

2.3 LES CYCLES DE GEL-DÉGEL

- L'action des cycles de gel-dégel produit deux principaux types de détériorations du béton:
 - la **fissuration interne**
 - **l'écaillage** des surfaces.
- Ces deux types de dégradations ont pour **origine** des **processus différents** et ne surviennent **pas nécessairement en même temps** lorsque les bétons sont exposés aux cycles de gel-dégel.

n La fissuration interne

- Il s'agit d'une dégradation qui touche toute la masse de béton soumise à des cycles de gel-dégel. Cette dégradation se manifeste par l'apparition d'une **intense microfissuration** du béton non seulement en surface mais aussi à **l'intérieur de la masse** de béton soumise au gel.
- Dans un béton mal protégé contre le gel, l'intensité de la fissuration interne dépend du **nombre de cycles de gel-dégel** et de la **sévérité des cycles** (températures minimale et maximale, taux de gel, degré de saturation).
- La fissuration interne du béton diminue la performance du béton en **réduisant considérablement** ses **caractéristiques mécaniques** (résistances à la compression et à la traction, module élastique) et son **impermeabilité**. Par exemple, un béton fortement attaqué par le gel interne peut perdre presque toute sa cohésion.

n L'écaillage de surface

En Amérique du Nord, l'écaillage de surface est le type de destruction par le gel le plus fréquemment observé sur les structures fortement exposées aux cycles de gel-dégel.

- Comme son nom l'indique, il s'agit d'un mode de dégradation qui touche surtout la surface du béton en contact avec le milieu externe (les premiers millimètres). Elle se manifeste par le décollement progressif de petites particules de pâte qui ont souvent la forme de petites écailles.

L'écaillage de surface se produit principalement lorsque le béton est en contact avec des sels fondants.

2.3.1 Destruction par fissuration interne

2.3.1.1 Mécanismes de destruction

- Même après de nombreuses années de recherche dans le domaine, on ne connaît **pas encore de théorie satisfaisante** pour expliquer complètement le comportement au gel du béton.
- Il existe néanmoins quelques **modèles** plus ou moins détaillés qui permettent d'expliquer **une partie du phénomène**, dont notamment le rôle protecteur des bulles d'air.
- Avant de résumer ces principales théories il peut être utile de rappeler les fait suivants:
 - En gelant, le volume de l'eau **augmente de 9%**
 - Dans un pore, **l'eau gèle** à une température qui dépend, notamment, de la **dimension du pore**.
 - La thermodynamique montre que, sous **l'effet d'un gel** suffisamment **lent**, la glace devrait se former à **l'extérieur du corps poreux**. La conséquence est alors une **contraction** de ce corps poreux, liée au départ d'eau (Fig 2.55)
- Dans les pâtes **saturées sans air entraîné**, on mesure un **gonflement** lorsque la température s'abaisse au-dessous de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ce gonflement est en partie provoqué par la **formation de glace** dans la porosité capillaire qui provoque une **pression interne** sur les parois des pores.
- Si la pâte était **sèche**, on observerait plutôt une **contraction** à peu près équivalente à la contraction thermique.

- Dans les pâtes **avec air entraîné**, on observe une **forte contraction** qui peut s'expliquer par la formation de **glace dans les bulles d'air** (à l'extérieur du corps poreux).

Dans les bulles d'air, la formation de glace peut se faire sans créer de pressions internes sur les parois car les bulles d'air ne sont pratiquement jamais remplies d'eau.

La **contraction** est provoquée par le **départ de l'eau** (retrait des hydrates) qui **quitte la porosité des plus petits capillaires (ou les pores de gel)** pour aller geler dans les bulles d'air ou dans les plus grands pores non complètement saturés.

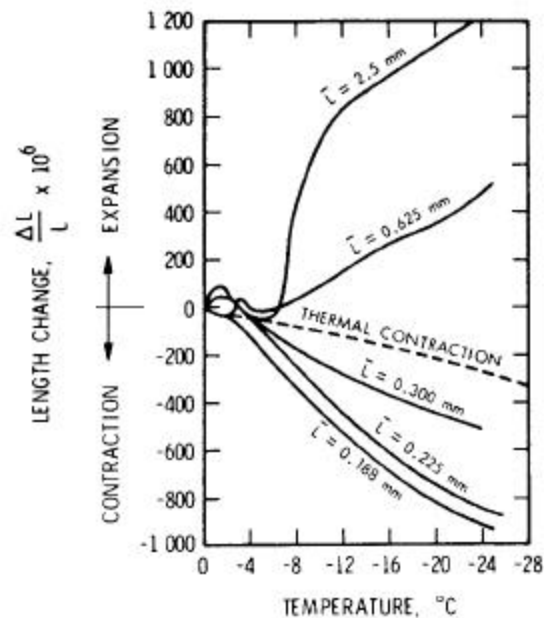


Fig 2.55 - Comportements dimensionnels des pâtes de ciment au cours du gel en fonction du facteur d'espacement des bulles d'air.

[tiré de Ramachandran et al. 1981 *Concrete science, treatise on current research* Heyden & Son Ltd. 427 p.]

- D'une manière générale, la **sensibilité au gel** d'une pâte de ciment est étroitement liée à la **quantité d'eau "gelable"**. **Cette quantité d'eau gelable est fonction du degré d'hydratation, de la température minimale atteinte et du rapport E/C** (qui contrôle en fait le volume total et la dimension des pores).

- Fagerlund, en se basant sur des mesures expérimentales effectuées Powers, a calculé la proportion de l'eau évaporable qui peut geler en fonction de la température minimale et du rapport E/C (Tableau 2.3) . **On constate que le rapport eau gelable / eau évaporable (W_f/W_e) augmente en fonction du rapport E/C et de la température minimale atteinte.**
- La technique expérimentale utilisée par Powers **surestime probablement la quantité d'eau gelable** mais il demeure néanmoins que pour un E/C de 0,20, environ 30% de l'eau évaporable est gelable à -20°C (Tableau 2.3).

Tab 2.3 - Quantité maximale d'eau gelable dans des pâtes de ciment saturées.
 [tiré de Fagerlund, G. 1993 *Frost resistance of high performance concrete - Some theoretical considerations*, Report TVBM-3056, Lund Institute of Technology, 38 p.]

E/C	W_f/W_e (%)		
	-12°C	- 20°C	- 30°C
0,20	24	30	39
0,30	24	30	39
0,40	24	30	39
0,50	46	50	56
0,60	57	61	60

(Degré d'hydratation = 75%)

- On peut estimer expérimentalement la quantité d'eau qui gèle dans un béton à l'aide d'un **calorimètre à basse température**. Cet appareil permet de mesurer, en fonction de la température, la quantité de chaleur dégagée lorsque l'eau se transforme en glace (J/°K/g). La quantité de glace formée est proportionnelle à la surface sous la courbe (Figure 2.56).

