

La durabilité du béton

Par Y. Houst, Laboratoire des matériaux de construction de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Après avoir décrit les caractéristiques chimiques et physiques du béton, l'auteur aborde le problème des eaux et des sols agressifs (différents dangers, attaque par les sulfates, confection de bétons résistants aux milieux agressifs) ainsi que la carbonatation du béton et la corrosion des armatures.

La durabilité est une caractéristique essentielle pour les matériaux de construction et les éléments de construction. Cette affirmation sera facilement acceptée par les personnes concernées, tandis que la définition de la durabilité pourra faire l'objet de discussions. Le dictionnaire définit le terme durabilité comme:

a) temps d'utilisation d'un bien (droit) et b) caractère de ce qui est durable. L'évaluation quantitative de la durée d'utilisation d'un matériau ou d'une construction peut être basée sur les expériences passées, mais cette évaluation quantitative est beaucoup plus difficile pour les nouveaux matériaux ou les nouvelles sollicitations qu'ils peuvent subir. Dans le deuxième cas, il faut effectuer des essais accélérés dont les résultats sont difficiles à corréler avec le comportement du matériau dans son environnement réel. Un tel problème se pose pour le béton armé dans des régions industrielles à forte pollution atmosphérique ou en contact avec les sels de déverglaçage.

Dès le début de l'emploi du «béton moderne» au siècle passé, on a été confronté à des problèmes de durabilité: dégradation par certaines eaux naturelles, eau de mer, sels, gel. La durabilité du béton armé ou non, dans des conditions climatiques normales et extrêmes, est devenue un sujet d'intérêt majeur et par conséquent un domaine de recherche largement exploré.

Tous les facteurs de dégradation affectant la durée de service des éléments de construction et des matériaux sont indiqués dans le tableau I. Ce tableau très complet a été établi pour tous les matériaux, mais s'applique également très bien au béton. Après avoir consulté ce tableau, on a naturellement l'impression que le béton doit être très peu durable et qu'il subit des dégradations par tous les facteurs qu'on peut imaginer. A première vue, on peut se demander par exemple qu'elle est l'influence du rayonnement solaire. Il n'y a en effet aucune influence notable sur le béton courant, mais par contre il peut entraîner un changement de teinte des bétons colorés.

Il n'est évidemment pas possible de discuter ici tous les facteurs cités, c'est pourquoi on se limitera à décrire trois types de dégradation qui subissent ou que peuvent subir les bétons de nos régions.

Caractéristiques du béton

Avant de discuter de quelques types de dégradation, il est indispensable

de décrire brièvement les réactions chimiques qui se déroulent lorsque l'on ajoute de l'eau au ciment ainsi que la structure du béton. Le ciment Portland contient essentiellement 4 composés qui sont: deux silicates (tri- et bicalciques), l'aluminate tricalcique et l'aluminoferrite tetracalcique. Ces quatre composés représentent environ 90 % du CP. Lorsque l'on ajoute de l'eau, ces produits s'hydratent.

De manière simplifiée, on peut considérer le béton durci comme un mélange intime de granulats de taille variable et de pâte de ciment constituée d'une substance très fine et poreuse, contenant des silicates et de l'hydroxyde de calcium. Les granulats peuvent être considérés comme inertes, ce n'est cependant pas toujours le cas. C'est donc la pâte de ciment qui joue un rôle essentiel dans la durabilité du béton.

Les eaux et les sols agressifs

Les différents dangers

Les eaux susceptibles d'entrer en contact avec le béton sont essentiellement les eaux naturelles et les eaux usées dans lesquelles on peut trouver à l'état dissous de très nombreux produits chimiques. Dans le tableau II, on a indiqué le degré d'agressivité des eaux naturelles pour le béton en fonction des caractéristiques et des ions dangereux pour le béton. Ce tableau repris de la norme DIN 4030 est valable pour des eaux dormantes ou avec un écoulement faible. Si les eaux sont sous pression ou ont un écoulement rapide ou si la température est élevée, le degré d'agressivité est plus élevé. Le degré d'agressivité est valable même quand seulement une des valeurs est atteinte. Si deux ou plusieurs valeurs sont dans le même domaine, le degré d'agressivité augmente d'un degré.

