

LA CONCEPTION DES OUVRAGES D'ART ROUTIERS ET LEUR DURABILITE

par A. ESPRESATI

*Chef du département physique et chimie
du laboratoire public d'essais et d'études*

1• Les préoccupations du projeteur

La conception d'un ouvrage d'art routier, d'un pont, part de quelques données préalables qui vont conditionner le projet ; ce sont :

- les caractéristiques de l'itinéraire dans lequel le pont doit être situé (tracé, largeur de la chaussée, surcharge maximale admissible),
- les caractéristiques du site (nature du sol de fondation, particularités du cours d'eau traversé).

Une fois ces caractéristiques connues, on sait bien que la préoccupation principale du projeteur est de réaliser aux moindres frais un pont présentant des performances mécaniques sécuritaires et une correcte stabilité. Accessoirement, de moins en moins, il est parfois assailli d'une préoccupation esthétique. Mais je trouve qu'il est rarement, pour ne pas dire jamais, préoccupé par la durabilité à longue échéance de l'ouvrage qui va être construit.

2• Durabilité escomptée et durabilité réelle des ouvrages en béton armé.

Un pont bien conçu est fait pour durer au moins cent ans. Or, l'expérience montre que de très nombreux ouvrages sont parvenus à la limite de sécurité au bout de 40 ans, que bien d'autres accusent déjà un état précaire au bout de 20 ans et que certains ont dû être repris en catastrophe au bout de 10 ans. Deux mille ans plus tard, on est loin des ponts romains.

Je ne vais pas pour autant préconiser de revenir à la pierre de taille et au ciment de chaux et pouzzolane. Le béton armé, est un matériau commode et économique, mais malheureusement, il est encore trop jeune et c'est maintenant, après un siècle d'existence,

qu'on commence à se rendre compte que malgré sa grande facilité d'emploi, il demande certaines précautions et que, si ces précautions ne sont pas prises en considération, la durabilité à longue échéance de l'ouvrage est fatalement compromise.

3• L'équilibre du béton armé avec l'atmosphère

Le béton peut être considéré comme une pierre artificielle, mais contrairement aux pierres naturelles, particulièrement celles de surface, qui sont pratiquement en équilibre physico-chimique stable avec son environnement, le béton se présente comme une pierre en équilibre métastable avec l'atmosphère et ceci est particulièrement le fait de trois des constituants naturels de celle-ci : l'eau, l'anhydride carbonique et les embruns marins. (Sans compter les gaz acides industriels).

- Le béton durci comporte une proportion importante de chaux hydratée, non combinée sous forme de silicates, (de 70 à 100 kg par m³ de béton) et une petite proportion d'Oxydes alcalins qui sont solubles dans l'eau ; d'autant plus soluble que l'eau est pure (eau de pluie) ou chlorurée (embruns marins).
- L'acier armant le béton n'est stable à l'air humide que dans le milieu alcalin qui lui est procuré par l'enrobage dans le béton ; or, cette alcalinité du béton disparaît progressivement par la dissolution par les eaux pluviales et par la neutralisation de cette alcalinité par l'Anhydride Carbonique de l'air (Anhydride qui devient en fait de l'Acide Carbonique en présence d'eau).
- La corrosion de l'acier est catalysée par les ions Chlorures et peut dans ce cas se déclencher même avant neutralisation complète de l'alcalinité du béton. D'autre part, par son faible diamètre ionique, les ions Chlorures présentent un très fort pouvoir de pénétration dans la masse du béton.

4• Scénario pour deux ponts jumeaux

Pour mettre en relief ces circonstances, nous allons montrer deux scénarios qui ne sont entièrement hypothétiques mais basés sur des observations réelles : Deux ponts du même type, correctement conçus sont construits côte à côte, avec la même orientation sur une route cotière à 500 m du littoral.

- Le premier a été construit par une entreprise sérieuse : le personnel d'encadrement est compétent, l'étude de béton a été scrupuleusement respectée, l'eau de gachage est contrôlée, le Slups Testreste faible, le moyens de vibration sont adéquats, le recouvrement de béton sous les aciers les plus extérieures (les étriers de o 8 armant l'âme des poutres) a été conservé à 4 cm à l'aide de cales et, précaution supplémentaire, un

produit de cure efficace a été utilisé pour éviter des microfissuration de retrait en peau pendant le temps que les poutres démoulées sont directement exposées au soleil. C'est, en effet, presque de la science fiction mais des entreprises comme cela existent encore ; ne perdons pas entièrement la foi.

