

COMMISSION BELGE DU BÉTON ARMÉ

Section de l'A.B.E.M.

**EMPLOI DU BÉTON
POUR LES
OUVRAGES A LA MER**

par

Mr F. CAMPUS

Professeur Emérite, Pro-Recteur de l'Université de Liège

PROCÈS - VERBAL

de la séance tenue le 23 mai 1973,

à l'Hôtel Ravenstein, Bruxelles.

PROCÈS - VERBAL

de la séance de la COMMISSION BELGE DU BÉTON ARME,
tenue le 23 mai 1973, à l'Hôtel Ravenstein, à Bruxelles.

La séance est ouverte à 14 h 30

Présidence : Mr J. M. PAPPAERT.

ORDRE DU JOUR :

Communication de :

Mr F. CAMPUS, Professeur Emérite, Pro-Recteur de l'Université de Liège,
sur le sujet :

EMPLOI DU BÉTON POUR LES OUVRAGES A LA MER

Membres présents :

MM. F. ALMEY, A. BIRGUER, BLOMMAERT, F. BONNECHERE,
R. BULTINCK, COIRBAY, R. DE DEYNE, DE FRAIGNE, R. du BOIS
de BOUNAM, P. DUTRON, M^{lle} M. DZULYNSKI, MM. J. FOUARGE,
R. FOUGNIES, P. GODRIE, G.A. HOMES, A. HORMIDAS, M. LE
BEGGE, D. NEMEGEER, NOISZEWSKI, J.M. PAPPAERT, G. PAI-
RON, J.R. RICHELLE, V. VANDENBOSCH, G. WILLEMS.

Membres excusés :

MM. R. BAUS, E.E. DE BEER, A. FAGNOUL, P. GUIAUX, E. LAM-
BOTTE, Ch. MASSONNET, F.G. RIESSAUW.

La parole est donnée à M. le Professeur CAMPUS pour l'exposé de sa
communication.

UTILISATION DU BETON DANS LES OUVRAGES A LA MER

par

Ferdinand CAMPUS,

Professeur émérite, Pro-Recteur de l'Université de Liège
Ancien membre de la délégation de la Belgique à la Commission Internationale Permanente
de l'Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation.

1. ÉTUDES ET RECHERCHES MODERNES ET RÉCENTES.

Dès le commencement de l'ère des grands travaux du génie civil et dès le début de l'emploi moderne des bétons de liants hydrauliques dans les ouvrages en mer, la nécessité est apparue d'étudier la résistance des liants hydrauliques à la décomposition par l'eau de mer et le comportement des bétons à la mer.

C'est l'ingénieur des ponts et chaussées Louis Vicat (1786-1861) qui fut l'auteur des premières études et recherches scientifiques. Leur couronnement fut son maître ouvrage publié en 1858 vers la fin de sa vie : « Recherches sur les causes chimiques de la destruction des composés hydrauliques par l'eau de mer et sur les moyens d'apprécier leur résistance à cette action ». J'ai rappelé dans ma contribution à l'ouvrage commémoratif publié à l'occasion du centenaire de la mort de Vicat [1] qu'il avait exposé dans ce mémoire tous les principes que d'innombrables travaux ultérieurs de recherche, dont beaucoup sont récents, devaient confirmer en les précisant, grâce au progrès général des connaissances. L'ouvrage de référence [1] contient une bibliographie complète des travaux de Vicat.

La thèse de 1887 du chimiste Henri Le Châtelier et ses travaux ultérieurs, notamment ses « Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques » (Dunod, éd., Paris, 2^e édit., 1904) apportèrent des progrès scientifiques importants du point de vue chimique. D'autre part, la publication en 1892 de l'ingénieur des Ponts et Chaussées René Feret : « Sur la compacité des mortiers hydrauliques » (*Annales des Ponts et Chaussées*, juill. 1892, Paris) est à l'origine de toutes les études sur la composition des bétons et sur le rapport eau : ciment qui constituent les éléments les plus importants déterminant le comportement des bétons à la mer. Vicat l'avait déjà compris et indiqué dans ses ouvrages.

Il n'est pas possible d'énumérer la masse des études, recherches et publications récentes sur les ciments, les mortiers et les bétons hydrauliques, même en se limitant à leur comportement dans l'eau de mer, aspect qui est rarement absent dans les études fondamentales sur ces sujets. On se bornera à rappeler les initiatives de l'A.I.P.C.N. concernant la connaissance du comportement des bétons dans la mer et celles plus récentes qu'elle a patronnées.

Après ceux de 1908, de 1912 et de 1923, le XV^e Congrès International de Navigation à Venise en 1931 traitait le thème : « Applications du béton et du béton armé dans les ouvrages intéressant la navigation maritime. Conservation de ces ouvrages dans l'eau de mer ».

Sous le titre : « Constatations récentes et précautions nouvelles à l'égard de la décomposition des mortiers et bétons dans l'eau de mer », l'A.I.P.C.N. avait à nouveau inscrit le sujet au programme de son XVII^e Congrès qui devait avoir lieu à Berlin en 1940 et dont la tenue fut rendue impossible par la guerre. Le thème fut conservé au premier congrès d'après la guerre, le XVII^e Congrès International de Navigation à Lisbonne en 1949, sous le même intitulé. Le rapport général de M. A.M. Fernandes, ingénieur en chef du Laboratoire du génie civil de Lisbonne, était bien étudié et clairement rédigé. Ses conclusions sont, à quelques détails près, restées valables en général.

Le thème fut repris à nouveau, sous une forme plus étendue toutefois, au XVIII^e Congrès International de Navigation à Rome en 1953, sous le titre : « Lutte contre les attaques que subissent les divers matériaux constituant notamment les parties inférieures des ouvrages d'accostage à grande profondeur ».

