

RAPPORT D'ENSEMBLE RELATIF AUX ESSAIS ET OBSERVATIONS EFFECTUES SUR DES EPROUVETTES DE MORTIERS ET DE BETONS PENDANT UNE DUREE DE TRENTE ANS (1934-1964), DONT UN GRAND NOMBRE ONT ETE IMMERGEES EN PERMANENCE DANS LA MER DU NORD A OSTENDE

(2^e suite et fin) (*)

Rédigé par

Ferdinand CAMPUS

Professeur émérite, Recteur honoraire, Fondateur des Laboratoires d'essais des constructions du génie civil
et d'hydraulique fluviale de l'Université de Liège

CHAPITRE XVI — Commentaires Généraux (suite)

3. — Signification des essais physiques et chimiques sur les éprouvettes immergées dans la mer à mi-marée

Les analyses chimiques initiales des ciments (cf. Chap. III, par. 2) ne poursuivaient aucun but scientifique; elles avaient simplement pour objet de rendre complets les essais de définition des ciments employés, conformément aux normes.

Dans la suite, lorsque l'intérêt des résultats accumulés des expériences a fait naître l'intention d'en tirer le plus

grand profit scientifique possible, on a regretté que ces analyses initiales n'aient pas été plus détaillées, les réserves de ciment constituées à l'origine ayant disparu par suite de circonstances de guerre imprévisibles.

En raison de l'intérêt que présentaient toutefois les collections d'éprouvettes de 30 ans d'âge, retirées de 3 milieux de conservation aussi différents que la mer (à mi-marée), une solution sulfatée et l'eau potable, pour une étude par des méthodes physico-chimiques modernes des produits d'hydratation et des produits de dégradation des ciments par les divers milieux de conservation, des contacts ont été pris avant le dernier prélèvement avec le Centre national de recherches scientifiques et techniques de l'industrie cimentière et le Professeur W. De Keyser, président du Comité technique CT 1 de ce Centre pour l'étude fondamentale des ciments et directeur du Laboratoire de chimie industrielle

(*) Pour le début et la 1^{re} suite voir fasc. 1 et 2/197 des *Annales des Travaux Publics de Belgique*, pages 7, et 105.

de l'Université Libre de Bruxelles (cf. Ch. XIV, par. 1). Ces entretiens ont permis de préciser les dispositions pour le prélèvement des dernières éprouvettes en 1964, notamment pour réduire au minimum leur carbonatation après prélèvement. Les plans de travail ont aussi été établis en commun. Les recherches effectuées par le Professeur W. De Keyser et ses collaborateurs ont fait l'objet de publications [18] [19].

La signification de ces travaux physico-chimiques est de caractère fondamental. Ils apportent des contributions à la connaissance des réactions chimiques d'hydratation et d'altération par les milieux ambiants liquides qui se sont produites dans les spécimens en question.

Les analyses chimiques usuelles ont été effectuées dans les Laboratoires d'essais des constructions du génie civil et d'hydraulique fluviale de l'Université de Liège (cf. Ch. XIV, par. 7), sous la direction de M. Cerf, licencié en chimie. Elles ajoutaient leurs résultats à ceux des analyses chimiques effectuées après 11 années d'immersion (cf. Ch. XII, par. 8.C.). Les résultats de ces analyses ont été déjà commentés au Ch. XII, par. 9 et au Ch. XIV, par. 8. Ils donnent des indications au sujet de l'action de l'eau de mer sur les ciments seulement en comparant les analyses des spécimens correspondants immergés dans l'eau de mer et dans l'eau douce. Encore ne suffit-il pas de comparer les résultats bruts, puisqu'ils ne portent plus sur les mêmes quantités de matière. Pour avoir des comparaisons valables, on a rapporté les teneurs à la proportion d'insoluble ou sable des mortiers, en admettant que celle-ci était la même à l'origine pour les divers mortiers et que le sable est resté inaltéré. Les calculs correspondants sont donc affectés des erreurs de dosages et d'analyses. Ils ont permis de définir un « *indice de la proportion de ciment décomposée ou modifiée* » basé sur la diminution de la teneur en chaux des éprouvettes retirées de la mer par rapport à celles retirées de l'eau douce. Ces indices, dont les valeurs sont comprises entre 0 (ciments indécomposables) et 1 (ciments entièrement décomposés) correspondent bien globalement aux observations générales sur la tenue des ciments à la mer, même pour les ciments tels que 3 et 10, dont le trass contient de la silice insoluble indépendante du sable du mortier. Sous réserve du ciment alumineux fondu 8, on peut donc considérer cet indice comme significatif. Il a l'avantage d'être quelque peu explicatif, puisqu'il met la tenue des ciments à la mer en relation avec la perte de chaux par diffusion, selon la théorie de Maynard [4].

Les analyses chimiques ont cependant l'inconvénient d'être délicates, coûteuses et de ne donner des indices que par des calculs dont la précision est incertaine, parce qu'ils sont affectés des erreurs accidentelles de dosage et d'analyse et qu'ils portent sur des différences parfois assez faibles. On peut donc les considérer comme moins

pratiques que les essais mécaniques destructifs pour apprécier la tenue des ciments à la mer. Non inclus à juste titre dans le programme primitif, leur addition en complément de programme est entièrement justifiée par le souci d'augmenter l'apport scientifique de la recherche. Ce résultat est atteint, non pas tant par la confirmation des résultats des essais mécaniques destructifs et par leur explication sommaire que par un nouveau problème qu'il fait naître.

Les analyses moyennes globales des fragments de mortiers retirées de la mer ont établi leur appauvrissement souvent très considérable en chaux, élément important de la résistance mécanique. Or, les essais de compression sur cylindres de 2,5 cm de diamètre et de hauteur extraits de ces fragments ont donné des résistances considérables, dont l'explication reste à trouver (cf. Ch. XIV, par. 5, 7 et 8).

Les essais chimiques font apparaître des dépôts de matière; elle éveillent les notions de compacité ou de porosité, de poids, de poids spécifique, en rapport avec la masse et le volume.

Les mesures de volumes et de poids sont évidemment très caractéristiques, lorsque les dégradations par l'action marine sont très fortes, comme pour les ciments 1, 2 et 3 et pour les mortiers à faible dosage. Les mesures de poids sont les plus commodes et les plus précises, aussi très peu coûteuses; elles sont objectives.

Aux mesures abstraites de volume, on pourra préférer comme élément d'appréciation de dégradation des représentations concrètes par la photographie. Les planches de photographies qui illustrent ce rapport en montrent le grand intérêt. Toutefois les photographies ne donnent qu'une représentation à deux dimensions, déjà assez coûteuse et il serait excessif de photographier les éprouvettes sur plusieurs faces. Il est recommandable de compléter les résultats des essais mécaniques destructifs par l'indication des poids et par des photographies caractéristiques en nombre limité.

La compacité est à juste titre considérée comme une caractéristique des bétons résistants et durables. Cependant, c'est une notion complexe et fortement influencée par la granularité et le mouillage. Une expérience épisodique ajoutée à la recherche le met en lumière. C'est celle relative au béton 10, par ailleurs identique au béton 2, sauf remplacement d'un quart du sable du Rhin par du sable fin des dunes (cf. Ch. II, par. 9). Cela est conforme à une pratique qui avait beaucoup d'adeptes en Belgique en 1934 et qui en a probablement encore actuellement. On en attend une augmentation de la compacité. Au par. 5 du Chap. XV, on peut trouver la comparaison des porosités des cylindres en béton 2 et 10. Les écarts sont faibles et pas toujours de même sens.

Cependant, en général, le béton 10 est un peu plus compact que le béton 2. Or, les éprouvettes de béton 10, qui n'ont pas été exposées à l'action marine, ont eu des comportements divers. Les cubes 10 S ont été les plus fortement attaqués par la solution sulfatée et finalement détruits par cette ambiance en moins de 20 ans (cf. Ch. XIII, par. 3). Les cubes de béton 10 ont toujours donné des résistances inférieures aux cubes de béton 2 conservés dans les mêmes conditions pendant la même durée. Toutefois, les éprouvettes cylindriques extraites des cylindres en béton armé (cf. Ch. XV, par. 3) ont donné des résistances sensiblement équivalentes du béton 10 par rapport au béton 2, sinon légèrement supérieures. Il est à remarquer que le béton 10 avait exigé un peu plus d'eau que le béton 2 (7,9 % au lieu de 7,1 % du poids sec) et que le mélange de 2 sables augmente le risque d'hétérogénéité.

L'enlèvement interne de matière par l'action marine suggère de rechercher une mise en évidence de la dégradation marine profonde par des mesures comparatives de compacité ou de porosité ou d'absorption d'eau des éprouvettes attaquées et d'éprouvettes témoins intactes (conservées dans l'eau douce). La tentative effectuée lors des prélèvements après 11 ans d'immersion a constitué un échec (cf. Ch. XII, par. 8. B.). La raison en est que les différences sont faibles et que les compacités sont aléatoires. Enfin l'attaque marine globale se fait surtout par enlèvement superficiel de matière; celle qui subsiste est encore assez « solide » ainsi que l'ont montré les essais mécaniques sur petites éprouvette (cf. Ch. XIV, par. 5).