- Le deuxième a été construit par une entreprise du tas : l'homme à la bétonnière est un manoeuvre qui peut changer d'un jour à un autre ; le chef de chantier est un ancien maçon qui n'a qu'une connaissance très approximative de béton : il préconise entre autre que comme l'eau facilite le coulage du béton et puis elle s'évapore, il n'y a que des avantages à confectionner des bétons liquides (ceci est une anecdote véridique) ; ainsi, le béton est en général liquide à très liquide, le dosage en ciment et en sable est fluctuant ; comme le seul vibreur tombe souvent en panne, la mise en place est faite par piquage à l'aide de fers à béton, mais généralement cela n'est même pas nécessaire car le béton « soupe » se met en place de lui-même ; les étriers O 8 de l'âme, mal liaisonnés, se sont déformés lors du coulage du béton et touchent le coffrage : après décoffrage, on s'aperçoit que les aciers sont apparents par endroits et que des ségrégations sous forme de nid de cailloux se sont produits par ailleurs : c'est vilain mais on peut y remédier en cachant tout cela avec des petits ragréages au mortier ou au lait de ciment.

5• Devenir de deux bétons armés

Maintenant nous allons fixer notre attention sur une zone de l'âme des deux ponts :

- Dans le premier de ces ouvrages l'épaisseur de béton de recouvrement est de 4 cm ; le béton durci présente une faible porosité (10 % de teneur en vides) fermée par des gels de Silice, provenant de la prise du ciment ; sa surface ne présente pas de fissuration de retrait, ni de zone cavernueuses.
- Un an après confection, on observe que la profondeur de carbonatation (ou de neutralisation de l'alcalinité) est de 2 mm.
- Cinq ans plus tard, elle est de 3 mm.
- Vingt ans après, elle est de 4 mm.
- Cinquante ans après, elle est de 5 mm.
- Au bout d'un siècle, de 6 mm. Les Chlorures amenés par par les embruns de la mer toute proche ont pénétré dans ce même temps bien davantage, de 20 mm, mais il n'atteignent pas encore l'armature.
- Peut être, au bout de 200 ans, les Chlorures atteindront l'armature mais le béton d'enrobage est encore assez alcalin pour résister à la corrosion et, de toutes les façons, il est

- fort possible que l'ouvrage soit déjà démodé.
- Pour le **deuxième ouvrage**, nous allons nous situer dans un point de l'âme de la poutre où l'épaisseur de recouvrement est bien supérieur à la moyenne, il sera exceptionnellement de 2 cm, et de même, nous aurons la chance de ce qu'en ce point le béton est homogène et sans ségrégations ; il est cependant sableux et fortement dosé en eau, donc très poreux (30 % de teneur en vides) ; malgré que le dosage en ciment, par un coup de hasard, est correct dans ce point, il n'est pas suffisant pour combler tout ces vides et le béton présente donc une porosité capillaire, c'est-à-dire continue, ouverte ; la microfissuration de retrait en peau atteint 3 mm de profondeur.
 - Un an après coulage la profondeur de neutralisation totale est de 8 mm, la neutralisation partielle est plus profonde.
 - Cinq ans plus tard, la neutralisation totale a atteint 16 mm (la progression n'est pas aussi régressive que sur le béton à porosité fermé). Les Chlorures ont cependant déjà atteint le niveau de l'armature où la baisse partielle d'alcalinité est également sensible : la corrosion de l'armature s'amorce ; les irrégularités métallographiques et de conditionnement commencent à former des micropiles de corrosion.
 - Au bout de 10 ans, la neutralisation totale aura atteint 20 cm, le niveau de l'armature. La teneur en Chlorures, principalement Chlorures de Sodium, à ce niveau a fortement augmenté, le béton est devenu hygroscopique, il retient facilement l'humidité ; la corrosion devient intensive, les oxydes produits par la corrosion plus volumineux que le métal à partir duquel se sont formés donnent naissance à une contrainte radiale autour de l'armature.
 - Lorsque le béton est âgé de 15 ans, le diamètre des étriers O 8 est devenu de 6,5 mm ; la contrainte radiale finit par provoquer la formation d'une fissure sur la section de béton la plus étroite, celle à l'aplomb de l'armature. La corrosion reçoit alors une nouvelle impulsion : en effet, l'air l'oxygène, qui est en définitive le moteur de toutes les corrosions métalliques, accède librement au niveau de l'armature, aux macropiles de corrosion de faible intensité électrique se joignent des macropiles créés entre cette zone du béton, neutralisée, chlorurée et aérée, et des zones adjacentes à l'armature plus profonde, encore alcalines, faiblement Chlorurée et peu aérées ; la grande extension de ces deuxièmes zones, dites cathodiques, par rapport à la première, dite anodique, fait que le courant de corrosion au niveau de la petite zone anodique est très intense : la vitesse de la corrosion est plus que décuplée.

