

2.3.3 L'air entraîné

- La mise en oeuvre d'un **béton à air entraîné** est un **processus relativement délicat** qui nécessite généralement un travail préalable de **mise au point en laboratoire et en usine**.
- Ce travail consiste à **sélectionner et à doser l'adjuvant** entraîneur d'air, en fonction des autres **paramètres de formulation** et des **conditions de mise en oeuvre**, de manière à produire un réseau de bulles d'air qui réponde à deux exigences principales:
 - Le volume d'air et le facteur d'espacement doivent satisfaire aux **exigences minimales associées au degré d'exposition** au gel.
 - Les caractéristiques du réseau de bulles d'air doivent être **stables avec le temps**.
- Il n'existe pas de règles simples et précises permettant de choisir le type et le dosage de l'adjuvant entraîneur d'air
- Les caractéristiques des bulles d'air sont fonction:
 - **Presque tous les paramètres de formulation du béton.**
 - Ciment
 - Ajouts minéraux
 - Fluidifiants (réducteurs d'eau, superplastifiant)
 - Granulométrie
 - **Les conditions de mise en oeuvre**
 - Température
 - Vibration
 - Finition de surface
 - Énergie de malaxage
 - **La nature chimique des adjuvants entraîneurs d'air.**

- La **grande diversité des produits** actuellement disponibles (résines de vinsol, sels sulfonés d'hydrocarbures, acides gras, détergents synthétiques) **ne permet pas de suggérer des valeurs précises** sur le dosage à utiliser.
- Il existe **quatre principales familles** d'agents entraîneurs d'air:
 - Les résines naturelles de bois (Vinsol Resin)
 - Les composés sulphatés ou sulphontatés
 - Les détergents synthétiques
 - Les acides gras organiques

2.3.3.1 Production du réseau de bulles d'air

n Mécanismes d'action

- Les agents entraîneur d'air abaissent la tension superficielle de l'eau. Ils facilitent donc la formation de bulles en diminuant l'énergie requise pour créer des surfaces de contact air-eau.
- Le rôle principal des agents entraîneurs d'air est de **stabiliser** les bulles d'air piégées par les **turbulances générées par les pales du malaxeur et les particules fines et grossières**.
- Il existe **trois** principaux **mécanismes** permettant d'expliquer l'action des agents entraîneur d'air.
 - Réduction de la **tension de surface** (surfactants) (Fig. 2.79)

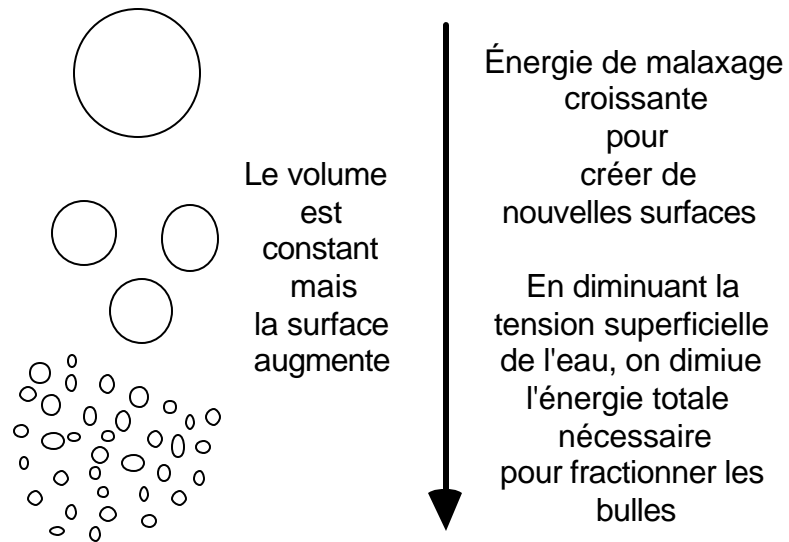


Fig 2.79 - Mécanismes d'action des surfactants.

