

DURABILITÉ ET RÉPARATIONS DU BÉTON

GCI - 714

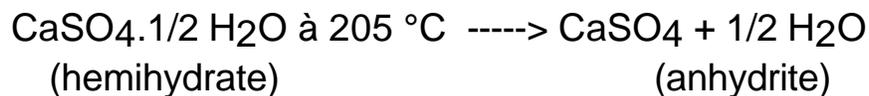
Chapitre 2

LA DURABILITÉ DU BÉTON

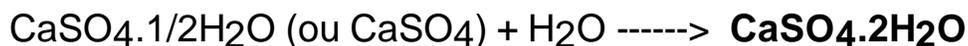
2.1 LA PÂTE DE CIMENT HYDRATÉ

- Il y a plus de 20 siècles, les Égyptiens utilisaient un mortier à base de gypse pour la construction des pyramides

Déshydratation du gypse (2 étapes):

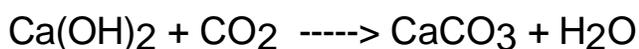
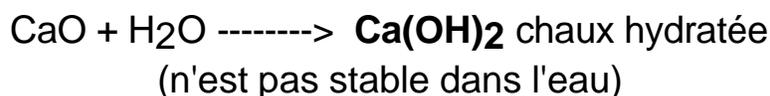


Hydratation:

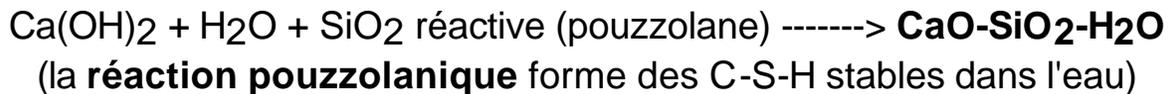


CaSO₄·2H₂O est un liant **non-hydraulique** car il n'est pas stable dans l'eau

- Les Grecs et les Romains utilisaient de la chaux éteinte (CaO) et des pouzzolanes naturelles dans leur mortier.



(carbonatation de la chaux)



- Le ciment Portland est un **liant hydraulique**, c'est-à-dire qu'il se solidifie en réagissant avec l'eau (hydratation) pour produire des composés (hydrates) qui sont **stables dans l'eau**.
- Les principaux constituants du ciment Portland sont:
 - C₃S : 3CaO.SiO₂ (35% à 65%)
 - C₂S : 2CaO.SiO₂ (10% à 40%)
 - C₃A : 3CaO.Al₂O₃
 - C₄AF : 4CaO. Al₂O₃Fe₂O₃
 - Autres (sulfates, alcalis, filler calcaire, impuretés, ...)
- Son invention date du début des années 1800 (1824).
- Le béton durci est produit à la suite de **l'hydratation** du ciment Portland qui réagit avec l'eau pour former des **C-S-H (silicates de calcium hydratés)**. Les C-S-H (la pâte de ciment durcie) jouent le rôle de colle qui solidarise les granulats entre eux pour former un matériau rigide. La pâte de ciment représente de 25% à 40% du volume du béton.
- La plupart des propriétés du béton, et plusieurs aspects de la durabilité du béton, sont directement liés aux caractéristiques de la pâte de ciment durci.

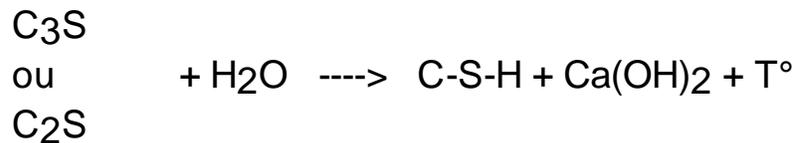
Pour bien comprendre les propriétés physico-chimiques du béton, il est donc important de comprendre la structure de base de la pâte de ciment hydraté.

2.1.1 Rappel sur la structure de la pâte de ciment hydraté

- La pâte de ciment hydraté est le résultat de la **réaction chimique entre l'eau et le ciment** (la réaction d'hydratation). C'est un processus chimique complexe où les principaux composés du ciment C₃S, C₂S, C₃A,

C₄AF réagissent pour former de nouveaux composés **insolubles** qui durcissent avec le temps. C'est surtout l'hydratation du C₃S et du C₂S qui participent le plus au développement de la résistance en produisant des C-S-H.

- **Très sommairement** la réaction d'hydratation du C₃S et du C₂S est la suivante:



- Les hydrates les plus importants sont les **C-S-H**, un composé nonstoichiométrique. Il s'agit d'un **gel** qui influence la **plupart des propriétés de la pâte**
- La réaction du C₃A avec l'eau est **très violente** (beaucoup de chaleur) et elle doit être contrôlée par les sulfates (gypse: $\overline{\text{C}}\overline{\text{S}}\text{H}_2$ ou anhydrite: $\overline{\text{C}}\overline{\text{S}}$) La réaction du C₃A forme des sulfoaluminates dont la forme la plus connue est **l'ettringite** (3CaO.Al₂O₃.CaSO₄.31H₂O).
- La réaction du C₄AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance.
- **La pâte de ciment hydraté est formée par**
 - Les hydrates (C-S-H, Ca(OH)₂, sulfoaluminates)
 - Des grains de ciment non-hydraté
 - Des espaces capillaires
 - Des bulles d'air
- La figure 2.1 [Pigeon 1981] montre une représentation schématique d'une pâte de ciment partiellement hydratée. On y retrouve:
 - Des **grains de ciment** (10 à 80 µm au départ) partiellement hydratés et recouverts d'une couche d'hydrates.
 - Des **capillaires** remplis ou partiellement remplis d'eau

- Des **hydrates** (surtout des C-S-H et de la chaux qui remplissent graduellement les espaces entre les grains de ciment.
- Les pores de gel ne sont pas représentés (trop petits !) et les bulles d'air sont trop grandes pour apparaître sur cette figure.

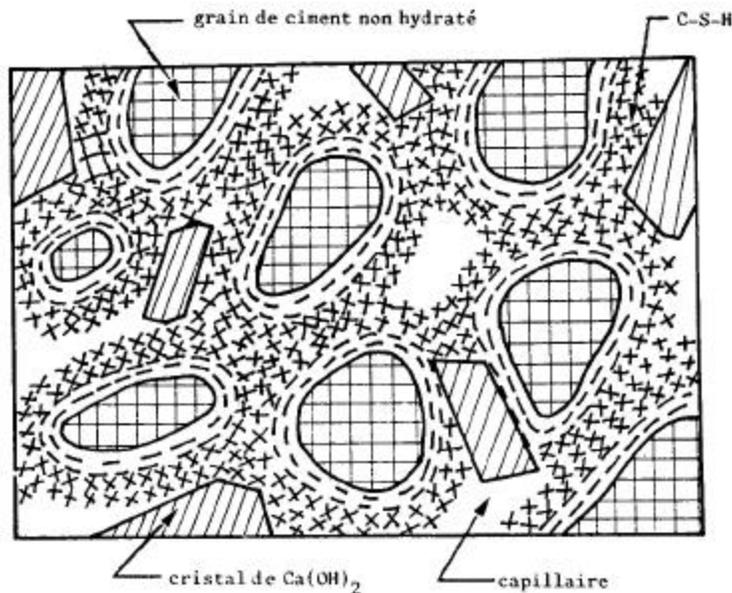


Fig 2.1 - Représentation schématique de la pâte de ciment hydratée
[tiré de Pigeon 1981 *Composition et hydratation du ciment Portland*, Séminaire progrès dans le domaine du béton, Québec, septembre 1981, p. 36-72.]

n Les principaux hydrates

- Les hydrates comprennent:
 - Les **silicates de calcium hydratés** (C-S-H)
 - Les aluminates hydratés
 - La **chaux hydratée** (portlandite)
 - De l'eau adsorbée sur certains cristaux
 - Des impuretés.

Les C-S-H

- Le C-S-H occupent entre 50% et 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée.
- Le **C-S-H est un gel solide** qui a les propriétés d'un corps solide.

- Il a une **structure en feuillet**, formée de cristaux très petits et mals cristallisés. La surface spécifique des C-S-H est très élevée (100 à 700 m²/g). La **cohésion** des C-S-H est due, en partie, aux forces de **Van der Waals** entre les particules colloïdales des C-S-H (Fig 2.2).
- Le pH de la solution intersticielle contenant les C-S-H est très alcalin (voisin de 13). À des pH plus faibles, il peut y avoir lixiviation des ions Ca²⁺. Les C-S-H subissent alors des transformations qui peuvent augmenter leur porosité et diminuer les propriétés mécaniques.
- Le gel de C-S-H est **poreux**.
 - Les pores de gel, sont en fait les espaces qui contiennent de **l'eau adsorbée sur les surfaces entre les feuillets**.
 - Ils sont **très petits** (20Å à 30Å)
 - La porosité du gel de C-S-H représente environ **28% du volume total du gel**.
- L'eau des pores de gel n'est pas "libre" car elle est fortement retenue sur les feuillets par des forces de surface. Puisque les pores de gel sont extrêmement fins, ils **contribuent très peu à la perméabilité de la pâte** et du béton.

