

2.3.2 Destruction par écaillage

- Il n'existe **pas encore de modèle** en mesure d'expliquer le mode de destruction des surfaces de béton soumises à l'action **combinée du gel et des agents de déglçage**.
- Quelques chercheurs ont déjà proposé des mécanismes mais ce phénomène semble particulièrement **difficile à modéliser**, en raison du grand nombre de variables qui peuvent être impliquées dans le processus.
 - Les **caractéristiques physiques de la surface** (porosité, perméabilité, microfissuration) sont souvent **mal connues** et très variables en fonction des conditions de mise en place et de mûrissement.
 - Les **conditions d'exposition sont très variables**. Par exemple, le degré de saturation de la surface qui peut passer de presque nul en été à presque complet en hiver.
 - La **concentration** et le **type d'agent de déglçage** peuvent être très **variables**.
 - Les surfaces en contact avec l'atmosphère sont soumises à des **cycles thermiques** qui peuvent être **plus étendus et plus brusques** comparativement au coeur de l'élément de béton où les conditions climatiques sont probablement plus "tempérées".
- **Plusieurs types de produits chimiques** peuvent causer de l'écaillage.
 - Verbeck et Klieger ¹ ont montré qu'on pouvait endommager la surface du béton non seulement avec des sels de déglçage courants (NaCl, CaCl₂) mais aussi avec des **produits qui ne cristallisent pas comme de l'alcool éthylique**.

¹ VERBECK, G. J. et KLIEGER, P. 1957 "Studies of 'Salt' Scaling of Concrete", Highway Research Board Bulletin No. 150, pp. 1-13.

- Browne et Cady ² ont émis l'hypothèse que la destruction (avec CaCl_2) pourrait être due à une action chimique mais en **général on considère plutôt qu'il s'agit d'une attaque physique** ^{1 3,4}

Quoi qu'il en soit, l'utilisation d'un agent de déglacage amplifie très certainement l'écaillage puisque Pigeon et al. ⁵ ont montré que le phénomène était presque inexistant en présence d'eau ne contenant pas de substances en solution.

- On admet maintenant que les concentrations **assez faibles** sont les plus **dommageables** (Fig 2.67). **Elles varient de 3 à 6 % selon les produits déglaçants** utilisés ^{1 2 4}
- Quelques études, dont celle de Litvan ³ et MacInnis et Whiting ⁶, ont montré que la **présence de sels de déglacage (NaCl)** en solution dans les pores peut **augmenter le degré de saturation** de la pâte.
 - Ce degré de saturation plus élevé serait dû au fait que l'eau **contenant des sels** en solution possède une **pression de vapeur plus faible que celle de l'eau pure**.
 - La vapeur de l'air ambiant a plus **fortement tendance** à se **condenser dans l'eau salée** que dans l'eau pure.

² BROWNE, F. P. et CADY, P. D. 1975 " Deicer Scaling Mechanisms in Concrete", Durability of Concrete, ASTM Special Publication, SP-47, pp. 101-119.

³ LITVAN, G. G. 1975 "Phase Transition of Adsorbates: VI, Effect of Deicing Agents on the Freezing of Cement Paste", Journal of the American Ceramic Society, Vol. 58, No 1-2, pp. 26-30.

⁴ ROSLI, A. et HARNIK, A. B. 1980 "Improving the Durability of Concrete to Freezing and Deicing Salts", Durability of Building Materials and Components, ASTM Special Technical Publication, STP-691, pp. 464-473.

⁵ PIGEON, M.; PERRATON, D. et PLEAU, R. 1987 "Scaling Tests of Silica Fume Concrete and the Critical Spacing Factor Concept", Concrete Durability, American Concrete Institute Special Publication, SP-100, pp. 1155-1182.

⁶ MACINNIS, C et WHITING, J. D. 1979 "The Frost Resistance of Concrete Subjected to a Deicing Agent", Cement and Concrete Research, Vol. 19, No 3, pp. 325-336.

- Il en résulte un **degré d'humidité plus important** dans les bétons en contact des **sels déglaçants**, ce qui favorise évidemment les dommages dus au gel.

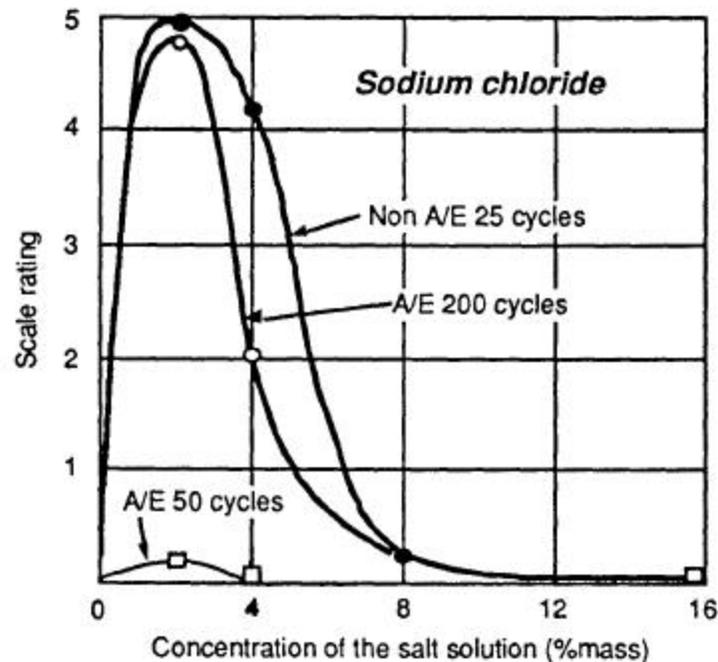


Fig 2.67 - Effet de la concentration en NaCl sur l'écaillage de surface [tiré de VERBECK, G.J., KLIEGER, P. (1957) *Studies of "salt" scaling of concrete*, Highway Research Board Bulletin, n° 150, p. 1-13.

