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

Band: 4 (1952)

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

Autor: Séméac, L. / Boutron, N.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-5065

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: 15.07.2025

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

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

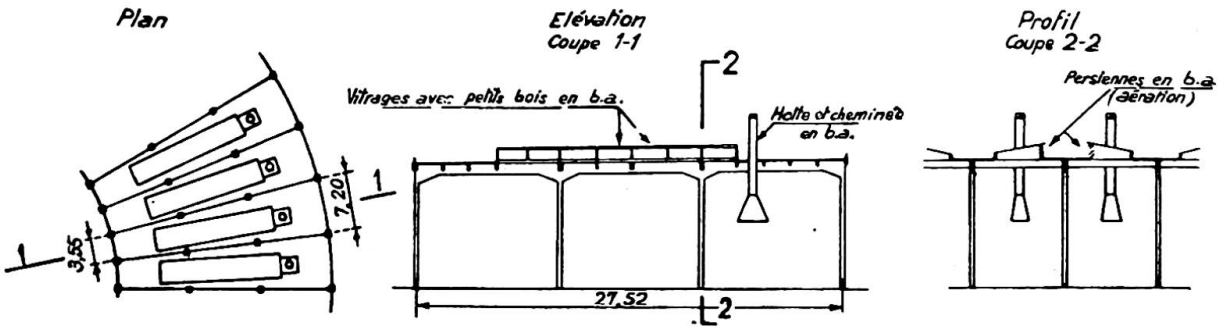

Fig. 1. Remise annulaire type A

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.

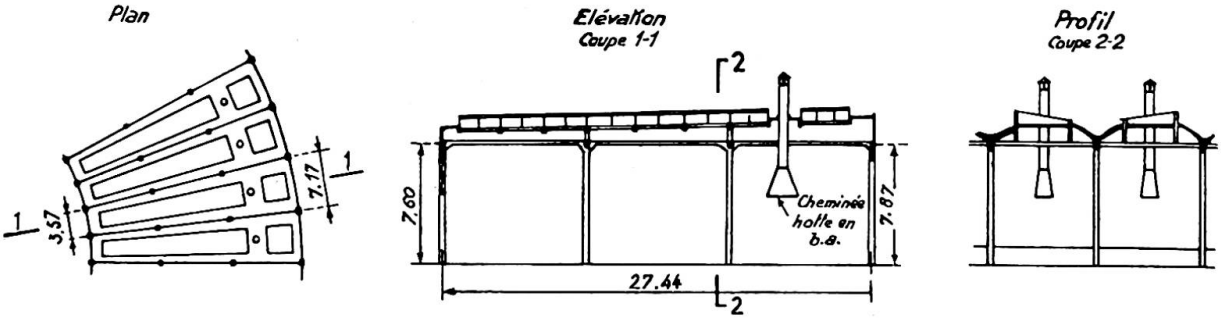

Fig. 2. Remise annulaire type B

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.

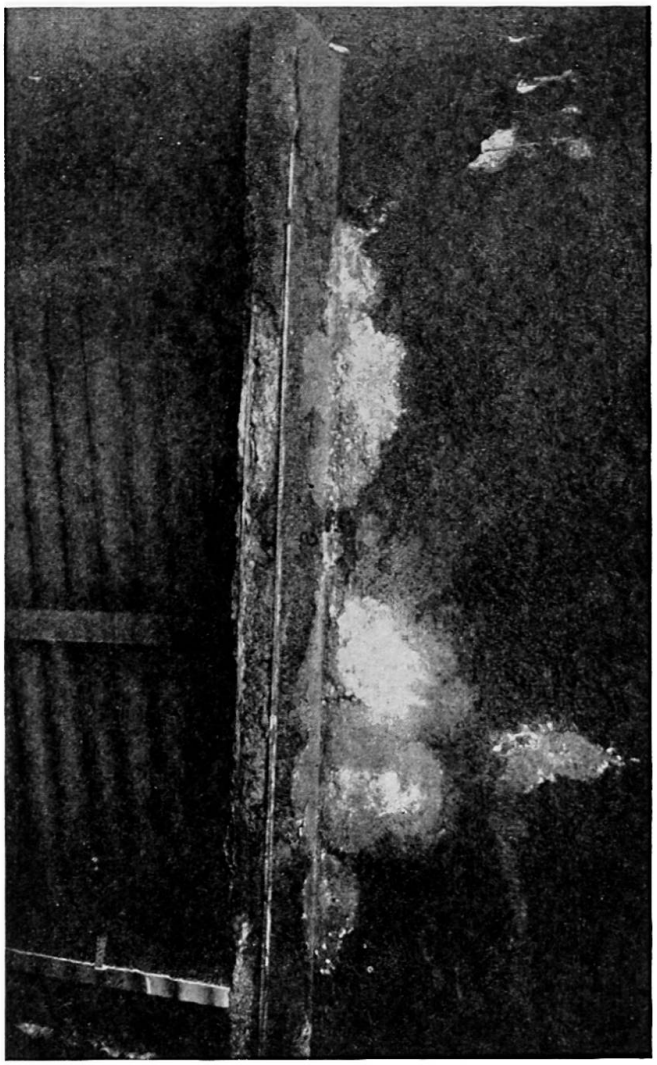

Fig. 3. Remise d'Alès

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.

