

Prescriptions et recommandations pour la construction

F. CAMPUS (1)

1. Introduction

Huit rapports particuliers ont été classés au thème III. Cependant, la complexité des facteurs qui influent sur le comportement des bétons dans la mer rend malaisées leur séparation et les classifications. Quelques rapports des thèmes I et II ne sont pas sans accointances avec le thème III, plus particulièrement ceux désignés I.3, I.5, I.7, I.8 et II.3.

On peut constater globalement que, malgré leur diversité, ces rapports contiennent beaucoup d'éléments communs. Le présent rapport général tentera de réunir ceux-ci en un ensemble cohérent, sans méconnaître pour autant l'importance des circonstances locales, qui sont les facteurs de diversification que les rapports particuliers mettent suffisamment en évidence.

2. Importance des circonstances locales

Une tentative de synthèse des principes généraux à observer pour assurer un comportement durable des bétons dans les milieux marins ne peut être abordée sans reconnaître et souligner l'importance des circonstances locales, qui peuvent être très diverses. Elles doivent donner lieu à des adaptations éventuelles des principes pour chaque cas d'application.

Cette remarque conduit à une première règle générale qui ne peut pas sans risques souffrir d'exception. C'est la nécessité d'une connaissance non seulement suffisante mais même approfondie de ces circonstances locales. Et ce d'autant plus qu'elle sera acquise une fois pour toutes.

Cette règle sera le mieux satisfaite en procédant, comme cela a été fait dans de nombreux pays, à des essais directs et de durée suffisante sur le comportement de mortiers et de bétons dans le milieu marin local. Le terme local ne possède d'ailleurs pas ici, en général et sauf cas éventuellement très particulier (dont je ne connais pas d'exemple), un sens très restrictif. Il correspond en fait à des stations d'observation assez éloignées les unes des autres et concernant des régions côtières assez étendues, telles que l'Atlantique Nord à Trondheim, la mer du Nord septentrionale à Hanstholm, la mer du Nord méridionale sur les côtes d'Angleterre et à Ostende, la Manche à Saint-Malo, l'Atlantique sur les côtes portugaises, la Méditerranée à Marseille et à Naples, l'Adriatique, la mer Morte, la mer Rouge, etc.

Certaines de ces observations ne sont pas encore achevées. On peut croire que d'autres restent à faire en d'autres lieux. Elles auront l'avantage de pouvoir être entreprises d'une manière plus informée, plus assurée et éventuellement plus économique que les recherches antérieures, grâce à la connaissance de

(1) Prof., 77 avenue Armand Huysmans, Bruxelles 5, Belgique.

leurs résultats. On peut croire qu'un travail important pourrait être consacré rien qu'à des conseils sur la manière de préparer et de conduire des recherches futures plus ou moins comparables et en vue de leur développement dans les aires marines non encore étudiées. Un tel travail conviendrait parfaitement aux fonctions de la RILEM et pourrait, avec chances d'aboutissement, être confié à un comité spécial, afin de tirer le plus grand profit possible des expériences déjà acquises.

On peut remarquer d'ores et déjà que ces nouvelles recherches locales ne devraient sans doute pas porter sur la vérification de toutes les règles générales, dont certaines peuvent avoir un caractère assez universel, mais plutôt sur des éléments dont la dépendance des circonstances locales peut ressortir particulièrement dans chaque cas.

Les circonstances locales présentent divers aspects, plus ou moins liés. D'abord les circonstances géographiques ou maritimes ou océanographiques : le régime des marées, celui des courants généraux (tels que le Gulf Stream à Trondheim), le régime des vents et des tempêtes, régissant l'agitation de surface et les courants locaux. D'une manière générale le climat, qui définit un ensemble de circonstances d'un ordre plus actif, telles que le régime de la salinité, celui des températures, aussi l'activité biologique marine, etc.

La salinité et les températures extrêmes sont les agents principaux de l'agression marine, surtout par leur combinaison. Dans les régions septentrionales, le gel est probablement l'élément le plus destructeur. Dans les régions équatoriales, les températures généralement élevées peuvent donner lieu à des mouvements de l'eau dans le béton et à des concentrations salines qui peuvent conduire à des altérations du béton et à des corrosions d'armatures si le béton est armé. Ces phénomènes présentent cependant des aspects très divers. Il a été procédé en 1935 dans les laboratoires du rapporteur général à des expériences de filtration sous pression de solutions agressives à travers des mortiers assez maigres confectionnés avec les divers ciments utilisés pour les éprouvettes immergées dans la mer du Nord à Ostende (voir rapport III.3). Le résultat a été un colmatage rapide des éprouvettes par les sels précipités dans les canaux de percolation.