- Formation d'un **film** insoluble (et hydrophobique) autour des vides d'air (Fig. 2.80)

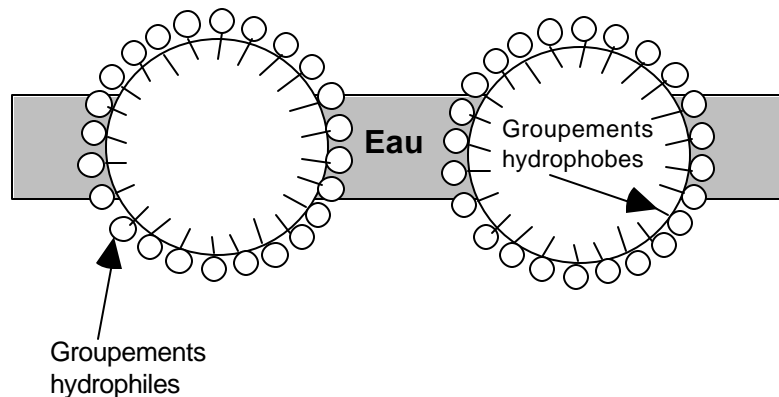


Fig 2.80 - Mécanismes d'action des agents entraîneurs d'air.

- Stabilisation par **adsorption** sur les grains de ciment (Fig. 2.81)

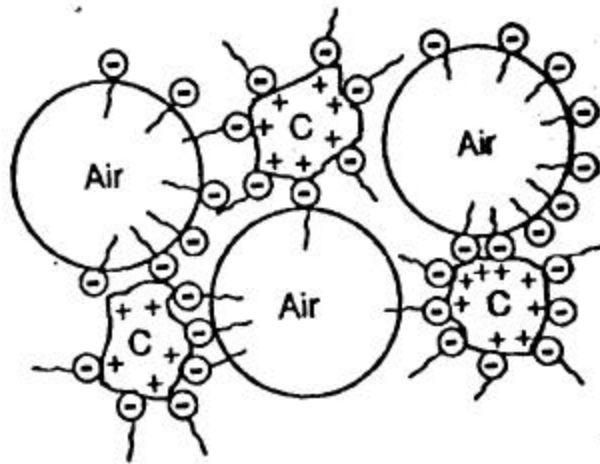
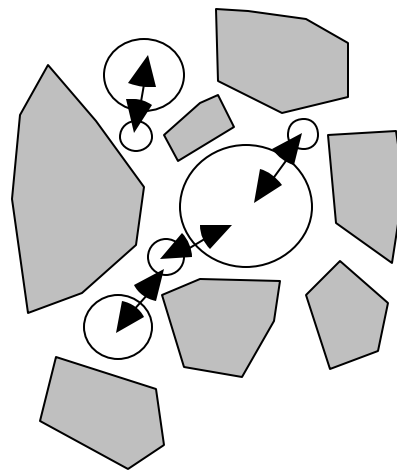
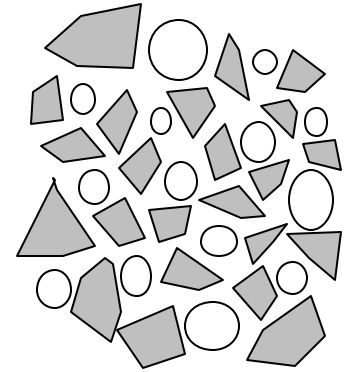


Fig 2.81 - Mécanismes d'action des agents entraîneurs d'air.

- Un bon agent entraîneur d'air doit permettre **d'éviter la coalescence** des bulles d'air pour deux raisons:
 - Les **grosses bulles** peuvent plus facilement être **expulsées** vers la surface (moins stables)
 - Le réseau de bulles d'air offre une meilleure protection s'il est **constitué de petites bulles** d'air.
- Les **paramètres** de formulation du béton qui **influencent** la production du réseau de bulles sont très nombreux.
 - **Ciment**: En général, plus le ciment est fin, plus le dosage en AEA doit être augmenté.
 - **Eau** de gâchage (Dureté, eau recyclée)
 - **Granulats** du mélange (Fig. 2.82)
 - Forme des particules, distribution granulométrique



Grosses bulles stables
Petites bulles instables



Pas de grosses bulles
Petites bulles stables

Fig 2.82 - Influence de la granulométrie des particules sur le mécanisme d'entraînement d'air.

