

**La perméabilité des bétons aux
fumées de silice**

CANQ
TR
GE
SM
233



920654

LA PERMEABILITE DES BETONS AUX FUMES DE SILICE

par

88

Daniel Perraton ¹, Pierre Laplante ², Daniel Vézina ³

- 1 Assistant de recherche à l'Université de Sherbrooke (Québec) Canada
- 2 Assistant de recherche à l'Université de Sherbrooke (Québec) Canada
- 3 Ingénieur de projets au Laboratoire Central du Ministère des Transports, Ste-Foy (Québec), Canada.

CANQ
TR
GE
SM
233



ABSTRACT

Water, chloride-ion and air permeability of two series of silica fume and non-silica fume concretes having water/cementitious ratios of 0.4 and 0.5 were studied as well as that of a 0.24 water/cementitious ratio silica fume concrete. Silica fume dosage varied from 5 to 20% by weight of cement.

Water permeability concretes samples having water/cementitious ratios lower than 0.5 is so low that they can be considered impervious whether they contain silica fume or not.

The chloride-ion impermeability provided by silica fume rivals that of latex for water/cementitious ratios of 0.4 to 0.5 and ploymer-impregnated concrete with a 0.24 W/C ratio.

The two drying methods used in this research yielded a positive correlation between silica fume dosage and air permeability. Equal variations were observed for values of up to 10%, whereas at 20%, the increase was markedly sharper.

The characterization of concrete permeability is not as simple as it appears. Sample preparation and fluid type can significantly affect the interpretation of the effect of an admixture such as silica fume.

RESUME

La perméabilité à l'eau, aux ions chlore et à l'air de deux séries de béton avec et sans fumées de silice, ayant des rapports eau/ciment de 0,4 et 0,5 a été étudiée, ainsi que celle d'un béton ayant un rapport eau/ciment de 0,24. Le dosage en fumée de silice a varié entre 5 et 20% par rapport à la masse du ciment.

La perméabilité à l'eau des bétons ayant des rapports eau/ciment inférieurs à 0,5 est si faible qu'il est pratiquement impossible de la mesurer, que le béton contienne ou non des fumées de silice.

La perméabilité aux ions chlore des bétons contenant de la fumée de silice est du même ordre que ceux qui contiennent du latex lorsque le rapport E/C est de l'ordre de 0,4 à 0,5. Dans le cas du béton de rapport E/C de 0,24, le béton à très haute résistance avait une perméabilité aux ions chlore du même ordre de grandeur que celle des bétons imprégnés de polymère.

En ce qui concerne la perméabilité à l'air, les deux méthodes de séchage qui ont été utilisées dans ce travail montrent qu'il existe une certaine corrélation entre le dosage en fumée de silice et la perméabilité à l'air.

La caractérisation de la perméabilité d'un béton n'est pas une chose aussi facile qu'on peut le penser. La préparation de l'échantillon, le type de fluide utilisé lors de la mesure peuvent affecter l'interprétation des effets d'un ajout quelconque tel que la fumée de silice.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

METHODE EXPERIMENTALE

Matériaux

Composition et caractéristiques des bétons étudiés

Mûrissement des échantillons avant les essais

Mesure de la perméabilité à l'eau

Mesure de la perméabilité à l'air

Mesure de la perméabilité aux ions chlore

Porosimétrie au mercure

PRESENTATION DES RESULTATS

Résistance en compression

Facteur d'espacement

Porosité au mercure

Mesure de perméabilité à l'eau

Mesure de perméabilité aux ions chlore

Perméabilité à l'air

CONCLUSION

REFERENCES

LISTE DES TABLEAUX

1. Composition chimique des différents matériaux utilisés.
2. Composition et caractéristiques de la série de béton ayant un rapport E/C 0,4
3. Composition et caractéristiques de la série de béton ayant un rapport E/C 0,5
4. Composition et caractéristiques du béton de rapport E/C 0,24
5. Résistance en compression des bétons de la série 0,4 et 0,5
6. Perméabilité à l'air.

LISTE DES FIGURES

1. Représentation schématique des perméamètres à l'eau.
2. Représentation schématique des perméamètres à l'air.
3. Schéma d'un perméamètre aux ions chlore.
4. Mûrissement des bétons avant les essais.
5. Courbe d'intrusion de mercure pour la série des bétons 0,4.
6. Courbe d'intrusion de mercure pour les bétons des séries 0,5.
7. Intensité du courant en fonction du temps pour la série 0,4.
8. Intensité du courant en fonction du temps pour la série 0,5.
9. Perméabilité aux ions chlore (en Coulombs) en fonction du dosage en fumée de silice.
10. Perméabilité à l'air en fonction du dosage en fumée de silice et du type de séchage.

INTRODUCTION

La durabilité d'un béton est reliée de façon très étroite, parmi d'autres facteurs, au type d'environnement dans lequel le béton va se trouver et de sa perméabilité. En fait la perméabilité donne la vitesse à laquelle les agents agressifs vont pénétrer et attaquer le béton. Etant donné qu'il n'existe pas un seul type d'agent agressif, il n'y a pas un seul type de perméabilité et une seule méthode pour mesurer la perméabilité. Si l'agent agressif est un gaz (CO_2 , SO_3 , etc...) la mesure de la perméabilité au gaz sera primordiale. Si l'agent agressif est un liquide, pluies acides, acides, eaux de mer, eaux riches en sulfates ou extrêmement pures, etc... la perméabilité à l'eau sera un facteur très important dans la durabilité du béton. Finalement si les ions chlore constituent le milieu de l'agent agressif, alors la perméabilité aux ions chlore sera le facteur clé.

Est-ce que tous ces types de perméabilité sont reliés les uns aux autres? Est-ce que ces perméabilités ne représentent simplement qu'un aspect particulier d'un concept plus général relié à la perméabilité de la matrice par elle-même?

Cette présentation n'a pas la prétention de vouloir couvrir tous ces aspects pour toutes sortes de béton, mais plutôt d'étudier l'incidence de l'utilisation de fumées de silice sur la perméabilité de béton, plus précisément la perméabilité à l'eau, la perméabilité à l'air, la perméabilité aux ions chlore. En fait, la fumée de silice est utilisée de plus en plus dans l'industrie du béton, très souvent pour rendre le béton plus imperméable.

On a dit très souvent, mais ceci n'est pas toujours très bien documenté, que la fumée de silice peut être utilisée pour abaisser la perméabilité du béton (1, 2, 3). Récemment, Ozyildirim (4) a montré que la fumée de silice abaissait drastiquement la perméabilité aux ions chlore.

EXPERIENCE

Dans le but d'étudier l'influence de la fumée de silice sur la perméabilité à l'eau, nous avons fabriqué deux séries de béton ayant des rapports E/C de 0,4 et 0,5, avec des dosages en fumées de silice de 0 (référence) 5, 7½, 10 et 20% par rapport à la masse de ciment. La composition de ces différents bétons a été ajustée de telle façon qu'ils contiennent la même quantité de pâte (ciment + eau + fumée de silice), en utilisant un superplastifiant qui maintenait un affaissement constant. De plus, nous avons inclus dans le programme de recherche l'étude d'un béton ayant un rapport E/C de 0,24 contenant des fumées de silice.

MATERIAUX

Dans les deux séries de béton, nous avons utilisé un ciment de type 10 dont la composition chimique est fournie dans le tableau 1. Dans le cas du béton ayant un rapport E/C de 0,24 nous avons utilisé un ciment de type 30 dont la composition chimique est donnée dans le tableau 1 aussi. La fumée de silice provenait d'une industrie locale qui produit un mélange de silicium et de ferrosilicium à 75%. La teneur en SiO_2 de cette fumée de silice est très élevée et sa perte au feu modérée comme on peut le voir dans le tableau 1.

Le granulat fin utilisé était un sable naturel siliceux ayant un module de finesse de 2,50 et une absorption de 1,4. Le gros granulat était un calcaire métamorphique (20-5mm) qui avait une absorption de 0,6.