Des éprouvettes prismatiques de béton armé, qui avaient été préalablement fissurées par flexion, ont été immergées partiellement dans des réservoirs contenant de l'eau de mer artificielle à concentration triple et à niveau légèrement variable à la Building Research Station à Watford (Royaume-Uni). Les fissures ont été colmatées par des sels déposés, jusqu'à devenir invisibles, et ces éprouvettes se sont ensuite comportées identiquement aux éprouvettes non fissurées de comparaison [1].

Le rapport III.7 sur le comportement du béton en Méditerranée fait suite à une communication des mêmes auteurs (BROCARD et CIRODDE) au Colloque international de la RILEM à Prague en août 1961 sur la « Durabilité des Bétons » (cf. références bibliographiques générales). Il apporte une contribution appréciable au sujet du comportement des bétons hydrauliques dans les mers et les climats relativement chauds. Le point principal mis en évidence est celui de l'action destructrice par expansion des sels cristallisés dans les pores du béton au-dessus de la ligne d'eau invariable dans des prismes partiellement immergés. Ces observations sont considérées comme spécifiques pour la Méditerranée. On recommande notamment une épreuve de « l'aptitude » marine des ciments effectuée sur des baguettes de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm de mortier ISO (RILEM-Cembureau), disposées dans de l'eau de mer artificielle à niveau constant, en semi-immersion intermittente ou permanente, avec chauffage intermittent infrarouge.

Un autre ordre de circonstances locales, souvent encore en relations avec celles de la géographie et du climat, est celui des matériaux économiquement disponibles. La nature des ciments peut en dépendre, par exemple en raison de la proximité de produits naturels, tels que les pouzzolanes en Italie méridionale, ou de sous-produits industriels, tels que les laitiers basiques de haut fourneau dans les régions d'industrie sidérurgique. Il peut aussi s'agir de granulats singuliers, le plus souvent caractérisés par des propriétés nocives, parce que réactifs, tels que les granites kaolinisés du Portugal, les silex du Danemark, ou encore expansifs. Les rapports I.8, I.9 et II.3 indiquent que, moyennant certaines précautions, ces matériaux permettraient de confectionner des bétons résistant à l'agression marine.

Le problème de la nature et de la composition des liants relève de manière caractéristique du thème I ; il n'y sera fait allusion dans la suite de ce rapport général que dans la mesure strictement nécessaire. En ce qui concerne les composants réputés inertes du béton, ils seront considérés comme tels, ce qui exclut précisément les granulats réactifs et expansifs, c'est-à-dire pas entièrement inertes.

3. Recommandations pour la construction

Il serait présomptueux de vouloir dans un rapport général user du terme de prescriptions. Le terme de recommandations même paraît à peine convenir à ce stade et doit être compris comme une tentative de synthèse des connaissances antérieurement acquises, des apports nouveaux résultant des rapports présentés au Colloque et de l'expérience personnelle du rapporteur général. Il y a lieu de craindre quelques

empiètements sur les autres thèmes, surtout le thème II. L'auteur de ce rapport s'en excuse à l'avance auprès de ses Collègues rapporteurs généraux.

Dans tout ce qui suit, il est présumé que les circonstances locales définies au chapitre II sont connues autant qu'il est nécessaire. Elles permettent d'apprécier l'intensité de l'agressivité marine, comme il ressort bien des rapports d'observations expérimentales et d'inspection des ouvrages existants (voir rapports I.1, I.2, I.3, I.5, I.7, I.8, I.9, II.2, II.3, III.2, III.3, III.4, III.5, III.6 et III.7).

Les éléments qui agissent sur l'agressivité de la mer sont les suivants, énumérés dans l'ordre d'importance que leur attribue le rapporteur général :

a) La rigueur du climat, principalement la rigueur du gel; éventuellement une température moyenne élevée.

b) La salinité, le pH et la température de l'eau.

c) L'importance de la marée et la situation du béton par rapport aux niveaux extrêmes moyens de la mer.

d) L'agitation superficielle et l'exposition.

e) Les actions mécaniques de la navigation (chocs, frottements, etc.).

f) L'action biologique marine.

Les éléments *a*, *b* et *c* sont les plus importants, *d* et *f* le sont moins, tandis que *e* est fortuit.

Il est à remarquer que l'action de *b* seule, c'est-à-dire l'action simple de l'eau de mer calme peut être en général considérée comme modérée, sauf éventuellement si la température moyenne est élevée. L'agression marine globale est le plus souvent la résultante des actions, qui se combinent et se renforcent mutuellement, de tous les éléments définis ci-dessus, selon leur degré d'importance.

