

## La corrosion atmosphérique en Inde

Il existe de nombreux comptes rendus d'essais effectués sur la résistance du matériel, en milieu climatique reproduit en laboratoire, mais les rapports concernant le comportement du même matériel dans des conditions réelles sont souvent plus riches d'enseignement parce que le nombre de facteurs intervenant dans les phénomènes de corrosion observés est plus grand, ainsi que le font remarquer de nombreux auteurs parmi ceux que nous avons groupé.

Les essais en laboratoire, en temps réel ou accéléré ne doivent pas exclure les essais sur place qui les contredisent quelquefois et qui peuvent de la sorte ouvrir la porte à de nouvelles recherches pour élucider mieux la complexité des phénomènes observés.

La considération de plus en plus grande qu'on accorde aux phénomènes mettant en jeu des quantités de matière très faibles mais très actives, l'interaction de la corrosion et de la pollution atmosphérique vont dans ce sens.

Nous avons voulu essayer de réunir un certain nombre d'articles relatifs à la corrosion atmosphérique en pays tropical, en les analysant et en essayant d'en tirer des conclusions. Ceci pour donner à ceux qui s'intéressent à ces questions, une vue d'ensemble et des idées générales, en rassemblant une documentation fragmentée et qu'il nous a été souvent très difficile d'obtenir. En ce qui concerne les idées de base et des développements généraux on pourra se référer à des ouvrages déjà parus (1), (2).

Pour considérer des cas particuliers de corrosion et de protection en milieu tropical, nous avons choisi de nous intéresser tout d'abord au continent indien, où les climats varient sensiblement, mais où la corrosion en milieu tropical, surtout sur les côtes, peut donner lieu à des observations utiles.

par A. DELRIEU

directeur du  
laboratoire de  
tropicalisation  
de l'Office de la recherche  
scientifique et technique  
outré-mer (ORSTOM)

Il y a plusieurs instituts scientifiques et la littérature scientifique est abondante. La corrosion dans les différents types de climats y a fait l'objet de nombreuses publications.

De nombreux instituts indiens s'occupent de corrosion : Centre Electronical Research Institute, National Metallurgical Laboratory, Defense Laboratory, Indian Institute of Science, Corrosion Advisory Bureau.

Des renseignements concernant la sévérité de la corrosion dans les diverses régions sont recueillis par la Survey of India et d'autres organismes similaires. Des études sont menées par exemple au CECRI qui ont conduit à la

mise au point d'inhibiteurs de corrosion de différentes sortes ; des peintures, des produits pour décaper, etc. en essayant d'utiliser des produits locaux (3).

Les articles auxquels nous nous référons datent de ces dernières années et les matériaux très divers ont été essayés. Nous ne prétendons pas faire un exposé critique exhaustif de tous les essais effectués dans ces régions, mais essayer de donner une bonne idée d'ensemble des phénomènes observés sur du matériel complet en service.

C'est aussi là une particularité des essais in situ, que de porter souvent sur du matériel, formé de plusieurs matériaux dont le voisinage fait que l'ensemble ne se comporte pas comme chacune des parties séparément l'aurait fait, alors que les essais en atmosphère reproduite de laboratoire portent plus souvent sur des échantillons de matériaux isolés.

Il est souvent fructueux de comparer les résultats obtenus par différents chercheurs dans des conditions semblables, ces rapprochements conduisent parfois à des remarques qu'il est difficile de faire d'une autre manière.

Il paraît, à notre époque, de nombreux articles dispersés sur des sujets voisins, mais il manque d'articles de synthèse, essayant de tirer quelques conclusions d'expériences isolées. C'est dans ce sens que nous pensons que notre travail sera utile.

### DONNEES METEOROLOGIQUES

Le régime climatique du continent indien est très diversifié ; on y trouve à peu près tous les climats. D'ailleurs, du point de vue de l'ingénieur corrosionniste, la manière d'envisager et de classer les climats peut différer sensiblement de celle employée habituellement par les géographes (Thorntwaite p. ex.)

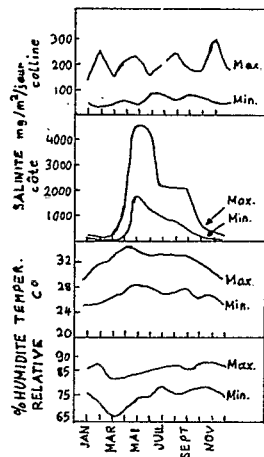


Figure 1. — Facteurs climatiques à Mandapam Camp. (Température, humidité, salinité.)