- On sait depuis longtemps que les bulles **d'air entraînées** permettent de **diminuer** les dommages dus à **l'écaillage** ¹⁷.
- Il est possible de relier la teneur en air et surtout le **facteur d'espacement** des vides d'air à la **résistance à l'écaillage** du béton.
- Les différents mécanismes de destruction ne permettent pas tous d'expliquer ce rôle positif des bulles d'air.
 - C'est souvent une des raisons qui laisse croire qu'ils ne modélisent pas complètement le phénomène de l'écaillage. On se doit toutefois

⁷ FAGERLUND, G. 1986 *Effect of Air-Entraining and Other Admixtures on the Salt-Scaling Resistance of Concrete*, Présenté au Chalmers International Seminar on Some Aspects of Admixtures and Industrial By-Products on the Durability of Concrete, 28-29 avril 1986, 33 p.

de considérer tous les processus susceptibles de provoquer même une très faible **microfissuration de la surface**.

- Il ne faut qu'un très petit nombre de fissures pour décoller un petit flocon de la surface, compte tenu de la grande disponibilité de l'eau lors du gel (**formation de glace dans les fissures**).

2.3.2.1 Mécanismes de destruction

n Pressions hydrauliques

- Le modèle des **pressions hydrauliques**, proposé par **Powers**, peut être utilisé pour expliquer l'écaillage du béton. ²,
- Selon ce modèle, l'écaillage serait dû à des pressions hydrauliques générées sous la surface.
 - **L'ampleur** de ces pressions est principalement fonction de la **quantité d'eau** qui **gèle** lors des cycles thermiques.
 - Le **degré de saturation** et la concentration en ions de la solution contenue dans les pores influencent les dommages lors du gel.
 - Un degré de **saturation élevé** (près de la surface) favorise évidemment la formation d'une plus grande quantité de glace.
 - Les **concentrations** en sels de déglacage les plus **faibles** sont les **plus dommageables** car elles abaissent moins le point de fusion de la glace lors du gel.
- En observant les débris, en forme de minces petits flocons, Browne et Cady ² ont émis l'hypothèse que les **pressions hydrauliques maximales** sont générées à une **profondeur correspondant à peu près à l'épaisseur des "écailles"**.
 - De part et d'autre de ce plan de rupture, les pressions sont plus faibles parce que la **teneur en ions** de la solution au dessus est

trop grande ou parce que le **degré de saturation** de la pâte au dessous est **moins grand** (Fig 2.68)

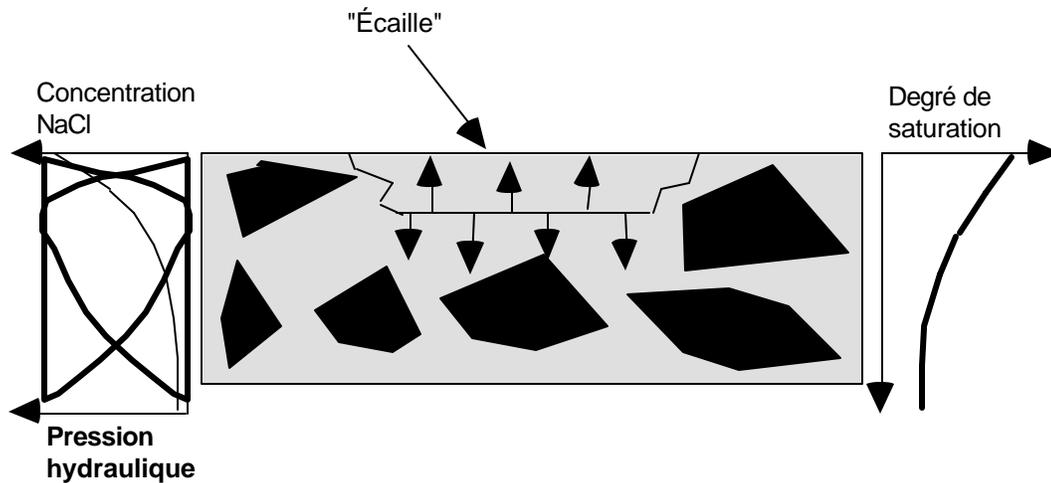


Fig 2.68 - Mécanisme de formation des "écailles" selon la théorie des pressions hydrauliques

- Le modèle des pressions hydrauliques ne **permet pas d'expliquer pourquoi** le béton peut **s'écailer** même en présence de produits qui **n'augmentent pas de volume en gelant** (alcool).
- Selon le modèle des pressions hydrauliques, **l'augmentation du taux de gel** devrait **augmenter** l'écailage alors qu'on ne **mesure pas cet effet en laboratoire**.

n Pressions osmotiques

Le modèle des pressions osmotiques est celui qui explique le mieux l'action néfaste des sels fondants.

- Les **dommages** sont surtout localisés **près de la surface**, car les pressions osmotiques y sont plus intenses en raison de la plus **forte concentration en sels fondants**

- Selon Fagerlund ⁸, l'écaillage pourrait être le résultat de **l'action combinée des pressions hydrauliques et osmotiques** (Fig 2.69). Ce modèle permettrait d'expliquer pourquoi les **concentrations les plus agressives sont comprises entre 3 et 6%**.

- Pour de très **faibles concentrations** en sels fondants, les contraintes internes seraient surtout générées que par les **pressions hydrauliques** et très peu par les pressions osmotiques (car peu de sels en solution).
- Plus la **concentration en sel fondant augmente**, plus l'importance des pressions hydrauliques diminue car le point de fusion de glace s'abaisse (c'est de plus en plus difficile de former de la glace). Par contre, les plus **fortes concentrations** en sels favorisent le développement des **pressions osmotiques**.

