Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 4 (1952)

Rubrik: CI4: Corrosion of concrete and reinforcement

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

CI 4

Corrosion du béton et des armatures

The corrosion of concrete and its reinforcement

Die Korrosion des Betons und der Armierungen

PROF. F. CAMPUS
Recteur de l'Université de Liège

La durabilité des premiers ouvrages en béton et en béton armé semble avoir été généralement satisfaisante. Cet effet de la prudence de leurs constructeurs a fait naître l'impression de l'inaltérabilité de ces matériaux. L'évolution de leur technique s'est faite dans le sens d'une importance croissante du calcul statique, d'une augmentation des contraintes admissibles et de l'économie dans la composition des bétons et dans la mise en œuvre. L'appréciation des propriétés physiques de ces matériaux n'a pas retenu l'attention des praticiens dans la même mesure. Le résultat en a été que les problèmes de la corrosion du béton et des armatures se sont imposés à l'attention des constructeurs d'une manière croissante depuis un quart de siècle. La confiance dans leur inaltérabilité a considérablement diminué et fait place progressivement à la notion que la durabilité doit être prise en considération au même titre que les calculs en vue d'assurer l'efficacité, la sécurité, l'économie et l'aspect d'une construction. Durabilité relative d'ailleurs. Aucune pierre naturelle n'est finalement inaltérable. On ne conçoit pas que le conglomérat artificiel du béton pourrait l'être. D'une manière idéale, selon la conception probabiliste de la sécurité, faisant intervenir la durée normale ou probable assignée à l'ouvrage, on pourrait considérer comme possible de déterminer la qualité du béton et des armatures mis en œuvre, assurant une probabilité totale de ruine suffisamment faible pour une durée déterminée. La mise en pratique de cette conception paraît toutefois particulièrement difficile si l'on veut graduer la durabilité avec une certaine sensibilité. L'expérience dont on dispose, relativement courte il est vrai, semble plutôt suggérer une règle de tout ou rien.

Des ouvrages importants ont manifesté à des époques récentes des indices de dégradation inquiétante, après des durées de l'ordre de dix à quinze ans, très inférieures à la durée d'utilisation assignée en toute sécurité et sans nécessité de réparations. Les réparations sont toujours difficiles, coûteuses, précaires ou aléatoires. Comme elles sont en outre imprévues, l'impression qu'elles causent est très défavorable. Cela s'applique à des ouvrages importants isolés, tels que des ponts, des barrages, des

édifices. On en trouve peu qui ne présentent dans l'une ou l'autre de leurs parties des indices caractéristiques de dégradation, notamment s'il s'agit de béton armé. La qualité de l'ouvrage se caractérise grosso-modo par la proportion de l'altération.

La question semble s'être posée dans de nombreux pays d'une manière particulièrement aigüe pour les éléments préfabriqués en béton armé, même les plus importants, tels que les poteaux pour le support des lignes électriques aériennes. Les exploitants de ces lignes s'en inquiètent très vivement, en raison de l'importance financière du problème et de la déception considérable qu'ils éprouvent au sujet de la durée qu'ils escomptaient des poteaux en béton armé, sans frais d'entretien ni de réparations. Cette situation existe en Belgique [1] et aussi dans d'autres pays.[2]

Les causes de dégradation du béton et du béton armé sont très nombreuses. La plupart sont externes. On ne connaît guère en Europe les phénomènes signalés aux Etats-Unis d'Amérique de désagrégation des bétons par suite de l'attaque chimique des agrégats par les ciments.[3] Par contre, on y a connu des cas de dégradation par transformation cristalline de certains composants du ciment alumineux hydraté.[4] Nous ne sommes jamais parvenus au laboratoire à produire des corrosions d'armatures par les constituants normaux du béton, notamment des ciments spéciaux. Seules les cendrées peuvent attaquer les armatures, mais on ne peut les considérer comme des agrégats normaux.

En dehors de ces cas exceptionnels de corrosion d'origine interne, on connaît de nombreuses causes externes de corrosion. Certaines sont particulières (ambiance des usines chimiques, usines à gaz, condensation de vapeurs d'eau dans les papeteries et les buanderies, sucreries, laiteries, huileries, eaux sulfatées des lavoirs et des terrils de charbonnages et des silos à charbon, eaux minérales carbo-gazeuses, etc.). Il n'est pas possible de les énumérer toutes, encore moins de les étudier dans l'espace d'un bref rapport. Leur connaissance est aussi importante pour le constructeur que celle des méthodes de calcul. Pour certains cas, l'emploi de matériaux spéciaux est à recommander, p.ex. les ciments sursulfatés durcissent davantage dans les eaux sulfatées que dans l'eau potable.[5] D'autres sont sans remède: aucun liant hydraulique ne résiste aux eaux carbo-gazeuses telles que les eaux de Spa.

Dans tous les cas où le béton, armé ou non, est susceptible de résister, les qualités qu'il doit posséder à cet effet sont les mêmes que celles qui sont envisagées plus loin pour assurer la résistance aux causes plus générales de corrosion, telles que les eaux très pures ou granitiques pour les barrages, les eaux marines pour les ouvrages maritimes et les actions atmosphériques pour tous les ouvrages extérieurs non immergés. Ces dernières sont les plus communes; elles contribuent puissamment aussi à l'action des eaux marines sur les parties d'ouvrages soumises à l'action de la marée; elles agissent également sur les barrages.

Dans un rapport d'étendue aussi limitée, qui ne peut être ni détaillé ni épisodique, il paraît opportun de se tenir principalement au cas le plus général à tous points de vue des effets des actions atmosphériques, qui se manifestent par les variations simultanées et, dans une certaine mesure, corrélatives de la température et de l'humidité. Ces variations conditionnent d'ailleurs le climat, avec les mouvements de l'air.

L'action destructrice de ces variations sur le béton armé ou non résulte principalement de l'hétérogénéité du béton. Il est composé de trois phases: solide, liquide (eau) et gazeuse (vides remplis d'air). La phase solide est elle-même hétérogène, se composant des agrégats et du sable, qui sont souvent de natures différentes, et du ciment hydraté partiellement. Les variations de la température et de l'humidité atmosphérique modifient les proportions des phases liquide et gazeuse, par évapora-

[1] Voir la bibliographie à la fin du rapport.

tion, condensation ou mouillage direct en cas de pluie, la somme de ces phases restant sensiblement constante. Ceci s'applique au béton dans son stade de durcissement ultime. Pendant les premiers temps qui suivent sa mise en œuvre, les phénomènes d'hydratation progressive qui constituent la prise et le durcissement font intervenir des changements dans les proportions des phases. C'est d'ailleurs pendant ces premiers temps que se manifeste principalement le phénomène du retrait, lié aux variations de la phase liquide. Ce retrait est en majeure partie irréversible.

Après le durcissement complet, les variations hygrométriques peuvent encore engendrer des modifications de volume plus ou moins réversibles, mais atténuées par rapport au retrait initial. Il est bien connu que le retrait peut provoquer des fissures lorsqu'il est entravé. Il s'agit là généralement d'empêchements de retrait d'ensemble affectant des pièces de grandes dimensions. Ces fissures macroscopiques, transversales par rapport à la plus grande dimension des pièces, sont des amorces à corrosion. Il est sans doute généralement bien connu aussi à l'heure actuelle que l'hétérogénéité de la phase solide donne lieu à des tensions de retrait, éventuellement à des fissures microscopiques ou même macroscopiques. L'élément affecté par le retrait est la pâte de ciment hydratée; les variations de volume des agrégats sont négligeables par rapport à celles du ciment ou en tous cas très inférieures (laitier concassé). Les agrégats entravant le retrait du ciment sont comprimés, cependant que les réseaux agglomérants de ciment ou de mortier sont tendus. Des microfissures peuvent naître de ce fait dans le mortier.[6] Les armatures du béton armé constituent une hétérogénéité de plus et très importante. Son invariabilité pratique de volume entrave considérablement le retrait du béton et donne lieu à des tensions de retrait qui engendrent souvent des fissures, principalement parallèles aux armatures très voisines des surfaces libres du béton.[7] Ces fissures longitudinales, parallèles aux armatures principales, ou transversales, parallèles aux étriers, sont en effet l'apparence la plus commune et la plus générale de la dégradation du béton armé.

Abstraction faite de l'influence des variations de température sur les variations hygrométriques, influençant le retrait, les variations thermiques exercent des effets directs de dilatation ou de contraction. Le coefficient de dilatation thermique des bétons est assez variable et généralement mal connu, il varie avec la composition, la nature des constituants et l'âge, aussi avec le degré d'humidité. En outre, il constitue un coefficient moyen, chaque constituant ayant son coefficient de dilatation propre. Pour une même variation de température, il peut se produire des variations de dimensions différentes pour les pierres, les grains de sable et la pâte de ciment, aussi pour l'acier des armatures. Le béton peut notamment, contrairement à une opinion assez répandue, avoir un coefficient de dilatation thermique sensiblement différent de celui de l'acier, généralement inférieur.[8] Ceci s'ajoute aux effets défavorables du retrait en cas d'abaissement de température, mais les atténue en cas d'élévation (abstraction faite des effets sur le retrait de variations hygrométriques corrélatives éventuelles).

A ces variations considérées comme uniformes dans un volume limité s'ajoutent, dans les pièces de dimensions assez considérables, les effets du régime variable de diffusion ou de propagation. Les effets des variations hygrométriques ne sont pas uniformes ni instantanés dans toute la masse, mais diffusent à partir de la surface dans la masse avec une certaine vitesse, dépendant de la porosité. Il en est de même des variations thermiques d'une manière dépendant de la capacité et de la conductibilité thermiques.

Ces phénomènes de régime variable peuvent être étudiés théoriquement, selon certaines hypothèses, par des méthodes connues. Il en résulte des différences de retrait et de dilatation ou de contraction thermique dans la masse, donnant lieu à des

tensions intrinsèques et qui peuvent aussi produire des fissurations ou des écaillages au voisinage des surfaces libres.

Enfin, il faut encore ajouter à cela les effets de la variation de composition des bétons. La composition nominale n'est qu'une moyenne statistique, dont la composition locale des diverses gâchées diffère plus ou moins. Il en résulte des différentiations dans toute la masse des facteurs spécifiques de retrait et de dilatation thermique. Certes, certains de ces effets, considérés en eux-mêmes, sont assez peu importants et guère susceptibles de causer *seuls* des dégradations appréciables. Mais ils sont susceptibles de se cumuler et, s'ils s'additionnent d'une manière défavorable à la principale des causes déjà considérées, le retrait, ils peuvent en accentuer les effets au point de rendre les dégradations inévitables. Celles-ci résultent aussi non seulement de la cumulation des divers effets considérés précédemment, mais aussi de leur répétition incessante et de leurs changements de sens plus ou moins périodiques. C'est ce qui explique l'effet du temps sur l'apparition des dégradations et leur progression.

Une cause de dégradation particulièrement active dans les climats où elle existe est le gel, qui combine l'action des variations hygrométriques et thermiques. L'espace total réservé au rapport n'est pas suffisant pour une analyse ou une discussion quelque peu détaillée du phénomène de la gélivité du béton durci, qui n'est certes pas simple. On s'en tiendra donc aux considérations les plus globales. L'expérience établit que l'eau congelée dans le béton gonfle et fait gonfler le béton. Ce gonflement dépasse localement l'allongement de rupture du béton et n'est de ce fait pas entièrement réversible. Chaque gel désagrège donc tant soit peu le béton. La répétition des gels entraîne une dégradation progressive plus ou moins rapide. Dans un béton gélif, l'altération est assez rapide. Si elle est lente, le béton est réputé ingélif, mais il ne peut y avoir de béton absolument ingélif. C'est ce que montrent les essais de gélivité, lorsqu'on a recours pour en caractériser les effets à un indice très sensible; en l'occurrence le module d'élasticité dynamique mesuré par le son ou l'ultra-son. Chaque gel donne lieu à une diminution appréciable du module d'élasticité. La gélivité dépend essentiellement de la quantité d'eau existant dans le béton, c'est-à-dire du mouillage initial et de l'eau qui a pu pénétrer dans le béton durci. Il s'agit donc de l'eau libre du béton, de telle sorte que finalement la gélivité est dépendante surtout de la porosité réelle du béton durci, représentée par les proportions en volume d'eau libre et d'air (vides totaux). Un béton ingélif sera donc très compact, ce qui implique une excellente composition et une mise en œuvre parfaite. Il est désirable que la *porosité en volume* soit inférieure à 10%, alors que des bétons de médiocre qualité ont jusqu'à 20% et plus de vides totaux. Ceci implique aussi une richesse suffisante en ciment, adéquate à la composition et à la granulométrie. A l'opposé, des bétons entièrement caverneux pourraient être ingélifs, mais il ne s'agit pas ici de bétons de cette nature. La forme des pores, surtout remplis d'eau, peut avoir de l'importance. Des lamelles d'eau libre, comme il peut s'en former par la ségrégation d'un béton vibré trop mouillé, sont particulièrement nocives [6] et tendent à favoriser un écaillage du béton par le gel. Au contraire, des pores très répartis et de forme plutôt sphérique peuvent être inoffensifs, ce qui peut expliquer la résistance plus grande au gel qui semble bien résulter de l'incorporation au béton d'agents entraîneurs d'air. Cet effet est d'autant plus marqué que le béton est plus médiocre, c'est-à-dire risque d'être plus gélif en absence d'air occlus.

Les variations des coefficients de dilatation thermique jouent un rôle important dans la gélivité du béton. Des essais effectués dans nos laboratoires ont montré notamment une bonne tenue au gel de bétons formés de pierres dont le coefficient de dilatation thermique est assez voisin de celui du mortier. Dans ces conditions, le

calibre maximum des agrégats est assez indifférent et il peut advenir que des bétons faits avec de gros agrégats aient une tenue au gel équivalente, sinon meilleure, à celle de bétons plus fins.

Ceci diffère des conclusions qui ont été déduites d'essais qui tendaient à faire dépendre la gélivité dans une large mesure du calibre des agrégats, la susceptibilité au gel croissant avec le calibre. Cela ne semble vrai que dans le cas où le coefficient de dilatation thermique des agrégats est très différent de celui du mortier ou de la pâte de ciment; l'effet du calibre se comprend très bien dans ces conditions. Mais l'effet de la différence des coefficients de dilatation thermique sur la gélivité semble plus grand que celui du calibre des agrégats. C'est là un point très utile à considérer pour la recherche de matériaux convenant pour un béton résistant au gel.

Dans le béton armé, en cas de gel, l'armature refroidie se contracte, cependant que le béton gelé gonfle. Ceci agit dans le même sens que les effets du retrait et d'une manière très accusée. La répétition saisonnière de ces effets doit contribuer beaucoup à faire naître les fissures parallèles aux armatures voisines des surfaces libres. De plus, le gonflement par le gel des réglettes de béton ainsi constituées, couvrant les armatures, les fait flamber et les en détache. L'écaillage par le gel du béton non armé peut aussi se produire par suite de la pénétration progressive du gel dans le béton à partir de la surface. Le béton superficiel congelé ayant gonflé, des tensions de traction et tangentielles naissent à la jonction du béton non congelé et tendent à en séparer la couche extérieure.

En fait, les dégradations les plus fréquentes et les plus caractéristiques sont les écaillages superficiels des bétons (surtout par le gel) et le dénudage des armatures du béton armé. Celui-ci peut provenir des processus précédemment indiqués de formation de fissures parallèles aux armatures et de la tendance à la séparation de l'armature du béton de couverture. L'eau atmosphérique peut alors atteindre facilement les armatures et les couvrir de rouille. Cette corrosion des armatures s'accompagne d'une expansion, qui provoque une aggravation et une progression marquées du phénomène. Dès lors, la dégradation est très prononcée et lorsqu'il s'agit d'une construction très exposée et que le béton est médiocre, il peut se décomposer à grande profondeur sous les armatures dans un espace de temps de dix à quinze ans, comme nous avons pu le constater sur des constructions de grande importance.

La fissuration du béton le long de l'armature préalable à la rouille de celle-ci n'est pas admise par tous. On préfère parfois invoquer la pénétration des eaux pluviales jusqu'aux armatures à la faveur de la porosité et de la capacité d'absorption d'eau du béton. Sauf les cas de porosité béante du béton, dénudant l'armature dès l'origine, on peut objecter que l'eau absorbée par le béton doit être rendue alcaline par la chaux et doit être de ce fait passive à l'égard des armatures. On pourrait envisager que la chaux libre du béton soit progressivement carbonatée et que, à la longue, la passivation disparaîtrait. L'eau atteignant les armatures en provoquerait alors la rouille, l'expansion et par là l'éclatement de l'enveloppe de béton.