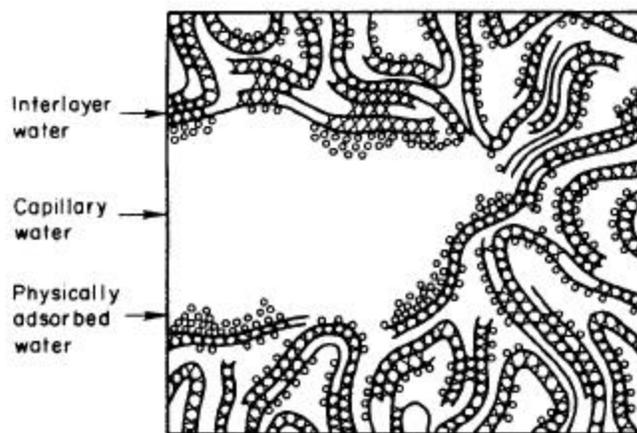


Figure 2-9 Types of water associated with the calcium silicate hydrate. [Based on R. F. Feldman and P. J. Sereda, *Eng. J. (Canada)*, Vol. 53, No. 8/9, 1970.)

In the hydrated cement paste, water can exist in many forms; these can be classified depending on the degree of ease with which water can be removed. This classification is useful in understanding the volume changes in cement paste that are associated with the water held by small pores.

Fig 2.2 - Représentation schématique du C-S-H et de l'état de l'eau qui y est associé.
[tiré de Metha, 1986 *Concrete structure, properties, and materials*, Prentice-Hall, 450 p.]

La chaux hydratée (CH ou portlandite)

- Elle occupe de 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée.
- La portlandite a une **morphologie hexagonale** prismatique (la morphologie est **très variable** en fonction des paramètres de composition du béton.
- Elle est produite à la suite de **l'hydratation du C₃S et C₂S**.
- Dans la pâte de ciment hydraté, elle **devient instable** (lixiviation) lorsque le pH devient inférieur à environ 12,5.
- Elle participe peu au développement de la résistance du béton.

Les aluminates hydratés

- Ils occupent de 15 à 20 % du volume solide de la pâte de ciment hydraté.
- On les retrouve généralement sous deux formes
 - **Ettringite** (trisulfoaluminates) aiguilles prismatiques
 - **Monosulfoaluminates** (plaquettes hexagonales).

n La porosité interne du béton et de la pâte de ciment hydraté

- La **porosité** du béton et de la pâte de ciment hydraté **gouverne de nombreuses propriétés du béton**
 - Presque toutes les caractéristiques mécaniques
 - Toutes les perméabilités (eau, ions , gaz)
 - **Durabilité**
- Plus la **porosité** diminue, plus les **propriétés mécaniques** augmentent et plus la **perméabilité** diminue (Fig 2.3).

Les bétons faiblement poreux sont en général plus

durables puisque leur faible perméabilité retarde la pénétration de l'eau, et des autres agents potentiellement agressifs (sulfates, CO_2 , Cl^- , etc).

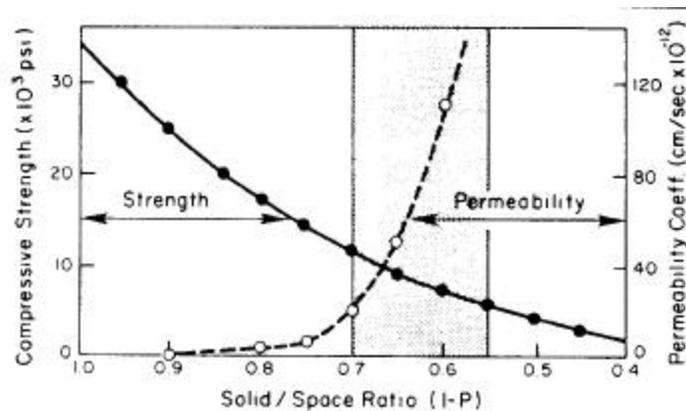


Fig 2.3 - Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton.
[tiré de Metha, 1986 *Concrete structure, properties, and materials*, Prentice-Hall, 450 p.]

- La **porosité** du béton est constituée de **plusieurs familles de vides** dont les dimensions sont comprises entre quelques mm et quelques dizaines d'angstrom (Å). Les plus petits *vides* du béton sont donc **1 million** de fois plus petits que les plus gros . (Fig 2.4)

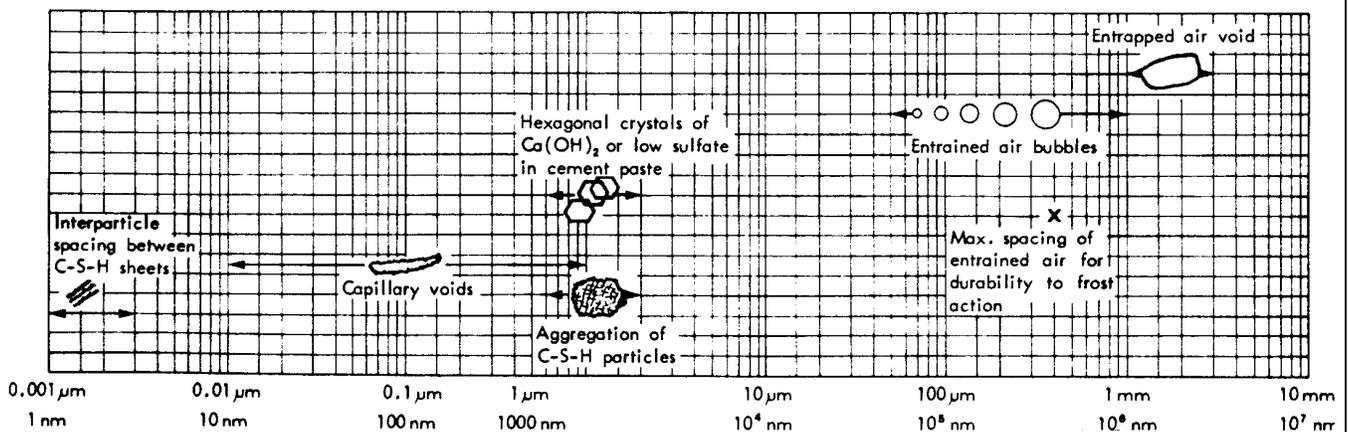


Fig 2.4 - Échelle de la taille des solides et des pores dans la pâte de ciment hydraté.
[tiré de Metha, 1986 *Concrete structure, properties, and materials*, Prentice-Hall, 450 p.]

- Par **ordre décroissant** de diamètre on retrouve:
 - Les vides d'air entrapés et les défauts de compaction (diamètre > 1mm)

Ces vides ne sont généralement pas remplis d'eau

- Les bulles d'air entraînées (10 μm < diamètre < 1 mm)
- Les pores capillaires (0,01 μm < diamètre < 5 μm)

Si le béton est constamment conservé à l'humidité, on peut considérer que les pores capillaires sont pratiquement remplis d'eau. Si le béton est soumis au séchage, les pores capillaires commencent à se vider graduellement en commençant par les plus gros.

Ce sont surtout le volume total et la dimension des pores capillaires qui influencent le plus la perméabilité du béton.

- Les pores de gel (diamètre < 40 Å)

Les pores de gel contiennent de l'eau qui est en partie **adsorbée à la surface des feuilletts de C-S-H**. Cette eau est relativement *stable* et il est difficile de l'extraire par séchage.

Les pores de gel n'ont pas une grande influence sur la perméabilité.

n Le rapport eau/ciment (influence sur la porosité)

- Le rapport eau/ciment exerce une **grande influence** sur la porosité de la pâte de ciment hydraté car il gouverne directement **l'espacement initial** entre les grains de ciment en **suspension** dans l'eau de gâchage.