Après que le comportement des ouvrages en béton dans la mer eût ainsi, à diverses reprises assez rapprochées, fait l'objet des travaux des Congrès Internationaux de Navigation, le relais fut pris par un organisme international nouveau, la « Réunion internationale

des laboratoires d'essais et de recherches sur les matériaux et les constructions (R.I.L.E.M.) ». Elle organisa en mai 1965 à Palerme, sous le patronage de l'A.I.P.C.N., un colloque international dont le thème était : « Comportement des bétons exposés à l'eau de mer ». Les rapports généraux ont été publiés en anglais et en français [2] ; ensuite tous les rapports ont été publiés en français [3].

L'Organisation de Coopération et de Développement Economique (O.C.D.E.), siégeant à Paris, avait constitué un « Groupe exploratoire pour la protection du béton en milieu marin », dans l'intention d'élaborer un programme international d'essais sur la tenue des ciments et des bétons dans la mer. Ce groupe tint une réunion à Paris le 19 avril 1967, à laquelle la R.I.L.E.M. avait été priée de se faire représenter. A la suite de ce contact, l'O.C.D.E. renonça à ses intentions et confia à la R.I.L.E.M. la mission de poursuivre l'étude de la question. A cette fin, la R.I.L.E.M. décida d'abord en 1968 de procéder à une enquête internationale sur les recherches en cours et sur les règles en vigueur concernant l'emploi des bétons pour les ouvrages à la mer. Elle fut effectuée à l'intervention de ses délégués dans la plupart des pays du monde et avec l'assistance de l'A.I.P.C.N. Le rapport sur les résultats de cette enquête a été publié en anglais et en français [4].

La résistance des bétons à l'eau de mer a aussi fait l'objet de quelques rapports au Premier colloque international sur la durabilité des bétons à Prague en 1961, sous les auspices de la R.I.L.E.M. Elle n'était pas directement traitée dans un Deuxième colloque international sur le même sujet à Prague en 1969, également sous les auspices de la R.I.L.E.M. [5].

Dans les publications des congrès précités de l'A.I.P.C.N. et dans les références bibliographiques [2] à [5], on trouvera un ensemble de communications sur le comportement des ciments et des bétons dans la mer ainsi qu'une documentation bibliographique étendue et récente, particulièrement dans [4].

Que peut-on conclure de cette abondante littérature et de cette documentation ? Il me semble intéressant de reproduire à ce sujet un alinéa d'une lettre de janvier 1969 par laquelle un correspondant canadien transmettait sa réponse à l'enquête internationale de la R.I.L.E.M. mentionnée plus haut. Il écrivait :

« Incidental to the field observations, study of specifications and maintenance records, I had the opportunity to review the papers of the 1965 Palermo Conference (R.I.L.E.M.) and some 1917 reports of a rather extensive study by Mr. R.J. Wigs, of the U.S.

Bureau of Standards, and Mr. L.R. Ferguson, of the Portland Cement Association. I found little to suggest that, in practical terms, much more was understood or at least being practised in this field in 1965 regarding the causes, effects and remedial measures than was the situation in 1917. »

Ne connaissant pas les références de 1917, il m'est difficile d'interpréter exactement cette opinion très franchement exprimée, mais je crois certes trop sévère au sujet des communications du colloque de Palerme. L'emploi de deux langues comme dans tous les colloques de la R.I.L.E.M. peut être une cause d'incompréhension. Cette opinion a pourtant le mérite de montrer qu'aux yeux des praticiens, la question du comportement des ciments et des bétons à la mer peut apparaître comme une bouteille à l'encre.

Les personnes qui s'expriment le plus sur la résistance des ciments, des mortiers et des bétons hydrauliques aux actions marines sont des chimistes, qu'ils soient actifs dans les laboratoires des cimenteries, ou dans ceux des groupements de cimenteries ou encore dans les universités, souvent en rapport avec l'industrie du ciment. Par suite de la complexité des phénomènes chimiques en cause et des multiples circonstances qui influent sur leurs manifestations, ces spécialistes alimentent le plus la littérature en question. Mais on constate qu'il s'agit généralement d'études *in vitro*, rarement d'observations *in situ* et, dans ces cas, la qualité du béton n'est le plus souvent pas définie.

Indépendamment de ses autres qualités d'esprit, qui lui ont permis d'être le promoteur de l'industrie moderne du ciment, Vicat était un ingénieur et un constructeur, ce qui lui a fait comprendre d'emblée, dans les conditions de son temps, la solution de la question de l'utilisation des bétons à la mer.

Cette solution a été exprimée récemment en ces termes par Bryant Mather, Supervisory Research Civil Engineer, Chief Engineering Sciences Branch, Concrete Division, U.S. Army Engineers Waterways Experimental Station, Jackson, Mississippi [6], dans le résumé introductif à une étude très concluante :

« Concrete exposed to seawater is wetted by a solution of salts-principally sodium chloride and magnesium sulfate. Damage to concrete, if it occurs, usually results from failure to use good practices in concrete construction and often is the result of freezing and thawing or wetting and drying, as much as or more than the results of the effects of seawater as such. Magnesium sulfate may attack most, if not all of the constituents of hardened portland cement paste,

especially the aluminate constituent ; chlorides may promote corrosion of steel ; alkalies may participate in alkali-aggregate reaction. Thus, concrete exposed to seawater should be made of cement of controlled aluminate content and with non reactive aggregate ; embedded steel should be well covered by concrete of low permeability and good construction practices should be followed. »

On peut souscrire à ce raccourci substantiel, à quelques détails près.

Cependant, l'ère des recherches ne paraît pas close. Si l'O.C.D.E. y a renoncé pour sa part, elle a passé le relais à la R.I.L.E.M., qui projette de constituer une commission pour l'étude du comportement des bétons à la mer.