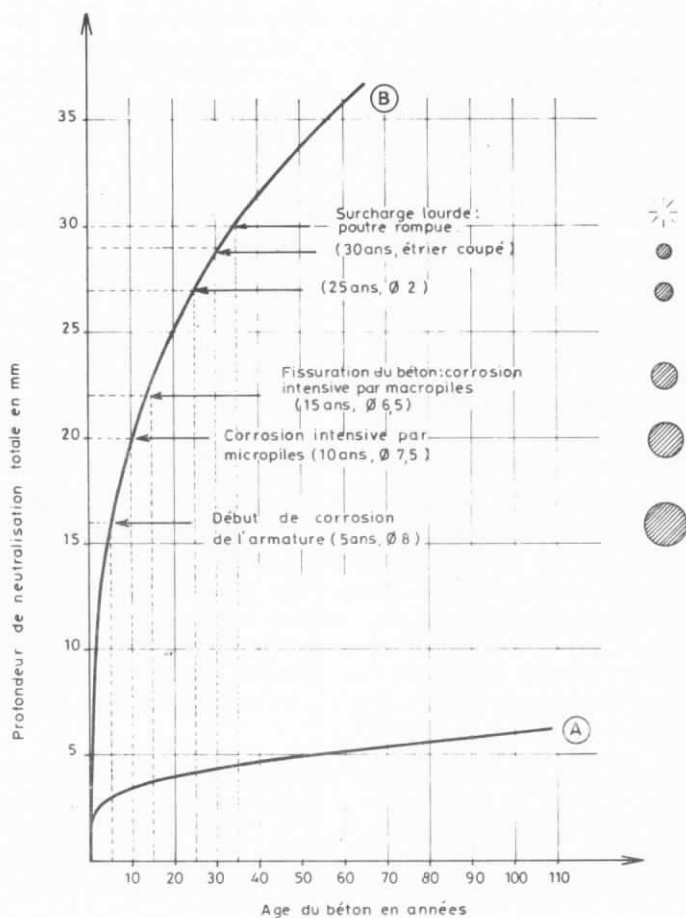
- Au bout de 25 ans, le diamètre des étriers de O 8 mm a été réduit à O 2 mm ; par chance d'autres étriers voisins n'ont pas souffert autant et, d'autre part, les coefficients de sécurité pris dans le calcul étaient très larges.
- Mais 5 ans plus tard, (30 ans l'âge de l'ouvrage), l'étrier est coupé, le diamètre des étriers avoisinants, est réduit à 2 ou 3 mm.
- Quelque temps après, un camion un peu plus chargé que les autres traverse le pont et la poutre se rompt à l'effort tranchant.

Nous avons supposé que la profondeur de recouvrement était de 2 cm et nous avons vu que la corrosion pour le mauvais béton commence à 5 ans. Si cette épaisseur avait été de 4 cm, la corrosion n'aurait commencée dans l'hypothèse de ces scénarios qu'à 60 ans : On peut comprendre l'importance que présente l'épaisseur de recouvrement.

Ajoutons que le graphique de la figure 1 qui représente cette évolution, se base évidemment sur l'extrapolation des observations sur des ouvrages de différents âges et de différentes qualités de béton plutôt que sur des essais de laboratoire qui auraient dû débuter en 1983 et être poursuivis jusqu'à maintenant. Des expérimentations de cette durée sont évidemment très rares, d'autant plus que le ciment portland est né vers cette époque et que les premières constructions en béton armé sont encore postérieures. Il est plutôt indicatif que précis.