- Sur la figure 2.6, on voit clairement que plus le rapport **E/C est faible**, plus, initialement, les grains de ciment sont **rapprochés les uns des autres**. Les espaces à combler entre les grains de ciment sont moins grands et il y a **moins de chance d'avoir un grand vide** ne pouvant pas être complètement rempli par les hydrates (Fig 2.5)

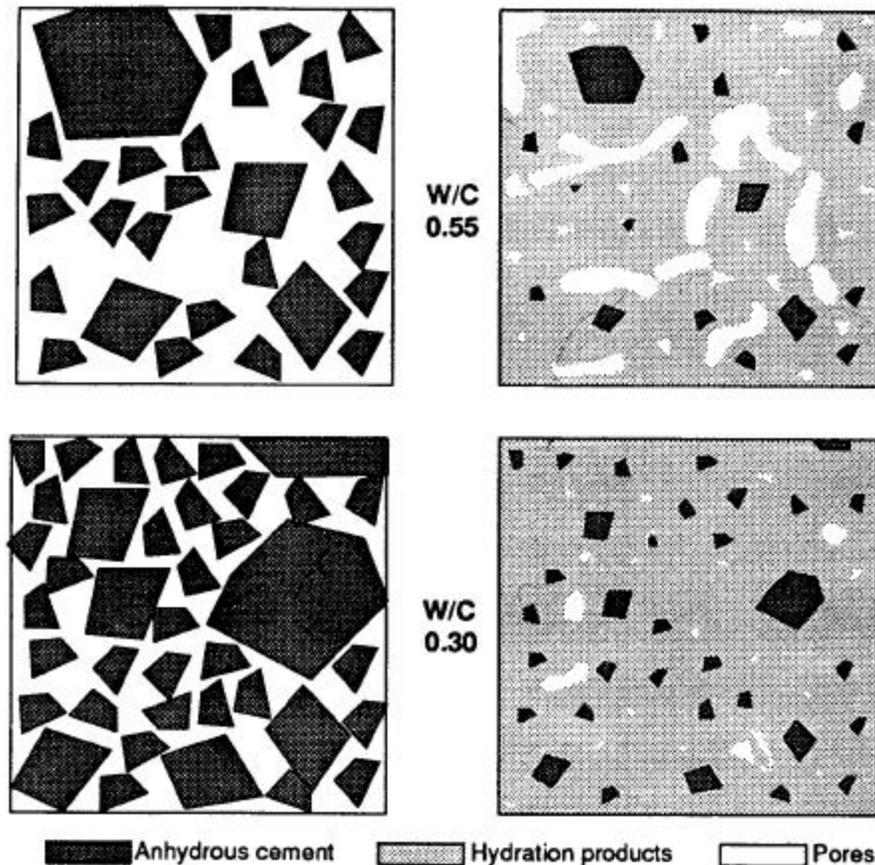


Fig 2.5 - Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci. [tiré de Gagné et Aïtcin 1993, *Superplasticizers for durable concrete*, Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton, Monterrey, Octobre, Mexique, p. 200-217].

- **Même une très faible quantité d'hydrates peut permettre de combler les espaces intergranulaires.** C'est en partie ce qui explique que les bétons avec E/C faible développent très rapidement leur résistance.
- On peut se poser cette question :

Quelle est l'influence du E/C sur la porosité capillaire ?

Intuitivement on peut effectuer le raisonnement suivant:

- A) Supposons que l'on utilise une très **grande quantité d'eau** pour une très faible masse de ciment (E/C élevé). Les grains de ciment seront donc très éloignés les uns des autres et, après s'être complètement hydratés, il restera un surplus d'eau important, donc, une porosité capillaire très importante. La **perméabilité du béton sera très grande et ses propriétés mécaniques seront très faibles**.
- B)- Inversement, si la quantité d'eau est **très faible** par rapport à la masse de ciment (E/C faible). Les grains de ciment sont **très près** les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très **peu de porosité capillaire**. La **perméabilité du béton sera très faible et les propriétés du béton seront très élevées**.

Cependant, on aura utilisé beaucoup **trop de ciment** car une grande partie de celui-ci n'aura pas pu réagir par manque d'eau.

Y a-t-il un *juste milieu* ?

À partir de **mesures expérimentales** de base, on peut calculer plus précisément la relation entre le E/C et volume de la porosité capillaire (*composition et hydratation du ciment Portland* [Pigeon, 1981]).

Sachant que:

- L'eau combinée chimiquement représente 23% du poids du ciment non-hydraté.
- Le volume des produits d'hydratation est égal au volume du ciment non hydraté plus 0,746 fois le volume d'eau combiné chimiquement.
- La porosité de l'ensemble des hydrates est de 28% (eau)

Théoriquement on peut montrer que:

- Pour un rapport **E/C de 0.42**, il y a **juste assez d'eau pour hydrater complètement tout le ciment (Fig 2.7)**. Cependant,

puisque le volume des hydrates formés est plus petit que le volume de l'eau et du ciment, il y aura création d'espaces vides non-remplis d'eau. C'est ce qu'on appelle la **contraction LeChâtelier**.

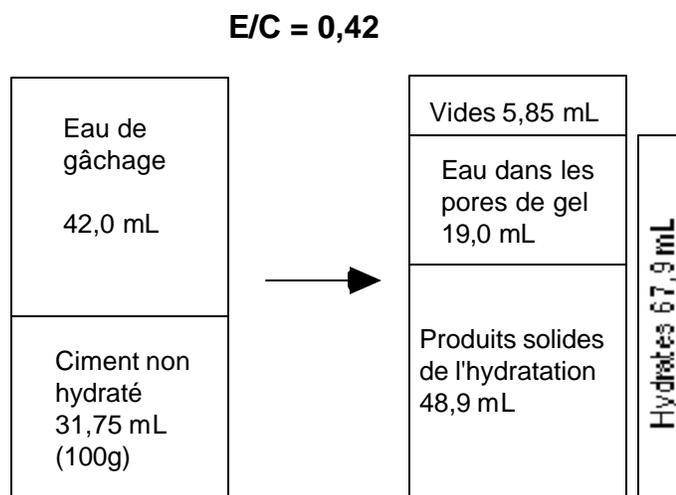


Fig 2.6 - Bilan volumique de l'hydratation d'une pâte de ciment fabriquée avec un E/C de 0,42.

- Si le rapport E/C est plus **grand que 0.42**, il y a plus d'eau qu'il n'en faut pour hydrater complètement tout le ciment (Fig 2.7). Après que tout le ciment se soit hydraté, ce **surplus d'eau demeurera dans des pores capillaires** (eau libre).

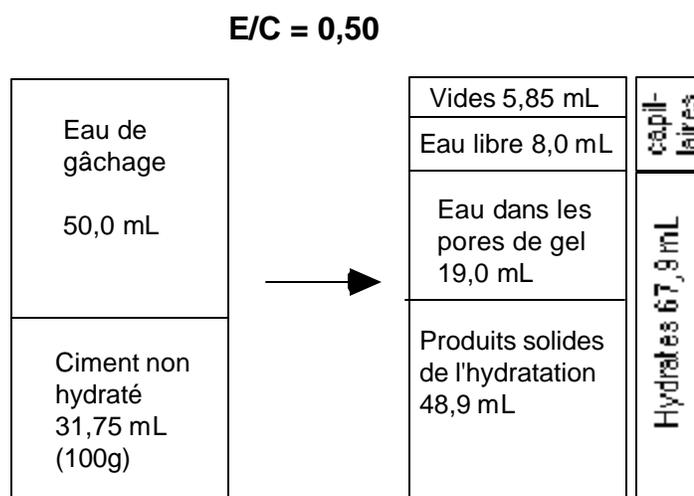


Fig 2.7 - Bilan volumique de l'hydratation d'une pâte de ciment fabriquée avec un E/C de 0,50.

- Si le rapport E/C est de **0.36** (cas théorique idéal), tout le ciment ne peut s'hydrater par manque d'eau. Cependant, **s'il y a un apport d'eau de l'extérieur** (le béton est conservé dans l'eau par exemple) la fraction du ciment qui reste, pourra s'hydrater avec cette eau externe et suffira à combler **tout juste** les vides créés par la contraction LeChâtelier (Fig 2.8).

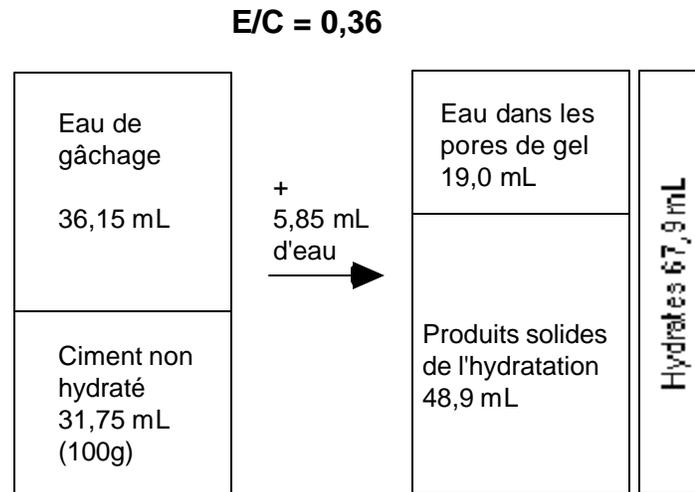


Fig 2.8 - Bilan volumique de l'hydratation d'une pâte de ciment fabriquée avec un E/C de 0,36.

- Si le rapport E/C est **inférieur à 0.36**, toute l'eau réagira et, par conséquent, **tout l'espace sera occupé par les hydrates**. Il subsistera toujours du ciment non-hydraté mais ce dernier ne nuit pas à la résistance.
- D'un point de vue strictement chimique, en équilibrant les réactions d'hydratation du ciment, un rapport E/C=0,22 suffit pour hydrater tout le ciment. Cependant, Powers a montré que pratiquement, et d'un point de vue physicochimique, il faut un rapport E/C minimal de 0,42 (système scellé).
- En effet, pour que la réaction d'hydratation se poursuive, une certaine quantité d'eau doit être adsorbée par les hydrates (eau de pores de

gel) sans que celle-ci soit liée chimiquement, sa présence dans les hydrates étant absolument nécessaire à leur formation¹

La figure 2.9 permet de résumer l'influence du E/C sur la porosité de la pâte de ciment hydraté. On y présente la fraction volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 100% d'hydratation (conservation dans l'eau).