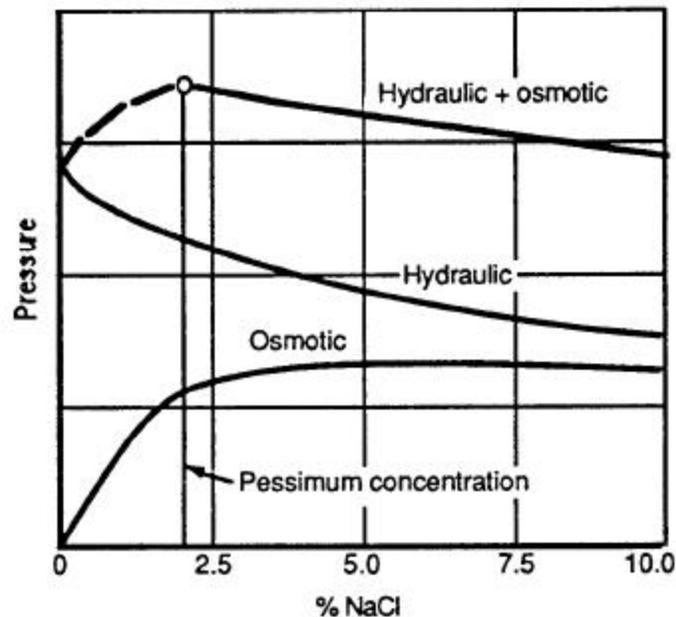


Fig 2.69 - Courbes hypothétiques de la pression se développant dans les pores d'une pâte de ciment qui gèle.
[tiré de Fagerlund, G. 1975, *Studies of the destruction mechanisms at freezing of porous materials*, Proceeding of the sixth international congress on the

⁸ FAGERLUND, G. 1975, *Studies of the destruction mechanisms at freezing of porous materials*, Proceeding of the sixth international congress on the problems raised by frost action, Le Havre, France, Fondation française d'études nordiques, p.. 166-196

problems raised by frost action, Le Havre, France, Fondation française d'études nordiques, p.. 166-196].

- En **additionnant** l'effet des pressions osmotiques et hydrauliques, on constate que les pressions internes générées lors du gel sont **maximales pour une concentration en NaCl voisine de 2,5%** (Fig. 2.69).

n Choc thermique

- Rösli et Harnik ⁴ ont émis l'hypothèse que l'écaillage des surfaces pouvait être causé par un **choc thermique**.
 - **Près de la surface**, un fort **gradient thermique** peut se produire au moment du dégel de la glace suite à l'application d'un agent de déverglaçage.
 - Ce **dégel très rapide** nécessite une grande quantité de chaleur qui doit être principalement **extraite du béton immédiatement sous la surface**.
 - Dans les **premiers millimètres** sous la surface, on observe un **abaissement très rapide de la température** (Fig 2.70).
- Rösli et Harnik ont mesuré en laboratoire un **gradient de température** maximum allant de **-3 à -17°C entre 0 et 1 mm** sous la surface.
 - Ce gradient se produit dans un **intervalle de temps très court**, soit moins d'une minute après l'application du sel déglaçant (NaCl).
 - Les profils de température qu'ils ont obtenus leur ont permis de calculer **l'état de contrainte** de la pâte de ciment lors du dégel rapide de la glace (Fig 2.71). Les résultats montrent que des efforts de **traction de 1 à 9 MPa** peuvent être induits. Ces contraintes sont en fait de l'ordre de grandeur de la résistance en traction du béton

(Fig 2.71).

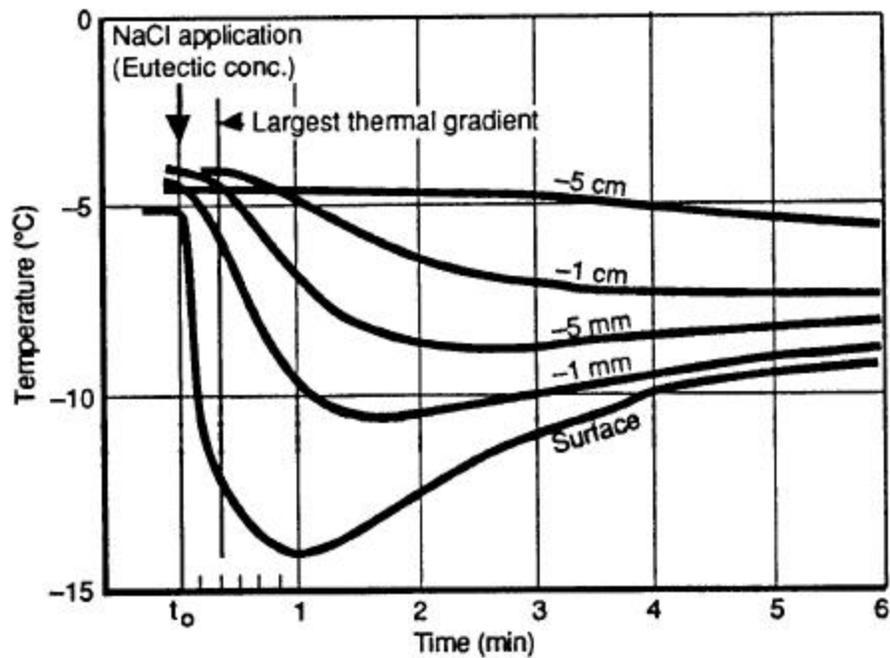


Fig 2.70 - Profil de température dans un béton recouvert de glace suite à l'application de NaCl.
[tiré de ROSLI, A. et HARNIK, A. B. 1980 *Improving the Durability of Concrete to Freezing and Deicing Salts*, Durability of Building Materials and Components, ASTM Special Technical Publication, STP-691, pp. 464-473.]