Nous avons donné au pont mal réalisé, placé en site maritime, une durabilité de 30 à 35 ans ; le même ouvrage en rural aura fait peut être 45 ans. Mais d'autre part, nous connaissons un ouvrage en site maritime qui était déjà gravement touché à 12 ans d'âge et que si l'on n'avait pas porté remède aurait fini leur existence vers les 20 ans.

Un fait curieux à noter est que, souvent, à un certain stade de la dernière phase, la corrosion simultanée de plusieurs barres proches et parallèles provoque le décollement et la chute d'une plaque de béton de recouvrement ; ou bien la corrosion d'une armature d'angle produit le décollement et la chute du béton de recouvrement à l'angle. Dans les deux cas les aciers restent à nu et alors la vitesse de corrosion décroît très sensiblement. La raison est simple : en climat humide une armature nue ne reste humide que pendant la période de rosée à la tombée du soir et durant la nuit, alors qu'une armature mal enrobée est continuellement en contact avec le béton humide ; d'autre part la partie électrolytique du circuit électrique des macropiles de corrosion (le béton humide et chloruré) n'existe plus et les macropiles s'arrêtent. Ceci me conduit à dire, bien que je ne vais pas m'étendre sur cette question,



SCENARIO DU DEVENIR DE DEUX BETONS ARMES

Fig: 1

que dans ce cas, il vaut mieux ne pas réparer que réaliser une mauvaise réparation : la solution optimale étant bien évidemment de réparer correctement le plus rapidement possible.

Dans ces scénarios nous n'avons pas tenu compte des zones de béton caverneux dues à une mauvaise granulométrie ou à une mauvaise mise en place du béton. Les zones de béton caverneux constituent un raccourci pour la pénétration de l'humidité, de l'Anhydride Carbonique, des Chlorures et de l'Oxygène de l'air et peuvent donc provoquer localement la corrosion des armatures dans des temps beaucoup plus courts ; bien que souvent l'acier qui se trouve directement à l'aplomb de ce qu'on appelle d'un « nid de cailloux » est mieux conservé que celui qui se trouve à proximité : ceci est dû au fait que l'humidité ne peut pas se conserver dans ce béton très ouvert.

6• Une corrosion plus rapide : l'eau qui ruisselle ou percole

Nous n'avons pas non plus tenu compte dans les précédents scénarios de l'effet de l'eau, non pas sous forme d'humidité mais d'eau liquide.

L'eau qui ruisselle à la surface ou qui percole à travers le béton humidifie plus ou moins profondément la masse du béton voisin et, si les conditions physico-chimiques de corrosion sont atteintes, enclenche les piles potentielles de corrosion déconnectées par défaut de circuit électrolytique. Mais en plus, cette eau dissout et entraîne la chaux du béton d'autant plus vite que le béton est plus poreux ; par ailleurs elle conserve toujours, par son renouvellement, un potentiel élevé de dissolution. Comme conséquence de ce lessivage de la chaux, l'alcalinité du béton disparaît beaucoup plus rapidement que par simple carbonatation par l'Anhydride carbonique de l'air et d'autre part, sa porosité augmente très sensiblement : La porte est alors grande ouverte à la corrosion des armatures dans une période beaucoup plus courte que celle correspondante au béton à l'abri de l'eau, même si ce dernier est de mauvaise qualité. Aux zones localisées de l'ouvrage sujettes à des circulations d'eau, la corrosion des armatures est toujours beaucoup plus précoce que partout ailleurs.

7• Un petit moment de réflexion = un demi siècle supplémentaire de service

Les très nombreux ouvrages que nous avons eu l'occasion d'étudier présentent d'une façon systématique des signes prématurés de vieillesse aux zones de ruissellement ou des percolation d'eau pluviale ; signes plus ou moins graves selon l'âge, la qualité du béton ou l'agressivité du site, mais dans l'origine fondamentale n'est ni la mauvaise qualité du béton ni l'agressivité du climat mais la mauvaise conception de certains détails de l'ouvrage.