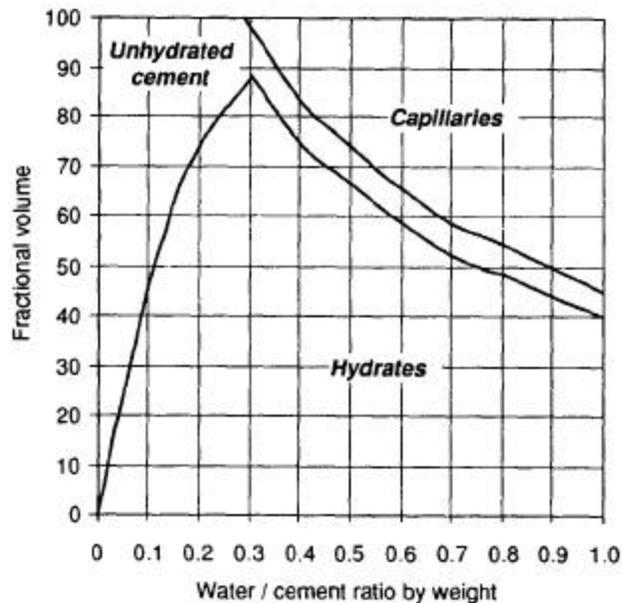


Fig 2.9 - Proportion volumique des constituants de la pâte de ciment hydraté en fonction du E/C après 80% d'hydratation dans l'eau.
[tiré de Hansen 1970, *Physical composition of hardened Portland cement paste*, ACI Journal, mai 1970, p. 404-407]

- Tous les exemples qui précèdent sont issus de **calculs théoriques** qui ne représentent pas nécessairement la réalité. En **pratique, l'hydratation n'est jamais complète** car les plus gros grains de ciment ne s'hydratent jamais complètement. À un certain stade de leur hydratation, ils sont recouverts d'une coquille d'hydrates très dense qui empêche l'intérieur du grain de réagir avec l'eau environnante. **C'est pour cette raison qu'en pratique, même dans les pâtes fabriquées avec un E/C très faible (0,25) il subsiste toujours une certaine porosité capillaire.**
- La réduction du rapport E/C permet non seulement de **diminuer le volume total des pores** capillaires mais elle permet aussi de **réduire leur**

¹ Aouad, I. 1997 Caractérisation du retrait autogène interne et externe dans les bétons, Rapport de définition de projet de recherche, Université de Sherbrooke, Génie civil, 24 p.

diamètre. Pour un E/C plus faible la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores **plus fin et plus discontinu**. Ce phénomène est illustré sur la figure 2.10

- En réduisant le E/C de 0,45 à 0,25, le volume total de la porosité (cumulative porosity) passe de 40% à moins de 20% et, en même temps, le diamètre moyen des plus gros pores est diminué par un facteur 10 !

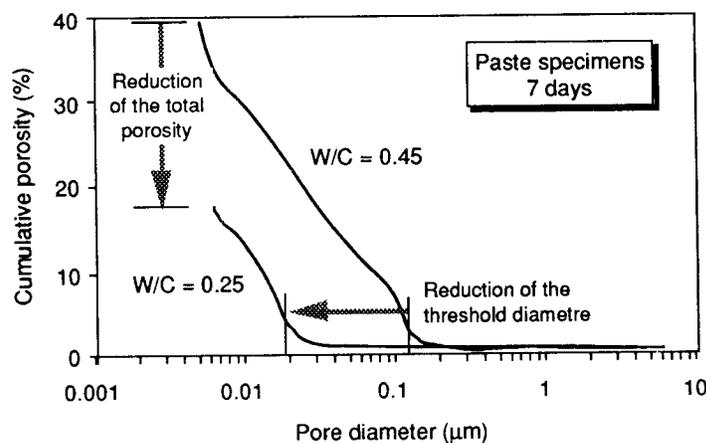


Fig 2.10- Courbe de porosimétrie au mercure de deux pâtes de ciment conservées pendant 7 jours dans l'eau.

[tiré de Gagné et Aïtcin 1993, *Superplasticizers for durable concrete*, Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton, Monterrey, Octobre, Mexique, p. 200-217].

- En général, il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les **plus petits possibles** car le degré d'interconnexion y est plus faible. La **perméabilité de la pâte s'en trouve alors considérablement diminuée** car il y a très peu de chemins préférentiels pour le passage des liquides, des gaz ou des ions potentiellement agressifs (Fig 2.11)

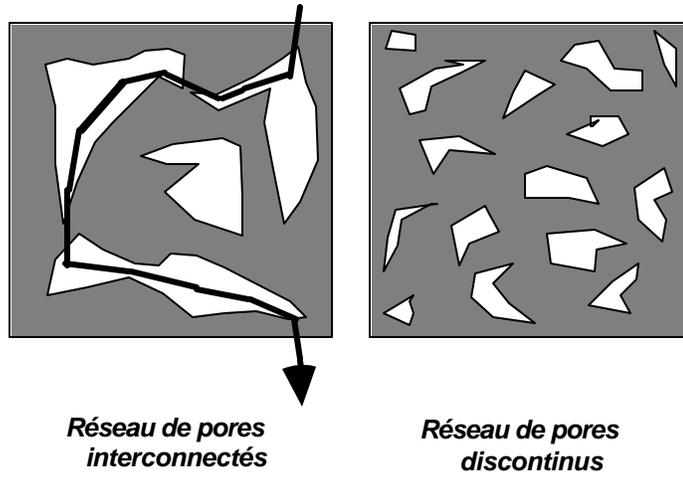


Fig 2.11 - Influence du degré d'interconnectivité sur la perméabilité de la pâte

2.1.3 Contraction LeChatelier, autodessiccation et retrait endogène

- Dès 1900, **LeChâtelier** a montré que **l'hydratation du ciment** s'accompagnait d'une **diminution de volume**.
 - LeChâtelier a mesuré les variations du niveau d'eau dans des tubes capillaires remplis d'eau et de ciment (Fig 2.12). Cependant, cette technique n'est valable que pour des rapports E/C très élevés (>1).
 - **La contraction LeChâtelier** correspond à environ **8,7% du volume des hydrates formés**.
 - Elle correspond aussi à **environ 5,8 mL par 100 g de ciment hydraté** (voir figures 2.6 et 2.7).

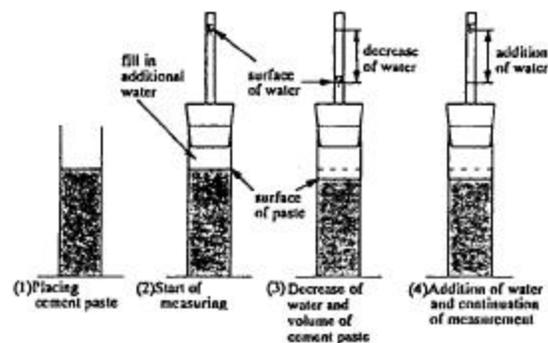


Fig 2.12 - Mesure du retrait chimique dans une pâte de ciment

[Tiré de: Tazawa, E.; Miyazawa, S. et Kasai, T. 1995 *Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste*, Cement and Concrete Research, Vol 25, No 2, p. 288-292]

- **Avant la formation d'un squelette minéral rigide** (prise), la contraction LeChâtelier produit uniquement une faible **diminution du volume externe** apparent (Fig 2.13 et 2.14).
- **Après la prise**, la diminution de volume due à l'hydratation est incompatible avec la déformation admissible par le squelette minéral.
 - On observe alors l'apparition d'un **volume gazeau (vapeur d'eau)** dans la porosité de la pâte initialement saturée en eau (Fig 2.13 et 2.14).

- Plus l'hydratation progresse, plus le **volume** des vides gazeux **augmente**.
- Le rapport entre le volume gazeux et le volume total des pores varie en **fonction du degré d'hydratation et du rapport E/C**.

