



LUND UNIVERSITY

Evaluation de la durabilité de la durée de vie des matériaux de construction : principes et méthodes

Fagerlund, Göran

1992

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Fagerlund, G. (1992). *Evaluation de la durabilité de la durée de vie des matériaux de construction : principes et méthodes*. (Report TVBM; Vol. 3046). Division of Building Materials, LTH, Lund University.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00



LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Division of Building Materials

EVALUATION DE LA DURABILITÉ ET DE
LA DURÉE DE VIE DES MATÉRIAUX DE
CONSTRUCTION : Principes et Méthodes

Göran Fagerlund

Report TVBM-3046

Lund Sweden, 1992

CODEN: LUTVDG/(TVBM-3046)/1-44/(1992)

ISSN 0348-7911

EVALUATION DE LA DURABILITÉ ET DE LA DURÉE DE VIE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION : Principes et Méthodes

Göran Fagerlund

Division of Building Materials
Lund Institute of Technology
Box 118
S-221 00 LUND, Sweden

Tel: int+46 46-107415
Fax: int+46 46-104427

EVALUATION DE LA DURABILITÉ ET DE LA DURÉE DE VIE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION: PRINCIPES ET MÉTHODES

1. AVANT-PROPOS

L'une des propriétés essentielles des matériaux et des éléments de construction est leur durabilité. C'est pourquoi les problèmes de durabilité des matériaux ont toujours eu une place centrale dans la recherche dans le secteur de la construction. Et cela concerne tous les pays, la Suède comme la Tunisie. Au cours des dix dernières années, l'approche du problème de la durabilité des matériaux s'est toutefois modifiée de façon marquante. On commence en effet à abandonner le concept qualitatif assez vague de "durabilité" au profit de celui, quantitatif, de "longévité ou durée de vie". Une évolution qui a également entraîné une modification des méthodes au niveau de la recherche de durabilité. Les simples essais de durabilité ont été remplacés par des essais plus sophistiqués, aptes à permettre d'évaluer la durée de vie des matériaux concernés. En Suède, nous avons adopté cette nouvelle ligne de recherche depuis une dizaine d'années environ, principalement pour ce qui est du béton.

J'ai l'intention, dans cet exposé, d'aborder d'une manière générale le concept de durée de vie et de donner également quelques exemples de la recherche telle que conduite en Suède. Les problèmes qui seront ici évoqués ne sont sans doute pas tous d'actualité en Tunisie, mais il n'en demeure pas moins que les principes adoptés pour les résoudre sont par contre certainement applicables dans votre pays également.

2. SITUATION ACTUELLE

Tout d'abord, je voudrais dire quelques mots sur la manière dont s'effectue actuellement le choix des matériaux.

Lorsqu'un concepteur choisit les matériaux qui entreront dans la composition d'un certain élément de construction, comme par exemple un plancher ou un toit, et qu'il étudie comment les combiner pour réaliser l'élément fini, il lui est assez facile de faire en sorte que cet élément ait l'aptitude requise à la fonction au moment de la livraison de l'ouvrage achevé. Il a la possibilité de choisir ses matériaux et sa formule de conception en se basant sur les caractéristiques raisonnablement précises que contiennent les documentations fournies par les fabricants ou en utilisant les données générales d'ouvrages de référence ou autres. Ces caractéristiques incluent entre autres la résistance au compression du béton ou le coefficient de transfert thermique des matériaux isolants.

Par contre, les critères nettement plus complexes relatifs au "vieillissement" des matériaux sur place, c'est-à-dire l'interaction intervenant avec le temps entre deux matériaux en contact ou entre un matériau et le milieu ambiant, n'ont eux aucune importance à la phase initiale de mise en service de l'ouvrage. Ces données figurent d'ailleurs rarement dans la documentation du fabricant ou la bibliographie disponible. Dans de nombreux cas, ni le fabricant ni le concepteur ne savent même quelles sont les propriétés d'un matériau qui revêtent de l'importance dans l'optique du long terme.

Permettez-moi de prendre un exemple, celui d'un matériau tout à fait courant sur lequel on manque encore actuellement dans une large mesure de données dont on aurait pourtant besoin: les revêtements de sols plastiques. Un procédé habituel en Suède pour réaliser les fondations consiste à couler une dalle en béton directement sur le sol, sur laquelle on pose ensuite un revêtement plastique dont on ignore pratiquement les propriétés.

En ce qui concerne la couleur, l'épaisseur, etc., le fabricant donne toutes indications utiles, mais sur les caractéristiques d'une importance

décisive à long terme on n'a par contre habituellement aucune information. C'est le cas par exemple du rapport entre l'humidité relative et diffusivité de cette humidité dans le revêtement, ou de l'interaction entre le revêtement et différents types de colles en présence de la basicité du béton humide.

L'effet de la perméabilité du revêtement sur le taux d'humidité de la colle ressort de fig 1. Le graphique est valable pour une maison en Suède construite sur une dalle en béton directement coulée sur le sol et isolée avec 5 centimètres de laine minérale.

L'axe vertical indique l'humidité relative immédiatement sous le revêtement et l'axe horizontal l'imperméabilité du revêtement par rapport à celle de la dalle en béton.

L'humidité relative entre les deux est de 90% si l'imperméabilité du revêtement est 50 fois supérieure à celle de la dalle en béton, mais seulement de 82% si ce même rapport n'est que de 5 fois. Cette différence d'humidité relative revêt une importance décisive, car si la plupart des colles ont une bonne tenue en présence d'une humidité relative de 82%, ce n'est plus que très rarement le cas lorsque ce chiffre passe à 90%.

En réalité, l'influence de l'humidité relative sur la tenue des différents types de colles, de mastics et autres matières organiques est également inconnue dans une large mesure. Il existe sans aucun doute des matières organiques qui ne résistent pas très longtemps à une humidité relative même aussi faible que 80%. Nous en avons plusieurs exemples en Suède.

On dispose bien sûr parfois de caractéristiques concernant les matériaux, mais celles-ci peuvent être trompeuses. Cette illustration en montre un exemple. On a en effet mesuré ici, par la méthode dite de la ventouse, la perméabilité à l'humidité d'une résine époxy destinée à être utilisée comme barrière d'humidité entre une dalle en béton humide et un revêtement de sol. La mesure s'effectue normalement avec récipient rempli d'eau et 50% d'humidité relative à l'extérieur du récipient. La valeur moyenne pour la résine époxy est alors de 75%, ce qui est

faible. Dans la pratique, ce taux d'humidité moyen est toutefois d'environ 95%, mais avec une perméabilité près de 6 fois supérieure. L'information fournie par le fabricant induit donc totalement en erreur et peut conduire à des problèmes de durabilité.

Cette ignorance en ce qui concerne les propriétés des matériaux, même ceux d'importance secondaire, a eu pour conséquence de graves problèmes en Suède au cours des 20 dernières années.

Il y aurait encore bien d'autres exemples à donner de problèmes de longévité provoqués par l'ignorance de données importantes, le manque de données ou l'utilisation de données trompeuses.

Ce manque évident d'intérêt pour les performances à long terme d'un ouvrage à sa phase de conception est assez remarquable. Il reflète la profonde complexité des problèmes liés à l'évaluation de la durée de vie des matériaux et tout spécialement l'extrême difficulté que présentent les calculs permettant de parvenir à une évaluation fiable de cette durée de vie.

Au lieu de concevoir l'ouvrage compte tenu de la longévité que l'on en attend, on se contente de tirer expérience du comportement de constructions similaires dans des environnements similaires. Cette expérience est habituellement concrétisée par des règles simples, regroupées dans différentes normes officielles ou transmises pragmatiquement. Ces règles sont sans doute quantitatives, mais ne s'appliquent pas directement à la longévité; elles fixent plutôt des valeurs maxi et mini en ce qui concerne certaines propriétés de substitution, supposées influer sur la durée de vie.

Le béton peut servir d'exemple de matériau pour lequel on se base largement sur de telles propriétés. Les impératifs de longévité sont en effet normalement exprimés en termes d'exigences sur les plans suivants:

- résistance à la compression
- rapport eau-ciment
- perméabilité à l'eau (et parfois à l'air)
- teneur en air du béton frais
- recouvrement des armatures
- type de ciment

Un grand nombre de ces propriétés sont mesurées sur des échantillons réalisés spécialement à cet effet et non pas sur l'ouvrage même. Cela est également le cas des matériaux autres que le béton. Et il est en outre fréquent que les échantillons utilisés pour le contrôle de qualité ne soient même pas représentatifs de l'ouvrage concerné.

Les impératifs applicables aux matériaux sont normalement fixés en fonction d'une classification du milieu environnant selon différents critères qualitatif tels que, par exemple:

- * très agressif
- * agressif
- * moyennement agressif
- * non agressif

Je vais maintenant parler des risques que présente le recours à la seule expérience comme critère pour le choix des matériaux et la conception de l'ouvrage, après quoi j'exposerai quelles sont les possibilités d'utiliser le concept de durée de vie dans ce même domaine.

3. L'EXPÉRIENCE COMME BASE D'UNE CONCEPTION FAISANT INTERVENIR UNE ÉVALUATION DE LA DURÉE DE VIE

Une conception uniquement basée sur l'expérience que l'on a du comportement d'ouvrages similaires présente de nombreux inconvénients. Cette formule peut entre autres se révéler très risquée dans une situation où les principes de conception évoluent fréquemment dans une mesure plus ou moins radicale et où de plus en plus de nouveaux matériaux et éléments de construction sont mis sur le marché et utilisés assez inconsidérément.

En Suède, nous avons de nombreux exemples de modifications des techniques de construction qui ont provoqué de sérieux problèmes depuis plusieurs dizaines d'années, cela tout simplement parce que personne n'en avait analysé les conséquences possibles sur la durée de vie des ouvrages ainsi réalisés. Les principes de conception traditionnels étaient donc conservés. Dans un grand nombre de ces cas, les fauteurs de troubles étaient des modifications pourtant d'assez faible envergure, la raison en étant que les principes de conception précédemment utilisés ne présentaient qu'un très faible coefficient de sécurité contre les avaries. La petite modification apportée suffisait donc à faire passer l'ouvrage du "viable" au "non viable". Permettez-moi de donner quelques exemples:

- * Les dalles en béton des maisons individuelles étaient coulées directement sur sol humide sans aucune modification de la conception précédemment adoptée, et qui donnait d'assez bon résultats, pour les fondations réalisées sur un sol préalablement drainé. On ne recourait donc ici à aucune isolation thermique. Pourtant, une étude même élémentaire du mécanisme de propagation de l'humidité aurait démontré que cette formule présentait de graves risques de dommages (dégradation, mauvaise odeur, décollement) en présence de certains types de matériaux organiques de revêtements de sol. Un changement du taux d'humidité relative, par exemple de 90% dans le cas d'un sol bien drainé à 100% pour un sol humide, est souvent désastreux. Ces analyses ne furent toutefois jamais effectuées par les concepteurs. En conséquence, ce sont aujourd'hui des milliers de maisons individuelles en Suède qui ont subi des dommages dus à l'humidité parce que leurs constructeurs se sont basés sur une expérience qui n'était plus valable en l'occurrence.
- * Pour ce qui est du béton, le concept de "qualité" était jusqu'à présent synonyme de résistance. Aussi, lorsque l'environnement était plus hostile, on prescrivait un niveau de résistance plus élevé. La résistance a été utilisée en tant que propriété de substitution en remplacement du rapport eau-ciment, qui donne à son tour une mesure d'autres propriétés telles que perméabilité, teneur en eau solidifiable par le gel, concentration en OH de l'eau contenue dans les pores, qui affecte la protection de l'armature, etc.