Les rapporteurs de l'enquête internationale de 1970 avaient conclu, en conformité avec un souhait de l'O.C.D.E., qu'il serait utile et opportun de définir un essai normalisé permettant d'apprécier, dans un délai ne dépassant pas un an, la résistance spécifique d'un ciment hydraulique quelconque au sulfate de magnésium en solution ou à l'eau de mer artificielle ou naturelle.

On ne peut cependant perdre de vue que la résistance du béton aux actions marines n'est pas une question élémentaire. Ni la mer, ni le ciment, ni le béton ne sont des éléments simples ; leur variabilité est grande. En pratique, il n'est pas permis d'avoir sur l'eau de mer en un lieu des notions générales non déterminées ; il n'est pas permis non plus de se fier à des notions commerciales pour apprécier la convenance d'un ciment ; enfin de mettre en œuvre un béton à tous usages.

2. LA MER.

L'eau marine de salinité moyenne est, par sa composition, un milieu modérément agressif. Elle ne produit des altérations importantes des bétons que lorsqu'elle peut y pénétrer profondément et intimement. Son action destructrice est fortement aggravée par des actions climatiques dangereuses pour le béton par elles-mêmes, telles que l'alternance de gel et de dégel du béton saturé d'eau de mer, ou encore l'alternance d'imbibition et de dessiccation. Ce dernier phénomène se produit surtout dans les mers chaudes à flottaison peu variable, par l'ascension capillaire de la solution marine suivie d'évaporation superficielle de cristallisation qui provoquent une expansion et un écaillage progressif de la surface du béton.

Les sauvegardes contre toutes ces actions résident dans la compacité totale du béton ainsi que dans l'imperméabilité et l'impénétrabilité de sa surface.

Si les eaux sont incrustantes, ce qui est assez fréquent, des incrustations de carbonatation et biologiques augmentent encore l'impénétrabilité de la surface, au bénéfice de la protection des armatures.

En concordance avec ce qui précède, le risque de dégradation est le moindre pour le béton immergé en permanence à quelque profondeur, de manière à être dans un milieu peu variable et soustrait aux actions atmosphériques. Les attaques majeures se produisent dans la zone de marnage ou, dans les mers assez chaudes et sans marée, au voisinage et au-dessus de la flottaison moyenne. Enfin les éléments non mouillés sont exposés à la corrosion des armatures en raison des projections d'eau de mer, des embruns et de l'atmosphère marine en général.

La salinité de la mer peut varier beaucoup. La Baltique est quasiment un lac d'eau douce, moins salée que l'eau de certains estuaires. Les conditions climatiques, hydrographiques et océanographiques varient aussi fortement selon les régions. Tous ces éléments ont une influence considérable sur la tenue des bétons dans les mers.

Le long des côtes des pays industrialisés de l'hémisphère nord, ces éléments aléatoires sont assez bien connus. L'ouvrage de O.E. Gjrv [7], publié sous les auspices du Comité norvégien sur le béton dans l'eau de mer, contient d'excellentes indications sur les données statistiques utiles à l'ingénieur en charge d'ouvrages maritimes. Que l'exemple vienne de Norvège se comprend par la grande étendue relative de ses côtes en rapport avec la superficie du territoire (même sans tenir compte des fjords) et des grandes variations des conditions naturelles sur leur étendue.

Dans ces pays, les projeteurs et les constructeurs pourront donc et devront toujours être suffisamment informés des circonstances marines locales. Pour d'autres pays, dont le développement maritime est probable et où il est à prévoir que de nombreux ouvrages maritimes seront construits à l'avenir, il arrivera que les projeteurs et les constructeurs auront à déterminer au préalable les caractéristiques marines locales ou à perfectionner leur connaissance, en vue de permettre l'établissement de projets adéquats. Dans un rapport général au Colloque international de Palerme [2] [3], j'ai suggéré qu'il serait utile d'établir un guide sommaire ou une instruction pour de telles études. L'A.I.P.C.N. est l'organisme le mieux à même d'y procéder, avec le concours d'hydrographes et d'océanographes.

Concernant l'action globale de la mer sur le béton il faut :

- a) une connaissance statistique des variations de la salinité d'au moins une année ;
- b) une connaissance statistique du climat d'au moins un à trois ans, selon la variabilité, y compris la température de l'eau et le régime des vents ;
- c) une connaissance statistique des marées, des courants et des mouvements de la mer (houles, vagues, ressac) ;
- d) des relevés hydrographiques des profondeurs et de la nature des fonds, des sédiments charriés ou mis en mouvement et l'appréciation des risques correspondants d'abrasion ;
- e) des indications sur l'activité biologique dans les eaux marines et le caractère incrustant ou non de ces eaux (cf. communication de A. de Sousa Coutinho et F.M. Peres Rodrigues dans la référence [3]).

3. LE BÉTON.

Il est usuel de traiter du béton au singulier comme si c'était un corps défini. Or, il possède une très grande variance. Le fait qu'à partir d'une certaine époque il soit devenu soi-disant un objet de science n'a pas diminué cette variance ni amélioré la qualité. Or, comme l'indique Bryant Mather, la résistance du béton à la mer est toujours et essentiellement une question de qualité. La mer est tout simplement un juge toujours sévère et parfois inexorable de cette qualité. C'est la raison pour laquelle l'U.S.A. Army Corps of Engineers a établi sa station de vieillissement naturel sévère à Treat Island [4], dans un site où les effets chimiques de l'eau marine, un marnage important, des variations sévères de température (gel ou dégel) et les actions mécaniques de la mer exercent des actions mutuellement renforcées et réalisent ainsi ce que l'on peut appeler une station de vieillissement naturel accéléré. On y trouve en effet réunis naturellement les moyens des procédés de vieillissement artificiel accélérés, tels que le brouillard salin, les cycles de gel et de dégel, les cycles d'immersion et d'émersion, etc.