L'agent entraîneur d'air était un détergent synthétique. Le réducteur d'eau était un polymère ne contenant aucun ion chlore. Le superplastifiant, lorsqu'il fut utilisé, était un sulfonate de naphthalène 42% de solide, avec une densité de 1,21.

COMPOSITION ET CARACTERISTIQUES DES BETONS ETUDIES

La composition des différents bétons est présentée dans les tableaux 2, 3 et 4. Les séries ayant des rapports 0,4 et 0,5 contenaient un entraîneur d'air et un réducteur d'eau. L'affaissement de ces différents bétons fut ajusté entre 65 et 100 mm pour les bétons qui furent mis en place par vibration. Le béton ayant un rapport E/C de 0,24 était un béton fluide sans air entraîné.

Dans chacun des cas, nous avons fabriqué 9 échantillons, 100 x 200 mm pour les essais de résistance en compression à 1, 7 et 28 jours, ces essais furent faits selon la méthode ASTM C-192. A chaque échéance nous avons testé trois échantillons. Deux échantillons de 150 x 300 mm furent fabriqués pour les mesures de perméabilité ainsi qu'une petite dalle de 180 x 500 x 100 mm sur laquelle devaient être prélevés les échantillons pour mesurer la perméabilité aux ions chlore, la perméabilité à l'air et les mesures de porosité. Enfin, nous avons fabriqué un prisme de béton 100 x 100 x 400 mm pour pouvoir mesurer les caractéristiques du système de bulles d'air.

Les facteurs d'espacement des bulles d'air des bétons furent mesurés selon la norme ASTM C-457: "Modified point count method" sur trois surfaces polies 100 x 100 x 20 mm.

Mûrissement des échantillons avant les essais

Le mûrissement des échantillons avant les essais est présenté dans la figure 4. Les échantillons ont reçu le même type de mûrissement jusqu'à la réalisation de l'essai de perméabilité, cependant selon les normes et les procédures établies pour chacun des essais, les échantillons ont subi juste avant d'être testés des traitements différents selon les essais de perméabilité auxquels ils ont été soumis.

Mesure de la perméabilité à l'eau

La perméabilité à l'eau fut mesurée dans des cellules spéciales représentées dans la figure 1. La conception de ces cellules de mesure est dérivée de celle proposée par Bernaix (5) pour mesurer la résistance d'échantillons de roc. Ce design est aussi très similaire à celui proposé par Alegre et al (6). En utilisant un tel type de perméamètre, il n'est pas nécessaire de sécher les cylindres 150 x 300 mm avant de mesurer leur perméabilité à l'eau. La perméabilité à l'eau fut mesurée en écoulement convergent à 28 jours avec des gradients de pression allant jusqu'à 7 MPa (1000 psi).

Perméabilité à l'air

La perméabilité à l'air fut mesurée avec un perméamètre à air développé à l'Institut National des Sciences appliquées de Toulouse par

Thenoz (7). On trouvera dans la figure 2 une représentation schématique de ce perméamètre à l'air. Les essais furent faits à différents gradients de pression entre 93 et 33 kPa.

Deux échantillons (38 x 50 mm) furent extraits de la dalle de 180 x 500 x 100 mm qui furent mûris à l'air dans le laboratoire après 7 jours, ensuite les échantillons furent mûris selon la figure 4. A la fin de la période de mûrissement, la perméabilité à l'air de deux échantillons fut mesurée. Enfin, ces deux échantillons furent séchés à l'étuve à 105°C pour deux jours supplémentaires, et leur perméabilité à l'air fut mesurée de nouveau.

Après le premier séchage, nous dirons que les échantillons ont été séchés à l'air. Après les deux jours à l'étuve, nous dirons que les échantillons ont été séchés en étuve.

Perméabilité aux ions chlore

La perméabilité aux ions chlore a été mesurée avec un Rapid Chloride-Ion Permeameter, selon la norme ASSHTO T277-831 (Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete) (8). Nous avons représenté schématiquement cet appareil dans la figure 3. Deux échantillons (95 x 50 mm) ont été prélevés à même de chacune des dalles à 28 jours. Le mode de mûrissement de ces échantillons avant les essais est représenté dans la figure 4.

Porosité au mercure

Des essais de porosité au mercure ont été faits sur de petits échantillons de béton 20 x 100 mm en utilisant un porosimètre au mercure Carlo Erba où le mercure peut être intrudé dans l'échantillon jusqu'à des pressions de 150 MPa. Cette pression correspond à un rapport de diamètre équivalent à 50 Å. Dans chacun des cas nous avons toujours

utilisé deux échantillons dont le mûrissement est représenté en figure 4. Chaque échantillon fut séché à l'air pendant 24 heures dans une étuve ventilée avant d'être testé.

PRESENTATION DES RESULTATS

Résistance en compression

Les résultats obtenus lors des essais de résistance en compression sont présentés pour les deux séries de béton dans le tableau 5. Dans ce tableau, on peut voir que la substitution d'un certain volume de ciment par de la fumée de silice augmente toujours la résistance en compression à 28 jours, mais cependant dès que le pourcentage dépasse 7,5% les gains en résistance en compression sont beaucoup moins substantiels que ceux obtenus lorsque la substitution de fumée de silice se fait dans le domaine 5 à 7,5%.

Facteur d'espacement

Les tableaux 2 et 3 montrent qu'il fut possible d'incorporer un bon système de bulles dans les bétons contenant de la fumée de silice, bien que le dosage en agent entraîneur d'air a dû être augmenté légèrement lorsque l'on a utilisé des fumées de silice. Tous les facteurs d'espacement sont bien situés en dessous de la valeur de 200 μm recommandé par l'ACI. Cette valeur de 200 μm est satisfaisante selon les dernières recherches (9).

Mesures de porosité au mercure

Le volume de mercure intrudé (première intrusion) est présenté dans les figures 5 et 6. Sur ces courbes on peut voir qu'il n'y a pas de différence majeure dans la forme des courbes d'intrusion pour les bétons des séries 0,4 et 0,5. On peut cependant remarquer que la

structure des courbes des bétons aux fumées de silice est quelque peu plus fine que celle des bétons ne contenant pas de fumée de silice. La présence de pores avec un diamètre d'entrée supérieur à $0,1 \mu\text{m}$ peut être observée dans ces deux séries. Ces résultats ont déjà été observés dans des bétons aux fumées de silice contenant des réducteurs d'eau et des superplastifiants (2).

Le volume total de mercure intrudé est légèrement plus faible pour la série 0,4 que pour la série 0,5. Il semble en outre que ce volume décroît dans les deux séries très légèrement au fur et à mesure que le dosage en fumée de silice augmente. Cependant, les volumes intrudés demeurent toujours dans le même ordre de grandeur. Ceci n'est pas le cas pour le béton de rapport E/C 0,24 dans lequel le volume de mercure intrudé est très très faible ($23\text{mm}^3/\text{g}$ au lieu de $50\text{mm}^3/\text{g}$ en moyenne pour la série 0,4 et 0,5).

Mesures de la perméabilité à l'eau

Les spécimens furent conservés 7 jours dans les cellules tandis que la pression d'eau fut augmentée graduellement jusqu'à 7 MPa. Le seul béton sur lequel on a été capable de mesurer une perméabilité fut le béton de référence de rapport E/C 0,5. Sa perméabilité était égale alors à 3×10^{-14} m/s. Il nous fut impossible de mesurer une perméabilité à l'eau quelconque dans les autres bétons. On peut donc les considérer à toute fin utile comme imperméables à l'eau.

Perméabilité aux ions chlore

On trouvera dans les figures 7 et 8 l'intensité des courants qui ont traversé les bétons des séries 0,4 et 0,5. On peut constater que le courant qui traverse le béton de référence est toujours supérieur à celui qui traverse les bétons contenant des fumées de silice. Ces résultats sont présentés dans la figure 9 de façon légèrement différente, en effet nous avons reporté la quantité de charges électriques qui est passée à travers l'échantillon de béton après 6 heures de fonctionnement, en fonction du pourcentage de fumée de silice dans le mélange.

