

UN MÉCANISME À MÊME DE COMPROMETTRE LA DURABILITÉ DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ OU PRÉCONTRAIT EST REPRÉSENTÉ PAR LA FISSURATION PRÉCOCE, à l'origine de près de 15

à 20 % des désordres reconnus dans les structures en béton armé. Induite par des contraintes de traction générées par le retrait du béton, elle se manifeste aux très jeunes et jeunes âges, mais peut apparaître plus tardivement, au cours du vieillissement de l'ouvrage.

Souvent superficielles, ces fissures peuvent atteindre les armatures voire même être traversantes, et les propriétés de transferts, notamment vis-à-vis des agents agressifs, se trouvent alors accrues, quelle que soit la compacité du béton. La maîtrise des déformations provoquant cette fissuration est ainsi primordiale.

Le retrait est une déformation induite par une diminution de volume mettant en jeu des phénomènes physico-chimiques lors de l'hydratation des ciments avant, pendant ou après la prise. Les mécanismes du retrait résultent, d'une part de processus se développant au sein du matériau et d'autre part de l'interaction avec le milieu environnant. Par ailleurs, la fissuration générée par le retrait doit être distinguée de la fissuration fonctionnelle qui est maîtrisée par les règles de calcul.

Pathologies du béton

Les retraits

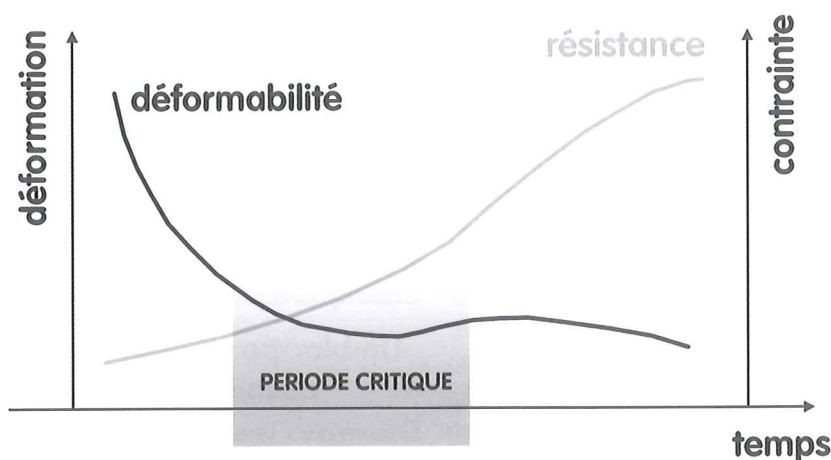
LES DIFFÉRENTS TYPES DE RETRAIT

1: Retrait plastique (ou de séchage ou de dessiccation) : il est dû à une évaporation de l'eau présente dans le matériau, avec pour conséquences un séchage rapide à travers la surface libre alors que le mélange est encore frais, suffisamment déformable après sa mise en œuvre. Le risque est spécialement élevé sous l'effet du vent ou de l'ensoleillement ou une absorption d'une couche sous-jacente. Il est prononcé dans le cas de surfaces horizontales non coffrées et non protégées. Le tassement et le ressuage contribuent et accentuent ce retrait. Les valeurs du retrait de séchage du béton sont d'environ 0,1 à 0,8 mm/m (100 à 800 $\mu\text{m}/\text{m}$).

2: Retrait endogène : il est provoqué initialement par la contraction de Le Chatelier (ou retrait chimique) : le ciment hydraté occupe un volume plus petit que la somme des volumes initiaux, ciment plus eau. Il en résulte alors une contraction, dite "Le Chatelier". Cette dernière

correspond à environ 9 % du volume des hydrates formés. Ce processus entraîne une diminution de volume après la prise du béton, et fait apparaître des vides dans la pâte de ciment hydraté (pores capillaires) entraînant une diminution du taux d'humidité interne (auto-dessiccation). Ce retrait apparaît en particulier dans les bétons confectionnés avec un rapport eau/ciment (E/C) faible et une teneur élevée en fines, tels que les bétons de hautes performances (BHP) ou de très hautes performances (BTHP). Les faibles rapports E/C contribuent à la consommation quasi-complète de l'eau disponible, entraînant la formation rapide de pores remplis d'air. Ce phénomène d'auto-dessiccation (dessiccation interne) entraîne des pressions capillaires qui conduisent à un retrait rapide dans toute la masse du béton. Les valeurs du retrait endogène sont d'environ 0,025 à 0,200 mm/m (25 à 200 $\mu\text{m}/\text{m}$) en fonction du type de béton.

