

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

Etablissement reconnu par application de l'arrêté-loi du 30-1-1947.

Siège social : 5, rue de la Violette, Bruxelles 1.

Station expérimentale : Limelette.



CONTROLE DE LA QUALITE DU BETON EN LABORATOIRE ET SUR CHANTIER

F. CAMPUS

Professeur à l'Université
de Liège.

R. DUTRON

Directeur Général du Laboratoire
d'Essais et de Contrôle des
Groupements de Producteurs
de Ciment de Belgique.

A. COUNE

Ingénieur au Centre
Scientifique et Technique
de la Construction.

Ce rapport de recherches constitue le compte rendu des résultats d'une
étude effectuée en collaboration avec le

Centre national de Recherches scientifiques et techniques
pour l'Industrie cimentière (C.R.I.C.)

Etablissement reconnu par application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947

127, avenue Adolphe Buyl, Bruxelles 5

CONTROLE DE LA QUALITE DU BETON EN LABORATOIRE ET SUR CHANTIER

F. CAMPUS

Professeur à l'Université
de Liège.

R. DUTRON

Directeur Général du Laboratoire
d'Essais et de Contrôle des
Groupements de Producteurs
de Ciment de Belgique.

A. COUNE

Ingénieur au Centre
Scientifique et Technique
de la Construction.

SOMMAIRE

Chapitre I - Description des essais	5
1.1 Objet de la recherche	5
1.2 Programme des essais	5
1.21 Essais en laboratoire	5
1.22 Essais sur chantier	6
Chapitre II - Résultats des essais	7
2.1 Résistance des cubes et des cylindres	7
2.11 Essais en laboratoire	7
2.12 Essais sur chantier	7
2.13 Conclusion	7
2.2 Relation entre les résistances sur cubes et sur cylindres moulés	7
2.21 Essais en laboratoire	7
2.22 Essais sur chantier	9
2.23 Conclusion	10
2.3 Résultats des essais sur carottes	11
2.31 Essais en laboratoire	11
2.32 Essais sur chantier	11
2.33 Conclusion	11
2.4 Essais au scléromètre	11
2.41 Essais en laboratoire	12
2.42 Essais sur chantier	15
2.43 Conclusion	15
2.5 Essais aux ultra-sons	15
2.51 Essais en laboratoire	15
2.52 Essais sur chantier	16
2.53 Conclusion	16
2.6 Autres essais non-destructifs	19
2.61 Essais de mise en résonance de prismes	19
2.62 Mesure de la vitesse de propagation du son par percussion	20
Chapitre III - Résumé et conclusions	21

Chapitre I - Description des essais

1.1 OBJET DE LA RECHERCHE

A la suite de l'enquête internationale entreprise par M. Campus sous les auspices de la RILEM, il a paru utile de procéder en Belgique à une recherche systématique en laboratoire et sur chantier, visant à déterminer la relation entre la résistance mesurée sur cubes moulés de 20 cm de côté, ainsi qu'il est d'usage en Belgique comme d'ailleurs dans bien d'autres pays, et la résistance mesurée sur cylindres moulés de 15 cm de diamètre sur 30 cm de hauteur, suivant les recommandations du Comité Européen du Béton.

A côté de cet objectif essentiel, l'étude a encore porté sur les points suivants :

- comparaison des résistances obtenues d'une part sur carottes prélevées dans la masse de l'ouvrage et d'autre part sur cubes moulés
- mesure de la confiance qu'on peut accorder aux essais non-destructifs de détermination de la qualité du béton (scléromètre, mise en résonance d'éprouvettes prismatiques, mesure de la vitesse de propagation d'ondes sonores et ultra-sonores).

La recherche a été exécutée sous les auspices du Centre National de Recherches Scientifiques et Techniques pour l'Industrie Cimentière (C.R.I.C.) pour la partie laboratoire, et du Centre scientifique et technique de la Construction (C.S.T.C.) pour la partie chantier, à l'initiative du Centre National de Recherches des Constructions Civiles (C.N.R.C.C.)

Les laboratoires ayant participé au programme sont :

- Laboratoire du Centre National de Recherches Scientifiques et Techniques pour l'Industrie Cimentière (Directeur : M. P. Dutron)
- Laboratoire Magnel de Béton Armé de l'Université de Gand (Directeur : M. le Professeur F. Riessauw)
- Laboratoire des Constructions du Génie Civil de l'Université de Liège (Directeur : M. le Professeur F. Campus)
- Laboratoire d'Essais des Matériaux de l'Université Catholique de Louvain (Directeur : M. le Professeur G. Reyntjens)
- Office de Contrôle et de Recherches Expérimentales concernant l'Art de Construire (Chef de Service : M. F. Decelle).

1.2 PROGRAMME DES ESSAIS

1.21 Essais en laboratoire

Les essais sont effectués sur 12 compositions de béton faisant intervenir :

- 3 dosages en ciment (200, 300 et 400 kg/m³)
- 2 fluidités (flow théorique mesuré à la table à secousses : 1,3 et 1,8)
- 2 gros granulats (gravier roulé et porphyre concassé).

Ces 12 compositions de béton ont été réalisées simultanément dans les 5 principaux laboratoires belges de béton, cités ci-avant.

Caractéristiques des matériaux

Le ciment utilisé pour les essais (Portland normal) provenait d'une même fourniture pour les 5 laboratoires. Les autres matériaux étaient approvisionnés pour chacun des laboratoires séparément.

Le sable était du sable de rivière 0/2 mm.

Le gravier était du gravier de rivière 4/32 mm.

Le porphyre était du concassé 8/22 mm.

Nombre d'éprouvettes

- par composition et par âge : 12 cubes et 12 cylindres dans chaque laboratoire.
- par composition : une dalle d'où sont extraites à 28 jours 6 carottes de 100 cm² de section sur 10 cm de hauteur.

Nature et âge des essais

- essai d'écrasement à 3, 7 et 28 jours : sur cubes et cylindres moulés
- essai d'écrasement à 28 jours : sur carottes prélevées dans la dalle
- essai au scléromètre à 3, 7 et 28 jours : sur cubes moulés
- essai aux ultra-sons à 3, 7 et 28 jours : sur cubes et cylindres moulés
- essai de mise en résonance à 28 jours : sur prismes prélevés par sciage dans la dalle
- mesure de la vitesse de propagation du son par percussion à 28 jours sur la dalle.

Les essais non-destructifs n'ont été exécutés que sur les mélanges à base de porphyre.

Conditions d'exécution des essais

Les moules utilisés étaient soit des moules en fonte à faces rabotées (moules cubiques), soit des moules métalliques usinés. Tous les moules étaient en parfait état.

La conservation des cubes et cylindres moulés et des dalles s'est faite, dès leur démoulage à 24 heures, sous eau à une température de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à l'âge des essais.

Les cubes étaient écrasés entre faces de moulage et ne subissaient aucune préparation avant l'essai.

Les cylindres étaient écrasés entre leurs bases. La face supérieure des cylindres était rectifiée à la meule diamantée.

Dans chaque laboratoire ont été écrasés 432 cubes et 432 cylindres. Au total, il y a eu 2.160 cubes et 2.160 cylindres soumis aux essais.

1.22 Essais sur chantier

Les essais ont été exécutés sur 18 chantiers d'importance variable. Sur chaque chantier on a prélevé 4 séries de 12 cubes et 12 cylindres. Les séries se différencient :

- par leur âge d'essai : 7 et 28 jours
- par leur conservation après démoulage à 24 h : soit sous sable humide soit dans les mêmes conditions que l'ouvrage.

De plus, à 28 jours d'âge, 3 carottes ont été prélevées dans la partie d'ouvrage confectionnée avec les mêmes gâchées que les cubes et les cylindres.

Le nombre total d'éprouvettes confectionnées sur chantiers est de 864 cubes et 864 cylindres.

