

CAMPUS, Ferdinand, I.C.C. & El.
Université de Liège (Belgique).

Le béton de protection des armatures.
Concrete protecting the reinforcement.

Résumé

La présente contribution analyse l'état spécial du béton protégeant les armatures contre la corrosion et les manières dont cette protection peut être mise en défaut. Elle résume les dispositions nécessaires pour assurer au mieux la protection des armatures par le béton et donne quelques indications sur les réparations des dégradations.

Summary

This paper analyses the special condition of the concrete protecting the reinforcement against corrosion and the ways in which this protection may fail. It summarizes the dispositions fit to assure the best protection of the reinforcement by the concrete and ends with some indications on the repair of defects.

I. Le Rapport du Colloque du Comité technique R.I.L.E.M. sur la corrosion des armatures du béton armé (1), tenu à Slough (Gr.-Br.) en septembre 1965 sous la présidence du Prof. C.A. LOBRY de BRUYN, (publié par la Cement and Concrete Association de Londres), présente un exposé complet de l'état de la question de la corrosion des armatures. La protection par le béton y est envisagée surtout du point de vue chimique, en rapport avec la chimie de la corrosion. La question de la carbonatation du béton a été largement traitée, parce que cette carbonatation altère l'alcalinité du béton, laquelle constitue une ambiance chimique anticorrosive. Il n'en résulte cependant pas que le béton carbonaté ne constitue plus une protection de l'armature contre la corrosion. Pour que celle-ci se produise, il faut nécessairement que de l'oxygène et de l'eau, éventuellement accompagnés d'autres agents agressifs, aient accès aux armatures par des vides initiaux ou produits

en service et qui permettent l'établissement de zones anodiques et cathodiques par aération différentielle. Cela n'est pas en principe une conséquence de la carbonatation qui peut être plutôt un phénomène concomitant. La constatation que l'on trouve dans le rapport précité que de fortes corrosions sont souvent accompagnées de fortes carbonatations ne peut pas être interprétée comme une preuve que la corrosion est la conséquence de la carbonatation. Elle signifie en réalité que le béton a permis un accès important des agents de corrosion de l'acier autant que des agents de carbonatation, qui en sont inséparables. Il en résulte que la protection des armatures par leur couverture de béton dépend entièrement et uniquement de la manière dont celui-ci retarde ou empêche l'accès des agents corrodants.

Cette protection dépend donc totalement de la continuité du béton couvrant l'armature, c'est-à-dire de sa composition nominale, de la qualité de sa mise en oeuvre sans vides et du parfait enrobage des armatures sans solutions de continuité. Ceci suppose que les composants du béton soient non seulement inaltérables, mais aussi impénétrables, ce qui n'est pas le cas de certains granulats légers. Mais on ne peut pas, à propos de cette protection considérer le béton comme une matière spécifique, dont les qualités sont indépendantes de la présence des armatures. D'après les dispositions de ces armatures les unes par rapport aux autres et par rapport aux parois de coffrage, le béton de couverture peut avoir une composition, des qualités et un état très variables et plus ou moins différents du béton interne, distant des armatures.

II. Les armatures sont généralement voisines des surfaces et entr'elles. Les parois de coffrage et, dans une moindre mesure qui dépend du rapport du diamètre des armatures à la grosseur des granulats, les surfaces des armatures donnent lieu à des effets de paroi, c'est-à-dire à une augmentation des éléments fins, donc du mortier. Ce n'est pas le seul effet géométrique. Si la distance des barres entre

elles et aux parois est inférieure à la dimension des gros granulats, ceux-ci seront nécessairement absents de la couverture en béton, puisqu'ils ne peuvent y trouver place géométriquement, indépendamment de tout criblage et de toute compaction. Le béton de couverture sera alors entièrement différent de la composition nominale, beaucoup plus fin et plus riche en mortier, d'autant plus que les écartements des barres entr'elles et aux coffrages seront plus faibles par rapport aux dimensions des gros granulats.