Les valeurs obtenues pour les bétons de référence de la série 0,4 et 0,5 sont conformes à ceux donnés par Whiting (8). Ces figures montrent clairement l'influence bénéfique des fumées de silice sur la perméabilité aux ions chlore, tel que mentionné déjà par Ozyildirim (4). Ces figures présentent aussi une très bonne corrélation avec les résultats obtenus lors des résistances en compression qui ont montré que lorsque l'on dépasse un niveau de 7,5% de substitution, les gains de résistance en compression sont de moins en moins significatifs. Selon l'échelle de perméabilité fournie par Whiting (8), on peut voir que tous les bétons de la série 0,4, lorsqu'ils contiennent des fumées de silice, ont une perméabilité aux ions chlore équivalente à celle des bétons modifiés au latex.

Dans le cas du béton de rapport E/C 0,24, la quantité de charge électrique totale passée en 6 heures fut égale à 150 Coulombs. Ce niveau de perméabilité aux ions chlore n'est atteint que dans les bétons imprégnés de polymère selon Whiting (8).

Perméabilité à l'air

Les résultats de perméabilité à l'air sont présentés dans le tableau 6 et la figure 10 où l'on peut voir que le type de séchage influence grandement la mesure de la perméabilité à l'air des échantillons de béton. Des échantillons de béton séchés à l'étuve ont une perméabilité supérieure à ceux qui furent simplement séchés à l'air. Ces résultats correspondent bien à ceux présentés par Nagataki and Ujike (10).

Dans la figure 10, on peut aussi voir, en général, que plus le rapport E/C est élevé, plus la perméabilité à l'air est élevée pour le même type de séchage. Dans le cas du béton de rapport E/C 0,24 la perméabilité à l'air après séchage à l'air était égale à 2×10^{-8} m/s, tandis que après séchage à l'étuve, il était égal à 11×10^{-8} m/s. La figure 10 indique clairement que la fumée de silice, que les bétons aux fumées de silice, ont une perméabilité à l'air supérieure à celle des échantillons de référence, et que cette perméabilité augmente avec le dosage en fumée de silice. Ces résultats sont à l'opposé de ceux trouvés par Nagataki and Ujike (10). Leur béton était mûri plus longtemps et testé à plus court terme que les nôtres.

Les valeurs de perméabilité à l'air plus faibles obtenues pour le dosage en fumées de silice de 10% n'ont pu être expliquées et pourraient être reliées à un manque d'homogénéité du béton dans la dalle où nous avons prélevé les échantillons.

CONCLUSION

Le concept de perméabilité d'un béton est beaucoup plus complexe qu'on ne le pense à première vue. Le coefficient de perméabilité non seulement varie selon le type de fluide qui est utilisé pour mesurer, mais aussi selon la préparation de l'échantillon.

On a trouvé en particulier que des bétons ayant des rapports E/C de 0,5 ou moins étaient pratiquement imperméables car inférieurs à 10^{-14} m/s, qu'ils contiennent ou non de la fumée de silice.

Si des ions chlore passent au travers d'un béton sans fumée de silice, plus le rapport E/C sera élevé, plus les ions chlore passeront facilement au travers du béton. Ceci reste vrai pour les bétons qui contiennent des fumées de silice, cependant l'effet le plus notoire des fumées de silice sur la perméabilité aux ions chlore demeure un abaissement très spectaculaire de la perméabilité aux ions chlore, ce qui fait que les bétons contenant des fumées de silice ont une perméabilité aux ions chlore du même ordre de grandeur que celle des bétons dans lequel on a incorporé des latex. Dans le cas d'un béton ayant un rapport E/C de 0,24, on obtient même une perméabilité aux ions chlore du même ordre de grandeur que celle qu'on observe dans les bétons imprégnés de polymère. Les expériences présentées ont démontré qu'au delà d'un dosage de 7,5% en fumée de silice, on n'observait pratiquement pas de décroissance dans la perméabilité aux ions chlore. Ces résultats sont très comparables à ceux que l'on a mesuré dans le cas des résistances en compression.

La perméabilité au gaz des bétons peut être aussi reliée au rapport eau/ciment dans une certaine mesure. En effet, plus le rapport E/C est faible, plus la perméabilité à l'air est faible. Cependant, le type de séchage influence grandement la mesure de la perméabilité à l'air lorsqu'on introduit des fumées de silice dans le mélange, la perméabilité à l'air des bétons aux fumées de silice augmente en proportion directe avec le dosage en fumée de silice et l'efficacité du séchage.

L'effet d'un produit chimique particulier ou d'un ajout minéral sur la perméabilité du béton nécessite donc une compréhension très claire du type de fluide qui va pénétrer le béton et du type de séchage auquel ce béton sera sujet.

Les bétons de chantier sont exposés très rarement à des conditions aussi bien définies que celles que nous avons utilisées dans nos expériences. Les conditions réelles de chantier demeurent souvent comprises entre ces conditions extrêmes, si bien que la perméabilité d'un béton donné peut varier grandement selon son environnement. Il existe cependant toujours un type de fluide qui sera beaucoup plus dangereux pour un béton donné. Ce type de fluide contrôlera l'attaque du béton si elle existe.

REFERENCES

1. Markestad, A., "An Investigation of Concrete in Regard to Permeability Problems and Factors Influencing the Results of Permeability Tests". Cement and Concrete Research Institute. The Norwegian Institute of Technology STF, Report 65 A 77027, pp. 238-242.
2. Wolsiefer, J., "Ultra High Strength Field Placeable Concrete in the Range 10,000 to 18,000 psi". Convention Annuelle ACI, Atlanta, Jan. 1982, pp. 1-23.
3. Hooton, R.D., "Some Aspects of Durability with Condensed Fume in Pastes, Mortar and Concretes". First International Workshop on Silica Fume, Montréal, Mai 1986, papier No. 19.
4. Ozyildirim, C., 1987. "Laboratory Investigation of Concrete Containing Silica Fume for Use in Overlays". ACI Materials Journal, Vol. 84, No. 1, pp. 3-7.
5. Bernaix, "Etude géotechnique de la roche de Malpasset, Dunod, Paris, 1967.
6. Lechuga, J.A., and Alegre, S., "Concrete Permeability with Fly-ash from Cercs. - Results Obtained with a New Method", Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, Avril 1986, pp. 1-52.
7. Thenoz, Ph.D. Thèse, Université de Toulouse, France, 1968.
8. Whiting, D., "In Situ Measurements of the Permeability of Concrete to Chloride Ions". American Concrete Institute, publication spéciale, SP-82, Détroit, 1982, pp. 501-524.
9. Pigeon, M., Aïtcin, P.-C., and Laplante, P., "Comparative Study of the Air-void Stability in a Normal and Condensed Silica Fume Field Concrete". A être publié in Concrete International.
10. Nagataki, S., Ujike, I., "Air Permeability of Concretes Mixed with Fly Ash and Condensed Silica Fume". SP-91, Vol. 2, 1986, pp. 1049-1068.

TABEAU 1. COMPOSITION CHIMIQUE DES DIFFERENTS MATERIAUX UTILISES

	Si ₀ 2	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO (total)	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
Type 10	21,2	4,1	3,0	62,0	2,6	0,26	0,99	3,4	2,1
Type 30	21,0	4,6	1,8	64,0	2,8	0,75*		3,3	1,3
Fumée de silice	91,8	0,4	1,7	0,5	0,3	0,1	1,3	--	3,5

* Na₂O équivalent

TABEAU 2. COMPOSITION ET CARACTERISTIQUES DE LA SERIE DE BETON AYANT UN RAPPORT E/C 0,4

		E/C = 0,40				
Fumée de silice (% en masse de (ciment))		0	5	7,5	10	20
(kg/m ³)	Eau	152	152	150	149	146
	Ciment	380	360	347	336	292
	Fumée de silice	0	19	28	37,5	73
	Gros granulat	1060	1060	1050	1050	1045
	Granulat fin	755	760	755	750	750
(mL/m ³)	A.E.A.	86	141	194	155	270
	Réducteur d'eau	950	950	950	930	925
	Superplastifiant	0	1670	2800	1240	3850
(mm)	Affaissement	75	70	80	65	80
(%)	Frais	5,1	4,6	5,3	5,5	5,8
	Teneur en air Durci	4,3	3,8	4,3	4,8	4,8
(µm)	Facteur d'es- pacement (L)	150	150	125	125	110