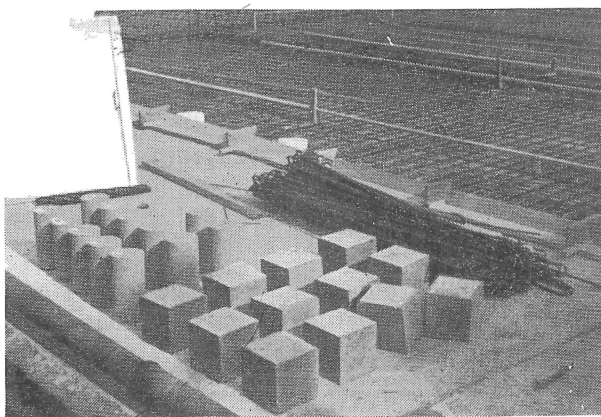


Fig. 1 — Cubes et cylindres de béton conservés sur chantier dans les conditions de l'ouvrage

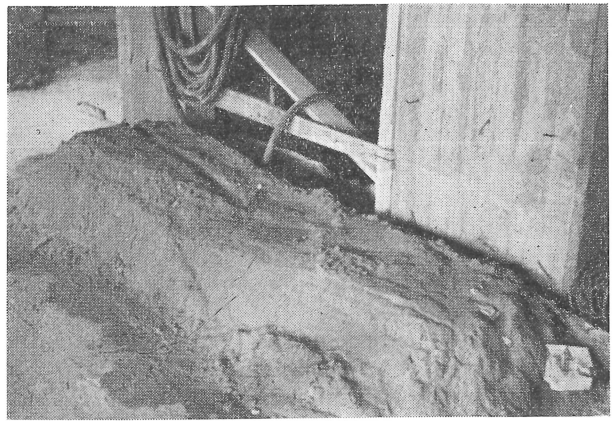


Fig. 2 — Cubes et cylindres de béton conservés sur chantier sous sable humide à l'abri des intempéries

Caractéristiques des matériaux

Le béton utilisé pour les essais était celui employé sur le chantier :

ciment : nature : Portland, haut fourneau, sur-sulfaté, de différentes classes de qualité (normal, haute résistance, durcissement rapide)

dosage : varie de 285 à 450 kg/m^3

sable : en général sable de rivière 0/2 mm

gros granulat : gravier roulé 4/32 mm (14 chantiers) et porphyre concassé 8/22 mm (4 chantiers).

Les mesures d'affaissement du béton au cône d'Abrams donnaient des slump variant de 0 à 13 cm.

Le serrage du béton des éprouvettes s'est effectué le plus souvent à l'aiguille vibrante. Parfois, il a eu lieu à la table vibrante ou par damage à la main.

Nature et âge des essais

- essai d'écrasement à 7 et 28 jours sur éprouvettes moulées
- essai d'écrasement à 28 jours sur carottes
- essai au scléromètre : à 7 et 28 jours sur cubes moulés à 7 et 28 jours sur l'ouvrage
- essai aux ultra-sons : à 7 et 28 jours sur cubes et cylindres moulés
- mesure de vitesse de propagation du son par percussion à 7 et 28 jours sur l'ouvrage.

L'ensemble de ces essais a été exécuté par un seul laboratoire.

Chapitre II - Résultats des essais

2.1 RESISTANCE DES CUBES ET DES CYLINDRES

2.11 Essais en laboratoire

Les compositions de béton ont été choisies de manière à obtenir une gamme de résistances aussi vaste que possible.

Compte tenu du choix des compositions et du facteur âge :

- la résistance des cubes moulés (σ'_{cub}) a varié de 70 à 600 kg/cm²
- la résistance des cylindres moulés (σ'_{cyl}) a varié de 50 à 500 kg/cm².

La dispersion des résultats à l'intérieur d'un laboratoire a été déterminée pour des séries de 12 cubes ou 12 cylindres provenant de la même composition de béton et écrasés à un même âge.

La dispersion est donnée par le coefficient de variation (rapport entre l'écart-type et la résistance moyenne exprimé en %).

En moyenne on a trouvé les valeurs suivantes :

- 4,7 % pour les cubes
- 5,6 % pour les cylindres.

La dispersion des résultats obtenus dans les 5 laboratoires réunis, pour une composition et à un âge donnés, est la suivante :

- coefficient de variation : 8,5 % pour les cubes
- coefficient de variation : 9,6 % pour les cylindres.

Ces valeurs sont faibles et montrent la bonne concordance entre les bétons préparés dans des laboratoires différents, compte tenu de ce que les granulats utilisés dans chaque laboratoire provenaient d'approvisionnements différents.

2.12 Essais sur chantier

Compte tenu du facteur « âge » (7 et 28 jours) et de la diversité des chantiers :

- la résistance des cubes moulés (σ'_{cub}) a varié de 80 à 750 kg/cm²
- la résistance des cylindres moulés (σ'_{cyl}) a varié de 60 à 700 kg/cm².

Les moyennes des coefficients de variation des résultats d'essais calculés par chantier, pour un âge et un mode de conservation donnés (séries de 12 éprouvettes), sont :

- 6,0 % pour les cubes
- 7,1 % pour les cylindres.

Les cubes et les cylindres d'une série ont tous été confectionnés avec une même gâchée ou avec deux gâchées successives.

2.13 Conclusion

On remarque aussi bien en laboratoire que sur chantier que, tout en restant très satisfaisants, les coefficients de variation des cylindres sont légèrement supérieurs à ceux des cubes. Cette différence est systématique : elle se marque dans tous les laboratoires et sur presque tous les chantiers.

2.2 RELATION ENTRE LES RESISTANCES SUR CUBES ET SUR CYLINDRES MOULES

2.21 Essais en laboratoire

L'étude statistique a montré que seul le facteur « **teneur en ciment** » avait une influence significative sur le rapport $\sigma'_{\text{cyl}}/\sigma'_{\text{cub}}$; on a donc déterminé la corrélation entre les deux variables σ'_{cub} et σ'_{cyl} , d'une part pour l'ensemble de toutes les compositions et d'autre part pour chacune des teneurs en ciment. Les résultats sont donnés au tableau I dont les formules sont représentées à la figure 3.

Tableau I - Corrélation entre σ'_{cub} et σ'_{cyl} . Formules générales

	Coefficient de corrélation	Droite de régression	Intervalle de confiance du seuil de 10 %
Ensemble des mélanges	0,987	$\sigma'_{cyl} = 0,852\sigma'_{cub} - 6,451$	$\pm 33,5 \text{ kg/cm}^2$
Mélanges à 400 kg ciment/m ³	0,972	$\sigma'_{cyl} = 0,825\sigma'_{cub} + 11,538$	$\pm 43,0 \text{ kg/cm}^2$
Mélanges à 300 kg ciment/m ³	0,977	$\sigma'_{cyl} = 0,812\sigma'_{cub} - 0,575$	$\pm 33,0 \text{ kg/cm}^2$
Mélanges à 200 kg ciment/m ³	0,983	$\sigma'_{cyl} = 0,807\sigma'_{cub} - 2,254$	$\pm 14,0 \text{ kg/cm}^2$