- **Réducteurs d'eau et superplastifiants**: Plusieurs types d'interactions peuvent se produire. L'efficacité des entraîneurs d'air peut être modifiée par des interactions liées aux changements de consistance ou à des interactions de nature chimique.
- Ajouts minéraux
 - **Fumée de silice** : relativement peu d'effet, des corrections sur le dosage peuvent être à prévoir si l'ajout de FS s'accompagne d'un changement de maniabilité ou d'un ajustement du dosage en fluidifiant.
 - **Les cendres volantes**: Peuvent modifier très significativement le dosage de l'adjuvant entraîneur d'air. En général, plus la teneur en cendres volante s'accroît, plus il faut augmenter le dosage de l'agent entraîneur d'air.

L'effet est très variable en fonction du type de cendres. Le surdosage peut aller de **150%** pour certaines cendres de type F à plus de **550%** pour des certaines cendres de type C.

Le dosage de l'agent entraîneur d'air et les caractéristiques des vides d'air doivent être vérifiés par des mélanges d'essais avant d'autoriser toute modification de la teneur ou de l'origine de la cendre volante utilisée.

- **Les laitiers** En général les ajustements sont moins importants que dans le cas des cendres volantes.

2.3.3.2 Stabilité du réseau de bulles d'air

- La **stabilité** est une **caractéristique importante** du réseau de bulles d'air.
- Le réseau de bulles d'air produit pendant le malaxage initial doit **demeurer stable pendant le transport** et jusqu'à la mise en place finale dans les coffrages.
- Un bon agent entraîneur d'air doit être en mesure de produire un bon réseau de bulles qui reste stable jusqu'à la mise en place finale.
- On peut **évaluer la stabilité** du réseau de bulles d'air en **prélevant un ou plusieurs échantillons** de béton entre la fin du malaxage initial et la mise en place du béton dans les coffrages.
- Il ne faut retenir que les agents entraîneurs d'air sont en fait des **stabilisateurs** des bulles d'air créées lors du malaxage.
- Les problèmes de stabilité peuvent survenir suite à un **dosage trop faible** de l'agent entraîneur d'air.
 - À la suite d'une forte baisse de la température, pour maintenir le volume d'air constant.
 - En présence d'un autre adjuvant qui possède une fonction secondaire d'entraînement d'air.

° En présence d'un sable qui entraîne beaucoup d'air (contaminants, granulométrie).

- Des problèmes de stabilité peuvent aussi survenir en raison d'une **incompatibilité chimique** d'un agent entraîneur d'air avec un autre adjuvant utilisé dans les mélanges (superplastifiant, réducteur d'eau, retardateur, etc). En général il peut être plus prudent d'utiliser les produits d'un même fournisseur.