Lors de la mise en place du béton dans les coffrages, surtout si elle est faite perpendiculairement aux armatures, celles-ci vont produire un criblage du béton, d'autant plus que les barres sont plus rapprochées entr'elles et des parois et qu'elles sont plus grosses. Car dans un crible, les pleins sont à considérer autant que les vides, surtout lorsqu'il s'agit comme dans ce cas d'un criblage unique et non répété. La pervibration du béton au voisinage des armatures peut atténuer cet effet de criblage, mais non l'annuler. Il est naturellement d'autant plus important que les granulats sont plus gros.

Il est très important que la mise en place du béton et son compactage ne dérangent pas les armatures, ce qui en général aurait pour effet de rapprocher certaines entr'elles ou des parois; cela aggraverait les phénomènes exposés et diminuerait la couverture des armatures. Cependant, il faut que le compactage soit suffisant pour que le béton le plus dense possible enrobe parfaitement toutes les armatures, sans solutions de continuité. Comme les armatures ne permettent pas un compactage énergétique, il faut donc mettre en oeuvre pour le béton armé une composition susceptible d'un compactage d'autant plus facile que l'armature rend le bétonnage plus difficile : armatures serrées, très enchevêtrées, éventuellement de gros diamètre. Au Colloque de Slough, on a rappelé des cas de fortes corrosions d'armatures dues à l'emploi de bétons difficiles à compacter et ayant, pour cette raison, mal enrobé les armatures. Ce n'est pas une nouveauté de constater que la composition du béton pour béton armé doit être adaptée à la construction selon les difficultés du bétonnage qu'elle présente. C'est le principe des granularités de FAURY (2). Indépendamment d'une

telle granularité, on peut constater que le béton d'un élément de béton armé doit être d'autant moins riche en gros granulats et plus riche en mortier que l'enrobage des armatures présente plus de difficulté. En principe, il serait avantageux d'employer un tel béton pour les fonds de coffrage, seulement pour la couverture des armatures, le restant de l'élément étant fait d'un béton contenant plus de gros granulats. Mais cette pratique est incompatible avec l'organisation économique des chantiers et elle présenterait d'autres inconvénients évidents.

Néanmoins, on doit constater que le mortier du béton aura d'autant plus d'importance pour la couverture des armatures qu'elles seront plus serrées, plus voisines des coffrages, plus grosses et plus enchevêtrées et ce en rapport avec la dimension des plus grands granulats. Pour pallier ces effets géométriques, il suffit que l'espacement des barres entre elles et aux parois de coffrage soit au moins égal à la dimension des plus gros granulats. Pour pallier les effets du criblage et de la difficulté de compaction, il faut que ces intervalles soient supérieurs à ce calibre maximum et au diamètre des barres, dans une proportion d'autant plus grande que la protection des armatures par le béton est plus exposée.

C'est la base des recommandations pratiques du C.E.B. en la matière. Si elles partent à juste titre du principe que la qualité du béton de couverture importe plus que son épaisseur, cela implique que cette épaisseur soit suffisante pour permettre la confection d'une couverture en béton de qualité convenable pour assurer la protection requise, cependant qu'aucune épaisseur, même grande, n'assure de protection si le béton est intrinsèquement de mauvaise qualité. Il est à remarquer que si le bétonnage et le compactage se font parallèlement aux armatures, les facteurs géométriques subsistent, mais le criblage et la difficulté de compactage peuvent être fortement réduits.

On sait que le béton durci est soumis à des tensions propres dues aux divers retraits qui l'affectent. Il s'agit du retrait initial de dessiccation (ou retrait plastique), qui agit surtout aux surfaces libres, du retrait thermo-hygométrique, du retrait de carbonatation (également superficiel), des

dilatations thermiques, éventuellement des effets du gel. Ces effets ne sont pas homogènes ni uniformes, mais généralement plus importants dans les couches superficielles, donc notamment dans la couverture des armatures. Ces effets peuvent engendrer des micro-fissures (3) dans le mortier entre les gros granulats. Le gel peut produire le cas échéant des défauts plus graves. Enfin, les armatures elles-mêmes s'opposent aux retraits et produisent de ce fait des tensions de traction normales aux plans diamétraux des barres, maxima au contact de celles-ci et décroissent rapidement avec la distance relative par rapport au diamètre. Si le retrait est assez grand, si l'épaisseur de la couverture est faible par rapport au diamètre de la barre et si l'allongement de rupture par traction du béton n'est pas supérieur au retrait, il peut en résulter des fissures diamétrales parallèles aux armatures et pénétrant jusqu'à leur contact. Ces fissures sont ouvertes et permanentes; elles permettent l'accès de l'air et de l'eau aux armatures suivant une génératrice. Le reste de l'armature restant protégé, les conditions sont établies pour une corrosion progressive.