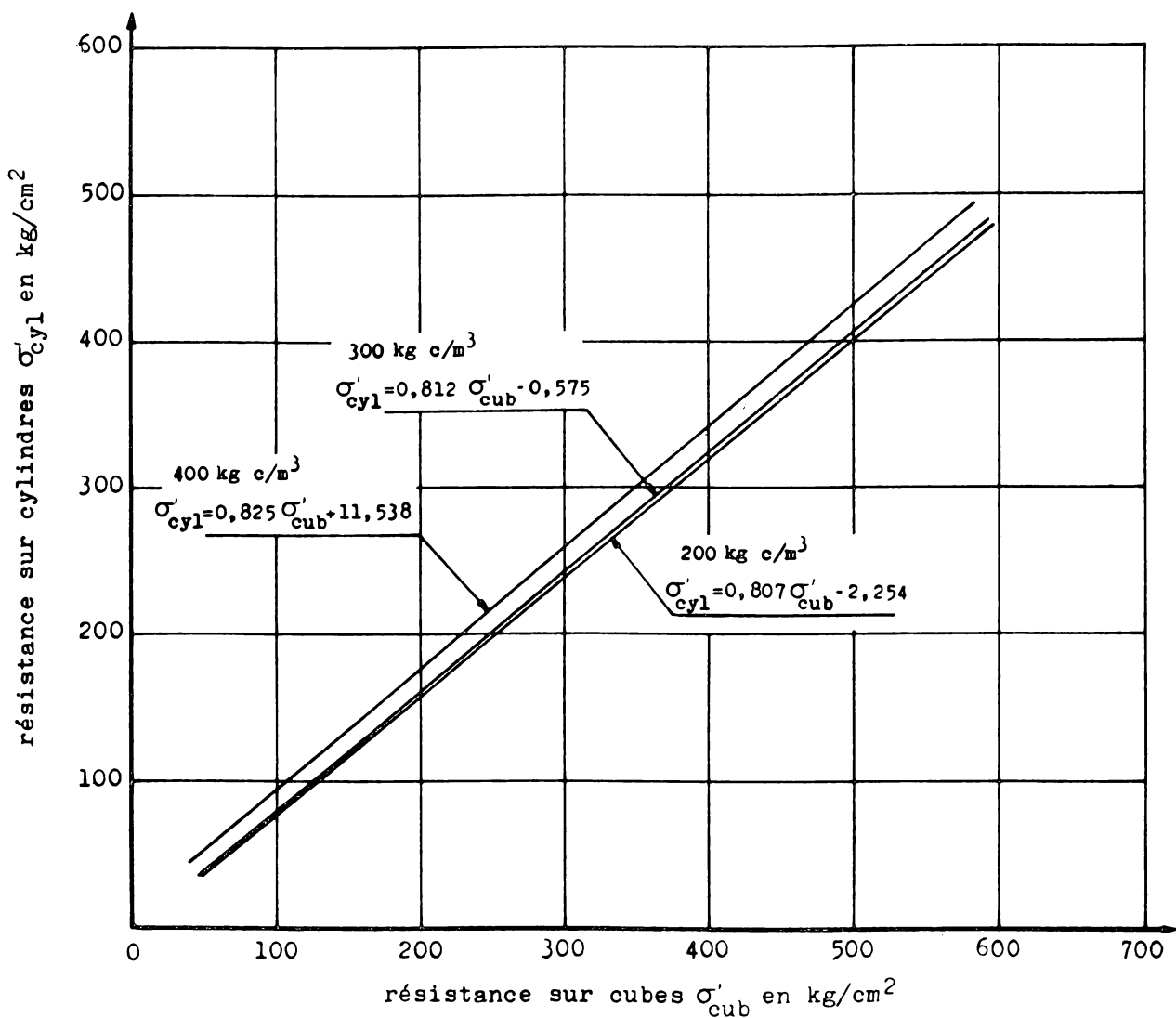


Fig. 3 — Corrélation entre σ'_{cub} et σ'_{cyl} . Essais en laboratoire

Les droites de régression passent virtuellement par l'origine (leur intervalle de confiance comprend l'origine). Aussi a-t-on cherché parmi différentes droites passant par l'origine celle qui exprimait le mieux la corrélation entre σ'_{cub} et σ'_{cyl} . Les meilleures corrélations sont obtenues, d'une part pour la droite passant par l'origine et le barycentre des mesures d'autre part pour la droite issue de

l'origine déterminée par la méthode des moindres carrés. Les équations de ces droites sont données au tableau II.

La dernière colonne de ce tableau contient les coefficients approchés, qui peuvent être adoptés en pratique sans risque d'erreur accru.

Tableau II - Corrélation entre σ'_{cub} et σ'_{cyl} . Formules simplifiées

	Droite passant par l'origine et le barycentre des mesures	Droite des moindres carrés issue de l'origine	Formules approchées
Ensemble des mélanges	$\sigma'_{cyl} = 0,828 \sigma'_{cub}$	$\sigma'_{cyl} = 0,833 \sigma'_{cub}$	$\sigma'_{cyl} = 0,83 \sigma'_{cub}$
Mélanges à 400 kg ciment/m ³	$\sigma'_{cyl} = 0,855 \sigma'_{cub}$	$\sigma'_{cyl} = 0,852 \sigma'_{cub}$	$\sigma'_{cyl} = 0,85 \sigma'_{cub}$
Mélanges à 300 kg ciment/m ³	$\sigma'_{cyl} = 0,810 \sigma'_{cub}$	$\sigma'_{cyl} = 0,810 \sigma'_{cub}$	$\sigma'_{cyl} = 0,81 \sigma'_{cub}$
Mélanges à 200 kg ciment/m ³	$\sigma'_{cyl} = 0,791 \sigma'_{cub}$	$\sigma'_{cyl} = 0,793 \sigma'_{cub}$	$\sigma'_{cyl} = 0,79 \sigma'_{cub}$

2.22 Essais sur chantier

La même étude que pour les essais en laboratoire a été faite sur l'ensemble des résultats des essais de chantier.

On a trouvé :

— coefficient de corrélation : 0,955

— droite de régression :

$$\sigma'_{cyl} = 0,873 \sigma'_{cub} - 6,892$$

— intervalle de confiance au seuil de 10 % :
 $\pm 50 \text{ kg/cm}^2$

— droite passant par l'origine et le barycentre :

$$\sigma'_{cyl} = 0,848 \sigma'_{cub}$$

— droite issue de l'origine par la méthode des moindres carrés :

$$\sigma'_{cyl} = 0,851 \sigma'_{cub}$$

— formule approchée :

$$\sigma'_{cyl} = 0,85 \sigma'_{cub}$$

Les résultats obtenus sur les chantiers sont représentés à la figure 4.