Dans son mémoire précité, B. Mather évoque le premier ouvrage maritime britannique construit à Southampton en 1899 au moyen d'un béton très sec ; il est toujours en excellent état. Un autre ouvrage construit en 1902 dans le même port avec du béton « plutôt mouillé » [6] s'est mal comporté. On peut citer aussi l'exemple contemporain du môle de Zeebrugge, construit de 1897 à 1905. On sait que cet ouvrage souffrit beaucoup pendant les deux guerres, mais non de l'action de l'eau de mer. Lors des travaux de reconstruction en 1946-1948, il a fallu détruire plus

de 15.000 m³ de béton en recourant aux explosifs [8], tellement il était dur et bien conservé.

A ce propos, je puis évoquer des souvenirs personnels au sujet d'ouvrages importants en béton armé construits vers 1909, non exposé cependant à l'eau de mer, mais dont on attendait une grande durabilité dans des conditions urbaines.

La composition était très soigneusement étudiée par la méthode la plus scientifique des volumes et des poids des constituants, mesurés au moyen des appareils très précis que sont les balances, les poids et les volumes tarés. René Feret avait déjà publié ses travaux fondamentaux sur la compacité des mortiers et des bétons.

Les granulats étaient constitués de gravier très propre et d'un calibre assez uniforme (20 à 30 mm) et d'un sable quartzueux de rivière, également très propre et bien calibré (0,5 — 3 mm). A l'époque, on appelait ces granulats en Belgique gravier et sable du Rhin. Ils faisaient l'objet de réceptions attentives.

La composition bien définie et contrôlée avait pour objet de remplir de mortier les vides du gravier, avec un léger excès. Dans le mortier, tous les vides du sable étaient remplis de même pâte fraîche de ciment, avec un léger excès. Pour le béton armé, la quantité de ciment était de 350 kg de ciment par m³ de béton, mouillé de moins de 140 litres d'eau. La confection du béton était strictement surveillée.

Ce béton était très sec, mais il contenait plus d'eau qu'il était nécessaire pour hydrater complètement le ciment. On sait qu'une addition d'eau en poids de 28 % en moyenne produit une pâte fraîche de ciment appelée pâte normale et déjà assez molle ; une faible addition supplémentaire d'eau la rend très fluide. Ce béton était damé par couches de 0,10 m d'épaisseur jusqu'à reflux d'eau, au moyen de dames en fonte que les ouvriers dameurs soulevaient et laissaient retomber librement. Ce damage était rigoureusement surveillé. Les dameurs étaient soumis à une agréation par l'ingénieur dirigeant, qui pouvait à tout moment retirer cette agréation. La qualité du béton était contrôlée au moyen de cubes témoins. Un petit laboratoire de réception des granulats et des ciments était établi sur le chantier ; les cubes de béton étaient essayés dans un laboratoire officiel.

L'enrobage convenable des armatures du béton armé était assuré par le fait que l'écartement des barres parallèles entre elles et leurs distances aux coffrages étaient nettement supérieures aux dimensions des plus gros granulats. De la sorte on évitait le tamisage du béton par les armatures et l'on permettait

l'efficacité du damage, sans risque de déplacement des barres, qui étaient bien fixées à leurs positions requises. Le ferrailage faisait l'objet d'une réception sérieuse avant le bétonnage.

Le contrôle et la surveillance étaient effectués par des agents compétents, dirigés par un chef ayant reçu une formation supérieure.

Des rapporteurs danois du Premier Colloque R.I.L.E.M. de 1961 sur la durabilité du béton [5, A] exprimaient de la surprise au sujet de la confiance que les premiers constructeurs d'ouvrages en béton armé avaient dans leur durabilité. Mais cette confiance est justifiée par le fait que l'expérience encore récente engendrait un vif sentiment de responsabilité, qui suscitait des précautions très adéquates et efficaces, aussi pour la cure.

Le rapport eau-ciment n'était pas inconnu, mais il n'en était pas fait état parce que l'on n'admettait que le plus faible possible. Il n'était pas non plus question de facilité de mise en œuvre (le terme « workability » était inconnu) parce que l'on exigeait une mise en œuvre parfaite d'un béton non facile à mettre en œuvre. Dans cet esprit, une addition d'eau pour rendre la mise en œuvre plus facile en augmentant le facteur eau : ciment constituait une infraction. Le cône d'Abrams et la table à secousses n'étaient ni nécessaires ni compatibles avec cette technique. Leur introduction sur les chantiers a conduit à une diminution rapide de la qualité des bétons, tout comme le premier effet de la diffusion de la notion du rapport eau : ciment a été l'emploi du béton liquide mis en place par coulage dans des goulottes à partir de tours à béton. Le système a même été utilisé pour la construction de grands barrages de réservoirs, avec des conséquences parfois funestes.

Le damage pneumatique n'a pu sauver le béton très sec d'avant la première guerre mondiale. La vibration, sous toutes ses formes, est arrivée trop tard à cet effet, mais elle a certes amélioré la situation.

La bonne composition d'un béton permet la réalisation d'un béton de qualité, mais celle-ci n'est assurée en fin de compte que par le soin de la mise en œuvre et un haut degré de compaction. Or, les procédés d'exécution des ouvrages en béton ont progressé dans des temps récents dans le sens de la productivité, c'est-à-dire de la vitesse et de la quantité, plutôt que dans le sens de la qualité. Certains de ces procédés sont à rejeter pour les ouvrages à la mer, tels que la mise en place du béton par pompage ou par pulsion à l'air comprimé, ou la manipulation du béton par des bennes à grappins avec chute libre. Pour éviter l'excès

d'eau et le démélange, il est recommandable de mettre le béton en place par des bennes à ouverture latérale déposant sans chute le béton d'apport sur celui déjà en place.