L'utilisation de la résistance comme critère de qualité est basée sur la présomption qu'il existe une relation définie entre résistance et rapport eau-ciment. Au cours des dernières décennies, il s'est toutefois produit une modification graduelle de cette relation, en direction de niveaux de résistance plus élevés pour un même rapport eau-ciment. La résistance du ciment a augmenté et l'industrie du béton prêt à l'emploi a affiné ses techniques. Cela a pour conséquence que les mêmes impératifs en matière de résistance entraînent un rapport eau-ciment plus élevé et par là même une longévité inférieure à ce qu'elle était il y a 20 ans.

Les relations moyennes entre résistance et rapport eau-ciment en ce qui concerne le béton prêt à l'emploi fabriqué en Suède au début des années 60 et actuellement ressortent de fig 2.

Un béton offrant une résistance de 30 MPa supposait il y a 20 an un rapport eau-ciment d'environ 0,7. Aujourd'hui, il suffit de 0,8. La modification est donc relativement importante lorsque l'on sait que même une petite variation du rapport eau-ciment peut affecter la durée de vie dans une très large mesure.

On peut également s'attendre à ce que des cas similaires se manifestent dans l'avenir. Nous allons ainsi voir quelques exemples suédois de modifications intervenues dans les techniques de conception, la composition des matériaux et la nature de l'environnement, qui seront appelées à avoir un important effet sur la longévité des ouvrages.

Quelques-uns de ces exemples devraient présenter un certain intérêt dans votre pays également.

- * On procéde de plus en plus à une isolation thermique complémentaire des constructions d'un certain âge. Cela entraîne donc une modification du taux d'humidité des parties anciennes de l'ouvrage, avec pour conséquence éventuelle un début de dégradation. Des variations climatiques même relativement faibles peuvent alors être désastreuses.

- * La capacité d'accumulation de chaleur des éléments de construction épais, comme par exemple les semelles en béton coulées sur le sol, est de plus en plus fréquemment exploitée. Cela conduira progressivement à une nouvelle répartition de la température et de l'humidité, qui réduira la durée de vie si les précautions nécessaires ne sont pas prises dès le stade de la conception.
- * On utilise d'une manière croissante des déchets industriels pour la production de matériaux de construction, tout spécialement pour le ciment et le béton, auxquels on intègre différents types de cendres volantes. Leur influence sur la résistance est souvent marginale et facile à compenser. Sur le plan de la longévité, par contre, il peut en aller tout différemment. Il n'y a aucune raison de supposer que la relation "normale" entre résistance et durée de vie demeure ici valable. On prétend souvent que les matières telles que les cendres volantes provenant de la combustion du charbon ou des fumées de silice réduisent la perméabilité à l'eau pour une résistance égale et que cela a une influence favorable sur la longévité. C'est absurde, car la perméabilité à l'eau n'est que l'un des paramètres affectant la durée de vie. Les autres, comme par exemple le pH de l'eau contenue dans les pores, la teneur en air, la structure des pores ou le taux de diffusion des gaz sont par contre souvent influencés dans le sens négatif par la présence de ces cendres.

C'est pourquoi la durabilité peut très bien diminuer bien que la perméabilité soit inférieure, ainsi que le montre fig 3.

De plus, le béton contenant des cendres volantes est beaucoup plus sensible à un durcissement dans de mauvaises conditions que ne l'est un béton normal. En conséquence, on ne peut pas être certain que la faible perméabilité des échantillons testés en laboratoire soit reproductible dans la couche superficielle du béton de l'ouvrage réel.

- * On s'efforce d'économiser l'énergie lors de la cuisson de produits céramiques tels que tuiles et briques. Cela est susceptible de réduire la résistance au gel, ainsi qu'aux agents chimiques comme par exemple la résistance vers l'alcalinité du mortier. On ne peut ici s'appuyer sur l'expérience passée.

Fig 4 montre la relation entre la température de cuisson de trois argiles différentes pour la fabrication de briques et la résistance au gel de ces briques [1]. Comme on le voit, cette résistance se modifie fortement pour une faible variation de la température de cuisson. La chasse aux économies d'énergie peut donc apparemment avoir pour conséquence de très graves problèmes de tenue à long terme.

- * L'Europe connaît une acidification croissante de son environnement, susceptible d'affecter la longévité des ouvrages enterrés: fondations, canalisations, etc.

Tous ces exemples montrent donc que l'on ne peut pas se fier à la seule expérience ni à des appréciations qualitatives en matière de durabilité. Il est parfaitement clair que nous devons essayer de mettre au point des méthodes quantitatives pour analyser cette durabilité, exprimée de préférence en années de durée de vie prévues, calculées dès le stade de la conception de l'ouvrage. Il est donc alors nécessaire d'étudier non seulement les différents matériaux séparément, mais également l'interaction intervenant avec le temps entre l'ensemble des composants d'un élément de construction.

De la même manière, il est important que le concept de durée de vie soit pris en compte plus consciemment dans les normes officielles. Les autorités responsables doivent être conscientes du fait qu'en stipulant un certain niveau mini de qualité (par exemple la résistance ou le rapport eau-ciment requis dans un environnement donné), elles fixent également la durée de vie moyenne de la totalité du parc futur d'ouvrages en béton de ce type. A l'heure actuelle, ces niveaux de qualité sont établis sur la base d'une information assez déficiente, tirée de "l'expérience pratique" et d'essais en laboratoire insuffisamment précis.

4. LE CONCEPT DE DURÉE DE VIE: DÉFINITION ET FACTEURS À PRENDRE EN COMPTE

Je vais maintenant passer au concept de durée de vie et m'attarder sur les facteurs dont il convient de tenir compte pour procéder à une évaluation de cette durée de vie.

La durée de vie d'un matériau ou d'un élément de construction est le laps de temps durant lequel ce matériau ou cet élément remplit la fonction qui est la sienne. Ce concept est donc vide de sens s'il n'est pas possible d'exprimer les critères de fonction concernés en termes quantitatifs concrètement appréhendables.

Pour cette raison, aucun effort ne doit être négligé pour traduire ces critères en propriétés mesurables telles que capacité portante, déformation, résistance, écaillage superficiel, décoloration, émission de substances toxiques, etc. Ces critères de fonction, bien que quantitatifs, sont souvent d'une grande complexité, parce que constitués en fait d'un faisceau de propriétés plus élémentaires.

Prenons un exemple simple. Celui d'une poutre en béton soumise à une flexion et exposée à l'action du gel et de l'humidité (fig 5).

Le critère de fonction, qui est ici une certaine capacité portante minimale, peut être remplacé par trois propriétés fondamentales, toutes trois liées au facteur temps.

- * la résistance du béton à longue échéance
- * la profondeur des attaques de corrosion dans l'armature
- * la profondeur d'écaillage à la surface du béton

Toutes ces propriétés fondamentales doivent être analysées si l'on désire rendre possible une évaluation de la durée de vie. Dans le cas d'une poutre en béton armé, trois mécanismes de détérioration différents doivent donc être connus.

La résistance du béton augmente d'abord légèrement par suite de l'hydratation, après quoi les effets de fluage dominent, ce qui réduit la résistance à long terme. La profondeur des attaques de corrosion dans l'armature est nulle jusqu'à carbonatation totale de la couche de recouvrement. Ensuite, cette profondeur progresse avec le temps. La corrosion du béton par le gel augmente pour sa part continuellement. Une analyse statique élémentaire permet de déterminer la dépendance temps de la capacité portante et, à partir de là, la durée de vie.

Cet exemple est très simplifié. Dans la réalité, le processus de détérioration est naturellement beaucoup plus complexe.

Il suffit dans de nombreux cas d'étudier uniquement l'interaction entre le matériau considéré et le milieu extérieur. Un bon exemple à cet égard est fourni par un mur en briques exposé à la pluie et au gel, situation dans laquelle nous avons un seul type d'environnement et un seul type de matériau.

Dans d'autres cas, il est également nécessaire d'analyser l'interaction entre différents matériaux. Un exemple en est le complexe "béton coulé sur le sol - enduit - colle - revêtement plastique" qu'il faut traiter comme un ensemble unique.

La durée de vie d'une structure déterminée est bien entendu fonction de l'environnement, comme l'illustrent les exemples suivants.

Exemple 1:

Fig 6 montre la dégradation du joint collé entre un revêtement plastique et une dalle en béton directement coulée sur le sol. Le critère de fonction est un assemblage d'une résistance d'au moins 0,2 MPa, laquelle valeur est atteinte au bout d'un mois lorsque l'humidité relative est de 95% entre les deux matériaux, de 3 mois lorsqu'elle est de 90%, et jamais lorsqu'elle est de 85%.

Exemple 2:

On peut aussi envisager que le principal problème ne soit pas l'adhérence, mais plutôt la mauvaise odeur que dégage le revêtement de sol lorsqu'il est trop humide. Dans ce cas, c'est la quantité de gaz malodorant qui constitue le critère de fonction. Le dégagement de gaz ne doit pas dépasser un certain plafond. On aura alors ici une toute autre relation entre l'humidité relative et la durée de vie que pour ce qui était de l'adhérence. Fig 7.

Exemple 3:

Fig 8 montre un parc de stationnement en plein air dans deux contextes d'environnement, avec les courbes de détérioration correspondantes. L'environnement 1 est totalement dépourvu de sel, tandis que l'environnement 2 fait intervenir à la fois du sel de déneigement et des cycles de gel et dégel. La capacité portante est le critère de fonction qui nous intéresse ici. Dans l'environnement 1, aucun dégât n'a lieu tant que le front de carbonatation n'a pas atteint les barres d'armature (point A), où celles-ci commencent à se corroder à une vitesse qui est fonction de la diffusion de l'oxygène à l'intérieur du métal. A une certaine phase (point B), la couche de recouvrement est totalement écaillée et l'ouvrage ne remplit plus sa fonction. La durée de vie est représentée par t_1 .

Dans l'environnement 2, un certain écaillage intervient déjà lors du premier cycle gel/dégel sous l'effet du sel de déneigement. Au bout d'un ou deux ans (point C), des chlorures dangereusement concentrés ont atteint les barres d'armature, qui cessent alors d'être passivées et commencent à se corroder. Le temps d'aptitude au service diminue de ce fait dès le début même, d'abord comme conséquence de l'écaillage de la surface du béton, puis après le point C sous l'action essentiellement de la corrosion. La capacité portante minimale acceptable est donc déjà atteinte avant que la couche de recouvrement ne s'éaille (ce qui se produit au point D), cela par réduction de l'épaisseur du béton et du diamètre des barres d'armature. La durée de vie n'est plus que t_2 , soit bien plus courte que t_1 .

De ces trois exemples, il est possible de tirer quelques importantes conclusions (en même temps que d'autres qui le sont moins).

Conclusion 1:

Différents types de matériaux, pour revêtements de sols par exemple, ont des courbes aptitude au service - temps également différentes bien que se trouvant dans un même environnement. La

raison pourrait très bien en être que des mécanismes de détérioration entièrement différents sont ici impliqués. En utilisant le concept de durée de vie, il est toutefois possible, au moins en théorie, de porter un jugement équitable sur les différents matériaux concernés. Les matériaux qui ont la même durée de vie ont une égale durabilité indépendamment de ce qui les différencie sur le plan de leurs autres propriétés, chimiques ou physiques. Une telle conclusion ne peut être tirée sur la seule base d'essais de durabilité normaux, car ceux-ci sont souvent accélérés, comme nous le verrons plus loin, et en outre souvent très différents selon le type de matériau considéré. Les problèmes d'interprétation sont donc considérables.

Conclusion 2:

Les critères de fonction doivent être clairs et quantifiés. Dans l'exemple 1, le critère retenu était la résistance du joint collé. Un autre critère, également important (sinon même plus important), se situe au niveau des mauvaises odeurs susceptibles de se manifester bien avant que le joint lâche. Cette dégradation suit différentes courbes de temps selon l'humidité relative, ce qui a donc pour conséquence que la durée de vie est également différente.