3: Retrait thermique, il résulte de



Déformabilité et résistance pendant la première phase de l'hydratation [FEBELCEM]

la contraction associée au refroidissement du béton (retour à la température ambiante) au moment de la prise ou juste après, qui fait suite à la réaction exothermique d'hydratation du ciment. Dans le cas des ouvrages massifs, la chaleur interne produite par l'hydratation est importante, conduisant à un fort gradient entre le cœur du béton plus chaud et la peau refroidie au contact du milieu environnant. Cette différence entre la dilatation thermique à l'intérieur et la contraction en traction à l'extérieur entraîne une fissuration si la résistance du béton est plus faible.

4: Retrait de carbonatation, il résulte de la contraction liée la réduction du volume après carbonatation de la portlandite et des C-S-H. Ce retrait est toutefois négligeable par rapport aux autres retraits.

Sur chantier ou sur ouvrage, dans la plupart des cas, les fissures sont liées à plusieurs types de retrait cumulés, souvent difficile à dissocier : on parle alors de retrait total.

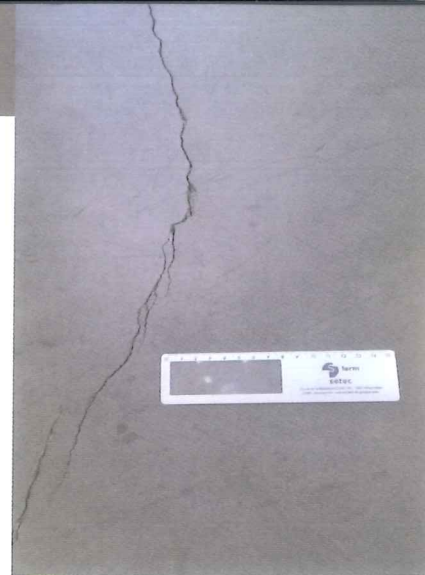
D'un point de vue normatif :

La norme EN 1992-1-1, article 3.1.4 (Eurocode 2) définit le retrait à prendre en compte dans les calculs comme la somme de deux retraits : retrait de dessiccation et retrait endogène. La déformation due au retrait de dessiccation évolue lentement, car elle est fonction de la

migration de l'eau au travers du béton durci. La déformation due au retrait endogène se développe au cours du durcissement du béton : elle se produit en majeure partie aux cours des premiers jours suivant le coulage. Le retrait endogène est une fonction linéaire de la résistance du béton. Il convient d'en tenir compte de manière spécifique lorsque du béton frais est coulé au contact de béton durci. La norme EN 1994, Eurocode 4, pour les ouvrages mixtes acier-béton tient compte du retrait thermique en plus des retraits endogène et de dessiccation définis dans l'Eurocode 2.

CONSÉQUENCES DES RETRAITS

D'une manière générale, les principales conséquences du retrait sont les fissurations qui peuvent affecter et réduire la durabilité des ouvrages en béton armé ou précontraint. L'apparition des fissures, en particulier au niveau de la zone d'enrobage, dégraderait les propriétés de transfert, facilitant ainsi la pénétration des agents agressifs (chlorures, CO_2 , sulfates...) et favorisant l'augmentation de l'humidité, paramètre essentiel des réactions chimiques. Ainsi, la diffusion du CO_2 atmosphérique ou des chlorures dans le béton entraînerait la corrosion des armatures par carbonatation pour le premier ou piqures pour les seconds. Les fissures dues au retrait peuvent également limiter l'adhérence entre le support en béton et le matériau rapporté (couche



Dallage / Retrait plastique [Ierm setec]

d'usure d'un sol industriel ou revêtement par exemple). D'une manière plus secondaire, les fissures peuvent limiter la capacité portante si elles affectent toute la masse du béton.