Le Conseil des ports nationaux du Canada [4] introduit dans ses cahiers des charges une utile prescription. Lorsque l'installation du chantier de bétonnage est terminée, plus de sept jours avant le commencement réel des bétonnages, des mélanges d'essai sont effectués en vraie grandeur dans les conditions exactes prévues pour la mise en œuvre. Des éprouvettes de contrôle sont prélevées et essayées à sept jours. L'approbation des dispositions et l'autorisation de commencer les travaux dépendent des résultats de ces essais.

La préfabrication des éléments en béton pour les ouvrages à la mer présente les deux avantages suivants :

- 1) Mise en contact du béton avec l'eau de mer à un âge assez avancé. Le comportement d'un béton à la mer est influencé par le degré de durcissement qu'il présente lorsqu'il est exposé à l'eau de mer. Le comportement dépend en quelque sorte d'une lutte de vitesse entre l'attaque progressive et la résistance croissante du béton avec l'âge. Il y a donc avantage pour le béton à n'être mis en contact avec l'eau de mer qu'à un âge assez élevé.
- 2) La confection sur un chantier équipé et organisé d'éléments préfabriqués : blocs massifs ou cellulaires, caissons, supports, etc. permet une confection et une mise en œuvre du béton conférant une meilleure qualité au produit fini. Il faut une cure adéquate des produits pour éviter des fissures de dessiccation et de retrait pendant le stockage.

In situ, la question du bétonnage par temps froid est à prendre en très sérieuse considération, attendu que le durcissement est alors ralenti et, par voie de conséquence, la résistance à l'agression marine.

En accord avec les observations de Bryant Mather résumées plus haut, on doit donc recommander pour les bétons exposés à l'eau de mer l'emploi de granulats de bonne qualité, propres, bien calibrés, non réactifs et non gélifs, permettant de réaliser, par une bonne composition et avec une quantité suffisante mais modérée de ciment, un béton qu'une mise en œuvre soignée voudra très compact, pratiquement imperméable et impénétrable.

La réalisation de la qualité finale du béton par le labeur humain, le contrôle et la surveillance comme avant 1914 est reléguée dans les souvenirs du passé. Actuellement, la qualité doit être obtenue par la

mécanisation et l'organisation, accompagnées naturellement de formes adéquates de contrôle et de surveillance. Le pesage automatique et enregistré sur les grands chantiers devrait permettre le contrôle global de la compacité moyenne de grands éléments de béton dont on connaît le volume. Cela ne paraît cependant guère usité.

4. LE CIMENT.

L'expérience prouve qu'il existe des ciments qui sont pratiquement inattaqués par l'eau marine, même en immersion et émergence alternées (exposition à mi-marée), augmentées de variations climatiques assez sévères et d'effets hydrodynamiques et biologiques marins. C'est ce que l'on peut conclure de la bonne tenue dans la mer d'éprouvettes de $4 \times 4 \times 16$ cm de mortier maigre composé de 300 kg de ciment pour 1.500 kg de sable [8] (voir aussi dans [3] « Constatations effectuées après trente années d'immersion marine d'éprouvettes de mortiers, de bétons et de bétons armés dans la mer du Nord à Ostende », par F. Campus, R. Dantine et M. Dzulynski). Les ciments qui ont résisté aux effets de la mer dans ces expériences sont trois ciments métallurgiques à haute teneur en laitier et faible teneur en chaux, un ciment sursulfaté et un ciment alumineux fondu.

Un ciment de haut fourneau peu riche en laitier et contenant trop de chaux et deux ciments portland, dont un même additionné de trass, n'ont pas résisté. Les éprouvettes correspondantes ont été rapidement très dégradées, alors que celles des autres ciments étaient pratiquement intactes après trente années d'exposition à mi-marée. Cependant, les deux ciments portland avaient une proportion calculée de C^3A nettement inférieure à la limite maximum de 8 % stipulée dans les normes américaines pour les ciments à utiliser dans la mer [8].

Il est à remarquer que tous ces ciments ont résisté à l'exposition marine à mi-marée pendant trente ans dans des barrettes de $4 \times 4 \times 16$ cm de mortiers de 600 kg de ciment pour 1.500 kg de sable. Les ciments les moins résistants se reconnaissaient seulement à l'épaufrage des arêtes et des coins.

Les éprouvettes de mortier 1 : 5 en poids (environ 1 : 5,85 en volumes absolus) sont très poreuses ; elles mettent en évidence la résistance intrinsèque des ciments à l'action de l'eau de mer.

Les éprouvettes de mortier 1 : 2,5 en poids (environ 1 : 2,92 en volumes absolus) sont à la limite de la compacité totale. Leur comportement établit l'effet prépondérant de la compacité de l'imperméabilité et

de l'impénétrabilité dans la résistance des mortiers et des bétons à l'action de la mer.

L'enquête internationale de la R.I.L.E.M. [4] a montré que le choix des ciments pour les ouvrages en béton exposés aux actions marines est sous la dépendance de l'état de l'industrie cimentière. Dans de nombreux pays elle ne produit que du ciment portland et on y a recours pour les bétons exposés aux actions marines moyennant une limitation de la proportion d'aluminate tricalcique (symbole C^3A) dans la composition minéralogique calculée (Etats-Unis d'Amérique, Canada, Norvège, etc.).