Le pH d'une eau est une mesure de son acidité. Une eau acide a un pH infé-

Tableau I: Facteurs de dégradation affectant la durée de service d'éléments de construction et des matériaux.

Facteurs d'altération

Radiations solaires, nucléaires et thermiques

Température (élévation, baisse, cycles)

Eaux (solide [telle que neige, glace], liquide [telle que pluie, condensation, eau stagnante], vapeur [telle que humidité relative élevée])

Constituants normaux de l'air (oxygène et ozone, gaz carbonique)

Contaminants de l'air (gaz [tels que oxydes d'azote et de soufre], brouillards [tels que aérosols, sels, acides et bases dissous dans l'eau], particules [telles que sable, poussières])

Gel-dégel

Vent

Facteurs biologiques

Micro-organismes

Algues

Bactéries

Facteurs de contraintes

Contraintes permanentes

Contraintes périodiques (action physique de l'eau, pluie, grêle, neige; action physique du vent; combinaisons de l'action physique de l'eau et du vent; mouvements dus à d'autres facteurs tels que les personnes et les véhicules)

Facteurs d'incompatibilité

Chimiques

Physiques

Facteurs liés à l'utilisation

Conception des systèmes

Procédures d'installation et d'entretien

Usure normale et exceptionnelle

Abus des utilisateurs

rieur à 7, tandis qu'elle est alcaline ou basique lorsqu'il est supérieur à 7. Tous les acides ont une influence néfaste et dangereuse sur le béton. Ils entraînent la dissolution des composés du ciment et de l'hydroxyde de calcium. Les eaux naturelles peuvent contenir, à l'état dissous, du gaz carbonique (CO₂) qui provient de l'atmosphère. Si cet acide n'est pas neutralisé en traversant un sol calcaire, l'eau peut avoir une agressivité élevée. Les granulats calcaires peuvent également être attaqués.

Les ions ammonium et magnésium ont la propriété de se substituer au calcium dans les silicates du ciment, ce qui

Tableau II: Caractéristiques des eaux naturelles définissant le degré d'agressivité

Caractéristique	Degré d'agressivité		
	faible	élevé	très élevé
PH	6.5 à 5.5	5.5 à 4.5	> 4.5
CO ₂ agressif (mg/l) d'après le test au marbre	15 à 30	30 à 60	> 60
Ammonium NH ₄ ⁺ (mg/l)	15 à 30	30 à 60	> 60
Magnésium Mg ²⁺ (mg/l)	100 à 300	300 à 1500	> 1500
Sulfate SO ₄ ⁻⁻⁻ (mg/l)	200 à 600	600 à 3000	> 3000

entraîne une modification de la structure et une perte de résistance mécanique importante. Les sulfates sont particulièrement dangereux pour le béton et comme on les rencontre assez fréquemment dans nos régions, on traitera particulièrement ce problème par la suite.

Tableau III: Caractéristiques des sols définissant leur degré d'agressivité

Caractéristique	Degré d'agressivité	
	faible	élevé
Acidité selon Baumann et Gully	> 20	—
Sulfate, SO ₄ ²⁻ en mg par kg de sel séché à l'air	2000 à 5000	> 5000

Les eaux des égouts peuvent être fortement agressives sans qu'il soit possible de le déterminer par une analyse chimique. En effet, de nombreux déchets contiennent des composés organiques soufrés qui sont transformés par des micro-organismes, puis convertis en acide sulfurique par une bactérie. Cela provoque une très forte corrosion en général dans la zone se trouvant juste au-dessus du niveau moyen. Une telle corrosion se rencontre particulièrement dans les égouts à débit très faible et dans les fosses des stations d'épuration des eaux.

Lors d'une construction et particulièrement pour les fondations, les collecteurs et drainages, il est recommandé de faire analyser les eaux d'infiltration que l'on trouve dans des fouilles.