Les résultats du par. 5 du Ch. XV, bien que plus satisfaisants, ne démentent pas les remarques précédentes. Il s'agissait en effet de rechercher des différences de porosité entre le cœur et l'enveloppe extérieure d'une même éprouvette retirée de la mer. Or, on n'a trouvé de différences caractéristiques que pour un petit nombre d'éprouvettes très attaquées par la mer. Pour les éprouvettes peu ou pas attaquées, il n'y a rien de significatif. On peut déduire de là deux conclusions. La première est que, sauf pour les conglomerats hydrauliques dont l'attaque marine saute aux yeux, les mesures de compacité, de porosité ou d'absorption ne sont pas appropriées pour apprécier les effets de l'action marine ou la résistance à cette action. Comme ces mesures ne sont ni très commodes ni très précises, elles ne sont pas recommandables en général. C'est donc à bon escient qu'elles n'avaient pas été prévues au programme initial.

Cependant, et c'est la deuxième conclusion, la compacité est une des caractéristiques les plus importantes des bétons destinés à résister à l'action marine. Elle doit être obtenue par une bonne granularité, sans excès de sable fin, un mouillage modéré et une quantité suf-

fisante de ciment, enfin naturellement par une bonne compaction sans ségrégation lors de la mise en œuvre.

Parmi les essais spéciaux inclus dans le programme initial, qui avaient pour objet de rechercher des caractéristiques des divers ciments employés dont les essais normaux de réception ne rendent pas compte, mais qui sont intéressantes en vue de l'emploi à la mer, seuls les essais de perméabilité (cf. Ch. VI) ont quelque accointance avec les caractéristiques examinées plus haut, notamment la porosité. Tous les mortiers utilisés pour les expériences de filtration avaient la même composition nominale, donc en principe la même porosité. Cependant des différences importantes de comportement ont été mises en évidence selon la nature des ciments et qui devaient donc être caractéristiques de celle-ci. Ce qui est intéressant à noter, c'est que les ciments se classent en général par ordre d'imperméabilité suivant un ordre ou plutôt des catégories qui sont en accord avec l'aptitude à la résistance à l'action marine. Cependant, la filtration n'a joué aucun rôle dans les épreuves des spécimens immergés, qui ont été simplement soumis à une imbibition sans pression. L'imperméabilité des bétons est importante pour les ouvrages soumis à pression, tels que les écluses, les murs-digues, éventuellement les murs de quai.

Dans le même ordre d'idées, on aurait pu songer à des essais d'absorption d'eau par capillarité. Comme les essais à la mer comportaient l'immersion à mi-marée ou l'immersion totale, mais pas d'immersion partielle permanente, d'ailleurs dépourvue de signification en raison du marnage important, des expériences de cette nature n'ont été prévues ni pratiquées. Elles sont appropriées pour des mers à niveau peu variable, comme la Méditerranée [20] et surtout lorsque l'ascension capillaire de l'eau de mer est accompagnée d'évaporation en raison d'une température moyenne assez élevée et qu'il en résulte une cristallisation de sels dans les pores du béton au-dessus de la ligne de flottaison. Il s'agit alors d'immersion partielle dans la mer, ce qui exige des éprouvettes d'assez grande longueur ne permettant pas d'essais destructifs directs. Il en sera question au paragraphe 7.

4. — Considérations sur la résistance aux sulfates des ciments essayés

Du point de vue chimique, la résistance des ciments à l'action marine est généralement considérée comme dépendant de leur résistance aux sulfates [4] [21]. En Belgique, après les échecs qui étaient survenus dans certains ouvrages maritimes en béton (cf. Introduction) avant 1934, la question de la résistance des ciments aux sulfates avait soulevé un vif intérêt, encore renforcé par des dégradations plus ou moins importantes consta-

tées à la même époque sur d'autres ouvrages. Le cas le plus important et le plus grave était celui du tunnel du Corbeau, par lequel la nouvelle ligne de chemin de fer de Fexhe à Kinkempois passait sous un terril de charbonnage [6]. L'ouvrage avait été très rapidement détruit par la percolation intense d'une eau contenant 23,34 gr de sulfates anhydres par litre. Des débuts de dégradations avaient été aussi constatés à la base de trémies de silos à charbon d'une usine métallurgique du bassin de Liège, ainsi qu'à des tuyaux en béton situés à faible profondeur sous une cour de lavoir de charbonnage. Dans ces 2 cas aussi, l'attaque était causée par la percolation d'eau sulfatée à travers le béton.

L'industrie cimentière belge avait réagi à ces événements avec une grande activité. Des raisons pratiques s'ajoutaient donc aux considérations scientifiques pour introduire dans le programme de 1934 une tentative de parallèle entre la résistance des ciments aux sulfates et leur résistance à l'action marine. Les résultats de la recherche ont été concluants sous ce rapport, mais ils ont de plus permis des constatations intéressantes sur la résistance des ciments aux sulfates.

Tous les essais relatés dans les chapitres VIII à XV, de toutes natures, établissent que les ciments les plus vulnérables aux sulfates résistent aussi le moins bien à l'action marine (sous réserve du comportement particulier des éprouvettes du ciment 8). Ceci résulte de la comparaison des performances des éprouvettes correspondantes immergées d'une part dans la mer à mi-marée et, d'autre part, dans une solution immobile de 15 gr de sulfate de magnésie cristallisé par litre d'eau, à température constante d'environ 20° C.

Cependant l'attaque des éprouvettes de mortier par cette dernière solution n'est très effective et assez rapide que pour les mortiers les plus maigres, à 300 kg de ciment pour 1.500 kg de sable du Rhin. Déjà après 5 mois d'immersion, la résistance à la flexion des éprouvettes de $4 \times 4 \times 16$ conservées dans l'eau sulfatée décèle, par comparaison avec celle des éprouvettes conservées dans l'eau potable, la plus ou moins grande vulnérabilité aux sulfates. Après 11 mois d'immersion, elle est totalement élucidée. Cet essai est simple, somme toute assez rapide et sélectif.

Le mortier à 450 kg de ciment pour 1.500 kg de sable du Rhin requiert un temps beaucoup plus long pour mettre en évidence une grande vulnérabilité aux sulfates; ses résultats sont moins sélectifs et risquent d'être ambigus. Quant au mortier à 600 kg de ciment pour 1.500 kg de sable du Rhin, il ne donne plus d'indications, l'attaque par le sulfate est pratiquement insignifiante ou nulle pour tous les ciments. Il en est de même pour les cubes de béton, sous réserve du comportement des cubes 10 S, d'ailleurs assez inexplicable.

Il en résulte la constatation que, dans un milieu d'une stabilité physique totale et d'une agressivité déjà forte, l'attaque par une solution sulfatée est très variable selon la compacité et n'est très effective que pour les dosages très maigres. L'aventure des cubes 10 S pourrait suggérer que la granularité et peut-être les forces capillaires pourraient jouer un certain rôle et que les sables fins pourraient favoriser l'attaque. Toutefois ceci n'est énoncé ici que sous toutes réserves. Comme les cylindres 10 S se sont bien comportés, on voit que la forme des éprouvettes a aussi de l'influence.

Néanmoins, dans les cas de dégradations d'ouvrages en béton par des sulfates, il ne suffit pas seulement de considérer, comme c'est presque toujours le cas, l'agressivité du milieu, mais aussi la qualité du béton et de l'ouvrage, ce qui ne se fait presque jamais. Par exemple, le Prof^r G. Batta [6] indique la composition nominale du béton du tunnel du Corbeau : 1.000 litres de gravier 0/60, 125 litres de sable et 350 kg de ciment portland artificiel. Or c'est là indubitablement un béton détestable, malheureusement très courant à l'époque dans la région mosane et qui ne serait plus admis actuellement. Le gravier 0/60 était ce que l'on appelait du tout-venant de Meuse, de granularité et de propreté incertaines. Le sable d'addition était probablement du sable local très fin et limoneux. Si l'on veut bien considérer en plus que ce béton était mis en œuvre dans un chantier souterrain, dans une ambiance saturée d'humidité à une température supérieure à 30° C, sous une véritable pluie d'eau sulfatée chaude, on peut imaginer quelle devait être la qualité du béton mis en œuvre. L'eau sulfatée très concentrée traversait le béton en grande quantité, les gouttes tombant de l'intrados en grosse pluie continue. On peut croire qu'une voûte en claveaux préfabriqués très compacts et de bonne qualité, mis en œuvre à joints minces, protégés par une chape extérieure surmontée de drains d'évacuation des eaux extérieures, aurait parfaitement résisté.

On se bornera à citer ce cas parce qu'il correspond à une référence connue et antérieure au programme de 1934 [6]. Mais il n'est pas du tout isolé ni inactuel. On pourrait citer encore des cas très récents d'attaques graves par des sulfates dans des installations industrielles qui y sont très exposées par leur nature et où très visiblement les bétons attaqués semblaient être d'une qualité très comparable à celle citée ci-dessus pour le tunnel du Corbeau et datant d'il y a quarante ans.

La percolation hydrodynamique de la solution agressive sulfatée à travers un béton perméable, avec renouvellement permanent de l'agent agressif, constitue une circonstance qui favorise beaucoup la corrosion du béton. Cette considération a conduit à insérer dans le programme de 1934 des expériences de filtration sous pression d'une solution sulfatée au travers de mortiers maigres

confectionnés au moyen des divers ciments (cf. Ch. VI). Les résultats n'ont pas été concluants, parce que ces expériences sont difficiles, en raison du colmatage assez rapide des éprouvettes par les sels cristallisés. L'analyse des filtrats a montré toutefois que les ciments qui abandonnent le plus de chaux et qui fixent le plus de SO^3 sont ceux qui sont les plus vulnérables par les sulfates et par l'action marine.