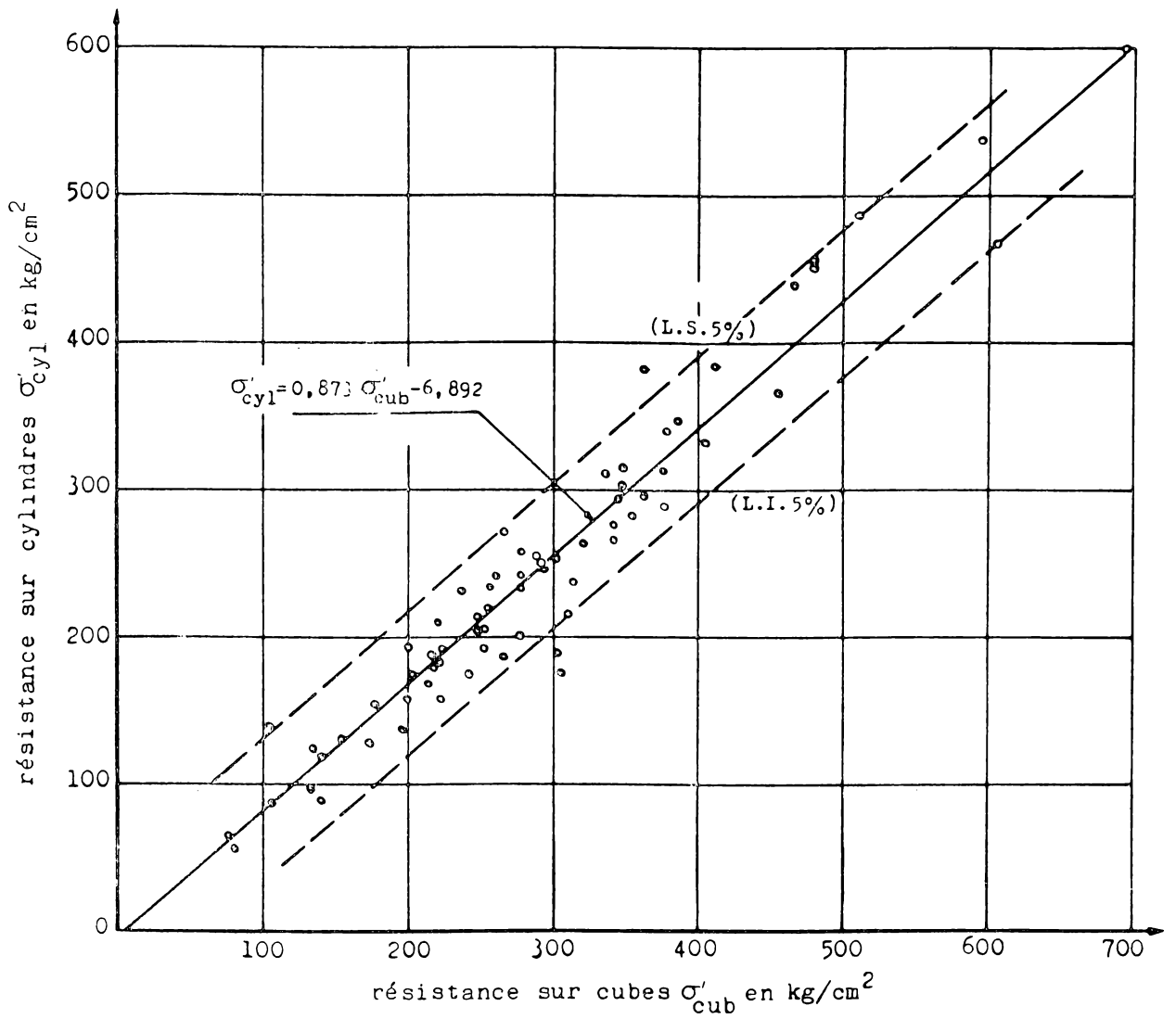


Fig. 4 — Corrélation entre σ'_{cub} et σ'_{cyl} . Essais sur chantier

2.23 Conclusion

Les valeurs obtenues sur chantier se rapprochent donc de celles trouvées en laboratoire pour les mélanges à 400 kg ciment/m³. En fait, les teneurs en ciment étaient égales ou supérieures à 350 kg

ciment/m³ sur 11 chantiers. Sur les 7 autres, la teneur en ciment variait de 285 à 330 kg/m³.

L'intervalle de confiance est plus important pour les essais de chantier (environ 50 kg/cm²) que pour ceux en laboratoire (environ 33 kg/cm²).

2.3 RESULTATS DES ESSAIS SUR CAROTTES

2.31 Essais en laboratoire

La résistance des carottes prélevées à 28 jours dans la masse d'une dalle de béton (σ'_{car}) a varié suivant les compositions de 200 à 700 kg/cm². Le coefficient de variation donnant la dispersion des essais à l'intérieur d'un même laboratoire était en moyenne de 4,1 %. La dispersion des essais entre les laboratoires était caractérisée par un coefficient de variation de 9,1 %.

Les deux variables : résistance sur cubes (σ'_{cub}) et résistance sur carottes (σ'_{car}) montrent une corrélation étroite :

— coefficient de corrélation : 0,962

— droite de régression :

$$\sigma'_{car} = 1,094 \sigma'_{cub} + 22,012$$

— intervalle de confiance au seuil de 10 % :

$$\pm 75 \text{ kg/cm}^2$$

A nouveau, la droite de régression passe virtuellement par l'origine. Les droites issues de l'origine ont pour équation :

— droite passant par le barycentre :

$$\sigma'_{car} = 1,151 \sigma'_{cub}$$

— droite déterminée par la méthode des moindres carrés :

$$\sigma'_{car} = 1,144 \sigma'_{cub}$$

— formule approchée :

$$\sigma'_{car} = 1,15 \sigma'_{cub}$$

2.32 Essais sur chantier

La résistance des carottes prélevées à 28 jours dans la masse des ouvrages a varié de 150 à 800 kg/cm². Etant donné le faible nombre de carottes prélevées dans chaque ouvrage, la dispersion n'a pas été calculée.

Les résistances mesurées sur carottes ont été comparées aux résistances des cubes moulés écrasés au même âge (28 jours) et conservés théoriquement dans les mêmes conditions que l'ouvrage.

La corrélation entre σ'_{cub} et σ'_{car} est beaucoup plus faible que pour les essais en laboratoire :

— coefficient de corrélation : 0,784

— droite de régression :

$$\sigma'_{car} = 1,052 \sigma'_{cub} + 75,46$$

— intervalle de confiance au seuil de 10 % :

$$\pm 145 \text{ kg/cm}^2$$

Les rapports $\sigma'_{car}/\sigma'_{cub}$ ont varié de 0,950 à 1,750.

La valeur de 0,950 étant unique sur un ensemble de 18 chantiers et la moyenne des rapports $\sigma'_{car}/\sigma'_{cub}$ étant de 1,29, on peut considérer que les carottes prélevées dans l'ouvrage donnent des résistances **au moins** égales à celles des cubes moulés.

2.33 Conclusion

Alors qu'en laboratoire la corrélation entre la résistance sur carottes et la résistance sur cubes moulés est très bonne, il n'en est pas de même pour les essais sur chantier. En laboratoire, les éprouvettes cubiques et les dalles étaient soumises au même mode de serrage (table vibrante) et à la même conservation (sous eau). Sur chantier, la dispersion obtenue s'explique par l'action d'un certain nombre de facteurs, entre autres :

— les dimensions de l'élément d'où sont extraites les carottes (effet de paroi)

— la différence entre le serrage du béton des éprouvettes et celui du béton de l'ouvrage

— la différence de conservation entre le béton des éprouvettes et celui de l'ouvrage, résultant de la durée de coffrage plus longue de l'ouvrage.

2.4 ESSAIS AU SCLEROMETRE

Les essais ont été faits avec des scléromètres Schmidt, modèle N, destinés au contrôle du béton dans les cas ordinaires de la construction de bâtiments et de ponts.

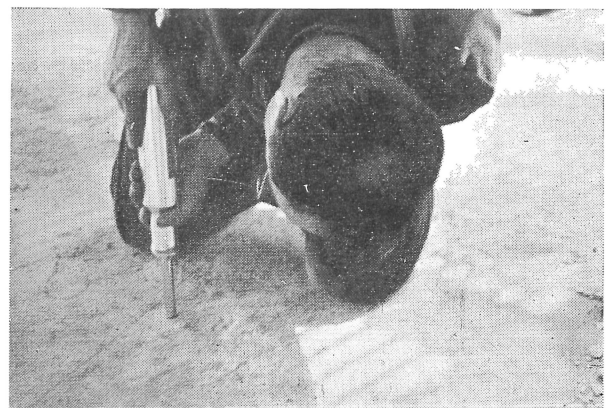


Fig. 5 — Essai au scléromètre sur ouvrage.

2.41 Essais en laboratoire

Les essais ont été faits dans les 5 laboratoires sur tous les cubes confectionnés avec les 6 mélanges à base de porphyre concassé. Chacun des laboratoires a utilisé son propre scléromètre pour tous les essais. Les cubes étaient placés entre les plateaux de la presse sous une charge de 2 t environ. Les essais se faisaient sur 2 faces opposées de moulage à raison de 16 mesures par face. La « dureté au choc » du béton est donnée par l'indice sclérométrique (I.S.) obtenu en faisant la moyenne des 32 lectures effectuées sur un cube.

Le cube était écrasé à la presse immédiatement après l'essai au scléromètre.

La corrélation entre la résistance sur cubes (σ'_{cub}) et l'indice sclérométrique (I.S.) pour l'ensemble des essais est donnée par les valeurs suivantes :

— coefficient de corrélation : 0,938

— droite de régression :

$$\sigma'_{\text{cub}} = 17,81 \text{ I.S.} - 171,65$$

— intervalle de confiance au seuil de 10 % :

$$\pm 152 \text{ kg/cm}^2$$

En vue de réduire cet intervalle de confiance, on a d'abord cherché les équations des droites de régression pour chacun des mélanges; les coefficients de corrélation variaient dans ce cas de 0,850 à 0,900 et les intervalles de confiance étaient de :

— 100 kg/cm² pour les mélanges à 400 kg ciment/m³

— 90 kg/cm² pour les mélanges à 300 kg ciment/m³

— 50 kg/cm² pour les mélanges à 200 kg ciment/m³

On a ensuite étudié la corrélation obtenue en groupant les résultats obtenus par chacun des 5 scléromètres séparément. Les résultats sont portés au tableau III qui montre une sensible amélioration de l'intervalle de confiance.

La figure 6 montre que ces droites de régression sont à peu près parallèles, ce qui permet de supposer que tous les scléromètres répondent de la même façon lors d'un essai, mais avec un décalage de lecture systématique.

La figure 7 montre la disposition des résultats obtenus avec le scléromètre A.