L'attaque par les sulfates

Nous avons vu plus haut que le ciment est constitué essentiellement de quatre composés. Un de ces composés, l'aluminat tricalcique (C₃A), réagit avec les sulfates en donnant un sulfo-aluminate qu'on appelle ettringite ou encore sel de Candlot. Cette réaction qui entraîne une forte augmentation de volume se produit dans le béton frais par réaction du C₃A avec le gypse présent dans tous les CP pour régulariser la prise et n'entraîne pas de conséquence néfaste pour le béton. Par contre, elle est néfaste si elle se produit dans le béton durci; le gonflement qui accompagne la réaction provoque l'éclatement et la désagrégation du béton. La susceptibilité des ciments à l'attaque par les sulfates est au moins connue depuis le XVIII^{ème} siècle (avant la mise au point du CP actuel!)

Une autre action de destruction des sulfates est à prendre en considération: c'est la cristallisation du gypse, en tant que tel, ou produit à partir d'un sulfate quelconque et de la chaux dans les pores du béton. Dans certaines conditions, la pression de cristallisation ou l'augmentation du volume due à la formation du gypse provoque déjà une désagrégation.

Confection de bétons résistants aux milieux agressifs

Pour obtenir des bétons résistants aux milieux agressifs, on peut, selon le

degré d'agressivité, utiliser des CP courants ou des ciments spéciaux. En Suisse, on ne fabrique qu'un seul ciment spécial augmentant la durabilité en présence de sulfate, c'est le ciment Portland à résistance élevée aux sulfates, CPHS. Les ciments présentant des avantages du point de vue durabilité sur le CP ordinaire sont les suivants:

CPHS

Un moyen pour augmenter la résistance aux sulfates des CP est de remplacer C₃A par C₄AF. La substitution de l'alumine par l'oxyde de fer a été d'abord suggérée par Le Chatelier à la fin du siècle passé. En 1920, Ferrari, en Italie, a produit un ciment avec un rapport A₁2O₃/Fe₂O₃ inférieur à un. Ce ciment est souvent connu en Europe sous le nom de ciment Ferrari. C'est le ciment qui est appelé chez nous ciment Portland à résistance élevée aux sulfates, CPHS. Le clinker est produit en Suisse dans une seule usine. Il est fabriqué avec les mêmes matières premières que le CP, mais avec adjonction d'oxyde de fer (Fe₂O₃). Ce ciment a une bonne résistance aux sulfates, mais il n'est pas invulnérable. Des recherches ont montré depuis longtemps que la résistance des CP aux attaques des sulfates dépend d'abord de la teneur en C₃A, puis ensuite de celle en C₄AF. Ce dernier composé, qui ne réagit que lentement, est susceptible de se décomposer et de donner du C₃A qui peut, à long terme, réagir avec le sulfate. On peut donc dire que plus les teneurs en C₃A et C₄AF sont faibles, meilleure est la tenue du ciment. Ces teneurs ne peuvent pas être trop abaissées, car la cuisson du clinker à relativement basse température exige la présence d'oxyde de fer et d'alumine qui agissent comme fondants.

Ciments pouzzolaniques et de trass

Ces ciments sont un mélange de CP et de pouzzolane ou trass. Les pouz-

zolanes et trass, d'origine volcanique, ont une structure vitreuse et la propriété de réagir avec la chaux et les alcalis pour donner des hydrosilicates et hydroaluminates dont les caractéristiques sont semblables à celles des composés hydratés du CP. Comme ces ciments contiennent une quantité réduite de CP et donc de C₃A, ils ont une résistance accrue aux sulfates.

Ciment de haut-fourneau

Ce ciment est obtenu par mélange homogène de laitier basique de haut-fourneau et de CP. L'adjonction de laitier varie de quelques pourcents à plus de 85 %. Dans ce dernier cas, on parle de ciment permétallurgique ou de laitier au clinker Portland. Par l'adjonction de laitier on diminue également la teneur en C₃A et C₄AF du ciment et ces ciments ont par conséquent une bonne tenue aux sulfates.