Ces expériences délicates et difficiles ne sont donc pas recommandables pour apprécier la tenue des ciments dans les sulfates. L'immersion complète ou partielle de prismes de mortier très maigre est plus simple, plus économique et plus efficace. L'immersion partielle peut d'ailleurs être compliquée d'un chauffage intermittent ou permanent par radiations infra-rouges [20]. Selon H. Le Châtelier [4, p. 190], en immersion totale une élévation de la température de la solution sulfatée au-dessus de l'ambiance est contre-indiquée.

Il est à remarquer que la percolation des liquides agressifs dans les bétons des ouvrages réels n'est pas de la même nature que celle que l'on réalise au laboratoire au travers de mortiers maigres mais relativement homogènes. Elle se fait au travers des hétérogénéités des bétons, résultant des défauts de mise en œuvre. Elle peut donc affecter aussi des bétons dont la composition nominale est satisfaisante. Mais elle est naturellement encore plus dangereuse pour des bétons mal composés, tels que celui du tunnel du Corbeau.

Finalement et conformément aux règles de la dynamique chimique, l'attaque vive par les sulfates se produit d'autant mieux que la solution agressive arrive plus facilement et plus intimement au contact du ciment. Les mortiers un peu riches en ciment, comme celui à 600 kg de ciment pour 1.500 kg de sable du Rhin, les bétons d'un dosage assez usuel, comme celui à 350 kg de ciment par m^3 utilisé pour les essais, entravent considérablement ce contact, tandis que les mortiers maigres à 300 kg de ciment pour 1.500 kg de sable du Rhin permettent dans une mesure qui est sélective, c'est-à-dire qui différencie les ciments selon leur vulnérabilité propre à l'attaque par les sulfates.

Les essais Le Châtelier-Anstett (cf. Ch. IV), qui réalisent un contact intime forcé du sulfate et du ciment hydraté, n'ont aucune sélectivité. C'est tout ou rien et il ne peut en être autrement; cela tient à la nature de l'essai et à celle des ciments. Les expériences ont montré que les ciments qui satisfont à l'essai Le Châtelier-Anstett résistent certes à l'eau marine et aux sulfates (sous réserve du comportement particulier du ciment 8), mais que plusieurs ciments qui ont très mal réagi à l'essai Le Châtelier-Anstett se sont très bien comportés dans la mer et dans la solution sulfatée. Mais l'essai Le Châtelier-Anstett ne permet pas de distinguer ces ciments de

ceux qui ont mal résisté à l'action marine et à la solution sulfatée. L'essai d'immersion complète d'un mortier maigre dans la solution sulfatée le permet. On sera tenté d'objecter à ce dernier essai sa durée de quelques semaines ou de quelques mois. Cependant il s'agit là plutôt d'essais d'agrégation que d'essais de réception. Dès lors, cette durée n'a rien de prohibitif. En considération de ce qui précède, on doit se rendre compte que des essais de courte durée ou accélérés ne seront pas sélectifs ou ne seront pas efficaces.

5. — Différences entre les comportements des éprouvettes conservées dans l'eau sulfatée et de celles immergées dans la mer à mi-marée

Dans l'eau sulfatée à température constante d'environ 20°C et immobile, l'attaque a été variable d'après la nature des ciments, mais surtout d'après le dosage.

Au dosage de 300 kg de ciment par m^3 de sable, la destruction a été plus rapide dans l'eau sulfatée que dans la mer pour les ciments 1, 2 et 4. Au dosage de 450 kg de ciment par m^3 de sable, il en est encore ainsi pour le ciment 1 seulement. Au dosage de 600 kg par m^3 de sable, les éprouvettes de mortier sont pour la plupart intactes après 30 ans, les autres présentent des dégradations généralement modérées et localisées près des arêtes et des coins. Dans la mer, les dégradations sont plus fortes et certaines totales.

D'après les analyses chimiques des mortiers, la corrosion par la solution sulfatée immobile procède à partir de la surface. Elle s'accompagne de gonflements et d'une augmentation de poids, plus ou moins prononcés selon le degré de l'attaque et qui présentent quelque analogie avec les phénomènes observés dans l'essai Le Châtelier-Anstett (cf. Ch. IV). L'analogie est complète dans les cas de destruction totale; les éprouvettes ont alors perdu toute consistance et sont réduites en bouillie. En cas d'attaque plus modérée et partielle, les accidents de forme et les hétérogénéités superficielles localisent les manifestations: arêtes, coins, faces de lissage. Les gonflements donnent lieu à des craquelures ou fissures, parfois à des courbures et aussi, par expansion, à des ébrèchures aux arêtes, aux coins et dans certaines faces.

C'est aussi le cas pour les bétons, qui ont eu des coins, des arêtes ou des faces de lissage dégradés. Dans le cas des cubes 10 S, contenant du sable fin des dunes, il y a même eu décomposition totale après 16 années, alors que le cylindre 10 S enfoui dans du sable imbibé de la même solution sulfatée est resté intact. La forme de l'éprouvette a donc une influence appréciable dans les essais de corrosion des mortiers et des bétons. Mais, sauf les cubes 10 S, tous les autres spécimens de béton ne

présentaient aucune ou seulement de légères dégradations après 30 ans d'immersion dans l'eau sulfatée.

L'immersion marine à mi-marée agit d'une manière différente. L'attaque externe est accompagnée d'une action interne, mise en évidence par l'analyse chimique des mortiers et exprimée par l'indice de la proportion de ciment décomposée ou modifiée. Cette action est générale, aucun des ciments utilisés pour les essais n'y échappe complètement, en faisant abstraction du cas particulier du ciment 8.

L'action interne, qui s'exerce selon Maynard et Le Châtelier [4] par diffusion, est de nature chimique (ou physico-chimique). Le chimisme intervient aussi dans l'action externe, notamment celui du sulfate de magnésie. Cela résulte de l'identité de classement de résistance chimique des ciments par l'immersion marine à mi-marée et l'immersion dans la solution sulfatée des baguettes du mortier maigre. Mais l'apparence des dégradations externes établit que le chimisme n'intervient pas seul. La mer enlève progressivement les produits de la décomposition superficielle, ne laissant pas subsister des matières vraiment molles. Sous une pellicule superficielle éventuellement friable mais toujours peu épaisse, subsiste une matière cohérente, même si elle est à l'état de débris.

Cet enlèvement des matières friables décomposées résulte des actions mécaniques ou hydrodynamiques de l'eau de mer : courants, marées, houles, clapotis et vagues, projections et embruns, rafales. Ces actions érosives, en découvrant constamment de nouvelles surfaces, peuvent favoriser le progrès de l'attaque chimique et y ajouter une attaque propre, p.ex. par érosion des sédiments marins en suspension et par les organismes marins.

Mais il y a encore d'autres éléments destructeurs qui s'ajoutent au chimisme, ce sont les météores auxquels le voisinage du large confère une action accrue : soleil et réverbération solaire, vent chargé de sable, et surtout le gel. Il est bien établi que l'action du gel est renforcée par l'immersion marine intermittente [22]. Cela contribue à expliquer l'influence des formes des éprouvettes.

L'étude détaillée des observations consignées dans les chapitres VIII à XV justifie entièrement ces commentaires. Elle montre que si certains tests au sulfate peuvent être utiles pour l'orientation d'essais en immersion marine, ils ne peuvent cependant remplacer ceux-ci.

Enfin, il faut revenir sur le problème posé par l'action interne de l'eau marine par diffusion. Dans le cas des éprouvettes de mortier, que l'analyse chimique révèle si profondément modifiées par diffusion de CaO, pourquoi la résistance mécanique reste-t-elle si élevée?

Il n'a guère été possible de procéder à des analyses chimiques des bétons pour établir qu'il s'y produit le même phénomène. La plus grande porosité de l'enveloppe extérieure de certains cylindres de béton retirés de la mer, par rapport à la partie centrale, peut avoir cette signification. C'était le cas notamment des cylindres 1 M et 2 M. Or, le test à la solution alcoolique de phénolphthaléine montrait que le béton était basique dans toute la section restante, tant vers l'extérieur que vers l'intérieur. La signification, le mécanisme et les effets de l'action interne de l'eau marine, dont Le Châtelier [4] souhaitait déjà l'explication, restent à élucider. La question est devenue plus complexe par la diversification des ciments. On se rend compte que son étude est très difficile. L'intérêt scientifique de l'investigation fondamentale du phénomène est grand. Mais au point de vue pratique, les connaissances empiriques dont on dispose sont déjà d'une grande utilité.

6. — Comportement des cylindres de béton armé dans la mer

La partie du programme des expériences relative aux cylindres n'a pas reçu en 1934 un grand développement; elle paraissait presque avoir un caractère de hors-d'œuvre. Les observations réunies dans le Ch. XV montrent qu'elle a cependant été très fructueuse, même au point de vue du comportement des bétons seuls. Les cylindres ont permis des investigations qui ont apporté des compléments intéressants aux observations faites sur les mortiers et les cubes de béton et notamment sur l'influence des formes des éprouvettes.

Cependant, il n'y avait là rien d'inattendu. Par contre, en ce qui concerne la protection des armatures par les couvertures des divers bétons, les résultats ont été assez imprévus et, par là même, d'un grand intérêt. C'était d'ailleurs, bien entendu, le but principal de l'expérience, bien indiqué par la disposition particulière des barres dans les éprouvettes.