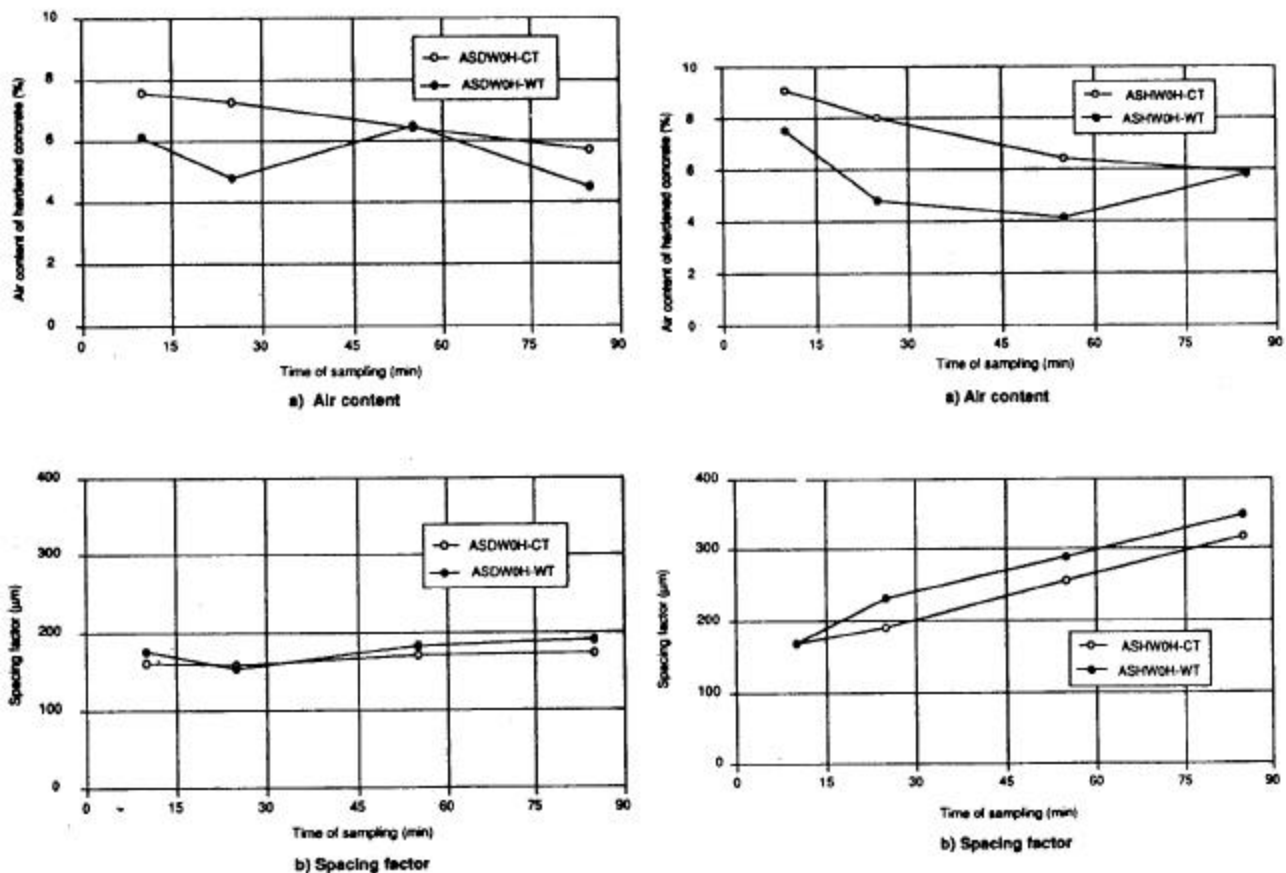


Fig 2.83 - Exemples de relations entre la stabilité du volume d'air et la stabilité du facteur d'espacement des bulles d'air — Partie de gauche: le volume d'air est instable et le facteur d'espacement est stable — Partie de droite: le volume d'air est instable et le facteur d'espacement est instable. [tiré de Saucier, F.; Pigeon, M. et Cameron, G. 1991 *Air-void stability, Part V: Temperature, general analysis and performance index*, ACI Material journal, Vol. 88, No 1, p. 25-36.]

- Il faut porter une attention particulière lorsqu'on doit **corriger l'affaissement par un ajout de superplastifiant au chantier**. Dans certains cas, cette pratique peut engendrer des problèmes de stabilité.

La variation du volume d'air n'est pas nécessairement un bon indicateur de la stabilité du réseau de bulles d'air (Fig 2.83).

