possible
que la résistance trouvée soit un peu inférieure ou supérieure à celle
prévue cela explique que le E/C calculé se trouve placé un peu à
gauche ou à droite du sommet de la courbe plus généralement et
légèrement aplatie.



EVOLUTION DE σ V ET E AVEC L'AGE INFLUENCE DU
MILIEU DE CONSERVATION

Le module d'élasticité et la vitesse du son semblent se stabiliser après un certain temps, voir figure 3 et 5. Ceci se manifesterait pour le module déjà vers un mois. Cependant que la vitesse continue à croître au delà de cet âge et ne commence à se stabiliser qu'après 2 mois.

La résistance croit encoee au delà de 60 jours, on peut le constater nettement pour les bétons conservés à l'eau. Fig. 4.

On note, aussi bien pour le module, la vitesse que pour la résistance, des progressions différentes pour les deux types de conservations. Les valeurs des modules des vitesses et des résistances pour la conservation à l'eau restent toujours supérieures à celles à l'air . L'eau assure un meilleur durcissement.

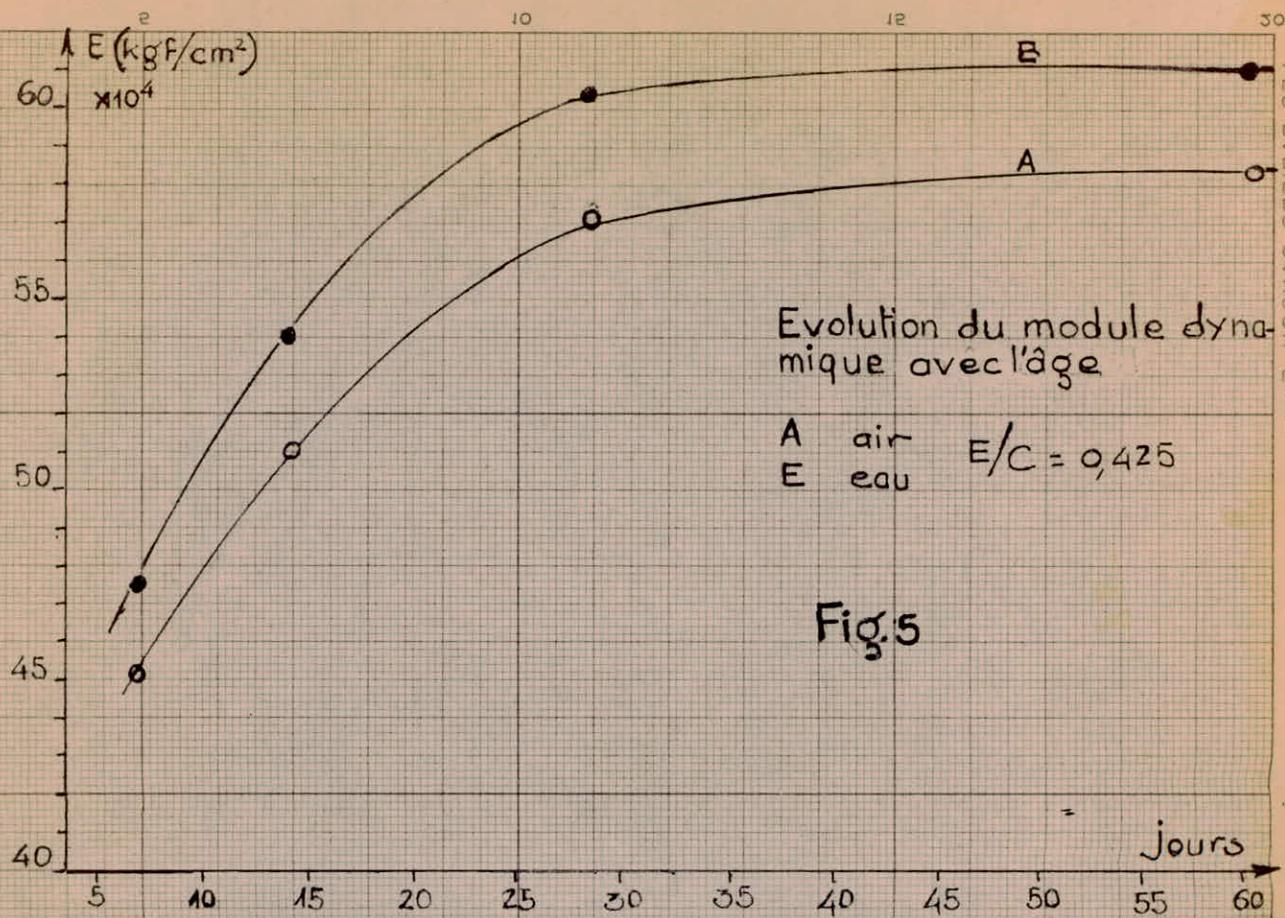
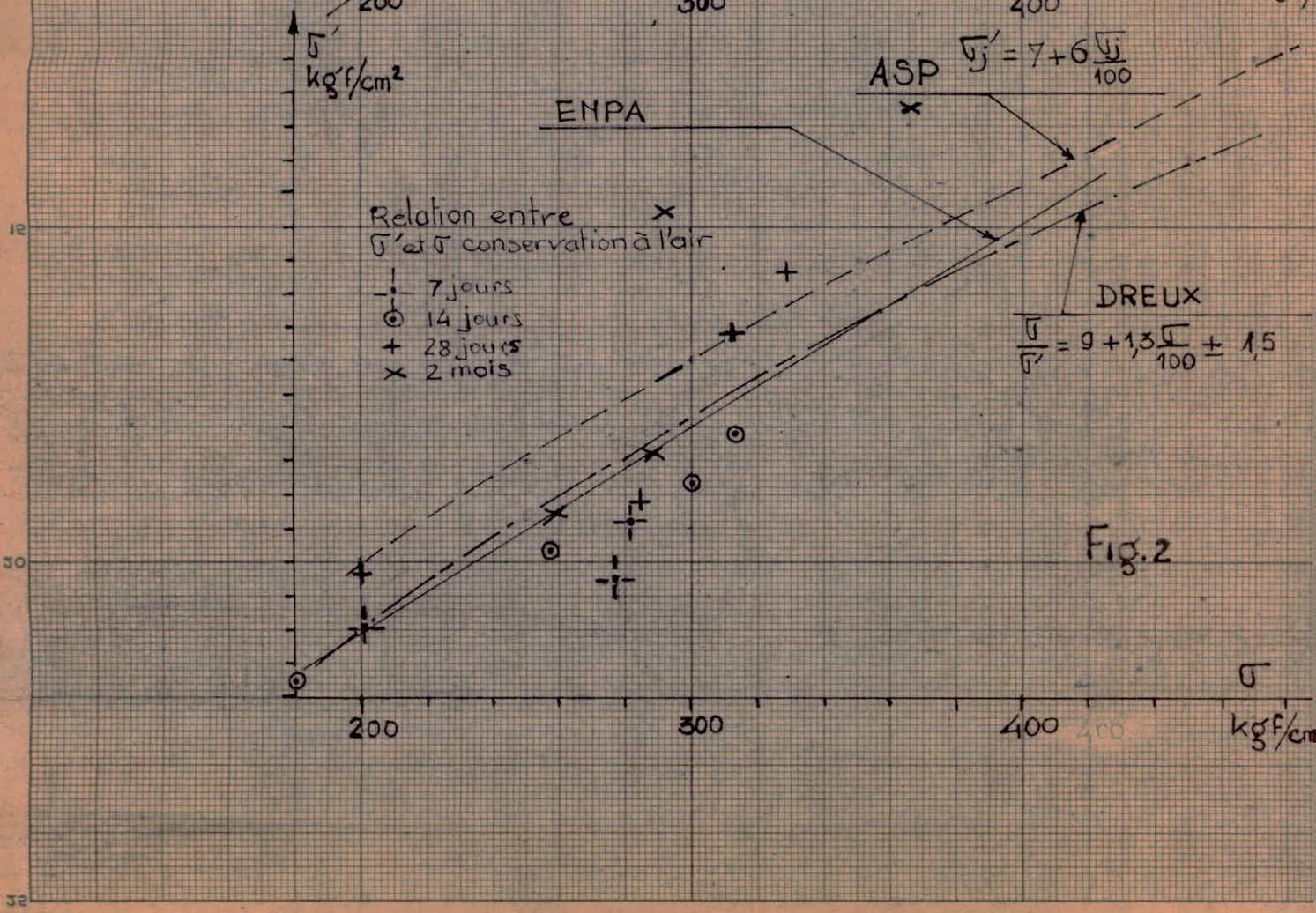
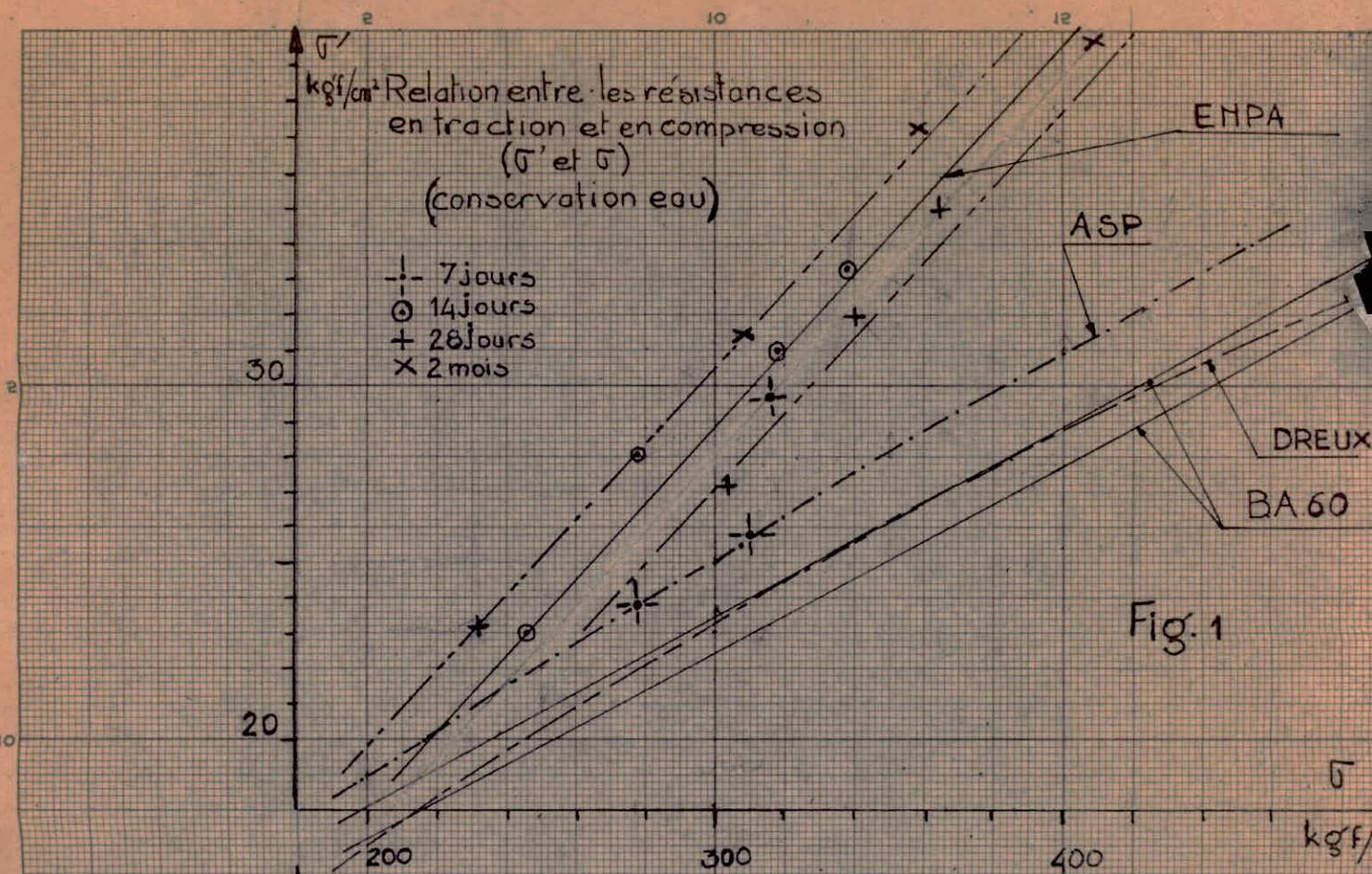