Comme la majeure partie du trafic maritime est concentrée dans l'hémisphère boréal et plus particulièrement encore dans ses régions tempérées, où sont situés les plus grands ports, ce sont les conditions d'ailleurs globalement assez sévères de ces régions qui sont les mieux connues, comme l'établit encore l'actuel colloque. Les conditions des régions tempérées de l'hémisphère austral sont probablement analogues.

Il n'existe guère de données systématiques et prolongées sur les conditions dans les régions tropicales. Bien que les influences marines aient figuré explicitement au programme du Colloque de la RILEM sur la « *Tenue et la Durée des Matériaux de Construction sous les Climats chauds* », à Abidjan en novembre 1963, aucune contribution n'y a été apportée concernant le comportement des mortiers et des bétons dans les mers tropicales.

Cependant, le développement à prévoir des pays situés dans ces régions, et qui s'effectue généralement le plus intensément dans les franges côtières, permet de croire que des constructions maritimes importantes s'y multiplieront à l'avenir. Les conditions auxquelles elles devront satisfaire devraient donc être plus étudiées que par le passé et l'effort de recherches futures sur les circonstances locales devrait être orienté vers elles.

Elles pourraient notamment étendre les observations décrites dans le rapport III.7 et évoquées dans le rapport I.1 (p. 22), sur la remontée capillaire en demi-immersion à niveau constant. Il en résulte que dans les mers chaudes sans marée les ciments métallurgiques résisteraient moins bien que certains Portlands. Il en serait déjà ainsi dans la Méditerranée. Ces opinions ne sont cependant pas reflétées dans les rapports italiens présentés au Colloque (I.4, II.2 et III.4), ni dans des publications plus anciennes, telles que celles de V. SEVIERI. Les expériences relatées au I.3 semblent être extérieures à la question considérée. Pour l'élucider, il faudrait procéder sans doute à des expériences plus étendues dans des conditions exactement définies, notamment en ce qui concerne l'exposition et aussi la composition des ciments, qui ne pourraient pas seulement être caractérisés par des termes aussi généraux (et commerciaux) que Portland, métallurgique, etc. C'est là une remarque très générale et il n'est pas indiqué pour des travaux à la mer de se fier simplement à des dénominations commerciales de ciments. Par exemple, il ne suffit pas qu'un ciment soit qualifié de métallurgique ou de pouzzolanique, encore faut-il connaître sa composition et les qualités de ses constituants, qui ne sont pas indifférentes. La qualité des laitiers basiques de haut fourneau notamment ne dépend pas tellement de leur composition chimique que de leur état physique, c'est-à-dire de leur granulation.

Feu M. TRIEF, un des protagonistes du broyage humide du laitier, croyait qu'une extrême finesse permettait d'être moins exigeant en ce qui concerne la qualité des laitiers, mais comme le procédé n'est guère répandu pour les travaux maritimes, il est important d'utiliser des laitiers très actifs et d'en incorporer une proportion suffisante au ciment.

Dans leur communication au Colloque de Prague, les auteurs du rapport III.7 faisaient état des coefficients d'absorption différents de mortiers des divers ciments étudiés, ceux possédant le plus élevé se comportant le moins bien dans l'essai de la demi-immersion. Il s'agit là d'un facteur physique peu considéré jusqu'à présent en cette matière et qui mérite une étude sérieuse. Il vient évidemment à l'appui du principe fondamental de la résistance des bétons à l'eau marine, qui est de se laisser pénétrer par elle le moins possible. Encore une fois, les aspects sont

divers. Les phénomènes de colmatage superficiel par les sels et par les matières organiques d'origine biologique sont fréquents. VICAT leur avait déjà assigné un rôle protecteur, cependant que LE CHATELIER avait déjà évoqué des incrustations destructrices. Il est possible que des facteurs climatiques influencent ces phénomènes, dans lesquels l'effet de la capillarité ne peut sans doute pas être exclu. Il se pourrait que la finesse des ciments agisse sur la remontée capillaire. Les ciments à haute teneur en laitier ont le plus souvent une grande finesse, en vue d'accélérer leur durcissement initial. Si cette propriété est opportune pour les constructions aériennes, elle n'a pas de raison d'être pour les ouvrages maritimes, pas plus que pour les bétons massifs des ouvrages hydrauliques et souterrains en général. Le rapport III.7 fait donc entrevoir un champ d'investigation d'assez grande étendue.