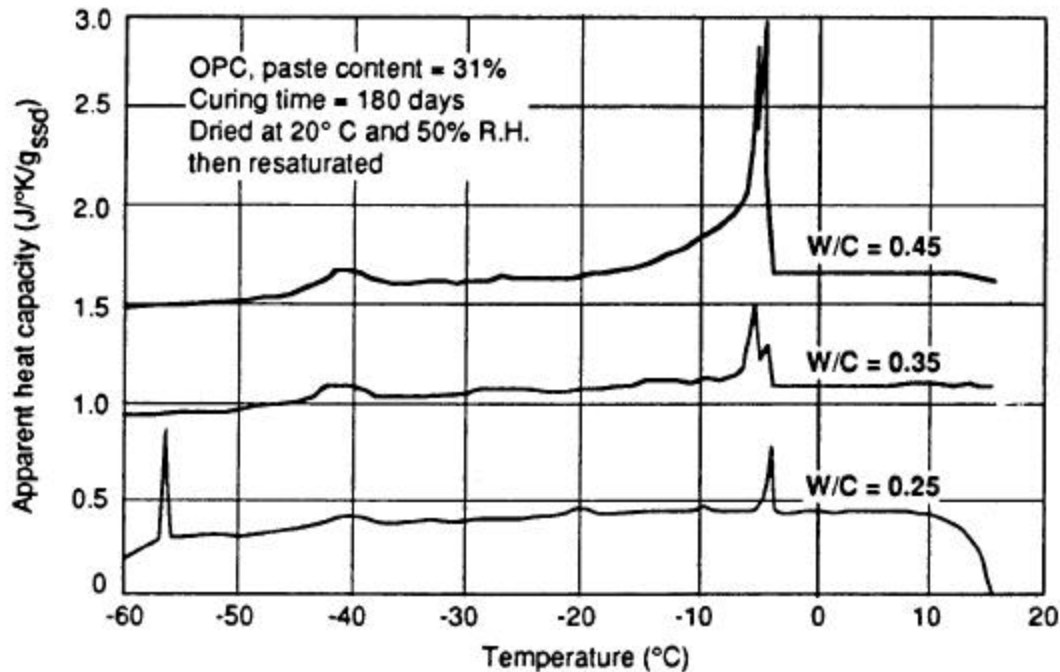


Fig 2.56 - Influence du rapport E/C sur la formation de glace.
 [tiré de Marchand J. 1993 *Contribution to the study of the scaling deterioration of concrete in presence of deicing salts* Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 326 p.]

- On constate qu'une réduction de E/C diminue significativement la quantité de glace formée (Fig 2.56). **Ces résultats montrent, cette fois, que pour E/C = 0,25, moins de 10% de toute l'eau évaporable est gelable à -20°C.**

n Le degré de saturation critique

- On peut comprendre facilement qu'un **béton sec** possède généralement un **bon comportement face aux cycles thermiques**. En fait, c'est l'eau qui est à l'origine de la plupart des désordres thermodynamiques qui peuvent engendrer la destruction du béton.

En l'absence d'eau, les risques de destruction sont donc très peu probables, quelle que soit la composition du béton.

- En pratique, si le taux de refroidissement est suffisamment lent, on trouve qu'il existe un **degré de saturation critique, voisin de 0,90**, au-dessus duquel se produit une forte expansion lors du gel (Fig 2.57).

- Dans les pâtes à air entraîné, le degré de saturation critique est plus élevé (c'est bénéfique !) (Fig 2.57)
- Dans les pâtes sans air entraîné ayant un **degré de saturation inférieur à environ 90%**, les vides non complètement saturés, constituent un **volume tampon** dans lequel la glace pourra se former **sans exercer de contrainte interne**.

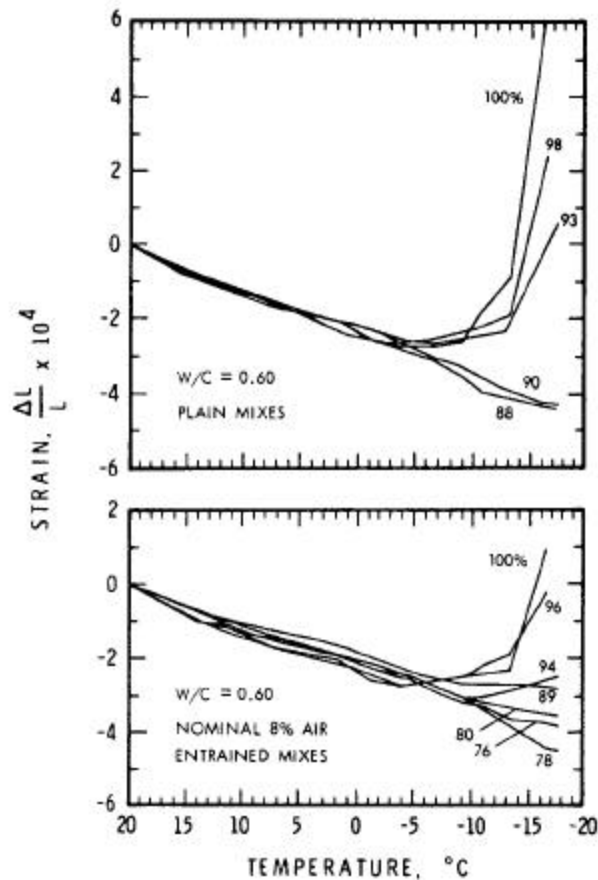


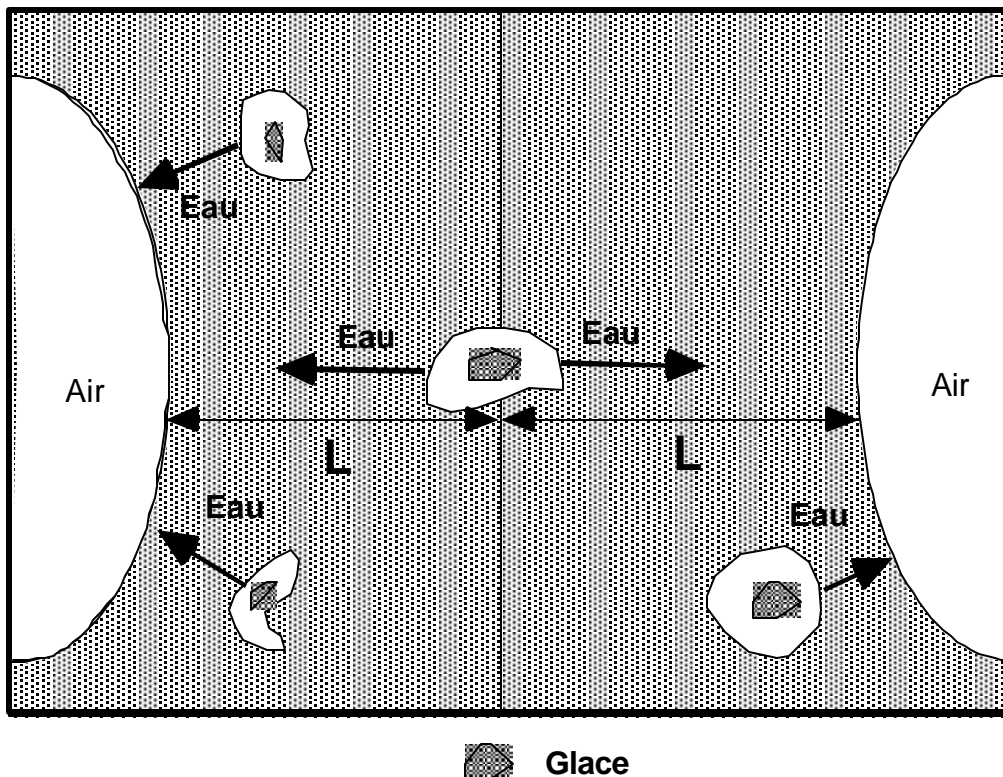
Fig 2.57 - Influence du degré de saturation d'un mortier (E/C = 0,6) sur son comportement dimensionnel au cours du gel.