Ceci conduit à attacher moins d'importance à la porosité proprement dite qu'à la capacité et à la rapidité d'absorption et d'évaporation d'eau du béton, d'ailleurs en corrélation statistique avec la porosité. On peut concevoir d'après cela [9] une méthode de calcul de l'épaisseur minimum de recouvrement sur les armatures, basée sur la fréquence et l'intensité des pluies et les facteurs d'absorption et d'évaporation d'eau par le béton. Seulement, ces facteurs sont très aléatoires.

Au point de vue des résultats, les deux explications conduisent aux mêmes et il n'est pas essentiel que les fissures soient préalables ou postérieures à la rouille de l'armature. Ainsi qu'il a été dit plus haut, la dégradation du béton armé comme

celle du béton est due probablement à la cumulation et à la répétition de toutes les causes envisagées, diversifiées par l'hétérogénéité des matériaux à divers degrés. L'hypothèse de la fissuration du béton postérieure à la rouille serait abusive si elle prétendait éliminer tous les autres effets, surtout le retrait et le gel. En effet, des expériences de laboratoire reproduisent très facilement la formation de fissures par le retrait et de dégradations du béton par le gel, cependant que nous n'avons guère réussi au laboratoire à provoquer la rouille d'armatures enrobées de béton. Par contre, l'hypothèse des effets cumulés du retrait, des variations thermiques et du gel n'exclut pas que s'y ajoute celui de l'absorption d'eau, d'autant plus qu'il est favorisé par les autres. Mais il n'est généralement pas seul en cause. Même dans les cas de corrosion du béton armé dans lesquels le gel ne peut pas intervenir, p.ex. sous un climat torride.[10] Le retrait et les variations thermiques et hygrométriques y jouent un grand rôle. Les pluies intenses jointes aux températures élevées provoquent une circulation d'eau importante et alternée dans le béton, qui au bout d'un certain temps enlève toute la chaux libre susceptible d'être formée dans le béton par hydrolyse du ciment hydraté. Le béton devient ainsi de plus en plus poreux, et, la carbonatation aidant, l'eau qui parvient abondamment aux armatures finit par les corroder lorsqu'elle n'est plus alcalinisée par la chaux. Au voisinage de la mer, ce processus de rouille des armatures en raison de la porosité croissante du béton peut être accéléré par les embruns salins.[11]

D'autres cas de corrosion, dans lesquels la rouille des armatures a été provoquée par l'eau salée dans des régions torrides ont été décrits.[12] Le processus précité sera naturellement accéléré et aggravé si l'eau contient des produits corrodant les armatures.

Dans le cas de barrages retenant des eaux très pures ou acides, c'est le processus d'enlèvement de chaux par filtration qui produira des effets analogues, par augmentation croissante de la porosité du béton, alors que normalement, il peut y avoir colmatage.

L'espace fait défaut pour analyser ici l'action des eaux marines. On sait que cette action est beaucoup plus accentuée sur les ouvrages découverts par la marée que sur ceux qui sont toujours immergés. Même les embruns sont plus à craindre que l'immersion permanente. Ceci montre que les actions atmosphériques interviennent très activement dans l'attaque des bétons et des bétons armés par la mer, qui se produit par la répétition de ces effets et leur cumulation avec l'action chimique de l'eau de mer, qui n'est souvent pas suffisante pour produire seule des dégradations notables.[5]

Ceci permet de conclure que les principaux moyens propres à différer la corrosion du béton et des armatures et à augmenter leur durabilité sont d'application dans tous les cas. Pour le béton, il s'agit d'assurer sa meilleure compacité compatible avec les conditions de mise en œuvre, par une bonne composition, une bonne qualité des agrégats (non réactifs, ni absorbants, ni gélifs) et une excellente mise en œuvre avec le minimum d'eau. Il est toujours recommandable d'utiliser les coffrages les plus lisses possibles, afin d'avoir des surfaces de béton très pleines et lisses. En bref, on prendra toutes les précautions utiles pour que le béton soit et reste aussi impénétrable que possible aux agents extérieurs (faible porosité, faible perméabilité, faible pouvoir absorbant). On le protègera pendant les premières périodes de durcissement contre le gel et la dessication. Dans certains cas, il sera nécessaire de recouvrir la surface du béton d'un enduit plastique adhérent et étanche, durable ou régulièrement renouvelé.

En ce qui concerne les armatures, elles doivent être recouvertes d'une couche de béton d'excellente qualité, d'épaisseur suffisante et durable. C'est le point le plus

délicat, car de fortes objections sont faites au nom de l'économie. Mais il s'agit d'une économie partielle, celle de construction, qui est souvent fallacieuse selon quelques expériences plutôt coûteuses. L'économie d'ensemble doit tenir compte de la durée. Les points de vue des entrepreneurs et des utilisateurs doivent s'accorder sur ce sujet. Il y a trois limites d'épaisseur à considérer dont il faut dans chaque cas adopter la plus élevée:

1° une limite absolue, destinée à protéger l'armature de l'atteinte par l'eau absorbée et que nous proposons, pour le climat de la Belgique, de prendre égale à 30 mm.;

2° une limite par rapport au diamètre des barres, pour tenir compte de l'effet des variations de volume et que nous proposons de prendre égale à deux fois le diamètre de la barre, comptée à l'extérieur de celle-ci;

3° une limite relative au calibre maximum de l'agrégat, que nous proposons de prendre égale à 1,5 fois la dimension maximum nominale de l'agrégat.

Les trois limites coïncident pour du béton armé dont les agrégats ne dépassent pas 20 mm. d'épaisseur nominale et dont les armatures ont 15 mm. de diamètre. Ces propositions favorisent les barres minces pour le béton armé et les agrégats de petit calibre, ce qui est recommandable pour les pièces élancées.

Fig. 1

Pour des milieux particulièrement agressifs, la limite minimum absolue peut être augmentée jusqu'à 50 ou 60 mm. Des précautions effectives seront prises pour garantir l'épaisseur de recouvrement minimum après exécution. Des moyens de contrôle électriques existent à cet effet.

Le béton précontraint est trop récent pour que l'on puisse juger de sa durabilité. Il semble que, par suite de la compression de précontrainte et l'emploi normal de

béton de meilleure qualité, la corrosion doive être moins à craindre. En cas de post-contrainte, que les câbles soient nus ou dans des gaînes, il faudra en assurer une parfaite protection contre les agents de corrosion extérieurs. L'injection des gaînes au moyen de mortier après la mise en tension des câbles devrait notamment être soigneusement contrôlée. Notre collègue M. le Professeur Magnel nous a prié de signaler un cas de corrosion se limitant aux fils de précontrainte aux endroits où ils sont serrés dans les clavettes de fixation (fig. 1). Les cables entièrement nus et les plaques de répartition étaient indemnes après six ans. Il se recommande donc de recouvrir soigneusement les dispositifs de fixation des cables d'un béton de protection, d'adhérence garantie.

En raison de la susceptibilité des fils à la fatigue près des ancrages, cette précaution ne dispense pas d'assurer l'adhérence des fils sur une longueur suffisante aux extrémités par injection des gaînes.

Bibliographie

(1) F. Campus. "La durabilité du béton et du béton armé soumis aux actions atmosphériques. Considération particulière des supports en béton armé des lignes aériennes," Procès-verbal de la séance du 8 novembre 1950 de l'A.B.E.M., Bruxelles, *Bull. sci. de l'A.I.M.*, Nos. 7, 8, 9, Liège, juillet, août, septembre 1950.

(2) R. Jour. "Résistance des poteaux en béton armé des lignes aériennes de contact à l'action de l'eau de pluie," *L'Industrie des voies ferrées et des transports automobiles*, Paris, octobre 1950.

(3) T. M. Kelly, L. Schuman and F. B. Hornibrook. "A study of alkali-aggregate reactivity by means of mortar-bar expansions," *J. Amer. Concrete Inst.*, **20**, (1), Sept. 1948.

(4) R. Cavenel. "Réparation du pont de la Corde sur la Penzé près de Carantec (Finistère)," *Annales des Ponts et Chaussées*, Paris, mars-avril 1944.

(5) 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.

(6) J. Bolomey. "Gélivité des bétons," *Bull. du ciment*, novembre 1946.

(7) F. Campus. "Effets élastiques d'inclusions hétérogènes dans un milieu subissant un retrait," Abstracts of papers, 4th International Congress for Applied Mechanics, Cambride, 1934.

"Tensions produites dans le béton et le béton armé par suite des variations de volume," *Hormigon y Acero*, Madrid, 1935; *Revue Universelle des Mines*, Liège, janvier 1936.

(8) A. Juillard. "Quelques propriétés du ciment et du béton: dilatation, retrait, élasticité," *Schweizerische Bauzeitung*, 1932.

(9) R. Dienne. "La grave maladie des poteaux électriques en béton armé," Publication de l'Association des Ingénieurs de la Faculté Polytechnique de Mons, No. 1, 1950.

(10) C. Wolterbeek. "Emploi du béton et du béton armé aux Colonies," Ier Congrès International du Béton et du Béton armé, Tome II, Liège, 1930.

(11) R. Peltier. "Note sur la rouille des fers dans les bétons aux colonies," *Annales des Ponts et Chaussées*, No. 1, Paris, 1950.

(12) Batta, Rabozée, Baes, Campus *Procès-verbal de la 5me séance tenue le 17 décembre 1930*, Publication No. 5 de 1930 de l'Association Belge pour l'Etude et l'Essai des Matériaux.

Résumé

Les causes de corrosion du béton et des armatures sont exceptionnellement internes, généralement elles sont externes. A côté de nombreuses causes particulières de corrosion, il en existe de très communes, telles les actions des eaux très pures ou marines et celles des agents atmosphériques. Ces dernières sont spécialement envisagées en rapport avec l'hétérogénéité multiple du béton et du béton armé, qui

commande leurs effets. Le mécanisme complexe des dégradations habituelles est analysé succinctement. Les remèdes sont à trouver dans les qualités de compacité effective du béton et un recouvrement suffisant des armatures.

Summary

The causes of corrosion of concrete and its reinforcement are seldom internal; generally they are external. Besides many particular causes of corrosion, there are some which are very common, such as action of very soft water, sea-water or atmospheric agents. The latter are specially taken into consideration in connection with the manifold heterogeneity of concrete and reinforced concrete, which determines their effects. The complicated reactions in the case of ordinary damage are briefly analysed. Remedies are to be found in sufficiently effective compactness of the concrete and a sufficient covering of the reinforcement.

Zusammenfassung

Die Ursachen der Korrosion des Betons und der Eisenstäbe sind selten innerer, sondern im allgemeinen äusserer Natur. Neben manchen besonderen Korrosionserregern bestehen einige ganz gewöhnliche, wie sehr reines Wasser, Meerwasser oder atmosphärische Wirkstoffe. Die letzteren werden besonders berücksichtigt im Zusammenhang mit der mannigfaltigen Heterogeneität des Betons und des Eisenbetons, die ihre Folgen bestimmt. Der komplizierte Vorgang bei der gewöhnlichen Beschädigung wird kurz analysiert. Gegenmittel finden sich in einer genügenden wirklichen Dichtigkeit des Betons und genügender Ueberdeckung der Bewehrungsstäbe.

Leere Seite
Blank page
Page vide

CI 4

Essais rapides de corrosion des ciments

Accelerated corrosion tests for cements

Kurzfristige Korrosionsversuche für Zemente

MARCEL PROT, Docteur ès Sciences, Docteur ès Lettres
Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, Paris

Intérêt des essais de corrosion des ciments

Les mortiers et les bétons des ciments sont, on le sait, l'objet de corrosions plus ou moins actives, parfois désastreuses, provoquées:

par les eaux de la mer,
par les eaux chargées de sulfate de chaux,
par les eaux vanne,
par les eaux très pures.

Il importerait donc que les ingénieurs puissent s'assurer, par des essais convenables, que le ciment employé pour la construction d'un ouvrage déterminé résistera pendant un temps suffisant, sinon éternellement, aux corrosions auxquelles cet ouvrage devra être exposé.

Les essais de corrosion doivent—il importe d'insister sur ce point—donner des assurances non seulement contre les désagrégations rapides mais encore contre des désagrégations plus ou moins lentes et susceptibles de n'entraîner la ruine de l'ouvrage qu'au bout d'un temps qui peut être de plusieurs années.

Or, si des essais de plusieurs années, comme ceux que l'on pratique actuellement en exposant par exemple des blocs de béton à la mer, donnent des indications sur la résistance à la corrosion de certains types de ciment, ils ne peuvent en aucune manière être utilisés pour le contrôle et la réception d'une fourniture particulière qui peut, en raison d'irrégularités inévitables de fabrication, se montrer peu satisfaisante quoiqu'elle appartienne à un type généralement acceptable.

Il n'est pas exclu par ailleurs que la qualité du sable ou de l'eau de gâchage entrant dans la composition d'un béton ou que la technique de fabrication de ce béton puissent, au moins dans une certaine mesure, influer sur sa tenue en présence d'eaux agressives. Il est donc très souhaitable de disposer d'une méthode d'essai susceptible de donner des résultats concluants sur la qualité d'un ciment qui doit être exposé à des corrosions, dans un délai suffisamment court de l'ordre, sinon de quelques jours

du moins de quelques semaines ou, au maximum, d'un petit nombre de mois sans avoir, comme c'est actuellement le cas, à attendre plusieurs années.

Le problème est de concevoir une technique d'essai qui accélère quantitativement les corrosions sans les modifier qualitativement, c'est ce problème que nous avons entrepris de résoudre à la demande de la Commission française des Chaux et Ciments avec la collaboration du port autonome du Havre et du port de Marseille. Les installations et les appareils sont actuellement en cours de mise au point; nous pensons que les premiers essais de ciments pourront être normalement entrepris vers la fin de cette année et nous espérons pouvoir donner connaissance à Cambridge des premiers résultats obtenus.

Essais de corrosion accélérée

Il ne saurait être question, sous prétexte d'accélérer un essai de corrosion, de substituer un milieu corrodant artificiel au milieu naturel qui doit être considéré, sans s'exposer aux plus graves mécomptes. Les corrosions observées dans la pratique sont, en effet, la conséquence non seulement des constituants principaux du milieu mais aussi souvent de constituants secondaires en quantité infime, de gaz dissous, du *p*H de la solution, voire de microorganismes qui peuvent modifier totalement le processus des réactions souvent très complexes dont le total produit la corrosion.

Il ne saurait être question non plus, sous prétexte d'accélérer l'essai, de porter le milieu naturel considéré à une température très supérieure à sa température ordinaire sans s'exposer à modifier profondément le mécanisme des réactions génératrices de corrosion.

On ne peut, d'autre part, élever notablement la température du milieu et en assurer en même temps le renouvellement sans aboutir à des dépenses d'énergie considérables; dès lors, si l'on provoque par élévation de température des dissolutions actives dans un milieu peu renouvelé, il est évident que ce milieu sera, très rapidement, complètement différent du milieu naturel primitif. Les conclusions d'un tel essai seraient nécessairement suspectes et l'on n'aurait, à aucun titre, l'assurance que le classement qu'il établirait entre les divers ciments essayés correspondrait bien à la réalité pratique.

Le seul procédé susceptible d'accélérer les conclusions sans en modifier la nature nous a paru être, dans ces conditions, d'accroître le contact entre le matériau à essayer et le milieu corrodant:

(*a*) en augmentant la surface libre du matériau relativement à sa masse;
(*b*) en renouvelant rapidement le milieu corrodant au contact de cette surface.

Technique de fin d'essai

La corrosion d'un matériau, et notamment d'un mortier, est un phénomène qui se poursuit d'une manière plus ou moins régulière depuis le commencement de l'essai jusqu'à la désagrégation complète des échantillons essayés. Un problème toujours délicat dans l'étude d'une corrosion est celui qui consiste à apprécier et à noter les progrès de cette corrosion.

La première méthode qui se présente à l'esprit et qui est très géneralement pratiquée est celle des pesées successives à intervalles réguliers, plus ou moins longs. Cette méthode conduit à des manipulations extrêmement laborieuses et délicates au cours desquelles les échantillons courent d'autant plus de risques d'être détériorés que ces pesées se renouvellent plus fréquemment. La comparaison des pertes de poids des différents échantillons se heurte, par ailleurs, à la difficulté pratiquement insoluble qui

provient du fait que certaines corrosions sont uniformément réparties sur toute la surface du matériau tandis que d'autres sont concentrées dans des piqûres ou des fissures étroitement localisées.