3.1. Composition du béton, squelette inerte

Il est admis depuis longtemps, déjà depuis les recherches de VICAT, que la composition des bétons pour la mer doit permettre une grande compacité après mise en œuvre. Le rapporteur général est personnellement très attaché à ce principe. Les conclusions différentes du rapport I.3, relatives au cas très particulier de la mer Morte, n'ébranlent pas sa conviction, sous la seule réserve cependant qu'elle concerne surtout les régions à climat plutôt rigoureux. Il se peut, comme indiqué plus haut, que la question ne soit pas entièrement élucidée pour les régions à climat torride. Il conviendrait d'associer à la notion de compacité celle d'absorption capillaire.

Il faut une composition granulométrique, réalisant cette compacité, en rapport avec la quantité de ciment par mètre cube de béton. Cette question ne demande pas d'autres commentaires, sauf qu'il ne paraît pas opportun de rouvrir à son propos le débat sur les mérites respectifs des granulométries continues et discontinues. Si l'on peut disposer d'un mélange naturel de sable et de gravier se rapprochant suffisamment d'une granulométrie idéale et assurant une bonne compacité au béton, on ne voit pas ce qui s'opposerait à son emploi, pourvu qu'il soit sain et propre et ne contienne pas un excès de fin. Mais s'il y a lieu de recourir à des matériaux classés par catégories et notamment des concassés, il est très rationnel et, de l'avis personnel du rapporteur général, préférable de recourir à une granulométrie discontinue, comme l'indique le rapport I.1. Il appuie aussi les observations de ce rapport quant à l'opportunité d'éviter les sables fins et d'éliminer les poussières de concassage. Cependant, la quantité de sable peut être augmentée lorsque celle du ciment est diminuée, mais sans que pour cela la finesse du sable soit accrue. En ce qui concerne le calibre maximal des granulats, il variera selon les

applications. Pour le béton armé en général, il est recommandable de s'en tenir à un calibre maximal assez faible. Les expériences relatées au rapport III.3 ont établi que l'on peut composer des bétons assez compacts et résistant bien à l'action marine sans dépasser le calibre maximal de 20 mm. Par contre, pour les gros blocs et les massifs sans armatures, surtout s'ils sont immergés en permanence et peu exposés à la dessiccation et au gel, on peut recourir à des calibres maximaux sensiblement plus gros allant jusqu'à 100 mm (voir rapport I.1) et même au-delà. Cette disposition permet d'atteindre de grandes compacités et de grandes résistances avec relativement peu de ciment.

3.2. Quantité de ciment par mètre cube de béton

L'augmentation de la quantité de ciment, dans les limites courantes, augmente la résistance des bétons à l'agression marine, même lorsque le ciment y est sensible par sa nature. Il semble que cela soit dû surtout à l'augmentation de la compacité. Il n'y a pas si longtemps que l'on recommandait l'emploi de dosages riches en ciment, de 400 à 450 kg/m³ de béton, du moins pour les bétons armés [2]. Le rapport I.1 discute pertinemment les inconvénients possibles d'une trop grande richesse en ciment. Le maximum de 350 kg/m³ auquel il s'est arrêté correspond sensiblement au dosage des bétons dont les essais sont relatés au rapport III.3. Cependant, un tel dosage correspond déjà à un mortier très riche de 832,5 kg de ciment pour 1 500 kg de sable.

Or, les expériences correspondantes établissent que tous les mortiers dosés à 600 kg pour 1 500 kg de sable résistent, quel que soit le ciment, et même les mortiers à 450 kg de ciment par 1 500 kg de sable, de manière très caractéristique pour les ciments peu sensibles à l'action marine. Pour ces derniers, on pourrait même descendre à 300 kg de ciment par 1 500 kg de sable, mais ceci conduirait à un béton vraiment trop maigre. On peut déduire de là que c'est une règle trop fruste que de prescrire pour tous les usages du béton à la mer indistinctement une richesse à peu près égale en ciment. Correspondant au fait que tous les éléments des constructions maritimes ne sont pas également exposés à l'attaque marine, on peut concevoir une gamme raisonnable de dosages en ciment répondant à divers degrés d'exposition. Le tableau I n'est donné qu'à titre d'exemple plutôt théorique en rapport avec les essais relatés au rapport III.3. Le béton C est celui qui a été employé pour les éprouvettes de béton. Le béton B correspond au mortier essayé à 600 kg de ciment par 1 500 kg de sable. Le béton A correspond au mortier essayé à 450 kg de ciment par 1 500 kg de sable. Il n'a pas paru opportun de descendre plus bas. Le béton D par contre représente à titre de comparaison un béton riche à 450 kg de ciment par mètre cube de béton. Ces dosages ont

été établis par le calcul de manière à prévoir des consistances à peu près identiques, avec des quantités d'eau peu variables et pour la mise en œuvre à sec.