La dissociation d'un critère de fonction en un certain nombre de propriétés élémentaires mesurables est une opération souvent très complexe, mais nécessaire pour une évaluation fiable de la durée de vie.

Conclusion 3:

La durée de vie dépend au plus haut point des caractéristiques de l'environnement. Celles-ci doivent donc être connues avec précision: humidité relative, température, précipitations, concentration d'agents agressifs, etc., et il faut en outre prendre en considération les variations futures possibles de ces différents paramètres.

A cet égard, un simple exemple pris en Suède. Au cours des 20 dernières années, les fortes quantités de sel de déneigement déversées sur des structures en béton initialement conçues pour résister aux attaques normales du gel ont provoqué de graves problèmes au niveau des ponts, sous forme d'écaillage profond et de corrosion des armatures.

Conclusion 4:

Le mécanisme de détérioration principal diffère souvent selon la période considérée. Ainsi, par exemple, dans le cas du parc de stationnement I précédemment mentionné, le mécanisme détériorateur le plus important est devenu la corrosion des armatures, et non plus le gel. La pente de la courbe aptitude au service - temps se modifie donc radicalement. De tels "sauts" d'un mécanisme à un autre se produisent dans la pratique et doivent donc être envisagés lorsque l'on évalue la durée de service au stade de la conception. Cela signifie également qu'on ne peut que rarement se baser, pour calculer la durée de vie, sur des essais simplifiés qui ne s'appliquent qu'à un agent de dégradation à la fois. Les résultats de tels essais, même s'ils sont correctement extrapolés dans le temps, ne peuvent fournir qu'une mesure de la durée de vie de l'échantillon testé, dans les conditions effectives de l'essai, et non pas de la structure réelle dans son environnement réel. L'action complexe, souvent combinée, de nombreux agents de dégradation intervenant simultanément peut être analysée de manière théorique sur la base des résultats d'essais portant sur chacun d'eux séparément, ou des connaissances que l'on a des mécanismes de détérioration.

Conclusion 5:

Il n'est possible de procéder à une évaluation de la durée de vie qu'à condition de connaître dans le détail le mécanisme de détérioration. Par exemple, la période d'installation du processus de corrosion par les chlorures dans le cas du parc de stationnement dont nous avons précédemment parlé est fonction de nombreux paramètres interreliés de manière complexe et encore actuellement

partiellement inconnus, les facteurs fondamentaux étant ici la concentration en OH^- de l'eau pénétrant par capillarité dans le béton et le taux de diffusivité des ions Cl^- dans le revêtement des armatures. Ces deux facteurs sont toutefois dépendants de nombreuses autres caractéristiques telles que rapport eau-ciment, teneur en ciment, type de ciment, type et quantité de matières résiduelles, durcissement, température, etc. Une estimation incorrecte de l'effet de l'un quelconque de ces paramètres peut conduire à de sérieuses erreurs en ce qui concerne l'évaluation de la durée de vie.

Conclusion 6:

Le premier exemple que j'ai cité, celui du revêtement de sol (fig 6 et 7), montre l'intérêt de pouvoir utiliser un seul et unique paramètre fondamental, en l'occurrence l'humidité relative, pour définir à la fois la courbe de dégradation et le milieu ambiant. Cela permet alors d'évaluer plus facilement la durée de vie. Pour cerner ce paramètre essentiel, il est toutefois nécessaire, comme je l'ai précédemment mentionné, de connaître le mécanisme de détérioration.

La dégradation par le gel des matériaux poreux est ainsi un exemple de problème de longévité que l'on peut poser dans de bonnes conditions en partant d'un seul paramètre de base, à savoir le degré de saturation d'eau S dans les pores. Chaque matériau a une certaine valeur S critique (valeur maxi acceptable). [2]

Fig 9 montre deux exemples de détermination expérimentale du degré de saturation d'eau critique. Le béton 1 a une teneur en air d'environ 2%. Dans le béton 2, par contre, on a ajouté 7,6% d'air. Un certain nombre d'échantillons de chacun de ces deux bétons ont été ajustés en fonction de différents degrés de saturation d'eau compris entre 50 et 100%. Ils ont ensuite été enfermés dans des sachets plastiques scellés et soumis à une série de 6 cycles de gel et de dégel. Le module d'élasticité dynamique a été mesuré avant et après la phase de gel. Comme on le voit, on constate une modification radicale du module E

pour un certain degré de saturation d'eau critique, qui est de 0,9 pour le béton 1 et de 0,8 pour le béton 2. La valeur S critique n'est pas affectée par la vitesse de congélation ni par aucun autre facteur climatique. Le degré de saturation d'eau critique peut donc être considéré comme une propriété intrinsèque du matériau.

La valeur S critique est la donnée du problème de la résistance au gel liée au matériau. Chaque environnement détermine un certain degré de saturation d'eau que j'ai coutume de désigner en tant que degré de saturation d'eau actuel. Les dégâts par le gel sont vraisemblablement fonction de ce que la valeur S actuel dépasse la valeur S critique. [2]

Jusqu'à présent, les courbes aptitude au service - temps ont été supposées continues, c'est-à-dire que l'on part du principe que le phénomène de détérioration augmente graduellement avec le temps, ce qui est typique des attaques chimiques. Toutefois, pour certains types d'attaques essentiellement physiques, ces courbes sont discontinues et l'on enregistre des dégradations plus ou moins brutales, après des périodes d'aptitude au service pratiquement constantes. Fig 10.

Le gel est un exemple type d'agent dont les attaques sont discontinues, comme le montre fig 11. Le volume Δv du matériau est supposé être le plus petit volume que l'on puisse considérer comme représentatif du matériau concerné.

L'aptitude au service du matériau sous son volume unitaire Δv représentatif demeure constante ou croît aussi longtemps que les conditions d'environnement sont telles que le degré de saturation critique S_{CR} n'est pas dépassé dans ce volume. S_{CR} est à peu près constant dans le temps. Puis, tout à coup, au point B, les conditions extérieures font intervenir une forte humidité, de sorte que S_{ACT} excède S_{CR} en même temps que se produit une période de gel. La détérioration à l'intérieur du volume représentatif est alors très importante, avec pour conséquence que l'aptitude au service chute. Dans la réalité, un matériau se compose de nombreux volumes unitaires. Un très grand nombre de volumes sont détériorés simultanément, d'où une baisse mesurable de l'aptitude au service du matériau incriminé.

La dégradation par le gel est un bon exemple du caractère statistique de la durée de vie. La combinaison particulièrement défavorable d'un taux d'humidité trop élevé dans un large volume d'un certain matériau, et de températures inférieures à 0°C, peut aussi bien se produire la première année qu'au bout de cinquante ans, ce qui rend difficile de procéder à une évaluation fiable de la durée de vie. Toutefois, il est tout à fait clair que pour parvenir à une bonne longévité il faut que le matériau ou la structure soient conçus de telle manière qu'il n'y ait que très peu de probabilités que S_{ACT} dépasse S_{CR} .

5. DURÉE DE VIE POTENTIELLE

Dans de nombreux cas, il est plus sage d'abandonner le concept de durée de vie réel au profit de celui de durée de vie potentielle. Pour obtenir la durée de vie réel d'un matériau dans un environnement donné, il est donc nécessaire de quantifier cet environnement avec le plus de précision possible.

Si l'on connaît exactement le milieu ambiant réel (fig 12a), on peut en principe déterminer la durée de vie réel dans la mesure où l'on sait aussi quel est le mécanisme de détérioration.

La mauvaise connaissance du milieu ambiant est le principal obstacle lorsque l'on désire évaluer la durée de vie. Pourtant, il existe ici une possibilité; on peut souvent remplacer l'environnement réel, trop complexe, par un "environnement standard", plus facile à appréhender en théorie et à transposer en laboratoire (fig 12b). La condition est naturellement alors que cet environnement standard soit aussi représentatif que possible de l'environnement réel.

A partir de l'environnement standard, ce que l'on obtient, ce n'est pas la durée de vie réel, mais plutôt ce que l'on pourrait appeler une durée de vie "potentielle". Un concept que l'on a utilisé pour les dégâts par le gel et la corrosion des armatures.

Pour ce qui est du gel, on remplace l'environnement complexe véritable par un essai de succion capillaire simple (fig 13). Dans la réalité, le degré de saturation d'eau dans le matériau est très variable, et à un moment donné la degré de saturation capillaire dépasse la valeur S critique. Ce laps de temps correspond à la durée de vie potentielle.

Chaque environnement est représenté en principe par un certain temps de succion capillaire. Si l'on souhaite une longue durée de vie, il faut que le temps de succion capillaire représentatif de chaque ouvrage n'aboutisse pas à un degré de saturation d'eau capillaire tel que le matériau en soit endommagé. (fig 14)

Fig 15 montre des exemples d'essais de succion capillaire sur les deux qualités de béton dont j'ai précédemment déterminé le degré de saturation d'eau critique (fig 9). La succion capillaire est nettement moindre pour le béton 2, ce qui lui confère une très grande longévité. Il est ici probable que le degré de saturation d'eau critique n'est jamais atteint. Pour ce qui est du béton 1, sa durée de vie n'est par contre que d'une quinzaine de jours.

Si l'on sait comment se fait l'absorption d'eau dans un matériau poreux et si l'on connaît le mécanisme de détérioration, il est en principe possible de calculer à l'avance la durée de vie potentielle. J'ai procédé à ce type de calcul pour le béton, ce qui m'a permis d'établir une relation entre la teneur en air du béton et sa durée de vie potentielle.

Fig 16 en montre un exemple. On voit en effet comment la durée de vie augmente lorsque le rapport eau-ciment diminue et que la teneur en air s'élève. Ce calcul suppose une certaine constance dans la répartition du volume des pores d'air.

En ce qui concerne la corrosion des armatures due à la carbonatation du béton, le profil d'humidité relative du recouvrement revêt une importance primordiale. Plus cette humidité est élevée, plus le taux de carbonatation est faible. Ainsi, un béton constamment humide a un très faible carbonatation et donc une grande longévité. Le même béton, placé à l'extérieur mais protégé de la pluie, connaît une rapide carbonatation, mais demeure dans la plupart des pays suffisamment humide pour qu'une corrosion rapide intervienne dès que le front de carbonatation a atteint les barres d'armature. Sa durée de vie est donc alors limitée. Les différents types d'environnements peuvent être classés en catégories distinctes, chacune ayant ses propres caractéristiques.

Chaque catégorie d'environnement détermine un certain profil d'humidité relative dans la couche de recouvrement des armatures. Ce profil peut être évalué par l'intermédiaire d'analyses des mécanismes de propagation de l'humidité et est différent selon le type de béton, en fonction de son rapport eau-ciment, etc.

Tuutti, en Suède, [4] a classé les ouvrages extérieurs en deux types d'environnements (fig 17).

- * Type 1: protégés de la pluie
- * Type 2: non protégés de la pluie

Le premier type d'ouvrages a un niveau d'humidité moyen nettement supérieur, ce qui ralentit la carbonatation du béton.

Tuutti a également calculé la vitesse de carbonatation pour différentes qualités de béton exposées à ces deux environnements. [4] Les résultats de ces calculs ressortent de fig 18, qu'il est possible d'utiliser pour l'évaluation de la durée de vie et le choix des matériaux. L'axe vertical représente la profondeur de carbonatation et l'axe horizontal le temps d'exposition.

L'illustration a fait l'objet de petits ajustements pour s'aligner sur les données relevées sur le terrain. Elle indique les profondeurs de carbonatation maxi que l'on peut attendre. Un rapport eau-ciment de 0,75 ne donne qu'une durée de vie de 7 ans pour un ouvrage protégé de la pluie avec couche de recouvrement des armatures de 20 millimètres d'épaisseur. Ce rapport doit être abaissé à 0,50 si l'on désire porter la durée de vie à 50 ans. L'ouvrage le plus humide a une durée de vie d'environ 50 ans et pouvant aller jusqu'au-delà de 100 ans avec ces deux rapports eau-ciment.