Fig.5



RELATION ENTRE σ ET σ' FIG. 1 ET 2

Notre courbe dans le cas de la conservation à l'air fig. 1 se rapproche assez bien de celle de DREUX. Cependant, il faut noter que nous avons une grande dispersion. Les formules proposées par DREUX et le BA 60 sont les suivantes :

$$\text{BA 60 :} \\ \sigma' = \frac{\sigma}{20} + 7,5 \text{ (pour les bétons non contrôlés)}$$

$$\sigma' = \frac{\sigma}{20} + 9 \text{ (pour les bétons contrôlés)}$$

$$\text{DREUX :} \\ \frac{\sigma}{\sigma'} = 9 + 1,3 \frac{\sigma}{100}$$

ces formules restent valables pour la conservation à l'air.

Par contre, dans le cas de la conservation à l'eau fig. 2 notre courbe s'écarte nettement des autres. La formule que nous proposons est la suivante :

$$\frac{\sigma}{\sigma'} = 8,25 + \frac{62,7}{\sigma}$$

LE COEFFICIENT DE POISSON

Son évaluation a été faite par comparaison des vitesses V_3 mesurées sur cubes, et sur prismes (en travers), et des vitesses V'_1 mesurées sur prismes longitudinalement.

Comparaison V'_3 et V'_1 cette comparaison ne nous a donné aucun résultat que nous puissions retenir. Cela pourrait provenir du fait que la mesure de V'_3 était faite sur une très faible épaisseur 7 cm. Les mesures sur une telle distance demande beaucoup de pression. Les signaux que l'on obtient pour de telles épaisseurs étant très courts, les erreurs d'appréciation, qui, pour des épaisseurs de 28 ou 20 cm ont une influence tolérable peuvent perturber d'une manière très considérable les résultats des mesures sur faible épaisseur.

Comparaison V_3 et V'_1 :

Contrairement à la première, cette comparaison nous a permis d'obtenir des résultats plus satisfaisants. Nous reportons si-dessous les valeurs de ν obtenues sur des bétons des 4 âges ($E/c = 0,425$) et conservés à l'air :

	V_3 / V'_1	ν	(lu sur la courbe proposée par l'HERMITE)
7 jours	1,12	0,27	
14 jours	1,08	0,23	
28 jours	1,05	0,19	
6 mois	1,05	0,19	

Ces valeurs de ν sont celles que nous avons utilisé dans nos calculs. L'influence du rapport E/C étant faible, ν varie linéairement avec E/C avec une pente très faible (RILEM n° 15 Août 1953 fig. I6). D'autre part pour les éprouvettes conservées à l'eau, il a été prouvé que la présence de l'eau dans les vides influe beaucoup les valeurs du coefficient de POISSON déterminées par la méthode dynamique (RILEM n° 15 page 4).

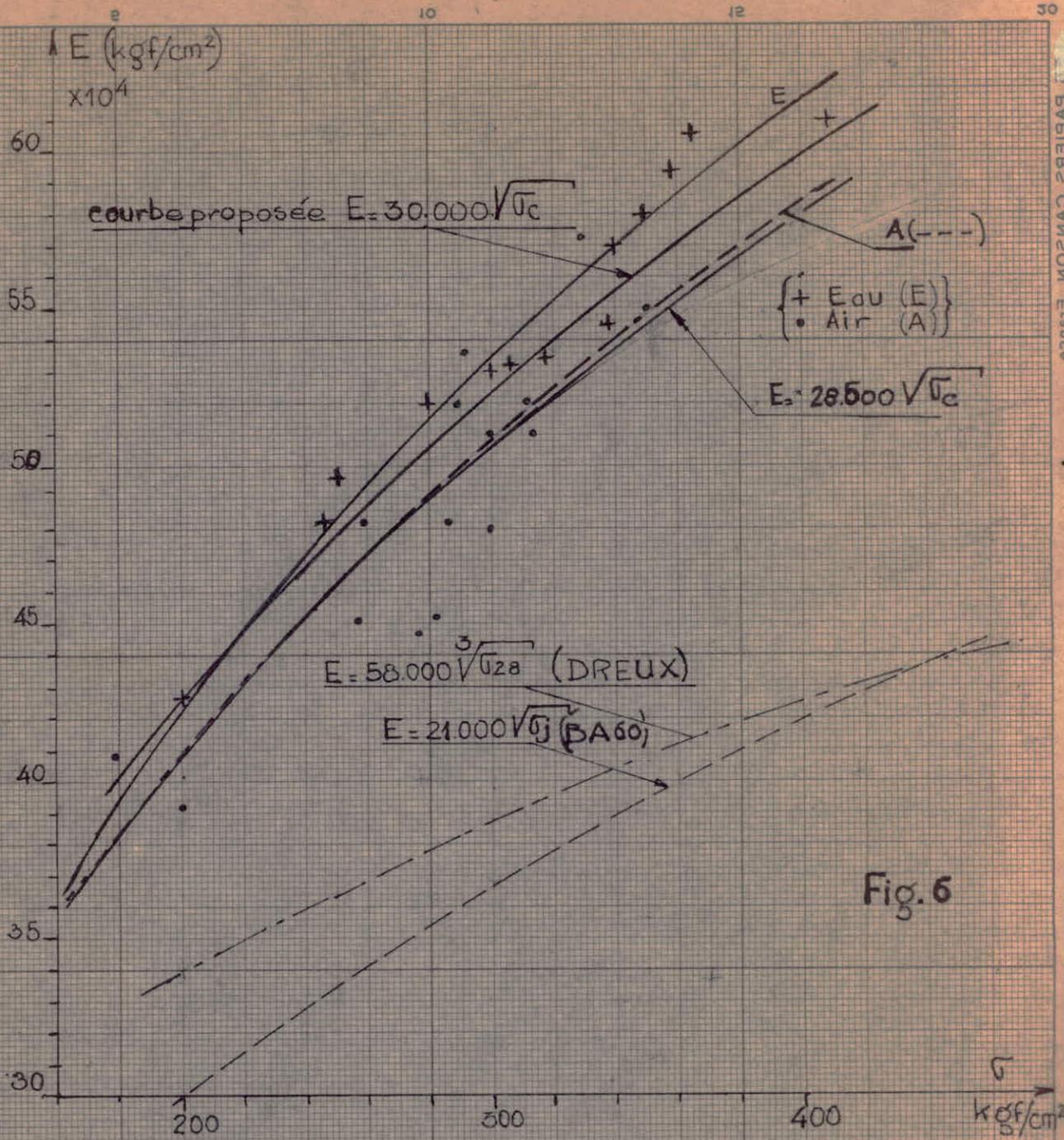
Toutefois que ces valeurs ne peuvent être considérées comme des valeurs exactes de ν . La détermination correcte de ν devant s'effectuer par comparaison de V_3 et V_1 , V_1 étant la vitesse mesurée par vibration.