On pourrait se demander pourquoi le bâtiment n'accuse pas ces mêmes déboires. La réponse est simple : le bâtiment est destiné à être habité et en conséquence on soigne son étanchéité ; la couverture du bâtiment est étanche, on essaye par ailleurs que les eaux pluviales ramassées sur cette couverture ne ruissellent pas sur les façades. Ces façades sont par ailleurs recouvertes d'une couche d'enduit, plus ou moins imperméable, revêtu à son tour de plusieurs couches de peinture imperméable. Le cheminement des agents de vieillissement cités plus haut est beaucoup plus lent. On observe cependant les mêmes désordres dans les bâtiments mal protégés, dans le béton brut de décoffrage et particulièrement dans certaines structures industrielles en béton nu ; et dans ces dernières le vieillissement est souvent plus rapide que sur les ponts.

Ni dans le passé, ni même actuellement, des précautions suffisantes ne sont prises pour assurer la pérennité du béton armé : Il s'agit de petits détails qu'on considère toujours comme secondaires, pas très onéreux (donc « pas importants ») et auxquels on n'attache pas beaucoup d'attention, ni dans la conception, ni dans la réalisation de l'ouvrage ; d'autant plus qu'ils n'auront d'incidence sur la vie de l'ouvrage que dans 20 ou 30 ans : où seront-ils les responsables à ce moment-là ? : Cependant le nombre d'ouvrages qui actuellement dépassent les 20 ans d'âge sont bien plus nombreux que ceux qui en ont moins et le prix qu'on doit payer maintenant pour assurer, à l'aide de réparations plus ou moins aléatoires, la sécurité de service et l'espérance de vie de ces ouvrages, est infiniment plus élevé qu'il n'aurait coûté au projecteur et au maître de l'œuvre d'en tenir compte : pratiquement rien. Sans compter qu'il faut souvent construire un ouvrage neuf bien plus tôt qu'il n'aurait été nécessaire. Alors que, si l'ouvrage précédent avait été bien conçu et réalisé, il aurait encore pu assurer le service durant un temps assez important pour devenir démodé.

Les précautions nécessaires pour assurer cette durabilité face à l'agression atmosphérique sont pourtant simples :

- 1—Il faut mettre le béton à l'abri des ruissellements ou percolations de l'eau de pluie.
- 2—Il faut concevoir le béton de recouvrement des armatures (qualité et épaisseur) de manière à ce que la neutralisation de l'alcalinité du béton n'atteigne pas le niveau de l'armature avant au moins un siècle.

Sur le plan pratique ceci équivaut à adopter les précautions suivantes :

- A—Eviter autant que possible de projeter un maillage d'armatures trop serré, particulièrement au talon de poutres, aux abouts des poutres et aux encorbellements.

- B—L'épaisseur de recouvrement des armatures les plus extérieures sera de préférence supérieure à 2,5 cm en climat mal sec et supérieure à 4 cm en climat maritime. Des climats intermédiaires demanderont des épaisseurs intermédiaires.
- C—La bordure du tablier composera une forme de larmier efficace.
- D—Les formes trop frêles en béton armé sont à éviter car elles présentent une grande surface spécifique aux agents atmosphériques. De même, on évitera les faces horizontales sur lesquelles l'eau peut stagner et les saletés s'accumuler en constituant des pièges d'humidité. Ceci est particulièrement vrai pour les sommiers des culées.
- E—Les joints entre travées, entre travée et culée et éventuellement entre deux travées parallèles, seront obligatoirement étanches. De même les bordures ou trottoirs apposés dessus le tablier ne devront pas permettre la circulation d'eau entre eux et le tablier.
- F—La chaussée et les trottoirs auront une pente suffisante pour éviter la stagnation de l'eau de pluie (la formation de mares sur la chaussée de certains ponts non seulement favorise les percolations à travers le béton du tablier mais devient un danger pour la circulation rapide).
- G—Le tablier sera parfaitement étanché avant de procéder à la mise en place du revêtement. Le produit d'étanchéité devra être de qualité reconnue et leur application sera sérieusement contrôlée. (l'asphalte en particulier et à proscrire au Maroc car il n'existe pas d'asphalte naturel depuis de très nombreuses années).
- H—Les gargouilles de drainage de la chaussée seront parfaitement étanches par rapport au béton du tablier qu'elles traversent le plus souvent. Elles seront disposées de telle manière que l'eau chassée ne vienne à aucun moment dans des conditions normales (faible vent), au contact des

