

376061

SEPTEMBRE 1995

VOLUME THÉMATIQUE

Numéro 18

Influence de la mise en oeuvre du béton sur les caractéristiques du réseau de vides d'air

Ronald Blackburn
Laboratoire Sol et Béton Inc.

Dans une perspective d'optimisation de l'investissement des fonds publics, l'entreprise privée doit s'impliquer pour favoriser l'atteinte des objectifs poursuivis par la collectivité. Toute action conjointe dans le domaine de la recherche et du développement ne peut qu'entraîner une réduction des coûts de construction et d'entretien des infrastructures routières.

Dans le cadre du Programme d'aide à la recherche-développement en transport (PARDT), le Laboratoire Sol et Béton Inc. s'est associé financièrement à parts égales au ministère des Transports pour étudier l'influence de la mise en oeuvre du béton sur les caractéristiques du réseau de vides d'air. En effet, l'état actuel de plusieurs structures de béton appartenant au ministère des Transports, à de

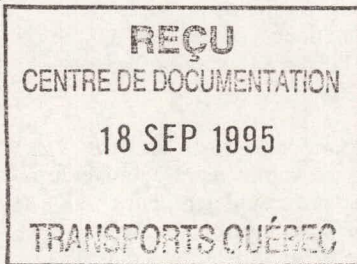
nombreuses municipalités du Québec et à d'autres propriétaires sont en bien piteux état.

Devant cette conjoncture, on peut se poser la question, dans l'état actuel des connaissances, à savoir pourquoi certaines structures de béton s'avèrent très détériorées, alors que d'autres sont encore en très bon état?

Les problèmes de détérioration du béton de ciment ont quelque peu été résorbés lors de la découverte fortuite de l'efficacité d'introduire de l'air entraîné dans le mélange de béton de ciment. À la suite de cette découverte, de nombreux chercheurs se sont mis au travail afin de développer de meilleurs produits entraîneurs d'air, de meilleures méthodes de contrôle et, surtout, de définir une méthode d'analyse du réseau de bulles d'air.

SOMMAIRE

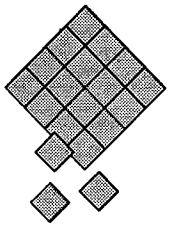
- 2 Introduction
- 3 Description du projet
- 5 Présentation des résultats
- 13 Conclusion



Ce bulletin est produit par le Service de la documentation et de l'information scientifique, Direction de la coordination de la recherche et de l'information en transport, Ministère des Transports du Québec
700, boul. René-Lévesque Est, 21^e étage
Québec (Québec) G1R 5H1
Tél. : (418) 643-6039
Fax : (418) 646-2343
Recherche et coordination :
Richard Pagé
Conception et édition électronique :
Carole Robitaille

Dépôt légal -
Bibliothèque nationale
du Québec, 1995
ISSN 1198-1113

CANQ
TR
248
V.18



Introduction

Le béton de ciment est un mélange bien réfléchi, composé de nombreux ingrédients dont les principaux sont : l'eau, le ciment, les agrégats et les adjuvants. L'eau hydrate, dans une proportion de 23 pour cent, les grains de ciment anhydres pour former les *gels de CSH*. Ces derniers procurent les caractéristiques mécaniques au béton de ciment tout en créant des vides, appelés *contractions Le Chatelier*. L'incorporation d'un adjuvant entraîneur d'air, quant à lui, induira des caractéristiques de durabilité au béton de ciment.

C'est au début des années 40 que l'on a utilisé, pour la première fois, de l'air entraîné dans le béton de ciment comme moyen de protection contre les effets très néfastes du gel. Aujourd'hui, tous les intervenants dans le domaine du béton reconnaissent le rôle indispensable de l'air entraîné dans le béton de ciment.

On sait maintenant que le volume d'air entraîné n'est pas suffisant pour obtenir un béton de ciment résistant. Le béton doit posséder un bon arrangement du réseau de bulles d'air.

La détérioration du béton est causée par le phénomène de déplacement de l'eau à l'intérieur de la pâte de ciment, ce qui crée des pressions élevées. Trois grandes théories de base ont été établies.

La première est celle des pressions hydrauliques (Powers, 1949). Elle propose que, lors du refroidissement du béton, une partie de l'*eau libre* se retrouvant dans les capillaires gèle. En gelant, cette eau augmente de neuf pour cent en volume et expulse à l'intérieur des capillaires l'eau encore liquide. Cette dernière eau, évacuée des capillaires, se retrouve donc dans la pâte de ciment adjacente, créant ainsi une pression hydraulique à l'intérieur de cette pâte.

En 1953, Powers s'est joint à Helmut pour énoncer une nouvelle théorie, dite des pressions osmotiques. L'observation d'un phénomène de retrait des pâtes de ciment soumises au gel mettait en doute la première théorie des pressions hydrauliques. Ainsi, l'*eau libre* dans les capillaires n'est évidemment pas pure; elle contient des concentrations plus ou moins importantes de diverses substances, dont principalement les alcalis (Na_2O et K_2O). Lors du refroidissement du béton et de la formation des premiers cristaux de glace, la concentration de l'eau non encore gelée dans le capillaire augmente. La glace étant composée d'eau pure, il reste donc moins d'eau liquide dans le capillaire pour une même quantité de substances dissoutes. Un réajustement osmotique s'impose donc, ce qui se traduit par une attraction de l'eau liquide des capillaires plus petits vers les plus gros.

La dernière théorie est celle de Litvan. Selon les recherches de ce dernier (1972 à 1981), l'*eau libre* contenue dans les capillaires ne peut pas geler, étant donné que les tensions superficielles qu'on y retrouve ne permettent pas aux cristaux de glace de se former selon un arrangement nécessaire à cette cristallisation. Se retrouve donc à l'intérieur des capillaires de l'eau surrefroidie, alors qu'au même moment, dans les bulles de grande dimension où se retrouve un peu d'eau, il y a formation de glace. La pression de l'eau surrefroidie étant supérieure à celle de la glace, l'*eau libre* tend donc à se déplacer à travers la pâte en direction de la glace.

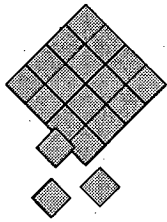
Peu importe laquelle de ces trois théories est la plus représentative de ce qui se passe vraiment, elles impliquent toutes trois un déplacement de l'*eau libre* à travers la pâte de ciment, créant des pressions dommageables pour le béton de

ciment. Il faut donc, à tout prix, diminuer ces pressions créées lors du déplacement de l'eau à l'intérieur de la pâte de ciment.

La façon de limiter ces déplacements de liquide est d'introduire dans la pâte de ciment le plus de bulles d'air possible, et ceci le plus près les unes des autres. De là l'intérêt d'un agent entraîneur d'air et d'une méthode de mesure du réseau de bulles d'air dans le béton durci. Il va de soi qu'il ne suffit pas d'introduire un certain pourcentage de bulles d'air dans le béton, mais qu'il faut s'assurer de la très bonne répartition de celles-ci. On doit donc faire intervenir les notions de facteur de déplacement moyen des bulles, de diamètre moyen des bulles, etc.

De nombreuses recherches ont été menées afin de vérifier l'influence de tel ou tel paramètre sur le réseau de bulles d'air. Les influences du type de ciment, du malaxage, du rapport e/c, de la température, du rabattage, des granulats, de l'affaissement et des adjuvants sont très bien documentées et relativement connues. Il en est tout autrement en ce qui concerne l'influence de la mise en place et du compactage sur le réseau d'air. Pourtant, tous les intervenants s'entendent pour dire qu'il s'agit de l'étape cruciale pour garantir la qualité, et surtout la durabilité du produit fini.

À la lumière de toutes les informations mentionnées, Laboratoire Sol et Béton Inc. a donc étudié plus précisément l'influence du temps de vibration, celles également de la fréquence utilisée, du pourcentage d'air initial contenu dans le béton frais et, enfin, de la proximité des coffrages sur le réseau de bulles d'air. Trois agents ont aussi été utilisés comme entraîneurs d'air différents. Il s'agit de ceux les plus fréquemment utilisés par les fournisseurs de béton de ciment de la région de Québec.



Description du projet

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
700, BOUL. RENÉ-LÉVESQUE EST,
21^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA
G1R 5H1

Étant donné que cette étude se veut la plus représentative possible des travaux exécutés sur les différents chantiers de construction, Laboratoire Sol et Béton Inc. a décidé d'opter pour le mélange suivant :

Tableau 1
Détails du mélange

Classe du béton	35 MPa
Agrégats maximum	20 mm
Affaissement	100 ± 10 mm
Volume d'air	4 ± 0,2 % et 8 ± 0,2 %

Les matériaux de base utilisés pour la confection du mélange de béton de ciment proviennent tous de la région de Québec. Chacun des composants a fait l'objet d'une série d'essais en laboratoire, afin de bien identifier les caractéristiques propres de ceux-ci. En voici le résumé :

Tableau 2
Caractéristiques physiques des composants

Eau	• Eau potable de service d'aqueduc
Ciment	• Ciment normal type 10, densité de 3,148 • C ₃ S : 52 % • C ₂ S : 20 % • C ₃ A : 6,6 % • C ₄ AF : 9,3 %
Gros granulats	• Calcaire concassé de la formation de Trenton • Calibre 20-5 mm, densité de 2,643 • Calibre 14-5 mm, densité de 2,638
Granulats fins	• Sable granitique, densité 2,690 • module de finesse 2,46

Les adjuvants utilisés consistent en un réducteur d'eau à base de lignosulfates et trois agents entraîneurs d'air : un détergent synthétique, un dérivé hydrocarboné et, finalement, une résine de Vinsol.