Plusieurs auteurs proposent de prendre forfaitairement $\nu = 0,2$ dans les calculs de E, l'erreur ainsi commise étant faible. Il conseille cependant de le déterminer chaque fois que l'on peut.

ν peut être pris " pris forfaitairement égal à 0,2, le terme correctif variant de 1,03 à 1,10 pour ν variant 0,15 à 0,25" (L'HERMITE Annale ITBTP n° 140).

ν " pourra être pris égal à 0,2 pour le béton sans grande erreur" (RILEM).

Nous avons cherché à apprécier numériquement l'erreur que l'on pourrait commettre sur la valeur de E en prenant $\nu = 0,2 \pm 0,5$ nous avons trouvé un $\frac{\Delta E}{E}$ égal à 6,3 %



MODULE D'ELASTICITE

1) Relation entre la résistance à la compression et le module dynamique.

Le graphique de la figure 6 représente les variations (à l'eau et à l'air) du module dynamique en fonction de la résistance comme nous l'avons dit dans notre exposé, les différentes formules proposées pour lier les variations de E et σ sont de la forme $E = K \sqrt[3]{\sigma}$

Dans l'Annale d'Octobre 1967, DREUX a proposé la formule suivante :

$$E = 58.000 \sqrt[3]{\sigma_{28}}$$

La formule bien connue du BA 60 est la suivante :

$$E = 21.000 \sqrt[2]{\sigma_j}$$

Nous avons tracé les courbes représentant ces deux fonctions sur notre graphique. Elles s'écartent nettement des nôtres. Nos bétons ont des modules plus élevés que ceux qui ont servi à établir les précédentes formules. Nous proposons les formules suivantes :

conservation à l'eau :

$$E = 30.000 \sqrt{\sigma_c}$$

conservation à l'air :

$$E = 28.500 \sqrt{\sigma_c}$$

2) Relation entre le module dynamique et la vitesse du son :

Les graphiques de la figure 7 représentent les courbes de E en fonction de V celle que nous avons obtenu et celle tracée à partir de la formule de DREUX :

$$E d = 4,5 V^3 10^{-6}$$

./.