Ciment Fouilloux

Ce ciment est obtenu par mélange de clinker de CPHS, de laitier et de pouzzolane. Il réunit donc les avantages de ces trois ciments. Le ciment Fouilloux à durcissement lent est à peu près indestructible et convient particulièrement aux milieux fortement et même à certains milieux très fortement agressifs.

Les noms des ciments peuvent varier selon leur pays d'origine. Le tableau IV permet de choisir le type de ciment à employer en fonction du degré d'agressivité en présence de résultats. Sur le plan international, il n'y a pas de règles admises par tous. Cela provient essentiellement des usages locaux et des différences de propriétés des ciments fabriqués. Toutefois, nous avons tenté de faire une synthèse des différentes tendances.

Pour les travaux en milieu fortement agressif par des substances autres que les sulfates, il faut employer des bétons très compacts avec des ciments de haut-

Tableau IV: Ciment à choisir en fonction du degré d'agressivité des eaux et des sols

Degré d'agressivité	Concentration en sulfates		Type de ciment
	dans le sol mg SO ₄ ²⁻ par kg de sol séché à l'air	dans l'eau mg SO ₄ ²⁻ /litre	
négligeable	< 2000	< 200	CP ordinaire
faible	2000 à 5000	200 à 600	CPHS ciment pouzzolanique, de haut-fourneau (35 à 85 % laitier)
fort	plus de 5000	600 à 3000	CPHS ciment de haut- fourneau (plus de 70 % laitier)
très fort	—	plus de 3000	ciment permétallur- gique, Fouilloux

Des exigences quant à la perméabilité à l'eau du béton, au rapport E/C, de la résistance et du type de protection éventuelle sont également à prendre en considération.

Pour des conditions sévères (par exemple sections minces, sections soumises à une pression hydrostatique d'un seul côté, sections partiellement immergées), il faudra réduire le rapport eau-ciment E/C et augmenter le dosage en ciment s'il est nécessaire d'améliorer la maniabilité du béton pour assurer un parfait compactage et une perméabilité minimum du béton.

fourneau (plus de 80 % de laitier) ou du ciment Fouilloux. En milieu très fortement agressif, il faut absolument éviter tout contact du béton avec les eaux agressives. Pour cela, on réalisera une étanchéité complète.

Le choix d'un ciment approprié n'est pas suffisant pour obtenir un béton résistant en milieu agressif; il est essentiel qu'il soit compact et imperméable. En effet, il ne faut en aucun cas faciliter la pénétration de l'eau qui véhicule les agents agressifs à l'intérieur du béton. Ces règles sont donc valables pour la confection de tous les bétons en contact avec des eaux agressives. Les granulats sont généralement plus compacts et moins perméables que la pâte de ciment durcie. Il faut donc s'efforcer de réduire d'une part la quantité de pâte liante utilisée et d'autre part la porosité de la pâte liante elle-même.

Examinons d'abord la question de la réduction de la quantité de la pâte liante. C'est le problème de la composition granulométrique du béton. Pour obtenir un béton compact, il est indispensable que les granulats aient une composition granulométrique appropriée. Il ne suffit pas d'effectuer au début du chantier une étude de composition, il faut encore contrôler que la composition prescrite soit effectivement réalisée pendant toute la durée du chantier. Il est presque indispensable de disposer d'au moins trois composants: sable fin, sable grossier et gravier bien lavés.

Considérons maintenant la composition de la pâte liante. La quantité d'eau strictement nécessaire pour l'hydratation purement chimique du ciment Portland est de l'ordre de 20 % du poids du ciment, mais ces réactions ne peuvent pas avoir lieu si les produits d'hydratation ne forment pas un gel dans lequel se trouve une quantité d'eau absorbée, physiquement liée, égale elle aussi, à 20 % environ du poids du ciment. Cela signifie que, si l'on veut que toute l'eau de gâchage ait théoriquement la possibilité de se fixer en partie chimiquement et en partie physiquement au ciment, il faut que le rapport eau sur ciment, E/C, soit inférieur ou égal à 0.4.