Une autre difficulté à laquelle se heurte la méthode des pesées successives provient du fait que si certaines corrosions correspondent bien à une destruction et à une disparition du matériau essayé, ce qui entraîne une perte de poids, d'autres corrosions, par contre, fixent certains constituants du milieu corrodant sur le matériau essayé et tendent par conséquent à augmenter son poids.

Une technique qui nous a paru plus intéressante est celle qui assigne à l'essai une fin nettement marquée et facile à observer, l'indice de corrosion de chaque éprouvette étant alors défini avec précision par le temps qui s'est écoulé entre le début de l'essai et sa fin. Les matériaux qui nous occupent intervenant dans la construction par leur résistance mécanique, il était indiqué de définir une technique d'essai dont la fin serait marquée par la rupture, sous une sollicitation déterminée, d'une éprouvette affaiblie par la corrosion. La fin d'un tel essai peut être au besoin enregistrée et les manipulations sont réduites au minimum car elles se bornent à mettre les éprouvettes en place et à les retirer après l'essai.

Essais statistiques

Il ne suffit pas, pour exprimer la corrodabilité d'un matériau, de faire la moyenne des indices mesurés dans un petit nombre d'expériences; il faut encore, selon une technique que nous avons préconisée depuis déjà longtemps et qui commence à être bien assise, connaître la dispersion des indices de corrosion relevés sur un assez grand nombre d'éprouvettes; ce ne sont pas tant, en effet, les corrosions moyennes qui sont dangereuses que les valeurs anormalement élevées qu'elles sont susceptibles de prendre dans certains cas défavorables, même exceptionnels.

La nécessité de procéder ainsi à des essais nombreux accroît encore l'intérêt qu'il y a à définir une technique d'essai aussi commode, économique et rapide, que possible.

Forme et dimensions des éprouvettes

Pour accroître la surface active des éprouvettes relativement à leur masse, il est évidemment indiqué de choisir des plaques minces; le cube est, sans doute, après la sphère, la plus mauvaise forme qui se pouvait imaginer.

Il ne paraît pas nécessaire d'essayer des bétons comportant de gros éléments mais il peut être utile, comme nous l'avons indiqué plus haut, d'essayer non des pâtes pures mais des mortiers fins en choisissants un dosage tel que le mortier soit poreux, il est alors possible d'augmenter la surface active et d'accélérer l'essai.

Avec un sable dont la dimension des grains serait voisine de 1 mm. on peut adopter des éprouvettes dont l'épaisseur est de l'ordre de 3 mm., la forme de cette plaque mince dépendant du dispositif expérimental adopté.

Principe des dispositifs expérimentaux de corrosion accélérée

En conclusion de ce qui précède, le dispositif expérimental à adopter doit avoir essentiellement pour but de renouveler constamment, et aussi rapidement que possible, le milieu corrodant au contact de l'éprouvette de mortier. Il importe, bien entendu, que ce renouvellement soit fait dans des conditions définies avec une précision suffisante et reproductibles toujours identiques à elles-mêmes. Il convient, par ailleurs, de rechercher des conditions générales d'expérience aussi économiques que possible, ce qui conduit naturellement à envisager des éprouvettes qui, si elles doivent être nombreuses, doivent être individuellement aussi petites que possible.

Dispositif à jet

Un premier dispositif expérimental répondant aux conditions générales qui viennent d'être exposées est le dispositif "à jet."

Nous supposons que l'eau constituant le milieu corrodant à considérer (eau de mer, eau séléniteuse, etc.) peut être puisée en quantités relativement importantes et refoulée dans un réservoir alimentant une cuve à niveau constant. A cette cuve seraient fixés des ajutages susceptibles de débiter une veine liquide de diamètre et de débit constant et constituant autant de postes d'essai; la veine liquide frapperait la plaquette de forme circulaire ou rectangulaire constituant l'éprouvette sous un angle donné et viendrait, par exemple, lorsque la plaquette serait percée, actionner un dispositif, enregistreur au besoin, indiquant la fin de l'essai.

Un tel dispositif, en apparence séduisant, se heurte à deux difficultés: si les débits sont importants, le maintien du milieu corrodant à une température constante conduit très vite à des dépenses d'énergie prohibitives, un calcul élémentaire permet de s'en rendre compte. Si, pour éviter cette difficulté, on recherche des jets aussi ténus que possible, les corrosions sont évidemment moins actives et les ajutages s'obstruent avec une déplorable facilité.

On peut, il est vrai, penser à réutiliser, au moins dans une certaine mesure, les eaux ayant déjà servi, mais le dispositif expérimental s'en trouve un peu compliqué d'autant qu'il faut alors procéder à une décantation soignée pour éviter que les produits de la corrosion viennent obstruer les ajutages.

Cuve à circulation forcée

Un dispositif qui rassemble tous les échantillons à essayer dans une même cuve, même largement dimensionnée, a paru devoir être moins encombrant et la température y est plus aisément réglable, le renouvellement de l'eau dans cette cuve pouvant être limité à une importance raisonnable, le problème est alors de provoquer une circulation active du milieu corrodant entre les éprouvettes.

Le procédé qui consiste à déplacer les éprouvettes dans la cuve ne paraît pas susceptible de donner des résultats, d'une part, parce qu'une masse de 100, 200 ou 300 éprouvettes avec leurs supports ne peut être commodément animée d'une très grande vitesse, d'autre part, parce qu'un tel mouvement tend naturellement à provoquer un déplacement d'ensemble du liquide contenu dans la cuve sans provoquer de mouvement très accusé du liquide entre les éprouvettes.

Les dispositifs d'immersions et d'émersions alternées, continus ou discontinus, présentent le même inconvénient et entraînent par ailleurs une complication mécanique qui rend difficile l'enregistrement automatique des fins d'essai.

On est ainsi conduit à concevoir une circulation forcée du liquide produite par une hélice ou par une pompe entre les éprouvettes, placée à poste fixe dans la cuve. C'est ce dispositif qui a été adopté par la Commission des Chaux et Ciments et que nous nous efforçons de mettre au point avec la collaboration des ingénieurs de service maritime du port autonome du Havre et du port de Marseille.

Installation réalisée

Eprouvettes

Les éprouvettes ont la forme de plaquettes en U dont le dessin coté est donné ci-joint (fig. 1).

Des essais de mise au point se poursuivent activement sur des éprouvettes de pâte pure et de mortier avec différents dosages.

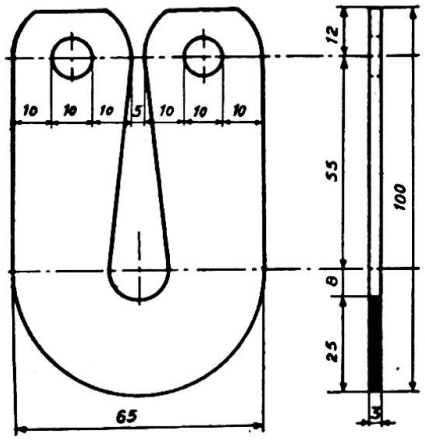

Fig. 1. Eprouvette en U

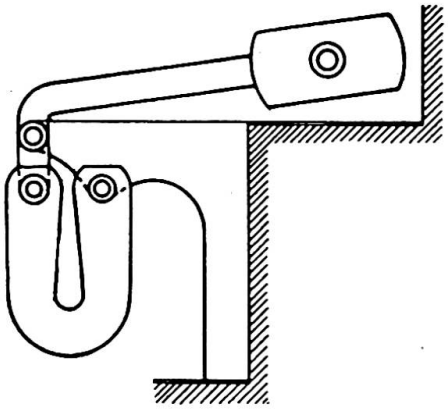

Fig. 2. Montage de l'éprouvette en U

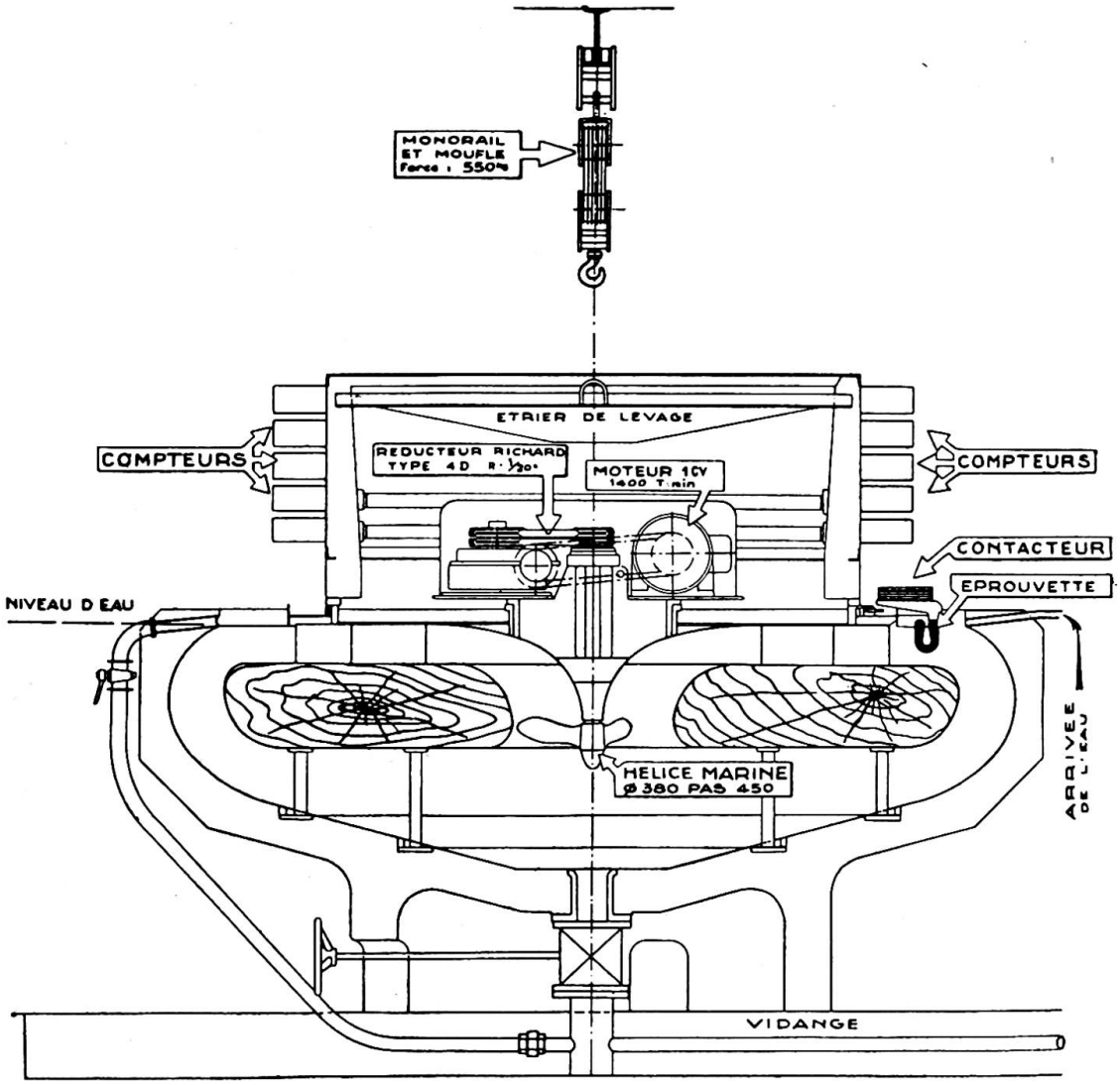

Fig. 3. Cuve à circulation forcée—Coupe transversale

Les moules nécessaires à la fabrication de ces éprouvettes donnent également lieu actuellement à des études tant au laboratoire central des Ponts et Chaussées qu'au Havre et à Marseille.

L'éprouvette est placée dans la cuve selon le montage indiqué par les figures 2 et 3. Elle est soumise à l'action d'un poids qui tend à ouvrir les deux branches de l'élément et qui correspond à la moitié de sa charge de rupture avant corrosion.

Les éprouvettes sont d'abord maintenues dans un moule clos pendant 48 heures et elles achèvent leur prise pendant 28 jours dans une armoire à humidité constante ou dans l'eau. Il est bien certain que la dessication de l'éprouvette au cours de sa prise, étant donné sa faible épaisseur, pourrait avoir des conséquences désastreuses.

Des essais se poursuivent également pour examiner la possibilité d'utiliser un mortier très maigre et très poreux fait avec un sable dont les grains auraient tous à peu près la même dimension.

Cuve à circulation

La cuve à circulation forcée est représentée en coupe par la figure 3.

La figure 4 représente, d'autre part, la vue extérieure de la cuve avec son appareillage telle qu'elle est actuellement réalisée au laboratoire du Havre.

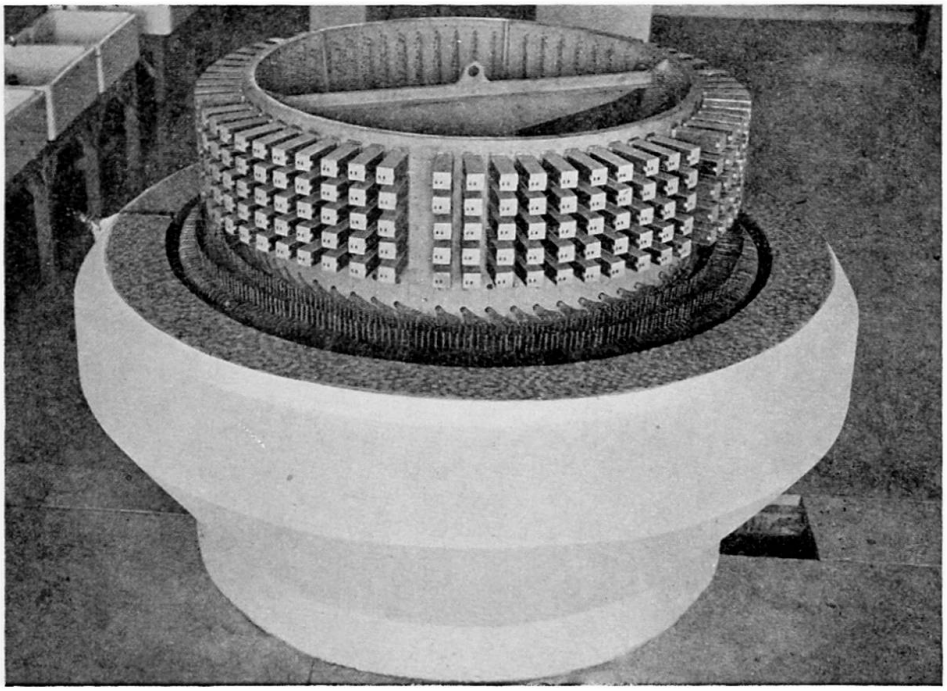

Fig. 4. Cuve à circulation forcée avec son appareillage

La figure 5 montre l'intérieur de l'appareil avec le moteur électrique et le dispositif qui transmet le mouvement à l'hélice.

Enfin la figure 6 montre en plan les dispositions générales de la station d'essais du port autonome du Havre. Les dispositions adoptées par le port de Marseille pour la construction de la station d'essais qu'il a réalisée à Cassis sont analogues aux précédentes, les réservoirs étant toutefois un peu moins importants, les cuves et leur appareillage sont pratiquement les mêmes dans les deux laboratoires.

Dans chaque cuve, on peut placer 300 éprouvettes en U qui sont activement

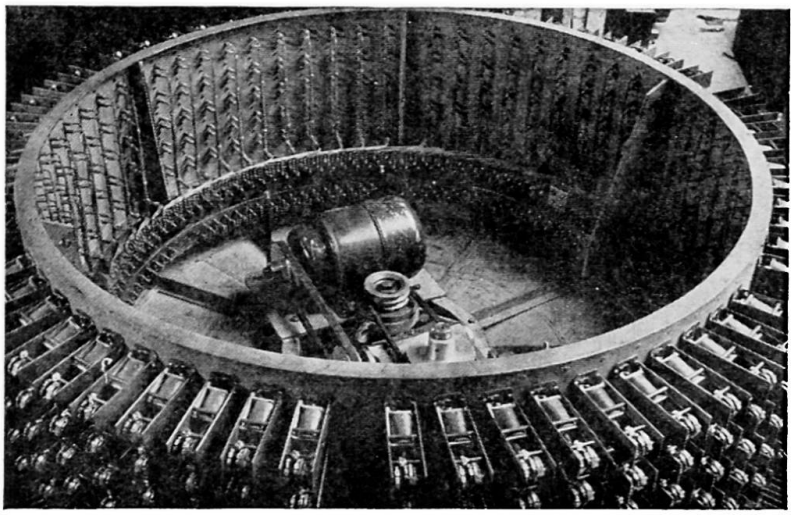

Fig. 5. Vue intérieure de l'appareil de corrosion

lessivées par l'eau de mer mise en mouvement par une hélice commandée par un moteur électrique, le renouvellement de l'eau dans la cuve se fait à raison d'un demi-litre à la seconde et l'on cherche actuellement à mettre au point une régulation de la température de l'eau, à un degré près, au voisinage de 23° qui est, pratiquement, la température la plus haute observée dans ces deux ports.