Dans les pays d'Europe occidentale, formant le premier noyau de la Communauté Economique Européenne (Belgique, France, Italie, Pays-Bas, République fédérale allemande), l'industrie cimentière produit des ciments hydrauliques diversifiés, dont certains sont spécialement appropriés pour les ouvrages maritimes. On y considère comme ciments résistant à l'eau de mer dans les conditions de ces pays :

- 1° des ciments portland artificiels à très faible teneur calculée de C^3A , moins de 2 % par exemple ou quasi nulle ;
- 2° des ciments métallurgiques contenant plus de 70 % de laitier granulé basique de haut fourneau sélectionné, très actif malgré une faible teneur relative en chaux. Le clinker doit être de qualité adéquate ;
- 3° des ciments spéciaux tels que le ciment sursulfaté, le ciment alumineux fondu, etc. dont l'emploi demande d'ailleurs des précautions.

Il est à noter que les ciments métallurgiques ne sont pas recommandables pour les bétonnages d'hiver. Par référence à une remarque vers la fin du paragraphe précédent, dès que la température ambiante sera inférieure à 5 °C, les bétonnages ne pourront être poursuivis que moyennant des précautions suffisantes pour que la température du béton ne tombe pas en dessous de cette valeur, notamment à la surface. C'est en effet par la surface que s'exerce l'attaque marine ; sa résistance ne peut être affaiblie.

D'après ce qui précède et d'après le paragraphe relatif au béton, l'emploi d'un ciment réputé résistant aux actions marines ne peut être considéré indépendamment de la haute qualité requise du béton. Il ne permet pas de relâchement dans les précautions destinées à assurer cette haute qualité. Mais ces précautions ne peuvent exclure la possibilité de défaillances accidentelles. La qualité du ciment est moins aléatoire que celle du béton. Pour rendre aussi négligeables que possible les conséquences des défauts accidentels, il faut recommander l'emploi de ciments qui sont effectivement pas ou peu attaqués chimiquement par l'eau

de mer. L'emploi de ciments ne possédant pas cette relative immunité est plus aléatoire et l'observation montre que les ouvrages qui en contiennent présentent souvent des dégradations superficielles, même s'ils ont un comportement d'ensemble satisfaisant (fragilité des arêtes et corrosion des armatures).

Dans les pays de production des ciments destinés aux travaux maritimes, ils font l'objet de spécifications particulières supplémentaires aux normes générales et qui sont de rigueur pour les réceptions. Parfois le produit industriel est l'objet d'une agréation préalable, comme en France, selon des dispositions définies et approfondies ; elle permet une simplification des réceptions. L'emploi de ces ciments peut aussi exiger une certaine expérience des entrepreneurs.

Pour l'emploi hors du pays de production, la capacité de résistance à l'attaque marine ne peut pas être considérée comme garantie par des définitions générales ou commerciales des ciments d'importation. Il ne suffit pas, par exemple, qu'un ciment soit appelé métallurgique pour qu'il soit approprié pour les ouvrages maritimes. Sa mise en œuvre peut aussi être inexpérimentée ou bien les conditions climatiques peuvent ne pas convenir à l'emploi (pays froids pour les ciments métallurgiques). En cela peuvent résider les causes d'échecs d'essais qui ont été faits au moyen de tels ciments en comparaison avec les ciments portland indigènes en Norvège. Ces échecs n'ont qu'une signification circonstancielle et non générale.

En ce qui concerne la quantité de ciment par m³ de béton, pour les ouvrages non armés, on ne descendra pas en dessous de 275 kg de ciment pour environ 1.250 kg de gravier 10-30 mm et 690 kg de sable 0,2-2 mm. Avec 160 litres d'eau au maximum, une telle composition permet la confection d'un béton déjà assez compact. La proportion en poids de ciment ne doit pas être inférieure à 0,40 fois le poids du sable bien gradué. Pour le béton armé, il faudra 350 kg de ciment pour 1.250 kg de gravier 5-20 mm et 630 kg de sable 0,2-2 mm, de préférence pas plus de 140 litres d'eau [2] et [3], rapport général, thème III.

Pour un ouvrage récent aux Pays-Bas [4], des blocs de revêtement de 1,70 à 2,55 m de côté sont confectionnés au moyen d'un béton dont la granulation va de 0,1 à 150 mm, selon une pratique déjà usitée pour les grands barrages massifs. Ces blocs sont confectionnés sur un chantier avant immersion. La quantité de ciment est réduite à 225 kg par m³ de béton, la quantité de sable est réduite davantage. Le ciment est d'un type résistant à l'action marine. Pour le béton armé, il est recommandable de ne pas utiliser de granulats d'un calibre supérieur à 30 mm.

5. PROTECTION DES ARMATURES.

La corrosion des armatures par le chlorure de sodium de l'eau marine est certes le phénomène le plus fréquent de dégradation des ouvrages maritimes en béton armé. A ces dommages on peut en général appliquer la remarque de B. Mather qu'il s'agit de conséquences de malfaçons. L'expérience prouve qu'il n'est pas difficile de protéger efficacement les armatures de la corrosion par l'eau de mer. B. Mather en rappelle des exemples américains remarquables [6], concordant avec les résultats des expériences relatées dans [9].

Les armatures seront protégées de la corrosion marine si elles sont recouvertes d'une épaisseur suffisante et non excessive d'un béton compact et imperméable. On peut considérer comme épaisseur suffisante la plus grande des trois valeurs suivantes, mesurées à l'extérieur des étriers et des ligatures éventuelles :

- a) deux fois le diamètre de la plus grosse armature voisine de la surface ;
- b) deux fois la dimension des plus gros granulats ;
- c) 40 à 50 mm (1 3/4 à 2 pouces).

Dans certains pays, on prescrit un minimum de 3 pouces, voire de 4 pouces près des arêtes. De telles épaisseurs de recouvrement sont excessives. Elles produisent un risque de fissures perpendiculaires aux armatures par des tensions de traction élevées dans le béton si les armatures subissent des tensions de valeur usuelle. Elles n'assurent pas une protection efficace si le béton de recouvrement n'est pas de bonne qualité.