Tableau III - Corrélation entre σ'_{cub} et I.S. par scléromètre

Scléromètre	Coefficient de corrélation	Droite de régression	Intervalle de confiance au seuil de 10%
A	0,975	$\sigma'_{\text{cub}} = 20,02 \text{ I.S.} - 178,35$	$\pm 53 \text{ kg/cm}^2$
B	0,953	$\sigma'_{\text{cub}} = 19,52 \text{ I.S.} - 230,55$	$\pm 74 \text{ kg/cm}^2$
C	0,961	$\sigma'_{\text{cub}} = 17,19 \text{ I.S.} - 183,20$	$\pm 69 \text{ kg/cm}^2$
D	0,966	$\sigma'_{\text{cub}} = 17,57 \text{ I.S.} - 223,25$	$\pm 60 \text{ kg/cm}^2$
E	0,956	$\sigma'_{\text{cub}} = 18,76 \text{ I.S.} - 191,62$	$\pm 64 \text{ kg/cm}^2$

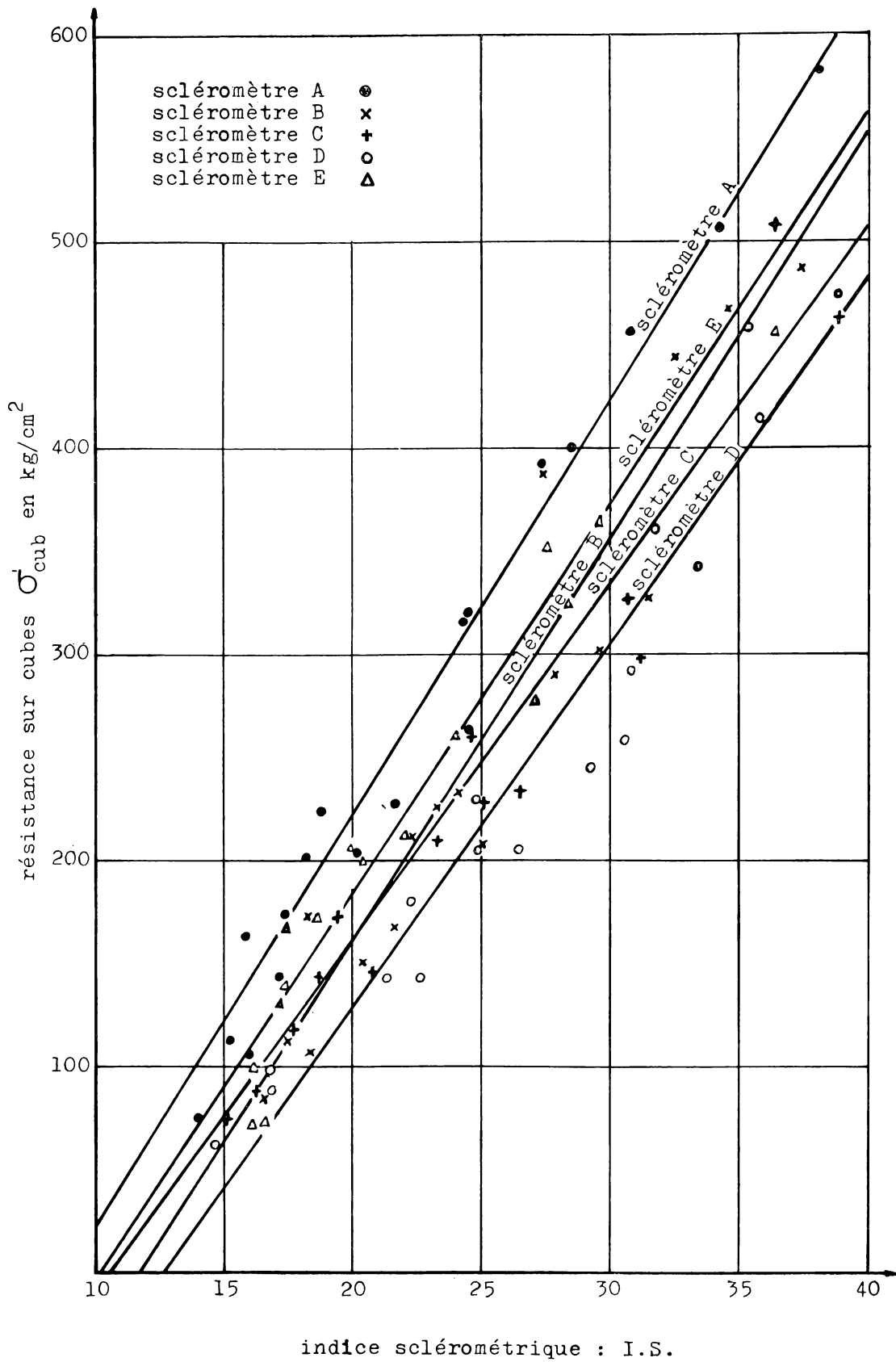


Fig. 6 — Essais au scléromètre sur cubes. Résultats moyens

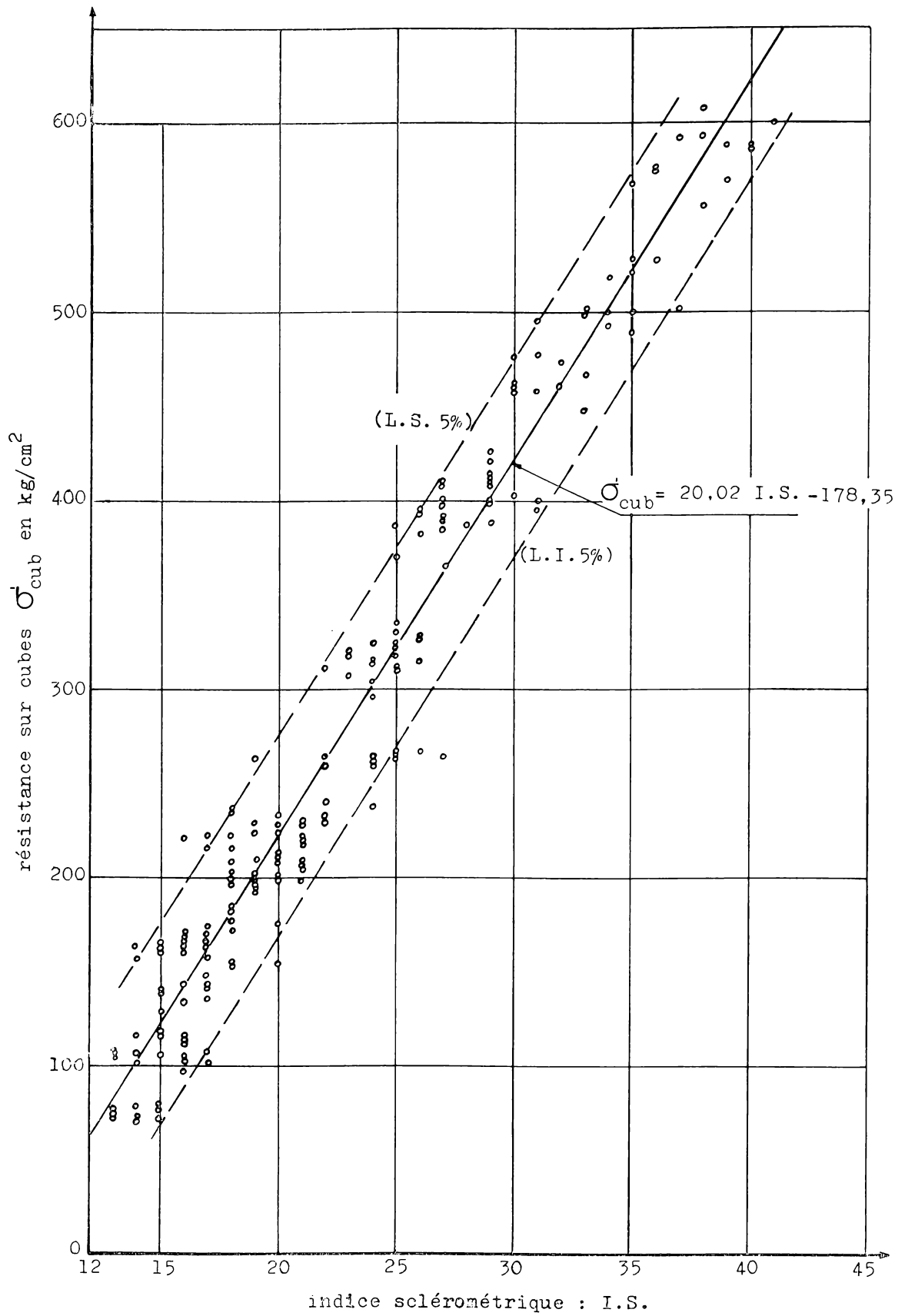


Fig. 7 — Essais au scléromètre sur cubes. Scléromètre A

2.42 Essais sur chantier

Essais sur cubes moulés

Des essais ont été faits suivant le même mode opératoire sur tous les cubes confectionnés sur chantiers. Les résultats obtenus sont très dispersés en raison du fait que tous les bétons étaient différents (ciments différents, granulats différents) et que les conditions de conservation étaient différentes. De plus, des raisons fortuites ont conduit à l'emploi de deux scléromètres. Les droites de régression trouvées en laboratoire n'étaient pas applicables aux essais réalisés sur les cubes de chantier.