La rupture de l'éprouvette ouvre le circuit d'un compteur qui normalement avance

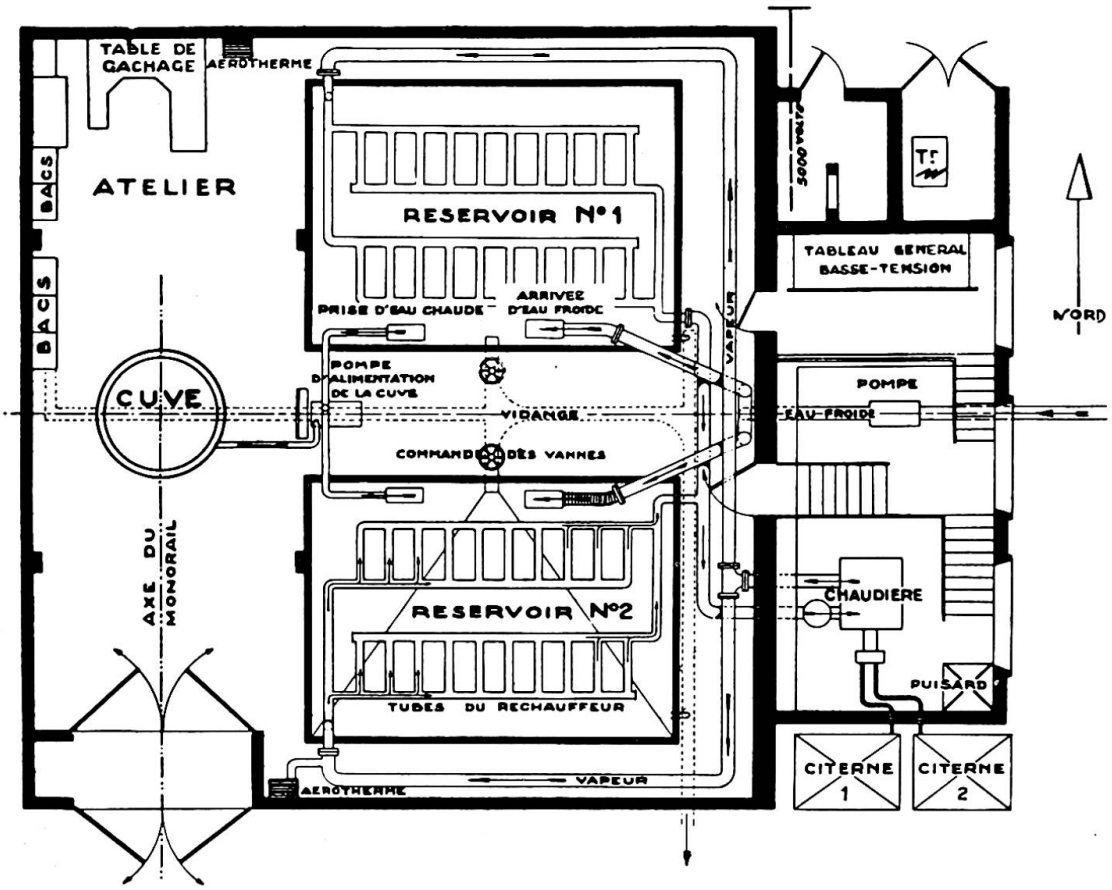

Fig. 6. Station d'essai des ciments par corrosion accélérée du Port Autonome du Havre

d'une unité par heure sous l'action d'un petit moteur synchrone qui ferme une fois par heure le circuit de l'électroaimant commandant chacun d'eux. On peut ainsi savoir, à une heure près, à quel moment la cassure s'est produite même si elle a lieu en dehors des heures de surveillance du laboratoire, la nuit, un dimanche ou un jour férié.

Dispositions générales des stations d'essais

La figure 6 représente en plan les dispositions générales de la station d'essai du port du Havre qui sont extrêmement complètes.

La station d'essais de Cassis comporte des installations analogues mais d'une importance qui est toutefois nettement moindre, l'emplacement dont on dispose étant plus exigu qu'au Havre.

Résultats

La mise au point des appareils, ayant présenté d'assez nombreuses et sérieuses difficultés, n'est pas encore achevée et il nous est dès lors impossible de donner dès maintenant des résultats.

Nous espérons pouvoir donner, lors du Congrès à Cambridge, les premiers résultats obtenus et indiquer, si nous le pouvons, quelle est la durée d'essai sur laquelle on doit compter pour pouvoir juger de la résistance d'un ciment.

C'est évidemment la question capitale à laquelle toute cette expérimentation doit répondre.

Résumé

La technique d'essai rapide de corrosion des ciments actuellement en cours d'étude est appliquée à la corrosion par l'eau de mer mais elle peut être appliquée à la corrosion par n'importe quel autre milieu liquide.

L'accélération de la corrosion est obtenue par une réduction des dimensions de l'éprouvette, qui se présente sous la forme d'une plaque mince, et par une circulation active de l'eau de mer au contact des éprouvettes, dans une cuve à température constante.

L'appareil, en cours de mise au point, permet l'essai simultané de 300 éprouvettes de telle façon que l'on ait, pour chaque ciment, des résultats assez nombreux pour donner une valeur moyenne et un indice de dispersion.

La fin de l'essai est fixée par la rupture de l'éprouvette et le temps au bout duquel se produit cette rupture caractérise la corrodabilité du ciment considéré.

Summary

At present the method of accelerated corrosion tests with respect to corrosion by sea-water is being studied. It can, however, be adopted for corrosion by any other liquids.

The acceleration of the corrosion is attained by reducing the dimensions of the test-pieces, which are in the form of thin slabs, and by a brisk circulation of the sea-water round the test-pieces in a container kept at a constant temperature.

The apparatus, which is at present nearing completion, allows up to 300 test-pieces to be handled simultaneously, so that for each kind of cement a sufficient number of results is obtained to derive an average value and a measure of the scattering of the recorded results.

A test is ended when the test-piece breaks. The time until this occurs gives a measure for the sensitivity to corrosion of the tested cement.

Zusammenfassung

Gegenwärtig wird das Verfahren der kurzfristigen Korrosionsversuche im Hinblick auf die Korrosion durch Meerwasser studiert. Es ist aber auch für Korrosion durch andere Flüssigkeiten anwendbar.

Die Beschleunigung der Korrosion wird erreicht durch eine Reduktion der Abmessungen der Probekörper, welche in der Form von dünnen Platten verwendet werden, sowie durch eine kräftige Zirkulation des Meerwassers um die Probekörper herum in einem Behälter mit konstanter Temperatur.

Die Apparatur, die gegenwärtig der Fertigstellung entgegengeht, erlaubt den gleichzeitigen Versuch an 300 Probekörpern, so dass man für jeden Zement eine genügende Zahl von Ergebnissen erhält, um daraus einen Mittelwert und ein Mass für die Streuung ermitteln zu können.

Das Ende eines Versuches wird durch den Bruch des Probekörpers gegeben. Die Zeit, nach welcher dieser eintritt, bildet ein Mass für die Korrosionsempfindlichkeit des untersuchten Zementes.

Leere Seite
Blank page
Page vide

CI 4

Corrosions du béton armé dans les ponts et charpentes de chemin de fer

The corrosion of reinforced concrete in bridges and structures on railways

Die Korrosion des Eisenbetons bei Brücken- und Hochbauten der Eisenbahnen

L. SÉMÉAC et N. BOUTRON
Ingénieur en chef à la S.N.C.F. Ingénieur à la S.N.C.F., Marseille

INTRODUCTION

A partir du moment où, en France, les conditions d'emploi du béton armé ont fait l'objet d'Instructions Ministérielles (20 octobre 1906), les Chemins de Fer Français ont commencé à utiliser le nouveau matériau dans leurs installations, et son emploi s'y est rapidement développé.

C'est que le béton armé se présentait *a priori* comme devant posséder des qualités très intéressantes pour les ouvrages du Chemin de Fer:

son incombustibilité le recommandait pour les halles à marchandises, les remises à machines.

il était donné comme ne nécessitant que peu de frais d'entretien, d'où son intérêt dans les ouvrages soumis soit à l'action des agents atmosphériques (quais couverts, abris, toitures en général), soit à l'action directe des fumées (remises, passages supérieurs, quais à combustibles) les deux actions étant d'ailleurs souvent conjuguées.

On présumait ainsi que le nouveau matériau aurait sur la construction métallique —qu'il faut repeindre fréquemment—un avantage très net, accentué au reste par le fait que son prix d'établissement était moins élevé (il l'est d'ailleurs resté dans la plupart des cas).

Les Chemins de Fer Français possèdent donc actuellement un nombre très important d'ouvrages en béton armé, dont les plus anciens datent de près d'un demi-siècle, et qu'ils ont la charge de surveiller et d'entretenir.

Quel a été le comportement de ces ouvrages?

L'expérience a montré qu'en fait le béton armé était dans certains cas susceptible de corrosions, parfois graves et étendues.

Nous voudrions, après avoir rappelé les caractères d'altérabilité du fer et du béton, essayer d'exposer ici, avec quelques exemples à l'appui, les constatations essentielles faites en matière de corrosions, et les types principaux d'avaries auxquelles elles donnent lieu.

Nous dirons ensuite comment on s'efforce, dans les ouvrages atteints, de réparer les effets des corrosions et d'en prévenir le retour.

Nous rappelerons les améliorations réalisées dans la conception et la technique d'exécution des ouvrages neufs.

Nous tenterons enfin de formuler quelques suggestions sur ce qui nous paraît rester à faire, en matière de conception et d'exécution pour réduire encore les frais d'entretien des ouvrages en béton armé et augmenter leur longévité.

Corrosions relevées dans les ponts et charpentes en béton armé des chemins de fer

Nous examinerons plus particulièrement deux catégories d'ouvrages:

les remises à locomotives
les passages supérieurs

Ce sont en effet ces ouvrages qui nous paraissent être les plus caractéristiques des constructions en béton armé du Chemin de Fer, parce qu'ils sont nombreux et qu'on y rencontre, du point de vue des corrosions, l'effet conjugué des intempéries—facteur d'ordre général—et des fumées, facteur particulier au Chemin de Fer.

Mais avant d'examiner le comportement d'ensemble de tels ouvrages, il paraît utile de rappeler en quelques mots les caractères généraux d'altérabilité des deux matériaux, acier et béton.

Acier

L'acier de qualité courante—et notamment l'acier doux pour armatures—s'altère facilement.

Le contact de l'air humide, de l'eau de pluie, qui contient toujours en dissolution de l'oxygène et du gaz carbonique, suffisent pour provoquer sa corrosion. Les réactions, d'ordre électrochimique, sont complexes; elles donnent lieu d'abord à la formation d'hydrates de fer, puis d'oxydes de fer en présence de l'oxygène. Ces corrosions peuvent d'ailleurs subir des temps d'arrêt (zones de passivation) en milieu alcalin.

D'une manière générale, les acides dilués provoquent également des altérations de l'acier.

La formation des oxydes de fer s'accompagne d'une augmentation de volume, ou, comme l'on dit, d'un foisonnement; ce foisonnement est particulièrement néfaste dans le béton armé, où il provoque des éclatements et dislocations du béton.

Cette altérabilité de l'acier, en particulier sous la simple action de l'eau de pluie ou de l'air humide, impose sa protection, réalisée en général par des peintures, des graisses, des huiles. Or, aucun de ces procédés de protection n'est admissible pour des armatures de béton armé: il compromettrait l'adhérence qui conditionne la solidarité indispensable de l'acier et du béton.*

C'est donc au béton lui-même qu'incombe, dans l'association acier-béton, la charge de protéger l'acier, en l'isolant efficacement de l'air humide, de l'eau, des fumées acides.†

* Cette remarque n'est, bien entendu, pas valable pour le béton précontraint, système Freyssinet.

† A noter que, au Phare du Planier, situé en pleine mer aux abords de Marseille, détruit à la Libération, et dont la tour a été reconstruite en pierre de taille, le couronnement de l'ouvrage a été établi en béton armé avec emploi d'aciers inoxydables.

Béton

Mais le béton est, pour son propre compte, passible aussi de corrosions.

Sauf mauvais choix des agrégats, son élément le plus vulnérable est le liant.

Ce liant de la qualité Portland Artificiel dans tous les cas courants est très riche en chaux et susceptible, en conséquence, de céder de la chaux par dissolution ou combinaison.

C'est ainsi que, par dissolution de chaux, les eaux à peu près pures corrodent ou, comme l'on dit, appauvrissent les bétons de ciment Portland, avec formation de dépôts ou croûtes de carbonate de chaux. Cet appauvrissement du béton augmente sa porosité, et le processus de dissolution et de corrosion s'accélère, le béton se laissant pénétrer de plus en plus profondément à mesure qu'il s'appauvrit davantage.

L'eau de pluie apparaît donc comme un ennemi naturel des bétons.

Il en est de même des composés oxygénés du soufre qui, en milieu humide, forment avec la chaux du sulfate soluble, susceptible de provoquer, outre l'appauvrissement, des gonflements et éclatements de béton.

Le sulfate de chaux peut même, dans certains cas, se combiner aux aluminates calciques les plus riches en chaux pour donner naissance, en milieu humide, à du sulfoaluminate de chaux (sel de Candlot) pulvérulent et provoquer ainsi, par action chimique, de graves désagrégations du béton.

L'eau de mer, enfin, est aussi l'ennemie des bétons de ciment Portland, sur lesquels elle peut agir à la fois par dissolution de la chaux (phénomène de Maynard) et en donnant naissance à des carbonates et à des composés sulfatés.

On peut certes utiliser pour le béton armé des liants tels que le ciment fondu, le ciment métallurgique sursulfaté, qui résistent beaucoup mieux que le Portland aux agents agressifs; mais leur prix beaucoup plus élevé et leurs conditions d'emploi plus délicates font qu'en pratique on ne les utilise qu'assez exceptionnellement.

Ajoutons qu'en dehors du domaine des corrosions proprement dites, le béton est, dans des conditions qui l'apparentent à la fonte, un matériau fragile; il résiste mal aux efforts d'extension et son durcissement s'accompagne de retrait, aussi, quelles que soient les précautions prises dans la conception et l'exécution des ouvrages, le béton est sujet, notamment aux changements de section des pièces, à des fissurations qui peuvent influencer sa résistance et sa durée.

Ce très bref rappel de la vulnérabilité de l'acier et du béton nous conduit à deux remarques:

le béton est un matériau facilement altérable (notamment par la simple eau de pluie), et un matériau fragile.

ses corrosions ou fissurations, en permettant aux agents agressifs de cheminer vers les armatures, auront toujours pour effet d'affaiblir son rôle protecteur vis-à-vis de celles-ci.

Les corrosions dans les remises à locomotives

On a commencé dès avant 1914 à construire des remises en béton armé, parfois rectangulaires, le plus souvent à voies rayonnantes autour d'un pont tournant.

Il nous paraît intéressant de suivre, rapidement, en fonction des corrosions, l'évolution des types à voies rayonnantes sur un ancien réseau, le P.L.M.

Dans l'ordre chronologique, trois types principaux A, B, C, s'y sont succédés.