Fig 19 donne un exemple d'utilisation du diagramme de durée de vie élaboré par Tuutti. Les trois qualités de béton représentées ont exactement la même longévité. Un béton avec couche de recouvrement des armatures de 10 mm aura la même durée qu'un béton dont la couche de recouvrement atteint 25 mm, cela à condition de réduire de rapport eau-ciment de 0,7 à 0,4. Cela permet ainsi de réaliser des structures plus minces et plus légères.

Tuutti a étudié de manière similaire la corrosion induite par les chlorures. On voit le résultat de ces calculs sur fig 20, qui indique la durée de vie jusqu'à la première amorce de corrosion en fonction du diffusivité des ions Cl^- dans la couche de recouvrement et le seuil de concentration de Cl^- nécessaire pour que débute la corrosion [4]. Ces deux facteurs dépendent de la composition et du durcissement du béton.

Le concept de "durée de vie potentielle" devrait pouvoir être appliqué avec de bons résultats à de nombreux autres types de processus de détérioration, y compris pour d'autres matériaux que le béton.

6. ESSAIS DE DURABILITÉ SERVANT DE BASE POUR L'ÉVALUATION DE LA DURÉE DE VIE

Nous allons maintenant dire quelques mots sur les essais de résistance servant de base pour l'évaluation de la durée de vie.

Il est absolument évident que l'évaluation de la durée de vie doit s'appuyer soit sur un modèle théorique définissant l'interaction entre l'environnement et le matériau, soit sur un quelconque essai de durabilité du matériau ou de l'élément concerné, dont les résultats sont ensuite convertis en durée de vie estimée.

Les essais de durabilité peuvent être effectués selon deux principes:

- 1: Essais accélérés, dans lesquels l'environnement étudié est "concentré" de telle manière que la durée de vie totale puisse être reproduite en un laps de temps relativement court en laboratoire.
- 2: Essais non accélérés, dans lesquels l'environnement concerné est reproduit tel quel en laboratoire. Les altérations subies par le matériau, qui sont normalement très faibles, sont enregistrées par des instruments d'une grande sensibilité, après quoi la courbe de dégradation d'ensemble est obtenue par extrapolation.

Les essais accélérés, bien que couramment utilisés, sont à rejeter comme base d'évaluation de la durée de vie, cela pour plusieurs raisons fig 21:

Tout d'abord, il est presque toujours impossible de traduire concrètement le temps d'exposition utilisé pour l'essai en temps d'exposition réel dans l'environnement réel. Sur l'échelle de temps ici illustrée, 1 semaine est supposée représenter 25 ans. Dans le cas ici, le matériaux B est le matériaux avec le durabilité supérieure.

Le second problème réside en ce que l'accélération de l'essai modifie parfois le mécanisme de détérioration. Il se peut donc alors très bien que le matériau A soit en réalité meilleur que le matériau B bien que l'essai ait indiqué le contraire.

Troisième problème, l'accélération est parfois telle qu'une détérioration se produit alors que cela n'aurait jamais été le cas dans la réalité. Les résultats de l'essai sont en conséquence totalement faux.

Enfin, on a souvent dans la réalité un effet de synergie au niveau de deux ou plusieurs processus de dégradation, ou encore des sauts dans le temps d'un processus à un autre. Cela n'apparaît pas dans un essai accéléré normal, étant donné que l'on étudie dans chaque cas un seul type de détérioration à la fois.

Fig 22 montre un exemple type de la difficulté des essais accélérés, ainsi que de l'exploitation problématique des résultats de ces essais pour l'évaluation de la durée de vie. Trois bétons différents ont été soumis à des essais de résistance au gel par quatre méthodes américaines standardisées [5]. Selon la méthode "slow water", ces bétons ont tous une très mauvaise tenue. Selon la méthode "slow air", ils offrent tous par contre une excellente durabilité. Seule la méthode "rapid water" donne des résultats nuancés. Lorsqu'il s'agit d'interpréter ces résultats, il est toutefois absolument impossible de parvenir à une évaluation de la durée de vie réelle. Celle-ci est apparemment fonction du milieu extérieur. En conséquence, il est indispensable de reproduire ce milieu le plus fidèlement possible lors de l'essai.

Je voudrais également donner un autre exemple, qui devrait pouvoir vous intéresser en Tunisie. L'Institut de Recherche sur le Ciment et le

Béton de Stockholm avait développé il y a une dizaine d'années un matériau de couverture ondulé à base de ciment avec armature en fibres de sisal. Ce projet était conduit en coopération entre la Suède et la Tanzanie, l'idée étant de parvenir à une production locale à partir de matières premières disponibles en Tanzanie. Ce produit répondait à un très fort besoin.

On réussit à réaliser un matériau de bonne qualité, robuste et facile à fabriquer, dont on estima, sur la base d'essais simples, qu'il devrait avoir une bonne tenue.

La technique fut donc transplantée en Tanzanie, où l'on construisit quelques toits expérimentaux que l'on exposa au climat local. Après 10 mois d'exposition, on procéda à un essai de résistance en charge, qui eut pour résultat un effondrement de la structure par apparition brutale d'un certain nombre de fissures.

Cela conduisit à effectuer des essais minutieux en Suède, qui permettent de déceler que les fibres de sisal étaient attaquées et rendues friables par l'eau fortement alcaline contenue dans les pores du béton. C'était là un point que l'on n'avait pas observé lors des essais de durabilité précédents. On étudia la température des toits en Tanzanie, ce qui fit apparaître que celle-ci pouvait varier entre $+20^{\circ}\text{C}$ et $+75^{\circ}\text{C}$ en 24 heures, tandis que le taux d'humidité demeurait en même temps très élevé.

On reconstitua cet environnement en laboratoire, avec pour résultat que l'on put alors reproduire les mêmes dégâts que ceux que l'on avait constatés en Tanzanie. On dispose désormais d'une méthode accélérée grâce à laquelle il est possible d'éviter ce type d'erreur totale d'évaluation [6].

Cette méthode permet de déceler les mauvais matériaux, mais ne donne naturellement aucune mesure précise de la durée de vie exprimée en années. Il aurait donc été préférable de mettre au point un essai non accéléré.

Les essais non accélérés sont en effet utilisables pour l'évaluation de la durée de vie, ce qui leur donne un particulier attrait. Toutefois, ce type d'essais également s'assortit de problèmes:

- 1: Le premier de ces problèmes est le choix de l'environnement d'essai, qui requiert une analyse minutieuse du contenu d'éléments agressifs de l'environnement réel.
- 2: Le second problème est la difficulté de déceler les dégâts effectifs en raison de l'extrême lenteur de leur apparition, puisque le processus n'est pas accéléré, et de la durée relativement courte de l'essai.
- 3: Et quant au troisième problème, c'est celui de l'extrapolation de la courbe dommages - temps, qui fait intervenir un facteur temps de 10^2 à 10^3 .

Ce dernier problème est le plus sérieux, car il exige une totale connaissance des mécanismes de détérioration. Et il faut aussi connaître toutes les modifications que ces mécanismes peuvent venir à subir dans le futur.

Fig 23 donne des exemples de différentes manières d'extrapoler un résultat de mesure à partir d'un laps de temps t . On peut ici avoir trois processus de dégradation, à savoir accéléré, retardé ou constant. Si l'on part d'une hypothèse erronée, on débouche automatiquement sur une évaluation de durée de vie qui est elle aussi totalement erronée.

Un exemple type de méthode d'essai non accélérée est celle de Rombén, utilisée pour mesurer la dégradation de tuyaux en béton au contact d'eau acide fig 24 [7]. L'échantillon est plongé dans la solution acide concernée et, en mesurant continuellement le pH, on ajoute de l'acide jusqu'à ce que ce pH soit constant. La consommation d'acide donne alors une mesure de la profondeur d'attaque.

On voit sur fig 25 une courbe d'attaque type. Pendant environ un mois, l'attaque diminue proportionnellement à la racine carrée du temps. Cela signifie donc que l'on obtient une droite d'inclinaison 0,5 dans un double diagramme logarithmique.

9. CONCLUSIONS

Me voici maintenant parvenu à la fin de mon exposé, dans lequel j'ai désiré mettre en évidence les quelques points que je vais reprendre ici.

La situation présente, selon laquelle la conception des ouvrages dans l'optique de la longévité est souvent basée sur une expérience dépassée et des données insuffisantes concernant les matériaux et l'environnement dans lequel ils sont utilisés, est rien moins que souhaitable. Nous avons vu, par de nombreux exemples, que ce mode opératoire pouvait conduire à une surestimation de la durée de vie des ouvrages. De plus, cela n'incite pas les producteurs de matériaux à étudier en profondeur les propriétés de leurs matériaux, ni les concepteurs à s'attarder aux répercussions d'une nouvelle technique de conception sur la longévité d'ensemble.

Il serait bien préférable que le concept qualitatif de "durabilité" soit abandonné au profit de celui, quantitatif, de "durée de vie". Ainsi, il y aurait toujours dans tout projet une évaluation de la durée de vie de l'ouvrage. Une telle évaluation, pour être fiable, requiert toutefois une importante somme d'information: les critères de fonction et l'environnement doivent être quantifiés, le mécanisme de détérioration doit être connu dans le détail et l'interaction entre l'environnement et le matériau doivent être calculés soit théoriquement soit par extrapolation des résultats d'un essai non accéléré, ce qui signifie donc que l'on doit aussi connaître de nombreuses données quant aux propriétés du matériau.

Les difficultés rencontrées pour parvenir à une évaluation fiable de la durée de vie sont grandes. Divers exemples empruntés au domaine de la recherche sur le béton montrent toutefois qu'il est possible de surmonter ces difficultés en orientant plus largement la recherche sur la durabilité des matériaux vers des modèles réels permettant une représentation théorique des mécanismes de détérioration.

C'est là un important défi à relever par tous ceux qui se consacrent à la recherche sur les matériaux.

REFERENCES

- /1/ G. Piltz: Einflüsse der Fabrikation auf die Frostbeständigkeit von Ziegeln. Die Ziegelindustrie, Heft 7, 1967.
- /2/ G. Fagerlund: Degré critique de saturation- un outil pour l'estimation de résistance au gel des matériaux de construction. Matériaux et Constructions, Nr 23, 1971.
- /3/ G. Fagerlund: The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. The international cooperative test. Materials and structures, Vol 10, Nr 58, 1977.
- /4/ K. Tuutti: Corrosion of steel in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Research Fo 4.82, 1982.
- /5/ Report on cooperative freezing-and-thawing tests of concrete. Highway Research Board, Special Report 47, Washington D.C. 1959.
- /6/ H-E. Gram: Durability of natural fibres in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Research Fo 1.83, 1983.
- /7/ L. Rombén: Aspects on testing methods for acid attacks on concrete, Research Fo 9.79, 1979.