[tiré de Ramachandran V.S., Feldman, R.F. et Beaudoin, J.J. 1981 *Concrete Science, Treatise on current research*, Heyden and Son, London].

- Il faut cependant retenir que **l'expansion des pâtes** congelées ne doit pas **uniquement être attribuée à la formation de la glace** expansive. En effet, on peut mesurer un gonflement dans des pâtes où toute l'eau est d'abord remplacée par du benzène (qui lui se contracte en refroidissant).

n Le modèle des pressions hydrauliques

- Cette *théorie* (on pourrait plutôt parler de modèle) a été **proposée par Powers**¹ en 1949.



\bar{L} : Valeur moyenne de "L" pour toute la pâte

Fig 2.58 - Représentation schématique du modèle des pressions hydrauliques expliquant l'expulsion de l'eau des capillaires lors du gel.

- Lorsque l'eau commence à geler dans un pore capillaire, son **volume augmente de 9%** et l'eau en excès doit être **expulsée**.

¹ Powers T. C. 1949 The air requirement of frost-resistant concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol. 29, p. 184-211.

- La formation de **glace** est **graduelle** en fonction du **diamètre** des pores et de la présence de **substances en solution** dans l'eau.
- La **vitesse de refroidissement** contrôle le **taux de formation** de la glace et, par le fait même la quantité d'eau expulsée du pore capillaire.
- La formation de glace provoque une **pression hydraulique** qui est fonction de la **résistance à l'écoulement** de l'eau dans la pâte.

L'intensité de la pression hydraulique dépend de la **longueur du trajet** et de la **perméabilité** de la pâte située entre le pore qui gèle et un vide qui peut accepter l'eau expulsée.

Selon le modèle des pressions hydrauliques, les bulles d'air ont un rôle protecteur, car elles agissent comme vase d'expansion, où l'eau peut geler sans créer de dommages (Fig 2.58).

- Powers, en utilisant la loi de DARCY, a estimé la **longueur L_{max}** que l'eau peut parcourir sans créer de dommage (Fig 2.59).

La distance **L_{max}** est la **longueur maximale** du trajet que l'eau peut parcourir **sans que la pression hydraulique, à l'intérieur du pore, surpasse la résistance à la traction** de la pâte.

- Selon Powers, cette distance **L_{max}** est **proportionnelle** à:

$$\frac{KT}{UR}$$

avec :

R = Vitesse de refroidissement

K = Coefficient de perméabilité de la pâte de ciment

U = Quantité d'eau gelable lorsque la température s'abaisse de 1°C

T = Résistance à la traction de la pâte

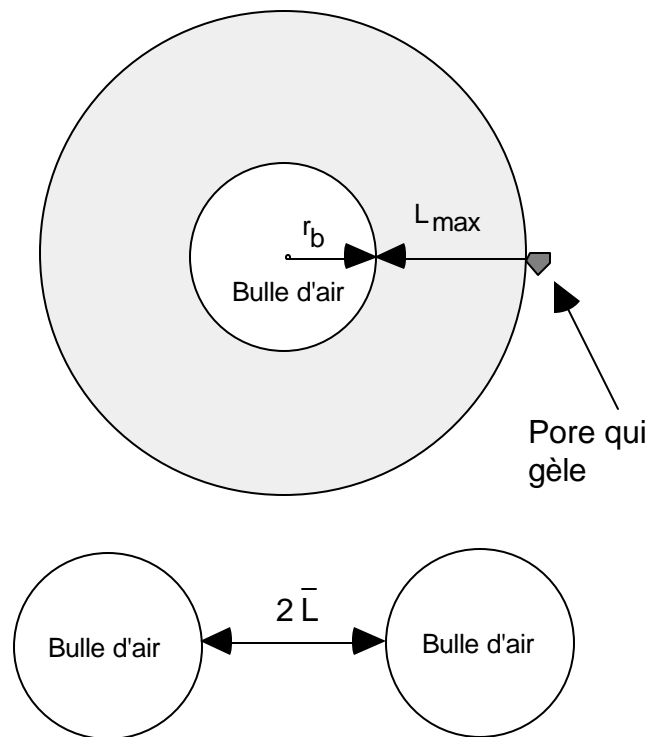


Fig 2.59 - Représentation schématique de L_{max} et \bar{L} .
 [tiré de: *La durabilité des bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 453 p.]

- Si la **distance moyenne** (\bar{L}) séparant deux bulles d'air adjacentes est **inférieure** à la distance L_{max} , le béton sera **protégé** contre les effets du gel.
- Si les bulles d'air sont trop éloignées, et que la distance à parcourir est **supérieure** à L_{max} alors la pression engendrée à l'intérieur du pore sera supérieure à la résistance à la traction de la pâte et provoquera la **fissuration de la matrice**.
- L'action **répétée des cycles** de gel entretient ce processus de fissuration et provoque un **endommagement progressif** qui généralement **s'accélère** en fonction du nombre de cycles de gel-dégel.
- La demie-distance moyenne séparant deux bulles d'air adjacentes, notée \bar{L} (**facteur d'espacement** des bulles d'air ou **indice des vides interstitiels**), est définie par la norme ASTM C457.

- En utilisant son modèle, Powers a pu calculer que pour protéger la pâte de ciment ($E/C = 0,5$), contre les effets du gel, la valeur de \bar{L} **devait être inférieure à environ 250 μm** . Cette valeur de 250 μm est comparable à celle retenue par les normes les plus récentes.
- Powers a mis sa propre théorie en doute après avoir observé que le **gel d'une pâte** bien protégée s'accompagne **d'un retrait et non pas d'une légère expansion**. Il en a conclu que toute l'eau ne devait pas être **expulsée hors des capillaires** mais que les mouvements d'eau pouvaient se faire des pores de C-S-H **vers les capillaires**.
- Cette démarche l'a amené, en collaboration avec Helmuth, à proposer un nouveau mécanisme pour expliquer l'action du gel dans le béton.

n Le modèle des pressions osmotiques

- Le modèle des **pressions osmotiques** a été formulée par **Powers et Helmuth en 1953** ² après qu'ils aient constaté que la théorie des pressions hydrauliques **ne pouvait expliquer la contraction** de la pâte (retrait), mesurée lors du gel.
 - Ils avaient découvert que l'eau avait tendance à se diriger **vers les sites de formation de glace** (capillaire), plutôt que d'y être expulsée.
 - Ils savaient également que le **point de congélation** de l'eau **diminuait avec la taille des pores**.
- Le modèle des pressions osmotiques est aussi fondée sur le fait que **l'eau des capillaires n'est pas pure** puisqu'elle contient des substances en solution, notamment des ions alcalins (Na^+ , K^+).
 - Lorsque la température s'abaisse au-dessous de 0°C , **l'eau des capillaires ne gèle pas immédiatement** en raison de la présence de substances en solution dans l'eau et du faible diamètre des pores capillaires.