Le type A (fig. 1) est caractérisé par une toiture *en hourdis plan, nervurée.* Dans chaque cellule, couvrant une voie, un lanterneau longitudinal vitré, ouvert d'un seul

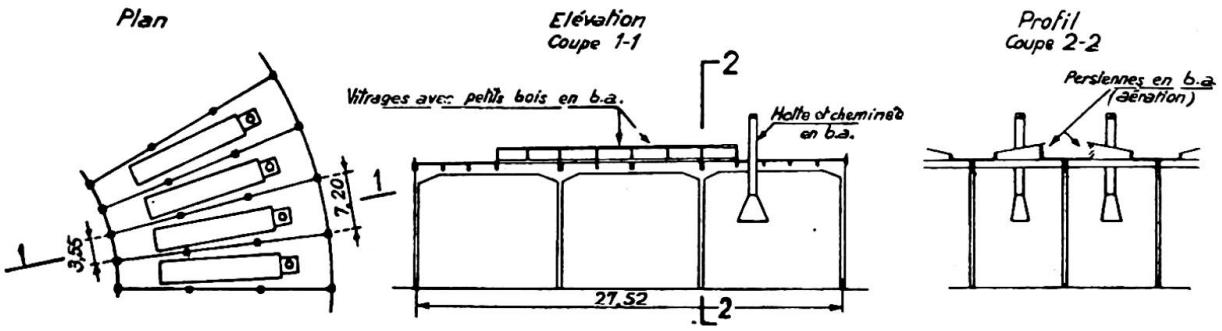

Fig. 1. Remise annulaire type A

côté, est destiné à l'éclairage et à l'aération pour les fumées. Une hotte cheminée est en outre prévue, sous laquelle doit se trouver en principe la cheminée de la locomotive.

Ce type, construit de 1911 à 1913, part manifestement de l'idée que le béton armé ne redoute pas les fumées; on n'a pas recherché un profil d'intrados favorisant leur évacuation. La confiance dans le nouveau matériau est d'ailleurs telle qu'on fait tout en béton armé, même des éléments de faible section très exposés: hottes cheminées à parois de 3 à 4 cm. d'épaisseur, petits bois des vitrages des lanterneaux, *lames de persiennes* des lanterneaux.

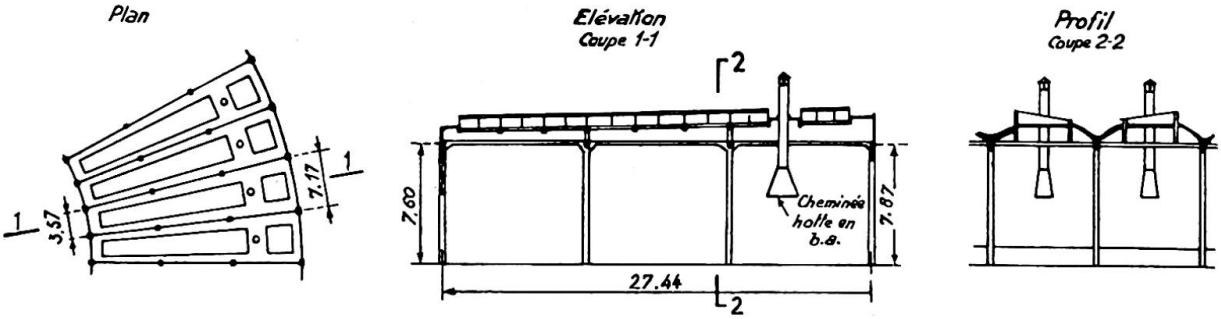

Fig. 2. Remise annulaire type B

Le type B (fig. 2), construit de 1912 à 1919, ne diffère du précédent que par la substitution au hourdis nervuré d'une toiture en voûte mince (épaisseur courante 6 cm.). C'est une amélioration, puisque le profil d'intrados favorise le glissement des fumées vers le lanterneau. Mais les butons qui contiennent les poussées au droit du vide du lanterneau entraînent souvent des fissurations obliques importantes. En outre, certains éléments de faible section: petits bois, hottes, parfois lames de persiennes, sont toujours en béton armé, tout au moins dans les premières années de construction de ce type.

A l'expérience, les remises des types A et B se sont révélées comme sujettes, dans la plupart des cas, à des corrosions, souvent profondes et étendues.

Donnons-en quelques exemples: la photographie (fig. 3) prise en 1951 montre une zone d'intrados de la remise d'Alès, du type A, construit en 1912. On voit que dans de larges zones, le béton inférieur des poutres a disparu; il était complètement décollé et fissuré, un léger piquage l'a détaché facilement. On voit aussi une zone de hourdis avariée avec taches d'humidité. Par contre, certaines zones de poutres et de hourdis sont à peu près intactes. On remarquera que le lanterneau est en fibrociment ondulé sur charpente en bois; c'est que le lanterneau d'origine a dû être complètement

remplacé en 1936, ses petits éléments de béton armé ayant été pratiquement détruits par les fissurations et les corrosions.

Une mesure analogue a dû être prise dans presque toutes les remises des types A et B, tant les corrosions des lanterneaux étaient généralisées.

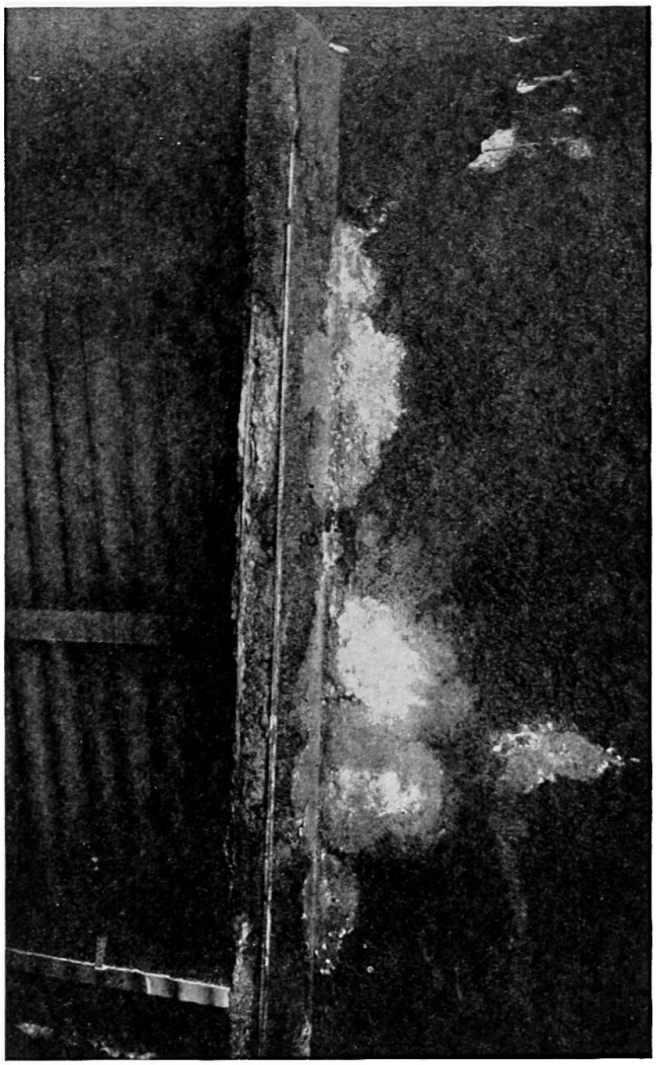

Fig. 3. Remise d'Alès

La photographie (fig. 4) montre l'état, en 1928, d'une zone d'intrados de la remise de Paray-le-Monial, construite en 1919. On voit quel degré de gravité et de généralisation y avaient atteint les corrosions, et ceci en moins de dix ans. C'est le cas le plus grave qui se soit produit sur le réseau P.L.M. Il a résulté d'une très mauvaise exécution, et de la qualité médiocre de certains matériaux, notamment du ciment (période d'après-guerre).

Plusieurs cellules de cette remise ont dû être complètement reconstruites dès 1930.

La comparaison des deux cas d'Alès, et de Paray-le-Monial montre l'importance primordiale de la qualité de l'exécution: *a priori*, la remise d'Alès était plus vulnérable; cependant, elle est encore en service et parfaitement réparable au bout de 39 ans, alors qu'au bout de onze ans, il a fallu reconstruire à Paray-le-Monial.

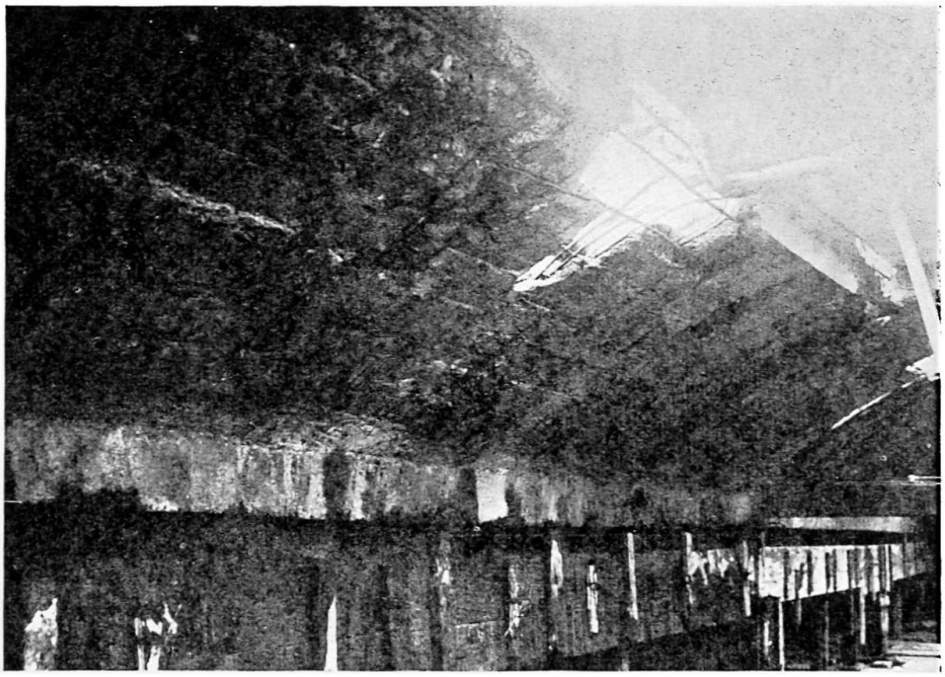

Fig. 4. Remise de Paray-le-Monial

A partir de 1919, le réseau P.L.M. remplace le type B par un type C (fig. 5), qui, à quelques modifications près, a été construit jusqu'à la dernière guerre.

Du point de vue des corrosions, il comporte comme amélioration essentielle la suppression du lanterneau longitudinal, trop vulnérable; l'aération est désormais assurée par deux files de baies latérales ménagées par le décrochement en hauteur de la voûte centrale.

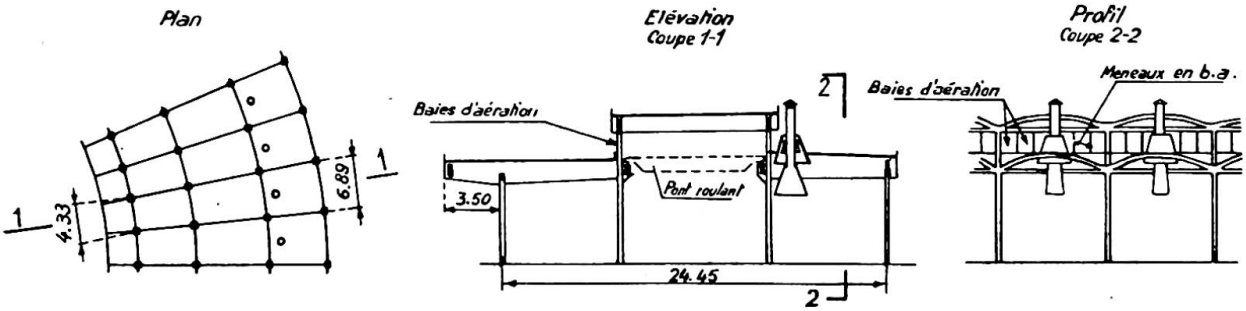

Fig. 5. Remise annulaire type C

Ce type, d'un entretien moins onéreux par la suppression du lanterneau, a pourtant donné lieu dans les voûtes et leurs retombées, à de nombreuses corrosions analogues à celles des voûtes du type B, surtout quand la toiture présentait des défauts d'étanchéité, par porosité ou soufflage de la chape, ou par fissuration.

Disons à ce propos que, d'une façon générale, les zones de corrosions sont par prédilection les zones humides.

On peut le voir sur la photographie (fig. 6), prise dans la remise de Niort (Région Ouest), à la zone de raccordement d'une voûte avec la poutre de retombée; cette dernière, qui forme chéneau à l'extrados, présente de nombreuses taches de suintements. Les aciers de la voûte sont très oxydés, et des plaques de béton sont prêtes à se détacher sous la poutre.

Fig. 6. Remise de Niort

Nouveau type de remises à machines

Le Service Technique des Installations Fixes de la S.N.C.F. a étudié et réalisé en plusieurs exemplaires un type annulaire de remise en béton armé, avec le souci d'évacuer le mieux et le plus rapidement possible les fumées, y compris celles qui sont produites en dehors des hottes.

La forme adoptée, très simple, sans arête vive à l'intrados, facilite à la fois l'écoulement des fumées à l'intérieur et celui des eaux de ruissellement sur la toiture. Un déflecteur réalise une zone annulaire de dépression, où viennent déboucher les hottes cheminées ainsi que des gaines radiales d'évacuation complémentaire. Ces gaines ont un revêtement intérieur réfractaire pour soustraite le béton armé aux corrosions.

Les lanterneaux et les chéneaux encaissés ont été supprimés ainsi que tous les petits éléments de béton. Un certain nombre d'éléments (paroi verticale extérieure, chéneau et déflecteur de fumées) ont été préfabriqués, ce qui leur assure une meilleure exécution, donc moins de vulnérabilité.

Quoiqu'il soit encore trop tôt pour porter un jugement sur la tenue de ce nouveau type aux corrosions, il présente à première vue de nettes améliorations sur les types des anciens réseaux (fig. 7).

Terminons par quelques mots sur l'évolution des types de hottes cheminées, puisqu'il s'agit de pièces soumises d'une façon intense à l'action des fumées.

Nous avons vu que dans les premières remises on les faisait, sur le P.L.M., entièrement en béton armé; elles étaient à parois non nervurées de 3 à 4 cm. d'épaisseur, armées d'un quadrillage de ronds de 6 mm. Elles comprenaient une hotte intérieure, surmontée par un fût circulaire prolongé de plusieurs mètres au-dessus de la toiture. Le comportement respectif des parties intérieures, soumises à la seule action des fumées, et des parties de fût extérieures, soumises en même temps aux intempéries est particulièrement instructif quant à la rapidité de propagation des corrosions: partout les fûts extérieurs périrent les premiers par craquèlement et feuilletage du béton, destruction des aciers et fissurations générales, ils durent être remplacés bien avant les hottes dont certaines sont encore en service.

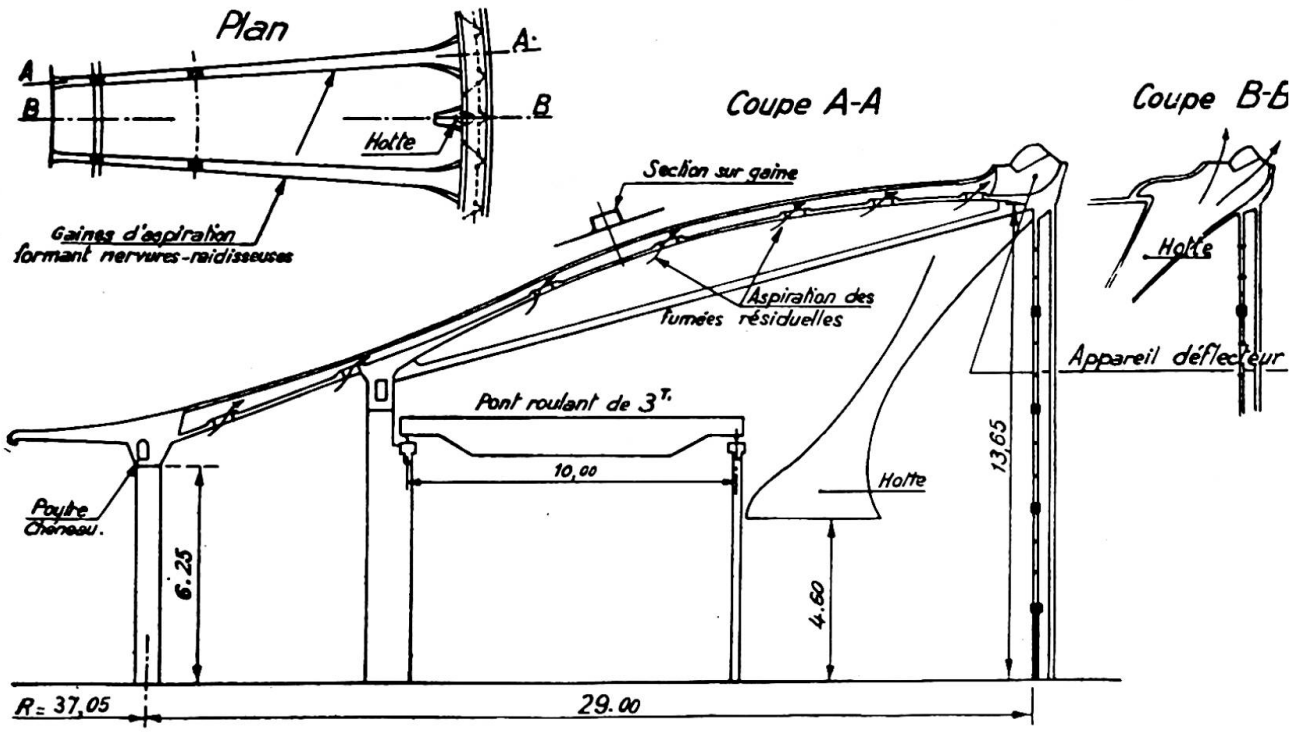

Fig. 7. Remise annulaire type P

On fit ensuite des hottes cheminées comportant des parois minces (5 mm. d'épaisseur) en fibro-ciment corsetées par des montants et des cercles en béton armé, de faible section. Elles périssaient rapidement aussi, en commençant par le corset, et à l'extérieur tout d'abord.