2.3.4 Le rôle des granulats sur la tenue au gel du béton.

- Le béton et les granulats ont **plusieurs points en commun**
 - Porosité capillaire
 - Cette porosité peut être plus ou moins remplie d'eau.
- Cette similarité de leur structure fait que **certains processus de destruction par le gel du béton s'appliquent aussi au cas particulier des granulats**.
- Cependant, dans le cas des granulats, on ne **peut pas contrôler** la porosité ou produire un réseau de **bulles d'air entraînées** pour diminuer les effets du gel.
- Pour s'assurer d'obtenir un béton durable, il faut donc **identifier et éviter d'utiliser des granulats** qui de par leur dimension, leur porosité, leur perméabilité ou leur composition chimique, sont sensibles à l'action du gel.

2.3.4.1 Les effets du gel dans les granulats

- La **présence d'eau** dans les granulats et leur degré de saturation sont à la base du phénomène de destruction par le gel.
- Si le degré de saturation du granulat est supérieur à environ 90%, il n'y a pas assez d'espaces vides pour accommoder l'augmentation de volume de l'eau qui gèle.

- **L'eau en excès devra être expulsée à l'extérieur du granulat.** L'expulsion d'eau engendre des pressions hydrauliques qui peuvent causer la rupture du granulat.
- La gélivité du granulat est fonction de l'importance des pressions hydrauliques engendrées lors du gel.
- Dans les granulats, l'intensité des pressions hydrauliques est contrôlée par 3 principaux facteurs.
 - **Degré de saturation**
 - **La porosité du granulat**
 - **La dimension du granulat**

n Le degré de saturation

- Les granulats **fortement saturés** ont plus de chance de **présenter des problèmes de durabilité.**
- Leur degré de saturation dépend :
 - **De la perméabilité du béton**
 - **Des conditions d'exposition**
 - **De la finesse de leur porosité interne**
- Pour un taux d'humidité donné, les granulats avec une porosité très fine possèdent un taux de saturation significativement plus élevé (Fig 2.84)

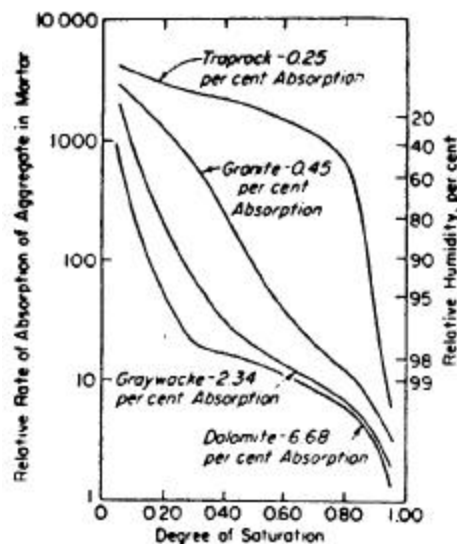


Fig 2.84 - Relation entre le degré de saturation d'un granulat et le taux d'humidité relative.
 [tiré de Verbeck, G. et Landgren, R. 1960 *Influence of physical characteristics of aggregates on frost resistance of concrete*, Proceedings of the American Society of Testing Materials, Vol. 60, pp. 1065-1079.]

n La porosité du granulat

- Pour juger de la performance au gel d'un granulat, il faut tenir compte de la porosité totale de la roche et de la dimension totale des pores.
- Par des essais sur bétons en laboratoire, des chercheurs ont montré que les granulats durables peuvent être regroupés en deux familles (Fig 2.85).
 - Les granulats à très faible porosité totale ($PV < 0,02 \text{ cm}^3/\text{g}$)
 - Les granulats composés de pores très grossiers ($MD > 5 \mu\text{m}$)