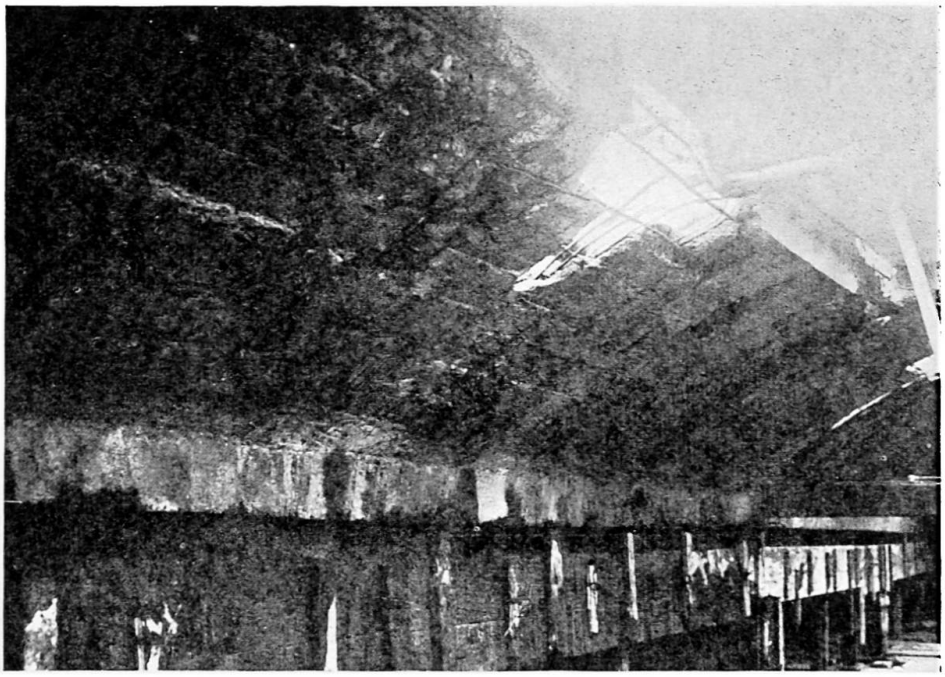

Fig. 4. Remise de Paray-le-Monial

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.

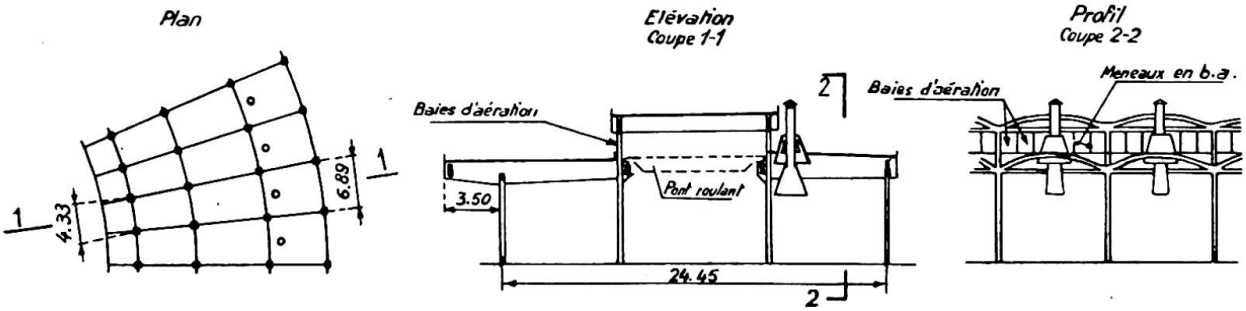

Fig. 5. Remise annulaire type C

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.