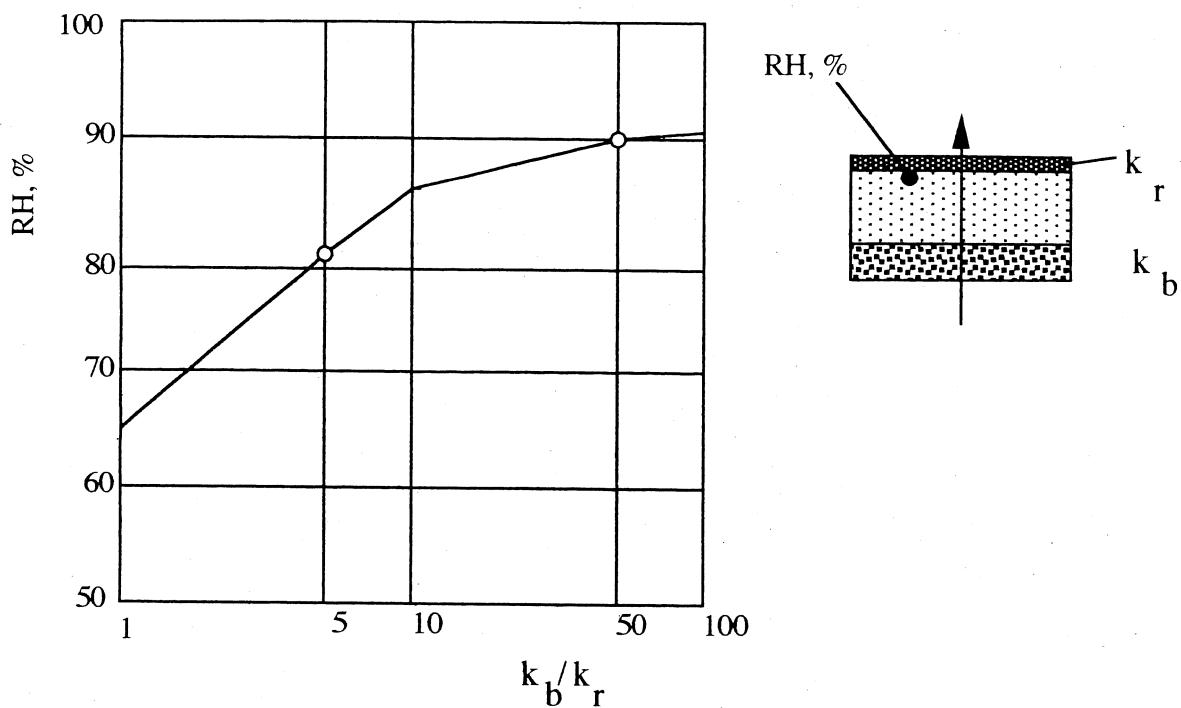


Fig 1 Influence de l'imperméabilité du revêtement de sol à la vapeur d'eau sur le taux d'humidité au bord supérieur de la dalle en béton. Cette dalle repose directement sur une couche isolante thermique posée sur sol humide.

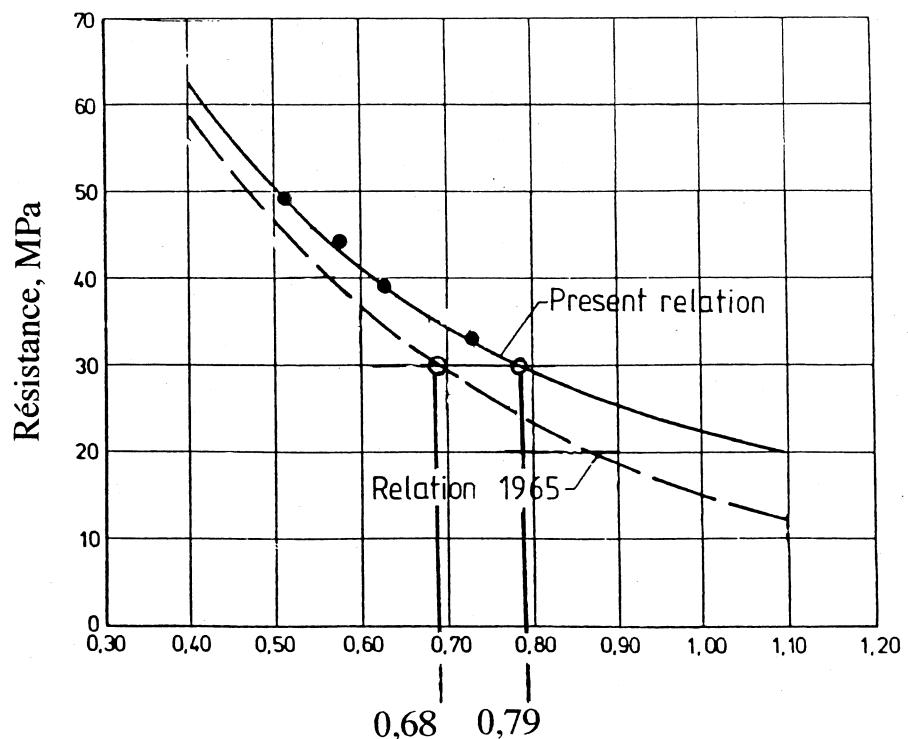


Fig 2 Relation moyenne entre le rapport eau-ciment et la résistance à la compression de béton de fabrication suédoise.

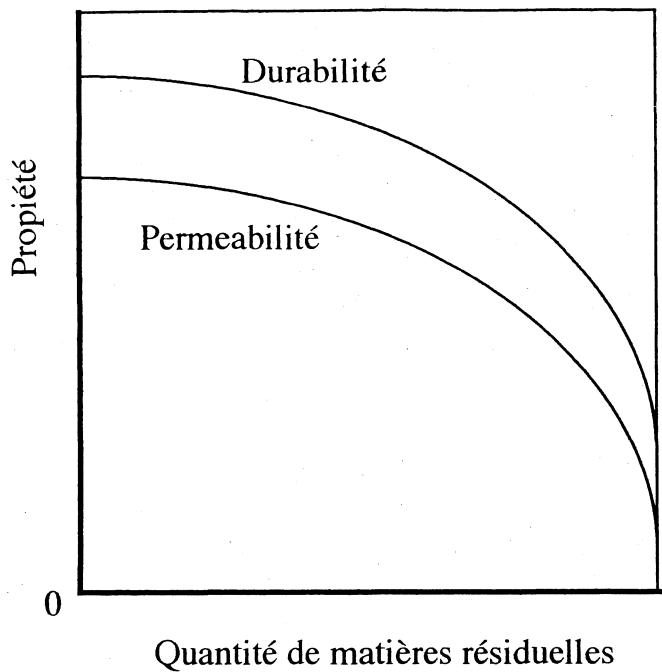


Fig 3 Relations de principe entre la quantité de matières résiduelles réactives dans le béton et la perméabilité et la tenue, respectivement, de ce béton. (Matières résiduelles = cendres volantes, laitier de haut-fourneau, etc.).

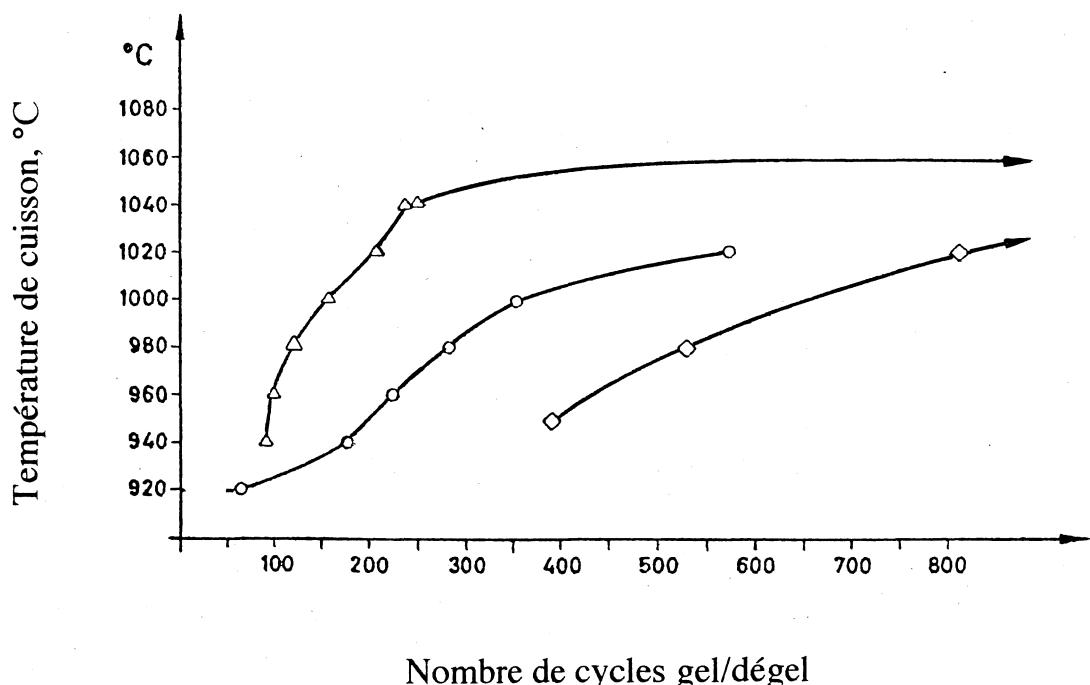


Fig 4 Relation entre la température de cuisson de trois argiles différentes et résistance au gel des briques et tuiles. [1]

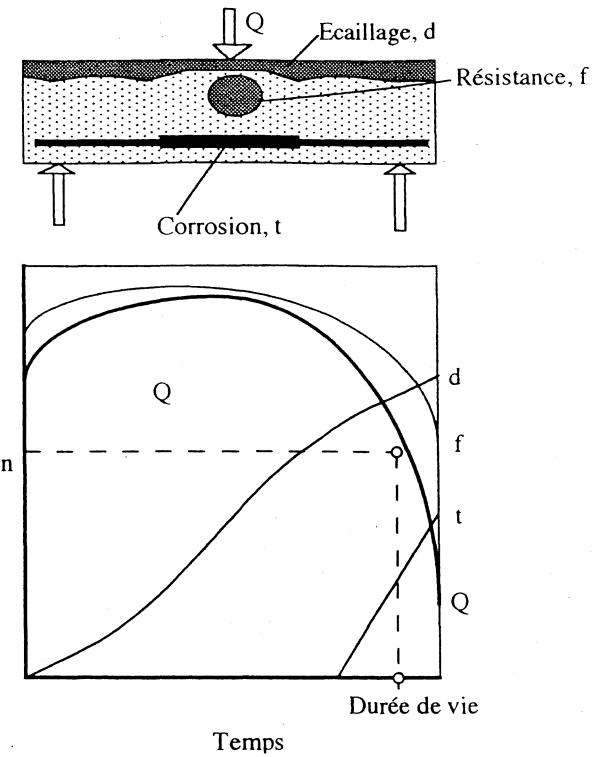


Fig 5 Poutre en béton soumise à un flexion et exposée à l'action du gel et de l'humidité.

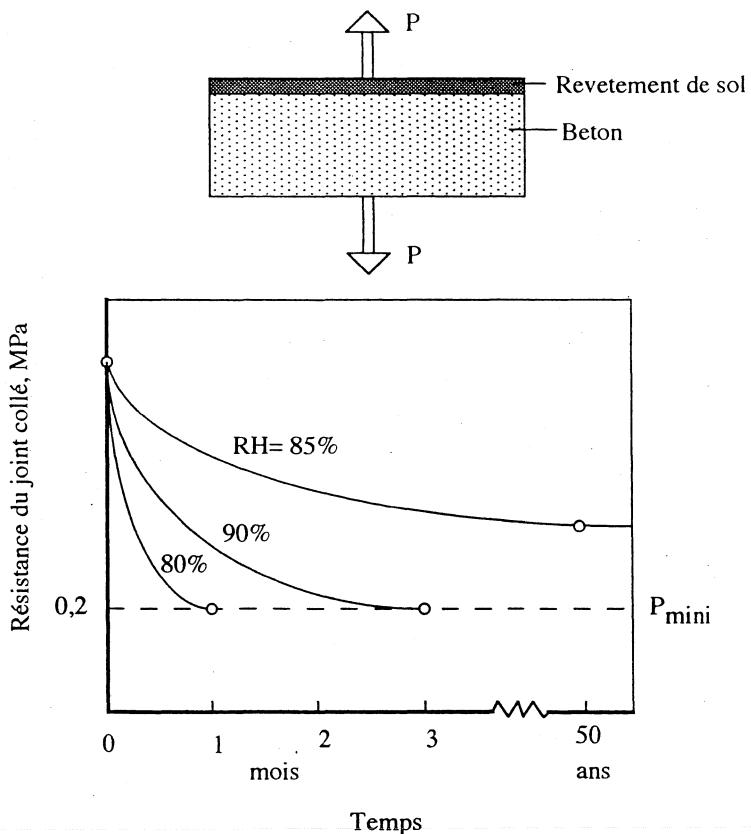


Fig 6 Exemple d'influence de l'environnement sur la durée de vie. L'humidité réactive entre un revêtement de sol et une dalle en béton effectue l'adhérence, laquelle est considérée comme étant le facteur décisif pour la durée de vie.