TABLEAU 3. COMPOSITION ET CARACTERISTIQUES DE LA SERIE DE BETON AYANT UN RAPPORT E/C 0,5

		E/C = 0,50				
		0	5	7,5	10	20
		Fumée de silice (% en masse) de ciment				
(kg/m ³)	Eau	151	153	150	151	145
	Ciment	302	290	277	273	231
	Fumée de silice	0	15,3	22,5	30	58
	Gros granulat	1060	1060	1050	1055	1050
	Granulat fin	815	820	815	800	795
(mL/m ³)	A.E.A.	45	74	93	71	225
	Réducteur d'eau	760	760	755	755	725
	Superplastifiant	0	625	810	770	1880
(mm)	Affaissement	100	80	80	90	90
(%)	frais	5,3	4,5	5,7	5,5	6,7
	Teneur en air durci	3,6	5,1	4,8	4,6	6,5
(µm)	Facteur d'es-pacement (L)	175	200	150	150	110

TABLEAU 4. COMPOSITION ET CARACTERISTIQUES DU BETON DE RAPPORT E/ 0,24

(kg/m ³)	Eau	141
	Ciment	552
	Fumée de silice	35
	Granulat fin	690
	Gros granulat	1055
(L/m ³)	Superplastifiant	9,9
(mm)	Affaissement	Fluide*
(%)	Teneur en air	1,6
Résistance en compression		
	MPa	
	1d	71,5
	7d	80,4
	28d	84,6

* Non mesurable

TABLEAU 5. RESISTANCE EN COMPRESSION DES BETONS DE LA SERIE 0,4 ET 0,5

Rapport E/C		E/C = 0,4					E/C = 0,5				
Dosage en fumée de silice (%)		0	5	7,5	10	20	0	5	7,5	10	20
Résistance en compression (MPa)	1d	19,8	--	22,8	23,0	22,4	13,4	15,3	12,9	13,0	10,6
	7d	35,2	37,6	37,6	36,1	39,7	28,9	31,5	30,1	29,8	22,6
	28d	41,6	46,1	52,2	48,5	53,1	36,0	42,8	42,9	42,8	40,0

TABLEAU 6. PERMEABILITE A L'AIR

		E/C = 0,4				
Dosage en fumée de silice (%)		0	5	7,5	10	20
Absorption (%)		5,8	6,1	5,2	6,1	5,9
Perméabilité 10-8 m/s	Séché à l'air	6	6	6	10	12
	Séché à l'étuve	20	21	19	32	38

		E/C = 0,5				
Dosage en fumée de silice (%)		0	5	7,5	10	20
Absorption (%)		6,2	6,2	6,7	6,1	7,7
Perméabilité 10-8 m/s	Séché à l'air	5	9	11	7	25
	Séché à l'étuve	13	29	34	21	74

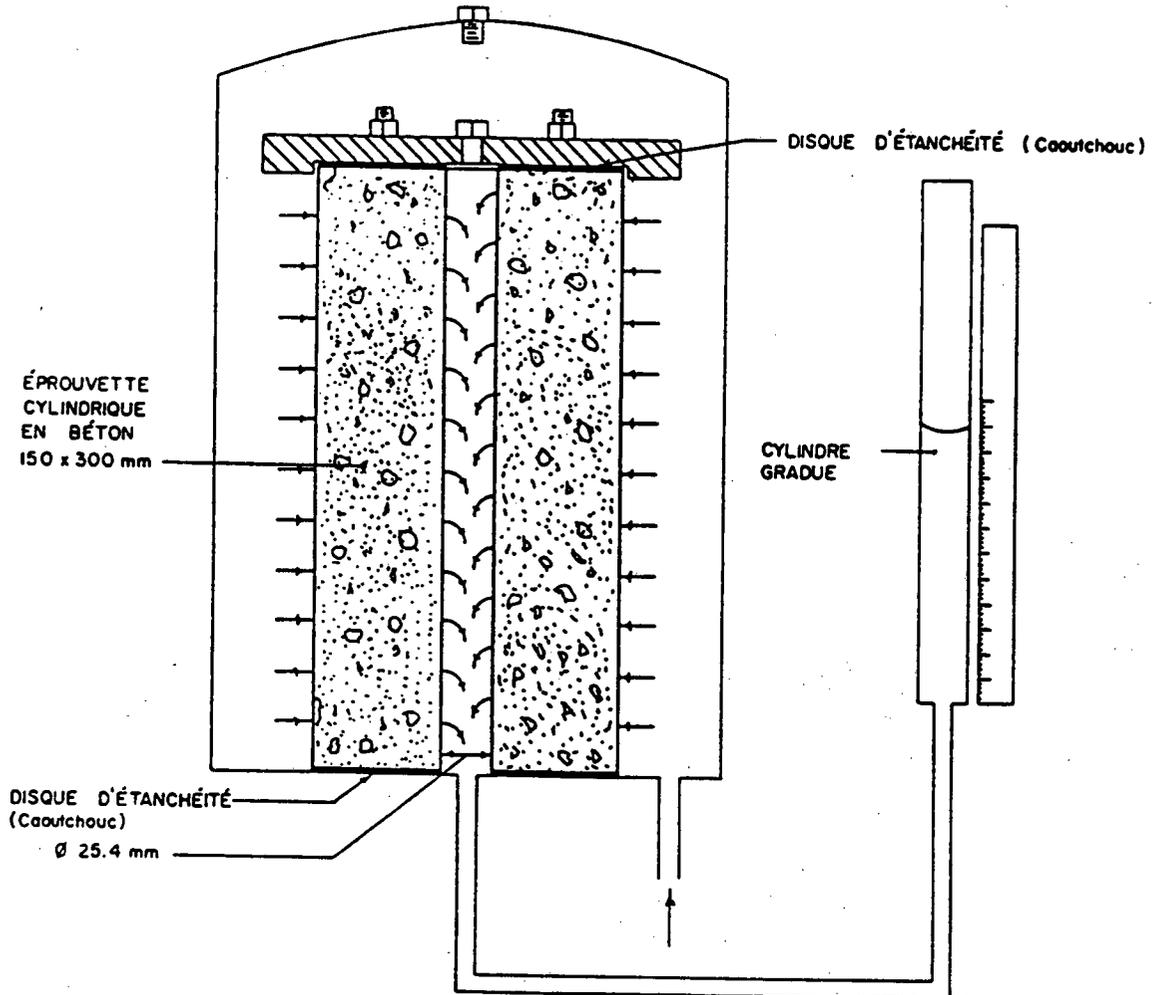


Figure 1- Représentation schématique des perméamètres à l'eau.