Avec le mélange de béton précédemment décrit, un bétonnage de 72 murets a été effectué, lesquels ont été mis en place avec des fréquences et des temps de vibration différents (voir le tableau 3). Une fois le mû-

risement achevé, trois échantillons dans chacun des murets ont été prélevés par carottage, soit un total de 216 carottes. Ces échantillons ont été prélevés perpendiculairement (horizontal) à l'axe de pénétration des vibrateurs (vertical) dans les murets. Pour chacune des 216 carottes, huit rondelles de béton ont été sciées et polies, soit un total de 1 728 surfaces polies.

Tableau 3
Caractéristiques des bétonnages

AFF: 100 ± 10 mm	Vibrateur 220 Hz	Vibrateur 170 Hz	Vibrateur 110 Hz
% d'air initial du béton à 4 ± 0,2 %			
Détergent synthétique	bétonnage 1 (4 murets)	bétonnage 2 (4 murets)	bétonnage 3 (4 murets)
Dérivé-hydrocarboné	bétonnage 4 (4 murets)	bétonnage 5 (4 murets)	bétonnage 6 (4 murets)
Résine de Vinsol	bétonnage 7 (4 murets)	bétonnage 8 (4 murets)	bétonnage 9 (4 murets)
% d'air initial du béton à 8 ± 0,2 %			
Détergent synthétique	bétonnage 10 (4 murets)	bétonnage 11 (4 murets)	bétonnage 12 (4 murets)
Dérivé-hydrocarboné	bétonnage 13 (4 murets)	bétonnage 14 (4 murets)	bétonnage 15 (4 murets)
Résine de Vinsol	bétonnage 16 (4 murets)	bétonnage 17 (4 murets)	bétonnage 18 (4 murets)
* Temps de vibration:	muret A: 0 seconde	muret B: 20 secondes	muret C: 40 secondes
	muret D: 60 secondes		

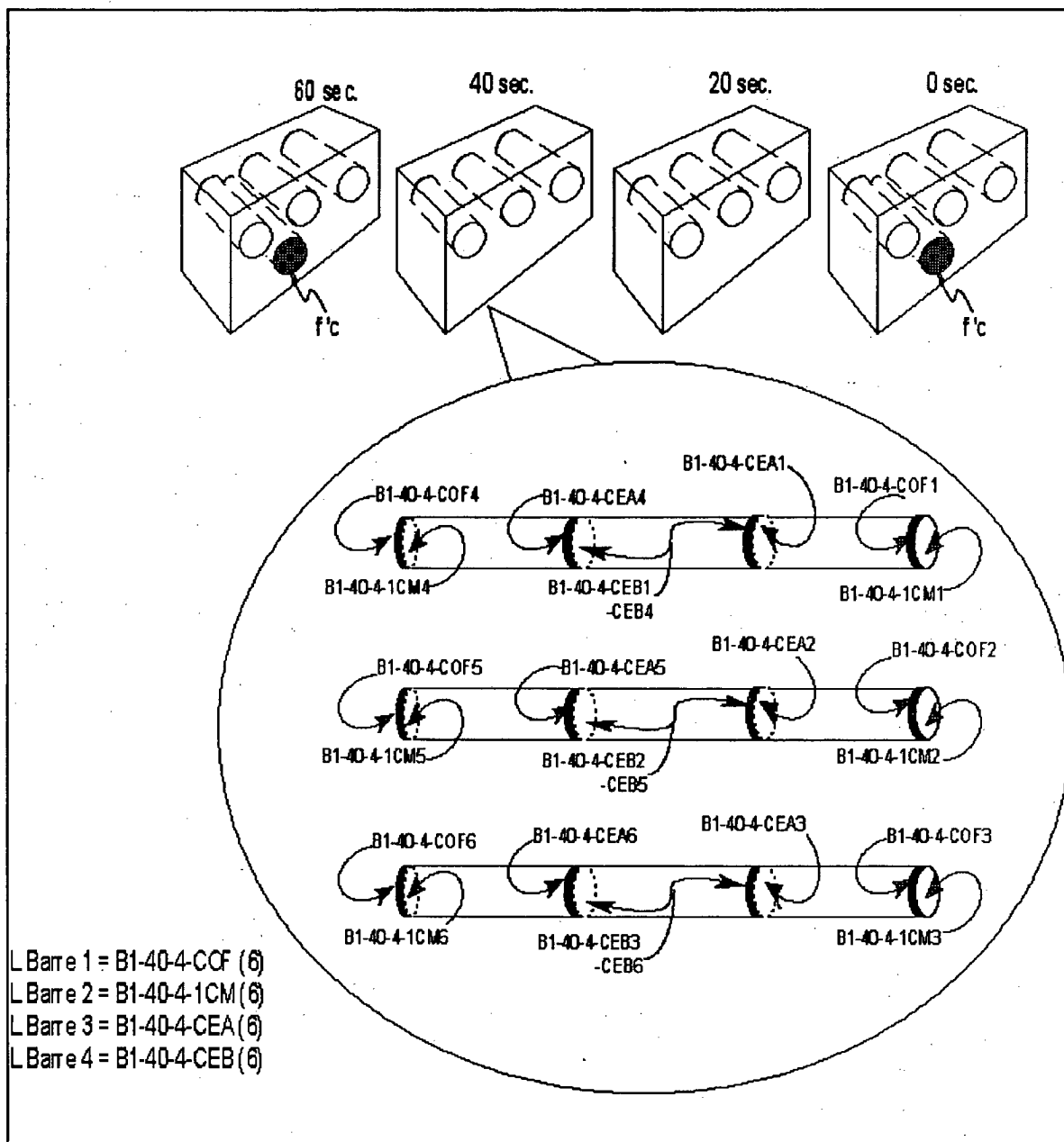
Afin de diminuer au minimum les coefficients de variation théorique et d'hétérogénéité pour influencer à la baisse l'erreur maximale associée à chacune des caractéristiques, six surfaces polies ont été utilisées pour évaluer chacun des résultats. Ainsi, dans chacun des murets, les six surfaces polies localisées près des coffrages ont été balayées et lues pour obtenir un résultat du réseau de

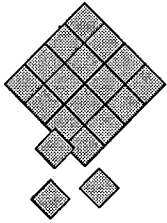
bulles d'air. Il en a été de même pour les six surfaces polies localisées à environ un centimètre des coffrages, celles qui étaient localisées au centre «A», ainsi que celles qui étaient localisées au centre «B» (voir figure 1).

Toutes les mesures et calculs concernant les caractéristiques du réseau de bulles d'air ont été exécutés confor-

mément à la méthode *Modified Point Count* de la norme ASTM-C457 (1984). Les calculs de coefficients de variation et d'erreur maximale ont été faits conformément à l'article édité par Pleau et Pigeon, intitulé *Precision Statement for ASTM-C457 Practice* et paru dans la revue *Cement, Concrete and Aggregates*.

Figure 1
Méthode de prélèvement des spécimens





Présentation des résultats

La première observation qu'il est possible de faire se situe au niveau de la grande variabilité des résultats microscopiques obtenus en laboratoire. Cette variation dans les résultats est évidemment plus importante dans les bétons malaxés à quatre pour cent d'air, comparativement à ceux malaxés à huit pour cent

d'air. De façon générale dans les bétons de quatre pour cent d'air entraîné, lors du balayage microscopique, le nombre d'arrêts sur bulles d'air (S_v) se situe aux alentours de 70. Ainsi, un ou deux arrêts de plus ou de moins a une plus grande influence sur le résultat final que si le nombre total d'arrêts sur bulles

d'air (S_v) est de 225, valeur approximative que l'on retrouve dans les bétonnages contenant huit pour cent d'air entraîné.

Le résumé des résultats obtenus sur les différents bétonnages, et ce pour chacune des caractéristiques du réseau de bulles d'air, se retrouve au tableau 4.

L'analyse plus détaillée des résultats obtenus a été effectuée sur la base des 120 graphiques tirés des différentes caractéristiques, en fonction des points de mise en oeuvre. Évidemment, ils ne sont pas tous inclus au présent numéro de *Recherches Transport*. Sont présentés les principaux graphiques ayant permis d'obtenir les meilleures informations.

Le volume d'air du béton durci est très sensible à la quantité totale d'énergie transférée au béton jusqu'à une certaine valeur. Ainsi, plus la durée de vibration est longue et plus la fréquence est élevée, plus la perte d'air est élevée (voir figure 2). Cependant, la durée ne semble plus avoir d'influence après 40 secondes pour des fréquences médianes. Le volume d'air total est également très affecté par la position du béton à l'intérieur des coffrages. La perte d'air est énorme au centre du coffrage (au droit de la pénétration des vibrateurs), alors qu'elle est moins évidente en s'approchant de ceux-ci (voir figure 3). Le type d'agent entraîneur d'air ne semble pas avoir d'influence précise sur le volume d'air, et ce peu importe les temps et les fréquences.