² Powers, T.C. et Helmuth, R.A. 1953 *Theory of volume changes in hardened Portland-cement paste during freezing*. Proceedings of the Highway Research Board, Vol.32, p. 285-297

- Lorsque la température devient suffisamment basse, c'est **d'abord dans les plus gros pores** que débute la formation de la glace. La **concentration** de la solution non-gelée **augmente**, et le point de fusion de la glace s'abaisse en conséquence. Le même phénomène se produit, mais à des températures plus basses, dans les plus petits pores car leur faible diamètre nuit davantage à la formation de glace.
- Durant la période de gel, il y a un **déséquilibre de concentration** entre la solution plus concentrée dans les gros pores et celle dans les plus petits (y compris les pores de gel) - (Fig 2.60)

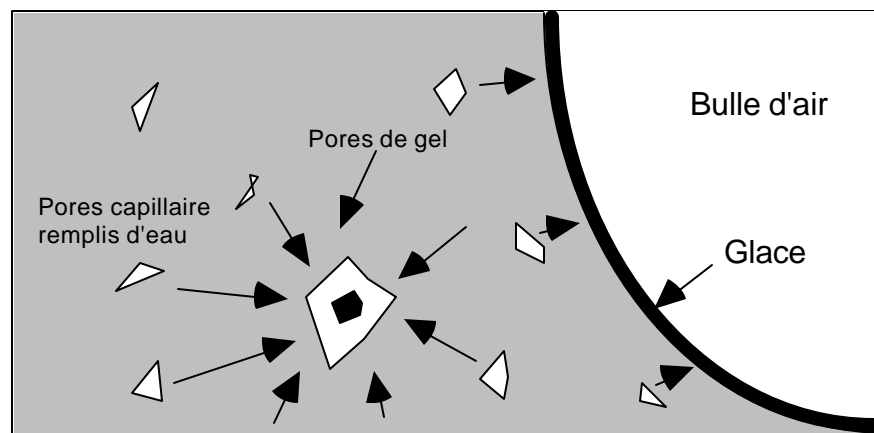


Fig 2.60 - Représentation schématique du processus d'établissement des pressions osmotiques.

- Le **déséquilibre de concentration est à la base du phénomène d'osmose**. L'eau des petits pores a tendance à se **diriger vers les plus gros** pour **rééquilibrer** les concentrations. **Si le pore est plein, il se forme des pressions osmotiques qui peuvent faire fissurer la pâte**.
- À mesure que **l'eau arrive dans les gros pores**, la concentration de la solution **diminue** ce qui entraîne la formation de glace supplémentaire, ce qui contribue alors à augmenter la pression.
- **Le phénomène est de plus en plus prononcé avec la baisse de température car le gel peut pénétrer un plus grand nombre de petits pores**.

Pour protéger la pâte, les bulles d'air doivent entrer en "compétition" avec les plus gros capillaires.

- Il y a généralement un peu **d'eau dans les bulles** et, en raison de leur grand diamètre, l'eau y gèle **relativement tôt sur leurs parois**. La solution qui reste non-gelée, devient de plus en plus concentrée et elle **attire l'eau** des pores plus petits.
- Si les bulles d'air sont **assez rapprochées**, elles **gagnent la compétition** et la pâte est protégée car l'eau se dirige principalement vers les bulles où elle peut s'accumuler sans créer de dommages.
- Cette théorie permet **d'expliquer le retrait** que l'on mesure lors du gel car, comme on l'a déjà dit, l'eau tend à quitter la pâte pour se diriger vers les plus gros capillaires ou les bulles d'air.

Le modèle des pressions osmotiques permet de faire ressortir l'action néfaste des sels de déglçage.

- Les sels de déglçage augmentent la quantité de substances dissoutes dans la solution interstitielle, ce qui amplifie les phénomènes d'osmose.
- La **pression de vapeur** au-dessus de l'eau **salée** est **plus faible** que la pression de vapeur au-dessus de **l'eau pure**. La vapeur d'eau **condense donc plus facilement dans la porosité des bétons en contact avec des sels de déglçages**.

Pour une hygrométrie donnée, le degré de saturation des bétons contenant des sels en solution (dans la porosité capillaire) est par conséquent plus élevé.

- Ce phénomène contribue probablement à expliquer la moins bonne tenue au gel des bétons en contact avec des sels de déglçage.

n Les effets thermodynamiques

- Les concepts de la thermodynamique classique ont souvent été utilisés pour expliquer l'endommagement du béton par les cycles de gel-dégel. Gerard Litvan, du conseil national de la recherche du Canada s'est particulièrement impliqué dans cette démarche ³.
- D'après son modèle, **l'eau des capillaires ne peut probablement pas geler in situ** et ce, probablement à cause des forces de surface.
 - Très tôt après que la température se soit abaissée en dessous de 0 °C, de la glace se forme contre la surface des bulles d'air.
 - La pression de vapeur au-dessus de l'eau surrefroidie (dans les petits capillaires) est supérieure à la pression de vapeur au-dessus de la glace (Fig 2.61).

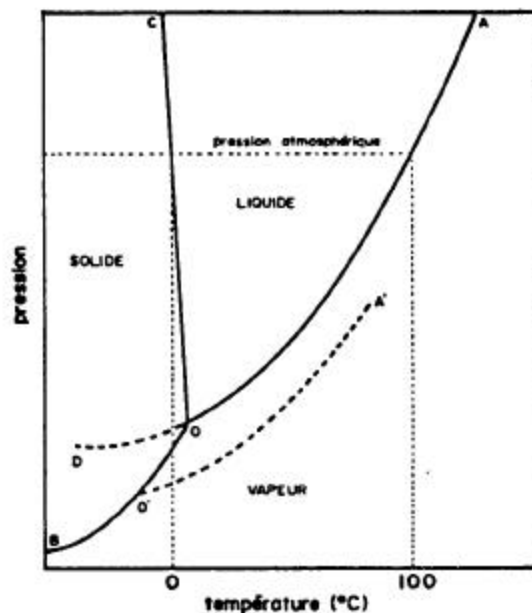


Fig 2.61 - Diagramme des phases de l'eau

³ LITVAN, G. G. 1978 *Freeze-Thaw durability of porous building materials*, Durability of building materials and components, ASTM STP 691 p. 455-463.