Même si cet état de tension ne produit pas de fissure, même s'il est atténué par une éventuelle plasticité (relaxation), il est toujours présent. Il peut donc s'ajouter à d'autres causes éventuelles dans la génération des fissures longitudinales. Or, ce sont les plus nocives.

Il est à remarquer que le phénomène est amplifié par la qualité du béton de couverture. Il est en effet d'autant plus vif que la couverture est relativement moins épaisse. C'est aussi dans ce cas que le béton de couverture est le plus modifié, le plus riche en mortier et que son retrait est le plus grand, ce qui augmente les tensions. C'est l'inverse si l'épaisseur de couverture est grande. Elle ne devrait pas être inférieure au diamètre des barres et de préférence au double pour les cas importants de protection.

Lorsque l'on considère la protection des armatures par le béton, il est nécessaire de tenir compte des conditions particulières de ce béton analysées ci-dessus. L'accroissement

de dimension de la couverture n'agit pas en tant que tel et seulement si le béton est de bonne qualité et mis en oeuvre avec soin, mais une épaisseur suffisante de couverture est précisément nécessaire pour permettre une bonne mise en oeuvre et améliorer la qualité et l'état de ce béton. Ceci conduit à la notion fondée d'une protection assurée par une épaisseur de couverture non excessive mais suffisante pour permettre de lui donner la qualité requise par les recommandations pratiques du C.E.B.

III. Si les conditions précitées sont satisfaites, il semble que dans la plupart des cas la couverture en béton doit assurer la protection des armatures contre la corrosion. Or, l'expérience banale et les enquêtes montrent que la corrosion des armatures est la cause la plus commune et la plus fréquente des dégradations des ouvrages.

Les processus de défaut de la protection des armatures par le béton sont divers selon les conditions d'agression et l'état du béton. On peut les ramener principalement aux types suivants qui sont rappelés brièvement ci-après (5) et qui sont souvent combinés.

- a) Corrosion de la couverture en béton. Se produit sous l'action prolongée d'un milieu agressif (attaque marine) ou sous l'effet assez rapide d'un agent agressif très fort (effluents acides d'une usine de décapage), sur un béton de couverture sans défauts et d'excellente qualité. Dans le cas des attaques les plus vives, aucun béton ne peut résister et il faut le protéger lui-même. Dans le cas d'une action prolongée, un ciment résistant à cette action peut éviter les dégradations.
- b) Pénétration des agents agressifs à travers le béton jusqu'aux armatures. C'est la cause la plus fréquente de corrosion des armatures, dues aux défauts de la couverture en béton, de mauvaise qualité ou trop mince ou affectée de défauts macroscopiques. On sait que la corrosion de l'armature sous la couverture en béton est progressive et que le foisonnement de la rouille produit des fissurations longitudinales, parallèles aux armatures, et qui peuvent

provoquer le détachement d'éclats longitudinaux du béton de couverture, mettant ainsi l'armature à nu. Le risque existe que la fréquence de ce processus augmente en raison de la tendance actuelle de l'évolution du béton armé vers des bétons moins résistants, contenant moins de ciment. Le souci de la durabilité des constructions peut donc requérir des bétons de meilleure qualité que celle qu'exige leur résistance. L'emploi de granulats légers poreux entraîne aussi un risque accru de corrosion des armatures par ce processus. L'accroissement d'épaisseur de la couverture en béton recommandé dans ce cas ne peut être efficace que si le béton contient une quantité si abondante de mortier de haute qualité qu'il peut enrober largement tous les granulats poreux et en quelque sorte les sceller. Il en résultera une diminution de l'allègement.