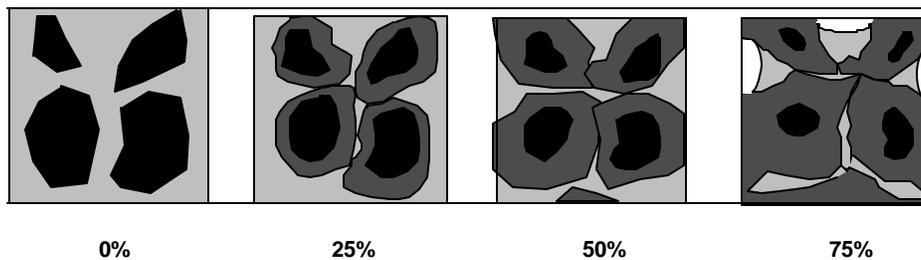
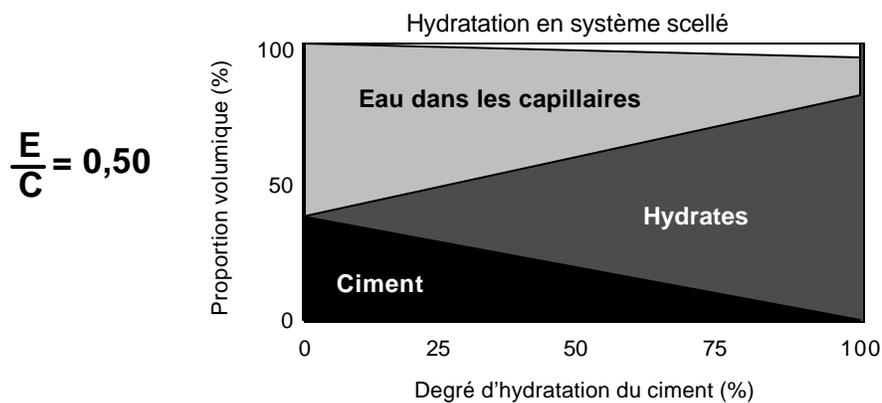


Fig 2.12 - Évolution schématique de l'hydratation d'une pâte de ciment ($E/C=0,50$) en système scellé.

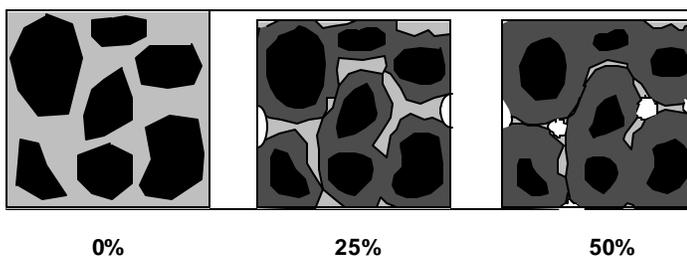
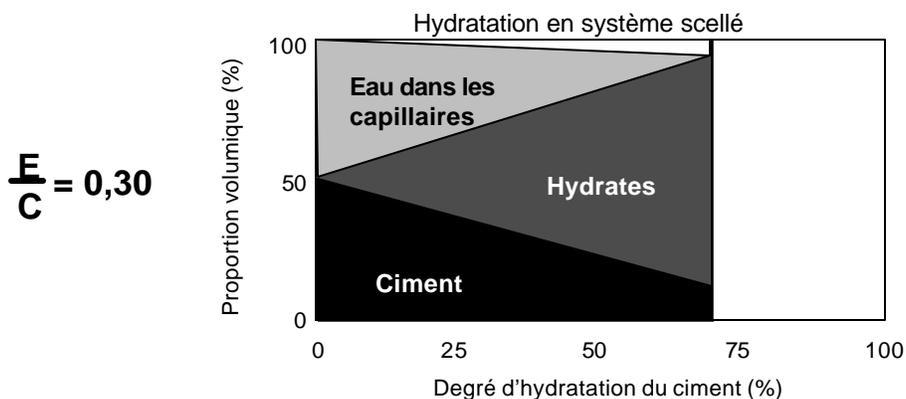


Fig 2.13 - Évolution schématique de l'hydratation d'une pâte de ciment (E/C=0,30) en système scellé.

- Dans un béton où le volume d'eau libre diminue par rapport au volume total des pores capillaires, à cause de la contraction LeChâteleir, **les vides gazeux (ménisques) se forment en premier dans les plus gros capillaires** (Fig 2.13 et 2.14).
 - Ainsi, à un instant donné, **tout le volume d'eau capillaire se retrouve dans les pores capillaires de diamètre inférieur à r_0** .
 - En utilisant l'équation de **Laplace** on peut calculer la **dépression** dans la phase liquide (Tab 2.1 et Fig. 2.14).
 - En utilisant l'équation de **Kelvin**, on peut calculer **l'humidité relative** dans le béton (Tab 2.1 et Fig 2.14).
 - Loi de Kelvin

$$DP = RT/Mv \cdot \ln h$$

ΔP : gradient de pression entre la phase gazeuse et la phase liquide
R : constante des gaz parfaits
T : température de l'eau capillaire
M : masse d'une mole d'eau
v : volume massique de l'eau
h : humidité relative dans le pore capillaire

- Loi de Laplace

$$DP = 2s/r \cdot \cos \alpha$$

ΔP : gradient de pression entre la phase gazeuse et la phase liquide
 σ : tension superficielle de l'eau
r : rayon d'un pore capillaire où existe le ménisque
 α : angle de mouillage

Tab 2.1 - Valeurs calculées de l'hygrométrie relative et de la dépression capillaire pour différents rayons de pores capillaires.

r (nm)	50	25	10	5
h (%)	98	95	90	80
ΔP (MPa)	3	6	15	3



Fig 2.14 - Schématisation d'un ménisque dans un capillaire

[tiré de Baroghel-Bouny, V. 1994 *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons*, Thèse de doctorat, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, p. 69-134.]

- La **dépression** engendrée par la contraction LeChâteleir **dans la phase liquide** est globalement compensée par une **compression dans la phase solide** de la pâte, ce qui engendre un **retrait nommé retrait endogène**.
- Le retrait endogène est notamment fonction de:
 - Le rapport E/C
 - La finesse du ciment
 - La fumée de silice
 - Autres
- **Influence du E/C**
 - **Le retrait endogène augmente rapidement lorsque le E/C diminue** (Fig. 2.15).
 - Il s'agit d'un phénomène **important dans le cas des BHP**. Ces bétons possèdent une porosité capillaire très fine qui force la formation de ménisques très courbés et qui engendre, très tôt, de **fortes dépressions capillaires**.
 - **L'humidité relative interne chute** rapidement lorsque le **rapport E/C diminue** (Fig 2.16)

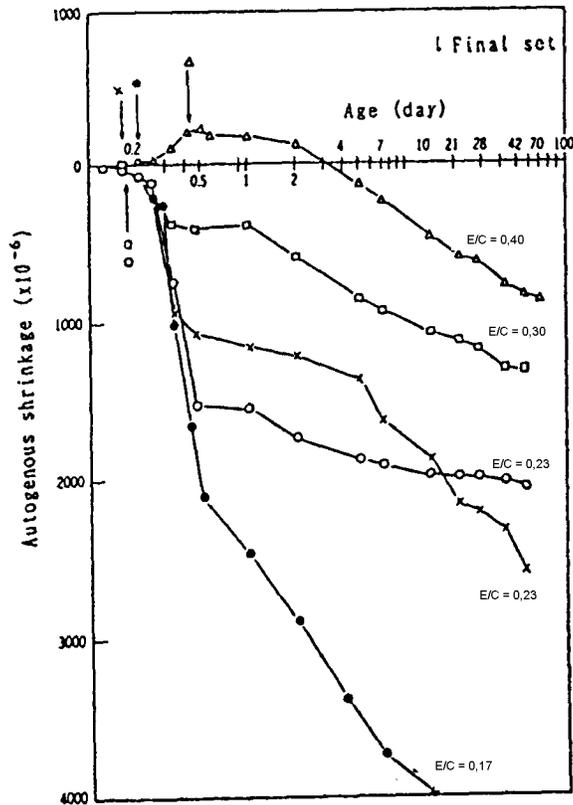


Fig 2.15 - Influence du rapport E/C sur le retrait endogène de la pâte.

[Tiré de: Tazawa, E.; Miyazawa, S. et Kasai, T. 1995 *Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste*, Cement and Concrete Research, Vol 25, No 2, p. 288-292]

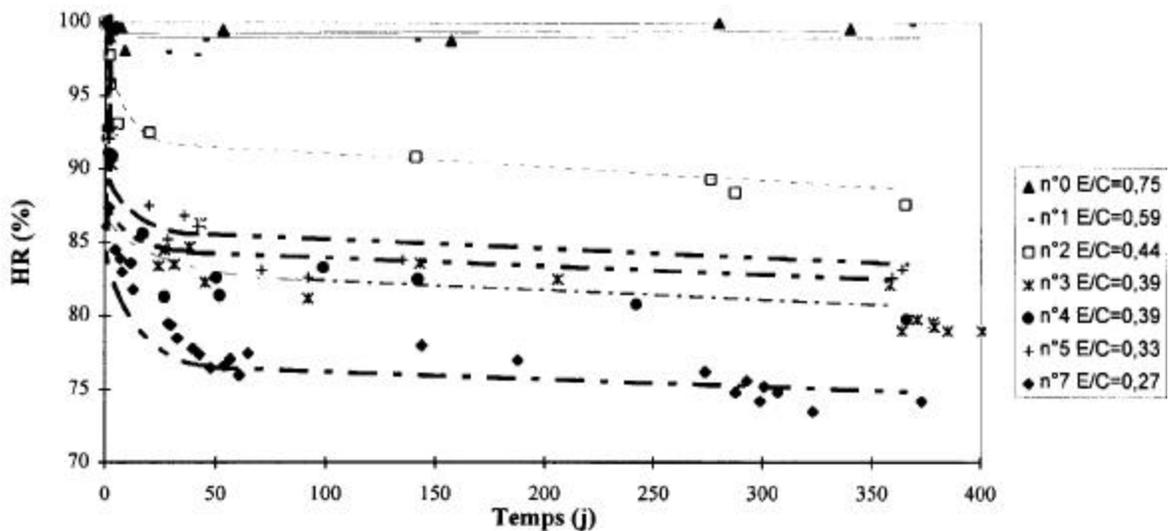


Fig 2.16 - Influence du rapport E/C sur l'humidité relative interne des bétons.