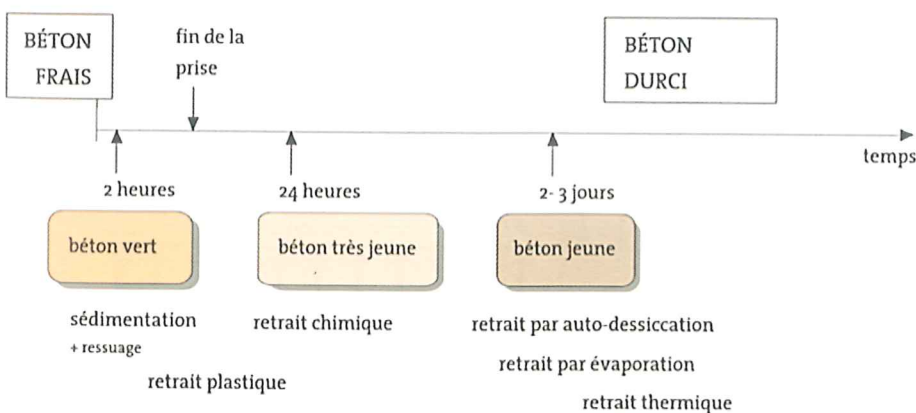
QUELLES SONT LES PRÉCAUTIONS À PRENDRE POUR ÉVITER LES RETRAITS

Telle que mentionné précédemment, il existe plusieurs types de retrait, rendant les mesures préventives à entreprendre différentes selon les cas en présence. Ainsi l'identification des types de retraits susceptibles de se manifester dans un ouvrage donné (ou une partie d'ouvrage) est primordiale.

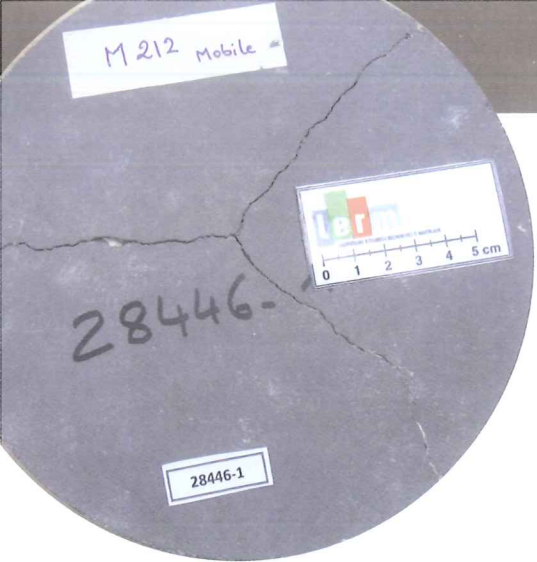
Retrait plastique (et de dessiccation)

La réduction de ce retrait passe par l'empêchement de départ d'eau du béton prématurément :

- Limitation de l'évaporation au moyen d'un traitement de cure correct, effectué à temps. Les durées minimales de cure vont dépendre des conditions ambiantes, de la température du béton et de la vitesse de développement de la résistance. Dans des situations très défavorables, cette durée peut aller jusqu'à 8 à 10 jours
- Ajout de fibres synthétiques afin de relaxer davantage les contraintes. Il convient de souligner que cet ajout n'empêche pas le retrait de dessiccation lié au départ d'eau.
- Mise en œuvre d'un béton ayant une cohésion suffisante et donc pas sujet au phénomène de sédimentation.



Plusieurs types de retrait peuvent être à l'origine des fissures ou microfissures, la prédominance des unes par rapport aux autres dépend de plusieurs facteurs.



Retrait de dessiccation [Ierm selec]

- Utilisation d'un produit de cure ("curing compound") à base de résine, en particulier pour les surfaces de béton exposées aux intempéries (notamment revêtements routiers et sols industriels). La quantité de produit à utiliser doit être suffisante et doit être appliquée (pulvérisée) au moment où l'eau de ressuage est pratiquement éliminée afin de garantir une efficacité optimale.
- Couverture de la surface au moyen d'une feuille de polyéthylène ou plastique, ou de toiles de jute ou géotextiles imbibés d'eau.
- Conservation de la surface du béton

humide, fondamental dans le cas de l'utilisation de ciment à durcissement rapide.

- Humidification préalable des coffrages absorbants ou des assises de fondation.

Retrait endogène

- Cure à l'eau
- Brumisation de la surface en continu pendant les premiers jours
- Utilisation d'adjuvants réducteurs de retrait et d'agents d'expansion
- Incorporation de fibres synthétiques
- Ajout de granulats légers saturés d'eau ou de polymères super-absorbants (technique de curing interne)

Ces dispositions maintiennent les pores capillaires remplis d'eau, constituant ainsi un « réservoir » dans lequel les réactions chimiques vont puiser, sans entraîner de réduction volumique de la pâte de ciment encore assez fraîche.