Avec les dosages courants en ciment de 300 kg/m³ et en eau de 160 à 180 l/m³, les rapports E/C sont de l'ordre de 0.53 à 0.60. On est donc bien loin du rapport E/C idéal de 0.40. L'eau en excès produit des vides capillaires dont les dimensions sont de 100 à 1000 fois supérieures à celles des pores qui se forment à l'intérieur du gel au moment de l'hydratation du ciment. Si cela n'est pas trop gênant pour les bétons courants, ça l'est beaucoup plus pour les bétons exposés à l'action des eaux agressives, car la présence des vides capillaires rend le béton perméable. Il est donc essentiel de réduire le pourcentage de ces vides, ce qui signifie que le rapport E/C doit être voisin de 0.4. Comme on ne peut pas réduire trop la quantité d'eau, car il faut que le béton conserve une maniabilité satisfaisante, il est nécessaire d'augmenter le dosage en ciment jusque vers 400 kg/m³ environ.

Carbonatation du béton et corrosion des armatures

Comme nous l'avons vu, l'hydratation du ciment libère de l'hydroxyde de calcium, Ca(OH)₂. Cette substance confère à l'eau qui se trouve dans les pores un pH élevé, d'environ 12.5 à 13.5. Dans un tel milieu, l'acier d'armatures se recouvre d'une couche d'oxyde très mince qui protège l'acier de la corrosion. On appelle cette protection de l'acier passivation. L'acier n'est plus passivé et donc protégé lorsque le pH baisse jusqu'à une valeur de 9 environ. La vitesse de corrosion de l'acier en fonction du pH est représentée schématiquement à la figure 1. La zone ombrée représente le domaine où la corrosion est sensible.

L'atmosphère contient actuellement 0.333 ml de gaz carbonique, CO₂ par litre d'air et augmente d'environ 0.0015 ml/litre par année. C'est la conséquence de la combustion de carburants fossiles (mazout, essence, charbon). Au contact du gaz carbonique de l'air, l'hydroxyde de calcium présent dans le béton réagit en formant du carbonate de calcium (calcaire). Cette réaction entraîne une baisse du pH de l'eau des pores et permet donc une corrosion sensible.

La carbonatation du béton est un phénomène lent. La vitesse de carbonatation dépend de nombreux facteurs tels que: compacité, dosage en ciment, type de ciment, teneur en eau du béton, degré d'hydratation du ciment, concentration du gaz carbonique dans l'air. Plus le béton est compact et a un dosage en ciment élevé, plus la vitesse de carbonatation est lente. Plus la teneur en gaz carbonique de l'air est élevée, plus la vitesse de carbonatation est élevée.

En première approximation, on peut admettre que la profondeur de carbonatation, d est proportionnelle à $\sqrt{\text{temps}}$, on a donc la relation: $d = A \sqrt{t}$ où A est une constante. On peut évaluer cette constante pour un béton d'un certain âge en mesurant la profondeur de carbonatation et en sachant le temps pendant le-

quel il a été exposé. La valeur de A dépend de la qualité du béton et du climat auquel il a été exposé (à la pluie ou à l'abri, etc.).

La profondeur de carbonatation peut être mesurée sur place d'une façon simple au moyen d'un indicateur de pH approprié. Pour cela, il faut au moyen d'un burin par exemple enlever des éclats de béton sur une certaine profondeur, éliminer la poussière, et pulvériser une solution de phénolphaléine. Le béton non carbonaté se colorera en rouge, tandis que le béton carbonaté ne changera pas de couleur.