- Il en résulte un **déséquilibre thermodynamique** qui cause le **déplacement de l'eau des capillaires, vers les bulles d'air** (ou vers la surface du béton), pour rétablir l'équilibre.
- Plus la **température diminue**, plus le **phénomène s'amplifie**. Au début, seuls les gros pores sont affectés et plus la température s'abaisse, plus des pores de plus en plus petits sont affectés.
- La fissuration de la pâte peut se produire lorsque les déplacements d'eau **ne peuvent se faire de manière ordonnée** en raison d'un **taux de gel** trop important, parce que la **quantité d'eau instable est trop grande** ou parce que le **trajet est trop long** (dans les pâtes sans air entraîné).

2.3.1.2 Paramètres d'influence

- Les principales hypothèses proposées pour expliquer l'action destructrice des cycles de gel-dégel dans la pâte de ciment durci permettent de **dégager trois principes qui gouvernent la formulation d'un béton soumis à un environnement humide avec gel sévère**:
 - Diminuer le volume total et la dimension des pores capillaires de manière à minimiser le volume d'eau gelable ou instable lors du gel.
 - Réduire la perméabilité afin de diminuer le degré de saturation en eau et la pénétration des sels fondants.
 - Produire un béton ayant une résistance mécanique suffisante, particulièrement au niveau de la résistance à la traction.
- Ces trois principales règles sont en fait étroitement associées à la valeur du rapport eau/ciment. En général, plus on abaisse celui-ci, meilleur est le comportement au gel du béton.

Pour des valeurs usuelles du rapport eau/ciment ($E/C > 0,35$), la tenue au gel est principalement gouvernée par un paramètre

fondamental: Les caractéristiques du réseau de bulles d'air entraînées.

n **Le degré de saturation**

- De nombreuses observations in situ faites par une multitude d'opérateurs tendent à montrer **qu'un béton n'est dégradé par le gel que s'il est entièrement saturé d'eau ou dans un état voisin de la saturation** (Fig. 2.62).

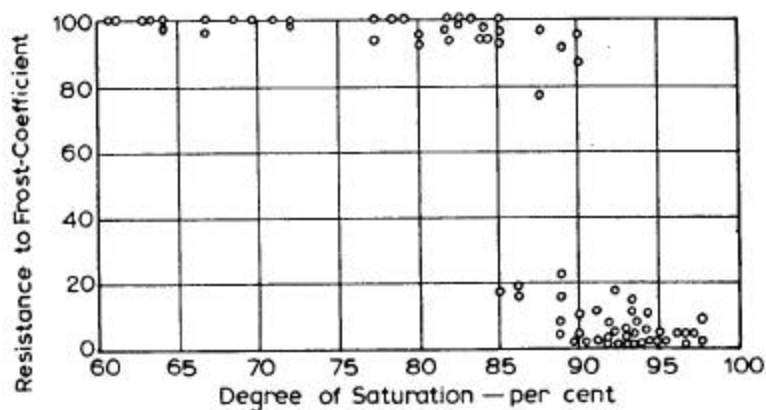


Fig 2.62 - Influence du degré de saturation d'un béton sur sa résistance au gel.
[tiré de Neville, A. M. *Properties of concrete*, 3^e édition, Longman Scientific & Technical, Harlow Essex, 1991].

n **L'air entraîné**

- Il est bien établi que les bétons d'usage courant **doivent contenir des bulles d'air entraînées pour être durables en ambiance hivernale**. Ce

comportement est illustré à la figure 2.63 qui présente une relation entre la tenue au gel de bétons, soumis à des cycles de gel-dégel en laboratoire, en fonction de la résistance à la compression, de la teneur en air, du rapport eau/ciment et de la durée de la cure humide (14 ou 180 jours).

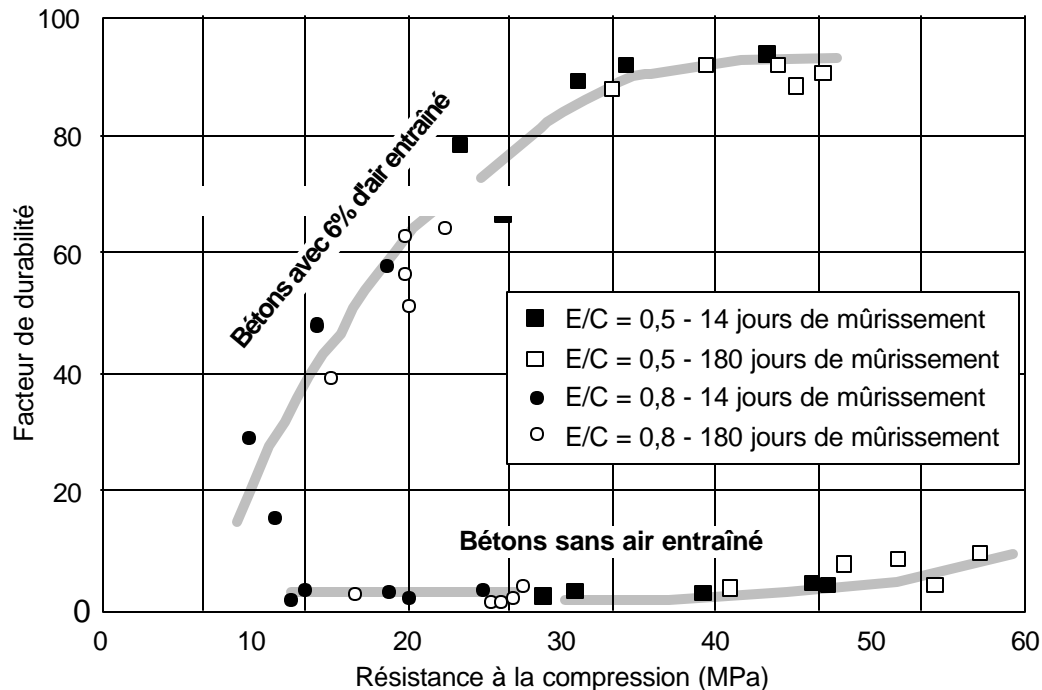


Fig 2.63 - Effet de l'air entraîné, du rapport eau/ciment, de la résistance à la compression et du niveau de maturité sur la tenue au gel du béton. [tiré de Mather, B. 1962 *Effect of duration of moist curing on the relative durability of concrete in freezing and thawing*, USAEWES, Misc Paper 6-531, 9 pp.]

- On constate que les deux bétons **sans air entraîné ne résistent pas au gel** quel que soit le rapport eau/ciment, la résistance à la compression, ou le niveau de maturité avant l'exposition aux premiers cycles de gel.
- Le facteur de durabilité des mêmes bétons mais **contenant 6% d'air entraîné** est significativement plus élevé, ce qui démontre la **protection offerte par la présence d'un bon réseau de bulles d'air**.
- Pour les bétons à air entraîné, les résultats de la figure 2.63 indiquent aussi qu'une **augmentation de la résistance à la compression**, ou une **diminution du rapport eau/ciment**, produit généralement une **amélioration très significative de la tenue au gel**.