Les cylindres conservés au laboratoire dans des milieux diversement agressifs sont restés intacts au point de vue de la protection des barres par le béton. On en tire naturellement des indications positives, mais limitées. L'excellent comportement de ces éprouvettes doit s'expliquer surtout par la stabilité physique et chimique du milieu.

Ce sont les cylindres immergés dans la mer à mi-marée qui ont donné les résultats les plus intéressants. Il n'y a eu d'attaque des barres couvertes par le béton que sur 3 des 9 cylindres.

Sur 9 barres couvertes de 1 cm de béton, 3 ont été attaquées.

Sur 9 barres couvertes de 2 cm de béton, 2 ont été attaquées.

Sur 9 barres couvertes de 3 cm de béton, 2 ont été attaquées.

Enfin aucune des 9 barres couvertes de 4 cm de béton n'a été attaquée. Il y a lieu de remarquer d'ailleurs que les couvertures de 2 et 3 cm de béton étaient incertaines et tendaient à être toutes voisines de 2,5 cm.

Pour les 2 cylindres 1 M et 2 M, les barres recouvertes de 1, 2 et 3 cm de béton ont été corrodées parce que le béton de couverture a été enlevé par l'action marine et qu'elles n'étaient donc plus protégées.

Pour le cylindre 9 M, la barre recouverte de 1 cm de béton semble avoir commencé à rouiller sous le béton, par suite d'une insuffisance, quelconque et inconnue, d'étanchéité de la couverture. Le foisonnement de la rouille a ensuite produit le détachement d'une longue esquille du béton de couverture.

Les 29 autres barres, dont 6 couvertes de 1 cm de béton, 7 couvertes de 2 cm de béton, 7 couvertes de 3 cm de béton et 9 couvertes de 4 cm de béton, étaient intactes, sans rouille ni fissure dans le béton.

Les 9 cylindres immergés en permanence sous marée basse ont été perdus, mais il y a tout lieu de croire qu'ils seraient restés intacts comme les cylindres conservés sous sable imbibé d'eau sulfatée.

Des 9 cylindres exposés à l'air marin au-dessus des plus hautes mers, 2 seulement ont été retrouvés, dont l'un β présentait le phénomène suivant. Au-dessus de l'armature couverte de 1 cm de béton, un éclat s'était formé, séparé du béton voisin par 2 fissures évasées aboutissant à la surface. Mais cette esquille « virtuelle » adhérait encore à l'armature, qui ne présentait aucune trace de corrosion. Il semble qu'il s'agisse donc, en l'occurrence, d'une fissuration assez récente due à l'empêchement de retrait du béton par la barre, non encore suivie de corrosion atmosphérique de cette dernière, mais qui devait advenir à la longue.

Dans les 8 dégradations constatées, on rencontre donc les 3 processus de corrosion des armatures exposés ailleurs [23], à savoir :

a) Corrosion des armatures en suite à leur dénudation par la décomposition et la disparition du béton de couverture.

b) Corrosion des armatures commencée sous la couverture de béton en raison des imperfections de cette couverture, qui permettent l'accès des agents corrosifs. Le foisonnement de la rouille produit ensuite le départ

d'esquilles du béton de couverture et la mise à nu de l'armature.

c) Fissuration du béton parallèlement à l'armature par empêchement de retrait (ou de déformation thermo-hygrométrique en général). Cette fissuration permet l'accès des agents corrosifs à l'armature qui rouille, ce qui est suivi des effets considérés sous b) ci-dessus.

Ce dernier point attire l'attention sur l'importance des déformations thermo-hygrométriques du béton de couverture des armatures pour leur protection [24].

Selon le programme des essais, le retrait des divers ciments a été mesuré en pâte pure, en mortier et en béton dans diverses ambiances de conservation (cf. Ch. V). Sous réserve des ciments 7 et 8, on ne constate pas de différences notables entre les retraits des divers ciments (voir planches 10 à 18). On trouve en moyenne après 365 jours :

	dans l'air	dans l'eau potable	dans l'eau sulfatée
En pâte pure	0,003	0,001	0,0005
En mortier	0,002	0,001	0,0005
En béton	0,0003	— 0,00005	— 0,0001

L'appréciation de la fissurabilité sous l'effet des empêchements de retrait ne peut être faite d'après les seules valeurs du retrait. Elle dépend de l'évolution simultanée dans le temps du retrait et de l'allongement de rupture du béton par extension. Un essai normalisé français de fissurabilité est fondé sur l'empêchement de retrait d'un anneau de pâte pure ou de mortier moulé autour d'un disque cylindrique co-axial d'acier qui en occupe la partie centrale. On note l'âge de l'apparition des fissures. Le phénomène est celui qui est à l'origine du processus c) de corrosion des armatures considéré ci-dessus et s'est produit dans le cylindre β .

Mais dans les conservations sous eau tous les bétons ont un retrait négatif, c'est-à-dire qu'ils gonflent. Dès lors, la fissuration par empêchement de retrait n'est plus possible. On a indiqué que les cylindres immergés à mi-marée étaient sous eau en moyenne pendant les 2/3 des marées, en tous cas plus de la moitié. Il est certain qu'ils étaient dès lors dans un état d'humidité peu variable. Il ne pouvait certes se manifester aucun effet d'alternance d'immersion et d'émersion. Cet état permanent de grande humidité a contribué à la remarquable protection des armatures constatée dans l'expérience par la suppression des tractions dues à l'empêchement de retrait qui existent toujours dans le béton de couverture des armatures dans les ambiances sèches.

Il ressort cependant clairement des résultats des expériences que d'autres circonstances plus particulières ont contribué à la protection efficace des armatures. En pre-

mier lieu la forme cylindrique des éprouvettes, qui ne donne pas lieu à la vulnérabilité caractérisée des arêtes et des sommets des formes prismatiques à l'attaque marine. Sous ce rapport, des armatures placées aux angles de sections carrées sont dans des situations défavorables. Cependant, les observations faites sur les cylindres, notamment 1 M, 2 M, 3 M et 9 M ont montré que la forme cylindrique n'empêche pas une manifestation nette de la capacité réelle de protection des armatures par des bétons de diverses compositions.

Une autre circonstance favorable résulte des dimensions des éprouvettes, en conjugaison d'ailleurs avec leur forme. Les cylindres ont été bétonnés verticalement, c'est-à-dire parallèlement aux armatures. Cela a permis de maintenir les armatures dans une position correcte par rapport aux parois et de réaliser un bon compactage du béton de couverture par piquage au moyen d'une barre. La bonne tenue des cylindres dont le béton lui-même n'a pas été détruit établit à suffisance que le béton couvrant les barres les protégeait efficacement de l'accès de l'eau de mer et était donc bien compact, sauf pour la couverture de 1 cm d'épaisseur du béton 9 M. Et encore, cette couverture n'a-t-elle laissé passer l'eau de mer qu'après 20 ans, comme d'ailleurs pour le cylindre 2 M. Pour le cylindre 1 M, les couvertures ont tenu plus de 11 ans. Pour le cylindre 3 M, si le béton superficiel était attaqué, aucune couverture d'armature n'avait pourtant cédé.

Des éprouvettes prismatiques longues sont en général bétonnées couchées horizontalement, c'est-à-dire perpendiculairement aux armatures. Il tombe sous le sens que le compactage du béton de couverture des armatures, surtout du fond, et la position correcte de ces armatures par rapport aux parois, sont beaucoup moins assurés, d'autant moins que l'épaisseur de couverture est plus faible. Sur le fond du moule s'exercent, d'une manière combinée et surtout dans les angles, un effet de parois multiples et une difficulté de compaction qui nuisent inévitablement à la qualité du béton de couverture. La face supérieure est une face de lissage et les expériences ont montré qu'une telle face est plus vulnérable aux attaques. Ce ne sont pas là des impondérables, mais des circonstances défavorables netement établies. Elles ont conduit les ingénieurs norvégiens [25] à adopter pour les pieux et piliers des sections carrées à arêtes émoussées par des pans coupés ou, de préférence encore des sections circulaires. Quant aux superstructures, elles sont à réaliser au moyen de dalles planes sans nervures. Si l'on ne peut éviter des nervures, elles devront être larges et peu saillantes et leurs arêtes seront émoussées par des pans coupés. Les ingénieurs norvégiens insistent sur le fait que les ouvrages maritimes en béton armé requièrent non seulement une étude attentive de la nature du béton et une organisation adé-

quate de sa mise en œuvre, mais aussi un dessin approprié.

Les constatations exposées au Ch. XV sont les conséquences de ces conditions d'expérience et elles sont assez différentes de celles observées au cours d'essais de longue durée effectués dans d'autres conditions [26]. Aussi est-il clair que l'on n'est pas autorisé à conclure des expériences d'Ostende qu'il est permis de réduire l'épaisseur de recouvrement des armatures du béton armé dans la mer à 1 cm. C'est au contraire à une épaisseur minimum de 4 cm qu'il faudrait conclure. Mais en fait ce n'est pas l'épaisseur seule qui est en cause, encore faut-il que le béton, quel que soit son épaisseur, protège effectivement l'armature. Il advient que l'on constate sur les ouvrages [25] qu'une couverture de 7 cm de béton ne protège pas efficacement les armatures. Cela prouve évidemment une incapacité protectrice du béton. Cependant, la vertu d'une grande épaisseur de recouvrement, telle que 7 cm, est principalement de faciliter la confection d'un béton de recouvrement de très bonne qualité, en atténuant les difficultés indiquées plus haut. Il est aussi à remarquer à ce sujet que l'épaisseur de recouvrement ne devrait pas être considérée seulement en valeur absolue, mais en rapport avec le diamètre des barres à protéger et aussi avec le calibre nominal maximum des gros granulats. Ce rapport ne devrait pas être inférieur à 2 et de préférence supérieur. Il en est de même pour l'écartement des barres.