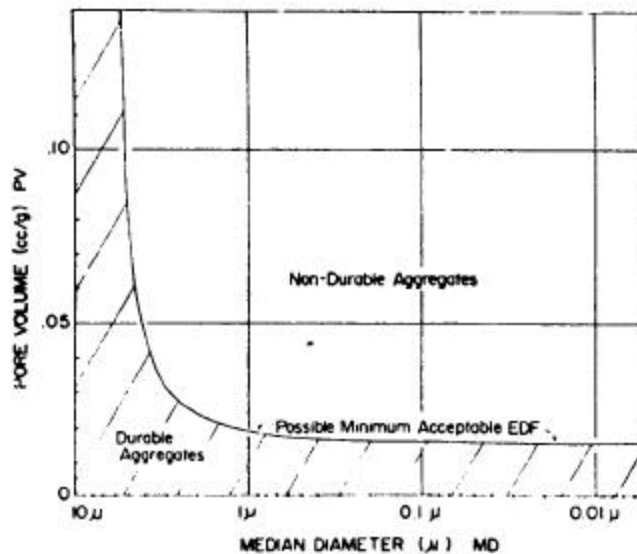


Fig 2.85 - Critère de d'évaluation de la tenue au gel d'un granulat.
 [tiré de Kaneuji, M; Winslow, D.N. et Dolch, W.L. 1980 *The relationship between an aggregates pore size distribution and its freeze-thaw durability in concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 10, No 3, p. 433-441]

Il faut surtout éviter d'utiliser des granulats fortement poreux constitués de pores très fins.

- Les granulats très **faiblement poreux** (quel que soit la dimension des pores) sont **généralement acceptables** car il y a très peu de glace qui se forme lors du gel.
- Les granulats **fortement poreux** peuvent être **acceptables** en autant que leurs **pores soient très grossiers** car ceux-ci sont plus difficilement saturables et parce que leur grande perméabilité permet d'évacuer plus facilement l'eau instable sans créer de pressions hydrauliques trop intenses.

n La dimension du granulat

En général, la sensibilité au gel d'un granulat augmente avec sa dimension (concept de la dimension critique).

- Ce phénomène s'explique par le fait que plus la dimension augmente, plus le trajet que l'eau doit parcourir, pour être expulsée du granulat, s'allonge. Les pressions hydrauliques générées lors du gel en seront d'autant plus grandes.
- **C'est selon ce principe que l'on parvient à expliquer pourquoi le granulat fin (sable) ne cause généralement pas problème lors du gel.**

2.3.4.2 Les principaux granulats sensibles au gel.

- Il est important de rappeler que la performance au gel d'un granulat est fonction de son **degré de saturation**.
- Ainsi, un granulat reconnu comme potentiellement sensible au gel ne sera pas nécessairement néfaste si le béton est maintenu dans un environnement où les conditions de saturation restent toujours faibles.
- Ce ne sont souvent qu'une **faible proportion des particules qui peuvent causer des dommages (< 20%)**.

- La plupart des granulats sensibles au gel font partie de la famille des **roches sédimentaires**.
- Il n'y a généralement **pas de problème** sur leur **absorption est inférieure à 2%**.
- Il faut **éviter** d'utiliser des granulats ayant une **absorption supérieure à 4%**.
- Il faut éviter les calcaires possédant des lits **schisteux ou cherteux** car ils sont sensibles à la délamination lors du gel.
- Il faut éviter les cherts (porosité > 4%, pores très fins) (aussi risques de RAG!)
- Il faut éviter certains **grès très poreux**, les granulats contenant des **argiles**, les **dolomies argileuses**, les **shales**.
- Il faut éviter les particules de **bois**, de **terreau**, de **charbon**, ou de **tourbe**.

La performance antérieure d'un granulat dans les ouvrages en service constitue l'indice le plus fiable de sa qualité

2.2.4.3 Les méthodes d'essais

- En laboratoire, on peut évaluer (ou vérifier) la tenue au gel d'un granulat en mesurant la tenue au gel d'un béton à air entraîné fabriqué avec ce même granulat.
 - On peut utiliser les méthodes suivantes:
 - **ASTM C666** Procédure A (gel-dégel dans l'eau)
 - **ASTM C682** Évaluation de la tenue au gel d'un granulat dans un béton à air entraîné par la méthode de la dilatation critique.
- On peut aussi soumettre le granulat seul à un essai de gel non confiné (**MTO LS 614**)

- Cette méthode consiste à séparer les gros granulats en trois fractions [3/4-1/2], [1/2-3/8] et [3/8-3/16] (pour tenir compte, entre autres, de la dimension critique).
- Chaque fraction est immergée dans de l'eau salée (3% NaCl) pendant 24h.
- **On soumet ensuite chacune des fractions à 5 cycles de gel-dégel (-18 °C).**
- La tenue au gel du granulat est évaluée en déterminant la perte totale sur chacun des tamis utilisés pour séparer chacune des fractions.
- Les pertes peuvent varier de 2% à plus de 80%.