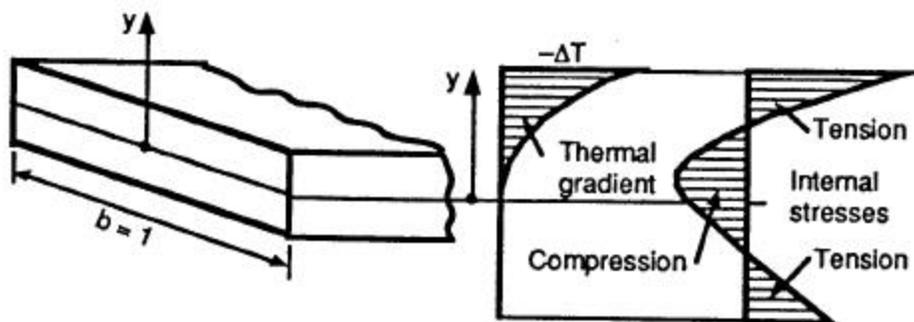


Fig 2.71 - Contraintes internes engendrées par un gradient thermique à la surface du béton.
[tiré de ROSLI, A. et HARNIK, A. B. 1980 *Improving the Durability of Concrete to*

- Le mécanisme de destruction proposé par ces deux chercheurs montre comment peut s'amorcer la fissuration de la surface du béton suite à l'action des sels déglaçants et du gel.
 - On peut penser que **l'écaillage**, à proprement parler, survient lorsque ces **microfissures sont fortement amplifiées** par la **formation de glace** lors du cycle de gel suivant.
- Ce modèle a **l'avantage** de faire intervenir la **résistance en traction** de la pâte, qui peut être passablement différente selon le type de béton utilisé.
- On **comprend mal** en quoi les bulles permettraient de **limiter les dommages**. De plus, le modèle n'est pas **applicable** dans les cas où les sels de déglaçages sont **constamment en contact** avec la surface lors du gel et du dégel (en laboratoire par exemple).

n Gel couche par couche

- Le modèle de destruction appelé *couche par couche* est, selon Rösli et Harnik ⁴, un des mécanismes à la base de la destruction par écaillage.

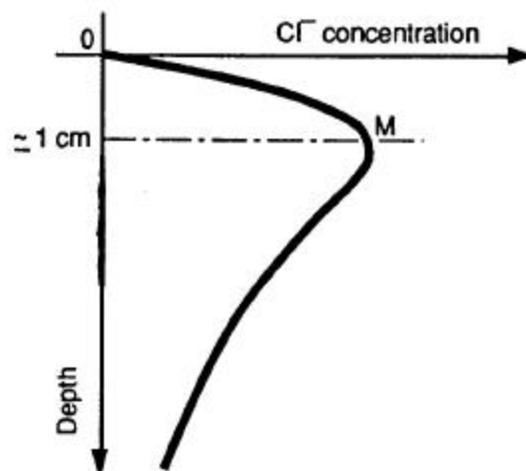


Fig 2.72 - Concentration en ions chlore à l'intérieur du béton suite à plusieurs applications successives.

[tiré de ROSLI, A. et HARNIK, A. B. 1980 *Improving the Durability of Concrete to Freezing and Deicing Salts*, Durability of Building Materials and Components, ASTM Special Technical Publication, STP-691, pp. 464-473.

- Ce modèle est principalement d'abord basé sur le fait que la **concentration** des agents déglaçants à l'intérieur du béton n'est **pas constante en fonction de la profondeur**.
 - Dans la nature, on mesure une **concentration maximale**, non pas à la surface, mais à **l'intérieur** du béton, en raison du **lessivage** par la pluie ou par la neige (Fig 2.72).
- Lorsque le gel survient, ce sont **d'abord** les couches contenant la **moins grande teneur en ions** qui gèlent en premier.
 - Ces couches sont situées d'une part tout **près de la surface** et d'autre part **plus en profondeur**.
 - Il existe par conséquent une **couche intermédiaire** qui, à cause de sa forte teneur en ions, **gèle après les deux autres**.
- Ce phénomène peut provoquer des **tensions internes** en raison de la **dilatation différente** des couches gelées et non gelées.
- Lorsque le gel parvient à la couche **intermédiaire**, une certaine quantité d'eau **ne pourra pas être expulsée** en raison de la faible perméabilité des deux couches voisines qui sont déjà gelées.
- Le modèle du gel couche par couche **n'explique pas tout** le phénomène de l'écaillage.
- Il propose cependant une **explication plausible** qui fait intervenir la présence prépondérante des substances en solution.
- Tout comme le modèle précédent, il **ne parvient pas** encore à expliquer le **rôle protecteur des bulles d'air**.
- Il est plus ou moins compatible avec le cas où la surface écaillée est toujours en contact avec les agents déglaçants puisque la concentration maximale est nécessairement tout près de la surface externe.

2.3.2.2 Paramètres d'influence

n Volume d'air et facteur d'espacement

Pour des valeurs usuelles de E/C (> 0,40), un bon réseau de bulle d'air entraîné est toujours nécessaire pour protéger le béton contre l'attaque des sels fondants.