TABLEAU I

	Bétons			
	A	B	C	D
Gravier 5/20 (kg)	1 250	1 250	1 250	1 250
Sable 0/2 (kg) ..	740	696	630	541
Ciment (kg)	225	275	350	450
Eau (kg)	158	158	158	180
Compacité du béton durci	0,853	0,862	0,875	0,911

Le béton A devrait contenir du ciment peu sensible à l'action marine et pourrait être utilisé pour de grands blocs préfabriqués destinés à être immergés, à partir d'un âge de 1 à 3 mois, en permanence sous le niveau de la marée basse et peu exposés à l'agitation de surface. Il est à remarquer qu'il conviendrait pour un tel usage d'employer un calibre maximal plus élevé, assurant une plus grande compacité et permettant de réduire encore la quantité de ciment, à 200 kg par exemple. Tel qu'il est défini ci-dessus, le béton A pourrait convenir par exemple pour les plaques de revêtement d'épaisseur modérée, immergées en permanence et à l'abri de l'agitation de surface.

Le béton B, surtout avec du ciment résistant à l'action marine, peut convenir déjà pour les éléments les plus exposés non armés. Ici également, si les dimensions transversales sont considérables, on peut augmenter le calibre maximal des granulats et abaisser la quantité de ciment à 250 kg en assurant de grandes compacités et résistances.

Le béton C convient pour les éléments en béton armé pas trop exposés, notamment préfabriqués et immergés en permanence.

Le béton D conviendrait pour les éléments armés les plus exposés, moyennant les précautions indiquées plus loin. Pour les deux derniers bétons, on doit recourir à du ciment résistant à l'action marine lorsque le danger d'agression est assez élevé.

En cas de bétonnage sous eau, les compositions doivent être étudiées en conséquence.

Sauf pour des applications spéciales et limitées, où l'on recherche une prise plus ou moins rapide par des mélanges en proportions définies de ciment alumineux et de ciment Portland ou métallurgique, il est contre-indiqué pour les bétons à la mer de mélanger des ciments différents [3] et même d'employer pour diverses parties d'un même ouvrage des ciments différents, surtout s'il y a des armatures. Par contre il n'y a

pas d'empêchements à faire varier la richesse du béton en ciment de même nature selon la position de l'élément de l'ouvrage par rapport aux niveaux extrêmes moyens de la mer, en évitant toutefois d'effectuer une reprise (arrêt de bétonnage) à la transition, afin de réaliser une liaison parfaite.

3.3. Mise en œuvre du béton

Pour les ouvrages à la mer, elle doit se rapprocher de la perfection. C'est en effet par les imperfections de la mise en œuvre que périssent généralement tous les bétons et surtout à la mer. Ces imperfections (considérées dans ce rapport général comme accidentelles, à l'exclusion de malfaçons systématiques ou intentionnelles) consistent toujours en discontinuités et hétérogénéités, cavités vides, ségrégations, nids de gravier, mauvaises reprises, etc. La composition et la consistance du béton doivent être appropriées aux difficultés de mise en œuvre. Ce qui compte est la qualité du béton mis en place, l'homogénéité et la compacité du béton durci dans toutes ses parties.

Les rapports présentés au Colloque confirment les recommandations connues déjà éprouvées. Emploi de coffrages métalliques lisses, de manière à réaliser des surfaces extérieures pleines, lisses et aussi impénétrables que possible. Vibration correcte assurant compacité et homogénéité. L'emploi d'adjuvants (entraîneurs d'air, plastifiants) peut s'indiquer dans certains cas, mais on s'assurera de leurs effets favorables ou non.

Le mouillage sera fait autant que possible à l'eau douce, bien que l'eau de mer puisse être utilisée en cas de nécessité, surtout avec les ciments résistant à l'action marine. Cela est toutefois à exclure pour le béton armé.

On évitera, autant que faire se peut, le bétonnage sous eau et le bétonnage à sujétion de marée. On préférera le bétonnage à sec, dans des fouilles, batardeaux, caissons, puits ou enceintes asséchées, ou la préfabrication. La mise sous eau ou l'immersion seront faites à l'âge le plus avancé économiquement possible.

Le bétonnage sous eau, lorsqu'on doit y recourir, requiert le maximum de précautions et présente néanmoins toujours des aléas. Le procédé Contractor (cf. rapport III.6) est bien connu. Un autre moyen plus nouveau est celui du béton à injection de mortier sous eau, en remontant.