[Tiré de: Yssorche, Mp. P. 1995 *Microfissuration et durabilité des bétons à hautes performances*, Thèse de doctorat, Institut National de Sciences Appliquées,

- **Influence de la finesse du ciment**

- **L'augmentation de la finesse** du ciment engendre une **augmentation du retrait endogène** du béton (Fig 2.17).
- Le retrait endogène **début** plus tôt à mesure qu'augmente la finesse.

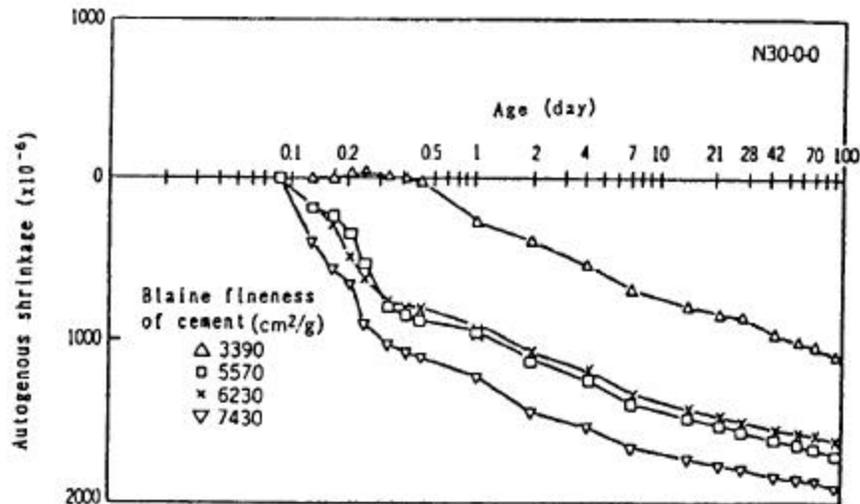


Fig 2.17 - Influence de la finesse du ciment sur le retrait endogène d'une pâte (E/C=0,30).

[Tiré de: Tazawa, E.; Miyazawa, S. et Kasai, T. 1995 *Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste*, Cement and Concrete Research, Vol 25, No 2, p. 288-292]

- **Influence de la fumée de silice**

- La substitution du ciment par de la **fumée de silice** provoque une **augmentation du retrait endogène** (Fig 2.18) et une **diminution de l'humidité relative interne**.
- La fumée de silice provoque un **raffinement des pores**, ce qui engendre alors des **dépressions capillaires plus importantes**.

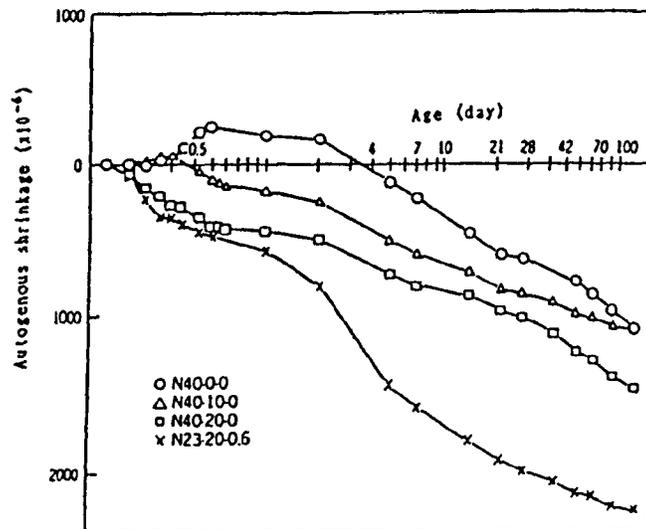


Fig 2.18- Influence de la fumée de silice (0-10-20%) sur le retrait endogène de la pâte (E/C=0,40 et E/C=0,23).
 [Tiré de: Tazawa, E.; Miyazawa, S. et Kasai, T. 1995 *Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste*, Cement and Concrete Research, Vol 25, No 2, p. 288-292]

2.1.3 L'état de l'eau dans la pâte de ciment hydraté

- Dans la pâte de ciment hydraté, on retrouve de l'eau sous différentes formes. **Cette eau intervient différemment dans les processus liés à la durabilité, en fonction de sa localisation et de son état** (Fig 2.19).

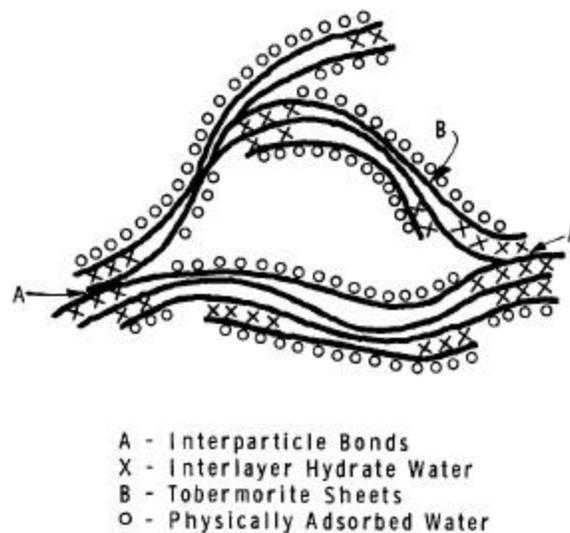


Fig 2.19 - Représentation schématique des feuillets de C-S-H.
 [tiré de Mailvaganam N.P. 1991, *Repair and protection of concrete*]

structures, CRC Press].

A) L'eau combinée chimiquement (densité ~ 1,2)

Cette eau fait partie **intégrante des C-S-H**. Elle représente environ 23% du poids de ciment qui a réagi. Elle est très stable et **on ne peut l'évaporer** qu'en décomposant le C-S-H à haute température.

B) L'eau zéolitique (interlayer) (densité ~ 1,0)

Cette eau n'est pas chimiquement combinée dans la structure des C-S-H mais elle est **retenue entre les feuillets de C-S-H par des liens hydrogène**. Pour l'évaporer il faut que le taux d'humidité s'abaisse au-dessous de 30%, ce qui provoque un très fort retrait de la pâte.

C) L'eau adsorbée (densité ~ 1,0)

Cette eau est **physiquement liée sur la surface** des solides (surtout sur les parois des capillaires ou des pores de gel). On croit qu'une couche d'environ 6 molécules d'eau (15 Å) peut être retenue par des liens hydrogène. **Une grande partie de l'eau adsorbée peut être retirée si le taux d'humidité est inférieur à 50%. Cette perte d'eau est en grande partie responsable du retrait de la pâte ou du béton.**

D) L'eau des capillaires

Il s'agit du **surplus d'eau qui n'a pas pu réagir avec le ciment**. Selon la taille des capillaires, cette eau peut être plus ou moins libre en raison de l'importance des forces de surface.

eau libre

L'eau libre est contenue dans les plus gros capillaires (> 0,05 µm). Son départ ne cause pas de changement de volume important (retrait).

non libre

Cette eau est contenue dans les plus petits capillaires (0,05 µm à 0,005 µm). Elle y est retenue par des tension capillaire. Il faut abaisser le taux d'humidité en dessous de 90% pour qu'elle commence à s'évaporer.

Elle a beaucoup d'influence sur le retrait de la pâte.