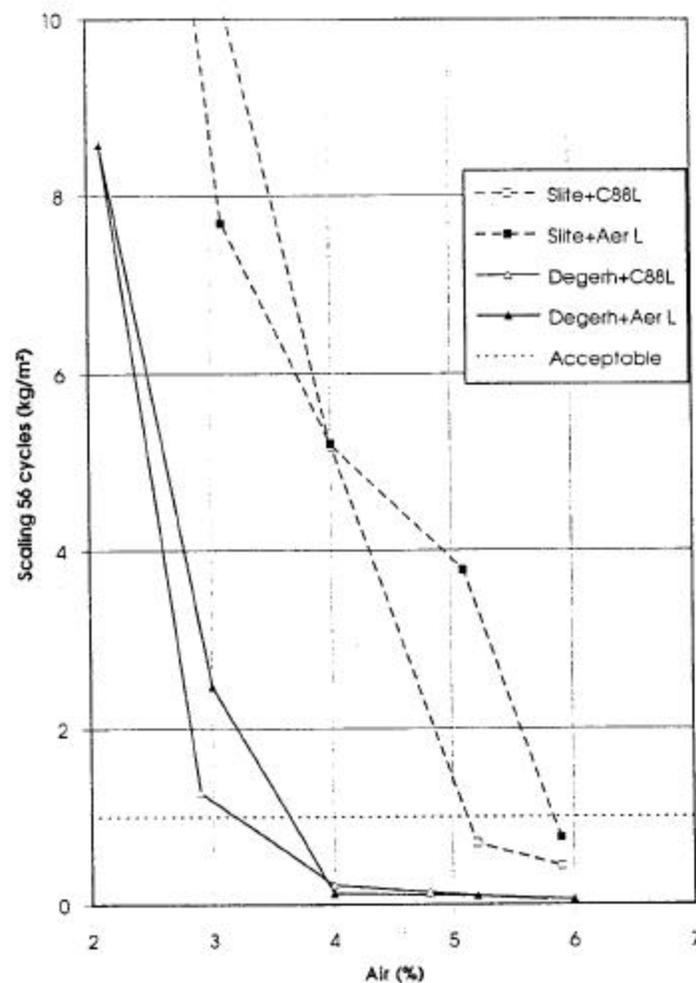


Fig 2.73 - Influence du volume d'air sur la résistance à l'écaillage en fonction du type d'agent entraîneur d'air (E/C = 0,43 à 0,47).
[tiré de Petersson P.E. 1993, *Scaling résistance tests of concretes - experience from*

practical use in Sweden, Comptes rendus de l'Atelier international sur la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants, Comité RILEM TC 117, 30-31 août, Québec, Canada, p.249-259]

- Cependant, le **contrôle du volume** d'air n'est **pas suffisant** pour garantir une bonne résistance à l'écaillage du béton. En effet pour un même volume d'air, la **protection peut être très différente** en fonction du **type d'agent** entraîneur d'air (la dimension des bulles d'air entraînées peut varier d'un produit à l'autre (Fig 2.73).
- Comme pour la fissuration interne, le **facteur d'espacement** est le **meilleur indicateur** du niveau de protection de l'air entraîné contre l'attaque des sels fondants.
- il n'existe **pas de facteur d'espacement critique** au deçà duquel la destruction par écaillage ne semble plus se produire. On observe plutôt que **l'efficacité de la protection augmente graduellement** à mesure que le facteur d'espacement diminue (Fig 2.74).

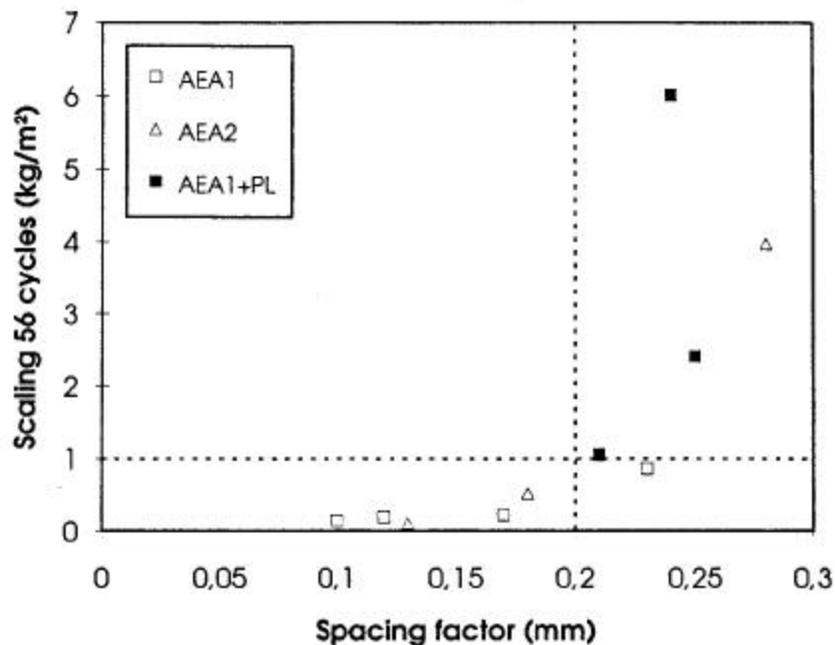
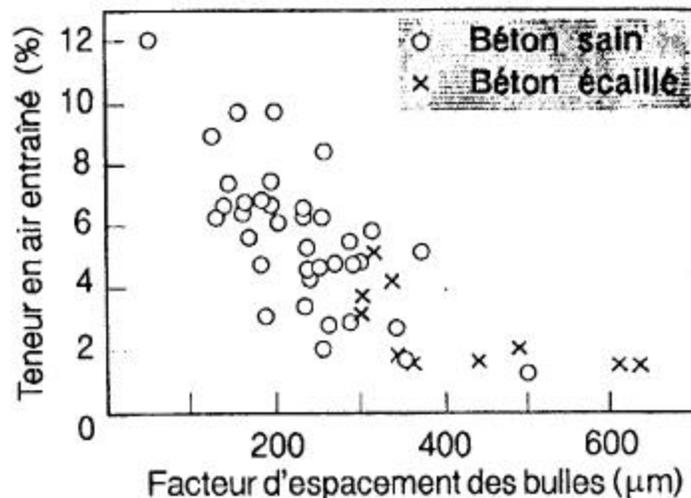


Fig 2.74 - Influence du facteur d'espacement sur la résistance à l'écaillage (E/C = 0,43 à 0,47).

[tiré de Petersson P.E. 1993, *Scaling résistance tests of concretes - experience from practical use in Sweden*, Comptes rendus de l'Atelier international sur la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants, Comité RILEM TC 117, 30-31 août, Québec, Canada, p.249-259]

Pour des valeurs usuelles de E/C ($> 0,40$), on trouve qu'un facteur d'espacement inférieur à environ $200 \mu\text{m}$ offre un niveau de protection suffisant pour prévenir la destruction par écaillage en présence de sels dégivrants (Fig 2.74).