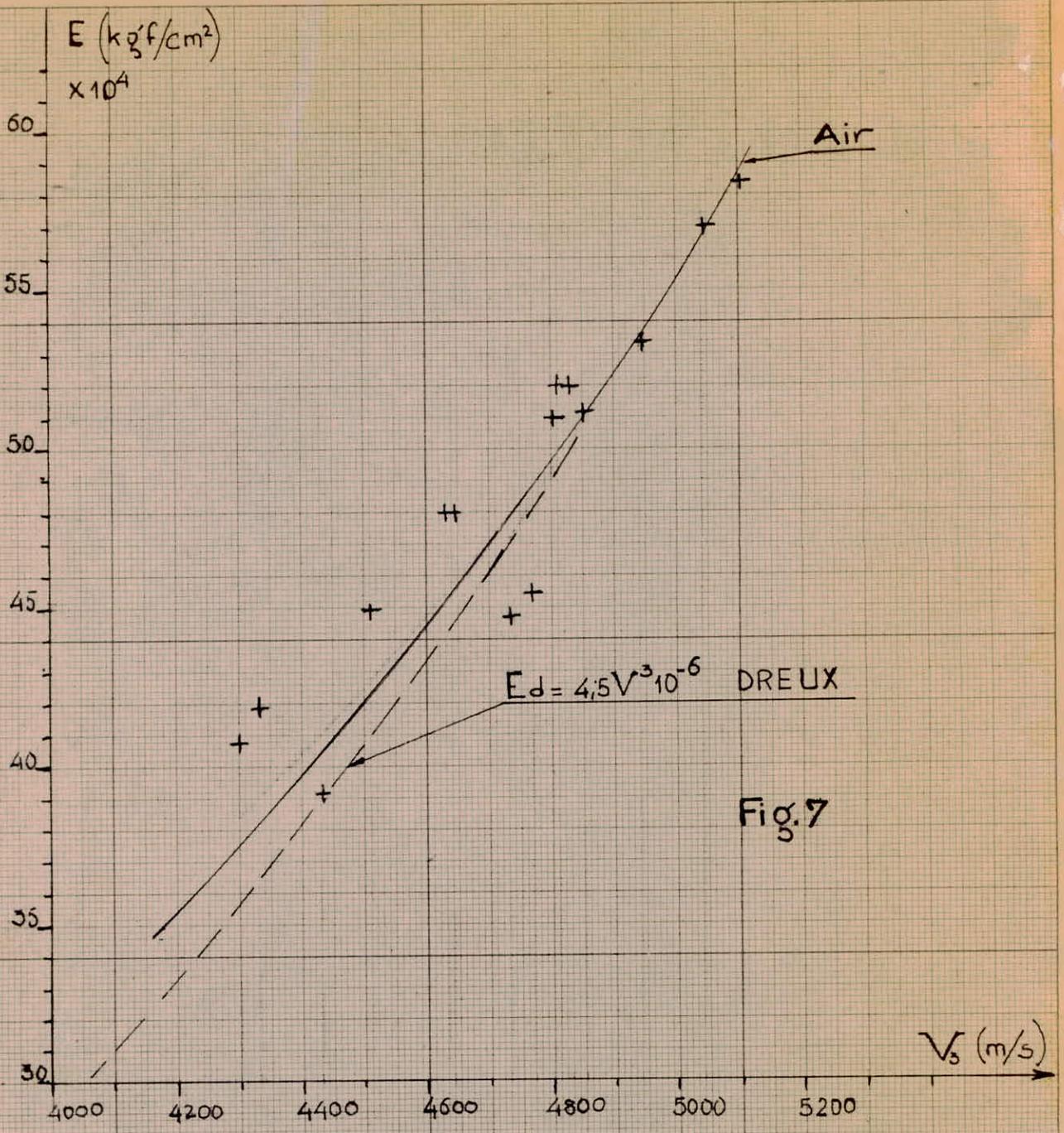


Fig.7

Notre courbe est celle de E en fonction de V^3 pour la conservation à l'air.

On note que les 2 courbes ont tendance à se rejoindre pour des vitesses > 4500 par contre au dessous de cette valeur elles s'écartent sensiblement.

La formule de DREUX a été établie comme suit :
nous citons :

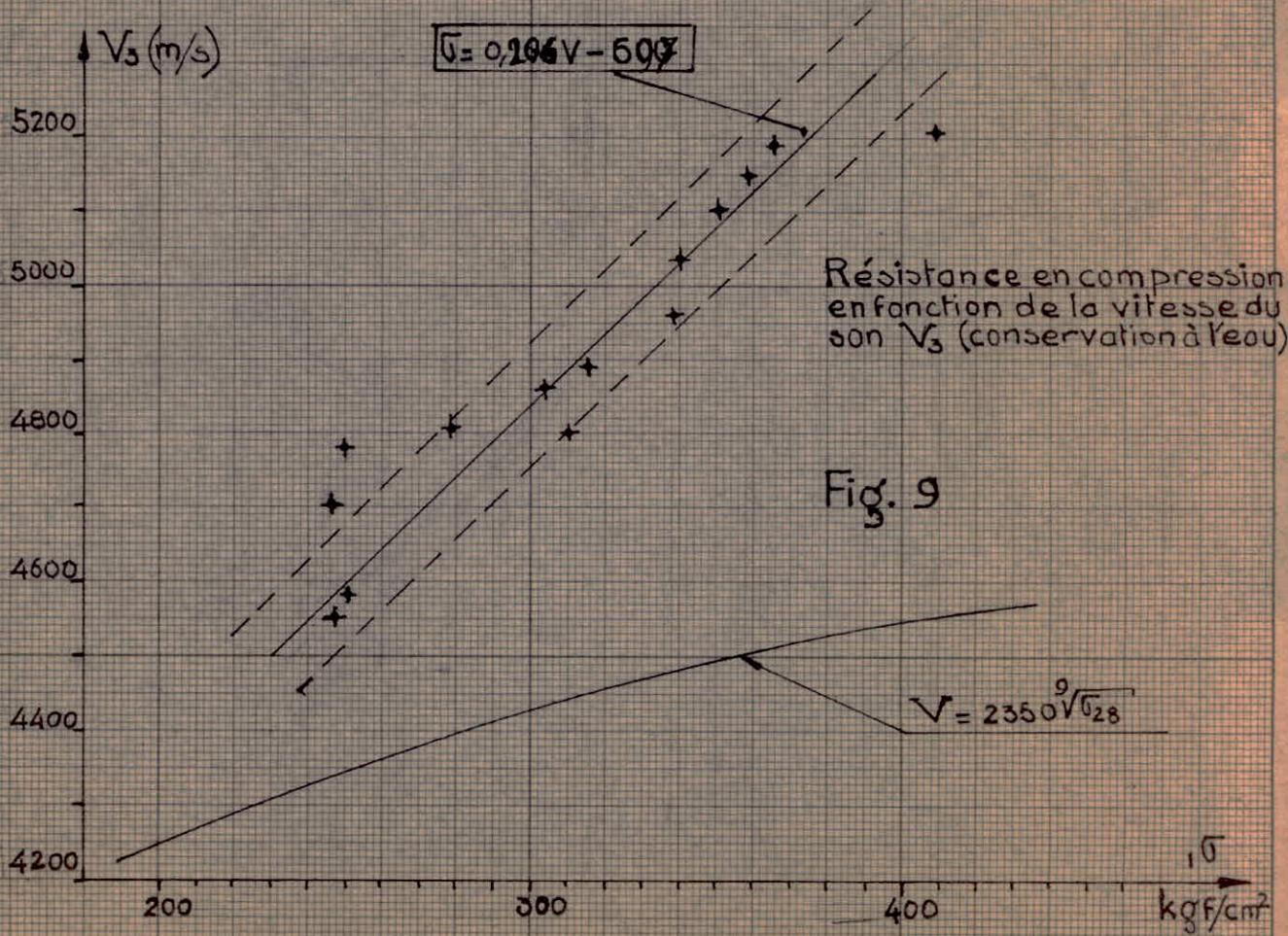
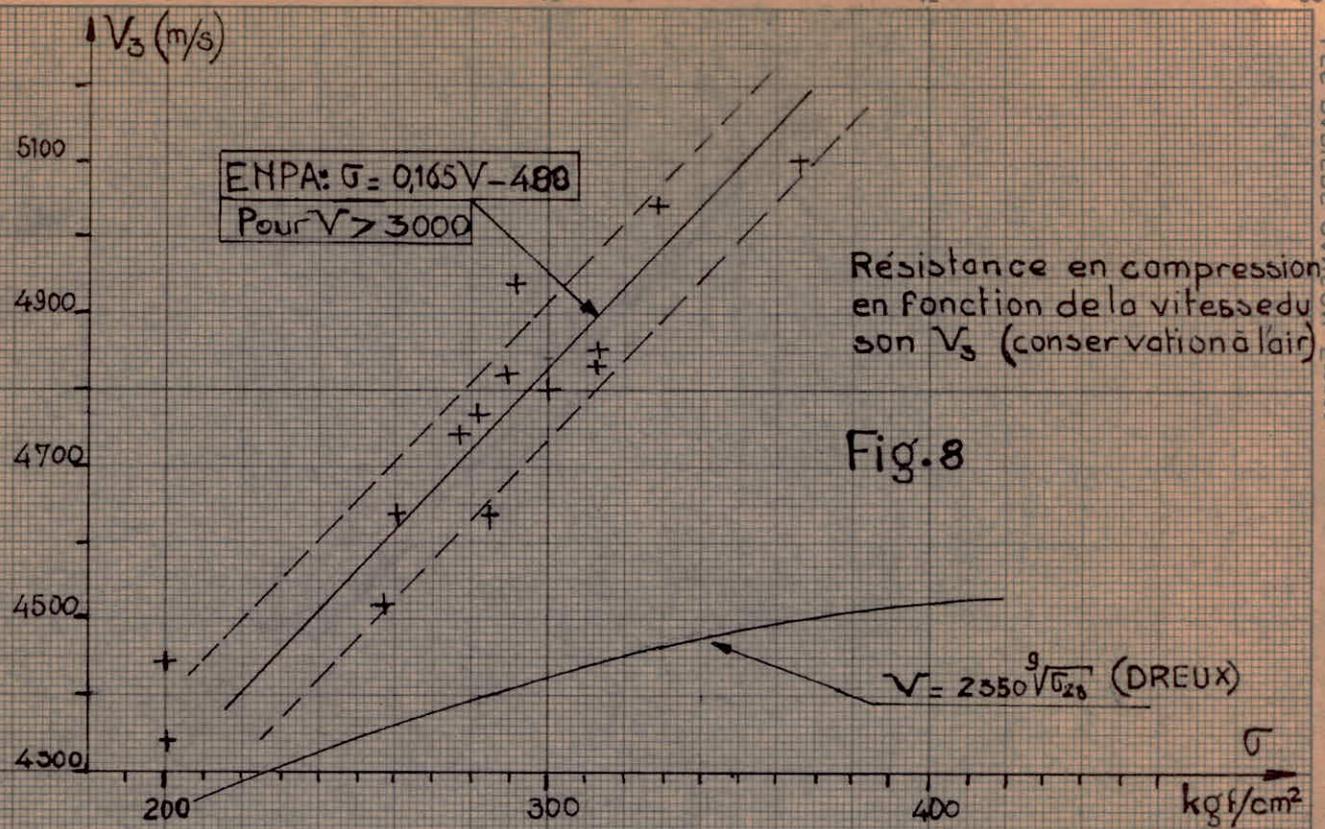
" on admet en général que l'on a $E = K V^2$, K étant une fonction du coefficient de POISSON ν et de la densité $\bar{\omega}$