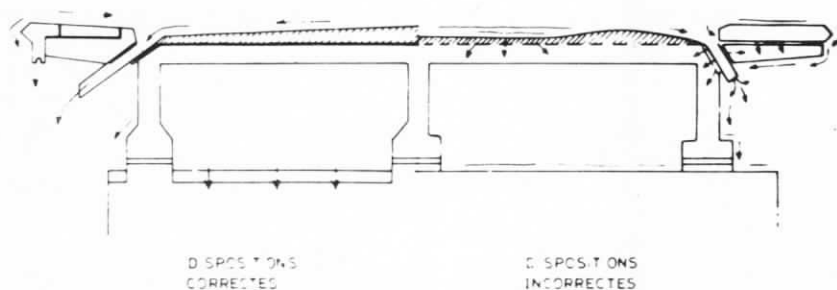


Fig 2

structures de l'ouvrage (principalement talon des poutres, chevêtre des piles, sommier des culées). Elles seront constituées en un matériau non fragile (le plastique et le fibrociment sont à éviter car ils constituent souvent la cible de bergers oisifs). Leur bec sera coupé en biseau de façon à éviter des éclaboussements.

- I—Le parapet métallique (qui s'impose de plus en plus) est sans doute préférable au parapet en béton armé, mais il faudrait qu'il soit protégé par une bonne peinture antirouille. La zone d'ancrage dans le béton pourra être laissée sans protection mais il faudrait cependant protéger la zone de transition, 4 ou 5 cm en dessous du nu du béton (origine de corrosions prématurées et d'éclatements disgracieux du béton).
- J—Demander lors de l'étude de béton de composer un béton le plus compact possible, en modifiant éventuellement les classes granulométriques disponibles (ce qui va de pair par ailleurs avec la consécution de résistances élevées à la compression).
- K—Faire attention à ce que la dimension maximale de la granulométrie soit adéquate aux espacements du ferrailage prévu pour l'ouvrage, en effectuant le cas échéant des essais de mise en place en laboratoire avec les plus faibles écartements du ferrailage prévus pour l'ouvrage.
- L—Eviter les agrégats pollués par des sels et les eaux de gachage saumâtres (des hétérogénéités provoquées plus tard par les intempéries dans les concentrations salines du béton peuvent amener l'apparition précoce de macro-piles de corrosion).
- M—Vérifier que les moyens de vibration de l'entreprise sont adéquats pour une correcte mise en place du béton.
- O—Si malgré toutes les précautions prises, on s'aperçoit au décoffrage que des zones de béton caverneux se sont produites, on procédera immédiatement au rebouchage avec du mortier fin, richement dosé et de préférence additionné d'un adjuvant anti-retrait et facilitant l'adhérence. Ce rebouchage se limitera à la zone caverneuse et ne dépassera pas le parement du béton. Des zones de béton visiblement poreux, ou des zones aux armatures apparentes, devront être traitées dans la période de construction, avec un système de peinture pour béton, étanche et de qualité reconnue.
- P—Dans un autre ordre d'idées, il faut songer également au conditionnement des eaux de chaussée de la route au delà de l'ouvrage. En effet, très fréquemment, le pont occupe un point bas de l'itinéraire sur lequel convergent les eaux

pluviales de chaussée d'un ou de plusieurs kilomètres de route en deça et au delà du pont. Ces eaux déversant tumultueusement contre ou à proximité des culées contribuent à leur sapement. Il faut donc soigner à ce que ces eaux soient canalisées et envoyées dans l'oued loin des culées.

Il me reste à ajouter que toutes ces observations découlent de l'étude d'ouvrages anciens et récents où justement les désordres obéissaient à l'inobservance d'une ou plutôt de plusieurs de ces règles.

7• A mode de conclusion

Les notions que je viens de développer ne sont nullement inédites, mais il fallait les rassembler et surtout, bien mettre en relief leur influence fondamentale sur la durée de vie des ouvrages.

Si j'ai réussi à faire prendre conscience aux responsables de l'importance de ces « petits détails sans importance », j'espère que les futurs ponts marocains dépasseront les 100 ans, et bien que je ne sois pas là pour le voir, mon âme immortelle se sentira réjouie.