Pour permettre une bonne protection des armatures, il est indispensable que l'entredistance des barres parallèles soit nettement supérieur aux dimensions des plus gros granulats, de manière à réduire l'effet de tamisage du béton par le ferrailage. Elles doivent être inébranlablement maintenues dans les positions prévues aux plans, afin de ne pas pouvoir être déplacées sous l'effet de la mise en place du béton et de sa compaction.

La protection des armatures dépend essentiellement de la qualité du béton de surface et de l'impénétrabilité de cette surface. On recommande pour les éléments en béton armé exposés à l'eau de mer l'emploi de coffrages métalliques lisses et très rigides, permettant une vibration des coffrages complétant la pervibration. Les bétons très secs bien dosés produisent ainsi des faces de décoffrage très lisses et très compactes, sans couche de laitance poreuse très attaquable. Ces surfaces compactes et impénétrables favorisent la formation d'incrustations de carbonatation et biologiques.

Si les corrosions d'armatures sont des dégradations très fréquentes, elles ne sont pas dangereuses si l'on procède assez tôt aux réparations.

6. PRÉCAUTIONS CONTRE L'INTRODUCTION DES SELS DANS LE BÉTON.

Il s'agit surtout des chlorures susceptibles d'attaquer les armatures. Pour les bétons à la mer, il faut exercer une très grande prudence pour l'emploi d'adjuvants ; l'addition de chlorures n'est pas recommandable. On peut se référer aux règles en vigueur dans certains pays d'Europe occidentale au sujet de l'emploi du CaCl_2 pour les bétonnages d'hiver. On admet en général pour le béton armé une addition maximale de 2 % en poids du ciment de CaCl_2 hydraté commercial dissous d'une manière uniforme dans l'eau de malaxage. Toute addition de cette nature est prohibée pour le béton précontraint.

Dans leur réponse à l'enquête internationale de la R.I.L.E.M. [4], les correspondants de l'Union sud-africaine font mention de recommandations récentes très strictes pour éviter l'introduction de sels marins, surtout des chlorures dans le béton par les granulats, les armatures et par l'eau de malaxage. L'emploi de sable marin est subordonné à un lavage de dessalement. L'emploi d'eau de mer est interdit.

La question n'est pas dépourvue d'importance et il faut veiller sur les chantiers à protéger les dépôts de granulats contre l'accès de l'eau de mer, contre les embruns et le sable marin transporté par le vent, etc. Les dépôts seront établis en des endroits bien protégés et constitués de manière à éviter la contamination des matériaux, notamment des armatures. S'il en résulte une augmentation des frais de manutention et de transport, il faut considérer cela comme une prime d'assurance.

L'emploi d'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Si l'on ne peut procéder autrement, il faut veiller à ce que cette eau soit du moins propre. Les polluants de diverses natures des eaux littorales pourraient être plus délétères pour le béton que les sels naturels. Si le béton est par ailleurs de très bonne qualité, les sels introduits par l'eau de malaxage ne provoquent pas de corrosion des armatures ni d'attaque du béton. Celle-ci provient de l'action extérieure incessante de la mer et de sa pénétration progressive et permanente, avec altération et enlèvement de composants du ciment. En cas d'obligation d'emploi d'eau de mer pour le béton armé, on peut augmenter la quantité de ciment à 400 kg par m^3 et on emploiera le moins d'eau possible. Les prescriptions sud-africaines limitent la quantité d'eau douce à 184 litres par m^3 ; pour l'eau de mer, il serait préférable de ne pas dépasser 160 litres.

Le béton déposé dans l'eau marine contrevient certes aux recommandations générales résumées par B. Mather ; il faut donc l'éviter. Si l'on est obligé d'y recourir, pour éviter de grands déboires, il faut une organisation, un matériel et une expérience éprouvés. Un contrôle préalable de la mise en œuvre selon les prescriptions canadiennes citées au paragraphe III est indispensable dans ce cas. Selon M. Gjorv (Norvège) [7], le béton déposé sous eau doit contenir 400 kg de ciment par m^3 . Les mouillages doivent être tels que l'affaissement au cône soit de 15 à 18 cm. Les prescriptions canadiennes sont concordantes. Il s'agit donc d'un béton très mou, assez mouillé, qui sur ce point aussi ne satisfait pas aux recommandations de qualité.

Au Canada comme en Norvège, on préconise la mise en place du béton sous eau par un tube de descente vertical surmonté d'une trémie tronconique et qui est tenu constamment plein de béton, de telle manière qu'il n'y ait pas de chute de béton dans l'eau ni de pénétration d'eau de mer dans le tube. Ce procédé est certes préférable à l'emploi de bennes descendues dans l'eau, qui produisent une grande agitation et la formation de laitance.

Un mur de quai important a été réalisé récemment avec succès à Zeebrugge (Belgique) par injection de mortier dans un magma de gravier de gros calibre, uniforme déposé sous eau. Le mortier fortement broyé était injecté en remontant, de manière à refouler l'eau de mer vers le dessus. Pour une telle pratique, le calibre des pierrailles, concassées de préférence, n'est pas inférieur à 60 mm. Le béton mis en place par trémie et tube sera constitué d'éléments roulés ne dépassant pas 25 mm.

Les imperfections inhérentes au béton mis en œuvre sous eau trouvent une compensation dans le fait que les parties d'ouvrages constamment immergées dont il s'agit sont relativement peu exposées. Une exécution soignée peut donc donner des résultats satisfaisants.

Le bétonnage à marée, c'est-à-dire effectué dans la zone de marnage avec immersion à marée haute, peut paraître moins aléatoire qu'en permanence sous eau. Il est cependant exposé à l'imprégnation du béton frais par l'eau de mer à marée haute, au délavage superficiel par le mouvement de l'eau et à une stratification par dépôt de sédiments. Il faut éviter cette pratique, surtout pour des éléments importants d'ouvrages, car le béton ainsi mis en œuvre est de qualité très douteuse. Or, il est dans la zone où l'attaque du béton par l'eau de mer est la plus vive.