Il faut noter que malgré la protection offerte par les bulles d'air, il n'est pas possible de produire un béton suffisamment durable au gel (FD > 60%) en utilisant un rapport eau/ciment aussi élevé que 0,8. Pour parvenir à un niveau de durabilité acceptable, il faut abaisser le rapport eau/ciment à des valeurs plus faibles, voisines de 0,5.

- Le **volume d'air** requis pour protéger le béton contre les cycles de gel-dégel est, entre autres, fonction de la **proportion de pâte** dans le mélange.
- Puisque le rôle des bulles d'air est de protéger la pâte de ciment durcie contre les effets du gel, les bétons contenant un plus **grand volume de pâte** ont donc besoin d'un **volume d'air plus important**.
 - D'un point de vue pratique, la proportion volumique de pâte dans un béton est surtout fonction de la **dimension maximale du gros granulat**.
 - En général, lorsque la dimension maximale du gros granulat augmente, la fraction volumique de pâte diminue tout comme la quantité d'air qu'il est nécessaire d'entraîner pour protéger le béton contre le gel.

n **L'influence de la dimension maximale du gros granulat**

- La figure 2.64 illustre la relation qui existe entre l'expansion mesurée après 300 cycles de gel-dégel en fonction du **volume d'air** entraîné et de la **dimension maximale du gros granulat**.

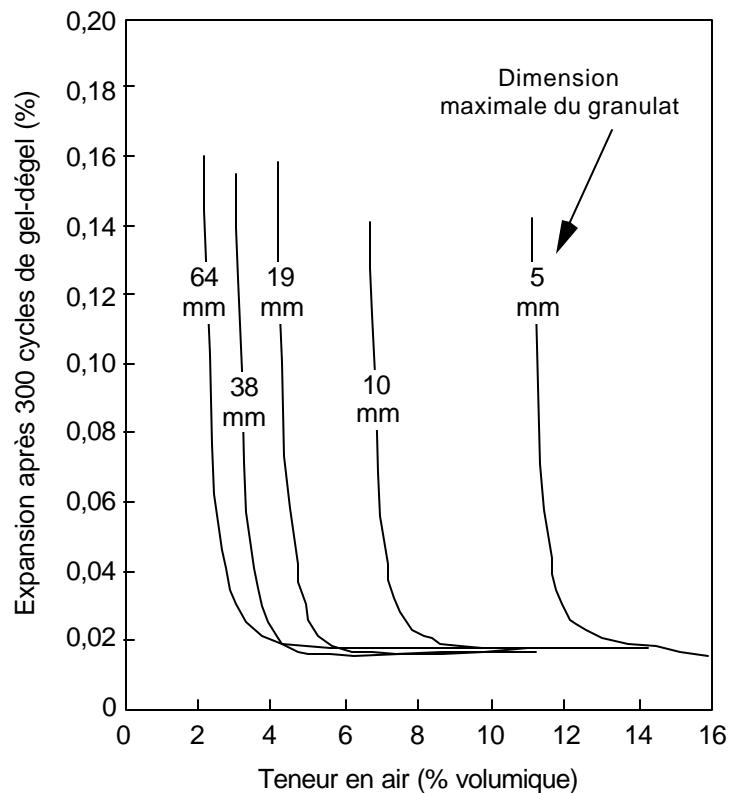


Fig 2.64 - Relation entre l'expansion au gel, la teneur en air et la dimension maximale du granulat.

[tiré de Klieger, P. 1952 *Effect of entrained air on strength and durability of concrete made with various maximum size of aggregates*, Proceedings of the highway research Board, pp. 177-201].

- Pour chacune des courbes, il existe un **volume d'air optimal** qui contrôle l'expansion due au gel.
 - Pour un volume d'air **inférieur à la valeur optimale**, l'expansion après 300 cycles évolue très rapidement vers des **valeurs inacceptables** (> 0,02%) alors qu'un volume d'air supérieur à la valeur optimale ne produit pas d'amélioration significative de la tenue au gel.
 - On remarque que les **valeurs optimales** requises sont toutes comprises entre **3 à 12% du volume total** et qu'elles sont fonction de la dimension maximale du gros granulat.
 - Plus la dimension **maximale est grande**, plus le **volume d'air requis est faible**. Puisqu'en pratique, il est assez rare que l'on fabrique des bétons dont la dimension maximale du granulat est inférieure à 10 mm, on constate qu'une teneur en air comprise entre **4% à 8% est généralement suffisante**.

n L'influence du facteur d'espacement

- Il est bien connu que le **volume total d'air** entraîné **n'est pas la seule caractéristique du réseau de bulles d'air qui gouverne la tenue au gel du béton**.
 - On peut par exemple imaginer **deux réseaux** de bulles ayant le même volume total mais dont le premier serait constitué de **grosses bulles** alors que le second serait constitué de **bulles plus petites**.
 - Même si le **volume total est le même**, on imagine facilement que la distance entre les bulles du réseau constitué de **grosses bulles** est **beaucoup plus grande** que la distance entre les bulles du réseau constitué de petites bulles.
 - Sachant que le degré de protection offert par le réseau de bulles d'air est d'autant plus grand que la distance séparant deux bulles d'air voisines est faible, on réalise alors facilement l'importance de la prise en compte de la dimension moyenne des bulles.

D'un point de vue pratique, il est toujours préférable de produire un réseau constitué de bulles les plus petites possibles. On peut ainsi diminuer la distance moyenne entre les bulles sans nécessairement augmenter le volume total d'air entraîné.

- Parmi les principales caractéristiques du réseau de bulles d'air, le **facteur d'espacement (Γ)** permet de tenir compte à la fois de l'influence du **volume total** et de la **dimension** des bulles d'air entraîné.

Le facteur d'espacement se révèle le meilleur indicateur de l'efficacité de la protection offerte par le réseau de bulles d'air, puisqu'il correspond approximativement à la demi-distance séparant les parois de deux bulles voisines du réseau de bulles supposé régulier.

- Cette grandeur peut être obtenue expérimentalement par **observation microscopique** sur des éprouvettes de béton poli. La procédure la plus fréquemment utilisée est la méthode normalisée **ASTM C457**.

2.3.1.3 Le concept de facteur d'espacement critique

- De nombreux travaux de recherches ont démontré qu'un béton est **durable** face aux cycles de gel-dégel lorsque le **facteur d'espacement est inférieur à une valeur critique (\bar{L}_{crit})** qui dépend des **caractéristiques du béton** et des **conditions d'exposition**.
- La protection offerte par le réseau de bulles d'air ne **diminue pas linéairement** avec l'augmentation du facteur d'espacement mais elle chute brutalement lorsque le facteur d'espacement dépasse la valeur critique. Ce comportement est illustré à la figure 2.65.