● SALINITE  
○ TEMPERATURE  
x % HUMIDITE

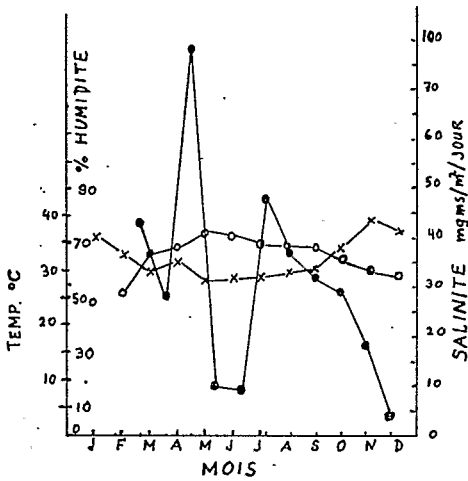


Figure 2. — Facteurs climatiques à Madurai. (Température, humidité, salinité.)

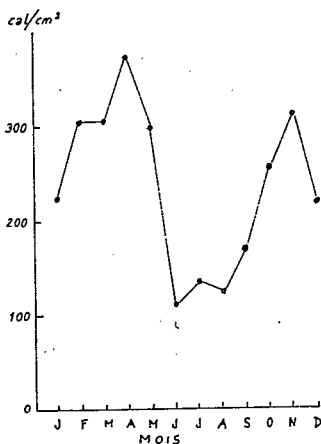


Figure 4. — Energie de rayonnement solaire direct à Calcutta en 1965.

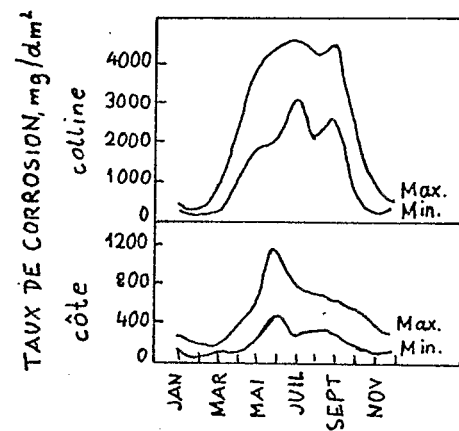


Figure 5. — Corrosion de l'acier doux à Mandapam Camp.