7. PRÉCAUTIONS CONSTRUCTIVES.

Les bétons de bonne qualité confectionnés au moyen de ciments peu résistants à l'attaque marine peuvent être bien conservés dans la masse, mais ils présentent généralement une grande fragilité des arêtes vives et des sommets (intersections d'arêtes). Les dégradations qui en résultent exposent à des dénudations d'armatures et constituent des amorces à des attaques progressives plus profondes et elles empêchent la formation d'incrustations protectrices. Il est donc très recommandable d'éviter les arêtes et les sommets vifs, à tout le moins est-il utile de les chanfreiner ou de les arrondir. Cette précaution est systématiquement appliquée pour la construction des appontements en Norvège [7], pays où l'on utilise toujours du ciment portland.

Les supports ont une section cylindrique ou polygonale à grand nombre de côtés ; les piles longues sont terminées par deux demi-cylindres. Les éléments superficiels n'ont pas de nervures ; ils sont constitués de dalles d'épaisseur constante ou peu variable ; leurs arêtes sont largement chanfreinées ou arrondies.

Ces dispositions sont excellentes pour la disposition et la conservation des armatures. Dans les nervures, les barres sont nécessairement rapprochées et souvent trop. La confection d'un bon béton de recouvrement y est difficile et très aléatoire. Les armatures y sont donc très exposées, surtout au voisinage des arêtes. Les dalles permettent au contraire une bonne répartition d'armatures d'assez faible diamètre et assez distantes entre elles, ce qui permet une mise en place facile du béton et un compactage efficace du béton de recouvrement des barres. La simplification des coffrages et du ferrailage permet l'emploi d'un béton plus sec sans difficulté de compactage, donc au total une meilleure qualité du béton. Si toutes les précautions sont prises pour assurer cette qualité, les épaisseurs minimales de recouvrement indiquées au paragraphe V peuvent être diminuées du quart.

En matière de bétonnage à la mer, plusieurs précautions valent mieux d'une. Il est donc très recommandable de recourir aussi à ces dispositions constructives lorsque l'on emploie pour la confection du béton un ciment réputé résistant aux actions marines.

En Norvège également, pour protéger le béton contre l'action marine dans la zone de marée, qui est la plus critique, on laisse souvent en place les coffrages en bois [7]. Cette disposition a cependant l'inconvénient de ne pas permettre l'inspection visuelle des faces de décoffrage, qui constitue un contrôle élémentaire de la qualité du béton. Les malfaçons sont plus probables à l'abri de coffrages inamovibles.

Comme il est indiqué au paragraphe V, il est préférable d'utiliser des coffrages métalliques et de décoffrer. Aux endroits particulièrement exposés, on peut le cas échéant fixer sur les faces décoffrées des supports des parois en planches ou en panneaux ligneux, non nocifs, pour le béton, avec débordement par-dessus et par-dessous. Cette disposition protège des effets du gel en Norvège, mais dans les mers chaudes à flottaison peu variable, elle peut protéger le béton jeune contre l'ascension capillaire de l'eau salée avec cristallisation des sels marins au-dessus de la flottaison. Elle doit régner sur une hauteur suffisante au-dessus et en dessous de la flottaison moyenne et durer un temps suffisant pour permettre au béton durci de résister à ce phénomène. Il est à remarquer que ce type de dégradation semble affecter plus les ciments métallurgiques et le ciment sursulfaté, résistants à l'attaque chimique marine, que les ciments portland. Mais il est certain que la qualité du béton est aussi essentielle à ce sujet, principalement l'imperméabilité et l'impénétrabilité.

8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

- [1] Commémoration du centenaire de la mort de Louis Vicat » (1786-1861). *Annales des Ponts et Chaussées*, Paris, mars-avril 1962.
- [2] *Bulletin R.I.L.E.M.*, nouvelle série, n° 30, mars 1966.
- [3] « Comportement des bétons exposés à l'eau de mer ». *Colloque international R.I.L.E.M.*, Palerme, 24-28 mai 1965.
Cahiers de la recherche théorique et expérimentale sur les matériaux et les structures publiés sous le patronage de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, n° 37, Ed. Eyrolles, Paris, 1968.
- [4] *Matériaux et constructions - Materials and Structures*, n° 14, mars-avril 1970, Paris.
- [5] A) *Colloque international R.I.L.E.M. sur la durabilité des bétons*, Prague 1961, 2 volumes.
B) *Colloque international R.I.L.E.M. sur la durabilité des bétons*, Prague 1969, 4 volumes.
Ed. Académie tchécoslovaque des sciences, Prague.
- [6] B. MATHER, « Effect of seawater on concrete Highway Research Record », No. 113. National Academy of Sciences. National Research Council, Washington D.C., 1966.
- [7] O.E. GJØRV, « Durability of Reinforced Concrete Wharves in Norwegian Harbours ». The Norwegian Committee of Concrete Wharves in Norwegian Harbours. The Norwegian Committee of Concrete in Seawater Ingeniørforlaget A.S. Osb, 1968.
- [8] J. LAGROU et L. DESCANS, « Les travaux de reconstruction du môle de Zeebrugge ». *Annales des Travaux Publics de Belgique*, n° 5, octobre 1946, Bruxelles.
- [9] F. CAMPUS, « Rapport d'ensemble relatif aux essais et observations effectués sur des éprouvettes de mortiers et de bétons pendant une durée de trente ans (1934-1964), dont un grand nombre ont été immergées en permanence dans la mer du Nord à Ostende ». *Annales des Travaux Publics de Belgique*, n°s 1, 2 et 3, 1967. Bruxelles.