Tableau 4
Résumé des résultats microscopiques

Caractéristiques		Béton malaxé à 4 %	Béton malaxé à 8 %
LBarre	min.	272 μm	86 μm
	max.	567 μm	145 μm
	moy.	382 μm	118 μm
	σ	60 μm	14 μm
A	min.	1,2 %	3,2 %
	max.	5,1 %	8,9 %
	moy.	3,0 %	6,3 %
	σ	0,7 %	1,0 %
d_{moy}	min.	232 μm	86 μm
	max.	491 μm	197 μm
	moy.	346 μm	154 μm
	σ	58 μm	22 μm
α	min.	12,2 mm^{-1}	30,4 mm^{-1}
	max.	25,8 mm^{-1}	69,7 mm^{-1}
	moy.	17,8 mm^{-1}	40,0 mm^{-1}
	σ	3,0 mm^{-1}	6,4 mm^{-1}
A/P	min.	.03	.10
	max.	.16	.31
	moy.	.09	.20
	σ	.02	.04

Où: LBarre = facteur d'espacement moyen des bulles
 A = volume d'air dans le béton durci
 d_{moy} = diamètre volumique du réseau d'air
 A/P = rapport air/pâte

Figure 2
Volume d'air en fonction du temps de vibration et de la fréquence

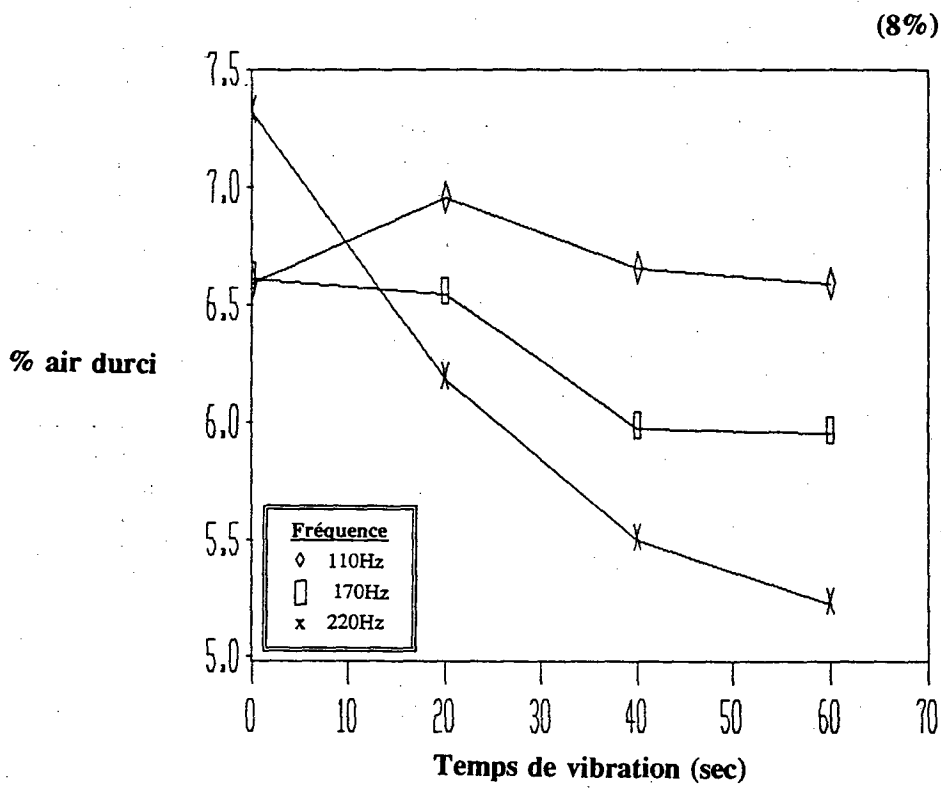
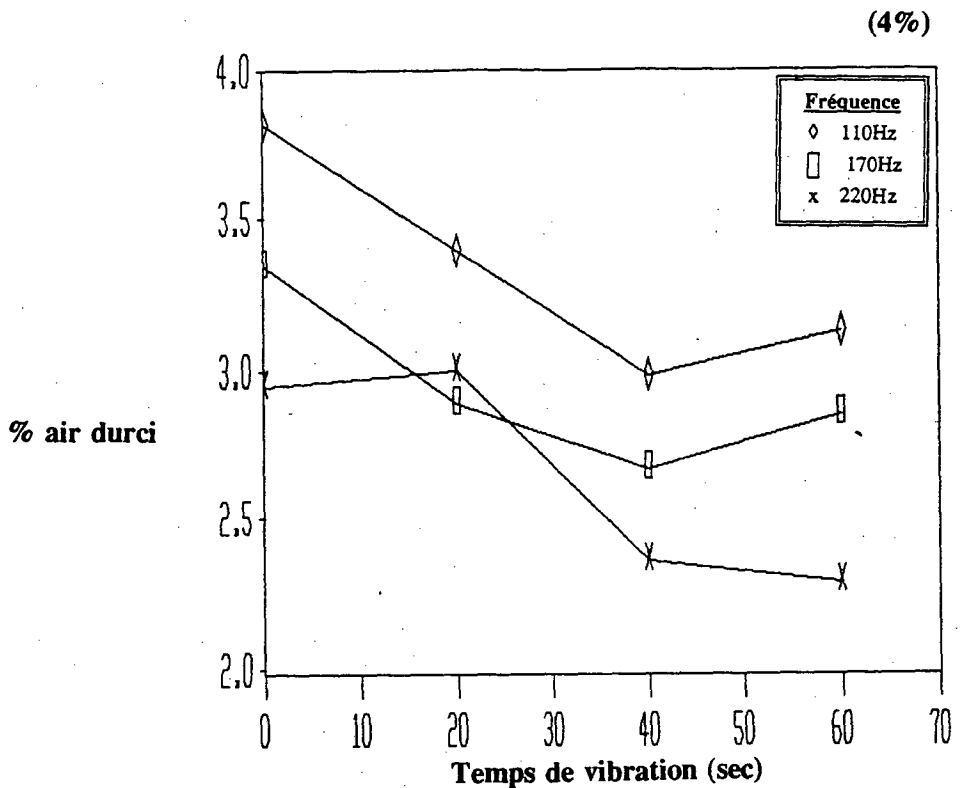
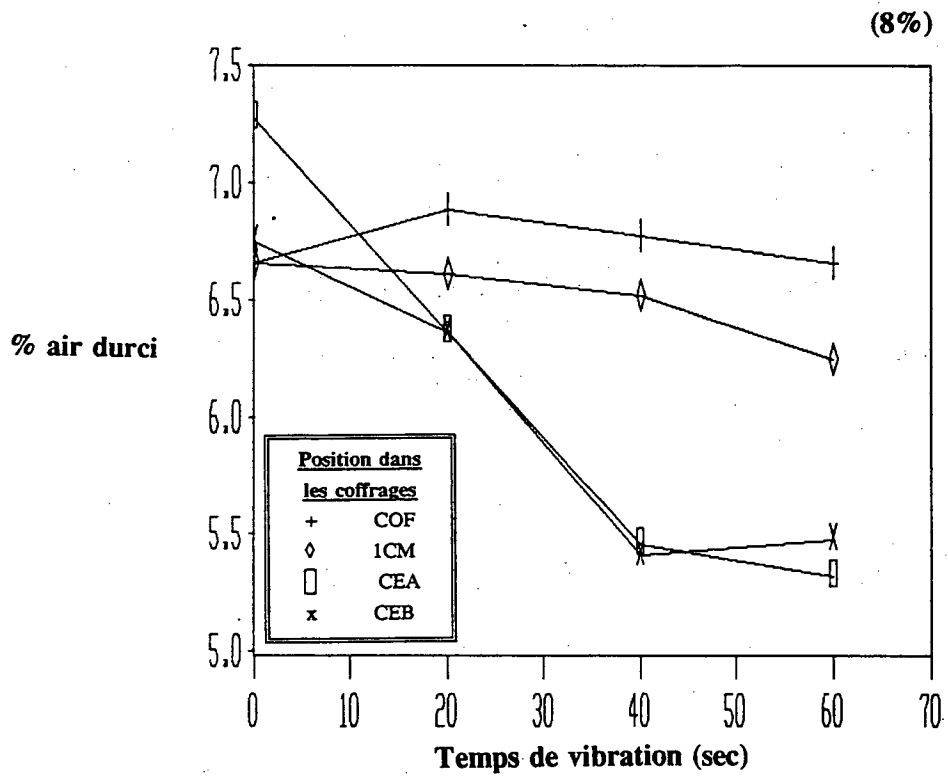
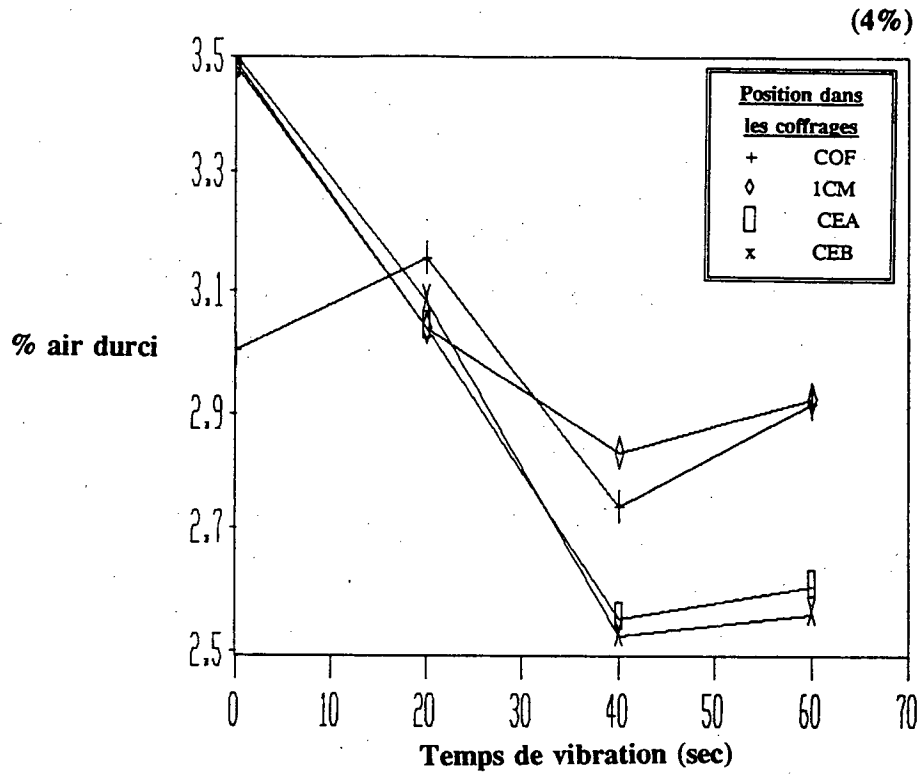