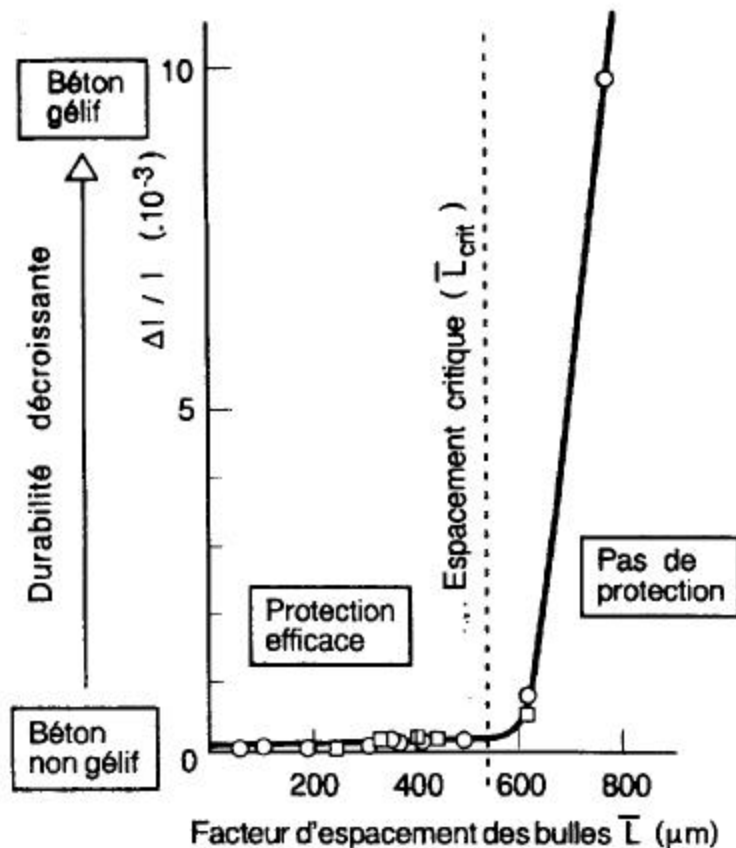


Fig 2.65 - Influence du facteur d'espacement des bulles d'air entraîné sur la durabilité du béton.
 [tiré de Langlois, M. 1986 Relations entre les caractéristiques des vides d'air et la durabilité des bétons usuels soumis à de longs cycles de gel-dégel, Thèse de maîtrise, Université Laval].

2.3.1.4 Résistance à la fissuration interne

- Le tableau 2.4 présente quelques valeurs du facteur d'espacement critique de bétons soumis à des **cycles accélérés de gel-dégel dans l'eau et dans l'air à 100% d'humidité relative**. Ces valeurs s'appliquent à des bétons conservés 14 jours dans l'eau avant la première exposition aux cycles de gel-dégel en laboratoire.

Tab 2.4 - Quelques valeurs du facteur d'espacement critique en fonction des caractéristiques des bétons et du milieu de gel.

$\frac{E}{L}$	Facteur d'espacement critique, \bar{L}_{crit} (μm)		
	Ciment Portland ordinaire	Ciment Portland avec fumée de silice	
	Cycles de gel-dégel dans l'eau	Cycles de gel-dégel dans l'eau	Cycles de gel-dégel dans l'air
0,50	500	250	400
0,30	400	300	450
0,25	750	< 700	-

- Les valeurs présentées au tableau 2.4 sont comprises entre 250 μm et 750 μm et **changent en fonction des caractéristiques du béton** (E/C, fumée de silice) et des **conditions d'exposition** au gel (cycles dans l'eau, cycles dans l'air).
- Pour chaque type d'exposition, les bétons les **moins sensibles** aux effets du gel sont ceux dont le **facteur d'espacement critique est plus élevé**.
 - Selon ces résultats, un béton fabriqué avec un rapport E/C de 0,5, soumis, après 14 jours de cure humide, à des cycles accélérés de

gel-dégel en laboratoire, possède un facteur d'espacement critique de 500 μm .

- Cette valeur indique que, pour être durable dans un environnement similaire, ce même béton devra être protégé par un réseau de bulles d'air dont le facteur d'espacement est au moins inférieur à 500 μm .

- Puisque le facteur d'espacement critique est **assez variable** en fonction des paramètres de formulation et des conditions d'exposition, certains pays, notamment ceux où les conditions d'exposition sont parfois très sévères, **prescrivent une valeur critique unique comprise entre 200 et 250 μm** . Cette exigence s'applique généralement aux bétons soumis à des conditions de gel en **milieu humide ou en présence de sels dégivants**.

- **L'exigence de 200 μm devient particulièrement importante lorsque le béton peut être en contact avec des sels dégivants.**

- Il existe de nombreux résultats en laboratoire qui montrent que **certains BHP** peuvent résister à la fissuration interne sans air entraîné (Fig 2.66) ⁴.
 - Dans le cas des bétons **conventionnels**, un bon réseau de bulles d'air ($\bar{L} < 250 \mu\text{m}$) est **toujours nécessaire** pour obtenir un bon comportement au gel (zone II - Fig 2.66).

 - **Certains BHP** avec un E/C < 0,35 peuvent être résistants au gel sans la protection d'un bon réseau de bulles d'air ($\bar{L} > 500 \mu\text{m}$) (zone I - Fig 2.66).

 - **Les meilleures performances ont été obtenues avec des ciments à haute résistance initiale (Type 30).**⁵

⁴ MARCHAND, J., GAGNÉ, R., PIGEON, M., JACOBSEN, S. ET SELLEVOLD, E.J. 1994 The Frost Durability of High-Performance Concrete, CONSEC 95 Sapporo, Japon, 16 p.

- Le mûrissement scellé produit généralement des bétons plus résistants à la fissuration interne (degré de saturation plus faible).

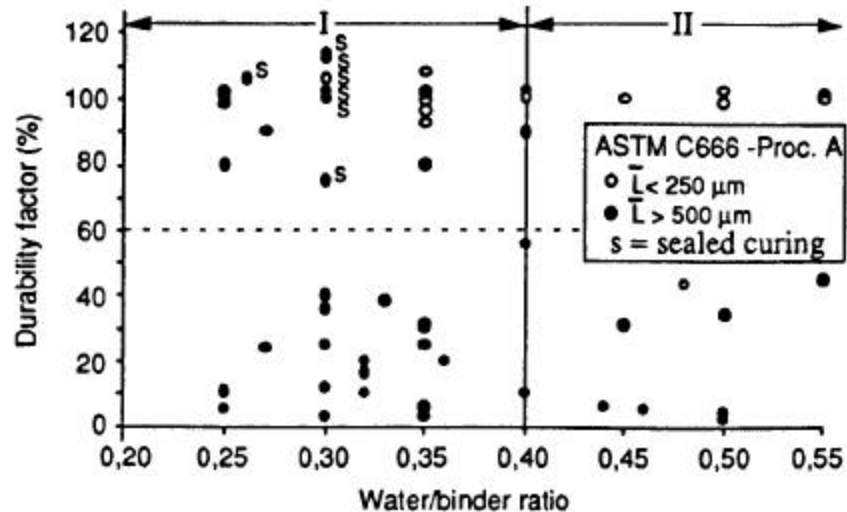


Fig 2.66 - Influence du rapport eau/liant sur la résistance à la fissuration du béton.
[tiré de Marchand, J., Gagné, R., Pigeon, M., Jacobsen, S. et Sellevold, E.J. 1994 *The Frost Durability of High-Performance Concrete*, CONSEC 95, Saporo, Japon, 16 p.].