2.3.5 Les principales normes applicables à la durabilité au gel du béton

- Il existe plusieurs normes qui dont les spécifications ou les recommandations concernent directement la tenue au gel du béton.
- Ces normes peuvent être regroupées en trois familles en fonction du domaine d'application:
 - Recommandations concernant les **matériaux**
 - Recommandations concernant la **formulation** du béton
 - Recommandations concernant la **mise en oeuvre** du béton

n Les matériaux

- La plupart des exigences concernant les matériaux (essentiellement les granulats) sont regroupées dans le tableau 3 de la norme CSA A23.1 section 5.
- Les exigences sont variables en fonction du type de granulat (fin ou grossier) ou en fonction du type d'exposition.

Tableau 3
Limites de substances nuisibles* et propriétés physiques

Propriété	Pourcentage maximal de l'échantillon total		
	Granulat fin	Granulat grossier	
		Classes d'expositions† F-1, C-1, C-2	Autres conditions d'exposition
Mottes d'argile (voir la note 1)	1.0	0.25	0.5
Constituants granulaires de faible densité (voir la note 2)	0.5	0.5	1.0
Particules fines passant le tamis 80 µm	3.0§K	1.0‡	1.0‡
Perte à l'essai MgSO ₄	16	12	18
Perte à l'abrasion**	SO	50	50

- **La dimension maximale du granulat est sujette à certaines prescriptions de la norme ACNOR.**
 - 1/2 de l'enrobage minimal spécifié par la norme CSA A23.1 (exposition aux chlorures, section 15.1.8).
 - 2/3 de l'enrobage minimal spécifié par la norme CSA A23.1 (exposition au sol ou aux intempéries, section 12.12.2).

n Le dosage

- On recommande de **limiter la teneur en fumée de silice à moins de 10%**, à moins qu'il ne soit possible de prouver le béton aura une durabilité, une résistance et stabilité volumique satisfaisantes.
- Plusieurs recommandations portent sur la formulation des bétons en contact avec le gel. Les exigences minimales sont fonction du degré d'exposition et de la dimension maximale du granulat.
- Les **classes d'expositions** au gel sont définies par les tableaux 7 et 8 de la norme CSA A23.1 (section 15).

- En fonction de ces **classes d'exposition**, on spécifie un rapport **E/L maximal**, une **résistance en compression minimale** (28 jours) et une catégorie de teneur en air).
- Les catégories de teneur en air sont définies au tableau 10 de la norme CSA A23.1 (section 15).
- Pour les **conditions d'exposition les plus sévères** (F-1, C-1 et C-2), on demande que **l'indice des vides interstitiel (L) soit inférieur à 230 µm** sans qu'aucun résultat ne soit supérieur à 260 µm (section 14.3.2, 14.3.3, 14.3.4).

Tableau 10
Exigences† de teneur en air* pour les diverses
classes d'exposition définies aux tableaux 7 et 8

Catégorie de teneur en air	Plage de teneurs en air des bétons à granulats grossiers de grosseur nominale maximale indiquée, %		
	10 mm	20 mm	40 mm
1	7 à 10	5 à 8	4 à 7
2	5 à 8	4 à 7	3 à 6

* Au point de déchargement du matériel de livraison, à moins d'indication contraire.

† Voir l'article 14.3.

Note. Pour toute autre grosseur nominale maximale du granulats grossiers, on peut faire une interpolation à partir des données du tableau 10.

n Mise en oeuvre

- **L'enrobage minimal** des armatures en milieu corrosif est spécifié à la section 12.12.2. Il est fonction du **degré d'exposition**, du **diamètre des barres**, du **type d'élément de béton** et de la **dimension maximale du granulats**.