Figure 3
Volume d'air en fonction du temps de vibration et de la position des coffrages



Le facteur d'espacement moyen s'avère être plus ou moins affecté par l'énergie totale transmise au béton (temps et fréquence), car les variations observées au binoculaire optique, bien qu'évidentes, sont faibles.

Toutes les courbes obtenues en laboratoire se comportent de la même façon (voir figure 4). Pour les bétons avec quatre pour cent d'air entraîné, on note une amélioration du facteur d'espacement entre 110 et 170 Hz, pour ensuite retrouver une légère détérioration avec une fréquence de 220 Hz. Le phénomène est cependant inverse dans les bétons contenant huit pour cent d'air. Le facteur d'espacement diminue légèrement (ou demeure stable) entre 110 et 170 Hz, alors qu'à 220 Hz est notée une nette amélioration (diminution) du facteur d'espacement.

Au contraire de l'énergie totale, la position dans les coffrages a une très grande incidence sur la valeur du facteur d'espacement (voir figure 5). Avec un béton de quatre pour cent d'air entraîné, le facteur d'espacement n'est pas influencé près des coffrages; il l'est très peu à un centimètre de ceux-ci et il l'est énormément au centre de la masse de béton. Au centre des coffrages, le facteur d'espacement est nettement diminué avec une fréquence de 170 Hz, pour se restabiliser à une fréquence de 220 Hz.

Avec un béton de huit pour cent d'air entraîné, le facteur d'espacement n'est influencé à la baisse (aux coffrages et à un centimètre de ceux-ci) qu'à des fréquences de 220 Hz. Au centre de la masse de béton, plus la fréquence est élevée, plus le facteur d'espacement diminue.

D'autre part, l'utilisation de l'un ou l'autre des agents entraîneurs d'air ne semble pas donner de comportements différentiels.

Le diamètre moyen des bulles dans le béton durci est très influencé par l'énergie transmise au béton. Dans les bétons comportant un volume d'air de quatre pour cent, la quantité d'énergie (temps et fréquence) fait diminuer le diamètre moyen des bulles jusqu'à un temps de 40 secondes, pour ensuite demeurer stable ou légèrement influencé à la hausse avec des temps de 60 secondes. Pour le béton de huit pour cent d'air entraîné, les faibles fréquences n'ont pas d'influence, alors que les hautes fréquences font énormément diminuer, avec le temps de vibration, le diamètre moyen des bulles (voir figure 6).

Le diamètre moyen des bulles est toujours influencé de la même façon dans le béton avec un volume d'air de quatre pour cent. Ainsi, le diamètre diminue jusqu'à des temps de 40 secondes pour ensuite remonter à des temps de 60 secondes. Pour ce qui est du béton à huit pour cent

d'air entraîné, une grande influence de la localisation du béton à l'intérieur des coffrages est observée. Il faut donc faire vibrer le béton pendant une période de 60 secondes avant d'influencer le béton près des coffrages, alors qu'au centre de ceux-ci l'on obtient une diminution instantanée et linéaire avec le temps de vibration. On note un changement du comportement à 40 secondes de vibration (voir figure 7).

Encore ici, nous n'observons aucune relation précise entre le type d'agent entraîneur d'air et le comportement du béton lors de la mise en oeuvre.

La surface volumique étant le complément du diamètre moyen des bulles, elle se comporte exactement à l'inverse de cette dernière caractéristique. Les conclusions à en tirer sur l'influence de la mise en oeuvre s'avèrent donc exactement les mêmes que celles qui sont tirées du diamètre moyen des bulles.

Le rapport air/pâte étant, lui, le complément du volume d'air, il se comporte exactement à l'inverse de cette dernière caractéristique. Les conclusions de l'influence de la mise en oeuvre sur le rapport air-pâte s'avèrent donc sensiblement les mêmes que celles tirées sur le volume d'air.

Figure 4
LBarre en fonction du temps de vibration et de la fréquence

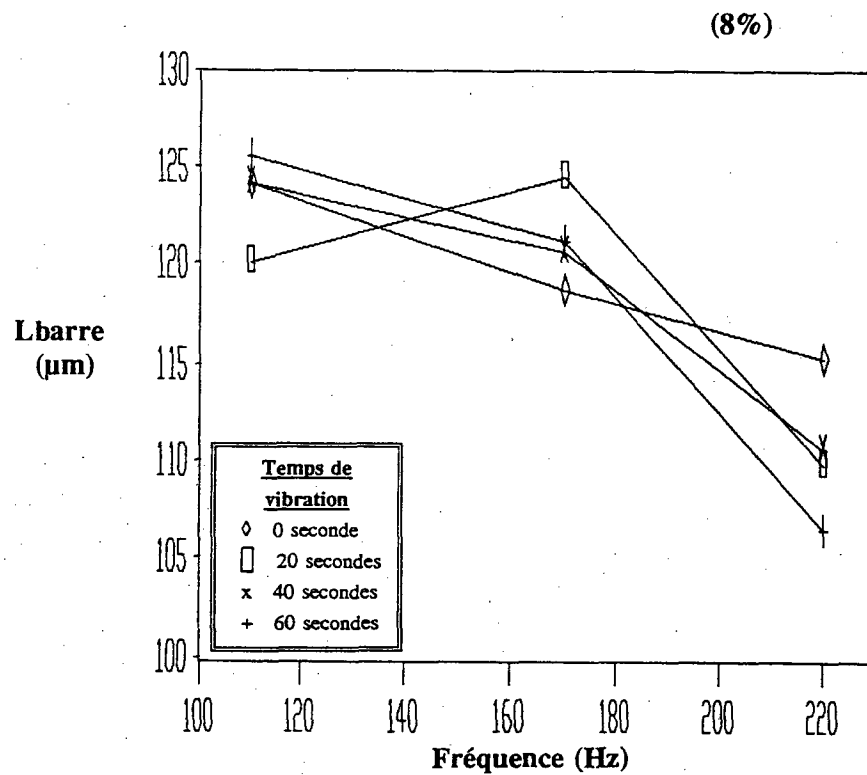
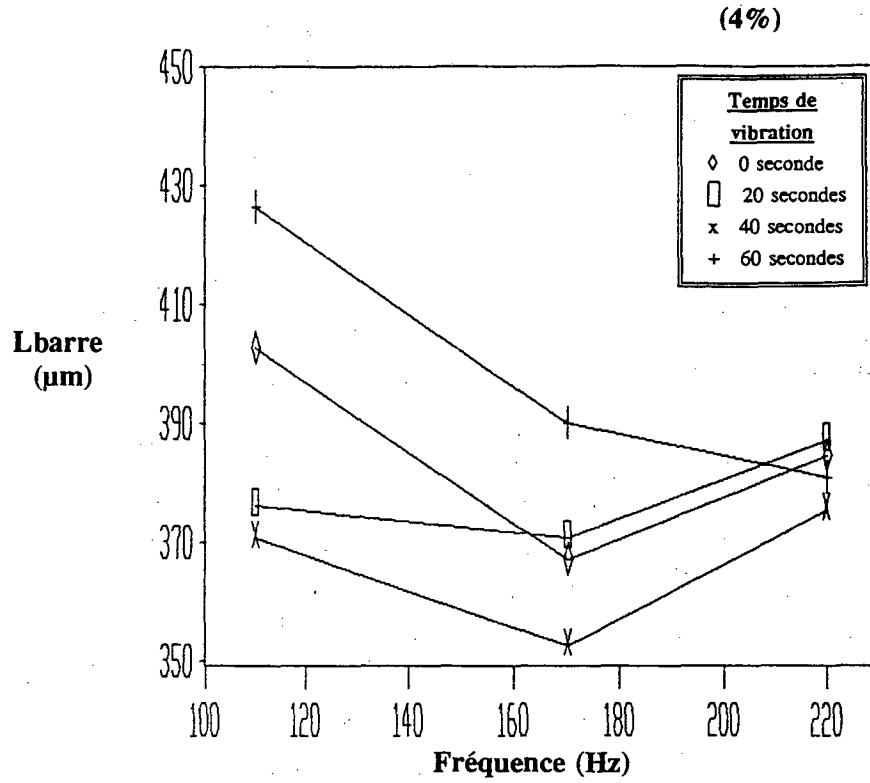