2.1.4 L'état de l'eau: son influence sur le retrait de la pâte et sur le point de fusion de la glace.

n Le retrait

La pâte de ciment est sujette à des changements de volumes dont les causes peuvent avoir plusieurs origines. Parmi les principales, on retrouve:

- Les changements de température
- La formation de glace ou de produits expansifs
- **Le retrait.**

- La cause la plus fréquente des changements de volume de la pâte est le **retrait** qui, en fait, est une **contraction** de la pâte (ou du béton).
- Le retrait est très souvent à l'origine des fissures que l'on retrouve très fréquemment dans presque tous les types d'ouvrages en béton.
- Les fissures de retrait sont provoquées par la **contraction d'une pièce de béton dont les mouvements sont partiellement ou complètement empêchés**. Cette diminution de volume provoque des contraintes internes de traction qui peuvent faire fissurer la pâte. On peut retrouver une excellente synthèse du sujet dans l'ouvrage de Acker [Acker, P. 1992, *Retrait et fissuration du béton*, Document scientifique et technique, Association française pour la construction, septembre 1992, 42 p.]
- **Le retrait est un paramètre fondamental qui gouverne en grande partie la performance des réparations.**
- **Il y a trois principaux types de retrait**
 - Le retrait plastique
 - Le retrait endogène (ou retrait chimique)
 - **Le retrait de séchage**

Le retrait plastique peut affecter le béton **au très jeune âge** (pendant la prise initiale). Il est causé par une **évaporation trop rapide** de l'eau en surface qui ne peut pas être compensée par un apport

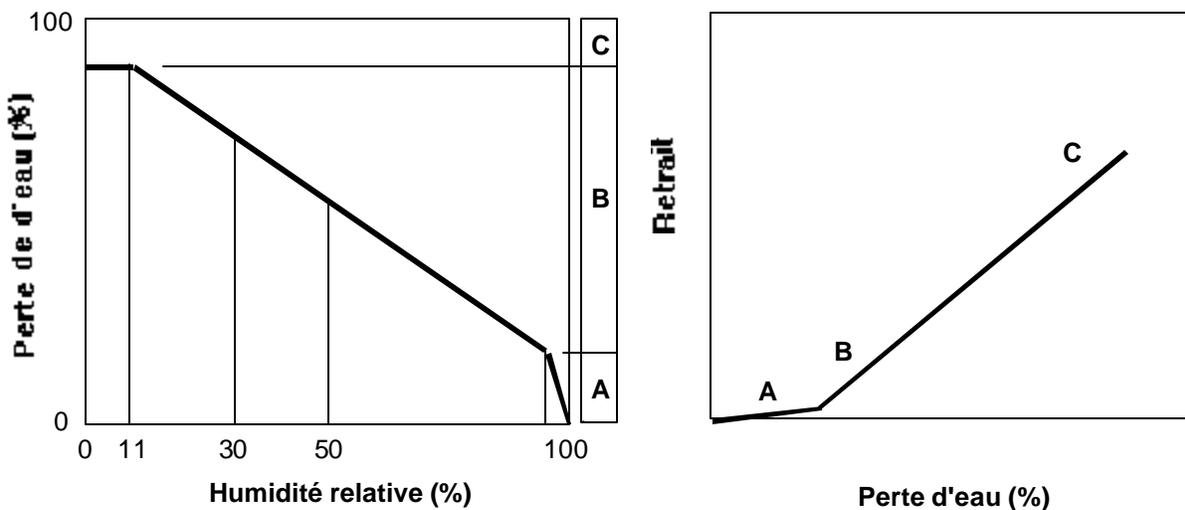
d'eau provenant de la masse de béton sous la surface. Il provoque une forte contraction de la pâte qui fait fissurer la surface externe. **Le retrait plastique est généralement associé à une technique de cure mal adaptée aux conditions climatiques.**

Le retrait endogène est provoqué par la **contraction LeChâtelier**. Il résulte du fait que le volume des hydrates formés est légèrement inférieur au volume des composants initiaux (eau+ciment). **Ce processus entraîne une diminution de volume après la prise du béton.** Il fait apparaître des vides dans la pâte de ciment hydraté (capillaires vides) qui ont pour effet de diminuer le taux d'humidité interne (autodessiccation). Il y a alors un processus de réorganisation de l'eau dans la pâte de ciment qui provoque une contraction que l'on désigne par retrait endogène .

Le retrait de séchage est une diminution du volume de la pâte provoquée par une réorganisation de l'eau. **Le retrait de séchage survient lorsqu'on abaisse le taux d'humidité interne du béton. C'est la forme la plus courante et la plus visible du retrait.**

La cause principale du retrait de séchage est l'assèchement progressif de la pâte de ciment. Lorsqu'on abaisse graduellement le taux d'humidité on observe que certaines catégories de pores s'assèchent en premier (Fig 2.20).

Dès que l'humidité est inférieure à 100 %, c'est l'eau libre dans les grands pores capillaires ($> 0,05 \mu\text{m}$) qui commence à s'échapper (Fig 2.20). Cette perte d'eau provoque relativement peu de retrait.



A: Eau libre (grands pores capillaires)
B: Eau non-libre + eau adsorbée + eau zéolithique
C: Eau combinée chimiquement

Fig 2.20- Relation entre la perte d'eau, l'humidité relative et le retrait de séchage de la pâte de ciment hydraté.

- Pour des taux d'humidité compris entre **50% et 90%**, C'est l'eau **non-libre** qui s'évapore. **Cette évaporation provoque un retrait important (ZONE B).**
- Lorsque le taux d'humidité devient inférieur à **50%**, on commence à évaporer l'eau **adsorbée** dans les petits capillaires. Ce processus produit des **tension capillaires** qui compriment les parois des pores et provoquent une diminution de volume de la pâte.
- Pour un taux d'humidité **inférieur à 30%**, l'eau zéolithique devient instable et commence à s'évaporer. L'eau zéolithique est responsable des **pressions de disjonction** qui écartent les feuilletts de C-S-H. Si cette eau disparaît le système se contracte et le volume diminue (retrait).
- Il est très difficile de retirer l'eau combinée chimiquement. C'est pour cette raison qu'on la désigne souvent par *eau non-évaporable* (on peut y arriver en chauffant !).

n Le point de fusion de la glace

- Les processus reliés à la **tenue au gel** du béton sont étroitement reliés à la **formation de la glace** dans la pâte de ciment hydraté.
-
- **Toute l'eau contenue dans la pâte de ciment hydraté ne se transforme pas en totalité en glace dès que la température s'abaisse au-dessous de 0°C.**
-
- La **formation de la glace** dans la pâte est un processus graduel qui dépend de la **température**, de la **vitesse de refroidissement** et de la **dimension des pores**.
 - On peut montrer que plus l'eau est contenue dans des pores de petite dimension, plus il faut abaisser la température en dessous de 0°C pour la transformer en glace. La figure 2.21 illustre cette relation entre le point de fusion de la glace et la taille des pores.
 - Selon ce principe, l'eau contenue dans les pores de gel ne peut se cristalliser que si la **température devient inférieure à -78°C**. **En pratique, cette eau est donc non-gelable !**

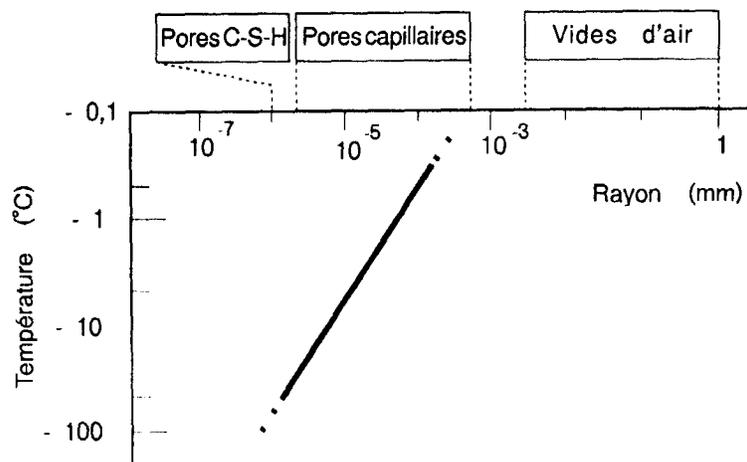


Fig 2.21 - Relation entre la température de formation de la glace et le diamètre des pores.

[tiré de *La durabilité des bétons* par J. Baron et J.-P. Ollivier, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris, 1993, 463 p.]

- Pratiquement, on peut dégager de la figure 2.21 un **grand principe gouvernant la tenue au gel du béton**.

Il est toujours préférable de faire en sorte que la porosité

capillaire d'un béton soumis au gel soit la plus faible et la plus fine possible. On peut ainsi limiter la quantité de glace en mesure de se former lors des périodes de gel.

- En pratique, on peut diminuer et raffiner la porosité capillaire en suivant deux principales approches.
 - **Diminuer**, dans la limite du possible, le **rapport E/C** de la pâte.
 - Prévoir des **conditions de mûrissement adéquates** et suffisamment **longues** pour maintenir la formation des hydrates (l'hydratation !) qui **comblent et raffinent la porosité capillaire**.

2.1.5 Les transferts de masse

- On a souvent mentionné que les différents **processus de dégradation** du béton ont souvent pour origine des **échanges entre le milieu externe et la pâte de ciment hydraté**.
- Les transferts entre le milieu interne du béton et le milieu externe peuvent être regroupés en **deux catégories**.
 - Les écoulements de l'eau interstitielle (en phase liquide)
 - Les transports par diffusion en milieu poreux

n Les écoulements de l'eau interstitielle

- Ce type d'écoulement intervient dans plusieurs situations. Par exemple, il peut se produire dans le cas d'un béton durci soumis à un **gradient de pression hydraulique** (barrage). Un béton saturé qui subit une **dessiccation** peut aussi être le site d'un écoulement d'eau interstitielle engendré par les tensions capillaires. C'est aussi le cas d'un béton sec qui se sature graduellement.
- La plupart des mécanismes d'attaque du béton font intervenir ou ont

pour origine un **écoulement de la phase liquide**.