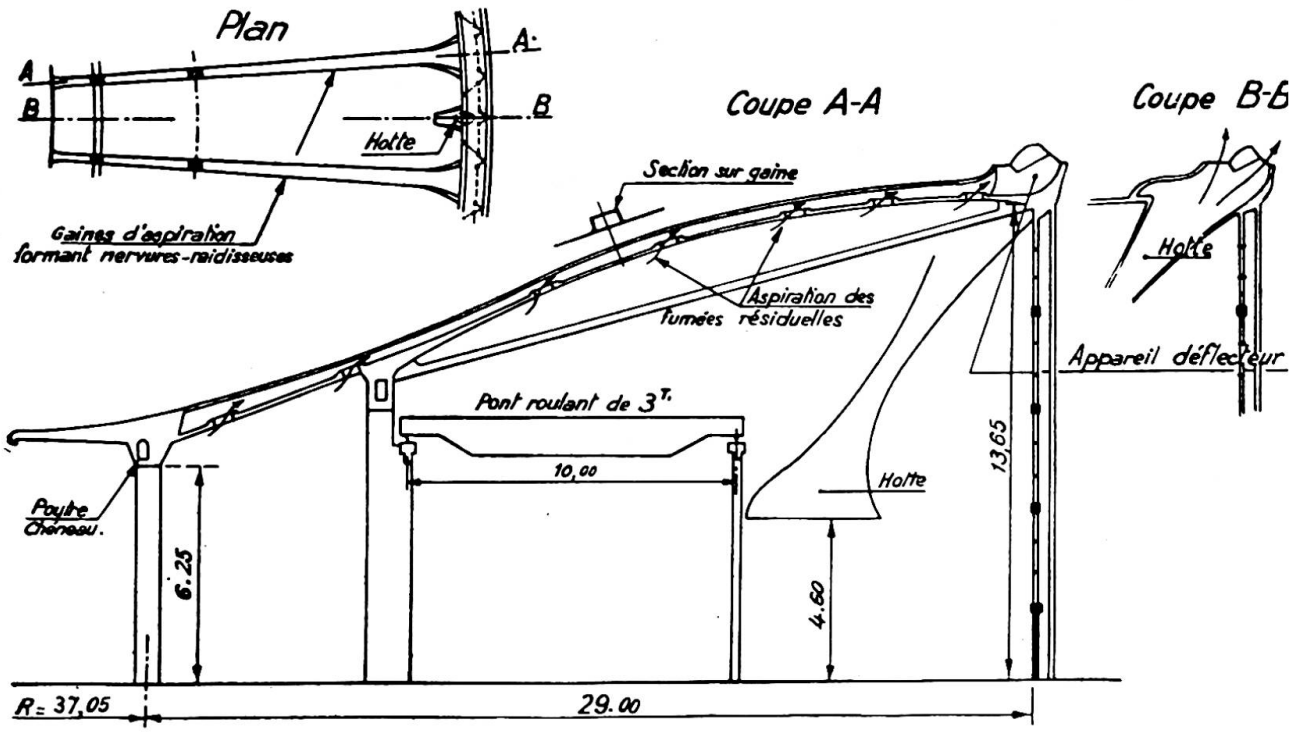

Fig. 7. Remise annulaire type P

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-

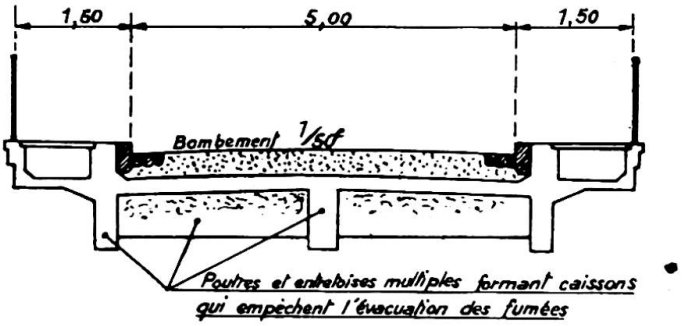

Fig. 8. P.S. à intrados en caissons

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.