Figure 5
LBarre en fonction de la fréquence et de la position dans les coffrages

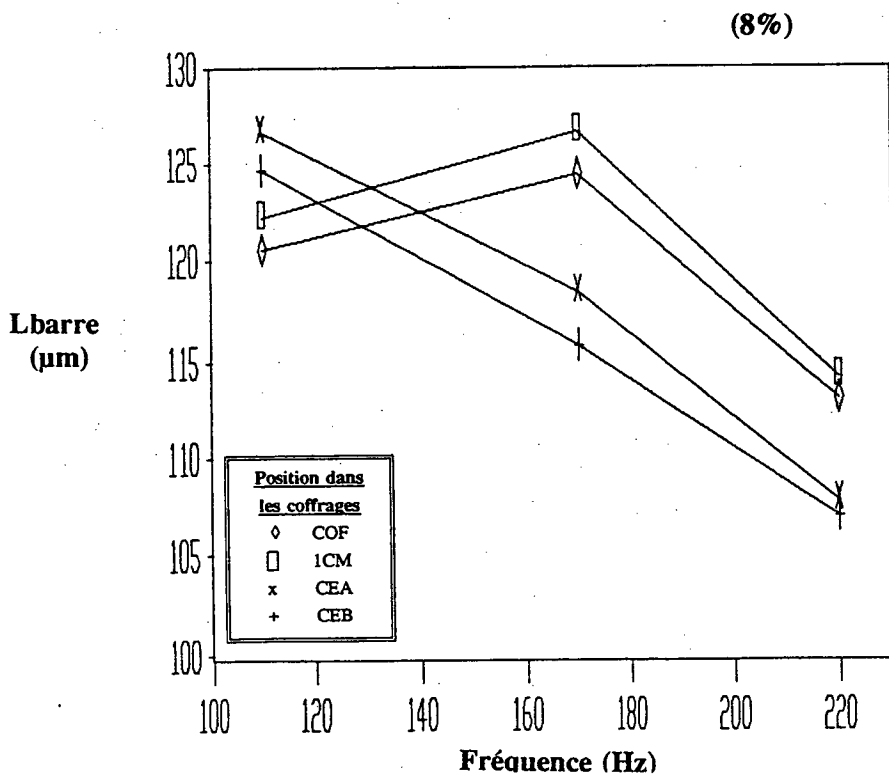
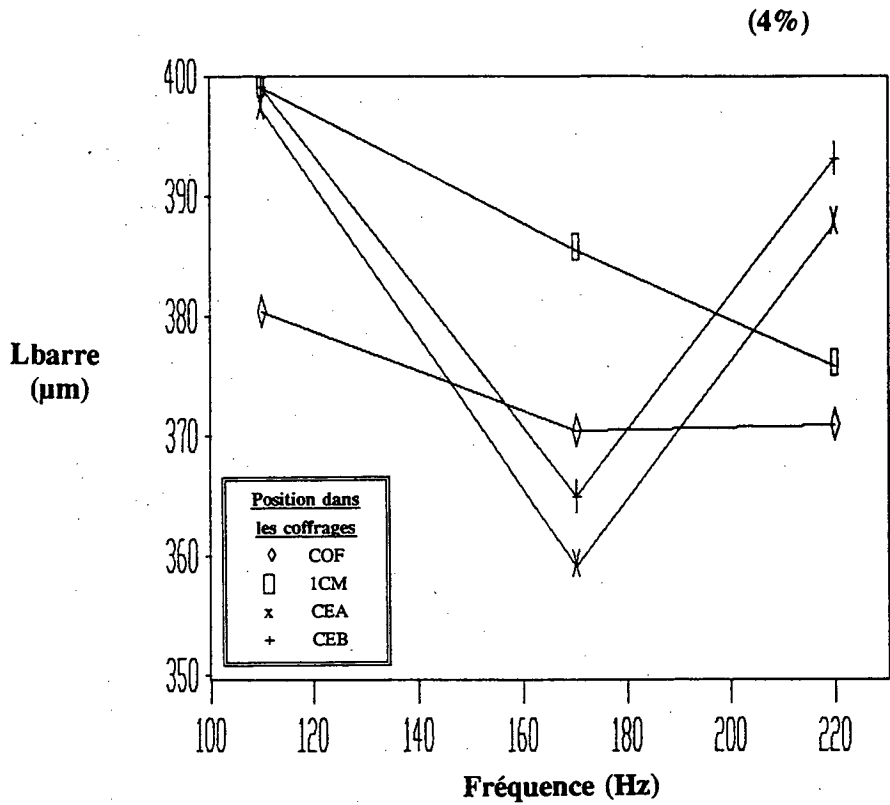


Figure 6
Diamètre moyen des bulles en fonction du temps de vibration et de la fréquence