- c) Fissuration préalable du béton parallèlement aux armatures. La fréquence de ce processus est difficile à établir, mais il existe. La fissuration sous l'effet des tensions dues à l'empêchement de retrait par les armatures a été constatée. (6). L'auteur a rencontré des cas peu nombreux de fissures parallèles à des armatures ne portant aucune trace de corrosion. Mais en général lorsqu'une corrosion est établie, il est difficile de distinguer ce processus du précédent b. Il est peut-être masqué par celui-ci. Si c'est le processus b qui est initial, l'existence des tensions dans le béton a certes facilité la fissuration due au foisonnement de la rouille. Le processus c peut être évité par une épaisseur suffisante de recouvrement en proportion du diamètre des barres.
- d) Fissures normales aux armatures, provenant des liaisons et des sollicitations mécaniques. On n'a pas pu établir de preuves de la nocivité fréquente des fissures normales aux armatures produites par déformations des éléments de construction en service. Des expériences de laboratoires assez particulières ont pu engendrer par ce moyen des corrosions peu étendues. M. L. CARPENTIER a confirmé au Colloque de Slough par des observations plus récentes celles qu'il avait présentées déjà au Colloque R.I.L.E.M. sur l'adhérence et la

formation de fissures dans le béton armé (Stockholm 1957) (7). Il en résulte qu'il n'est pas possible de conclure dans quelles mesures de fortes fissures transversales exposées à des agents corrosifs donneront lieu à des corrosions étendues. Elles n'en sont pas moins indésirables.

Il est à remarquer que si la carbonatation ne figure pas parmi ces processus de corrosion, c'est qu'il accompagne éventuellement certains d'entre eux, surtout le cas b.

IV. Ce qui précède permet de croire qu'une bonne et durable protection des armatures par le béton de couverture peut être réalisée si les conditions suivantes sont satisfaites.

1. Le béton aura une composition rationnellement appropriée aux circonstances : forme et dimensions de l'élément, importance et disposition des armatures, conditions de bétonnage et de compactage, agressivité de l'ambiance. Ceci déterminera le rapport du volume de mortier à celui des gros granulats, d'autant plus grand que le bétonnage de la couverture des armatures est plus difficile, et la consistance du béton qui ne dépend pas seulement du facteur eau/ciment, mais aussi de la composition. Il est à remarquer que pour une consistance définie, une faible valeur de E/C demande une assez grande quantité de ciment, qui est finalement le protecteur principal de l'armature. Pour certains agents agressifs définis (tels que les sulfates ou l'eau de mer), il faut recourir à des ciments qui résistent à ces agents, même s'ils sont moins alcalins que le ciment portland.

2. Le facteur eau/ciment sera aussi faible que l'autorisent les circonstances, tout en permettant un parfait enrobage des armatures. L'eau en excès augmente non seulement la porosité du béton durci, mais donne lieu à des pores ouverts d'assez grandes dimensions qui augmentent l'absorption et la perméabilité du béton.

3. Le béton de couverture des armatures est enrichi en mortier d'une manière relativement considérable s'il est peu épais, moins s'il est assez épais. La porosité d'ensemble en volume en est accrue, non sur la porosité locale, qui est celle du mortier. La valeur de E/C du mortier est la même que celle du

béton. Si elle est assez faible et que le mortier est bien plein, c'est-à-dire s'il contient assez de ciment, la protection des armatures sera assurée si l'enrobage est parfait.

4. Le béton de couverture doit être protégé pendant un temps suffisant contre toute dessiccation rapide par la chaleur et contre le gel, selon les conditions climatériques. Etant éventuellement plus riche en mortier, le béton de couverture est exposé à un plus grand retrait. Pour en atténuer les effets, il est utile d'empêcher la dessiccation du béton de couverture et même à l'humecter pendant un temps assez long selon le climat.

5. Il faudra s'efforcer de donner au béton de couverture une épaisseur assez grande, en rapport avec la grosseur des granulats, l'écartement des barres et leur diamètre, enfin la sévérité des conditions d'ambiance. Les recommandations pratiques du C.E.B. donnent à ce sujet des indications minimales et peuvent servir de guide.