7. — Remarques finales

Tirer de tout ce qui précède des conclusions générales serait simplifier le tableau à l'extrême. Les observations accumulées et exposées sont cependant claires et doivent permettre au lecteur des conclusions pondérées, avec toutes les nuances qui conviennent. Il est permis d'écrire que les expériences ont atteint les buts limités et précis qu'en attendaient leurs promoteurs.

Peut-être ont-elles donné de surcroît quelques apports plus particulièrement scientifiques? Dans ce cas, elles s'inséreraient honorablement dans une recherche complexe dont beaucoup de questions fondamentales restent à résoudre et dont les aspects varient selon les régions. Il reste donc beaucoup à faire et en de nombreux endroits, car les conditions locales sont les facteurs essentiels qui influent sur le comportement des bétons dans la mer [27].

Sans ce rapport, il peut être utile de procéder à un bref examen critique des dispositions adoptées pour les expériences décrites dans ce rapport.

Les formes et les dimensions des éprouvettes employées se sont montrées satisfaisantes. Elles ont été suffisantes pour résister aux actions les plus violentes de la mer et du climat à l'endroit où elles ont eu lieu. Les faibles dimensions ont beaucoup facilité les opérations, mais on se rend compte qu'il n'était pas recommandable de recourir à de plus petites encore.

Ces formes et dimensions usuelles dans les essais courants de mortiers et de bétons ont permis de recourir à toute la gamme des moyens connus dont on dispose à cet effet. L'efficacité de ces moyens a été examinée aux paragraphes 2 et 3 de ce chapitre. Les essais mécaniques destructifs et les analyses chimiques ont certes été les plus significatifs et les plus instructifs. Ils étaient d'ailleurs liés à l'emploi de petites éprouvettes, qui convenaient dans les conditions de marée existant à Ostende.

Des éprouvettes de plus grandes dimensions peuvent présenter de l'intérêt lorsque le marnage est très faible comme en Méditerranée [28] ou assez modéré comme à Trondheim [29]. Elles permettent l'exposition de pièces verticales dont la partie inférieure est en permanence sous le niveau moyen le plus bas de la mer, cependant que la partie supérieure est en permanence au-dessus du niveau moyen le plus élevé de la mer. Les conditions d'expérience sont rendues ainsi conformes le plus qu'il est possible à la situation des ouvrages réels et permettent de recueillir le plus d'observations directement applicables à ces ouvrages, notamment dans les parties situées immédiatement au-dessus des hautes eaux moyennes, qui ne sont submergées que lors des fortes marées ou des tempêtes.

Ces éprouvettes permettent des observations visuelles (photographiques) et descriptives, même éventuellement des pesées [29] à la fin des expériences, des essais mécaniques sur les résidus. Les essais non destructifs ne sont vraiment significatifs que si les formes et les dimensions sont peu altérées. En dehors éventuellement des essais non destructifs, il n'est guère possible de procéder à des essais échelonnés pendant toute la durée de l'exposition.

A Ostende, pour satisfaire à ces conditions, les éprouvettes auraient dû avoir au moins 7 m et de préférence 8 à 9 m de hauteur. Il ne semble pas que l'on aurait pu recueillir par cette voie une aussi ample moisson de renseignements que par celle qui a été suivie.

Enfin, un point important est que le comportement réel des bétons exposés à l'eau marine ne peut être mis en évidence réellement que dans le milieu marin intégral, non seulement avec l'eau de mer vraie, mais avec ses marées, courants, houles, vagues, déferlements, projections, embruns, sédiments, organismes et météores.

1. — Nature des liants et conditions des expériences

Un des liants est constitué de laitier moulu très fin activé par de l'eau de mer additionnée d'environ 3,2 % en poids de chaux hydratée. Il a reçu le numéro 11. Le deuxième, numéroté 12, est constitué par la même farine de laitier activée par une solution aqueuse à 12 % de sulfate de soude sec, additionnée de 8 % en poids de chaux hydratée. Les essais ont commencé en 1939.

La poudre de laitier provenait de la cimenterie de la S.A. métallurgique d'Ougrée-Marihaye. (Cette cimenterie a été fermée depuis lors) Elle donnait un refus de 0,8 % sur le tamis de 4900 mailles. Son analyse n'est pas connue. En raison de sa provenance, on peut croire qu'il s'agissait d'un laitier sélectionné en vue de la production de ciment métallurgique. La chaux hydratée industrielle et le sulfate de soude ont été procurés par les demandeurs des essais, sans indication d'analyse.

L'eau de mer a été prélevée à Ostende, sans autre indication. Elle n'a pas été analysée. Son degré de dilution éventuelle par l'eau douce du port n'est pas connu (cf. Ch. II, par. 10).

Les essais d'immersion marine n'ont porté que sur des mortiers, dosés respectivement à 300 kg, 450 kg et 600 kg de liant pour 1.500 kg de sable du Rhin 0/2 mm. Comme pour les essais principaux, selon la convention indiquée (cf. Ch. II, par. 4), ces mortiers ont reçu les désignations 111, 112, 113, 121, 122 et 123. Il n'y a pas eu d'éprouvettes témoins conservées dans l'eau sulfatée et dans l'eau potable.

L'analyse granulométrique du sable est la suivante :

Jours des tamis (mm)	2.36	1.17	0.589	0.295	0.147
Refus cumulés (%)	1	7.7	21.1	82.2	99.4
Module de finesse :	2.114				

Les compositions des 6 mortiers étaient les suivantes :

Mortier	111	112	113
Sable (kg)	1500	1500	1500
Laitier (kg)	293.7	443.2	592.7
Chaux ét. (kg)	6.3	6.8	7.3
Eau de mer (l)	198	214.5	231
Mortier	121	122	123
Sable (kg)	1500	1500	1500
Laitier (kg)	284.3	433	581.7
Chaux ét. (kg)	15.7	17	18.3
Eau sulf. (l)	198	214.5	231

Le laitier et la chaux ont été mélangés intimement à sec. La consistance des mortiers était plastique. 36 éprouvettes prismatiques ont été confectionnées au moyen de chacun des mortiers, dans les mêmes conditions que pour l'essai principal (cf. Ch. II. par. 4). Les dates de confection ont été les suivantes :

Mortiers 113 et 123 : 18 juillet 1939
 Mortiers 112 et 122 : 19 juillet 1939
 Mortiers 111 et 121 : 20 juillet 1939

La conservation pendant les premières semaines a été la même que dans l'essai principal.

A l'âge de 28 jours, 4 éprouvettes de chaque espèce ont été prélevées et essayées à la flexion et à la compression comme dans l'essai principal (cf. Ch. III, par. 3).

Le 1^{er} septembre, à marée basse, 32 éprouvettes de chaque espèce, transportées à Ostende la veille, ont été immergées au même endroit que les éprouvettes de l'essai commencé en 1934 (emplacement marqué A à la planche 3). Elles étaient disposées dans 2 caisses suivant le rangement schématisé ci-après :

4 × 113	4 × 113	4 × 113	4 × 113
4 × 112	4 × 112	4 × 112	4 × 112
4 × 111	4 × 111	4 × 111	4 × 111
4 × 121	4 × 121	4 × 121	4 × 121
4 × 122	4 × 122	4 × 122	4 × 122
4 × 123	4 × 123	4 × 123	4 × 123

Les 2 caisses, constituées comme celles de l'essai principal, ont été fixées aux places des caisses I et 1 (planche 4) déjà enlevées précédemment. Pour effectuer un prélèvement complet, il suffisait de démontrer un quart de couvercle.

Des prélèvements étaient prévus aux mêmes âges que pour l'essai principal, mais les événements n'ont pas permis d'y procéder avant septembre 1945. Les constatations faites lors de ce premier examen après 6 ans d'immersion ont conduit à ne plus procéder à de nouveaux prélèvements qu'en même temps que pour l'essai principal, c'est-à-dire en 1954 et en 1964.

2. — Essais normaux

a) Mortiers 11.

Composition de la pâte normale :

Laitier 396.28 gr; chaux éteinte 3.72 gr; eau de mer 116 cm³ (29 %)

Prise : début 3.05 h; fin 5.05 h.

Stabilité à froid 0.5 mm; à chaud 1 mm

Total 1.5 mm.

Mortier pour essais normaux de traction et de compression :

Sable normal belge : 3 parties en poids.

Laitier : 0.99072 parties en poids.

Chaux éteinte : 0.00928 parties en poids.

Eau de mer : 7.25 % du poids des matières sèches.

Résistance du mortier normal battu (kg/cm²)

	3 jours	7 jours	28 jours
Compression	78	163	274
Traction	4.5	7.1	21.5
Résistance en mortier plastique à 28 jours (kg/cm ²)			
Mortier	111	112	113
Flexion	8.08	20.8	26.5
Compression	51.5	107	123

b) Mortiers 12.