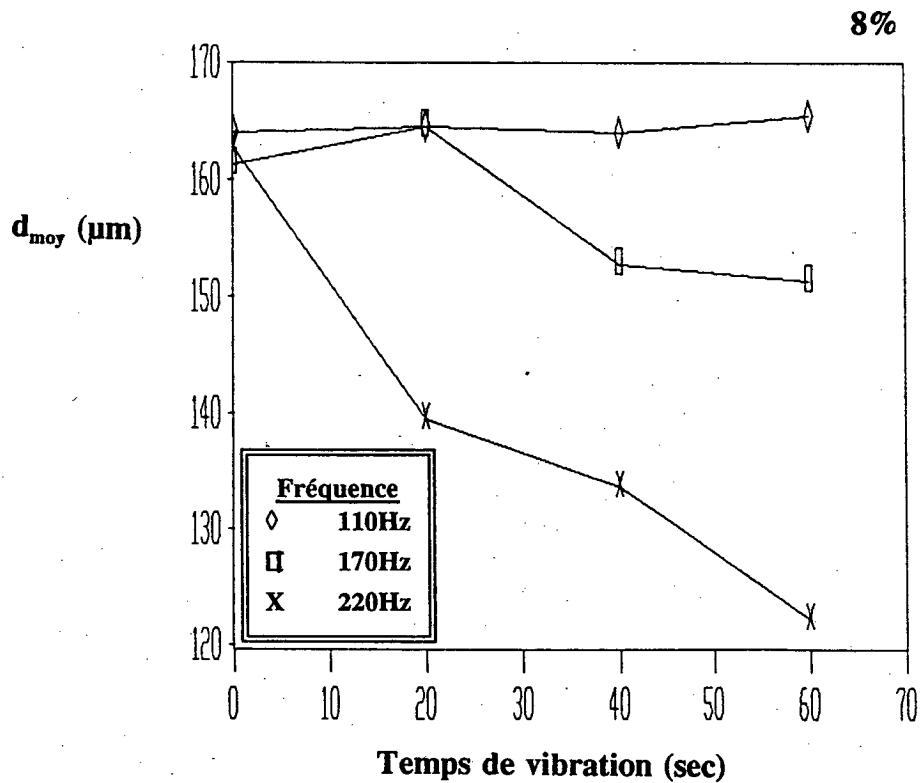
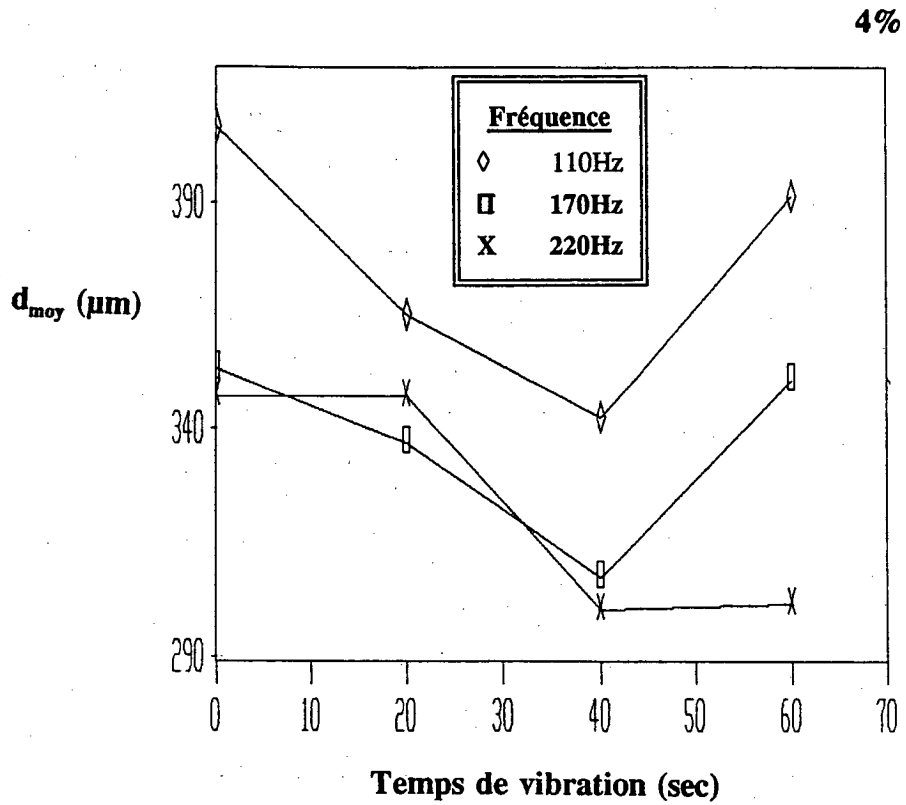
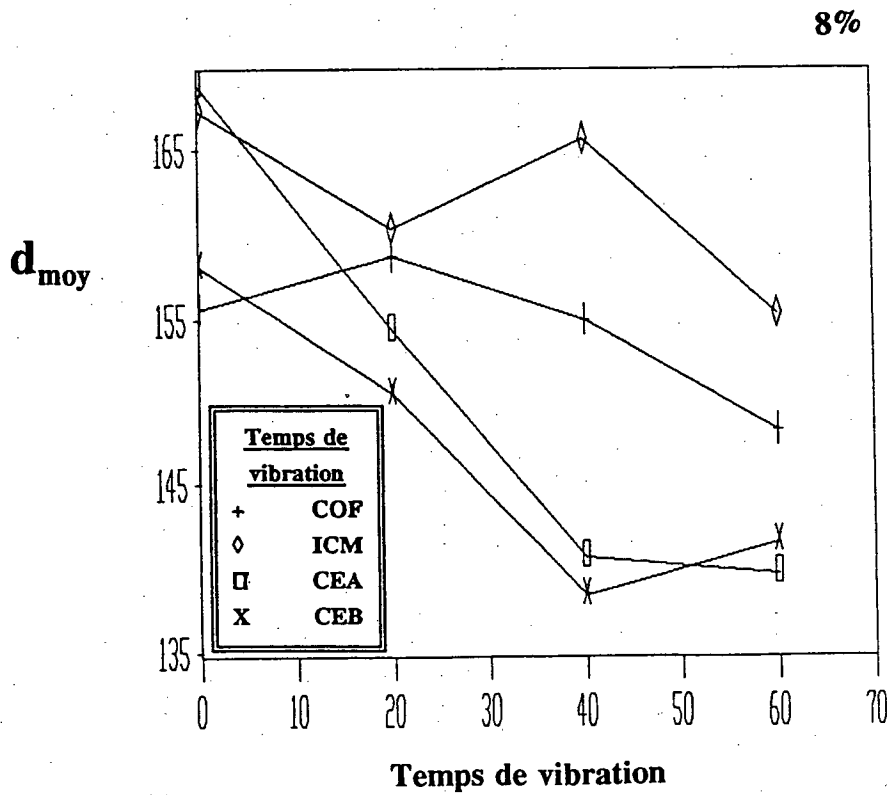
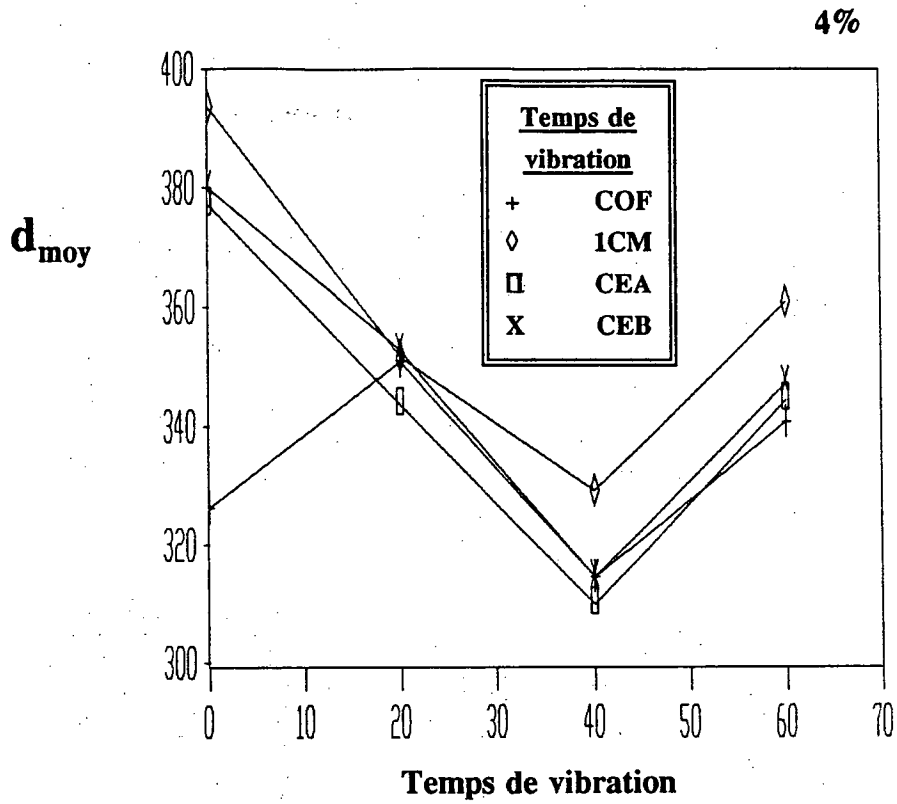
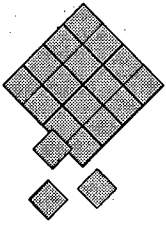


Figure 7
Diamètre moyen des bulles en fonction du temps de vibration et de la position dans les coffrages





Conclusion

L'analyse détaillée des résultats obtenus en laboratoire permet de dégager certaines conclusions intéressantes. Quelques conclusions sont d'ordre général, faisant référence à une vue d'ensemble des résultats, alors que d'autres s'avèrent beaucoup plus particulières.

- Il s'avère impossible d'obtenir un béton durable (soit avec un facteur d'espacement moyen inférieur à $260 \mu\text{m}$) lorsque le mélange est préparé à quatre pour cent d'air entraîné. Les résultats du facteur d'espacement sont compris entre 272 et $567 \mu\text{m}$, pour une moyenne de $382 \mu\text{m}$.
- Peu importe l'agent entraîneur d'air utilisé, la méthode de mise en oeuvre préconisée et le type de vibrateurs utilisés, en malaxant un béton avec huit pour cent d'air entraîné, un béton ayant les caractéristiques pour être durable est toujours obtenu. Les résultats du facteur d'espacement sont compris entre 86 et $184 \mu\text{m}$, pour une moyenne de $118 \mu\text{m}$.
- Une mesure de plus de cinq pour cent d'air dans le béton fraîchement malaxé n'est pas garant d'un béton ayant un bon facteur d'espacement. Les pourcentages d'air mesurés dans le béton frais ont varié entre 1,2 et 5,1 pour cent (LBarre toujours plus grand que $260 \mu\text{m}$) dans les bétons malaxés à quatre pour cent, et de 3,2 à 8,9 pour cent dans les bétons malaxés à huit pour cent.
- De façon générale, peu importe la méthode de mise en oeuvre utilisée, on obtient une perte du volume d'air dans le béton durci par rapport aux mesures sur le

béton frais de 26 et 21 pour cent dans le béton malaxé à quatre et à huit pour cent respectivement.

- Contrairement à ce que de nombreuses études ont déjà démontré, le type d'agent entraîneur d'air n'a pas eu d'effet marqué sur les caractéristiques du réseau de bulles d'air dans le béton (pas plus sur le diamètre des bulles que sur le volume d'air entraîné).
- Le volume d'air est très affecté par le temps de vibration et la position dans les coffrages mais, surtout, il est affecté par les fréquences de vibration utilisées. La diminution de 50 pour cent du volume d'air et l'augmentation de 100 pour cent de la surface volumique observées par Simon et al. sont confirmées par nos résultats, mais à des pourcentages légèrement moins élevés.
- Le diamètre moyen des bulles s'avère toujours supérieur dans le béton à quatre pour cent d'air entraîné que dans le béton à huit pour cent d'air entraîné. Ainsi, avant toute mise en oeuvre, le béton malaxé à quatre pour cent contient des bulles de diamètre moyen de $346 \mu\text{m}$, alors que celui malaxé à huit pour cent contient des bulles de diamètre moyen égal à $149 \mu\text{m}$.
- Contrairement aux conclusions de D. Stark (1986), qui dit que le temps de vibration et le rayon d'influence des vibrateurs n'ont aucun effet sur le réseau de bulles d'air, les résultats tendent à démontrer que l'on obtient une dégradation du réseau des bulles principalement dans le rayon d'influence des vibrateurs, mais

aussi avec le temps de vibration.