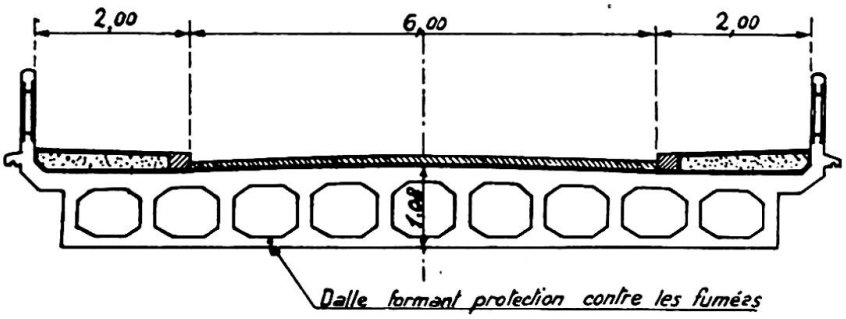

Fig. 9. P.S. à intrados protégé

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

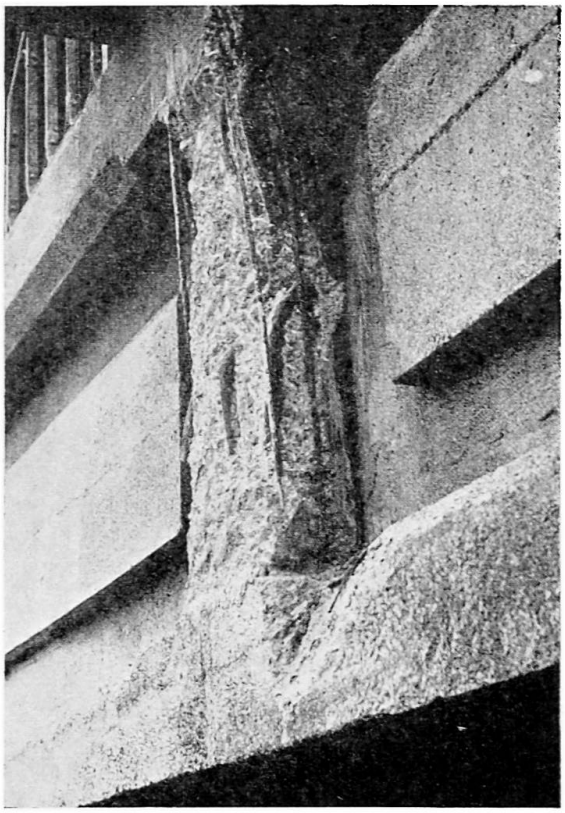

Fig. 11. P.S. du Donon

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

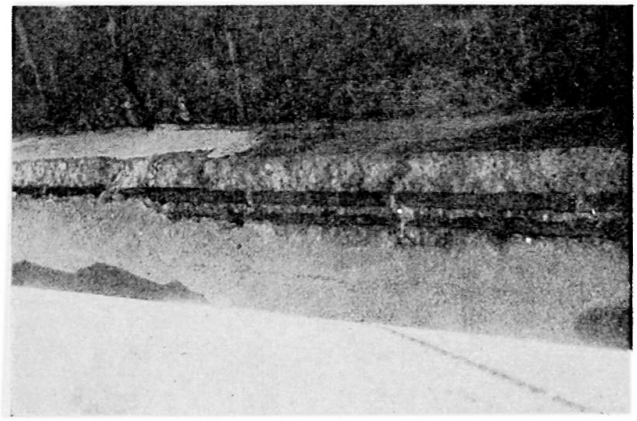

Fig. 13. Passerelle de Cerbère

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).

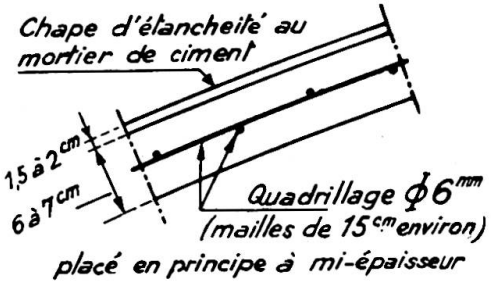

Fig. 14

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

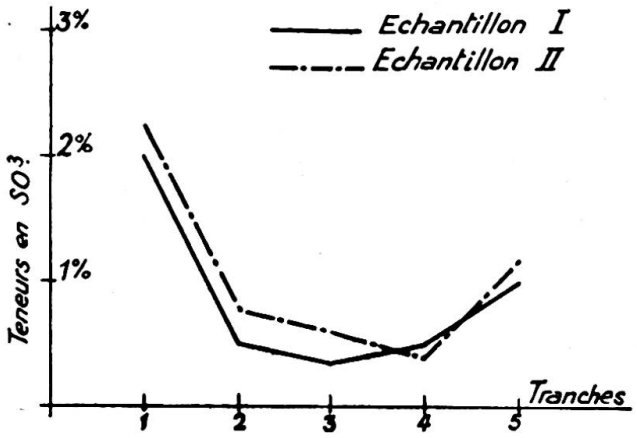

Fig. 15

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

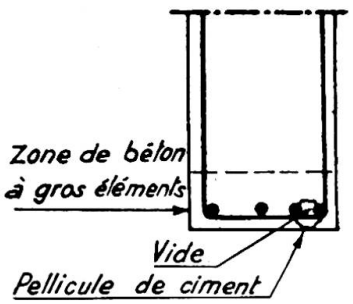

Fig. 16

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).

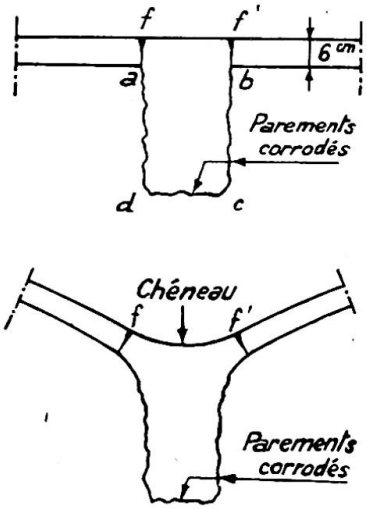

Fig. 17

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.