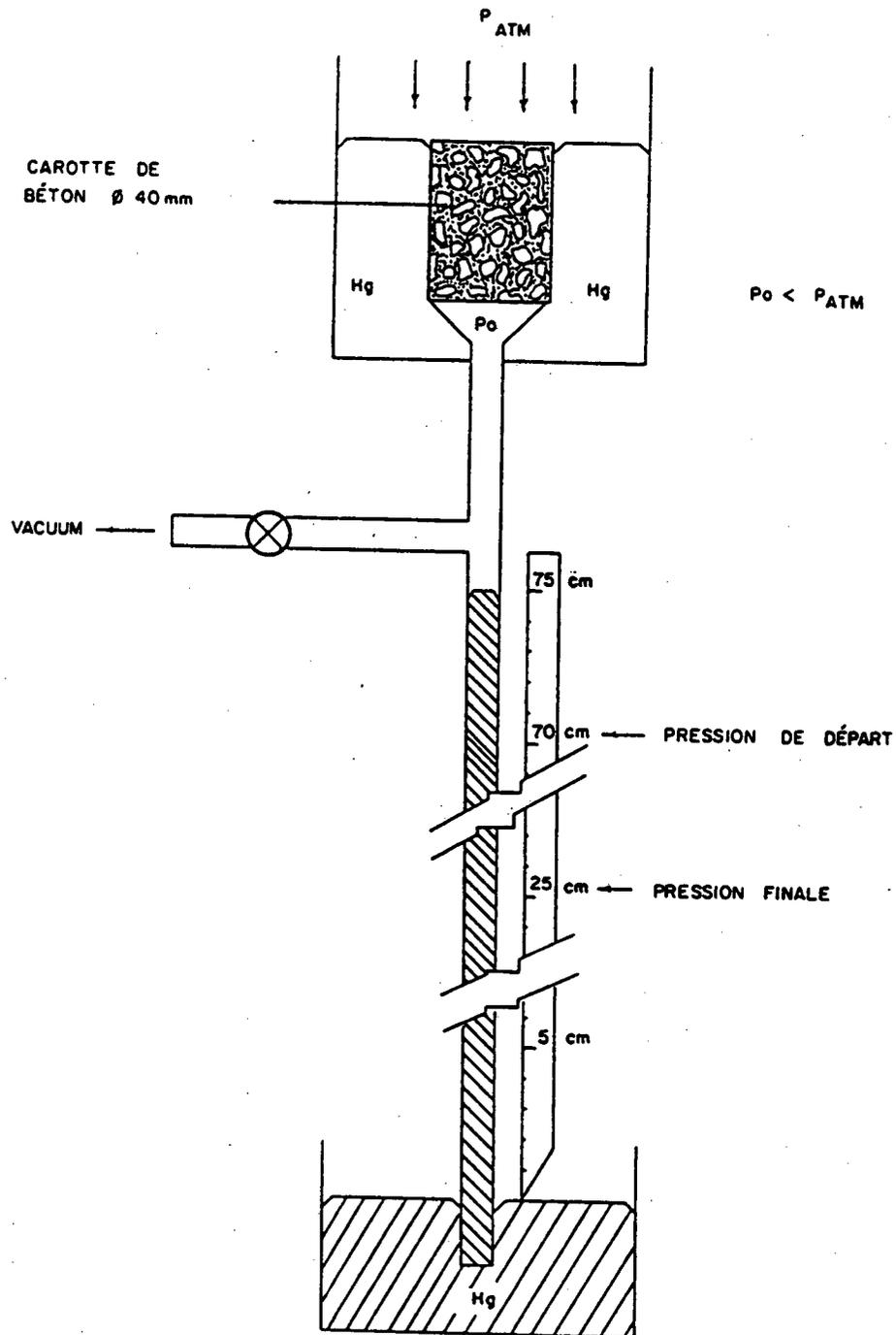


Figure 2- Représentation schématique des perméamètres à l'air.

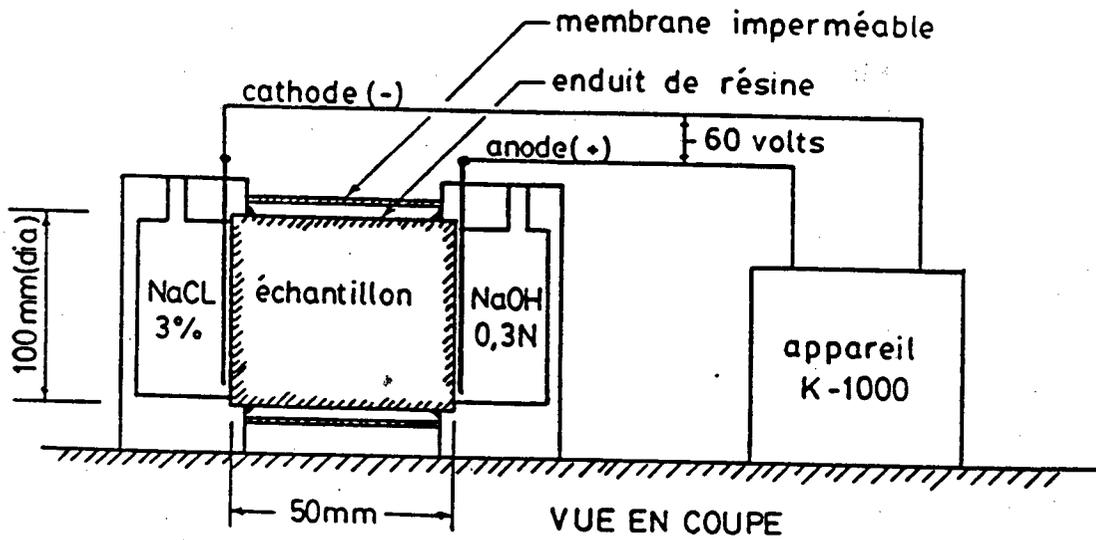


Figure 3- Schéma d'un perméamètre aux ions chlore.

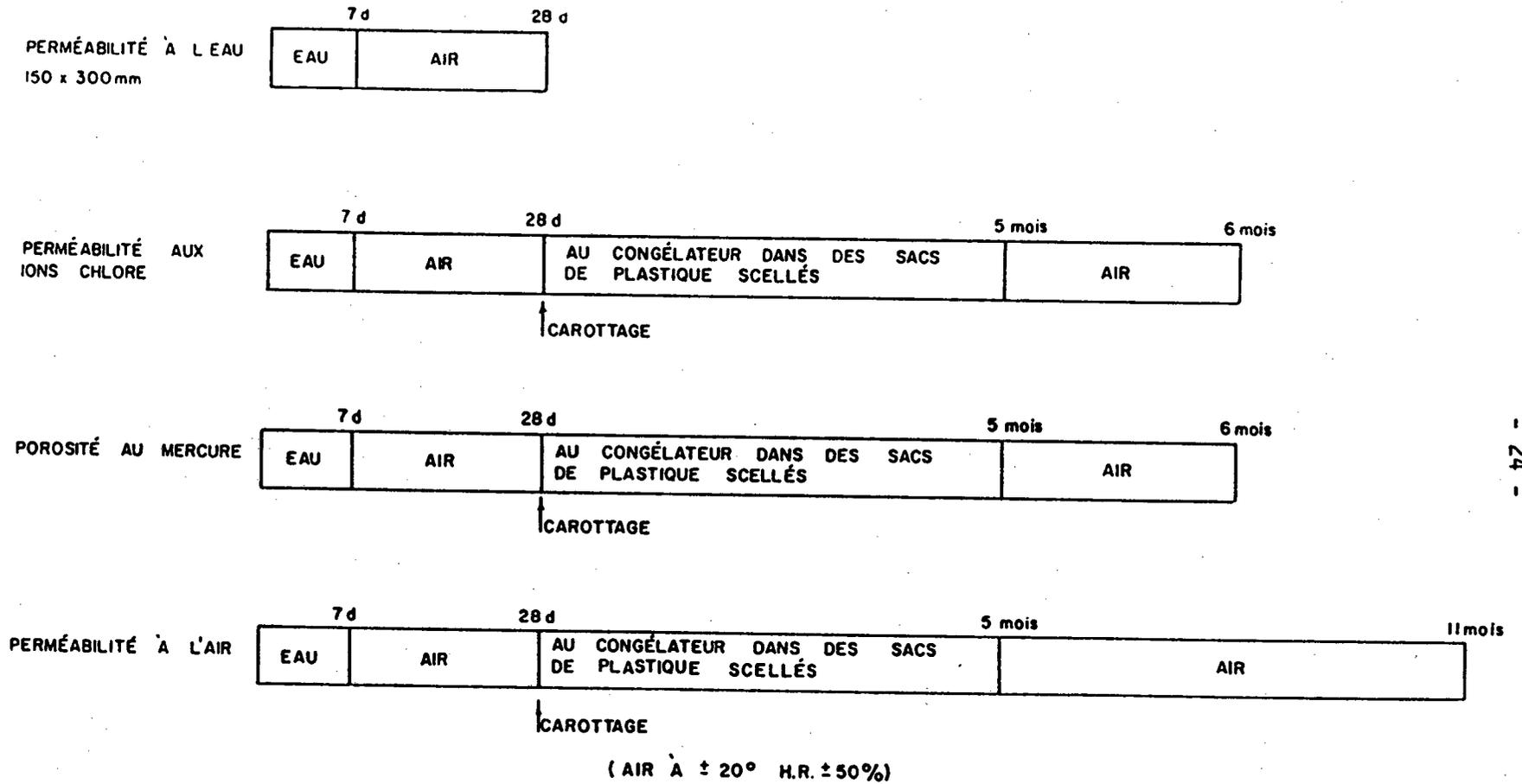


Figure 4- Mûrissement des bétons avant les essais.