On construisit finalement des hottes cheminées entièrement en fibro-ciment épais (25 mm. d'épaisseur), qui donnèrent généralement satisfaction et qui sont encore utilisées.

Les corrosions dans les passages supérieurs

Au point de vue de l'attaque des fumées, ces ouvrages sont placés dans des conditions assez différentes suivant qu'ils sont en pleine voie ou au voisinage immédiat des gares.

Les premiers se sont en général assez bien comportés, à moins qu'ils présentent à l'extrados de sérieux défauts d'étanchéité.

Au contraire, les ponts voisins des gares ou des dépôts, sous lesquels les locomotives manœuvrent, démarrent ou stationnent, accusent souvent des corrosions sérieuses. De même que pour les remises à machines on a construit pendant assez longtemps les ponts supérieurs, même placés dans ces conditions défavorables, sans se soucier particulièrement de l'action des fumées; les tabliers comportaient à l'intrados des nervures multiples (entretoises intermédiaires notamment), qui augmentaient les surfaces vulnérables et formaient des caissons favorisant le séjour et l'attaque des fumées. La figure 8 montre une coupe d'un tel tablier.

Dans les ponts plus récents, on s'est attaché, en cas d'exposition intensive aux fumées, à protéger les œuvres vives du tablier par une dalle générale en béton armé placée dans le plan inférieur des poutres principales (la Cie P.L.M. a parfois constitué cette protection par des dalles de fibro-ciment, mais elles avaient tendance à être ébranlées à la longue). Ces dalles contribuent d'ailleurs à la répartition des sur-

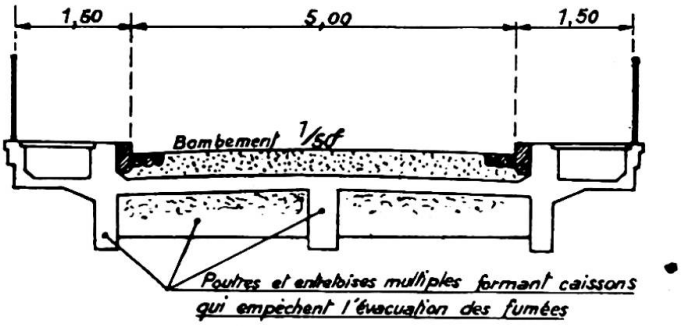

Fig. 8. P.S. à intrados en caissons

charges dans les tabliers de faible hauteur à poutres multiples, que l'on est souvent amené à prévoir au voisinage des gares (fig. 9).

En définitive, les corrosions des intrados de ponts-routes sont analogues au degré d'intensité près à celles des intrados de remises, dont nous avons donné plusieurs vues.

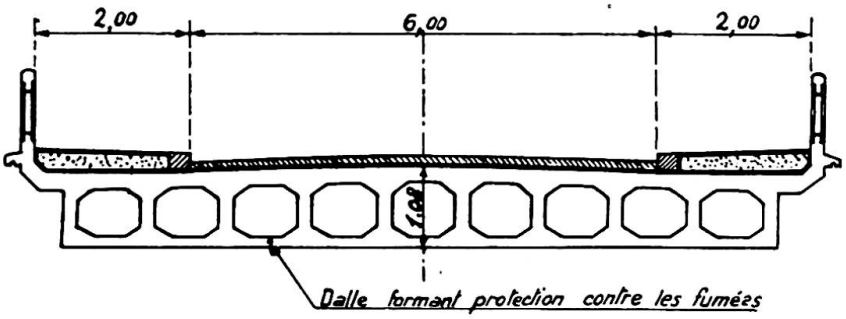

Fig. 9. P.S. à intrados protégé

Mais il nous faut signaler en outre que, dans les ponts importants comportant des superstructures (bow-string, poutres latérales à treillis), les éléments des superstructures, soumis essentiellement aux intempéries, en présence de fumées diluées, ont présenté souvent de sérieuses corrosions.

Les figures 10 (P.S. de St-Privé, ligne Vierzon–Saincaize) et 11 (P.S. du Donon, ligne Epinal–Strasbourg) montrent deux exemples caractéristiques de corrosions dans les rives et les superstructures.

Autres catégories d'ouvrages

En dehors des remises et des ponts, très exposés aux fumées, la S.N.C.F. possède de très nombreux et importants ouvrages en béton armé exposés essentiellement aux agents atmosphériques, et accessoirement aux fumées: ce sont notamment tous les ouvrages où le béton armé forme toiture: halles, abris, marquises, etc.

Les corrosions, dues essentiellement aux eaux de pluie, avec effets de gel parfois, dépendent essentiellement du degré d'étanchéité de la toiture: elles sont pratiquement nulles si la toiture est étanche, elles peuvent être sérieuses si les fuites d'eau sont nombreuses.

Ouvrages à la mer

La S.N.C.F. n'a pratiquement pas d'ouvrages à la mer proprement dits, c'est-à-dire soumis directement aux effets de l'eau de mer.

Fig. 10. P.S. de St-Privé

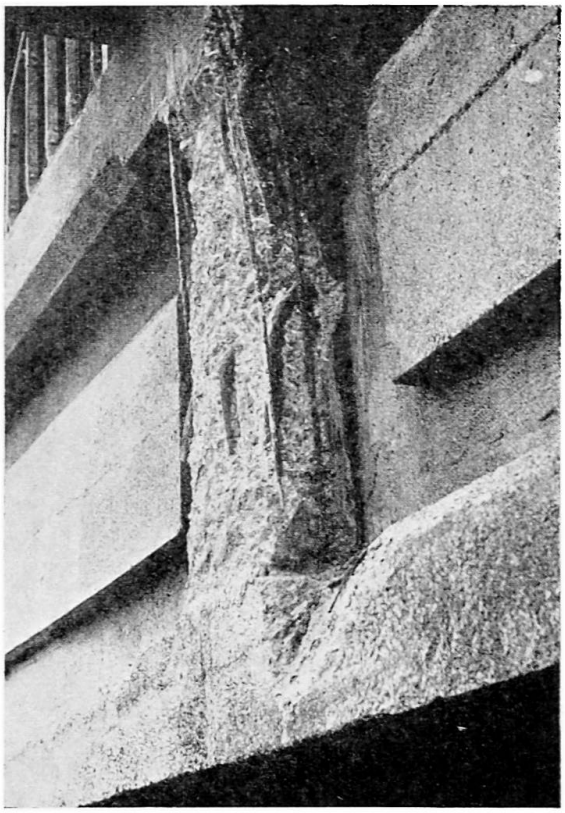

Fig. 11. P.S. du Donon

Par contre, elle possède dans les zones côtières et les ports un certain nombre d'ouvrages en béton armé soumis aux effets de l'air salin.

Le processus de corrosion des ouvrages ainsi placés ne paraît pas présenter de différences essentielles avec celui des autres ouvrages, sauf que le développement des corrosions et des avaries qui en résultent est, à qualité d'exécution égale, un peu plus rapide et plus généralisé.

A titre d'exemple, on peut citer notamment:

le P.S. du km 6 k.147 de la ligne de La Rochelle à La Pallice construit en 1918, et qui, bien que peu soumis à l'action des fumées, présente de sérieuses dégradations même dans les palées.

les remises de Cannes-la-Bocca et de Port-de-Bouc, qui présentent de nombreux éclatements et dégradations, notamment dans les éléments de façades et pignons exposés à l'air salin.

les abris de la gare de Sète-Ville, situés entre la mer et les étangs et ainsi particulièrement exposés à l'air salin; ces abris, construits en 1929, présentent des corrosions nettement plus accentuées que les ouvrages analogues de même âge (fig. 12).

la passerelle de Cerbère, située à 50 m. de la mer, qui présente de graves corrosions, même dans des parties telles que les limons d'escaliers non soumises directement à l'action des fumées (fig. 13).

Vue d'ensemble sur les corrosions, leur processus de développement et les avaries typiques qui en résultent

Nous distinguerons tout d'abord les éléments de béton armé en deux types principaux:

Fig. 12. Abris de la gare de Sète-Ville

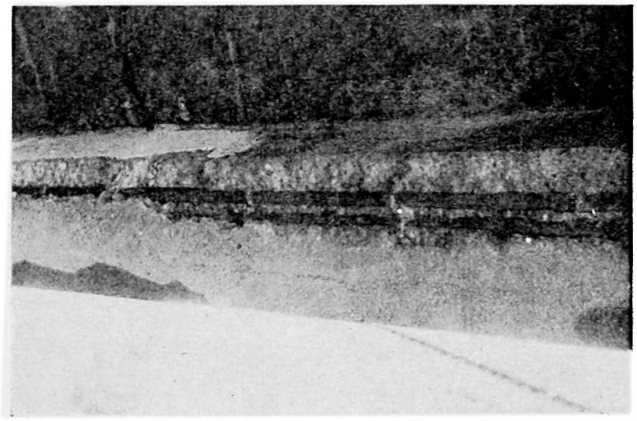

Fig. 13. Passerelle de Cerbère

les éléments de faible ou moyenne épaisseur sans arêtes vives, c'est-à-dire les hourdis, plans ou courbes (voûtes).

les éléments d'ossature, à arêtes vives: nervures (poutres) et poteaux.

Hourdis

Le cas le plus typique est celui d'une voûte de remise à machines. Les dimensions et armatures sont généralement celles de la figure 14.

Pour étudier les conditions d'imprégnation par les vapeurs acides d'une voûte ainsi constituée, nous avons prélevé par découpage, dans les voûtes de la Remise à Locomotives du dépôt de Marseille-Blancarde, deux échantillons I et II de béton armé, dans deux zones inégalement enfumées (l'échantillon II correspondant à la zone la plus enfumée).

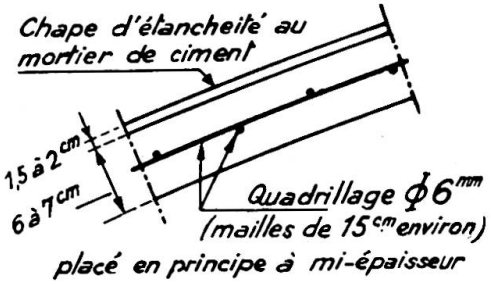

Fig. 14

Ce béton, âgé de 21 ans, est à base de ciment Portland Artificiel 20/25 Lafarge, de l'Usine de Valdonne.

Dans les deux échantillons, le béton s'est révélé au découpage comme étant de bonne qualité, de composition assez homogène, compact et dur; les armatures, convenablement placées, ne présentaient pas d'oxydation.

Le Laboratoire de la Faculté des Sciences de Marseille a, sur notre demande, analysé le béton de chaque échantillon, par tranches successives en profondeur à partir de l'intrados.

Cette analyse a donné, pour la teneur en anhydride sulfurique, des résultats indiqués par le Tableau I, que l'on peut traduire par deux courbes (fig. 15).

TABLEAU I

Intrados	Tranches	Teneurs en SO^3 (%)	
		Echantillon I	Echantillon II
1	1	2,04	2,28
2	2	0,42	0,79
3	3	0,34	0,58
4	4	0,49	0,41
5	5	0,96	1,08
Extrados			

La recherche des matières organiques, effectuée colorimétriquement par l'essai à la soude, a donné les résultats indiqués par le Tableau II, qui corroborent les précédents:

TABLEAU II

Tranches	Test colorimétrique	
	Echantillon I	Echantillon II
1	nettement positif: couleur jaune	très nettement positif: couleur brune
2	positif: couleur jaune clair	nettement positif: couleur très jaune
3	négatif: incolore	positif: couleur jaune
4	négatif: incolore	négatif: incolore
5	positif: couleur jaune clair	positif: couleur jaune clair

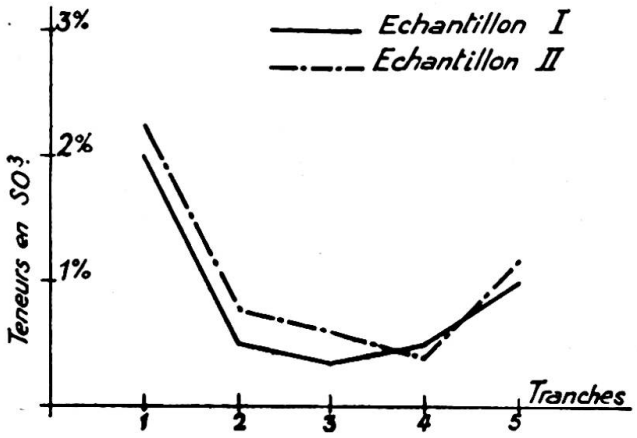

Fig. 15

A titre indicatif, l'analyse des suies d'intrados, prélevées sur les échantillons I et II, a donné notamment les résultats indiqués par le Tableau III:

TABLEAU III

Nature de l'analyse	Echantillon I	Echantillon II
Analyse des suies	3,34 % de soufre combustible à la bombe	3,48 % de soufre combustible à la bombe
Analyse des cendres de suies	12,80 % de SO^3 soit 21,65 % de SO^4Ca	17,50 % de SO^3 soit 29,75 % de SO^4Ca

Les analyses de béton ci-dessus montrent:

(1) qu'en un milieu de fumées acides, le béton se laisse pénétrer dans sa masse par certains produits composant ces fumées.

(2) que le dégré de pénétration, maximum au voisinage de l'intrados directement exposé aux fumées, s'abaisse à un minimum vers le milieu de l'épaisseur de la voûte pour s'accentuer à nouveau vers l'extrados, où l'action des fumées rabattues par les vents est favorisée par les pluies.

(3) que cependant dans un béton de bonne qualité, et dont les armatures étaient correctement enrobées, ces phénomènes n'ont pratiquement entraîné, au bout de plus de 20 ans, aucun désordre, ce qui permet de conclure à une longévité satisfaisante pour des éléments de béton armé exécutés convenablement.

En définitive, si, compte tenu notamment de ces résultats, nous essayions de schématiser, par gravité croissante de corrosions, les cas qui se présentent, nous proposerions la gradation ci-dessous.

Premier cas

La chape est étanche (pas de porosité, de cloquages, de fissures); le béton, bien plein, forme à l'intrados un écran imperméable.

L'expérience montre que les zones de hourdis répondant à ces caractéristiques ne donnent pas lieu, du moins dans les limites d'âge actuellement observables, à des corrosions inquiétantes.

Deuxième cas

Le chape est étanche, mais le béton était poreux d'origine.

Il se laisse donc pénétrer peu à peu par les fumées acides et la vapeur d'eau; il peut alors s'appauvrir encore, en cédant de la chaux à l'élément SO^3 pour former du sulfate de chaux. Ce processus n'est pas rapide en général, car on est en milieu peu humide.

L'armature arrive cependant à être touchée par les fumées et la vapeur d'eau; elle s'oxyde en foisonnant, commence à faire éclater par points le béton d'intrados.

L'épaisse couche de suie qui revêt l'intrados masque les avaries, du moins au début, mais un piquage détache par petites plaques ou écailles du béton non adhérent, surtout le long des armatures.

Le béton placé au-dessus des armatures garde en général sa cohésion, si bien qu'en pratique les avaries ne deviennent inquiétantes qu'à assez longue échéance, à moins que le béton ne soit vraiment très poreux ou présente de nombreux nids d'abeille.

Troisième cas

La chape n'est pas étanche (elle peut être poreuse, fissurée, soufflée).

L'eau de pluie filtre donc par gravité à travers la toiture, entraînant de la chaux, ce qui se traduit à l'intrados par des trainées blanchâtres, et, si les fuites sont abondantes, par des stalactites de carbonate de chaux.