Il a reçu une application toute récente et satisfaisante à la construction du voile avant d'un mur de quai en eau profonde à fondation haute sur pieux au port de Zeebrugge (Belgique). L'emploi de ciment résistant à l'action marine s'impose. Dans le cas du mur de quai en question, les coffrages en palplanches métalliques de la face arrière étaient retirés et l'on a

pu se rendre compte de l'aspect excellent du béton injecté sur une certaine hauteur à la partie supérieure. Mais en général, qu'il soit décoffré ou non, l'aspect du béton coulé ou injecté sous eau ne pourra être observé et le décoffrage peut souvent présenter des difficultés, être onéreux et le réemploi des coffrages difficile. Il peut ainsi paraître préférable de laisser subsister les coffrages sous eau et sur la hauteur du marnage, même au-dessus (voir rapports III.5 et III.6), susceptibles d'apporter une protection superficielle du béton contre le gel.

Le problème des reprises doit retenir particulièrement l'attention. Le mieux est de les éviter par une subdivision judicieuse de la construction en plots séparés par des joints étanches ou non, selon les circonstances. Pour les éléments préfabriqués aussi il doit être possible de les éviter. Là où ce n'est pas possible, on aura recours à des précautions spéciales bien étudiées et efficaces (voir rapport II.1). Dans les bétons coulés ou injectés sous eau, comme les reprises ne sont pas observables ni contrôlables, il faut les éviter par la division en plots et l'organisation correspondante du chantier.

Les arêtes vives et les sommets étant particulièrement vulnérables à la mer (voir rapports III.3, III.5 et III.6), on chanfreinera ou l'on arrondira les angles des coffrages ou même on préférera pour les piles et piliers des surfaces de coffrages cylindriques.

3.4. Précautions spéciales pour le béton armé

Elles ont essentiellement pour but :

- a) d'éviter que les armatures rendent difficile la mise en place du béton et compromettent sa qualité ;
- b) d'assurer une protection efficace et durable des armatures par le béton contre la corrosion marine de l'acier ;
- c) d'éviter la fissuration du béton telle qu'elle peut se produire dans le béton armé, en exposant ainsi les armatures à la corrosion marine.

Sous le niveau haute mer moyenne de morte eau (H.M.M.M.E.), le béton sera constamment humecté. La fissuration par empêchement des déformations thermohygro-métriques ne sera donc pas à craindre (parallèle aux armatures). C'est ce qui explique les constatations relatées au rapport III.3 de la protection efficace d'armatures pendant 30 années par une couverture de 1 cm de béton seulement, dans des éprouvettes cylindriques de béton immergées à marée. Ce phénomène, produit à plusieurs exemplaires et dont l'évolution a été suivie pendant trente années, est bien propre à justifier l'opinion que l'efficacité de protection d'une armature par une couverture de béton ne se mesure pas seulement par l'épaisseur de cette dernière mais dépend encore davantage de sa qualité et de son invariabilité de volume [4, 5].

Bien entendu, il ne faut pas en déduire autre chose que l'efficacité de la protection conférée par une couverture de béton sans défauts, même lorsqu'elle est peu épaisse. Mais il faut se garantir par une épaisseur suffisante de couverture contre les défauts possibles, même probables, et en fixer le minimum à 4 ou 5 cm lorsque l'on peut attendre une bonne exécution normale. Si celle-ci est aléatoire, par exemple en cas de bétonnage par coulage ou injection sous eau, on n'aura même pas la certitude qu'une couverture de 7 cm soit efficace. Selon le rapport III.6, elle a cependant été suffisante dans certains cas.

Cette épaisseur de couverture est déjà de nature à augmenter les dimensions des éléments en béton armé des ouvrages maritimes. Elle s'applique aux superstructures aériennes comme aux infrastructures mouillées, car les armatures des parties aériennes sont aussi exposées à la corrosion que celles qui sont constamment humides, en raison du caractère corrosif de l'air marin et des embruns, ainsi que des effets de mouillages intermittents par les projections marines. L'épaisseur de couverture doit être suffisante non seulement sur les armatures principales, mais aussi sur les étriers ; d'une manière générale sur les armatures les plus externes.

Les dimensions des éléments en béton armé à la mer sont aussi majorées pour éviter des nappes et faisceaux d'armatures trop serrés, rendant difficile la bonne mise en place du béton et diminuant en tout état de cause sa compacité locale par effet de paroi, encore accentué par le même effet de la surface de coffrage voisine (ce qui milite encore en faveur d'une forte épaisseur de couverture).