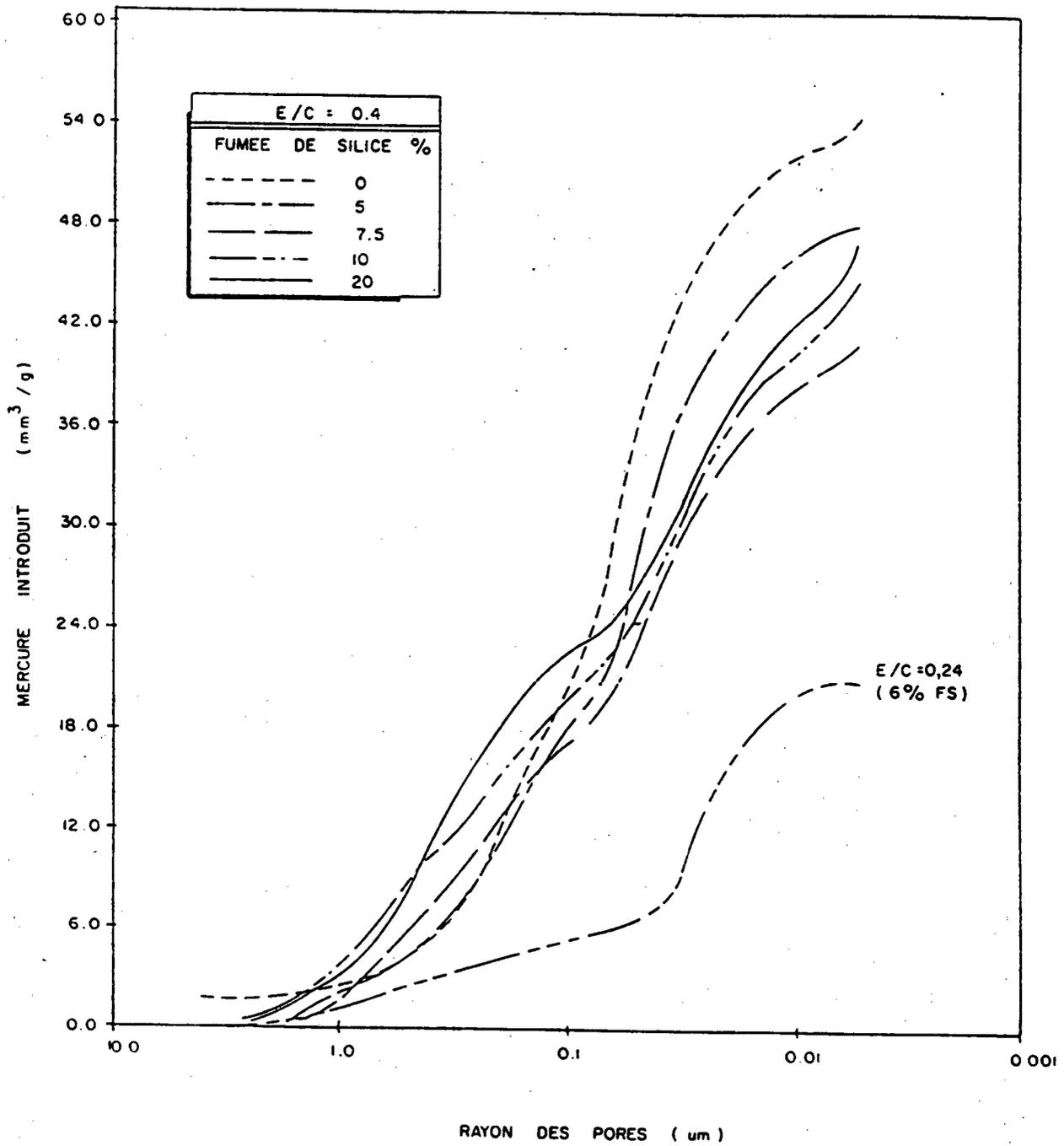


Figure 5- Courbes d'intrusion de mercure pour la série des bétons
E/C = 0,4

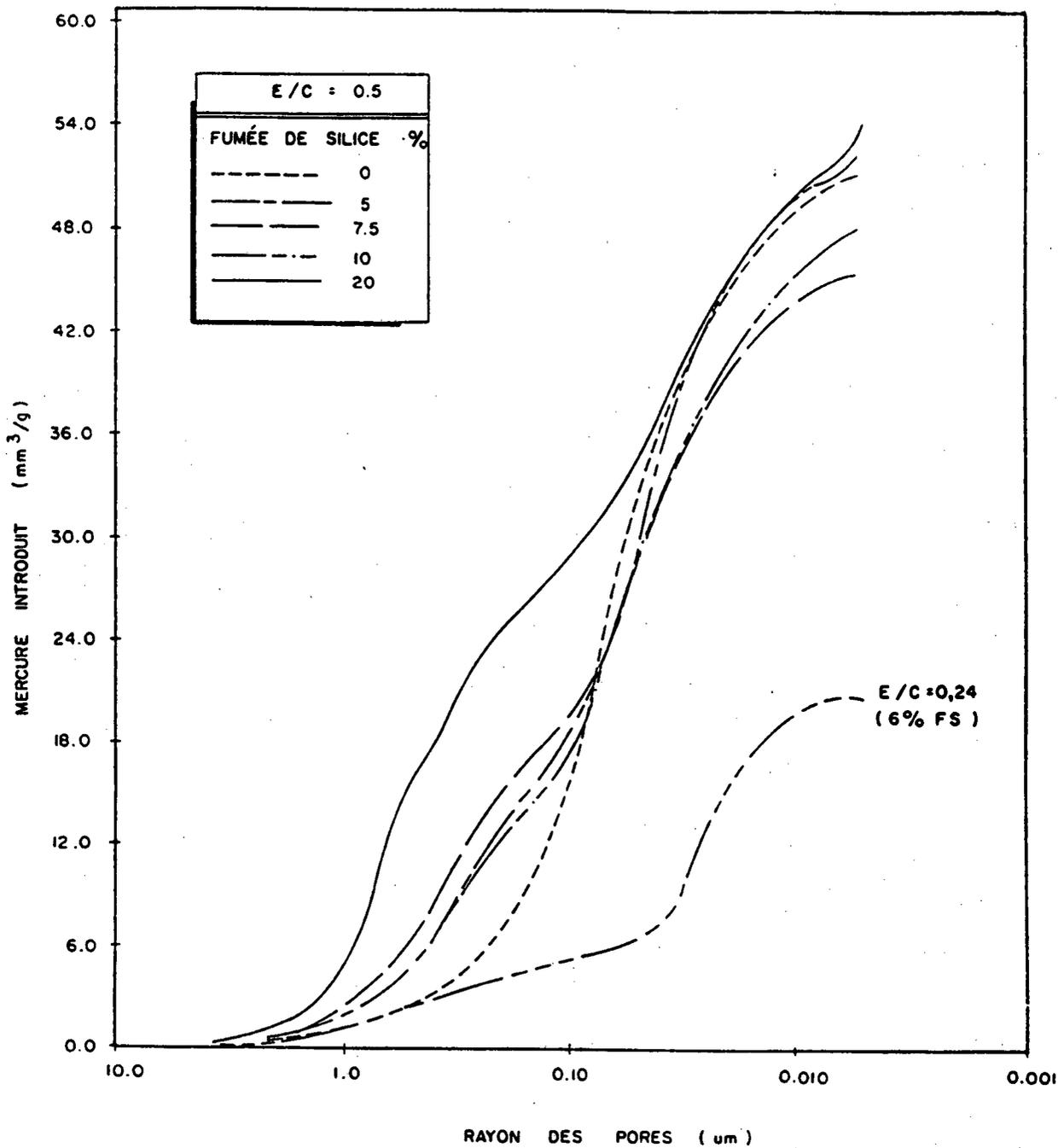


Figure 6 - Courbes d'intrusion de mercure pour la série des bétons
E/C = 0,5