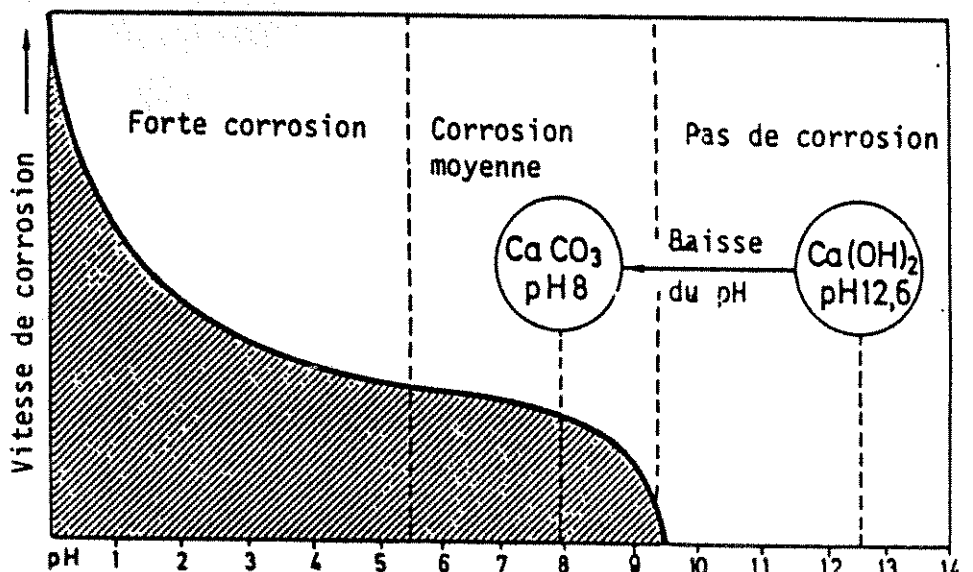
Sur un ouvrage dont on veut connaître la profondeur de carbonatation, il faut effectuer de nombreuses mesures pour déterminer la profondeur moyenne et surtout les profondeurs extrêmes. En effet, ces dernières valeurs sont très importantes, car c'est souvent dans les zones défectueuses où la carbonatation est la plus profonde et souvent il suffit que les armatures soient corrodées dans une zone limitée pour que l'ouvrage présente des dangers.

De façon schématique, on peut considérer deux périodes pour la corrosion des armatures:

- une période d'initiation pendant laquelle le béton se carbonate
- une période de propagation pendant laquelle l'acier se corrode jusqu'à ce que les barres d'armatures soient diminuées à un diamètre inadmissible.

On a déjà vu de quels facteurs dépend la période d'initiation. La période de corrosion proprement dite dépend essentiellement de l'oxygène présent pour que l'oxydation de l'acier se produise, de l'humidité et de la température. Une armature dans un béton relativement sec ne se corrodera que très lentement alors qu'elle se corrodera beaucoup plus vite dans un béton plus humide et à température élevée. On voit donc que la carbonatation du béton n'est pas une condition suffisante pour que l'armature se corrode.

Figure 1: Vitesse de corrosion en fonction du pH environnant.



L'oxydation du fer entraîne une très forte augmentation de volume (jusqu'à 2.5 fois) et la formation de rouille exerce une forte pression sur le béton entourant l'armature. Cette pression est souvent suffisante pour provoquer l'éclatement du béton superficiel et cela d'autant plus facilement de la couverture des armatures est faible.

La couche protectrice passivant l'acier est détruite en présence de chlorures. L'addition de chlorures est interdite dans le béton armé, mais l'emploi généralisé de sels de déverglaçage permet fréquemment la pénétration des solutions salines dans le béton. Sitôt que les chlorures entrent en contact avec l'acier, on peut avoir une forte corrosion même dans un béton non carbonaté. Le ciment est susceptible de fixer une certaine quantité de chlorures qui dépend de la teneur en C_3A du ciment. On admet en général que le béton armé doit contenir une teneur en chlorure (Cl^-) inférieure à 0.4 %, calculée par rapport au ciment (0.4 kg de chlorure pour 100 kg de ciment).

Les chlorures et même du chlore peuvent être libérés par la combustion de matières plastiques (PVC) lors des incendies. Dans ce cas, il est prudent d'effectuer des analyses du béton pour déterminer sa teneur en chlorures pour décider si l'on peut conserver le béton ou non.