Essais sur ouvrages

Les résultats des essais effectués directement sur les ouvrages ont montré la grande influence de l'état de surface du béton. Les essais sur des bétons rugueux ont donné en général des « duretés au choc » inférieures à celles mesurées sur cubes, alors que lorsque la surface est lisse, les duretés au choc sont supérieures à celles mesurées sur cubes.

2.43 Conclusion

Il s'ensuit des essais réalisés qu'une courbe d'étalonnage doit être déterminée pour chaque scléromètre et chaque type de béton. Dans ce cas seulement, il est possible de prédire la résistance du béton avec une précision donnée par un intervalle de confiance d'environ 60 kg/cm² dans le meilleur cas.

2.5 ESSAIS AUX ULTRA-SONS

La mesure de la vitesse de propagation des ultrasons à travers le béton a été faite à l'aide de l'appareil Cawkell.

2.51 Essais en laboratoire

Les essais ont été exécutés sur tous les cubes et les cylindres confectionnés avec le béton à base de porphyre. Pour les cubes, la vitesse des ultra-sons V_L a été mesurée entre faces de moulage suivant deux directions perpendiculaires; pour les cylindres elle a été mesurée entre les bases. Les mesures ont eu lieu immédiatement avant l'essai d'écrasement.

Une première constatation est que la forme de l'éprouvette, cube de 20 ou cylindre de 15 × 30, n'influence pas la vitesse de propagation des ultra-sons; il n'y a en effet pas de différence systématique entre les vitesses des ultra-sons mesurées sur l'un ou l'autre type d'éprouvette.

Pour l'ensemble des essais sur cubes, l'étude statistique, suivant une loi linéaire, a fourni les résultats suivants :

— coefficient de corrélation : 0,842

— droite de régression :

$$\sigma'_{\text{cub}} = 0,472 V_L - 1.866$$

— intervalle de confiance au seuil de 10 % :

$$\pm 130 \text{ kg/cm}^2$$

Les régressions effectuées par mélanges ont montré un faible coefficient de corrélation (0,750) pour les mélanges à 400 kg ciment/m³, tandis que pour les mélanges à 300 et à 200 kg ciment/m³, on obtenait respectivement 0,88 et 0,92.

En s'inspirant des formules avancées par différents auteurs, la régression a été recalculée suivant les formules ci-dessous :

$$\log \sigma'_{\text{cub}} = a + b \log V_L$$

$$\text{ou } \log \sigma'_{\text{cub}} = a + b V_L$$

Pour chacune des teneurs en ciment, les lois logarithmiques sont données au tableau IV.

Tableau IV - Corrélation entre $\log V_L$ et $\log \sigma'_{\text{cub}}$

	Coefficient de corrélation	Régression logarithmique
Mélanges à 400 kg ciment/m ³	0,801	$\log \sigma'_{\text{cub}} = 8,737 \log V_L - 29,50$
Mélanges à 300 kg ciment/m ³	0,950	$\log \sigma'_{\text{cub}} = 9,444 \log V_L - 32,17$
Mélanges à 200 kg ciment/m ³	0,969	$\log \sigma'_{\text{cub}} = 6,412 \log V_L - 21,17$

La loi linéaire générale et les différentes lois logarithmiques sont représentées à la figure 8.

Les lois semi-logarithmiques sont obtenues avec les mêmes coefficients de corrélation et se confondent sur la figure 8 avec les courbes logarithmiques.

On constate que la corrélation logarithmique ou semi-logarithmique est bonne pour les mélanges à 200 et 300 kg ciment/m³. Par contre, pour les mélanges à 400 kg ciment/m³, cette corrélation est nettement moins bonne. En effet, pour les vitesses du son élevées (supérieures à 4.800 m/sec) auxquelles correspondent des résistances élevées, les courbes ont une allure asymptotique et la dispersion en devient par conséquent très grande.

2.52 Essais sur chantier

Des mesures de la vitesse de propagation des ultra-sons ont été faites également sur tous les cubes et cylindres moulés confectionnés sur chantiers. Le processus d'essai était le même que pour les essais en laboratoire.

Les résultats des essais sont donnés à la figure 9.

On voit à nouveau que les points se disposent suivant une courbe exponentielle, la branche infinie de la courbe étant atteinte pour une vitesse de 4.600 m/sec environ. Pour des vitesses supérieures à 4.600 m/sec, la résistance du béton était supérieure à 375 kg/cm². Pour des valeurs in-

férieures, une corrélation linéaire satisfaisante a été obtenue :

— coefficient de corrélation : 0,833

— droite de régression :

$$\sigma'_{\text{cub}} = 0,260 V_L - 854$$

— intervalle de confiance au seuil de 10 % :
 $\pm 80 \text{ kg/cm}^2$

La dispersion plus élevée trouvée pour les essais de chantier doit être attribuée au fait des compositions et des conservations de béton différentes d'un chantier à l'autre. En laboratoire, tous les essais avaient été faits sur du béton à base de ciment Portland et de porphyre concassé et sur des éprouvettes conservées dans l'eau.

2.53 Conclusion

Il ressort des essais en laboratoire, que pour des bétons de qualité faible à moyenne ou très jeunes, un ajustement logarithmique ou semi-logarithmique assez bon peut être déterminé. Ceci permettrait de prédire très tôt après coulage la qualité d'un béton.

Par contre, pour des bétons de qualité élevée la dispersion des mesures est très grande et l'ajustement n'est plus possible. On peut cependant dire qu'à partir d'une certaine vitesse des ultra-sons, on est sûr d'avoir un béton de bonne qualité.

La précision des essais sur chantier serait nettement améliorée si on pouvait déterminer une courbe d'étalonnage pour chaque type de béton.