- En pratique, la validité de cette limite d'environ $200 \mu\text{m}$ à déjà été **confirmée** par de nombreux relevés de terrain (Fig 2.75)



- Les **BHP** peuvent développer une très **bonne résistance** à l'écaillage malgré une **durée de mûrissement très courte** ⁹. (attention au BHP avec CV)
- Certaines membranes ont un **effet positif** significatif sur la résistance à l'écaillage. La **performance** des membranes est **variable** d'un produit à l'autre.
- Le **mûrissement accéléré** à haute température tend généralement à **diminuer** de manière très significative la résistance à l'écaillage ⁹
- L'effet négatif du mûrissement à haute température est nettement plus faible dans le cas des BHP.

n Influence des conditions de séchage après le mûrissement initial

- Le **séchage violent** tend à **ouvrir la porosité** de la pâte en brisant les parois de C-S-H qui divisent certains pores
- Un **séchage intense** peu aussi créer de la **microfissuration**, surtout en peau des ouvrages.
- Dans l'ensemble, il semble que la résistance à l'écaillage du **béton ordinaire séché à 20 °C et 50% HR** pendant quelques semaines est significativement **supérieure** à celle d'un béton conservé dans l'eau.

⁹ GAGNÉ, R. ET MARCHAND, J. 1993, *La résistance à l'écaillage des bétons à haute performance: état de la question*, Comptes rendus de l'Atelier international sur la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants, Comité RILEM TC 117, 30-31 août, Québec, Canada, p.23-47]

- Une **augmentation de la température** de séchage a généralement tendance à **diminuer** très significativement la **résistance à l'écaillage** du béton ordinaire (Fig 2.76).

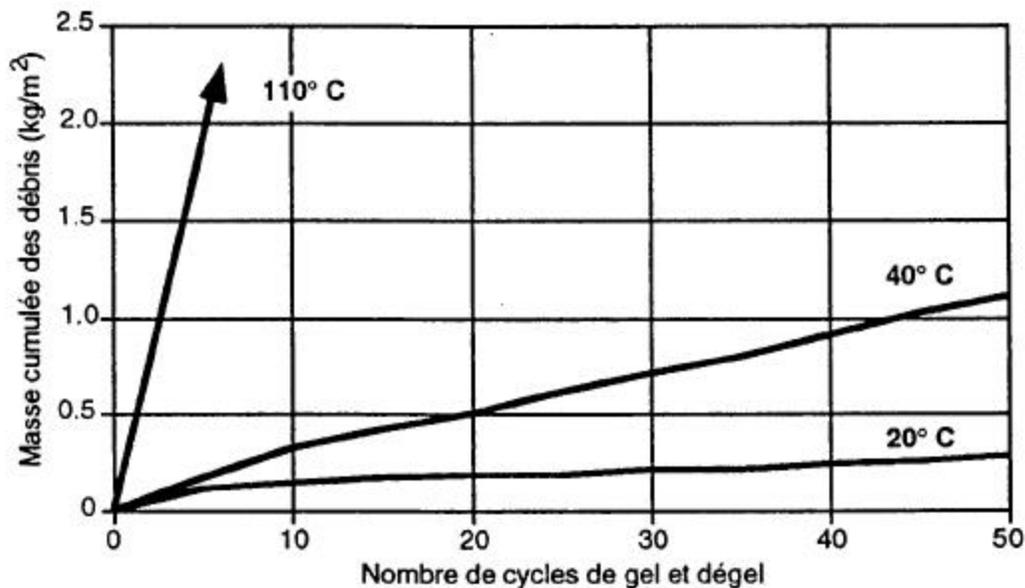


Fig 2.76 - Effet de la température de séchage sur la résistance à l'écaillage d'un béton ordinaire (E/C = 0,45).
 [tiré de Marchand, J. 1993 *Contribution à l'étude de la détérioration par écaillage du béton en présence de sels fondants*, Thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées, Paris, France, 316 p.]

- La **fumée de silice** et la **réduction du E/L** permettent **d'atténuer** les effets néfastes du séchage.

2.3.2.3 La résistance à l'écaillage du béton

n Influence du E/C

Pour des valeurs usuelles du rapport E/C (> 0,40), il ne fait aucun doute que l'absence de protection d'un bon réseau de bulles d'air conduit invariablement à une destruction intensive de la surface.

- Ce n'est qu'en abaissant le rapport E/C à des valeurs très faibles, soit **aux environs de 0,25**, que l'on parvient à produire des bétons (BHP) en mesure

de résister aux sels fondants **sans la protection d'un réseau de bulles d'air entraîné** ¹⁰.

La résistance à l'écaillage des bétons à air entraîné ayant un facteur d'espacement inférieur à 250 µm est généralement acceptable en autant que le rapport E/C reste inférieur à 0,50 (Fig. 2.77).

- Si le **réseau de bulles d'air entraîné est de mauvaise qualité** ($\bar{L} > 250 \mu\text{m}$), la résistance à l'écaillage peut être **inacceptable en dépit d'un rapport E/C aussi bas que 0,35.**

Il est important de souligner qu'un béton fabriqué avec un rapport E/C supérieur à 0,50 sera nettement moins résistant à l'écaillage, et ce, malgré la présence d'un bon réseau de bulles d'air.