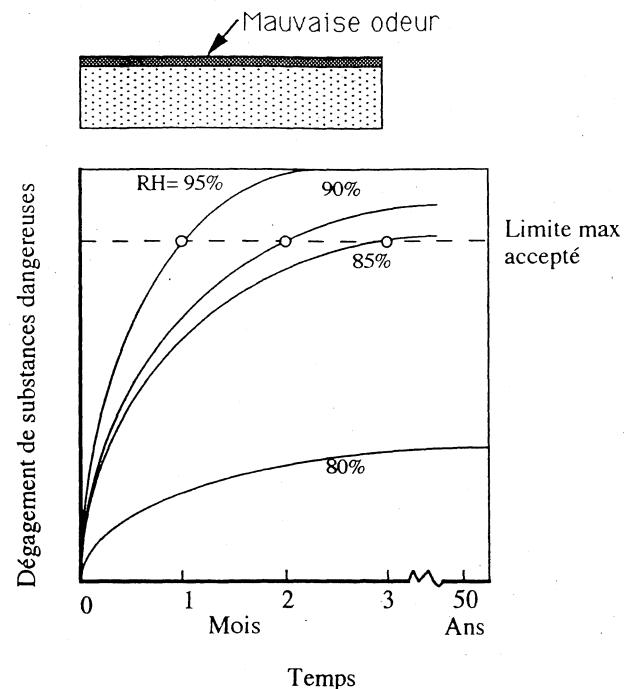


Fig 7 Même exemple qu'à la fig. 6, mais la durée de vie est ici déterminée par les émissions de gaz malodorants.

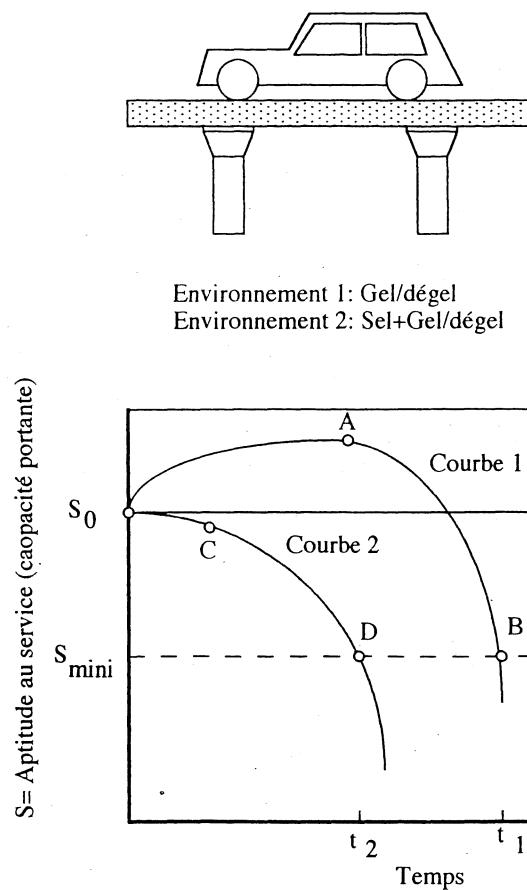


Fig 8 Exemple d'influence de l'environnement sur la durée de vie. Une dalle de parc de stationnement non couvert est exposée soit à l'eau de pluie et au gel, soit à l'eau salée et au gel.

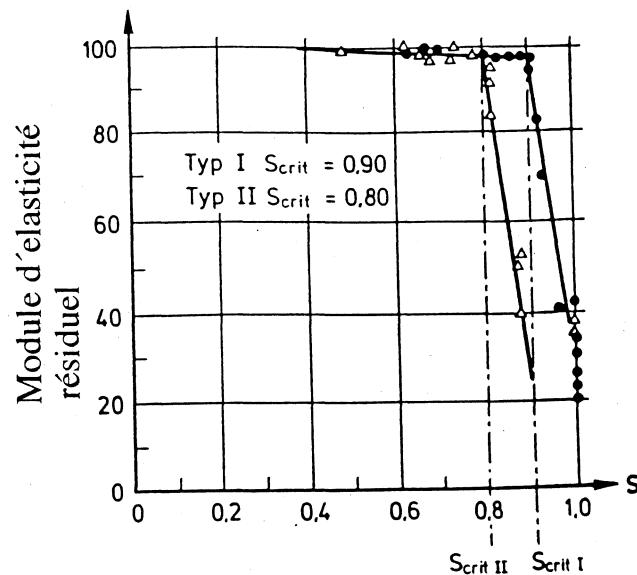


Fig 9 Relation entre le taux de saturation d'eau du béton et son module d'élasticité résiduel après 6 cycles de gel. [3]

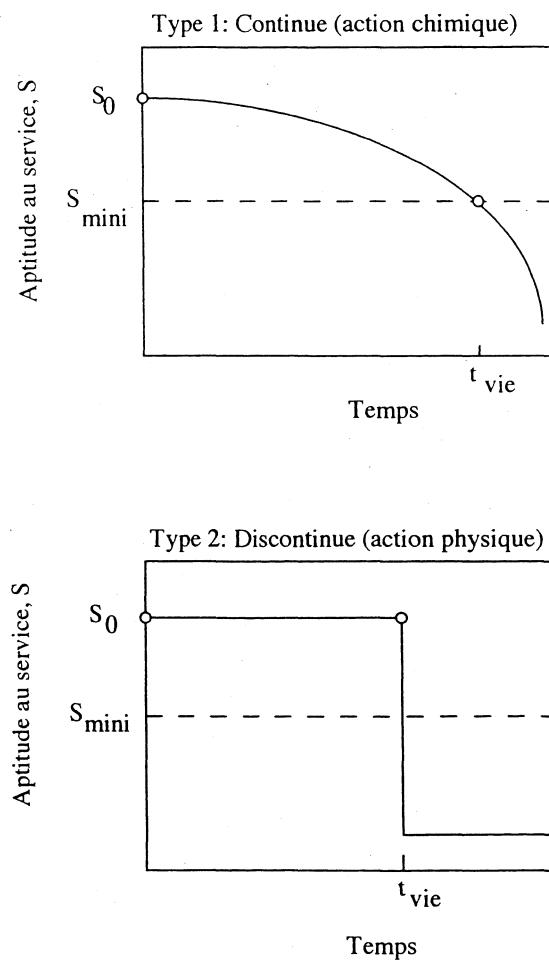


Fig 10 Processus de détérioration continu et discontinu, respectivement.

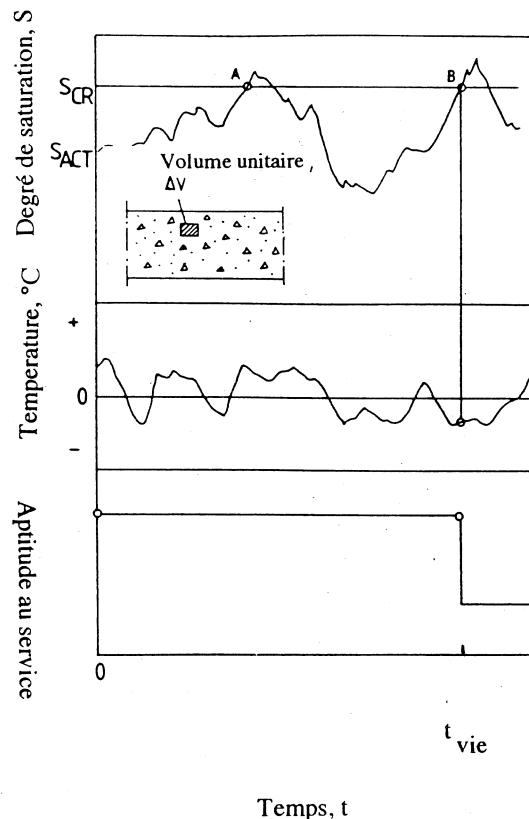


Fig 11 L'effet du gel, exemple de processus de détérioration discontinu.

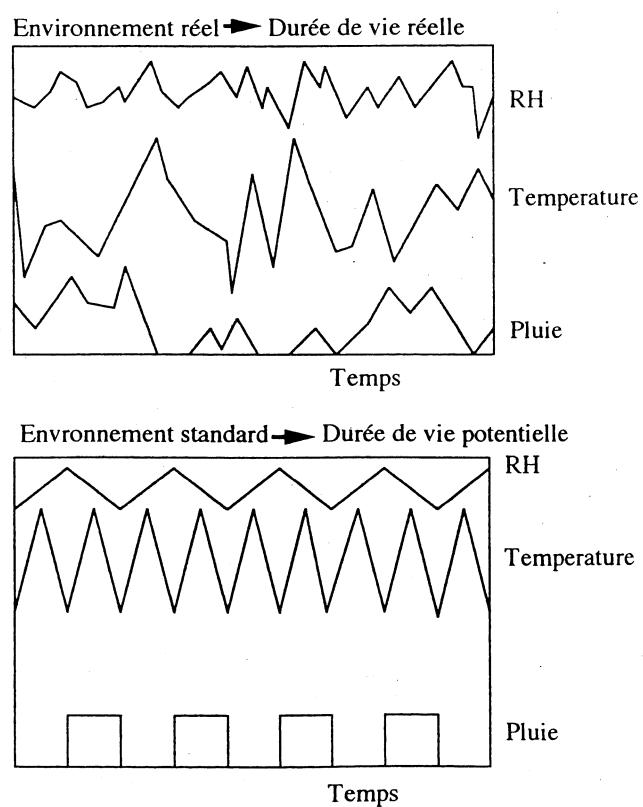
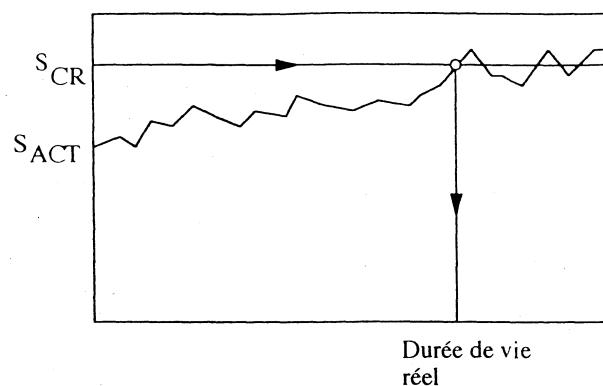


Fig 12 (a) L'environnement réel donne la durée de vie également réelle.
 (b) Un environnement standardisé donne une durée de vie potentielle.

Environnement réel



Environnement capillaire isothermique

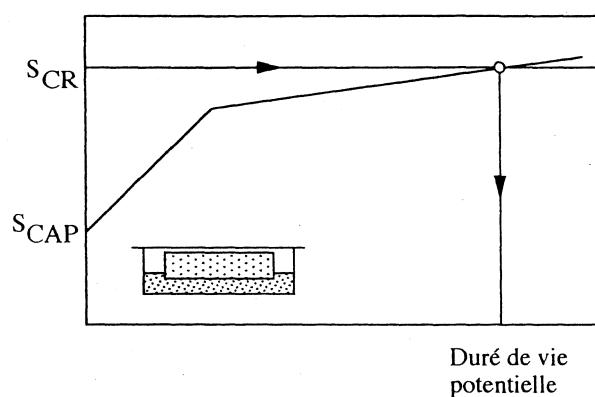


Fig 13 Environnement standardisé pour béton exposé au gel. On observe une succion capillaire continue.