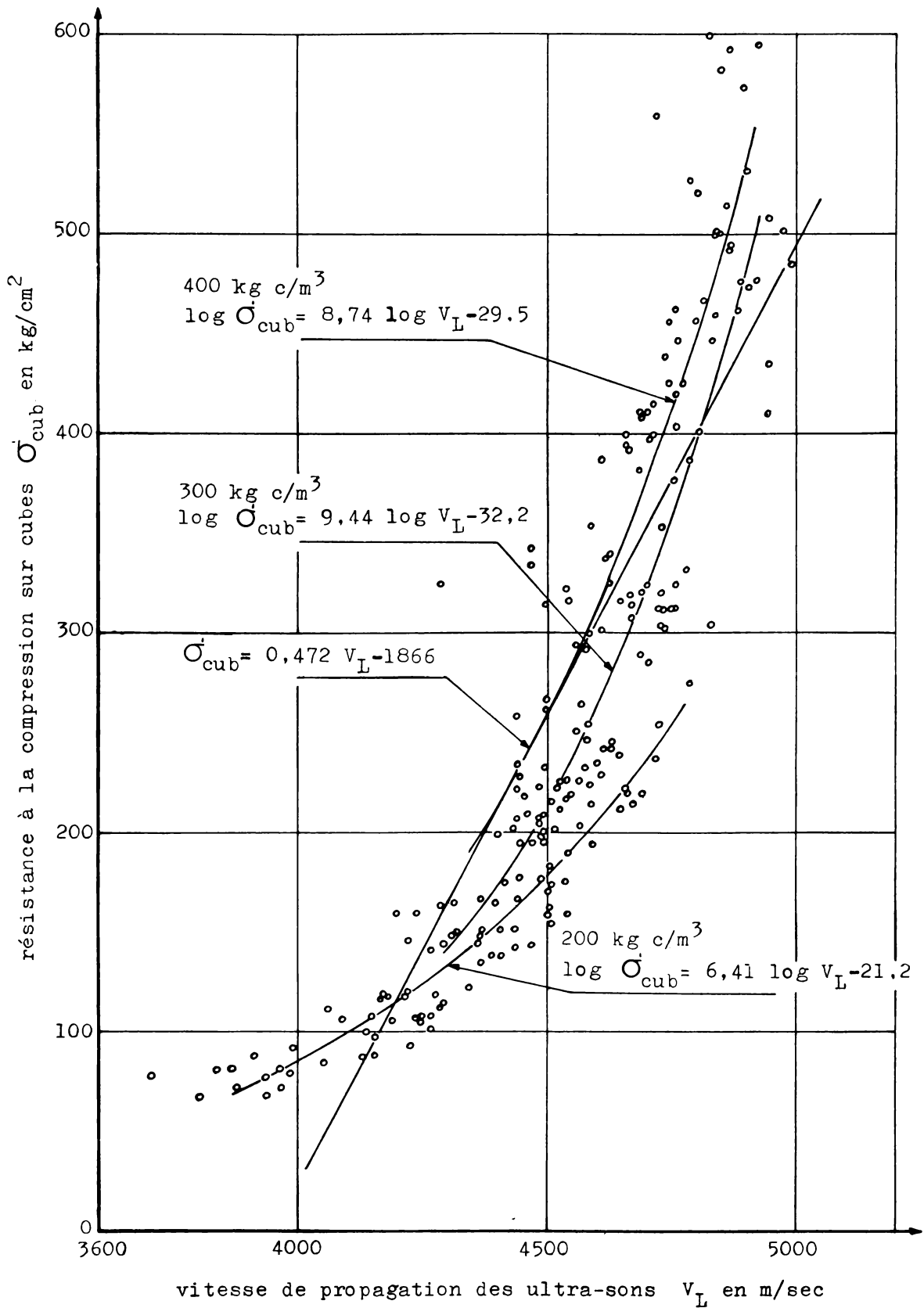


Fig. 8 — Corrélation entre σ'_{cub} et V_L (vitesse de propagation des ultra-sons). Essais en laboratoire

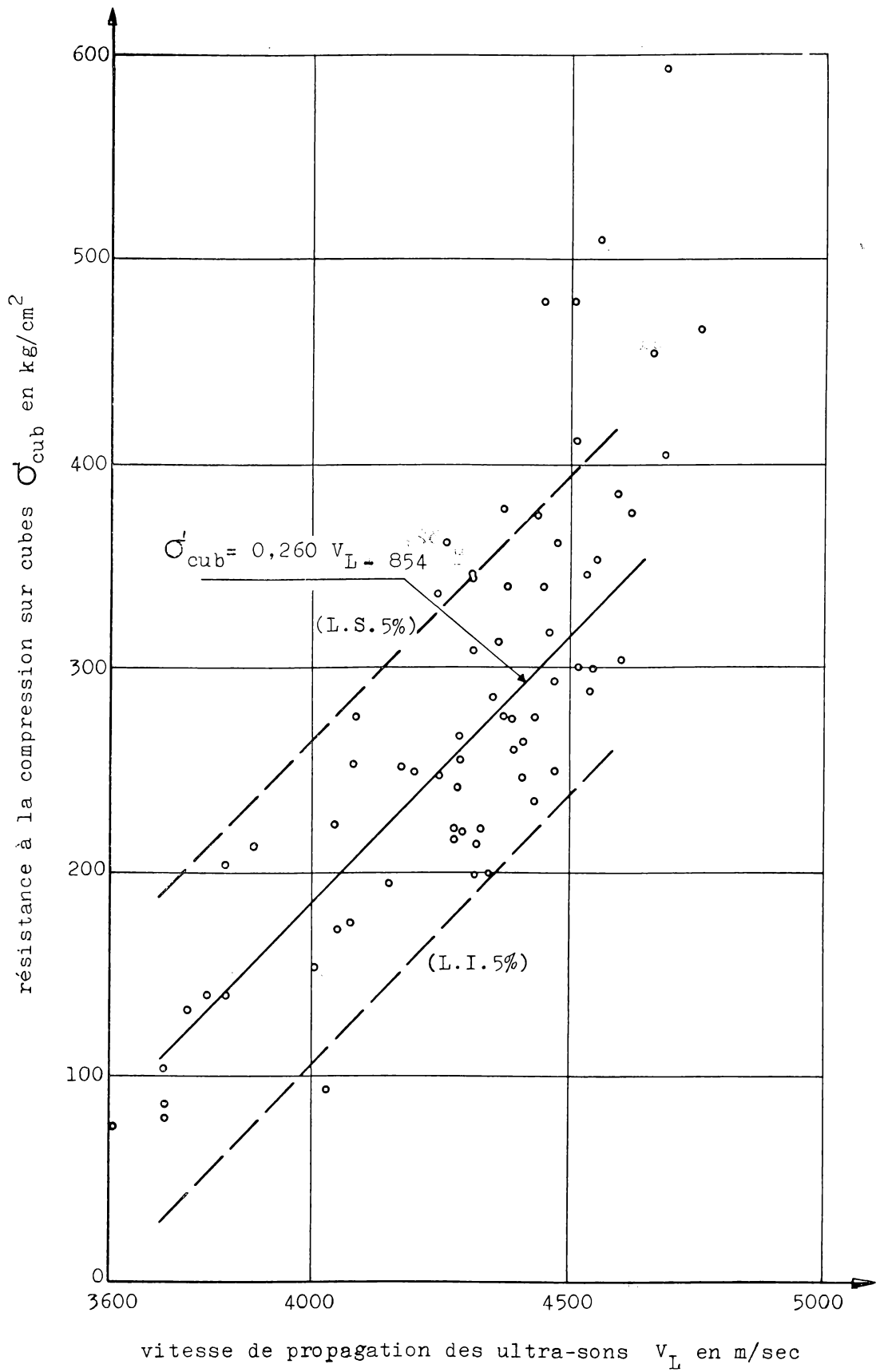


Fig. 9 — Corrélation entre σ'_{cub} et V_L (vitesse de propagation des ultra-sons). Essais sur chantier

2.6 AUTRES ESSAIS NON-DESTRUCTIFS

2.6.1 Essais de mise en résonance de prismes

Ces essais ont été faits en laboratoire sur des prismes découpés dans les dalles d'où ont été extraites les carottes. Les résultats des essais sont portés à la figure 10 dans un diagramme

où les résistances (σ'_{car}) sont portées suivant une échelle logarithmique. On remarque que les points, à l'exception de deux, s'alignent approximativement sur une droite. Il y correspondrait donc une loi semi-logarithmique. Cette loi n'a pas été calculée étant donné le faible nombre de mesures exécutées (18 mesures). Ce procédé n'a pas été utilisé sur chantier. Il semble en effet qu'il doive être réservé à des essais en laboratoire.