$$K = (1 + \nu)(1 - 2\nu) \times \frac{\bar{\omega}}{g}$$

Si l'on cherche à expliciter une fonction de la forme $E = C V^n$, C n'étant alors qu'un simple coefficient numérique on trouve que la fonction la plus représentative est obtenue pour $n = 3$ et on a alors $E d = 4,5 V^3 10^{-6}$ "

Nous voyons donc que la formule ne tient ni compte du coefficient de POISSON ni de la densité cela expliquerait pourquoi, pour les valeurs de V faible donc, pour ce qui est de l'âge, cela correspond à de vitesse sur béton jeunes donc de densité plus élevée. Cette fonction qui ne tient pas compte de la variation de la densité reste au dessous de la notre (donne des modules plus faibles).

Nous pensons que la formule est valable surtout pour des bétons âgés, à ν et $\bar{\omega}$ pratiquement constants.



RELATION ENTRE LA RESISTANCE EN COMPRESSION ET LA
VITESSE FIG. 8 ET 9

Cette relation est à notre avis la plus importante sur le plan pratique, car la mesure de la vitesse du son est un moyen d'auscultation non destructif des ouvrages sur lesquels il permet d'estimer approximativement la qualité et la valeur de la résistance du béton constitutif.

Malheureusement les avis sur ce point sont divergents. Nous donnons ci-dessous deux étalonnages du béton d'après l'I.T.B.P., note n° 9 et DREUX dans l'Annale n° 238 Octobre 1967. Le troisième étant celui de Ms LISLIE et CHEISSMAN déjà donné au début de cette étude.