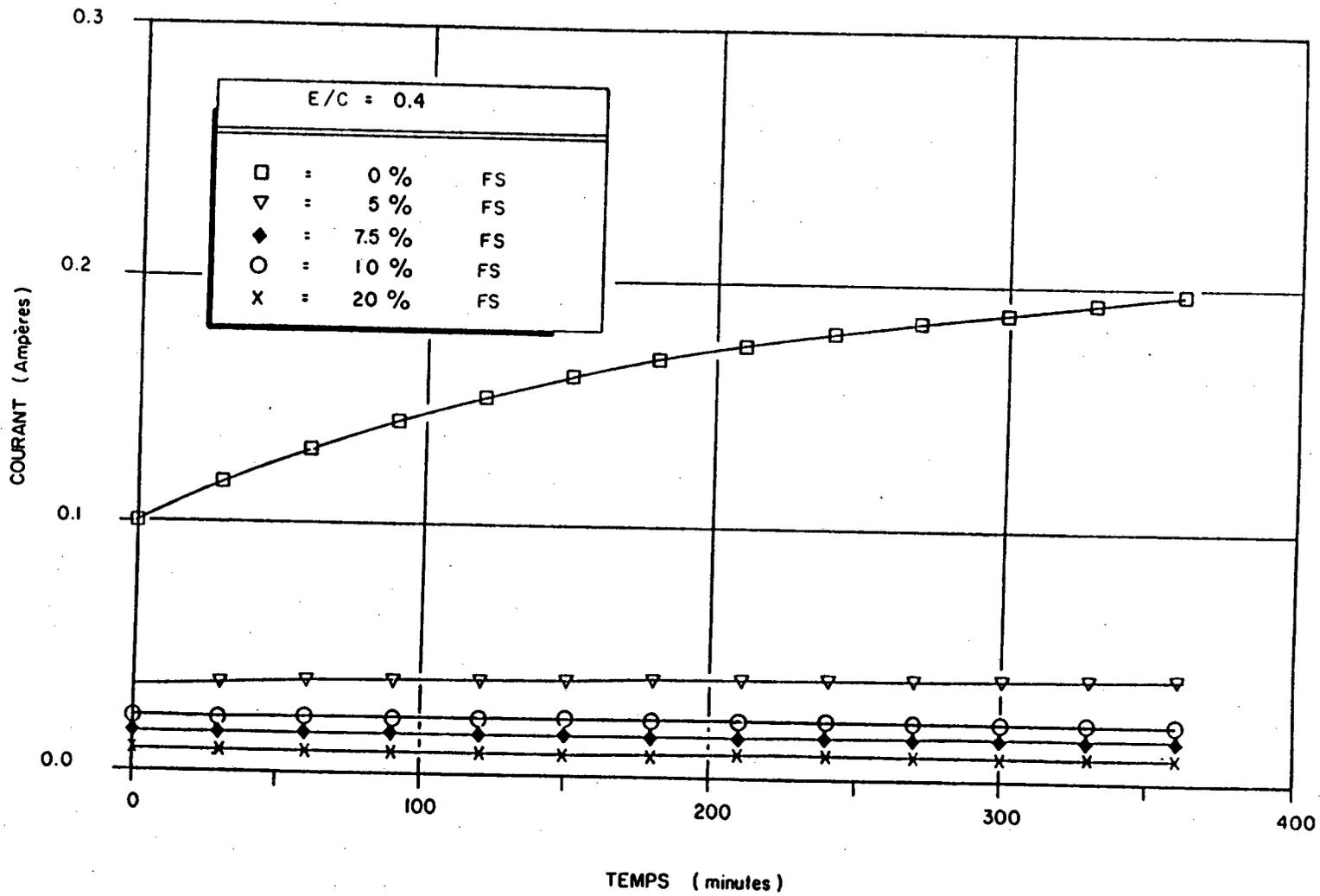


Figure 7 - Intensité du courant en fonction du temps pour la série des bétons E/C = 0,4

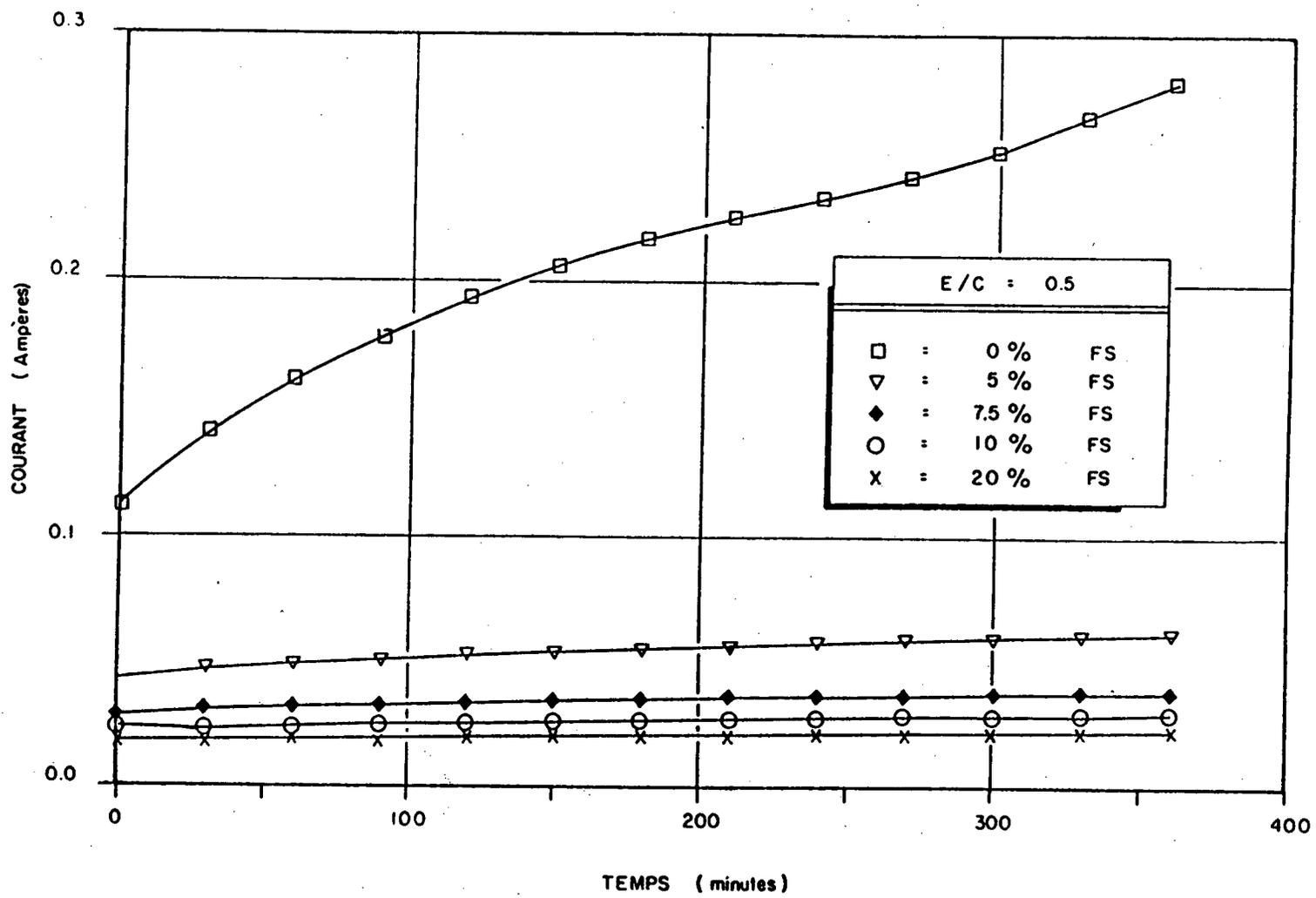


Figure 8 - Intensité du courant en fonction du temps pour la série des bétons E/C = 0,5