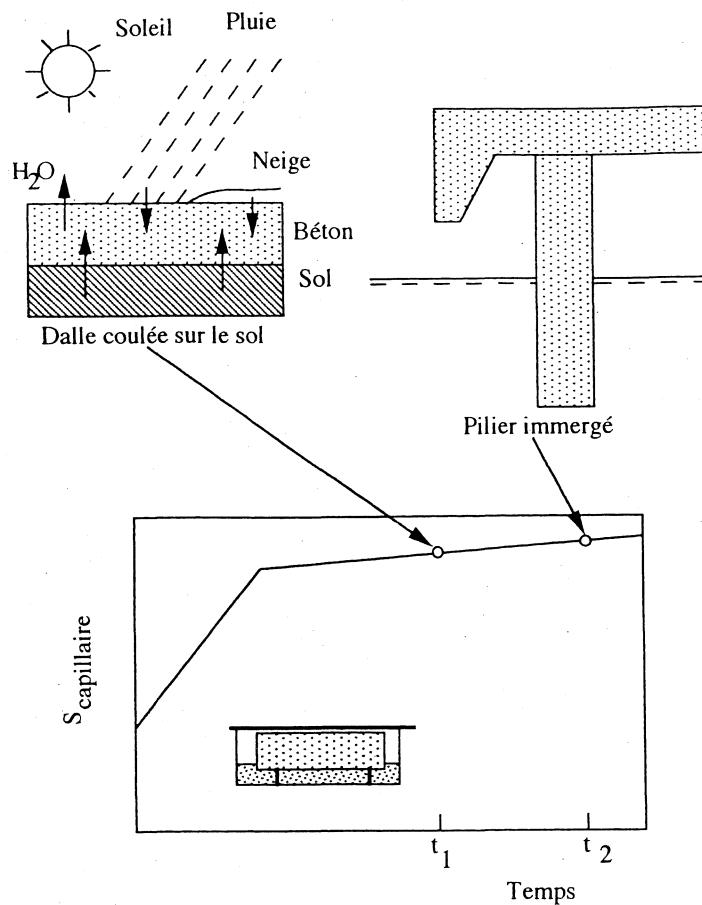


Fig 14 A chaque environnement réel correspond un certain temps de succion capillaire.

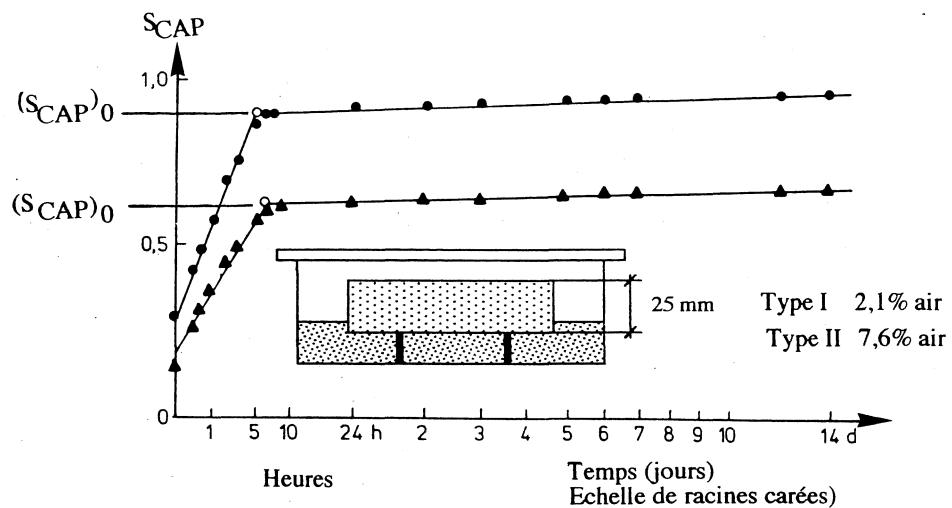


Fig 15 Exemple d'essai de succion capillaire sur les deux bétons de la fig. 9. [3]

$$F = S_{CR} - S_{CAP}(t)$$

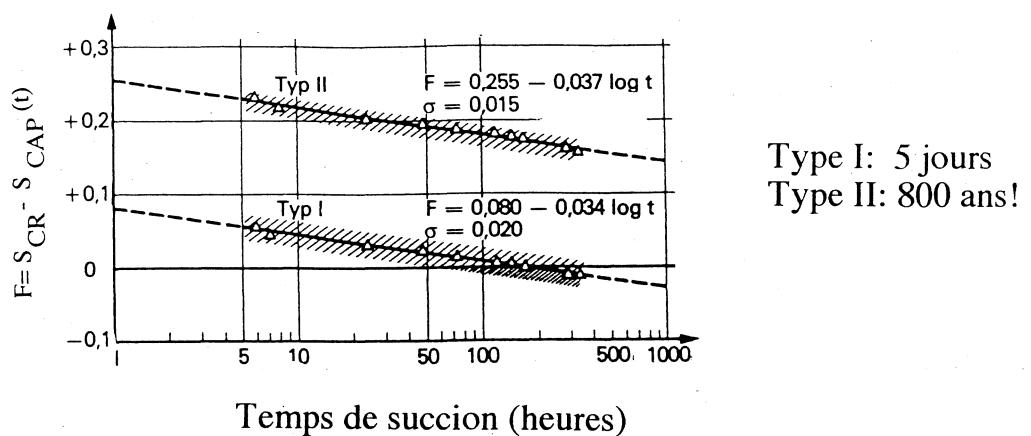


Fig 16 Durée de vie potentielle du béton exposé au gel et à une succion capillaire continue.

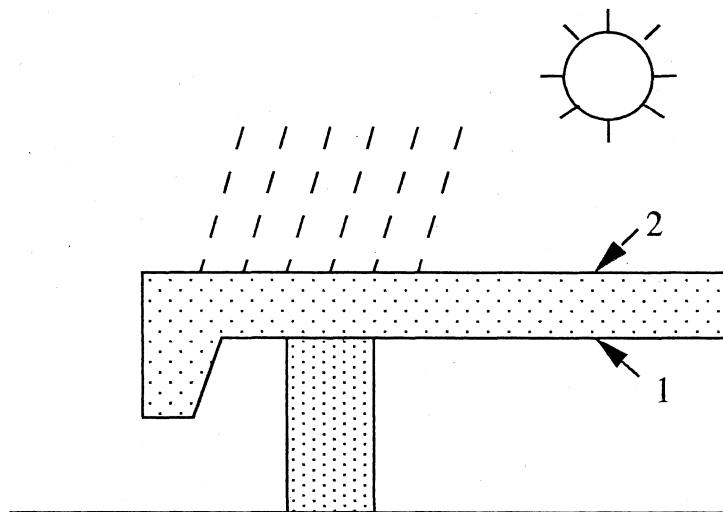


Fig 17 Environnements standardisés pour béton exposé à la carbonatation. [4]

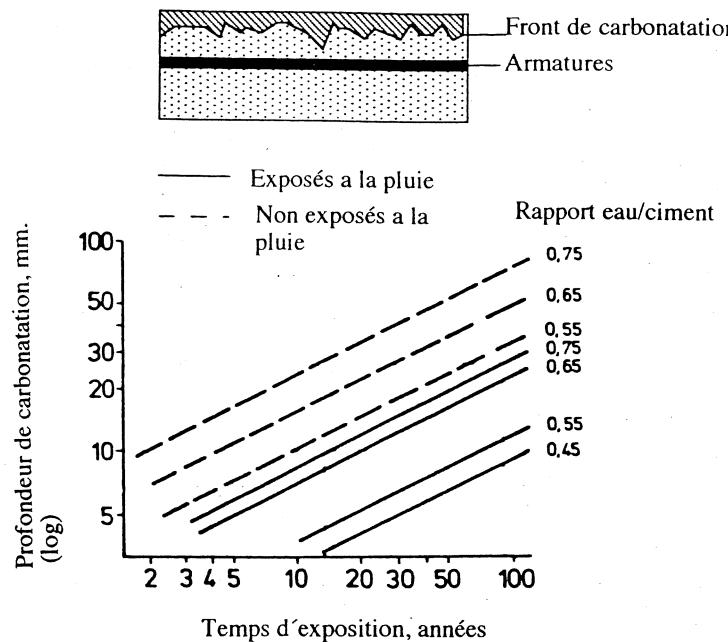


Fig 18 Diagramme de durée de vie d'un béton armé exposé à la carbonatation. Les deux environnements standardisés sont ceux de la fig. 17. [4]

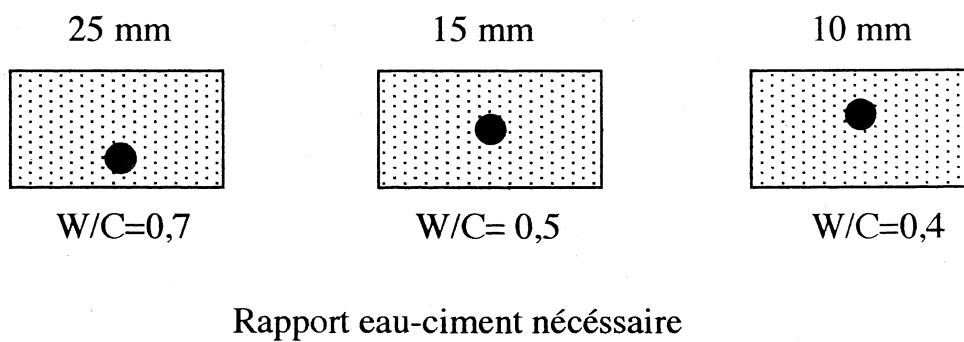


Fig 19 Exemple d'application de la fig. 18. Les trois bétons ont la même durée de vie jusqu'au moment où commence la corrosion de leur armature. [4]