- Selon D. Stark (1986), on n'observe une dégradation générale du réseau de bulles d'air qu'à des fréquences de 14 000 vibrations à la minute (233 Hz). Encore une fois, les résultats tendent à démontrer une dégradation à des valeurs beaucoup plus basses, soit 170 Hz.
- Backstrom et al. (1986) ont conclu que le temps de vibration affecte à la baisse le volume d'air (A), mais n'a aucune influence sur le facteur d'espacement (LBarre). Les résultats confirment cette conclusion, à l'exception des fréquences très basses (110 Hz) où le facteur d'espacement se dégrade avec le temps de vibration.
- Laboratoire Sol et Béton Inc. a évalué la zone d'influence des vibrateurs à 113 mm. Cette valeur est très similaire à celle obtenue par Simon et al., soit 125 mm.
- Avec un béton à quatre pour cent d'air entraîné, on a plusieurs grosses bulles d'air disponibles au fractionnement. Elles sont donc brisées à des fréquences plus basses et plus rapidement. Ce changement de granulométrie des bulles d'air affecte évidemment le volume d'air, le diamètre moyen des bulles et la surface volumique, mais affecte très peu le facteur d'espacement, les petites bulles étant plus rapprochées.
- Les résultats tendent à démontrer que l'on fractionne les bulles jusqu'à des temps de vibration de 40 secondes, pour ensuite les éjecter à l'extérieur de la masse de béton à des temps de 60 secondes. Celles qui ne sont pas éjectées sont

probablement dissoutes autour des agrégats sous forme de film d'air.

- La localisation du béton à l'intérieur des coffrages a une influence importante sur les caractéristiques du réseau de bulles d'air. Ainsi, toutes les conclusions précédemment exprimées sont plus marquées au coeur du béton comparativement aux bordures extérieures. La perte d'air s'avère beaucoup plus faible près des coffrages qu'à l'endroit d'insertion des vibreurs. On peut donc croire que le béton est moins uniforme. La porosité étant plus élevée, c'est ce qui affecte à la baisse la durabilité de la surface du béton.

En conclusion, on peut donc se poser de sérieuses questions sur les exigences permettant des volumes d'air de quatre et cinq pour cent. À la lumière des résultats présentés, il faudrait beaucoup plus viser sept et huit pour cent d'air entraîné lors du malaxage. Dans le même ordre d'idées, certaines associations promouvant une diminution des volumes d'air devraient au moins garder le statu quo sur la question.

Une meilleure mise en oeuvre du béton en général ne serait que bénéfique pour le béton. Selon les résultats exprimés, la fréquence optimale serait de 170 Hz, le temps de vibration le mieux indiqué serait

de 40 secondes et, surtout, il s'avère nécessaire de bien vibrer le béton près des coffrages. Il faut cependant bien garder en mémoire qu'un produit bien dosé à l'usine sera difficilement détériorable au chantier avec les méthodes généralement utilisées.

RÉFÉRENCES

ACI COMMITTEE 309. *Behavior of Fresh Concrete During Vibration* (ACI 309.1R-86). ACI Manual of Concrete Practice. Part 2 : Construction Practices and Inspection. American Concrete Institute. Detroit, 1990, pp. 309.1 R-1-309.1 R-20.

ACI COMMITTEE 309. *Guide for Consolidation of Concrete* (ACI 390R-87). ACI Manual of Concrete Practice. Part 2 : Construction Practices and Inspection. American Concrete Institute. Detroit, 1990, pp. 309R-1 - 390R-40.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1983). *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral by Products in Concrete*. ACI Publication SP-79. American Concrete Institute. Detroit, 1983.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Practice for Microscopical Determination of Air-Void Content and Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*. ASTM C457-82a - Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02. Philadelphie. Septembre 1988, pp. 289-304.

ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION (1990). *Béton - Constituants et exécution des travaux -*

Essais concernant le béton. Norme nationale du Canada. CSA-A23.1-M90 et CSA-A23.2-M90. ISSN0317. Toronto, Ontario. 415 pages.

BACKSTROM, J.-E., BURROWS, R.-W., MIELENZ, R.-C. et WILKODOFF, V.-E. (1958). *Origin, Evolution and Effects of the Air-Void System in Concrete. Part 2 - Influence of Type and Amount of Air-Entraining Agent*. Journal of the American Concrete Institute, Proceedings, 55, pp. 261-272.

BACKSTROM, J.-E., BURROWS, R.-W., MIELENZ, R.-C. et WILKODOFF, V.-E. (1958). *Origin, Evolution and Effects of the Air-Void System in Concrete. Part 3 - Influence of Water-Cement Ratio and Compaction*. Journal of the American Concrete Institute, Proceedings, 55, pp. 359-375.

BÉRUBÉ, M.-A., FOURNIER, B., GRATTAN-BELLEW, P.-E., VÉZINA, D., FRENETTE, J., DUCHESNE, J., CHOQUETTE, M., OUELLET, C. et CLAVEAU, A. (1988). *Les réactions alcalis-granulats dans le béton - Caractérisations des granulats, méthodes préventives et inspection des bétons*. Rapports GCL88-12 et GCL88-13. Département de génie géologique. Université Laval.

BLOEM, D.-L. et WALKER, S. (1946). *Preliminary Report on Effect of Mixing Time on Properties of Concrete Containing Air-Entraining Admixtures*. NRMCA Series 72. Preliminary Report.

BLOEM, D.-L. (1950). *Air Entrainment in Concrete*. Pamphlet NSG and NRMCA. 30 pages.

BRUERE, G.-M. (1974). *Some Influence on Admixture Requirements in Concrete*. NRMCA Publication No. 146.

BUCK, Alan-D. et MATHER, Katherine. *Methods for Controlling Effects of Alkali-Silica Reaction*. Technical Report SL-87-6. Waterways Experiment Station. - U.S. Army Corps of Engineers. Vicksburg, Mississippi. 1987.

BURG, R.-U. (1983). *Slump Loss, Air Loss and Field Performance of Concrete*. Journal of American Concrete Institute. Vol. 80, pp. 332-339.

CARETTE, G.-G. et MALHOTRA, V.-M. (1983). *Mechanical Properties, Durability and Drying Shrinkage of Portland Cement Incorporating Silica Fume*. Cement, Concrete and Aggregates, 5(1), pp. 3-13.