I. T. B. T. P.

Vitesse du son en m/s	Résistance en kg/cm ²
4.200	415
4.000	300
3.500	135
3.000	56

D R E U X

Vitesse du son en m/s	Résistance en kg/cm ²
3.500	50
3.800	50 à 100
4.000	100 à 150
4.200	150 à 250
4.400	250 à 350
4.600	350 à 450
4.700	450 à 550

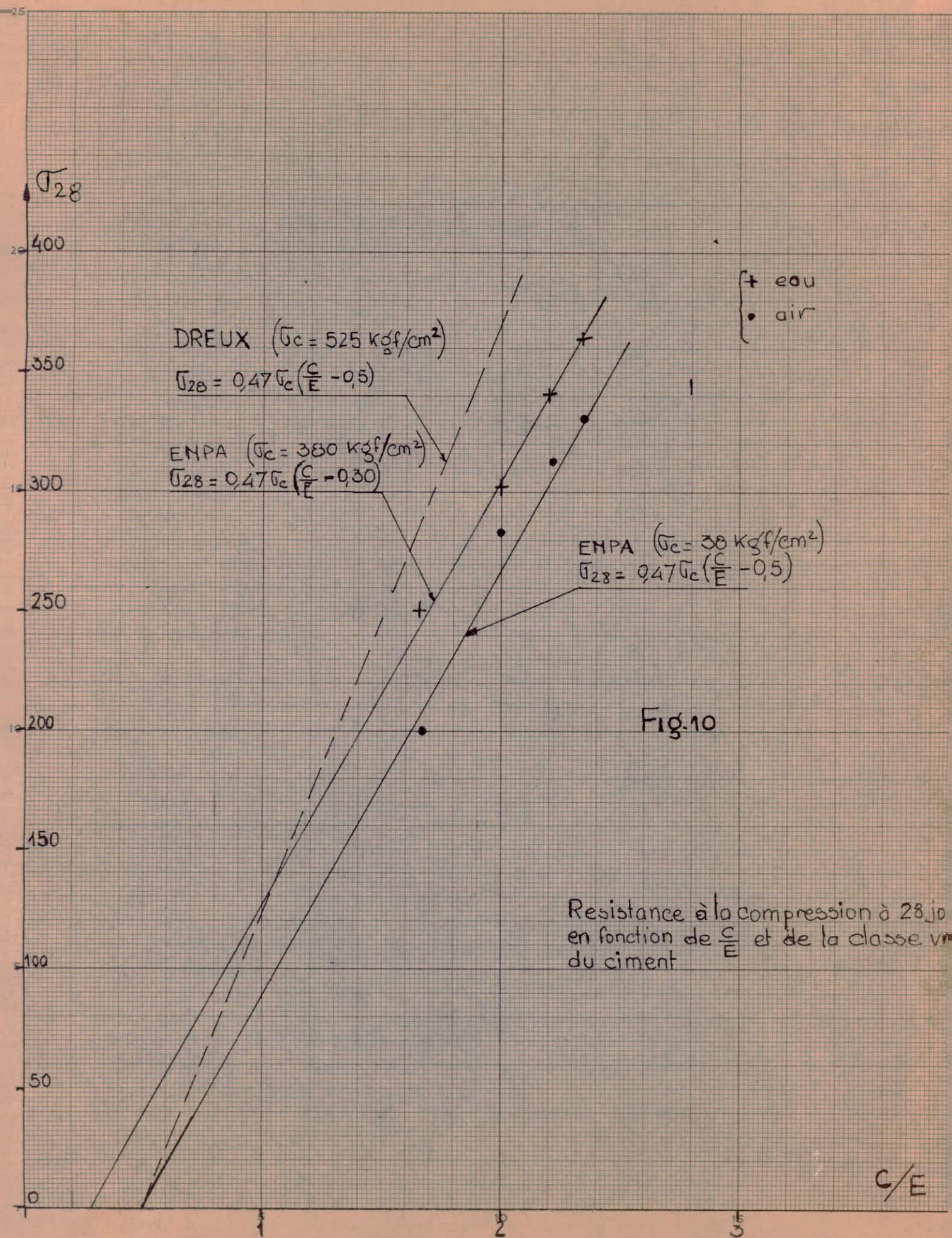
Néanmoins on peut noter qu'ils sont tous à peu près d'accord pour fixer la limite pour laquelle le béton cesse d'être considéré comme bon. Elle est de l'ordre de 3000 m/s.

Nous avons exprimé les équations des droites que nous avons obtenues.

- conservation à l'air : $\sigma = 0,165 \text{ V} - 488$
- conservation à l'eau/: $\sigma = 0,206 \text{ V} - 697$

Nous retenons ces relations pour des vitesses supérieures pour le cas de la conservation à l'air, à 3.000 m/s et pour le cas de la conservation à l'eau à 3.380 m/s.

Ces vitesses correspondent à des résistances pratiquement nulles . Ce qui nous concorde pour ce qui est de la limite ci-dessus citée avec étalonnages par DREUX, l'**ITBTP** et Ms LESLIE et CHEESMAN.



RESISTANCE A LA COMPRESSION A 28 JOURS EN FONCTION
C/E ET DE LA CLASSE VRAIE DU CIMENT Fig.10

Par des formules diversement présentées, on a souvent cherché à permettre le calcul de la résistance d'un béton en fonction du rapport C/E. Et effet, ce facteur est celui qui présente vis-à-vis de la résistance la plus forte corrélation.

Sur la figure 10 nous avons tracé les courbes σ_{28} f (C/E) pour les deux types de conservations et retracé la droite obtenue par DREUX à l'aide de la formule qu'il a proposé

$$\sigma_{28} = 0,47 \sigma_c (C/E - 0,5)$$

Nous retenons cette formule pour la conservation à l'air par contre, nous proposons la suivante pour les bétons conservés à l'eau.

$$\sigma_{28} = 0,47 \sigma_c (C/E - 0,3) -$$

c étant la classe vraie du ciment dont nous avons de l'influence sur la résistance.

C O N C L U S I O N

De l'ensemble de cette étude nous pouvons tiré les conclusions suivantes :

- sur les agrégats :

Nous avons trouvé généralement des vitesses et des modules élevés pour nos bétons, ceci nous avait un peu étonnés . L'explication que nous avons donné est la suivante :

Nous avons fait tailler un bloc dans la roche de nos agrégats (par les Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics) et nous avons mesuré la vitesse du son dans ce bloc. Nous trouvons une vitesse de 6.900 m/s, ce qui nous donne un module calculé à l'aide de la formule $E_d = 4,5 V^3 10^{-6}$ sensiblement égal à 1.500.000 kg/cm², ce qui est un module très élevé.