Enfin tout ceci conduit à surdimensionner les éléments en béton armé des ouvrages maritimes par rapport au béton armé courant pour des raisons de résistance à la fissuration (voir rapport II.1). C'est assez dire que l'on n'envisage pas de leur appliquer la méthode récente du calcul à la rupture. On veut ici limiter les tensions en service pour éviter la fissuration du béton tendu. A l'usine marémotrice de la Rance (voir rapport II.1), on a limité les tensions d'extension du béton à 25 kg/cm² pour éviter la fissuration ; on a de plus limité à 10 kg/mm² la tension de l'acier calculée par la méthode classique dans les cas de sollicitation les plus défavorables. Il y a en fait correspondance entre ces conditions. Elles ont rappelé au rapporteur général sa première publication sur le calcul du béton armé dans les *Annales des Travaux Publics de Belgique* en 1924. Une étude parallèle y était faite entre le calcul classique dans l'hypothèse du béton fissuré et le calcul dans l'hypothèse du béton non fissuré, compte tenu toutefois de l'armature. Une table de correspondance permettait de déterminer d'emblée les tensions à respecter dans le calcul classique à béton fissuré pour satisfaire *ipso facto*

à la condition de non-fissuration du béton tendu. Cela revenait en fait à limiter la tension maximale de l'acier.

Ceci est compatible avec une concentration d'armatures assez faible. Les armatures seront cependant assez rigides et bien fixées, pour ne pas se déformer et se déplacer pendant la mise en place du béton. Ce résultat sera obtenu sans emploi de cales ou de ligatures métalliques effleurant ou dépassant le parement du béton qui constitueraient des amorces de corrosion.

On aura recours à des blocs ou tasseaux en mortier riche ou en plastique. (A noter en passant la proposition contenue dans le rapport I.3 de recourir à des armatures en plastique dans le cas de salinités aussi considérables que celle de la mer Morte). Le problème de la position correcte des armatures doit retenir autant l'attention que celui de leur protection dans le cas de béton coulé ou injecté sous eau.

De même que l'on aura recours à un ciment de même composition, surtout pour le béton armé, on aura recours aussi à des armatures en acier de même nature et de même origine, pour éviter les tendances à la corrosion qui pourraient résulter de différences caractéristiques entre les aciers (voir rapport I.1).

L'emploi du béton précontraint dans les ouvrages maritimes est relativement récent. Le rapport III.4 mentionne des ouvrages maritimes en béton précontraint, notamment en Sicile, dont la brève durée d'observation ne donne encore lieu à aucune constatation. Les indications du rapport font d'ailleurs croire que des précautions adéquates ont été prises en vue de leur durabilité. Bien que la précontrainte supprime le risque de la fissuration sous l'effet des sollicitations mécaniques, il n'est pas douteux que le souci de la protection des armatures et des ancrages métalliques contre la corrosion sous tension doit être poussé à l'extrême. Les impératifs de la qualité du béton à la mer s'accordent avec ceux du béton précontraint. En ce qui concerne la protection des armatures de précontrainte, les éléments préfabriqués et à précontrainte proprement dite paraissent poser le moins de problèmes. Pour ce qui est de la postcontrainte, en principe seuls les câbles logés dans des gaines intérieures sont admissibles et la perfection nécessaire de l'injection de ces gaines au moyen de mortier pose certainement des problèmes.

Le rapport III.8 suggère d'envelopper les câbles dans des gaines en matière plastique. Le procédé paraît praticable ; il y aurait lieu cependant d'en étudier le comportement au point de vue de l'adhérence ainsi que la nature des matériaux de remplissage des gaines à utiliser.

3.5. Surveillance du travail. Instruction du personnel

Le rapport II.3 souligne opportunément l'importance du contrôle et de la surveillance du travail et en détaille une organisation moderne et exemplaire. Au risque de faire double emploi avec le rapport général du thème II et en m'excusant auprès de mon éminent Collègue le Professeur Dr Inge LYSË, je ne puis me résoudre à ignorer cette question dans la présente tentative de synthèse, tant j'y attache personnellement d'importance. Elle ne prend d'ailleurs pour les travaux en béton à la mer qu'une importance relativement plus grande que pour d'autres moins exposés, mais elle est vraiment générale.

Quelles que soient les dispositions prises, les meilleures possibles, pour satisfaire aux conditions définies dans les paragraphes précédents et encore à d'autres plus communes et constituant ce que l'on appelle les règles de l'art, le résultat atteint sera cependant surtout dépendant de l'action de quelques hommes humbles et obscurs, ceux qui confectionnent le béton et ceux qui le mettent en place (outre les charpentiers de coffrage et les ferrailleurs monteurs dans le cas du béton armé, qui sont déjà des spécialistes qualifiés et plus considérés).