- DUCHESNE, J., BÉRUBÉ, M.-A. et PIGEON, M. (1993). *Thèse de doctorat sur les ajouts cimentaires*. Département de génie géologique. Université Laval. Non encore publié.
- FARKAS, E. (1964). *The Role of Alkali in Air Entrainment*. Rock Products Chemical Research Seminar. Chicago.
- GAY, F.-T. (1985). *The Effect of Mix Temperature On Air Content and Spacing Factors of Hardened Concrete Mixes with Standardized Additions of Air-Entrained Agent*. Proceedings of the Seventh International Conference on Cement Microscopy, pp. 305-315.
- GAYNOR, R.-D. et MULLARKY, J.-L. (1974). *Effects of Mixing Speed on Air Cement*. NRMCA Technical Info. Letter No. 312, 8 pages.
- GEBLER, S.-H. et KLIEGER, P. (1983). *Effect of Fly Ash on the Air-Void Stability of Concrete*. Proceedings of the CANMET/ACI First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete. American Concrete Institute Special Publication SP-79, pp.103-120.
- GEBLER, S.-H. et KLIEGER, P. *Effect of Fly Ash on the Air-Void Stability of Concrete*. Research and Development Bulletin RD085T. Portland Cement Association. 1983.
- GEBLER, S.-H. et KLIEGER, P. *Effect of Fly Ash on Some of the Physical Properties of Concrete*. Research and Development Bulletin RD089T. Portland Cement Association. 1986.
- GEBLER, S.-H. et KLIEGER, P. *Effect of Fly Ash on the Durability of Air-Entrained Concrete*. Research and Development Bulletin RD090T. Portland Cement Association. 1986.
- GREENING, N.-R. (1967). *Some Causes for Variation in Required Amount of Air-Entraining in Portland Cement Mortars*. J. PCA, Research and Development Laboratory. Vol. 9, No. 2, pp. 22-36.
- GRIEB, W.-E., WERNER, G. et WOOLF, D.-O. (1961). *Water-Reducing Retarders for Concrete - Physical Tests*. Public Roads. Vol. 31, No. 6, pp. 136-152.
- HELMUTH, Richard A. *Fly Ash in Cement and Concrete*. SP040T. Portland Cement Association. 1987.
- HOGAN, FF.-J. et MEUSEL, J.-W. (1954). *Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast Furnace Slag*. Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 3, No. 1. American Society for Testing and Materials. Philadelphia. Été 1981, pp. 40-52.
- JACKSON, F.-H. et TIMMS, A.-G. (1954). *Evaluation of Air-Entraining Admixtures for Concrete*. Public Roads. Vol. 27, pp. 259-267.
- KLIEGER, P. (1958). *Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength*. ACI Proceedings. Vol. 54, pp. 1081.
- KLIEGER, P. et ISBERNER, Albert W. (1967). *Laboratory Studies of Blended Cements - Portland Blast-Furnace Slag Cements*. Research Department Bulletin RX218. Portland Cement Association.
- LANGAN, B.-W. et WARD, M.-A. (1976). *A Laboratory Investigation for Potential Durability of Ready-Mixed Concrete Retempered for Air Content and Workability*. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 3, No. 4, pp. 570-577.
- LARSON, T.-D., MANGUSE, J.-L. et RADOMSKI, R.-R. (1963) *Preliminary Study of the Effects of Water-Reducing Retarders on the Strength, Air-Voids Characteristics and Durability of Concrete*. Journal of the American Concrete Institute. Vol. 60, No. 12, pp. 1739-1753.
- LITVAN, G.-G. (1972). *Phase Transitions of Absorbates IV - Mechanism of Frost Action in Hardened Cement Paste*. Journal of the American Ceramic Society, 55(1), pp. 38-42.
- LITVAN, G.-G. (1973). *Pore Structure and Frost Susceptibility of Building Materials*. RILEM/IUPAC International Symposium on Pore Structure and Properties of Materials. Prague. Vol. II, pp. F17 - F30.
- LITVAN, G.-G. (1974). *Design for Frost Durability*. 2nd International CIB/RILEM Symposium on Moisture Problems in Buildings. Rotterdam 4.1.4, 6 pages.
- LITVAN, G.-G. (1975). *Phase Transitions of Adsorbates VI - Effect of Deicing Agents on the Freezing of Cement Paste*. Journal of the American Ceramic Society, 58 (1-2), pp. 26-30.
- LITVAN, G.-G. (1978). *Freeze-Thaw Durability of Porous Building Materials. Durability of Building Materials and Components*. P.-J. Sereda et G.-G. Litvan, Éditeurs. American Society for Testing and Materials Special Technical Publication STP 691, pp. 455-463.
- LITVAN, G.-G. (1981). *Frost Action in Porous Systems*. Séminaire Altération et durabilité des bétons et des pierres. Collège international des sciences de la construction, Saint-Rémy-les-Chevreuses. 15 pages.
- MACINIS, C. et RACIC, D. (1986). *The Effect of Superplasticizers on the Entrained Air-Void System in Concrete*. Cement and Concrete Research. Vol. 16, No. 3, pp. 345-352.
- MALHORTA, V.-M. (1981). *Effect of Repeated Dosages of Superplasticizers on Slump, Strength and Freeze-Thaw Resistance of Concrete*. Materials and Structures, 14(80), pp. 79-89.
- MALISCH, W.-R., RAECKE, D.-A., FISHER, D.-M., LOTT, J.-L., KENNEDY, T.-W. et KESLER, C.-E. (1966). *Physical Factors Influencing Resistance of Concrete to Deicing Agents*. NCHRP Report 27. 41 pages.
- MATHER, K. (1953). *Crushed Limestone Aggregates for Concrete*. Mining Engineering. Vol. 5, No. 10, pp. 1022-1028.
- MAYFEILD, B. et MORETON, A.-J. (1969). *Effects of Fineness of Cement on the Air-Entraining Properties of Concrete*. Civil Engineering and Public Works Review. Vol. 64, No. 750, pp. 37-41.
- MIELENZ, R.-C., WOLKODOFF, V.-E., BACKSTROM, J.-E. et BURROWS, R.-W. (1958). *Origin, Evolution and Effects of the Air Void System in Concrete - Part 4 : the Air Void System in Job Concrete*. Journal of the American Concrete Institute. Proceedings, 55, pp. 507-517.
- MIELENZ, R.-C. (1968). *Use of Surface Active Agents in Concrete*. Principal Paper Session IV-1, 5th International Symposium on Chemistry of Cement, pp. 1-29.
- MIELENZ, R.-C. et SPROUSE, J.-H. (1978). *High-Range Water-Reducing Admixtures: Effects on the Air-Void System in Hardened and Non-Air-Entrained Concrete*. ACI Special Publication No. 62, pp. 167-192.

NEVILLE, A.-M. (1973). *Properties of Concrete*. Deuxième édition. Pitman Publishing. New-York. 686 pages.

PERENCHIO, W.-F. et KLIEGER, P. (1976). *Further Laboratory Studies of Portland-Pouzzolan Cement*. PCA, Research and Development Bulletin R0041.01T.

PERENCHIO, W.-F., WHITTING, D.-A. et KANTRO, D.-L. (1978). *Water-Reduction, Slump Loss and Entrained Air-Void Systems as Influenced by Superplasticizers*. American Concrete Institute Special Publication, No 62, pp. 137-155.

PIGEON, M. (1984). *Microstructure et résistance au gel des ciments et bétons*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie. Paris 6. 340 pages.

PIGEON, M., SAUCIER, F. et PLANTE, P. (1987). *Production et stabilité du réseau de bulles d'air entraîné dans le béton*. Rapport soumis au Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie ainsi qu'à la compagnie Verreault-Frontenac. Programme Université - Industrie. Département de génie civil. Université Laval.

PISTILLI, M.-F. (1983). *Air-Void Parameters Developed by Air-Entraining Admixtures, as Influenced by Soluble Alkalis from Fly Ash and Portland Cement*. Journal of the American Institute. Proceedings, 80(3), pp. 217-222.

PLEAU, R. (1984). *Quelques facteurs affectant la résistance au gel-dégel des bétons*. Thèse de maîtrise. Département de génie civil. Université Laval. 327 pages.

PLEAU, R., PLANTE, R., GAGNÉ, R. et PIGEON, M. (1990). *Practical Considerations Pertaining to the Microscopical Determination of Air-Void Characteristics of Hardened Concrete (ASTM C-457 standard)*. Cement, Concrete and Aggregates. Vol. 12, No. 2, pp. 3-11.

PLEAU, R. et PIGEON, M. (1992). *Precision Statement for ASTM C-457 Practice for Microscopical*

Determination of Air-Void System in Hardened Concrete. Cement, Concrete and Aggregates. CCAGDP, Vol. 14, No. 2. Hiver 1992, pp. 118-126.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1987). *Concrete for Massive Structures*. IS128T. Portland Cement Association.

POWERS, T.-C. (1964). *Topics in Concrete Technology. 3 Mixtures Containing Intentionally Entrained Air*. PCA Research and Development Laboratories. Vol. 6, No. 13, pp. 19-42.

POWERS, T.-C. (1949). *The Air Requirement of Frost-Resistance Concrete*. Proceedings of the Highway Research Board, 29, pp. 184-211.

POWERS, T.-C. (1954). *Void Spacing as a Basis for Producing Air-Entrained Concrete*. Journal of American Concrete Institute. Proceedings, 50, pp. 741-760.

POWERS, T.-C. (1975). *Freezing Effects in Concrete*. Durability of Concrete, an American Concrete Institute Special Publication SP-47, pp. 1-11.

POWERS, T.-C. et HELMUTH, R.-A. (1943). *Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing*. Proceedings of the Highway Research Board, 32, pp. 285-297.

REGOURD, M., HORNAIN, H. et POITEVIN, P. *The Alkali-Aggregate Reaction, Concrete Microstructural Evolution*. International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town - South Africa, Paper 35. Published by the National Building Research Institute of the C.S.I.R.S. 252 (30 mars - 3 avril 1981).

ROBERTS, M.-H. et ADDERSON, B.-W. (1983). *Tests on Superplasticizing Admixtures for Concrete*. Magazine of Concrete Research. Vol. 35, No. 123, pp. 86-98.

SCRIPTURE, E.-W. et LITWINOWICZ, F.-J. (1949). *Some Factors Affecting Air Entrainment*. American Concrete Institute. Vol. 20, No. 6, Proc. 45, pp. 433-442.

SIMON, M.-J., JENKINS, R.-B. et HOVER, K.-C. (Sans date). *The Influence of Immersion Vibration on the Void System of Air Entrained Concrete*. Durability of Concrete, G.M.I. Dorn International Symposium. SP-131-4, ACI Publication.

SOMMER, H. (1979). *The Precision of the Microscopical Determination of the Air-Void System in Hardened Concrete*. Cement, Concrete and Aggregates. Vol. 1, No. 2, pp. 49-55.

SPIEGEL et MURRAY, R. (1981). *Théorie et applications de la statistique*. Série Schaum, McGraw-Hill. New-York (1972). 360 pages.

STARK, David C. (1986). *Effect of Vibration on the Air-Void System and Freeze Thaw Durability of Concrete (RD092.01T)*. Portland Cement Association. Stokie, Illinois.

TAYLOR, T.-H. (1949). *Variables that Influence the Air Content of Concrete*. Portland Cement Association. Series 336 (Rapport non publié).

VENUAT, M. (1971). *Adjuvants et traitements des mortiers et bétons*. Édité par l'auteur. Paris. 430 pages.

WALLACE, G.-B. et ORE, E.-L. (1959). *Structural and Lean Mass Concrete as Affected by Water-Reducing, Set-Retarding Agents*. ASTM Special Technical Publication. No. 266, pp. 38-96.

WHITING, D. et STARK, D. (1983). *Control of Air Content in Concrete*. National Cooperative Highway Research Program. 258 Report.