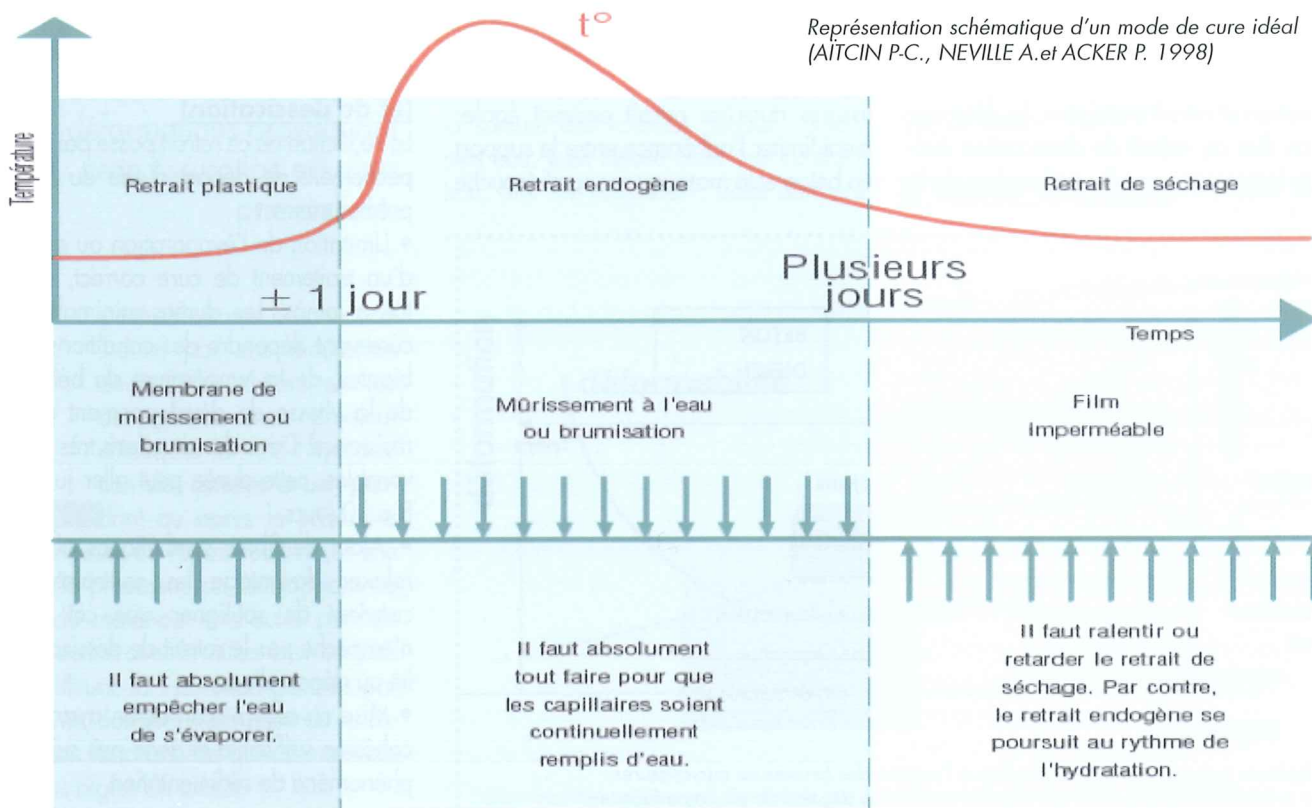
Retrait thermique

- Utilisation des ciments à faible chaleur d'hydratation, tels que définis par la norme NF EN 197-3
- Arrosage à l'eau froide des coffrages, des aciers d'armature, du sol de fonda-

tion ou du substrat de béton durci par temps chaud ou venteux.

Représentation schématique d'un mode de cure idéal (AÏTCIN P.-C., NEVILLE A. et ACKER P. 1998)

Il convient de souligner que dans le cas des bétons ordinaires, le recouvrement des surfaces par des panneaux ou des bâches plastiques, lorsque cela est possible, est une des techniques les plus couramment utilisées pour assurer une protection adéquate contre le retrait, dont les composantes principales sont le retrait plastique et de séchage. A l'inverse, dans le cas des bétons spéciaux (dont le retrait endogène est prépondérant par rapport au retrait de séchage), ces matériaux ne peuvent être utilisés que temporairement. Une fois les risques de retrait plastique éliminés, le recouvrement du béton par des matériaux non imbibés ne présente aucun intérêt pour limiter le retrait endogène et est même nuisible puisqu'il empêche ou ralentit toute pénétration d'eau susceptible de réduire l'amplitude du retrait endogène.