Composition de la pâte normale :

Laitier 390.72 gr; chaux éteinte : 9.28 gr; eau sulfatée : 116 cm³ (29 %)

Prise : début 1.50 h, fin 3.10 h

Stabilité à froid 1 mm; à chaud 1 mm; total 2 mm.

Mortier pour essais normaux de traction et de compression :

Sable normal belge : 3 parties en poids.

Laitier : 0.9768 parties en poids.

Chaux éteinte : 0.0232 parties en poids.

Eau sulfatée : 7.25 % du poids des matières sèches.

Résistances du mortier normal battu :

	3 jours	7 jours	28 jours
Compression	418	458	539
Traction	33.3	32.6	37.8
Résistance en mortier plastique à 28 jours (kg/cm ²)			
Mortier	121	122	123
Flexion	59.2	74.7	94.6
Compression	240	442	533

3. — Essais Le Châtelier-Anstett

Opérés comme il est indiqué au Ch. IV.

Les compositions des pâtes étaient les suivantes :

Liant 11

Pâte à	30 %	40 %	50 %
Laitier (gr)	990.4	987.2	984
Ca(OH) ² (gr)	9.6	12.8	16
Eau de mer (cm ³)	300	400	500

Liant 12

Pâte à	30 %	40 %	50 %
Laitier (gr)	976	968	960
Ca(OH) ² (gr)	24	32	40
Eau sulfatée (cm ³)	300	400	500

Les éprouvettes du liant 11 se sont comportées pratiquement comme celles des ciments 7 et 8 (planche 8). Par contre, les éprouvettes du liant 12 ont éprouvé des augmentations de poids de 60 à 100 % après 30 jours et plus et une augmentation de diamètre de 15 à 50 %, selon la richesse en eau de la pâte. Ce liant ne supporte donc pas l'essai Le Châtelier-Anstett.

4. — Retrait

Les mesures de retrait ont été effectuées sur pâte pure normale (cf. par. 2) et sur mortier plastique de 450 kg de liant pour 1500 kg de sable du Rhin 0/2 mm et 11 % d'eau en poids des matières sèches.

Les compositions étaient les suivantes :

	Pâte	Mortier
<i>Liant 11.</i>		
Laitier (kg)	12.882	2.437
Ca(OH) ² (kg)	0.118	0.038
Eau de mer (l)	3.67	1.18
	Sable (kg)	8.25

	Pâte	Mortier
<i>Liant 12.</i>		
Laitier (kg)	9.768	2.38
Ca(OH) ² (kg)	0.232	0.095
Eau sulfatée (l)	2.9	1.18
	Sable (kg)	8.25

Les mesures ont été effectuées dans les mêmes conditions qu'au Chapitre V, sauf que les éprouvettes étaient des prismes de 10 × 10 × 50 cm, portant dans les faces de base 2 goujons inoxydables scellés, servant de repère pour les mesures de longueur effectuées au moyen de l'appareil Amsler. La conservation uniquement à l'air se faisait dans une salle ad hoc conditionnée (temp. 20° C, humidité relative 50 %). Après 180 jours, le retrait en pâte des 2 liants était de 0,003 et celui du mortier de 0,001. Ces retraites étaient encore assez fortement croissants. La différence importante entre les retraites des ciments 1 à 9 d'une part et ceux des liants 11 et 12, mesurés sur mortier, est due à la différence considérable de dimension des éprouvettes (2 × 2 × 10 cm et 10 × 10 × 50 cm). Les mesures sur pâtes n'en sont guère affectées.

5. — Chaleurs de durcissement dégagées pendant les 72 premières heures

On a opéré d'une manière analogue à ce qui est indiqué au Ch. VII, mais seulement sur pâtes. Leur composition était

Liant	11	12
Laitier (gr)	1485.6	1464
Ca(OH) ² (gr)	14.4	36
Eau (de mer ou sulfatée, cm ³)	450	450

Les quantités de chaleur dégagées après 72 heures étaient :

Liant 11	18.1 cal/gr.
Liant 12	23.1 cal/gr.

6. — Effets de l'immersion marine à mi-marée

A. Prélèvement du 9 octobre 1945. (6 ans d'immersion)

Les éprouvettes 111, 112 et 113 étaient très corrodées; leur forme était devenue quasi cylindrique. Il n'était plus possible de les soumettre aux essais mécaniques.

Les éprouvettes 121 étaient légèrement corrodées aux arêtes et sur les grandes faces; les barrettes 122 et 123 étaient intactes.

B. Prélèvement du 16 septembre 1954. (15 ans d'immersion)

Toutes les éprouvettes du liant 11 étaient détruites, il n'en subsistait que des débris dans les encoches des caisses.

Les barrettes 121 étaient assez fortement dégradées, sauf à l'extrémité inférieure. Poids 439, 397, 360 et 436 gr. (fig. 3)

Les éprouvettes 122 avaient des arêtes légèrement ébréchées. Poids 580, 580, 568 et 585 gr. Les barrettes 123 étaient intactes. Poids 583, 584, 586 et 591 gr.

C. Prélèvement du 1^{er} avril 1964. (25 ans d'immersion)

La dégradation des éprouvettes 121 a considérablement augmenté de 1954 à 1964 (fig. 4). Poids 342, 351, 270 et 272 gr.

Les éprouvettes 122 sont un peu plus corrodées en surface. Poids: 563, 567, 562 et 558 gr.

Les éprouvettes 123 sont intactes. Poids 587, 582, 597 et 588 gr.

Les résultats des essais mécaniques destructifs sont indiqués ci-après. On se rappellera qu'en 1964 (cf. Ch. XIV, par. 5), les essais de compression ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques de 2,5 cm de diamètre et de hauteur extraites par sondage des barrettes brutes et dont les bases étaient rectifiées à la meule diamantée.

		Résistances en kg par cm ²		
Mortiers		121	122	123
6 ans (1945)	Flexion	71.5	93	96
	Compression	134	556	666
15 ans (1954)	Flexion	—	53.9	69.9
	Compression	—	546.8	706.9
25 ans (1964)	Flexion	—	76.31	90.15
	Compression	300.2	643.4	857.1

Des essais non destructifs ont aussi été opérés. En 1954 comme au Ch. XIII, par. 5. Les fréquences propres trouvées en cycles par sec. sont : Mortier 122 : 13.237
Mortier 123 : 13.575

Elles sont supérieures à celles trouvées pour les ciments 1 à 9.

En 1964, on a opéré comme au Ch. XIV, par. 6. On a trouvé pour les vitesses de propagation des ultrasons :

Mortier 121 : 4 100 m/sec.
Mortier 122 : 4 380
Mortier 123 : 4 514.

Ces valeurs sont comparables à celles figurant au Ch. XIV, par. 6, pour les ciments résistant à l'action marine.

7. — Commentaires généraux

Les résultats brièvement résumés dans ce chapitre sont susceptibles aussi de nombreuses remarques et notamment en comparaison avec ceux des chapitres précédents. On se borne encore ici aux commentaires dont la portée est la plus générale et qui doivent aider à dégager les conclusions des expériences.

Le liant 11 subit brillamment l'épreuve de l'essai Le Châtelier-Anstett; le liant 12 n'y satisfait pas. Bien que très résistant aux sulfates, le liant 11 est cependant promptement détruit par la mer, même au dosage le plus riche. Il est clair que c'est par manque d'activité et de résistance. Ce sont donc les actions marines mécaniques et météoriques qui sont responsables de cette destruction rapide, non l'action chimique. On peut considérer comme plus que probable que les mortiers 111, 112 et 113 auraient résisté sans dommage à une immersion marine profonde, à l'abri des actions mécaniques et des météores, comme les bétons de médiocre résistance immergés dans le Portovecchio di Piombino signalés par V. Sevieri [30].

En ce qui concerne le liant 12, l'échec à l'épreuve Le Châtelier-Anstett se montre de nouveau dépourvu de signification. Le durcissement remarquable de ce liant, malgré le faible dégagement de chaleur, joint d'ailleurs à une faible susceptibilité pratique à l'action des sulfates, lui permet de résister remarquablement aux actions combinées de la mer et cela d'une manière soutenue, comme il ressort bien des états à 15 et à 25 ans représentés aux figures 3 et 4.

Ceci contribue bien à mettre en évidence les caractères véritables de l'immersion marine à mi-marée et

l'importance réelle des actions mécaniques et météoriques.

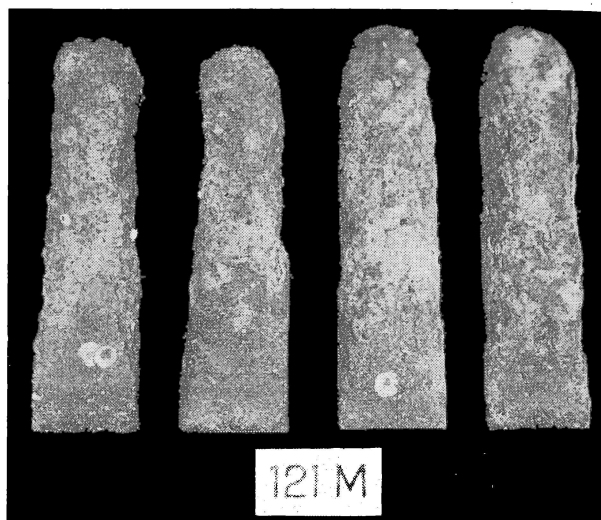


Fig. 3.