Or nous savons que le module d'un béton est une fonction des modules de ces constituants . La formule suivante fût proposée par l'HERMITE (essais et mesures n° 16) page 17:

$$E = E_{gr} \times g + E_{mo} (1 - g),$$

où

E_{gr} représente le module des gravillons;

E_{mo} " " du mortier;

g " le volume absolu des gravillons.

Le module ainsi calculé devrait être affecté d'un coefficient de réduction qui tient compte des vides en considérant ces derniers comme un composant du mélange dont le module est nul, c'est à dire un coefficient égal à :

$$\frac{\text{module calculé}}{\text{module réel}} = \text{pourcentage de plein du béton.}$$

./.

Nous avons effectué ce calcul très approximatif qui suit en application de la présente formule :

- volume de nos graviers
0,134 + 0,199 = 0,443
- pourcentage de plein de béton
0,858

(voir tableau de la composition du béton)

Nous prenons pour le module du mortier que nous n'avons malheureusement pas déterminé, la valeur de 200.000. Cela en nous référant à l'étude faite par l'HERMITE sur trois mortiers. Dans cette étude, il trouve les valeurs suivantes:

206.000 - 204.000 - 190.000 kg/cm²

on a alors :

$$\begin{aligned} E &= 1.500.000 \times 0,443 + 200.000 (1 - 0,443) \\ &= 664.500 + 111.400 \\ &= 775.900 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Compte tenu du coefficient de réduction apporté par les vides $E = 775.900 \times 0,858 = 665.000 \text{ kg/cm}^2$.

Cette valeur est assez proche de celle du module maximum que nous avons trouvé pour nos béton de deux mois $E_{EI4} = 610.000 \text{ kg/cm}^2$.

En résumé nous pouvons dire que les agrégats "JAUBERT" sont des agrégats de bonne qualité. Ils sont bon pour la confection des bétons type A.

- Sur la méthode d'auscultation dynamique

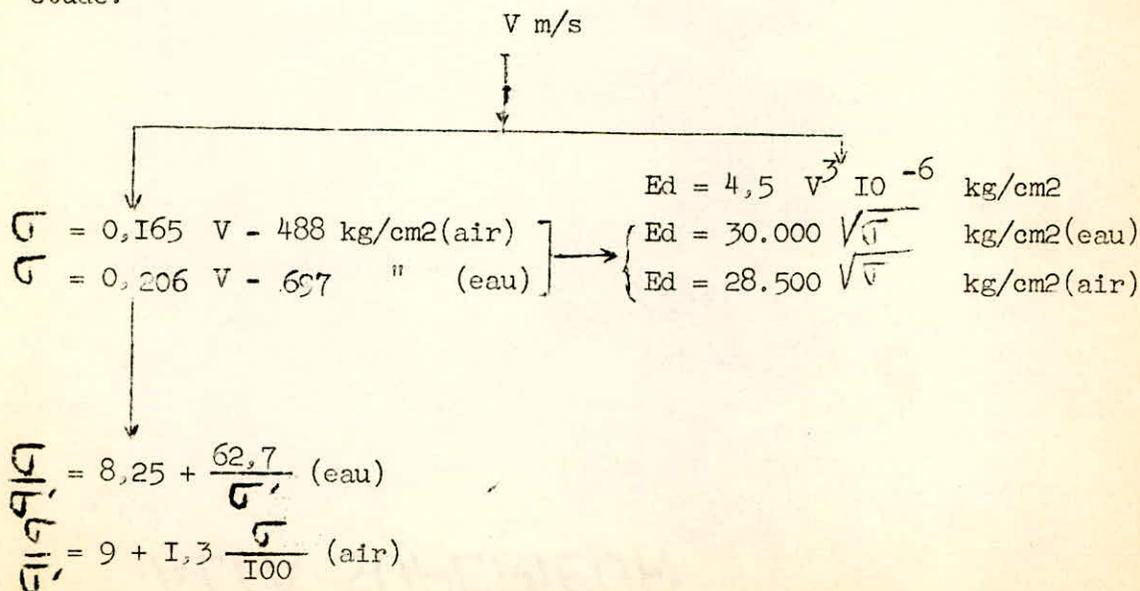
- Cette méthode non destructive présente un certain nombre de particularités intéressantes : au Laboratoire c'est un auxiliaire précieux un test très rapide qui nous permet de déterminer une qualité physique de la matière, une vitesse qui s'exprime en longueur et en temps ainsi que le module d'élasticité qui s'exprime en force et en longueur, ces qualités physiques étant liées au modification des propriétés de la matière. ./.

Il est maintenant possible grâce à cette méthode de :

- mesurer l'évolution du module d'un éprouvette au cours du temps.
- De calculer le module du béton à partir de ses constituants.
- D'apprécier la qualité macanique telle que la résistance à la compression et la traction.

Sur le chantier la mesure du module en oeuvre permet, avec une très grande sensibilité de révéler les anomalies du béton mis en place, de déceler les fissures et les points faibles, de s'assurer de la bonne exécution des reprises de bétonnage, de mettre en évidence les défaillances plus ou moins locales sur les ouvrages qui pourraient présenter des troubles, même si ces faiblesses de qualité du béton se localisent à l'intérieur de la masse des ouvrages, l'aspect extérieur ne révélant pas le mal.

Le schéma pourrait être le résumé des résultats de cette étude:



Je ne saurais terminer sans adresser mes sincères remerciements à tous ceux qui m'ont aidé dans l'application de cette tâche.

Je tiens à remercier particulièrement :

- Monsieur DELAGE Professeur à l' E.N.P.A. pour m'avoir suivi et instruit par les explications qu'il n'a jamais hésité de me donner tout au long de cette étude.

Tous les membres des Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics d'Algérie :

- Monsieur NADEAU - Directeur
- Monsieur BETOUX - Ingénieur section Matériaux
- Monsieur BOUZIANE - Asistant section Matériaux
- Mme ZATOUT - Secrétaire

-----oooOooo -----