Tableau 7
Exigences relatives au béton exposé au gel et au dégel

Classe d'exposition	Condition d'exposition	Résistance minimale spécifiée à la compression à 28 jours, MPa*	Rapport maximal eau/liant*	Catégorie de teneur en air (tableau 10)
F-1	Béton exposé au gel et au dégel, avec saturation	30	0.50	1
F-2	Béton exposé au gel et au dégel, sans saturation	25	0.55	2

* Voir les articles 15.1.4 et 15.1.5.

Note. Voir le tableau 8 pour les exigences relatives au béton exposé au gel et au dégel en présence de sels de déglacage ou d'eau de mer.

Tableau 8
Exigences relatives au béton exposé aux sels de déglacage ou à l'eau de mer

Classe d'exposition	Condition d'exposition	Exemples types	Résistance minimale spécifiée à la compression à 28 jours, MPa*	Rapport maximal eau/liant*	Catégorie de teneur en air (tableau 10)
C-1	Béton pour lequel la protection de l'armature contre la corrosion est critique.	Tabliers de pont, planchers et rampes de stationnement suspendus ; parties d'ouvrages maritimes situées à l'intérieur de la zone des marées	35	0.40	1
C-2	Béton qui n'est pas visé par la classe C-1, mais exposé aux cycles de gel et de dégel.	Chaussées, trottoirs, bordures et caniveaux	32	0.45	1
C-3	Béton dans conditions de saturation, qui n'est pas visé par la classe C-1 et qui n'est pas exposé aux cycles de gel et de dégel.	Parties d'ouvrages maritimes constamment submergées	30	0.50	2
C-4	Béton relativement sec, qui n'est pas visé par la classe C-1 et qui n'est pas exposé aux cycles de gel et de dégel.	Dalles sur sol dans des bâtiments chauffés	25	0.55	2

* Voir les articles 15.1.4 et 15.1.5.

Notes :

1. Les sels de déglacage peuvent avoir un effet nuisible sur les surfaces de béton, même lorsque celles-ci ne sont pas exposées aux cycles de gel et de dégel. Les solutions de sels de déglacage qui pénètrent dans le béton contribuent à diminuer la passivité de l'armature métallique et à la rendre plus vulnérable à la corrosion et à la détérioration consécutive de l'armature et du béton.

2 Voir la note 1 de l'article 15.2

12.12.2.1

L'enrobage spécifié pour l'armature du béton précontraint et non précontraint ne doit pas être inférieur aux valeurs suivantes :

a) béton coulé contre le sol et demeurant en contact permanent avec le sol 75 mm ;

	Béton exposé au sol ou aux intempéries	Béton non exposé au sol ni aux intempéries
b) (i) poutres, poutres-maîtresses, armature principale des poteaux et des pieux, armature n° 35 et plus petite	50 mm	40 mm
ligatures, étriers et armatures hélicoïdales	40 mm	30 mm
(ii) dalles, murs et poutrelles, armature n° 20 et plus petite	30 mm	20 mm
(iii) coques et voiles minces, armature n° 15 et plus petite	30 mm	15 mm
c) pour les barres dont le diamètre (d_b) est supérieur à ceux indiqués ci-haut, l'enrobage doit avoir au moins mais pas plus de 50 mm	$1.5 d_b$	$1.0 d_b$
d) le rapport entre l'enrobage et la grosseur maximale du granulat doit être d'au moins	1.5	1.0
e) l'enrobage d'un faisceau de barres doit être le même que celui d'une barre individuelle ayant une aire égale à la somme des aires des barres du faisceau.		

- Dans le cas d'une exposition aux chlorures ou aux autres agents corrosifs, l'enrobage de protection de l'armature ne doit pas être inférieur à:
 - **60 mm**
 - **Deux fois de diamètre nominal de l'armature**
 - **Deux fois le diamètre nominal maximal du granulat**