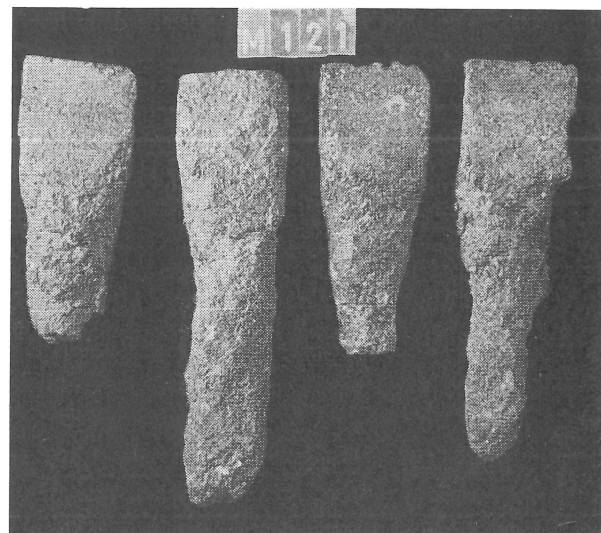


Fig. 4.

Il est à remarquer que le liant 12 était assez nettement défini, cependant que le liant 11 peut avoir été affecté d'une dilution éventuellement importante de l'eau de mer qui devait l'activer. Mais cela ne peut être éventuellement qu'une question de degré.

Les essais mentionnés dans ce chapitre ont été effectués à la demande de la Société financière de transports et d'entreprises industrielles « Sofina ». La publication succincte de leurs résultats est faite avec son obligeante autorisation.

- [1] F. Campus, R. Dantinne, E. Verschoore, J. Dooms & J. Verschave. — Constatations récentes et précautions nouvelles à l'égard de la décomposition des mortiers et bétons dans l'eau de mer (Annales des Travaux Publics de Belgique, juin 1946).
- [2] R. Feret. — Encore la relation entre les résistances à la flexion et à la compression des mortiers. (Annales des Travaux Publics de Belgique, août 1946).
- [3] L. Bonnet et J. Lamoën. — Etude des ports belges de la Mer du Nord. (Annales des Travaux Publics de Belgique, juin, août, octobre et décembre 1948).
- [4] H. Le Châtelier. — Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques. (Ed. Dunod, Paris, 2^e édition, 1904).
- [5] L. Blondiau. — Considérations diverses relatives à l'essai de résistance chimique au sulfate de calcium suivant le processus Le Châtelier-Anstett. (Revue des matériaux de construction, Paris, n° 546, mars 1961).
- [6] G. Batta. — Etude de la corrosion du tunnel du Corbeau. (Comptes Rendus du 10^e Congrès de Chimie industrielle, 7-13 septembre 1930. Ed. Chimie et Industrie, Paris).
- [7] F. Campus. — Observations aux rapports des professeurs Slater (E.U.A.) et Graf (Stuttgart) concernant la perméabilité des bétons (Livre du Congrès international d'essais des matériaux, Zurich, 1931).
- [8] F. Campus. — Essais sur la résistance des mortiers et bétons à l'eau de mer. Synthèse des résultats de 1934 à 1945 (Annales des Travaux Publics de Belgique, août 1947).
- [9] L. Vicat. — 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. (1858).
Cf. Commémoration du Centenaire de la mort de Louis Vicat (1786-1861) (Annales des Ponts et Chaussées, Paris, mars-avril 1962).
- [10] M. Prot. — Recherches sur les essais de ciments (Circulaire Série F, n° 35 de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, janvier 1947).
- [11] V. Sevieri. — Il controllo della resistenza chimica dei cementi all'acqua del mare. (Le Industrie del Cemento, n° 8, 1935, Milano).
- [12] V. Sevieri. — Bacini di prova per la resistenza chimica dei cementi all'acqua di mare. (Il Cemento Armato, n° 8, 1936, Milano).
- [13] F. Campus. — Observations au rapport du professeur R. Grün (Düsseldorf) concernant les substances pouzzolaniques, notamment l'emploi des poudres de trass et de laitier (Livre du Congrès international d'essais des matériaux, Zurich, 1931).
- [14] R. Jacquemin. — Recherches sur l'hydratation des liants hydrauliques (Bulletin du Centre d'études, de recherches et d'essais scientifiques des constructions du génie civil et d'hydraulique fluviale de l'Université de Liège, Tome II, 1947).
- [15] K. Gamski. — Détermination de la fréquence fondamentale de vibrations longitudinales (Science et Technique, Vol. 14, n° 3/4, 1956).
- [16] F. Campus, R. Dantinne, M. Dzulynski et K. Gamski. — Essais de résistance des mortiers et bétons à l'eau de mer. Résultats après 20 ans d'immersion (Annales des Travaux Publics de Belgique, n° 5, 1960/61).
- [17] R. Joosting. — Le prélèvement et l'examen de petites carottes de béton (RILEM Symposium on the experimental research on field testing of concrete, Trondheim, October 1964).
- [18] W. De Keyser. — Travaux exécutés sous l'égide du Comité de la Recherche fondamentale du Cric. (La chimie des ciments, Bruxelles, 17 mars 1965).
- [19] W. De Keyser, N. Tenoutasse et A. Van Bemst. — Contribution à la détermination de la nature des phases hydratées dans des mortiers immergés durant 30 ans (Colloque international R.I.L.E.M.—A.I.P.C.N. sur le comportement des bétons exposés à l'eau de mer. Palerme, 24-26 mai 1965).
- [20] J. Brocard et R. Cirodde. — Recherches sur la résistance des ciments, mortiers et bétons aux eaux de mer. (R.I.L.E.M. Colloque international sur la durabilité des bétons. Rapport final. Ed. Académie Tchécoslovaque des Sciences, Prague, 1962).
- [21] W. Eitel. — Physikalische Chemie der Silikate (Ed. J.A. Barth, Leipzig, 1941).
- [22] I. Lyse. — Durability of concrete in sea-water (R.I.L.E.M. Colloque international sur la durabilité des bétons. Rapport préliminaire. Ed. Académie Tchécoslovaque des Sciences, Prague, 1961).
- [23] F. Campus. — Processus divers d'altération des ouvrages en béton armé (5^e Congrès de l'Association internationale des Ponts et Charpentes. Rapport final. Lisbonne, 1957).
- [24] F. Campus. — a) Effets élastiques d'inclusions hétérogènes dans un milieu subissant un retrait. (Abstracts of papers 4th International Congress for Applied Mechanics. University Press, Cambridge, 1934).
b) Dégradation de pieux en béton armé par le battage (Annales des Travaux Publics de Belgique, février 1935).
c) Tensions produites dans le béton et le béton armé par suite de variations de volume (Revue Universelle des Mines, Liège, janvier et février 1936).
- [25] O. E. Gjörv. — Investigation on norwegian marine concrete structures (R.I.L.E.M. Colloque international sur le comportement des bétons exposés à l'eau de mer. Palerme, mai 1965).
- [26] F. M. Lea & C. M. Watkins. — The durability of reinforced concrete in sea-water (National Building Studies. Research Paper No 30. London, 1960).
- [27] F. Campus. — Prescriptions et recommandations pour la construction. Observations expérimentales. Thème III. Rapport général. Colloque international sur le comportement des bétons exposés à l'eau de mer, Palerme, mai 1965 (Bulletin R.I.L.E.M. n° 30, mars 1966).
- [28] J. Brocard et R. Cirodde. — Recherches sur le comportement du béton en Méditerranée (Bulletin R.I.L.E.M. n° 32, septembre 1966).
- [29] O. E. Gjörv, J. Gukild & H. P. Sundh. — Investigation of concrete piles under varying conditions in sea-water (Bulletin R.I.L.E.M., n° 32, septembre 1966).
- [30] V. Sevieri. — a) Osservazioni sullo solfo di solfuro delle loppe basiche et dei cementi di alto forno (La Chimica e l'Industria, Milano, Aprile 1936).
b) Agglomeranti marini di altoforno (Firenze, Marzo 1939).