La fissuration du béton joue bien sûr un rôle important pour la corrosion des armatures, car les fissures diminuent localement la couche protectrice du béton. Les conditions et les facteurs régissant la corrosion des armatures sont représentés schématiquement à la figure 2.

Pour protéger l'acier de la corrosion, il faut absolument que la couverture du béton soit suffisante. La norme SIA 162 prévoit à l'article 3.28 que la couverture doit être de 1.5 cm au moins pour les constructions à l'abri des intempéries et de 2.5 cm si elles ne sont pas à l'abri. Le recouvrement est à augmenter jusqu'à un maximum de 5 cm dans les milieux agressifs. Rappelons que pour un même béton le temps pour la carbonatation et les chlorures atteignant une armature située à 4 cm de la surface sera quatre fois plus long que pour une armature située à 2 cm. On constate malheureusement trop souvent que sur ce plan les normes ne sont pas respectées et que de nombreux ouvrages se dégradent déjà quelques années après leur construction.

La durabilité des constructions peut être augmentée, comme on l'a vu, par une couverture des armatures plus importante. On peut également, pour les constructions très exposées, protéger le béton au moyen de résines synthétiques, bitumes ou enduits. Les bétons dégradés peuvent être réparés en reconstituant la couverture en béton. Dans ce cas il faut en général enlever toutes les parties dégradées ou celles contenant des chlorures, nettoyer soigneusement les armatures ou les remplacer quand c'est possi-

ble. On peut alors reconstituer la couverture par exemple par un micro-béton projeté, des mortiers de résines ou des mortiers à base de liants hydrauliques.

Conclusions

Les matériaux de construction et particulièrement le béton peuvent être attaqués par de nombreux agents agressifs et altérés par des facteurs liés à l'environnement et au climat. Le béton est particulièrement sensible, car c'est un matériau poreux dans lequel les substances agressives peuvent migrer facilement et c'est aussi un matériau peu stable. En effet, l'hydratation du ciment amène à la formation de composés essentiellement non cristallins qui vont subir des modifications constantes pendant leur vie. La durabilité du béton augmente, comme les performances mécaniques, avec la compacité. Il est donc essentiel, pour obtenir des bétons durables, de contrôler soigneusement la production, la mise en œuvre et la cure du béton.

De nombreux dégâts sont constatés régulièrement et même actuellement en Suisse sur des ponts d'autoroutes. Les dégâts qui surviennent moins de vingt ans après la construction sont pratiquement toujours dus à une conception erronée et/ou à de graves défauts de mise en œuvre du béton. Le niveau des

connaissances est en principe suffisant pour éviter des problèmes graves.

La durabilité du béton à long terme est un problème important, et ce n'est que récemment qu'on s'en est préoccupé.

Lors de toute construction importante, il est souhaitable de penser à la durabilité. On peut l'améliorer souvent par des méthodes constructives n'entraînant pas de coût supplémentaire et même prévoir des protections faciles à remplacer. Pour des constructions récentes, on a réalisé des enduits de protection contre la carbonatation et les chlorures qui peuvent être remplacés facilement lorsqu'ils sont dégradés.

Le coût d'entretien des constructions et des structures devrait être établi et comparé pour les différentes variantes au niveau des projets. On évitera ainsi souvent de choisir une solution économique lors de la construction mais non pour l'entretien.

Bibliographie: Parmi les ouvrages en langue française, on pourra particulièrement consulter: M. Duriez et J. Arrambide, Nouveau traité des matériaux de constructions, Dunod, Paris, 2ème édition (1962), 3 volumes. M. Venuat, La pratique des ciments et des bétons, Editions du Moniteur, Paris (1976). M. Adam, Guide pratique pour l'emploi des ciments, Eyrolles, Paris (nouvelles éditions fréquentes).

Figure 2: Corrosion de l'acier dans le béton. Conditions et relations.