Représentation schématique d'un mode de cure idéal (AÏTCIN P.-C., NEVILLE A. et ACKER P. 1998)

DURÉE MINIMALE POUR LES CLASSES DE CURE 2, 3 ET 4

| | Température de la surface du béton (t) en °C | Durée minimale de cure (en jours) | | |
|---------------|--|--|---------------------------------|-------------------------------|
| | | Évolution de la résistance du béton $r = f_{cm2}/f_{cm28}$ | | |
| | | Rapide $r \leq 0,50$ | Moyenne $0,30 \leq r < 0,50$ | Lente $0,15 \leq r < 0,30$ |
| Classe cure 2 | $t \geq 25$ | 1,0 | 1,5 | 2,5 |
| | $15 \leq t < 25$ | 1,0 | 2,5 | 5 |
| | $10 \leq t < 15$ | 1,5 | 4 | 8 |
| | $5 \leq t \leq 10$ | 2,0 | 5 | 11 |
| Classe cure 3 | $t \geq 25$ | 1,5 | 2,5 | 3,5 |
| | $15 \leq t < 25$ | 2,0 | 4 | 7 |
| | $10 \leq t < 15$ | 2,5 | 7 | 12 |
| | $5 \leq t \leq 10$ | 3,5 | 9 | 18 |
| Classe cure 4 | $t \geq 25$ | 3 | 5 | 6 |
| | $15 \leq t < 25$ | 5 | 9 | 12 |
| | $10 \leq t < 15$ | 7 | 13 | 21 |
| | $5 \leq t \leq 10$ | 9 | 18 | 30 |



Cure à l'eau, présence de toiles de jute en partie haute

© IERM setec

La norme NF EN 13670 introduit la notion de classes de cure (classes 1 à 4), en fonction de la durée de la période de cure (classe 1), ou du pourcentage de la résistance à la compression caractéristique à 28 jours (classes 2 à 4). La classe de cure doit être précisée dans les spécifications d'exécution.

Son choix est fonction de nombreux paramètres : classes d'exposition, formulation du béton, valeur d'enrobage des armatures, conditions climatiques et caractéristiques géométriques de l'élément à bétonner. La durée nécessaire d'application de la cure dépend en particulier de l'évolution des propriétés du béton dans la zone de surface du parement et des conditions climatiques lors de la réalisation du chantier.

La résistance à la surface en béton peut être déterminée en particulier par la technique de maturométrie ou par essai au scléromètre.

L'annexe F de la norme NF EN 13670 « Guide sur les opérations de bétonnage » propose des valeurs de durées minimales de cure, à respecter pour les classes de cure 2 à 4 (cf. tableau ci-après). Ces valeurs sont fonction de la température à la surface du béton et de l'évolution de la résistance du béton (3 types : rapide, moyenne, lente).

Quelques recommandations

- Prévoir la mise en place du béton le matin, en fin de journée ou la nuit si les conditions sont spécialement difficiles.

- Installer des coupe-vent temporaires pour diminuer la vitesse du vent sur la surface de béton et, si possible, ériger des pare-soleil pour contrôler la température en surface.

- Commencer la cure dès que possible.

- Utiliser un retardateur d'évaporation à la surface du béton ou recouvrir le béton.

- Utiliser un brumisateur de fin brouillard pour augmenter l'humidité de l'air ambiant, surtout en période chaude et sèche.

LES RÉPARATIONS POSSIBLES DES DOMMAGES CAUSÉS PAR LES RETRAITS

Le développement des fissures de retrait peut être minimisé par des mesures prises avant et durant la mise en œuvre, dès lors que la fissuration identifiée est mise en relation avec le retrait. Il est primordial dans tous les cas de vérifier la stabilité du phénomène de retrait avant intervention.

La réparation, en premier lieu, correspondra à un colmatage des fissures par des produits adaptés.

Les réparations structurales ne sont pas vraiment nécessaires, en raison de la largeur minimale des fissures sur une grande partie de la section (transfert de l'effort tranchant). Les traitements pourront correspondre à un brossage de la surface avec du ciment sec ou à l'aide d'une pâte de ciment dès l'apparition des fissures, lorsque la surface est encore propre. Il est évident que les fissures situées au-dessus des armatures seront scellées d'une manière plus efficace.

Au final, la réduction du retrait passe par une optimisation de la formulation des bétons : dosage en ciment, dosage en éléments fins, dimension maximale des granulats, dosage en eau de gâchage en utilisant des adjuvants réducteurs d'eau, plan de ferrailage adéquat, étude soignée de la géométrie des pièces et une maîtrise de la vibration. Enfin, la réflexion préalable quant au risque et le cas échéant la mise en œuvre d'un schéma de cure adapté est absolument fondamentale.

Noureddine Rafai¹, Christophe Carde², Bernard Quénez³

¹ : Expert durabilité Direction scientifique IERM setec

² : Direction technique IERM setec

³ : Directeur général délégué IERM setec