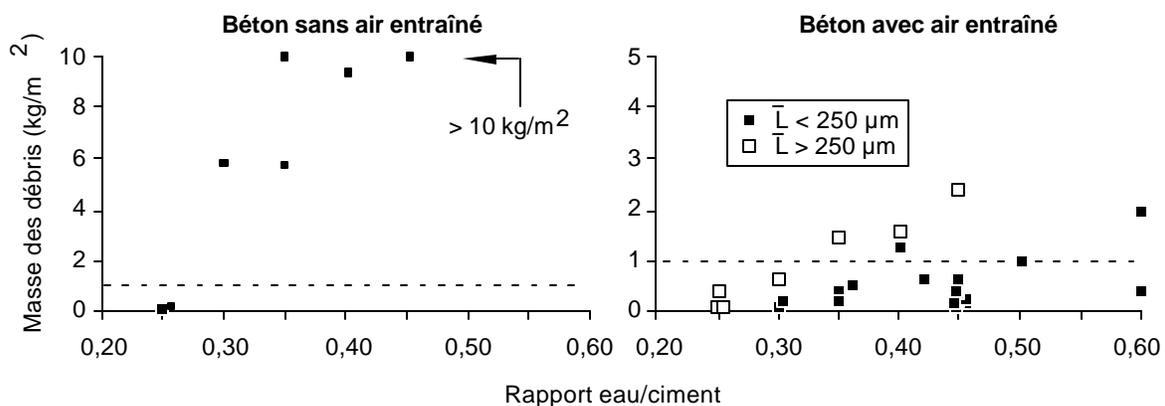


Fig 2.77 - Influence du rapport E/C et de l'air entraîné sur la résistance à l'écaillage du béton.

[tiré de Gagné, R. et Marchand, J. 1993, *La résistance à l'écaillage des bétons à haute performance: état de la question*, Comptes rendus de l'Atelier international sur la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants, Comité RILEM TC 117, 30-31 août, Québec, Canada, p.23-47].

- **Les ciments plus fins (type 30) ont généralement une performance à l'écaillage nettement supérieure** ¹⁰.

¹⁰ GAGNÉ, R. (1992) *La durabilité au gel des bétons à hautes performances*, Thèse de doctorat, Université Laval, Département de génie civil, Sainte-Foy (Québec), Canada, 433 p.

n Influence des additions minérales

Fumée de silice

- En général, les **bétons de résistance normale**, contenant **moins de 10% de fumée de silice** en remplacement du ciment, **résistent bien** aux sels dégivrants lorsqu'ils sont protégés par un **réseau de bulles d'air de bonne qualité** (Fig 2.78).

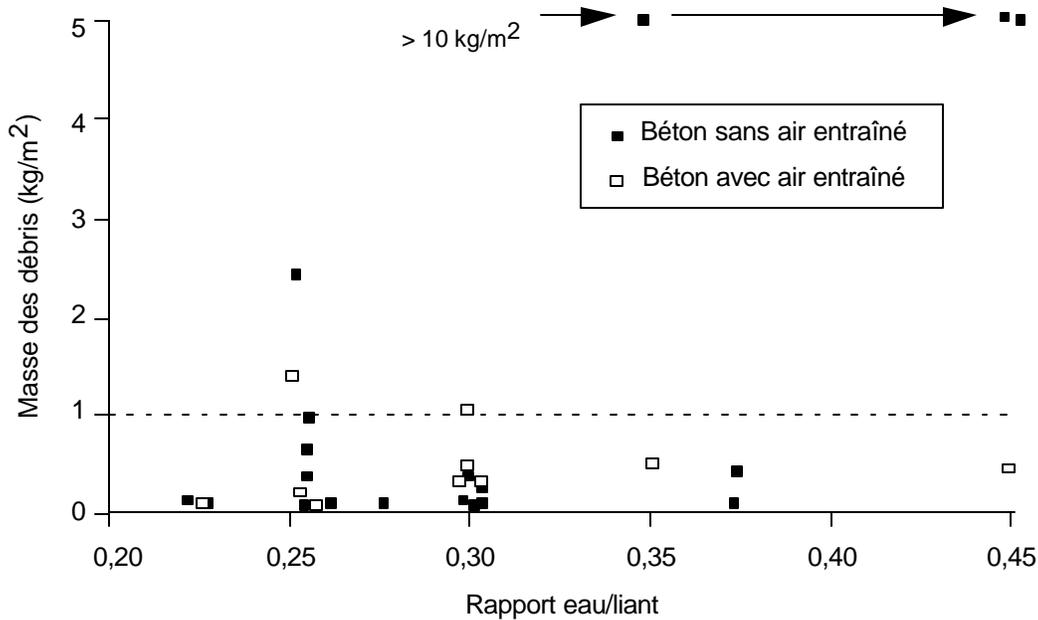


Fig 2.78 - Influence du rapport E/L et de l'air entraîné sur la résistance à l'écaillage du béton avec fumée de silice après 100 cycles de gel-dégel.
[tiré de Gagné, R. et Marchand, J. 1993, *La résistance à l'écaillage des bétons à haute performance: état de la question*, Comptes rendus de l'Atelier international sur la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels fondants, Comité RILEM TC 117, 30-31 août, Québec, Canada, p.23-47].

- Plusieurs résultats expérimentaux tendent à montrer que la **résistance à l'écaillage** des bétons avec fumée de silice **sans air entraîné** s'accroît rapidement lorsque le **rapport E/L devient inférieur à 0,30**.

- Quelques publications signalent même que certains BHP ayant un rapport E/L très faible (**0,25 et moins**) n'auraient **pas toujours besoin d'air entraîné** pour résister à l'attaque des sels dégivrants ^{11 12 13}.