- L'exposition au **gel** génère des **pressions hydrauliques** à l'intérieur de la pâte. On expliquera que la performance au gel du béton est en fait étroitement reliée à sa perméabilité à l'eau.
- **Presque tous les types de destruction** causés par la formation de produits expansifs ou par des ions agressifs (corrosion, réactions alcalis-granulats, attaque par les sulfates) ne peuvent se produire que si le béton est dans un **état voisin de la saturation (grande disponibilité de l'eau)**.
- En pratique on peut **estimer** la résistance à l'écoulement de la phase liquide en mesurant la perméabilité à l'eau du béton soumis un à gradient hydrostatique.

n **Les transports par diffusion en milieu poreux**

- La diffusion désigne le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. S'il existe des différences de concentration entre deux points du milieu, il y aura un transport du constituant de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée.
- Les transports par diffusion peuvent se produire sous deux formes:

En phase liquide (ions chlore, sulfates, CO₂, O₂)

En phase gazeuse (oxygène, CO₂)

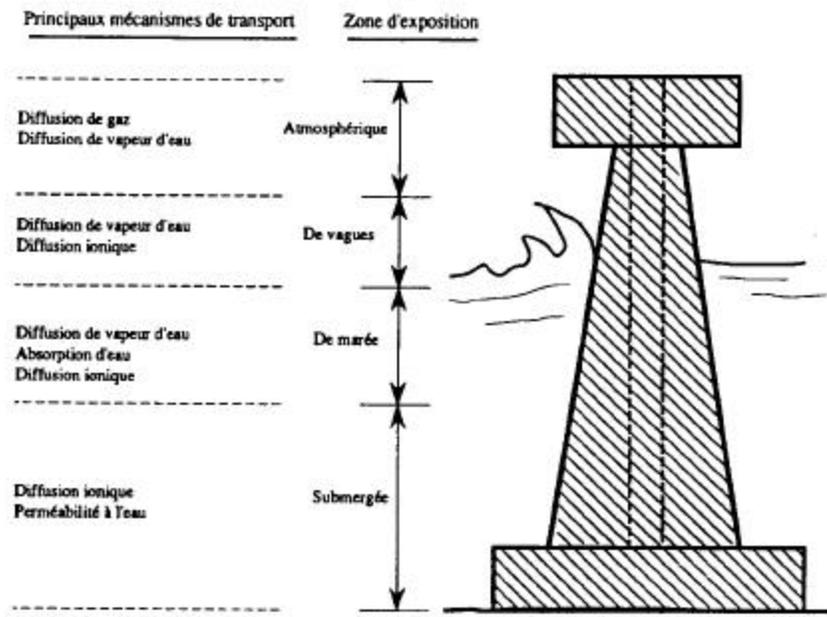


Fig 2.22 - Principaux mécanismes de transport dans les différentes zones d'exposition d'une structure côtière en béton.

[tiré de Report of a Concrete Society Working Party, 1988, *Permeability testing of site concrete: a review of methods and experience*, Concrete society technical report no 31, London, 131 p.]

- **Le transport en phase liquide** concerne la diffusion des constituants en **solution dans la phase liquide** (les ions chlore, les sulfates). Elle intervient, par exemple, dans l'attaque par l'eau de mer et la corrosion des aciers d'armature.
- **Le transport en phase gazeuse** concerne, par exemple, la diffusion de la **vapeur d'eau** dans un béton partiellement saturé ou la diffusion de l'oxygène ou du CO₂.
- Les différents mécanismes d'attaque du béton font généralement intervenir **un ou plusieurs types de transferts de masse**: en phase liquide, en phase gazeuse ou par écoulement de la solution interstitielle
- Le **type de mécanisme de transport** est généralement fonction des **caractéristiques du milieu environnant** et des **conditions d'exposition** de la structure. Les principaux mécanismes de transport, en fonction du type d'exposition, sont présentés à la figure 2.15 pour le cas particulier d'une structure côtière.
- Les **formes principales de détérioration** sont étroitement liées

aux **mécanismes de transferts de masse** à travers les pores. Le tableau 2.2 présente un aperçu des types de détérioration, les agents transportés qui en sont responsables et l'intervalle d'humidité relative où ces dégradations sont les plus propices.

Tab 2.2 - Relation entre les mécanismes de détérioration et les mécanismes de transport de masse dans le béton.

[tiré de Parrott, L.J. 1988, *Characteristics of surface layers that affect the durability of concrete*, Proceedings of Engineering foundation Conference on Advance in Cement Manufacture and Use, Potosi, USA, p 137-142.]

Type de détérioration	Agent transporté	Intervalle critique de HR (%)
Carbonatation	CO ₂ , H ₂ O	30 - 80
Diffusion des ions chlore	Cl, H ₂ O	> 90
Corrosion des armatures	H ₂ O, O ₂	70 - 99 ?
Attaque des sulfates	Sulfates, H ₂ O	> 90 ?
Attaque des acides	Acides	--
Réaction alcalis-granulats	H ₂ O	> 80 à 85 ?
Cycles de gel-dégel	H ₂ O, sels de déglacage	> 90
Abrasion	H ₂ O	?
Mouillage-séchage	H ₂ O	--

2.1.6 Les autres types de ciments ou de liants

n Le ciment alumineux

- Le ciment alumineux peut atteindre, en **24h**, une résistance **équivalente à celle d'un ciment Portland à 28 jours**. Il contient une forte proportion de Al₂O₃ (40%) et de C₉O (40%), un peu de Fe₂O₃ et jusqu'à 8% de SiO₂.
- Les principaux minéraux sont les **aluminates de calcium** (CA, CA₂, C₁₂A₇) et d'autres phases telles que C₂AS, C₂S et certaines ferrites ayant une composition comprise entre C₄AF et C₆A₂F.

- L'hydratation du ciment alumineux produit des **hydrates métastables** (CAH₁₀, C₂AH₈ et AH_x).



- Avec le temps, ces hydrates, à la structure hexagonale, sont transformés en des cristaux cubiques de C₃AH₆ et en AH₃



- Ces réactions (conversion) **s'accélèrent à haute température** et en présence **d'humidité** (surtout si **E/C est élevé**). La conversion s'accompagne d'une **chute de résistance**, ce qui limite l'utilisation du ciment alumineux dans les applications structurales.
- Les bétons fabriqués avec du ciment alumineux **résistent bien aux hautes températures** (jusqu'à 1600 °C) mais on doit alors utiliser des granulats appropriés (brique, corindon).
- Le ciment alumineux **résiste bien aux sulfates et à l'eau de mer**. Il résiste relativement bien aux **effluents acides** que l'on retrouve dans certains types d'industries.
- Il est particulièrement **sensible** aux solutions fortement **alcalines**.

N Le ciment d'oxychlorure de magnésium (ciment Sorel)

- Ce liant possède **certaines caractéristiques supérieures** à celles du ciment Portland.
 - Il ne requière **pas de cure** humide.
 - Bonne résistance au **feu**
 - Faible conductivité thermique
 - Bonne résistance à l'abrasion

- Grande résistance en compression.

- Ce liant adhère à plusieurs types de surfaces, il développe une **haute résistance initiale**, il est léger et il résiste bien aux huiles, aux alcalis, aux **solvants organiques et aux sulfates**.
- Les produits à base d'oxychlorure de magnésium sont formés à partir **d'oxyde de magnésium** (poudre) et d'une **solution de chlorure de magnésium** mélangés avec de la poudre de marbre, du sable ou du quartz broyé.
- Ils ont déjà été utilisés comme **produits de resurfaçage** de planchers industriels et comme **adhésif pour les briques réfractaires**.
- Ce type de liant est **instable dans l'eau** et perd de sa résistance lorsqu'il est exposé à **l'humidité** pendant une longue période. Il peut être altéré par les acides et certains sels et il est **corrosif** pour certains métaux (acier, aluminium).

n Le ciment de phosphate de magnésium

- Ce ciment est parfois utilisé dans les produits de réparation à **prise rapide**.



- La réaction dégage **beaucoup de chaleur** et la prise survient en **15 à 20 minutes**. On peut contrôler la prise avec certains additifs (borax).
- Ce ciment peut être utilisé sous des basses températures (-5°C).

n Ciment à prise contrôlée

- Il s'agit d'un ciment Portland ordinaire auquel on ajoute un composé, par exemple le $11\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaF}_2$.
- La prise rapide résulte de la **formation rapide d'ettringite**.

- Une **prise rapide** survient en **6 heures** environ, suivie par une augmentation plus lente de la résistance (jusqu'à 1 jour) qui augmente ensuite rapidement par la suite.
- La résistance à **24 h est supérieure à celle d'un ciment Portland à prise ultra-rapide.**