Peu à peu appauvri, le béton, quelle que soit sa qualité initiale, se laisse pénétrer à l'intrados par les vapeurs acides, qui peuvent donner lieu, comme nous l'avons vu, à formation de sulfate de chaux (SO^3 dans fumées+Ca du béton) amorçant des dislocations.

Parallèlement, les armatures s'oxydent assez vite en ce milieu humide, le foisonnement de l'oxydation provoque des éclatements du béton.

Le béton se disloque progressivement sur toute son épaisseur et finit par perdre toute cohésion.

L'évolution peut être plus ou moins rapide suivant l'abondance des pluies, l'importance des fuites, la qualité initiale du béton; même si on remédie au manque d'étanchéité, on aura à plus ou moins longue échéance des corrosions profondes et des désordres généralisés.

On remarquera que dans tous les cas ci-dessus la position du quadrillage d'armatures a été supposée à peu près correcte, c'est-à-dire à 2 cm.5 environ du parement d'intrados. En pratique, et surtout dans les anciennes constructions, nombreux sont les cas d'armatures insuffisamment enrobées, et recouvertes seulement d'une mince pellicule de laitance, voire même apparentes. Il va de soi que, dans de tels cas, l'armature s'oxyde plus rapidement encore; c'est un défaut grave dans les hourdis plans, où les réductions de section de l'armature tendue diminuent la résistance mécanique, et où le défaut d'enrobement compromet l'adhérence. Les conséquences sont moins graves dans les hourdis voûtés où l'armature n'est qu'un élément accessoire au point de vue résistance mécanique; car le fait même que les armatures soient apparentes a pour conséquence de permettre leur foisonnement vers l'intrados sans dislocation du béton en profondeur.

Cas du béton fissuré

Il arrive fréquemment, dans les hourdis minces de toiture, que le béton lui-même présente des fissures sur toute son épaisseur, et intéressant, bien entendu, la chape également.

Dans ce cas, l'eau de pluie passe par ces fissures et forme des traînées à l'intrados; l'action des fumées devient plus marquée au droit des fissures et sur les surfaces humides, et le développement général des corrosions se trouve alors accéléré.

Eléments à arêtes vives (poutres, poteaux, potelets)

Nous prendrons pour exemple les poutres. Dans les poutres, les corrosions, les fissurations et les avaries qui en résultent intéressent en général, pour tous les ouvrages, la zone inférieure, où se trouvent les aciers tendus.

Que s'y passe-t-il?

Tout d'abord, au bétonnage, les plus gros éléments des agrégats tendent à s'accumuler dans cette zone (fig. 16), et il peut en résulter des nids d'abeilles et des parties creuses. On trouve parfois sous les aciers ou entre les aciers, quand ceux-ci forment

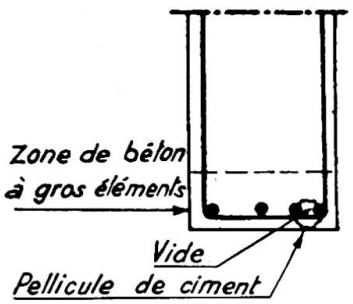

Fig. 16

une grille assez serrée, des vides importants qui étaient dissimulés au décoffrage par une pellicule de laitance.

Cela est fréquent dans les anciens ouvrages où la granulométrie n'était généralement pas étudiée de près, et les procédés de serrage du béton assez sommaires.

Par ailleurs, le béton, dans la même zone, travaille à l'extension par solidarité avec l'acier, surtout dans la partie centrale des travées; il est donc sujet à des fissurations transversales sans gravité du point de vue résistance mécanique, mais qui favorisent le cheminement de l'air humide ou des fumées. Enfin, *et ceci d'autant plus que l'épaisseur d'enrobement est plus faible*, les parties de béton extérieures aux aciers tendent à se décoller le long de ceux-ci par défaut d'adhérence sous les efforts de glissement; bien entendu, tout début d'oxydation des barres longitudinales favorise ces décollements. A partir du moment où le béton est franchement décollé, voire même se détache spontanément, l'oxydation des armatures s'aggrave, et la résistance mécanique de la poutre peut être compromise par réduction de section des barres longitudinales et des étriers. Ces derniers, de petit diamètre, sont particulièrement vulnérables (encore plus dans les très anciens ouvrages, où ils étaient en feuillards), et on en trouve de complètement coupés.

Toutes ces avaries sont, bien entendu, aggravées en milieu très humide; or, c'est un cas fréquent dans les toitures (fig. 17): si la nervure est solidaire d'un hourdis plan de faible épaisseur, des fissures en f sont fréquentes, avec suintements susceptibles d'intéresser tout le périmètre a, b, c, d; si l'on a une toiture voûtée, la nervure de retombée se trouve sous chéneau, et comme des fissures se forment par prédilection en f', zone de reprises du béton à l'exécution, et d'articulation de la voûte sous les variations de température, des suintements se manifestent aussi sur tout le périmètre de la poutre (voir ci-dessus les photographies des remises de Niort et de Paray-le-Monial).

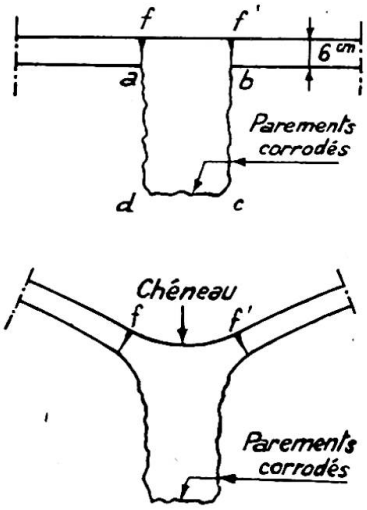

Fig. 17

Les avaries de ce type ont entraîné parfois un tel affaiblissement des poutres qu'il a fallu les consolider par des appuis intermédiaires ou des poutres de renfort.

Signalons aussi que, dans les ouvrages construits sous les Instructions Ministérielles de 1906, les poutres ne comportaient parfois que peu d'étriers puisque le béton pouvait concourir à la résistance à l'effort tranchant; des poutres ainsi armées ont présenté parfois, au voisinage des appuis, de sérieuses dislocations ayant leur origine dans de grosses fissures d'effort tranchant, ouvrant la voie aux corrosions.

Ce que nous venons de dire de la vulnérabilité des arêtes vives des poutres est valable, bien entendu, pour les arêtes des poteaux, et toutes les arêtes vives en général.

Conclusion sur le comportement des ponts et charpentes de chemin de fer vis-à-vis des corrosions

Il nous semble qu'en définitive, à cet égard, le béton armé est caractérisé par *l'inégalité de son comportement.*

Nous voulons dire par là que des ouvrages de même catégorie, placés dans les mêmes conditions, pourront avoir une tenue très différente, quel que soit leur âge, parfois même à l'inverse de ce que leurs âges respectifs pourraient *a priori* faire supposer.

Bien plus, dans un même ouvrage, des éléments semblables, très voisins, placés dans les mêmes conditions à tous égards, pourront se comporter les uns bien, les autres très mal.

A quoi sont dues ces différences imprévisibles dans la tenue de béton armé? Essentiellement à ses conditions d'exécution.

Elles n'ont en effet rien de comparable avec celles de la charpente métallique, par exemple; celle-ci utilise un seul matériau, l'acier, fabriqué dans des qualités bien déterminées par des usines contrôlées.

La plus grande partie de la charpente est faite en atelier, par des ouvriers qualifiés, à l'abri des intempéries. Il n'y a, sur le chantier, qu'à rabouter des tronçons tout préparés à l'atelier. Au surplus, les sections de métal, les assemblages, la rivure, sont vérifiables à tout moment, même après l'achèvement de l'ouvrage, et il est possible de remplacer les pièces ou les rivets défectueux.

Rien de semblable avec le béton armé: en règle générale, tout est à faire sur le chantier, où n'arrivent que des matériaux élémentaires: planches, aciers, ciment, sable, gravier.

Il faut que, d'origine, tous ces matériaux soient de bonne qualité—et qu'ils le soient d'un bout à l'autre du chantier où ils sont approvisionnés par lots successifs, parfois de provenance différente.

Mais si ces conditions sont nécessaires pour construire un ouvrage de bonne qualité, elles sont loin d'être suffisantes: tout dépend en effet de la façon dont ces matériaux divers seront préparés et mis en œuvre.

Or, d'après ce que nous avons vu sur les corrosions et leurs origines, le résultat final doit répondre simultanément aux trois conditions suivantes:

béton imperméable
béton sans fissures
armatures bien enrobées

De quoi cela dépend-il? La simple énumération des conditions de détail à remplir elles aussi simultanément montrera la complexité de la tâche.

(1) *Pour que le béton soit imperméable, il faut*:

que sa composition et sa granulométrie aient été soigneusement étudiées, et surtout qu'elles soient bien réalisées, et régulièrement, en exécution;

que le dosage effectif en eau soit aussi bien respecté, compte tenu du degré d'humitidité des matériaux, de la température et du vent (dessication);

que le malaxage soit correct;

que le transport du béton soit fait en évitant les ségrégations, les pertes d'eau, les commencements de prise; que les coffrages soient suffisamment étanches;

que le serrage du béton soit fait correctement (vibrateurs en nombre suffisant et de types appropriés, points de vibration assez rapprochés, durée de vibration correcte);

qu'après sa mise en place, le béton soit protégé s'il est besoin contre la pluie, le gel, le vent, le soleil, pour éviter le délavage, les défauts de prise, les pertes d'eau;

que le décoffrage soit fait avec précaution pour éviter des arrachements en parements.

(2) *Pour que le béton ne se fissure pas, ou plus exactement se fissure le moins possible, il faut*:

que les fondations aient été prévues assez largement pour éviter des tassements importants, et comportant des coupures pour le cas de tassements inégaux d'un point à un autre;

que, dans l'étude de l'ouvrage, on ait prévu des coupures en nombre suffisant pour le retrait et la dilatation, ces coupures devant correspondre obligatoirement avec les coupures de fondations;

que l'on ait evité autant que possible les variations brutales de sections;

que les éléments soient armés de façon homogène, qu'aucune zone de béton tendu ne soit dépourvue d'armature et que la densité de celle-ci soit suffisante pour ne pas avoir de mailles importantes de béton non armé;

que l'on emploie un ciment n'ayant pas un retrait excessif (c'est-à-dire ne dépassant pas autant que possible, *en pâte pure*, 1.200 μ par m.l. à 7 jours, 2.000 μ à 28 jours).

que l'humidité du béton soit entretenue constamment pendant sa prise et le début de son durcissement.

(3) *Pour que les armatures soient bien enrobées, il faut*:

que l'on ait admis, dans l'étude, des épaisseurs de béton suffisantes sur tous les parements et pour toutes les armatures (c'est-à-dire y compris les étriers, barres de recouvrement ou autres), ces épaisseurs variant suivant le milieu où se trouve placé l'ouvrage. Ce point est, à notre avis, capital, et il faut se tenir large sur les épaisseurs d'enrobement.

que l'on ait étudié en détail les nœuds et croisements d'armatures, par des croquis à grande échelle pour s'assurer qu'en exécution on pourra respecter les épaisseurs d'enrobement prescrites;

que le ferraillage soit exécuté avec précision;

que le ferraillage comporte toutes les ligatures et cales nécessaires pour être rigide et bien arrimé dans les coffrages, de manière à ne pas être déplacé pendant le bétonnage et la vibration.

A tous ces facteurs, il faut en ajouter un dernier, et très important: l'influence des intempéries sur la qualité du travail des ouvriers.

Si nous avons volontairement fait, au risque d'être fastidieux, l'énumération détaillée des conditions dont dépend la qualité finale d'une construction en béton armé, c'est pour rappeler que ces conditions quant à la résistance aux corrosions sont si nombreuses qu'il n'est pas surprenant d'obtenir, dans la pratique, des résultats irréguliers.

Reparation des avaries provoquées par les corrosions

Les procédés types de réparation sont bien connus, et nous nous bornerons à les rappeler en quelques mots. Leur objet est non seulement de réparer les effets des corrosions, mais de le faire dans des conditions qui en évitent autant que possible le retour.

Les réparations sont essentiellement de deux sortes:

(1) *Rétablissement de l'étanchéité des extrados de toitures ou de ponts*

C'est un point essentiel: nous avons vu en effet que les fuites d'eau favorisent considérablement les corrosions. La réparation des intrados serait donc inefficace si l'on n'assurait pas tout d'abord l'étanchéité.

La plupart des toitures des grands bâtiments, des remises, ateliers, halles à marchandises, abris et marquises, sont revêtues d'une chape en ciment autant que possible incorporée.

Si des suintements sont dûs à la porosité de cette chape, on la badigeonne avec un

produit bitumineux en solution, l'expérience ayant montré que les produits en émulsion étaient rapidement délavés par la pluie.

S'ils sont dûs, comme c'est le cas le plus souvent, à des fissures, on traite celles-ci avec un mastic plastique, au besoin après élargissement pour faire pénétrer celui-ci dans l'épaisseur de la fissure, le tout pouvant être recouvert d'une bande collée en feutre bitumé.

Si la chape présente des fissures multiples, qui s'accompagnent généralement de cloquages, il faut la refaire ou lui substituer un autre dispositif d'étanchéité.

Il faut remarquer que, même bien lissées au début, les chapes en ciment s'usent par appauvrissement, au moins en surface, sous l'effet des eaux de pluie: elles deviennent granuleuses, ce qui retarde l'écoulement des eaux et favorise leur action. Mais cette usure est généralement très lente.

Tout compte fait, bien que la meilleure solution, sinon la plus économique, reste la chape à base d'hydrocarbures lourds, une chape en ciment bien faite constitue pour des bâtiments où l'on n'exige qu'une étanchéité "industrielle," c'est-à-dire relative, une solution acceptable, étant entendu qu'il se produira toujours quelques fissures, mais faciles à boucher.

Il faut cependant faire une réserve pour les toitures à intrados soumis aux fumées: une surveillance vigilante doit s'attacher à déceler toute fuite d'eau *dès qu'elle se révèle* (visite après pluie) et à y remédier *immédiatement*.

Si l'action corrosive des fumées est à craindre, on peut badigeonner l'intrados ou le plafond du bâtiment par un produit étanche, à condition que l'application soit faite sur le béton neuf.

Des essais en cours actuellement dans une remise à machines ont montré que des peintures à base de produit bitumineux en solution, appliquées à chaud ou à froid et des peintures au caoutchouc chloré donnaient également de bons résultats. L'essai, qui ne date que de deux ans, n'a pas permis encore de classer les différents produits.

Si des fuites résultent de multiples fissures capillaires, un badigeon général avec un produit bitumineux en solution est à recommander, mais il faudra le refaire périodiquement.

Pour les tabliers de ponts en béton armé, la chape en ciment est acceptable pour des ouvrages de faible ouverture. Pour les ouvrages plus importants, il arrive qu'elle se fissure, et la réparation devient *très onéreuse*, et gênante pour l'exploitation.

Une bonne solution, quand on dispose de la hauteur voulue, paraît être la chape en asphalte, protégée par une contre-chape maigre au ciment: elle est durable, et assez élastique pour suivre sans se fissurer les légères déformations du tablier.

(2) *Reconstitution de parements touchés par la corrosion* (*intrados de toitures, éléments de façades, intrados de ponts, superstructures de grands ponts*)

La réparation comporte en principe:

un piquage pour éliminer le béton avarié ou non adhérent;

un décapage, au jet de sable ou, à défaut, la brosse (suivant l'importance) des surfaces à reprendre;

l'adjonction, si cela est nécessaire et quand cela est possible, de barres d'armatures pour compenser les armatures coupées ou de section réduite par les corrosions;

la reprise au mortier de ciment des zones intéressées (après lavage abondant), avec les surépaisseurs nécessaires, s'il est besoin, pour assurer l'enrobement correct des armatures. Il est préférable de faire ces reprises au ciment-gun,

ce qui assure une meilleure adhérence et un meilleur serrage du mortier rapporté, si ce procédé est utilisé correctement. Ces reprises constituent un travail qui doit être fait très soigneusement et en évitant autant que possible d'opérer par temps froid ou très chaud. C'est à ce prix seulement qu'elles auront chance d'être durables.

D'une manière générale, les travaux de remise en état de béton armé sont délicats; il faut des entreprises compétentes et une surveillance attentive.