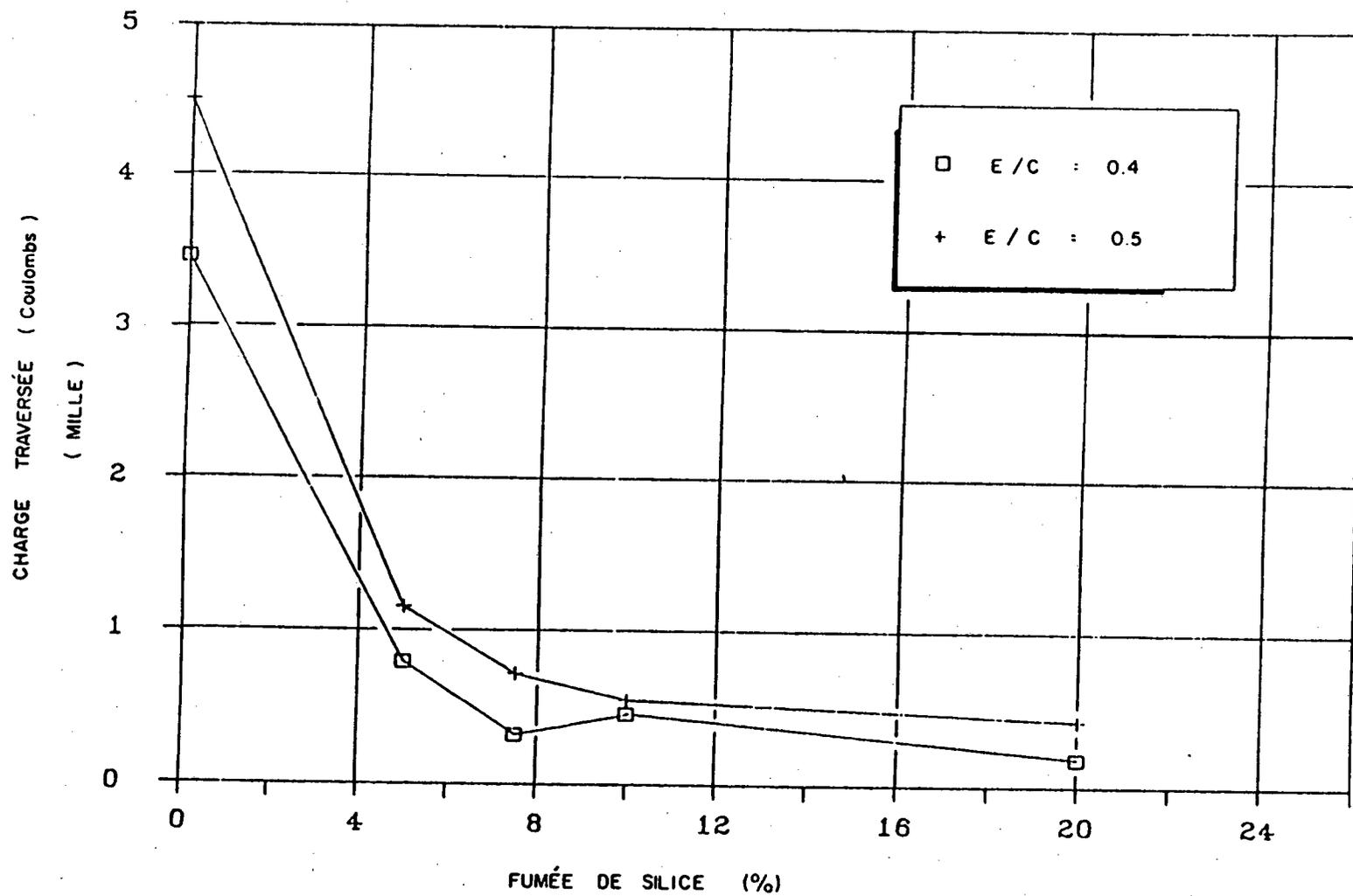


Figure 9 - Perméabilité aux ions chlore (en Coulombs) en fonction du dosage en fumée de silice.

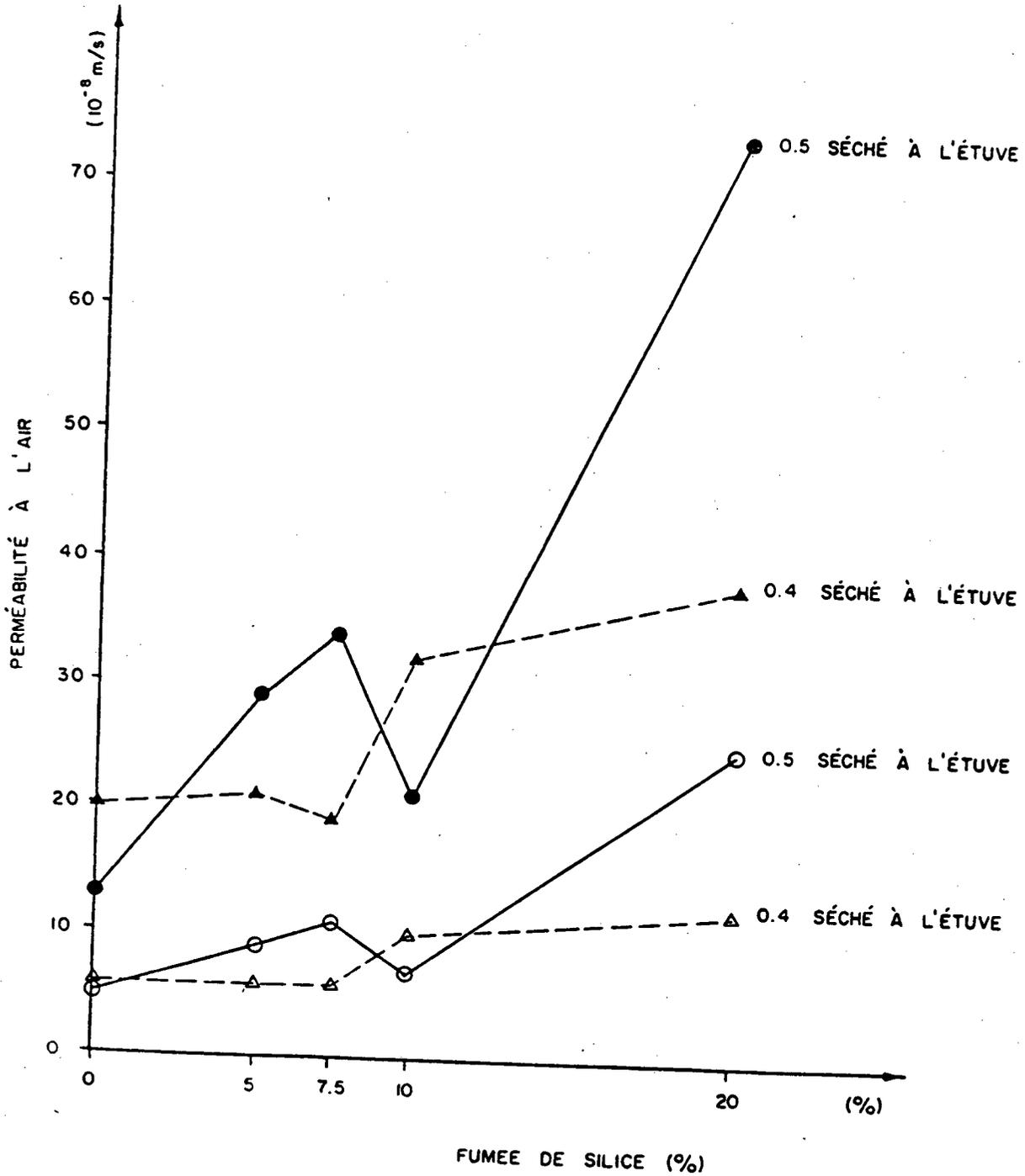


Figure 10 - Perméabilité à l'air en fonction du dosage en fumée de silice et du type de séchage.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 222 588