V. Si les dégradations du béton armé par corrosion des armatures sont fréquentes, elles ne sont généralement pas dangereuses, car elles se manifestent assez tôt. Il est fait abstraction à ce sujet du béton pré-ou postcontraint. En outre, les dégradations des éléments en béton armé par corrosion des armatures sont réparables d'une manière plus ou moins simple et plus ou moins coûteuse selon les cas. La qualité de la couverture en béton des armatures ne concerne donc guère la sécurité, mais surtout l'aspect et l'entretien, c'est-à-dire l'économie. Un entretien diligent est plus économique. Il sera relatif à des dégradations isolées, peu étendues et consistera en décapage et application d'un micro-béton de qualité. Celle-ci sera éventuellement précédée d'un badigeon de résine appropriée, ou le micro-béton sera additionné de résine. La réparation au moyen de béton de résine, coûteuse et qui exige d'être faite à bon escient, sera réservée à des cas spéciaux.

En cas d'agression forte et prolongée, les dégradations peuvent être assez étendues, mais générales. Des enduits généraux de micro-béton après décapage demandent des précau-

tions spéciales d'adhérence : chevilles métalliques, treillis léger, enduit de résine. Il est des cas où cela ne suffira pas et où il faudra, après décapage profond, envelopper les éléments dégradés d'un véritable manchon de béton mis en place dans un coffrage (P. ex. piles d'un pier en mer sur la hauteur du marnage). L'auteur a présidé à l'enveloppement complet par du béton neuf de haute qualité d'un grand nombre de poutres paraboliques extérieures d'assez grande portée, qui supportaient la toiture en sheds d'une importante usine. Ces poutres, dont la qualité du béton initial laissait à désirer et qui étaient assez fortement armées, étaient entièrement dégradées. Toutes les armatures étaient dénudées et corrodées à la fin de la dernière guerre et le béton voisin décomposé par les intempéries après une quinzaine d'années de service dans une atmosphère industrielle fortement agressive. Une telle réparation est naturellement très coûteuse en soi, mais en l'occurrence elle était vitale.

VI. Les éléments de l'exposé qui précède devraient être assez connus, du moins l'auteur les a-t-il communiqués déjà plusieurs fois. Cependant, l'expérience établit que les dégradations des éléments en béton armé par corrosion des armatures restent toujours très fréquentes; peut-être même se multiplient-elles. Finalement tout dépend des praticiens : auteurs de projets, exécutants, contrôleurs. C'est eux qu'il faut instruire et convaincre, par des règles simples et motivées. Il faudrait aussi qu'ils admettent que la composition du béton doit être adaptée à la plus ou moins grande difficulté de bé-tonnage d'un élément de béton armé et que la correction usuelle par addition d'eau est une véritable malfaçon. Les résultats déjà acquis par les colloques scientifiques doivent donc être introduits d'une manière probante et autorisée dans les recommandations pratiques.

VII. Références bibliographiques.

- (1) R.I.L.E.M. Technical Committee Corrosion of reinforcement of concrete. Report of a meeting held at Wexham Springs, Slough, England, 6-9 September, 1965.

- (Ed. Cement and Concrete Association, London, 1968).
- (2) J. FAURY. Le béton. (Ed. DUNOD, Paris, 1942).
- (3) T.T.C. HSU, F.O. SLATE, G.M. STURMAN & G. WINTER. Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve. (Journal of the American Concrete Institute, n° 2, February 1963).
- (4) F. CAMPUS. Tensions produites dans le béton et le béton armé par suite des variations de volume (Revue Universelle des Mines, Liège, janvier 1936).
- (5) F. CAMPUS. Processus divers d'altération des ouvrages en béton armé. (Rapport final du 5e Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes, Lisbonne 1956, Ed. A.I.P.C. Zurich, 1957).
- (6) F. CAMPUS. Dégradation de pieux en béton armé par le battage (Annales des Travaux Publics de Belgique, Bruxelles, n° 1, février 1936).
- (7) R.I.L.E.M. Symposium on bond and crack formation in reinforced concrete. Stockholm, 1957. Volume III. Proceedings.