TABLE DES MATIERES

	Page
	n° 1 - 1967
Avant-propos	7
<i>Première partie.</i> Programme et organisation des essais	8
Chapitre I. Programme des essais	8
Chapitre II. Organisation et déroulement des opérations	10
<i>Deuxième partie.</i> Essais comparatifs des divers ciments	19
Chapitre III. Essais normaux de réception, analyses chimiques et essais de départ	19
Chapitre IV. Essais Le Châtelier-Anstett	23
Chapitre V. Essais de retrait	28
Chapitre VI. Essais de filtration	30
Chapitre VII. Chaleur dégagée par l'hydratation en 72 heures	35
<i>Troisième partie.</i> Essais et observations sur les mortiers et les bétons conservés dans divers milieux de 1934 à 1964	36
Chapitre VIII. Prélèvements du 22 février 1935 (après 5 mois d'immersion)	36
Chapitre IX. Prélèvements du 20 août 1935 (après 11 mois d'immersion)	39
Chapitre X. Prélèvements du 24 août 1936 (après 23 mois d'immersion)	42
	n° 2 - 1967
Chapitre XI. Prélèvements du 1 ^{er} septembre 1938 (après 47 mois d'immersion)	105
Chapitre XII. Prélèvements des 8 et 9 octobre 1945 (après onze années d'immersion)	109
Chapitre XIII. Prélèvements du 16 septembre 1954 (après vingt années d'immersion)	121
Chapitre XIV. Prélèvements du 1 ^{er} avril 1964 (après trente années d'immersion) Mortiers et bétons . .	129
Chapitre XV. Prélèvements du 1 ^{er} avril 1964 (après trente années d'immersion) Cylindres de béton armé	147
<i>Quatrième partie.</i> Examen des résultats	154
Chapitre XVI. Commentaires généraux	239
	n° 3 - 1967
Chapitre XVII. Comportement en immersion marine à mi-marée de liants hydrauliques spéciaux à base de laitier basique granulé de haut-fourneau	247
Chapitre XVIII. Références bibliographiques	251

VOLLEDIG VERSLAG AANGAANDE DE PROEVEN
EN WAARNEMINGEN UITGEVOERD OP PROEFSTUKKEN
VAN DIVERSE MORTELS EN BETONSOORTEN
GEDURENDE EEN PERIODE VAN DERTIG JAAR
(1934-1964), EN WAARVAN EEN GROOT AANTAL
BLIJVEND WERDEN ONDERGEDOMPELD IN DE
NOORDZEE TE OOSTENDE
(2e Vervolg en slot) *

Het programma van 1934 voorzag geen enkele exploitatie van scheikundige proeven. Het is het belang van de fysische waarnemingen, welke naargelang van de vordering van het onderzoek werden verzameld, dat op de wenselijkheid van een dergelijke exploitatie heeft gewezen, ondanks het toevallig verlies, — door oorlogsfeiten, — van de reserves aan vers cement, dat deze proeven minder gemakkelijk en minder zeker heeft gemaakt.

De proefstukken van de verschillende, 30 jaar oude mortels hebben het voorwerp uitgemaakt van fysico-chemische onderzoeken, volgens moderne methodes, in de laboratoria van Professor W. De Keyser, van de Vrije Universiteit te Brussel.

De courante analyses welke te Luik plaatsgrepen hebben uitgewezen dat de proefstukken, die in het zeewater bewaard bleven, een soms aanzienlijk deel van hun kalkgehalte verloren hadden, naargelang van hun graad van ontbinding. Door vergelijking met de analyse van de proefstukken van dezelfde ouderdom, die in drinkwater werden bewaard, kon een index van de verhouding ontbonden cement worden bepaald. De waarden van deze index voor de diverse cementsoorten stemmen volkomen overeen met de resultaten van de mechanische proeven. Deze laatste hebben nochtans aange-

toond dat de overblijvende fragmenten van de, door het zeewater vermolde proefstukken steeds een sterke cohesie bezitten, niettegenstaande het kalkverlies.

Benevens de mechanische proeven en de scheikundige analyses, die doeltreffende resultaten opleveren, hebben ook de metingen van het gewicht of van het volume van de proefstukken, alsmede de fotografische beelden, tot waardevolle doch beperkte appreciatie-elementen gevoerd. De dichtheidsmetingen, of deze welke hiermede verband houden, zijn daarentegen onzeker en over het algemeen weinig betekenisvol.

De speciale doorlatendheidsproeven die werden uitgevoerd zijn niet in tegenspraak met de globale gedragingen van de diverse cementsoorten in zeewater. Hun uitvoering en hun interpretatie zijn echter moeilijk, alhoewel niet van belang ontbloomt. De capillaire drenkingsproeven waren niet aangewezen voor de havens van de Belgische kust.

Talrijke informaties werden terloops door de proeven bijgebracht aangaande de weerstand van de diverse cementsoorten ten opzichte van een geconcentreerde sulfaatoplossing. Deze laatste vertoont een sterke en snelle inwerking op de magere mortels, en zij rangschikt de cementsoorten zoals hun gedrag in zeewater. De inwerking op de mortels met een gemiddelde mengverhouding is minder kenmerkend, en zij is dit praktisch niet meer voor de cementrijke mortels, alsmede voor de betonsoorten welke in deze studie werden beschouwd. Om een

(*) Voor de aanvang en het 1° vervolg, zie afleveringen 1 en 2/1967 van het *Tijdschrift der Openbare Werken van België*, bladzijden 45 en 165.

degradatie door de sulfaten te beoordelen, dient dan ook niet alleen het agressief agens beschouwd, doch ook de kwaliteit van het beton dat erdoor wordt aangetast.

Het onderdompelen, in een sterk geconcentreerde sulfaatoplossing, van proefstukken van zeer magere mortel kan, binnen enkele weken of enkele maanden, aanduidingen verschaffen aangaande het weerstandsvermogen van de cementsoorten ten opzichte van de zeewerking. Zulks is niet het geval voor de Le Châtelier-Anstett-proef, welke talrijke cementsoorten zou doen verwerpen die praktisch nochtans zeer goed aan de zeewerking weerstaan.

Dit spruit voort uit het verschil van aard tussen de zuiver chemische aantasting vanwege de sulfaten en de complexe actie van het zeewater, waarvan de hydrodynamische en atmosferische componenten, — en vooral de vorst, — een aanzienlijke rol spelen.

De sulfaatoplossing ontbindt geleidelijk de mortel vanaf het oppervlak, zonder stofafname, totdat deze eventueel tot brij is herleid.

Door de bewegingen van het zeewater, worden de oppervlakkige degradatieprodukten weggevoerd naarmate zij zich vormen. De overblijvende stof is zeer coherent, alhoewel zij gebeurlijk zeer arm kan worden zijn aan kalk, door diffusie hiervan naar buiten toe.

Het deel van het onderzoek dat verband houdt met de gewapend-betoncilinders was weinig omvangrijk, doch het heeft zeer kostbare, bijkomende informaties verstrekt aangaande het gedrag van de betonsoorten in het zeewater, alsmede bijzonder suggestieve inlichtingen nopens de bescherming van de wapeningen door het beton. In het zeewater, en op 9 proefstukken waarin 36 staven waren gehuld, hebben 3 proefstukken en 7 staven corrosieverschijnselen vertoond. Geen enkele staaf die met 4 cm beton was bedekt werd aangetast na 30 jaar onderdompeling, zelfs bij de betonsoorten die het minst weerstandbiedend zijn gebleken ten opzichte van het zeewater. De cilindervorm is voordelig voor de weerstand tegen de zeewerking. De scherpe kanten en punten van de prismatische vormen zijn zeer kwetsbaar en worden zeer gemakkelijk aangetast.

Het goed gedrag van de slechts 1 cm dikke betonoverdekkingen van de wapeningen is te wijten aan de degelijke hoedanigheid van het beton, aan de cilindrische vorm en aan het feit dat de proefstukken evenwijdig met de wapeningen gebetonneerd werden. In de praktijk zal in ieder geval een veel grotere betonbedekking nodig zijn, onder meer om een degelijke verwerking van het afdekkingsbeton mogelijk te maken, terwijl een zelfs

dikke afdekking van minderwaardig beton geen doeltreffende bescherming zou kunnen opleveren. De voortdurende bevochtiging van het afdekkingsbeton beneden het hoogwaterpeil verhindert de krimp van het beton en aldus de langse scheuren, — evenwijdig met de wapeningen, — welke hiervan het gevolg kunnen zijn, en welke veel gevaar bieden voor de corrosie van de wapeningen.

De maatregelen welke van bij de aanvang van de 30 jaar lange beproevingsperiode werden getroffen zijn volkomen aangepast gebleken aan de kenmerken van de Noordzee te Oostende, o.m. voor wat betreft de afmetingen en de onderlinge schikking van de proefstukken, waardoor zeer talrijke waarnemingen en metingen mogelijk werden gemaakt

In 1939, werd door een private maatschappij het verzoek geuit om analoge proeven als deze ondernomen in 1934 uit te voeren op zeer speciale bindmiddelen met als grondbestanddeel gegraneerde basische hoogovenslak.

Eén daarvan, dat het nummer 11 draagt, heeft als catalysator zeewater met toevoeging van een weinig kalk. Het andere, bekend als nummer 12, wordt geactiveerd door een oplossing à 12 % van droog natriumsulfaat met toevoeging van een weinig kalk. Prismatische mortelproefstukken van $4 \times 4 \times 16$ cm werden op de onderdom van 28 dagen in het zeewater te Oostende ondergedompeld, op dezelfde plaats en volgens de drie zelfde mengverhoudingen van 300, 450 en 600 kg bindmiddel voor 1500 kg Rijnzand 0/2 mm.

De normale proeven en de proeven op plastische mortel na 28 dagen hebben uitgewezen dat het bindmiddel 11 zeer traag verhardt, terwijl de verharding van het bindmiddel 12 snel verloopt. Zij ontwikkelen beide weinig warmte, vertonen beide een normale krimp doch gedragen zich op volkomen verschillende wijze ten opzichte van de Le Châtelier-Anstett-proef. Het bindmiddel 11 voldoet hieraan; het bindmiddel 12 geenszins.

Nochtans hebben al de mortelproefstukken met het bindmiddel 11 slecht weerstaan aan de zeewerking, vermits zij na zes jaar onderdompeling praktisch volledig vernield waren. Deze vervaardigd met het bindmiddel 12 waren na 25 jaar onderdompeling om zo te zeggen nog niet aangetast, voor de mengverhouding van 450 kg bindmiddel per m^3 zand.

Deze proefnemingen dragen bij tot het algemeen begrip van het onderzoek, o.m. voor wat betreft het verband tussen de weerstand ten opzichte van de sulfaten en het globaal gedrag in zeewater.