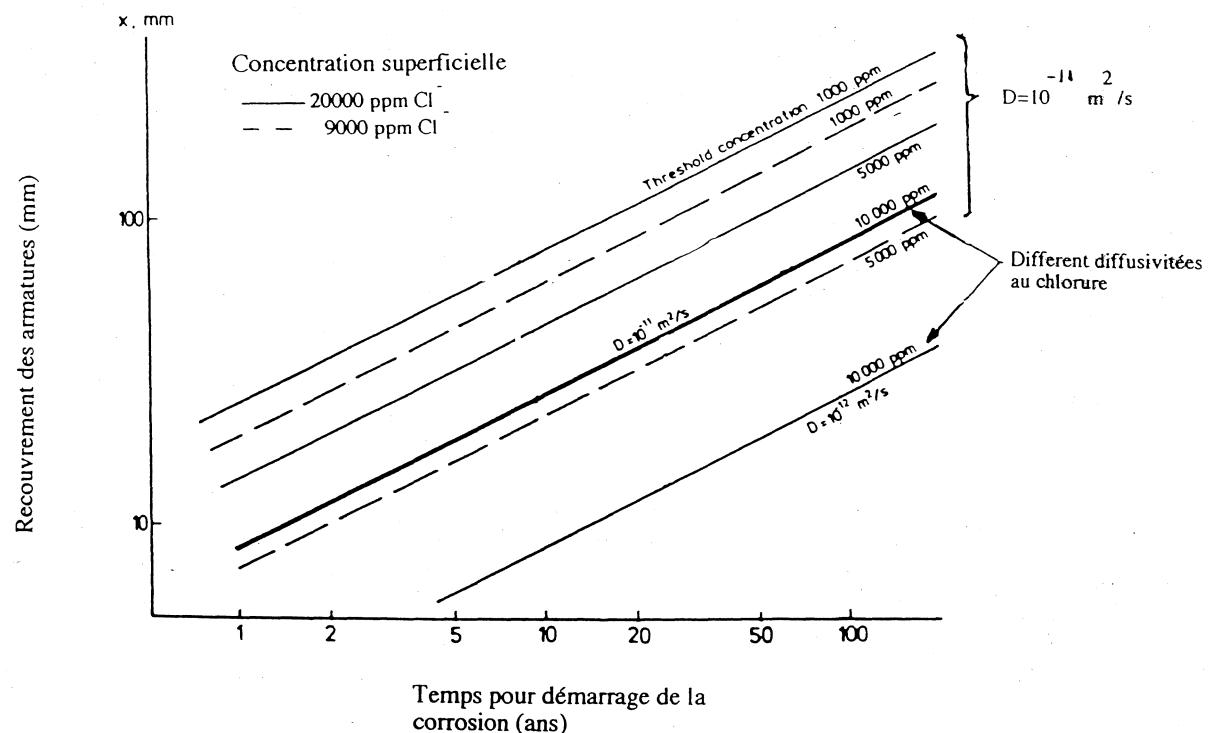
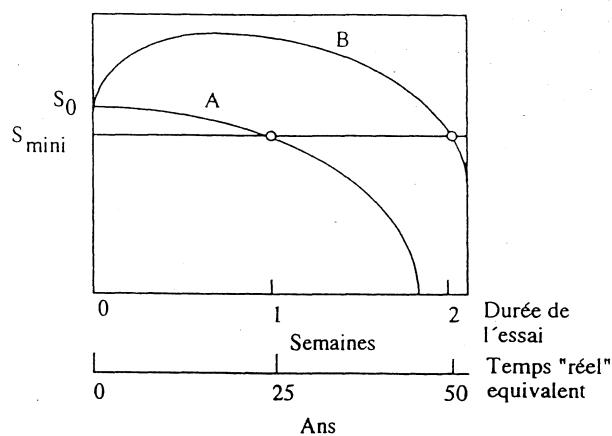


Fig 20 Diagramme de durée de vie d'un béton armé exposé en surface à une solution de chlorures.

a) Echelle de temps: $t_{\text{réel}} = f(t_{\text{essai}})$



b) Modifications des mécanismes

Aptitude au service

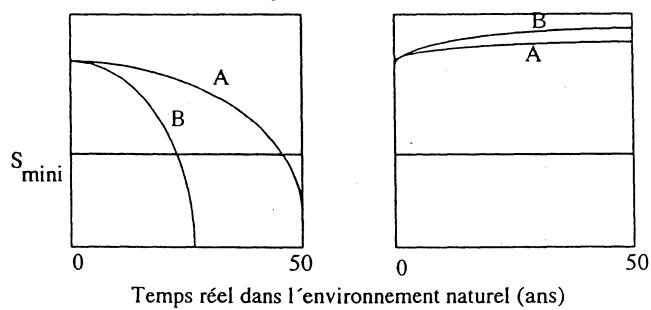


Fig 21 Problèmes inhérents aux essais.

- (a) L'échelle de temps effective est inconnue.
- (b) L'accélération artificielle du processus entraîne une modification du mécanisme de détérioration.

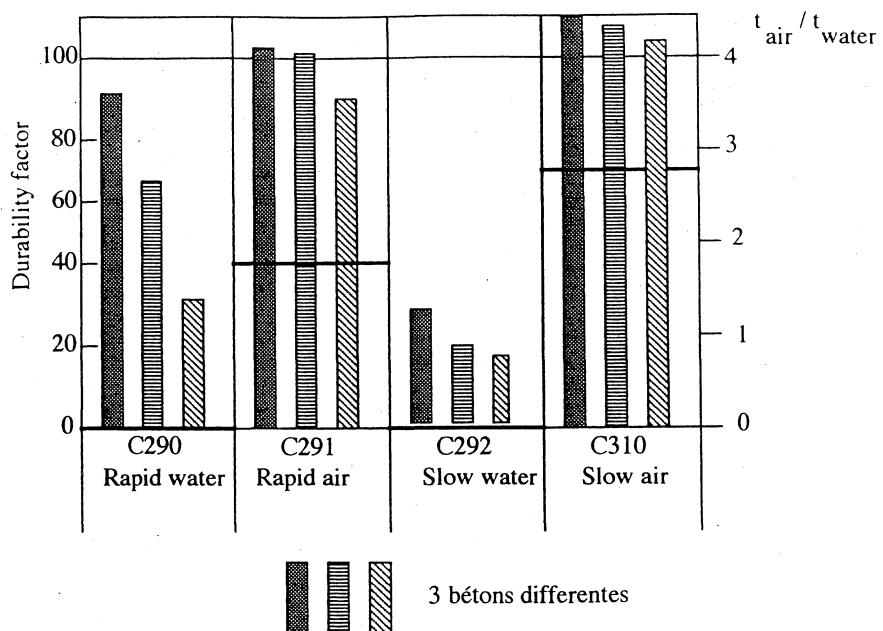


Fig 22 Exemple des difficultés d'interprétation des résultats d'essais accélérés. Essais de trois bétons différents par quatre méthodes d'exposition au gel différentes. [5]

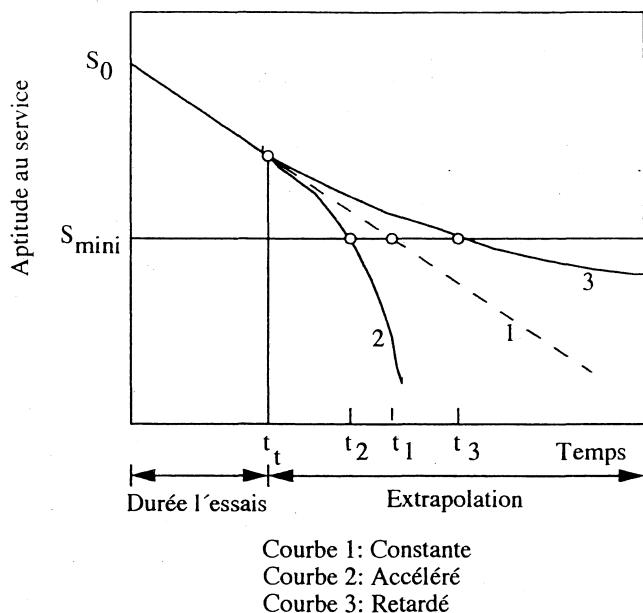


Fig 23 Le problème de l'extrapolation des résultats d'un essai non accéléré.

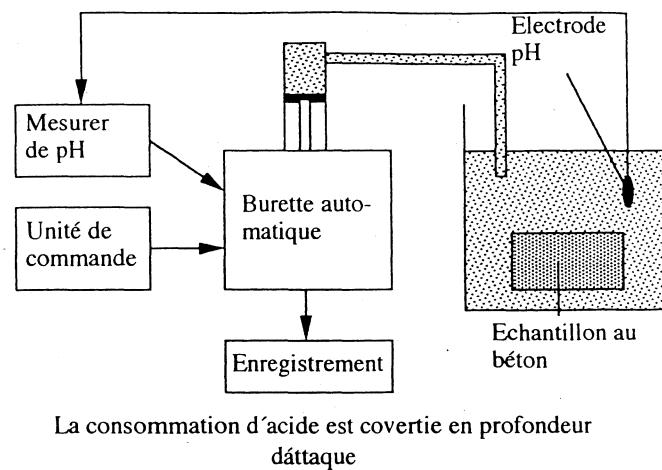


Fig 24 Méthode de Rombén pour les essais de résistance du béton aux acides.

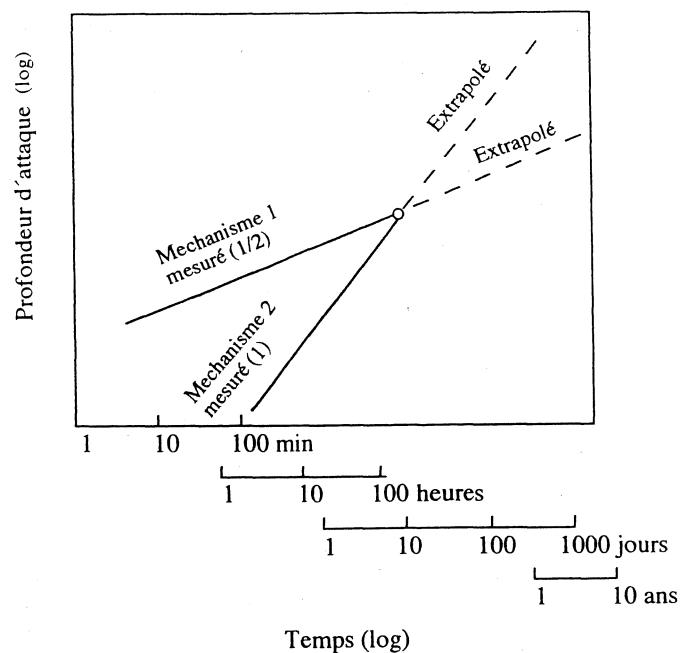


Fig 25 Exemple de mesure par la méthode de Rombén.

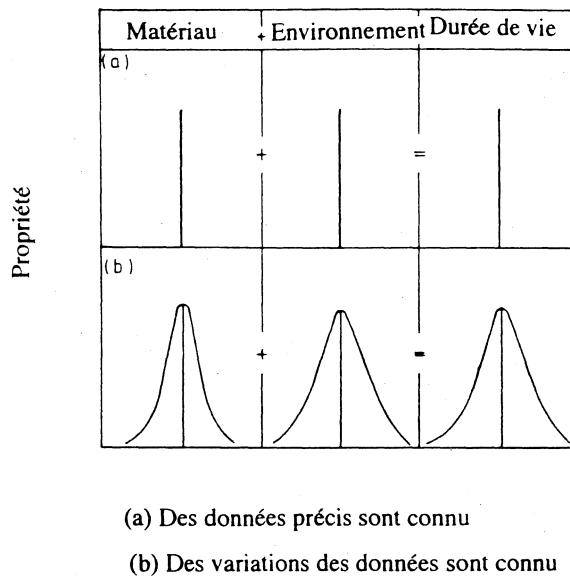


Fig 26 Evaluation de la durée de vie d'une structure particulière.
 (a) Chacune des caractéristiques à prendre en compte au niveau de l'environnement ou des matériaux concernés a une valeur connue.
 (b) Chacune des caractéristiques à prendre en compte a une valeur plus ou moins incertaine.

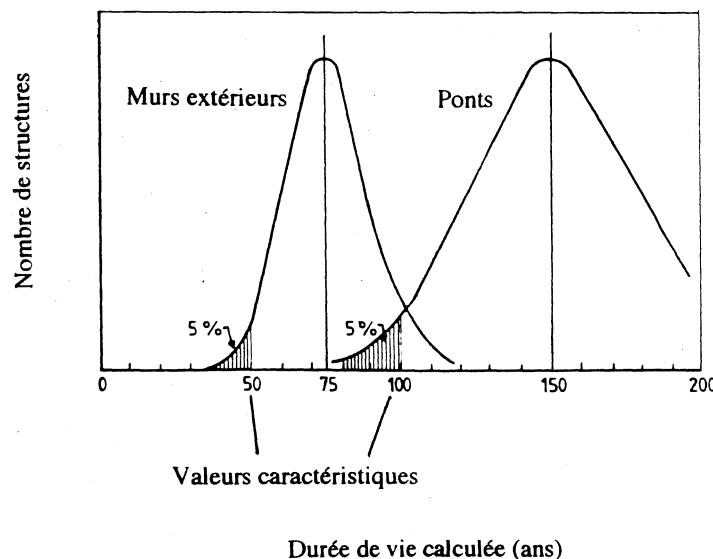


Fig. 27 Evaluation de la durée de vie d'un ensemble d'ouvrages similaires.