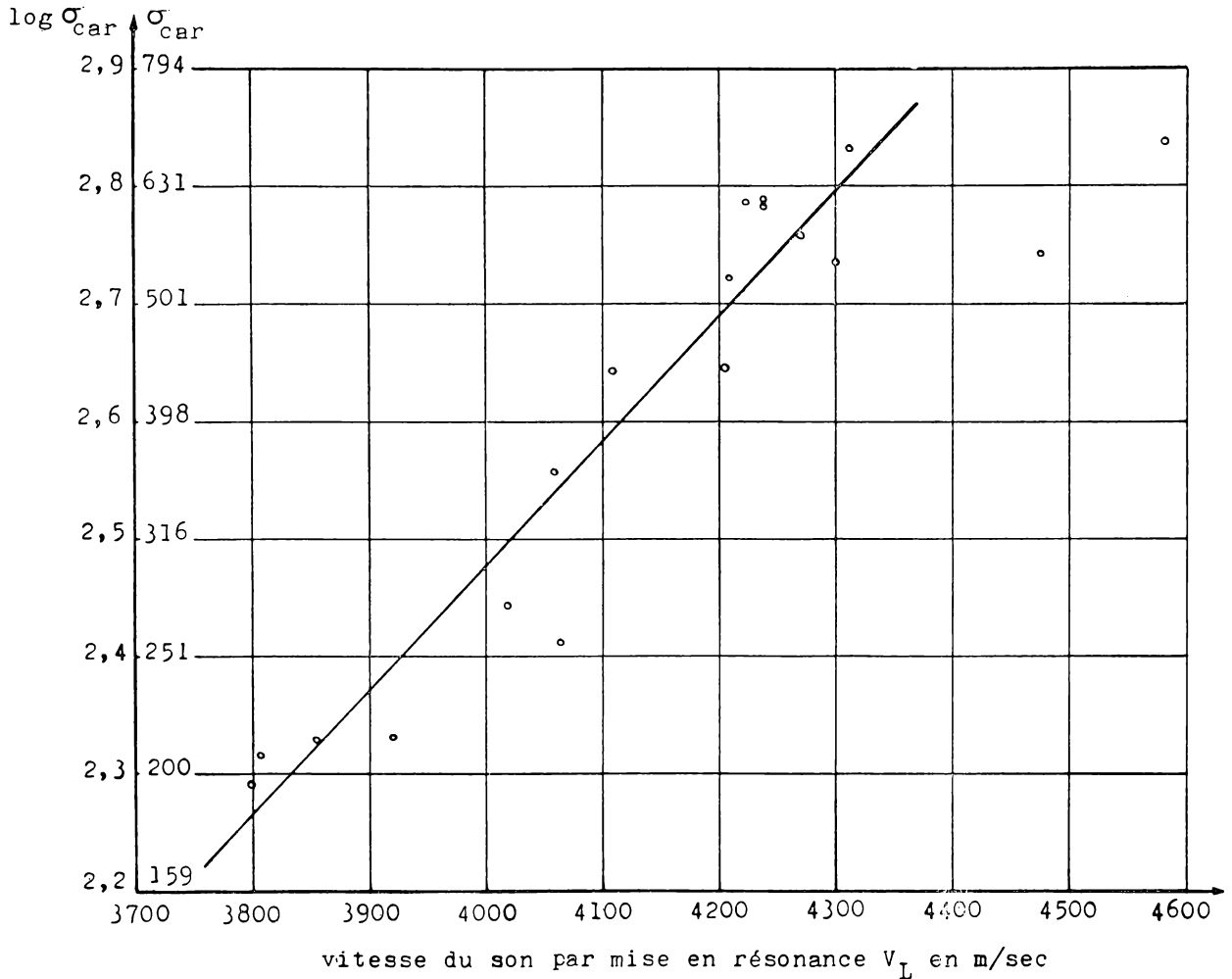


Fig. 10 — Corrélation entre σ'_{car} et V_L . Vitesse du son par mise en résonance

2.62 Mesure de la vitesse de propagation du son par percussion

En laboratoire les essais ont été faits avec deux appareils de type distinct :

- le premier : constitué de deux capteurs et d'un compteur électronique de temps. On détermine le temps de passage entre les deux compteurs d'une onde sonore provoquée par un coup de marteau appliqué au béton
- le second : constitué d'un marteau automatique frappant le béton à raison de 5 coups/sec, d'un capteur à magnétostriction et d'un oscillographe cathodique permettant de lire le temps de parcours des ondes sonores entre l'émetteur et le capteur (appareil du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux publics de Paris).

Les résultats obtenus avec les deux appareils du premier type montrent une bonne concordance, mais ne sont pas du tout comparables aux résultats obtenus avec l'autre type d'appareil,

Les essais de chantiers ont été exécutés directement sur les ouvrages avec l'appareil du second type. On a essayé de comparer les résistances réelles du béton déterminées à partir des essais sur carottes, aux résistances du béton déduites

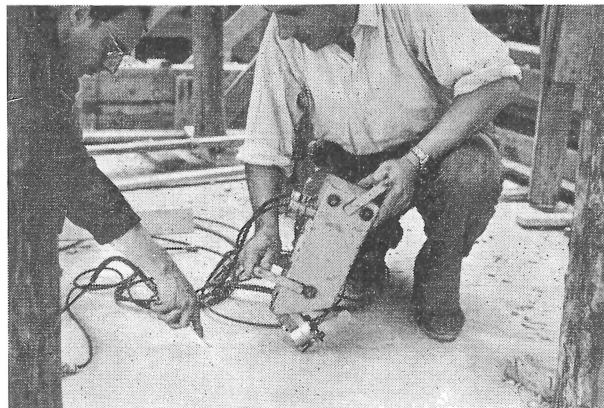


Fig. 11 — Mesure de la vitesse de propagation du son par percussion sur ouvrage

de la vitesse de propagation du son par les formules de transformation généralement admises. Il ne semble pas que l'erreur soit supérieure à celle commise en comparant les résistances réelles du béton de l'ouvrage à celles des cubes moulés conservés théoriquement dans les mêmes conditions que l'ouvrage.

Chapitre III - Résumé et conclusions

On a procédé en Belgique à une vaste recherche en vue de déterminer la relation entre la résistance du béton mesurée respectivement sur cubes moulés de 20 cm de côté et sur cylindres moulés de 15 cm \varnothing \times 30 cm.

A côté de cela on a cherché la relation existant entre la résistance des éprouvettes moulées et la résistance d'éprouvettes cylindriques de 100 cm² de section sur 10 cm de hauteur prélevées par carottage dans la masse du béton. On a de plus procédé sur le béton à diverses mesures non-destructives (scléromètre, mesure de la vitesse de propagation du son et des ultra-sons) en vue de connaître la confiance que l'on peut leur accorder.

Les essais ont eu lieu d'une part en laboratoire sur des bétons de compositions bien déterminées et dans des conditions d'exécution rigoureusement définies, d'autre part sur chantiers avec les compositions de béton et dans les conditions de travail propres à chacun d'eux.

Les résultats de la recherche ont fait apparaître les points suivants :

- la dispersion des essais sur cylindres est légèrement supérieure à celle des essais sur cubes
- le coefficient de passage entre les résistances mesurées sur cylindres et sur cubes dépend de la teneur en ciment du béton.

Les valeurs statistiques de ce coefficient résultant des essais de laboratoire sont :

0,85 pour le béton à 400 kg ciment/m³

0,81 pour le béton à 300 kg ciment/m³

0,79 pour le béton à 200 kg ciment/m³.

Pour l'ensemble des essais de laboratoire, la valeur statistique moyenne du coefficient est de 0,83.

Les essais effectués sur chantier ont donné un coefficient de passage moyen de 0,85 avec un intervalle de confiance au seuil de 10 % de 50 kg/cm²

$$\sigma'_{cyl} = 0,85 \sigma'_{cub} \pm 50 \text{ kg/cm}^2$$

- d'après les résultats des essais de laboratoire, la résistance sur carottes prélevées dans la masse du béton est égale à 1,15 \times la résistance sur cubes moulés avec un intervalle de confiance au seuil de 10 % de $\pm 75 \text{ kg/cm}^2$

$$\sigma'_{car} = 1,15 \sigma'_{cub} \pm 75 \text{ kg/cm}^2$$

Dans les conditions de chantier la relation est moins certaine, mais il est établi que la résistance sur carottes est au moins égale à celle déterminée sur cubes.

- le scléromètre donne des informations dignes de confiance si l'on a pris soin d'établir au préalable pour chaque scléromètre et chaque type de béton une courbe d'étalonnage
- la mesure de la vitesse de propagation des ultra-sons nécessite également la détermination d'une courbe d'étalonnage pour des bétons de résistance faible à moyenne. A partir d'une certaine vitesse des ultra-sons, on peut affirmer que la résistance du béton est supérieure à une certaine valeur limite.