C'est là le point de danger du béton et l'on peut se demander si les praticiens y sont en général assez attentifs, si leur attention n'en est pas distraite par la confiance que confère une connaissance pseudo-scientifique du béton, par l'importance routinière attribuée aux calculs, ainsi que par le souci prédominant de la rapidité d'exécution.

Un rapport danois au Colloque international de la RILEM sur la « *Durabilité du Béton* » à Prague en 1961 évoquait la confiance très grande dans la durabilité des bétons manifestée dans les premiers temps de cette technique. Evoquant des souvenirs relatifs à des chantiers importants pour l'époque, que je fréquentais assidûment en 1910, dans mon rapport général au Colloque de Prague j'exprimais l'avis que cette confiance ancienne n'était pas aveugle, mais fondée sur les dispositions très rigoureuses et efficaces de surveillance et de contrôle auxquelles on avait recours et qui étaient placées sous la supervision permanente d'un technicien de formation universitaire.

Au Colloque international de la RILEM sur les « *Essais du béton sur chantier* », qui a eu lieu à Trondheim en octobre 1964, j'ai dans diverses interventions personnelles insisté sur la nécessité d'une qualification suffisante du personnel de contrôle et de surveillance. Mais je pense que cela n'est même plus suffisant dans la situation actuelle.

Le contrôle de 1910 était exercé par peu d'hommes qualifiés sur des hommes non qualifiés, dont on ne demandait que le temps, la bonne volonté et la force physique (notamment pour le malaxage manuel et le damage manuel).

Sauf que l'emploi actuel de machines permet d'aller beaucoup plus vite, je ne vois pas de progrès ; les bétonneurs restent en général des ouvriers peu ou non qualifiés et agissent comme des instruments peu ou non instruits (en général). Si l'on pense à l'importance et au développement pris par le béton et à ce qui en dépend, on ne peut s'empêcher de croire que cette insuffisante qualification des bétonneurs est une grande et étrange faiblesse dont le contrôle, même le plus organisé et le plus rigoureux, ne saurait prétendre éviter toutes les conséquences possibles.

Je suis donc d'avis que pour assurer la qualité totale requise par les travaux en béton à la mer, il est recommandable de recourir à une main-d'œuvre

non seulement formée, mais informée, instruite et rendue consciente de ce qui dépend de son travail. Si cela doit entraîner des conséquences économiques, elles doivent être considérées comme préférables à celles qui résultent d'échecs et qui peuvent être très lourdes. La qualification des bétonneurs peut être considérée comme une assurance efficace.

Pour conclure, il est permis de constater que l'ensemble des connaissances acquises sur le comportement des bétons à la mer est considérable. Il reste, on l'a vu, certains secteurs à explorer, mais plutôt du point de vue local ou géographique. Il n'est pas exclu que des recommandations de bonne pratique pour les bétonnages à la mer puissent être mises à l'étude comme suite au Colloque de Palerme.

Pour commencer, des conseils pourraient être formulés pour les recherches ultérieures à effectuer dans les milieux marins.

RÉFÉRENCES

A. Générales

On consultera utilement les publications du XVII^e Congrès international de Navigation à Lisbonne en septembre 1949 (Section II : Navigation maritime. II^e Communication : Constatations récentes et précautions à l'égard de la décomposition des mortiers et bétons dans l'eau de mer) et celles des Congrès ultérieurs de l'AIPCN. Egalement celles du Colloque international de la RILEM à Prague en août 1961 sur la Durabilité des Bétons.

B. Particulières

[1] *The durability of reinforced concrete in sea water*, National Building Studies, Research Paper n° 30, Londres, Her Majesty's Stationery Office, 1960.

[2] COYNE A. — *Le Pont en béton armé Albert-Loupe sur l'Elorn entre Brest et Plougastel*. Le Génie Civil, 4 octobre 1930.

[3] BERTRANDY R. — *Blocs de quai à Martigues*. Exemple d'une attaque par l'eau de mer d'un ouvrage en béton de ciment avec phénomène d'expansion. Publication technique n° 155 du Centre d'études et de recherches de l'industrie des liants hydrauliques, Paris, octobre 1963.

[4] LEWIS D.A., COPENHAGEN W.J. — *The Corrosion of reinforcing steel in concrete in marine atmosphere*. South African Industrial Chemist, vol. II, n° 10, octobre 1957.

[5] CAMPUS F. — *Corrosion du béton et des armatures*. IV^e Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes, Cambridge et Londres, 1952. Publication préliminaire.