- **La résistance en compression peut aussi fournir un indice de la tenue au gel des BHP (Fig 2.67).**
 - Les bétons usuels (< 45 MPa) ont nécessairement besoin d'un bon réseau de bulles d'air (zone 1 - Fig 2.67).
 - Les bétons de 45 MPa à 95 MPa n'ont pas nécessairement besoin de la protection d'un bon réseau de bulles d'air (attention prudence !!).

⁵ GAGNÉ, R., PIGEON, M., AÏTCIN, P.-C. (1990) *Durabilité au gel des bétons à haute performance mécanique*, Matériaux et Constructions, RILEM, vol. 23, n° 134, p. 103-109.

- Les bétons de **plus de 100 MPa n'ont généralement pas besoin d'un bon réseau de bulles d'air** (attention prudence !).

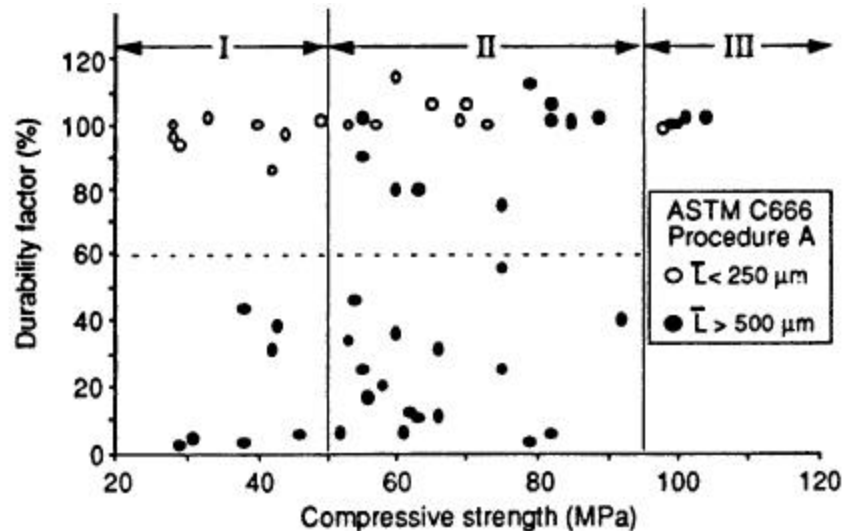


Fig 2.67 - Influence du rapport eau/liant sur la résistance à la fissuration du béton.
[tiré de Marchand, J., Gagné, R., Pigeon, M., Jacobsen, S. et Sellevold, E.J. 1994 *The Frost Durability of High-Performance Concrete*, CONSEC 95, Sapporo, Japon, 16 p.]

- En tenant compte du fait que les cycles rapides de gel-dégel en laboratoire (ASTM C 666) sont **assez sévères** par rapport aux cycles de gel en nature, les résultats de la littérature suggèrent que les **BHP n'ont pas nécessairement besoin d'air entraîné si le rapport E/L est inférieur à 0,25**.⁶

En pratique, avant d'autoriser la mise en place d'un BHP sans air entraîné dans un environnement fortement exposé aux cycles de gel-dégel, il convient de toujours valider le comportement au gel du béton par des essais en laboratoire.

- Dans les BHP à faible rapport E/L (0,25), il apparaît **logique et prudent de recommander un dosage minimal en agent entraîneur d'air** qui devrait permettre d'entraîner un faible volume d'air (3 ou 4 %) afin **d'éviter d'obtenir un facteur d'espacement supérieur 600 ou 700 μm** .

⁶ PIGEON, M., GAGNÉ, R., AÏTCIN, P.-C., BANTHIA, N. (1991) *Freezing and thawing tests of high-strength concretes*, Cement and Concrete Research, vol. 21, n° 5, p. 844-852.

Ce faible volume d'air entraîné n'aura pas d'effet très néfaste sur les propriétés mécaniques. Il procure cependant une garantie supplémentaire contre le gel, tout en améliorant significativement la maniabilité du béton frais.

- Les **additions minérales** peuvent **influencer le facteur d'espacement critique** du béton.
- L'influence des additions minérales sur la tenue au gel du béton en milieu humide est **variable en fonction du type d'addition minérale** et du **taux de remplacement** du ciment.
- De nombreuses études tendent à démontrer **qu'en général**, ces additions minérales (fumées de silice, cendres volantes, laitiers) ne **produisent pas une amélioration significative** de la performance **au gel** du béton ^{7 8}.
 - Pour des taux de **remplacement élevés**, on mesure plutôt une **diminution** de la résistance au gel.
 - Pour les bétons de résistance normale soumis au gel sans sels dégivrants, on peut néanmoins profiter des nombreux avantages offerts par les additions minérales en imposant une **limite sur le taux de remplacement** du ciment, en s'assurant d'un **niveau de maturité suffisant** avant la première exposition au gel et en **prévoyant toujours un réseau de bulles d'air de bonne qualité** ($\bar{L} < 200 \mu\text{m}$).
- On trouve plusieurs résultats qui démontrent que les **bétons avec fumée de silice** possèdent une **bonne tenue au gel** si le réseau de bulles d'air est adéquat et si le taux de remplacement du ciment est **inférieur à 10%** ^{7 8}. En toutes circonstances, la norme CSA A23.2 limite à 10% le taux de remplacement du ciment par de la fumée de silice.

⁷ PIGEON, M.; GAGNÉ, R. ET FOY, C. 1987 *Critical air void spacing factor for low water-cement ratio concretes with and without condensed silica fume*, Cement and concrete research, Vol. 17, No 6, p.896-906.

⁸ 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.

- En l'absence de sels dégivrants, la tenue au gel des bétons avec **cendres volantes** n'est **acceptable** que si le béton est protégé par un **bon réseau de bulles d'air** ^{9 10 11}.
 - Cependant, la tenue au gel des bétons **contenant de fortes teneurs en cendres** volantes (> 35%) fait encore l'objet d'une **controverse** ^{10 12}.
 - En effet, plusieurs **résultats contradictoires** suggèrent qu'il serait plus prudent de **limiter à moins de 35%** le taux de remplacement du ciment lorsque le béton risque d'être exposé à des cycles de gel-dégel en milieu humide **en l'absence de sels de déglacages**.

⁹ 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.

¹⁰ REID, É., PIGEON, M., PLEAU, R. 1993 *La durabilité au gel des bétons à haute performance contenant des cendres volantes de classe F*, Demi-journée ouverte du Réseau de centres d'excellence sur les bétons à haute performance, Québec, juin, p. 19-34.

¹¹ 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.

¹² BILODEAU A., MALHOTRA M. 1992 *Concrete incorporating high-volumes of ASTM class F fly ash: mechanical properties and resistance to deicing salt scaling and to Chloride-ion penetration*, Fourth International Conference of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-132, V. M. Malhotra éd., p. 319-330.