Améliorations apportées dans la conception et l'exécution des ouvrages dans le domaine de la résistance aux corrosions

Ce qui a été fait

Nous avons déjà été amenés à parler de ce qui avait été fait à cet égard; rappelons-le brièvement avec quelques indications complémentaires:

Au point de vue conception, on s'astreint:

- à prévoir en nombre suffisant des joints de dilatation et de retrait;
- à ne laisser sans armatures aucune zone où le béton est susceptible de travailler à l'extension;
- à dimensionner les pièces de façon que, dans les parties où le béton sera sollicité par des contraintes de traction, il travaille à un taux très faible;
- à éviter, autant que possible, les variations brutales de section;
- à profiler les surfaces exposées aux agents agressifs de façon à éviter les caissons et à faciliter l'aération;
- dans certains cas, à protéger les paraments exposés par des revêtements réfractaires, des peintures anti-acides, etc.

Au point de vue exécution, la qualité du béton et ses conditions de mise en œuvre ont été sérieusement améliorées par l'étude systématique de la granulométrie, la réduction au minimum nécessaire de la quantité d'eau de gâchage, la mise en eau du béton pendant sa première période de durcissement, l'emploi de la vibration. Mais il reste encore à faire au point de vue vibration: beaucoup d'entreprises ne possèdent ni un appareillage assez varié pour que chaque élément soit traité avec le type de vibrateur approprié, ni un personnel bien qualifié pour utiliser judicieusement ces appareils.

Quelques suggestions sur ce qui pourrait encore être fait

Il semble qu'il reste encore bien à faire pour assurer régulièrement aux constructions en béton armé, même dans des conditions d'utilisation banales (effets des seules intempéries), une longévité en rapport avec leurs autres qualités.

Pour cela, les efforts devraient, à notre avis, porter notamment sur deux points:

(a) modifier foncièrement les conditions d'exécution;
(b) prévoir la "peinture" des parements, pour pallier en toute hypothèse leur perméabilité et assurer ainsi à coup sûr la protection simultanée du béton et des armatures.

En ce qui concerne les conditions d'exécution, les facteurs d'imperfection sont dans les meilleures conditions de l'exécution totale sur place, trop nombreux pour qu'on puisse espérer obtenir régulièrement des constructions sans fissures et sans parements perméables. Il pourrait donc être profitable de chercher, même pour des constructions importantes, à préfabriquer en atelier le plus grand nombre possible d'éléments: ceci suppose, bien entendu, un minimum de standardisation des éléments, une

technique de transport et de mise en place permettant de préparer en atelier des éléments aussi importants que possible, pour réduire au minimum des raboutages à faire sur place. Cela amènerait d'ailleurs à modifier sur certains points la conception usuelle des ouvrages et la qualité des matériaux à utiliser, de façon à tirer le maximum d'avantages de l'exécution en atelier. En particulier, on serait mieux placé pour combattre les fissurations, inévitables tant qu'on aura du retrait et des zones de béton tendu, et si préjudiciables à la durée des ouvrages: des précontraintes locales, des mises en tension préalables, sont beaucoup plus faciles à réaliser en atelier; cela pourrait amener aussi le développement des ciments sans retrait et même expansifs dont l'emploi paraît devoir être un des facteurs essentiels de suppression des fissures.

La préfabrication, en outre, déterminerait automatiquement la position et l'orientation des reprises, qui sont, à l'heure actuelle, non pas certes laissées au hasard, mais toujours sujettes à modifications inopportunes en fonction du rythme du travail notamment.

Il resterait bien entendu des parties à bétonner sur place, auxquelles tous les soins devraient être donnés: du moins réduirait-on à ces seuls raccords les aléas de l'exécution sur place.

Cette suggestion n'apporte évidemment pas d'idée nouvelle: de nombreux objets en béton, armé ou non, et des éléments importants, gros tuyaux, poteaux, poutrelles, sont depuis longtemps fabriqués en atelier. Mais il ne semble pas que l'on se soit attaché, autant que cela le mériterait, à étendre le procédé à l'ensemble d'une construction, du moins dans le domaine des travaux du chemin de fer.*

En l'état actuel des choses, il faut admettre franchement que l'on ne saurait répondre de l'imperméabilité du béton; sans doute, de nombreux procédés existent pour améliorer le béton à cet égard: incorporation d'hydrofuges, béton à air occlus, notamment.

Sans nier qu'ils puissent être efficaces, il semble que, de toute façon, il serait nécessaire, pour tous les parements exposés non seulement à des agents agressifs caractérisés, mais simplement aux intempéries, de prévoir après décoffrage, l'application *systématique* d'une pellicule protectrice.

Les enduits à base de ciment, quels qu'ils soient, ne peuvent, à notre avis, jouer ce rôle, parce qu'ils ont les mêmes caractères d'altérabilité que le béton, et qu'ils sont, plus encore que lui, à cause de leur dosage riche, sujets à fissuration.

Il existe déjà de nombreuses peintures pouvant être utilisées pour la protection du béton, à savoir essentiellement:

les peintures silicatées, qui doivent être passées autant que possible sur des fonds alcalins, donc d'exécution assez récente;

les peintures au fluate, à base de fluosilicate, complexes; elles ont une meilleure résistance aux acides dilués que les peintures silicatées, mais leur action corrosive sur les métaux entraîne une réserve quant à leur emploi pour du béton armé.

les peintures bitumeuses, d'application facile et de prix peu élevé, mais inesthétiques par leurs couleurs.

les peintures au caoutchouc chloré, qui ont de grandes qualités d'imperméabilité

* Il faut mentionner le mode de construction des nouveaux hangars de l'Aéroport de Marignane, qu'achève actuellement l'Entreprise Boussiron de Paris: la toiture en voûte de chaque hangar, de 100 m. d'ouverture et 58 m. de longueur, forme un monobloc exécuté au niveau du sol, et levé ensuite par vérins (poids 4.000 t. environ) sur des éléments de poteaux également préfabriqués (hauteurs sous tirants 19 m. environ).

C'est en somme une préfabrication à terre, qui permet des conditions d'exécution meilleures et plus rapides, et facilite la surveillance.

et de résistance aux agents atmosphériques et chimiques, mais qui sont coûteuses.

Il paraîtrait utile de disposer, *pour les cas courants*, d'une peinture pas trop coûteuse, qui devrait réunir autant que possible les qualités suivantes:

s'harmoniser avec la teinte générale du parement;
ne pas attaquer les aciers;
ne pas se décomposer ni s'user sous l'action des eaux de pluie, et, si possible, pour ce qui intéresse spécialement les chemins de fer, sous les fumées, même à longue échéance;
avoir le degré de fluidité voulu pour être d'une application facile, tout en pénétrant bien tous les pores et petits vides superficiels du parement, et en adhérant parfaitement;
être suffisamment ductile pour suivre sans fissuration, au moins les fissures capillaires; cette dernière qualité paraissant devoir être parmi les plus essentielles.

Dans notre esprit, il ne s'agit pas là d'une solution de paresse, susceptible d'entraîner des relachements dans l'exécution d'un béton du fait qu'on se fierait à l'imperméabilisant surajouté. Ce serait plutôt une solution d'attente, à utiliser tant que l'on n'aura pas trouvé des procédés certains pour exécuter régulièrement du béton plein. En tout hypothèse, et même dans ce dernier cas, la peinture pourrait cependant constituer, dans tous les milieux agressifs, une sécurité complémentaire.

Enfin, un tel produit serait dès maintenant très utile pour compléter l'efficacité des réfections de parements faites sur les ouvrages existants.

Conclusion générale

L'expérience a montré que, tout au moins dans le domaine des constructions du chemin de fer, le béton armé n'est pas spécifiquement inapte à résister assez longtemps aux corrosions sous les intempéries, les fumées acides, ou les deux actions combinées. Mais, même en tenant compte des progrès réalisés jusqu'ici dans la conception et l'exécution, le comportement des ouvrages à cet égard paraît devoir rester variable.

Cela est dû essentiellement, à notre avis, à l'inaptitude du béton à subir sans se fissurer des contraintes de traction, et aux imperfections résultant de l'exécution complète sur le chantier.

Nous pensons que le développement de la préfabrication devrait pouvoir apporter simultanément de grosses améliorations sur ces deux points.

En attendant, et même, en toute hypothèse, par sécurité complémentaire, il faudrait, à notre avis, admettre la nécessité d'assurer systématiquement l'imperméabilité des parements par une peinture appropriée.

Ces conditions sont d'autant plus impératives que, lorsqu'on a laissé les corrosions se développer, les réparations sont difficiles, coûteuses, et de tenue incertaine.

Résumé

Les Chemins de Fer Français ont commencé à utiliser le béton armé dès les premières années du siècle, et en ont rapidement développé l'emploi.

Le nouveau matériau présentait en effet l'avantage d'être incombustible (halles a marchandises, remises à machines); on pensait en outre qu'il ne nécessiterait que peu d'entretien.

L'expérience acquise par les Chemins de Fer à cet égard a montré que si l'on

pouvait effectivement compter sur ces qualités, on constatait souvent de graves corrosions dans certains ouvrages.

En effet, l'acier s'oxyde s'il n'est pas protégé; le béton, qui doit assurer cette protection, est lui-même susceptible de dégradations. S'il n'est pas très compact et imperméable, il n'assure pas convenablement la protection des armatures.

Parmi les ouvrages du Chemin de Fer les plus caractéristiques quant aux corrosions sont les remises à machines et les passages supérieurs, soumis directement à l'action des fumées.

Si l'on suit l'évolution de ces types d'ouvrages, on voit que l'expérience a conduit, pour diminuer les avaries, à supprimer les éléments de faible section, à augmenter l'enrobement des armatures, à supprimer les caissons retenant les fumées, à faciliter par une aération appropriée l'évacuation de celles-ci.

L'étude du développement des corrosions montre que le béton armé n'est pas, par essence, impropre à résister convenablement dans le milieu "fumées": tout dépend de sa qualité.

En pratique, on constate à cet égard que son comportement est très variable.

C'est que sa qualité dépend essentiellement de ses conditions d'exécution et, par conséquent, de facteurs très nombreux, d'autant plus que l'exécution totale sur chantier multiplie les aleas. Il n'est donc pas étonnant d'obtenir des résultats irréguliers.

La réparation des avaries provoquées par les corrosions consiste essentiellement:

à rétablir l'étanchéité (toitures, tabliers de ponts) toutes les fois qu'elle est en défaut, car l'humidité accélère le développement des corrosions;

à reprendre au mortier de ciment les zones corrodées, de préférence par projection au ciment-gun après décapage au jet de sable.

Pour les ouvrages nouveaux, de nombreux progrès dans la conception et la technique d'exécution ont déjà été réalisés, afin de réduire les fissurations et d'améliorer la qualité du béton.

Il reste cependant beaucoup à faire pour réaliser régulièrement des constructions en béton armé susceptibles de durer.

Il semble que les efforts devraient porter sur deux points:

s'efforcer de fabriquer en atelier le plus d'éléments possible pour éliminer les aleas de l'exécution sur place; cela permettrait parallèlement de réaliser plus facilement des précontraintes pour réduire les fissurations.

en attendant, admettre que l'on ne peut répondre de l'imperméabilité du béton, et prévoir systématiquement la protection des parements par une peinture appropriée.

Summary

The French railways already used reinforced concrete at the beginning of this century, and very soon developed its applications.

The new building material had above all the advantage of being incombustible (storehouses, sheds), and it was thought to need very little maintenance.

The experience gained in this respect in connection with railways has shown that, even if these properties could be depended on, serious corrosion phenomena often occurred in certain structures.

The steel oxidises if it is not protected; the concrete itself, which should furnish this protection, is very easily damaged. If it is not thick and impervious, it does not ensure sufficient protection for the reinforcement.

Among structures on railways, locomotive sheds and bridges over the track are

the most liable to corrosion, since they are directly subjected to the effects of the smoke-gases.

If the development of these structures is examined, it will be seen that experience has led to the following precautions being taken, which should diminish the damage: avoiding elements with small cross-sectional dimensions; providing thicker covering for the reinforcing steel; avoiding box-like shapes that retain the smoke; and providing sufficient ventilation to lead the smoke away.

A study of corrosive action shows that reinforced concrete is in its essence capable of sufficiently withstanding a "smoke climate": everything depends on its properties.

In practice it has been found that its behaviour may greatly vary in this respect.

Since the properties of reinforced concrete depend essentially on the execution of the work, i.e. on very numerous factors and on chance occurrences on site, it is by no means surprising that the results should be anything but uniform.

In cases of damage by corrosion, the reconstruction work consists mainly:

in restoring the water-tightness (roofs, bridge roadways), whenever this has become deficient, since moisture accelerates corrosion;

in patching corroded places with cement-mortar, preferably with a cement gun after cleaning the place by sand-blasting.

For new structures, great progress has already been made in choosing appropriate shapes to diminish the formation of cracks and in improving the quality of the concrete.

However, there still remains much to be done until durable reinforced structures with definite uniformity can be erected.

It appears that efforts should be directed to two points:

as far as possible to fabricate elements finished in the workshop, in order to eliminate the chance happenings on site. This would at the same time and in a simple manner allow of the adoption of prestressing in order to diminish crack formation.

in the meantime (but temporarily) to admit that the impermeability of the concrete cannot be depended on, and to provide systematic protection of the surfaces by coats of suitable paint.

Zusammenfassung

Die Französischen Eisenbahnen verwendeten den Eisenbeton schon zu Anfang dieses Jahrhunderts und entwickelten in kurzer Zeit seine Anwendungen.

Der neue Baustoff wies vor allem den Vorteil der Unbrennbarkeit auf (Lagerhäuser, Remisen), und man dachte, er benötige nur sehr wenig Unterhalt.

Die in dieser Beziehung bei den Eisenbahnen gesammelten Erfahrungen zeigten, dass, wenn man auch auf diese Eigenschaften zählen konnte, doch bei gewissen Bauten öfters schwere Korrosionserscheinungen auftraten.

Der Stahl oxydiert, wenn er nicht geschützt wird; der Beton selber, welcher diesen Schutz bilden soll, ist empfindlich auf Beschädigung. Wenn er nicht sehr dicht und undurchlässig ist, gewährleistet er der Armierung nicht genügenden Schutz.

Unter den Bauten der Eisenbahnen sind, was die Korrosion anbelangt, Lokomotivremisen und Ueberführungen am meisten gefährdet, da sie dem Einfluss der Rauchgase direkt ausgesetzt sind.

Verfolgt man die Entwicklung dieser Bauten, so sieht man, dass die Erfahrung zu folgenden Massnahmen geführt hat, die Schäden vermindern sollen: Vermeidung von

Elementen mit kleinen Querschnittsabmessungen, stärkere Umhüllung der Armierungseisen, Vermeidung von kastenförmigen Gebilden, die den Rauch zurückhalten und Ableitung desselben durch genügende Belüftung.

Das Studium des Korrosionsvorganges zeigt, dass der Eisenbeton seinem Wesen nach fähig ist, einem "Rauchklima" genügend zu widerstehen: Alles hängt von seinen Eigenschaften ab.

Praktisch stellt man in dieser Beziehung sehr verschiedenartiges Verhalten fest.

Weil seine Eigenschaften wesentlich von der Ausführung abhängig sind, also von sehr zahlreichen Faktoren und von Zufälligkeiten auf der Baustelle, ist es nicht erstaunlich, wenn man unregelmässige Ergebnisse feststellt.

Die Wiederherstellungsarbeiten bei Korrosionsschäden bestehen hauptsächlich:

in der Wiederherstellung der Dichtigkeit (Dächer, Brückenfahrbahnen), jedesmal, wenn diese wieder fehlerhaft wird, denn die Feuchtigkeit beschleunigt die Korrosion;

in dem Ausflicken der Korrosionsstellen mit Zementmörtel, vorteilhaft mit der Zementkanone nach Reinigung mit dem Sandstrahlgebläse.

Für neue Bauten sind schon zahlreiche Fortschritte in der Gestaltung erzielt worden, welche die Rissebildung vermindern und die Betonqualität verbessern.

Es bleibt immerhin noch viel zu leisten, bis man mit Regelmässigkeit dauerhafte Eisenbetonbauten herstellen kann.

Es scheint, dass die Anstrengungen sich auf zwei Punkte richten sollten:

nach Möglichkeit Elemente in der Werkstatt fertig herzustellen, um die Zufälligkeiten auf der Baustelle auszuschalten. Dies würde gleichzeitig erlauben, auf einfachere Weise die Vorspannung anzuwenden um die Rissebildung zu vermindern.

inzwischen (vorläufig aber) zuzulassen, dass man sich nicht auf die Undurchlässigkeit des Betons verlassen könne, und systematischen Schutz der Flächen durch entsprechende Anstriche vorzusehen.