Cendres volantes

- Le **comportement face aux sels dégivrants** est un des **points faibles** de la durabilité des bétons contenant des **cendres volantes** en *remplacement du ciment*.
- On **ignore encore pourquoi** les bétons avec cendres volantes sont moins résistants à l'écaillage.
- **Voici quelques hypothèses :**
 - Les essais normalisés en laboratoire (ASTM C672) recommandent une durée de **mûrissement relativement courte** (14j) ne permettant pas à la cendre de participer à la densification de la pâte avant la première exposition au gel.
 - La pâte **près de la surface** des bétons avec CV (1 ou 2 mm) présente très souvent **une forte porosité** qui amplifie probablement les mécanismes de destruction.
 - En surface, seul le ciment **Portland semble être en mesure de s'hydrater durant les premiers jours** ou les premières semaines. Après quelques semaines (28 jours) **les conditions de mûrissement ne sont généralement plus favorables** pour permettre aux CV de s'hydrater.
- On retrouve de nombreuses mentions dans la documentation qui signalent que les bétons avec **cendres volantes (type F ou C)** sont **plus sensibles**

11 Foy, C., Pigeon, M., Banthia, N. 1988 *Freeze-thaw durability and deicer salt scaling resistance of a 0.25 water-cement ratio concrete*, Cement and Concrete Research, vol. 18, n° 4, p. 604-614.

12 Hammer, T. A., Sellevold E. J. 1990 *Frost resistance of high-strength concrete*, Second International Conference on High-Strength Concrete, ACI SP-121, W.T. Hester Ed., p. 457-487.

13 Gagné, R., Pigeon, M., Aïtcin, P.-C. 1991 *Deicer salt scaling resistance of high-strength concrete made with different cements*, 2e Conférence internationale sur la durabilité du béton, ACI SP-126, V.M. Malhotra éd., vol I, p. 185-194.

à l'écaillage que des bétons de référence ne contenant pas de cendre ^{14 15}

16 17 18

- Les performances sont, en général, **assez variables** d'une étude à l'autre, probablement en raison de la **nature très variable des caractéristiques physico-chimiques des cendres volantes**.

Même si les bétons avec cendres volantes se révèlent souvent plus sensibles à l'écaillage, il est néanmoins possible d'obtenir des performances tout à fait satisfaisantes en s'assurant de produire un facteur d'espacement des bulles d'air adéquat (< 200 µm), en limitant les taux de remplacement à des valeurs de 30% et moins et en fournissant des conditions de mûrissement favorables.

- Les taux **de remplacement de 50% ou de 60%** sont à éviter lorsque le béton risque d'être en **contact avec des sels fondants**. Il est important de souligner que, pour ces forts contenus en cendres volantes (**> 50%**), même un **bon facteur d'espacement** ($\bar{L} < 250 \mu\text{m}$) et un rapport E/L de 0,30 et moins **ne permettent généralement pas d'obtenir une bonne performance** face aux sels fondants .

La résistance à l'écaillage des bétons avec CV semble surtout contrôlée par le rapport E/C et non pas le rapport E/L.

-
- 14 Bilodeau, A., Carette, G. G., Malhotra, V. M., Langley, W. S. 1991 *Influence of curing and drying on salt scaling resistance of fly ash concrete*, Second CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, ACI SP-126, V. M. Malhotra éd., p. 210-228.
- 15 Whiting, D. 1987 *Durability of high-strength concrete*, Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, ACI SP-100, J. M. Scanlon éd., p. 169-183.
- 16 Barrow, R. S., Hadchiti, K. M., Carrasquillo, P.M., Carrasquillo, R.L. 1989 *Temperature rise and durability of concrete containing fly ash*, Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolan in Concrete, ACI SP-114, V.M. Malhotra éd., p. 331-347.
- 17 Kleiger, P., Gebler, S. 1987 *Fly ash and concrete durability*, Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, ACI SP-100, J. M. Scanlon éd., p.1043-1069.
- 18 Johnston, C. 1987 *Effects of microsilica and class C fly ash on resistance of concrete to rapid freezing and thawing and scaling in the presence of deicing agents*, Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, ACI SP-100, J. M. Scanlon éd., p.1183-1204.

- Pour illustrer cet effet, voici comment évolue le E/C effectif, en surface des bétons avec CV, en fonction du E/L et du taux de remplacement du liant (tableau 2.4).

Tab 2.5 - Rapport E/C "effectif" en fonction du rapport E/L et du taux de remplacement du liant par l'ajout minéral.

| Taux de remplacement du liant (%) | Rapport E/C "effectif" | | |
|---|------------------------|-------------|-------------|
| | E/L = 0,40 | E/L = 0,35 | E/L = 0,30 |
| 20 | 0,50 | 0,44 | 0,38 |
| 30 | 0,57 | 0,50 | 0,43 |
| 40 | 0,67 | 0,58 | 0,50 |
| 50 | 0,80 | 0,70 | 0,60 |

Laitiers de haut fourneau

- Les données concernant la **résistance à l'écaillage** des bétons avec **laitiers** de haut fourneau sont **relativement rares** et souvent **contradictoires**.

- On signale parfois que la résistance à l'écaillage des bétons augmente avec le contenu en laitier ¹⁹ ²⁰ ou au contraire, que la sensibilité à l'écaillage augmente avec la proportion de ciment remplacé par des laitiers ²¹.
- Les résultats publiés jusqu'à présent démontrent que le comportement face aux sels fondants des bétons contenant des **laitiers** de haut fourneau a été peu étudié et est **encore mal connu**.
 - Par conséquent, l'utilisation de bétons **contenant des laitiers** de haut fourneau dans des structures soumises à l'action des sels dégivrants doit se faire **avec grande prudence**.
 - Il est encore trop tôt pour formuler des recommandations précises, mais il apparaît **prudent d'éviter les taux de remplacement élevés et il convient de s'assurer de la présence d'un bon réseau de bulles d'air entraîné**.

19 Fagerlund, G. 1982 *The influence of slag cement on the frost resistance of the hardened concrete*, CBI, Research 1:82, Sweden Cement and Concrete Institute, Stockholm.

20 Fagerlund, G. 1986 *Effect of air-entraining and other admixtures on the salt-scaling resistance of concrete*, Chalmers International Seminar on some Aspects of Admixture and Industrial By-Products on the Durability of Concrete, Göteborg, Suède, 33 p.

21 Virtanen, J. 1990 *Field study on the effects of additions on the salt scaling resistance of concrete*, Nordic Concrete Research, vol. 9, p. 197-212.