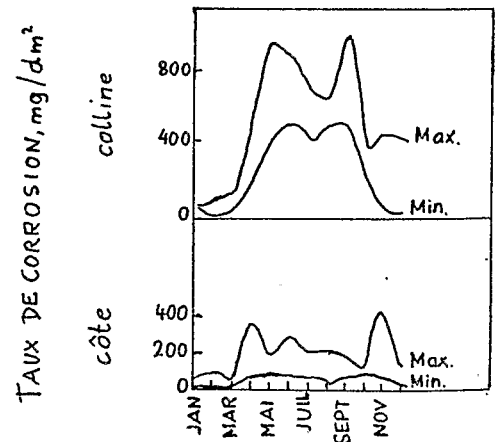
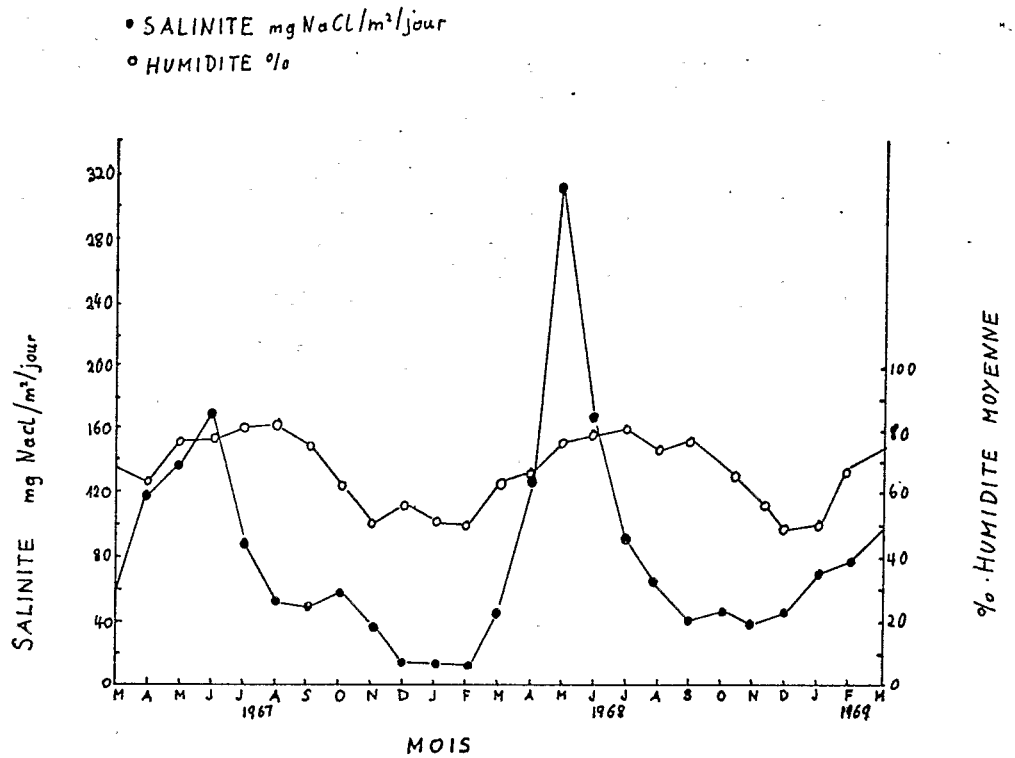
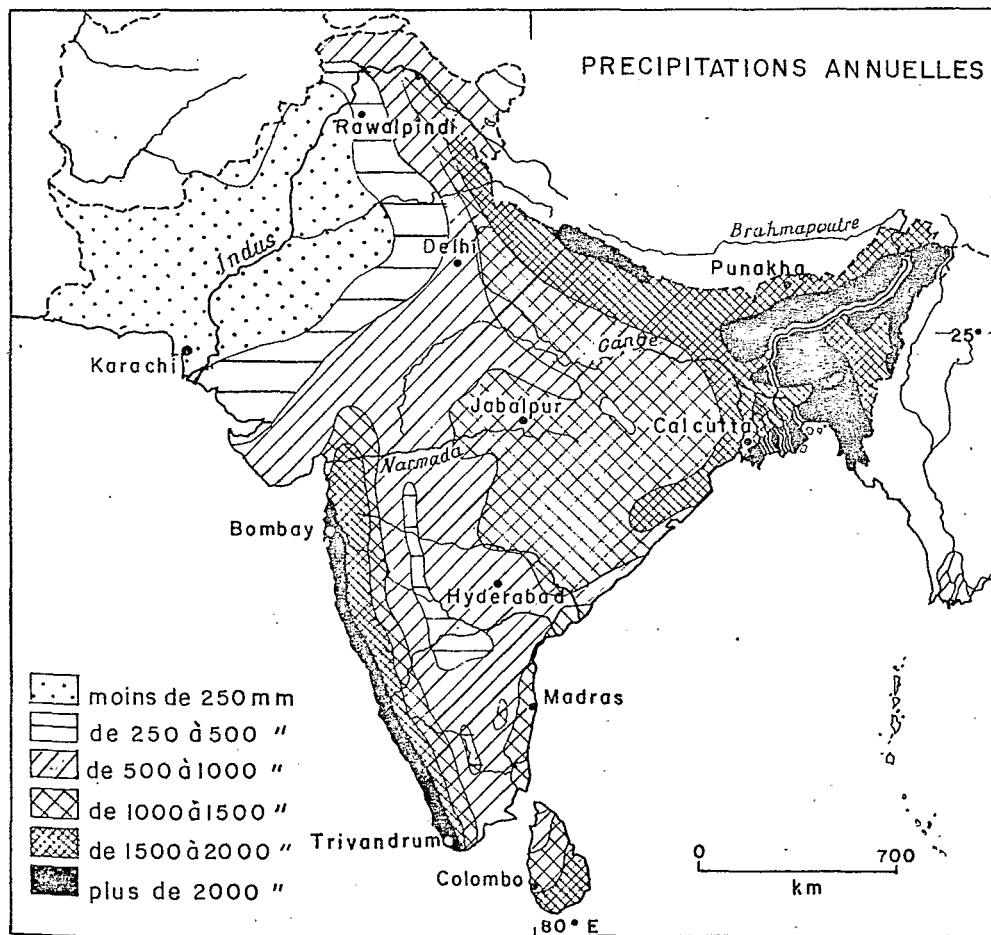
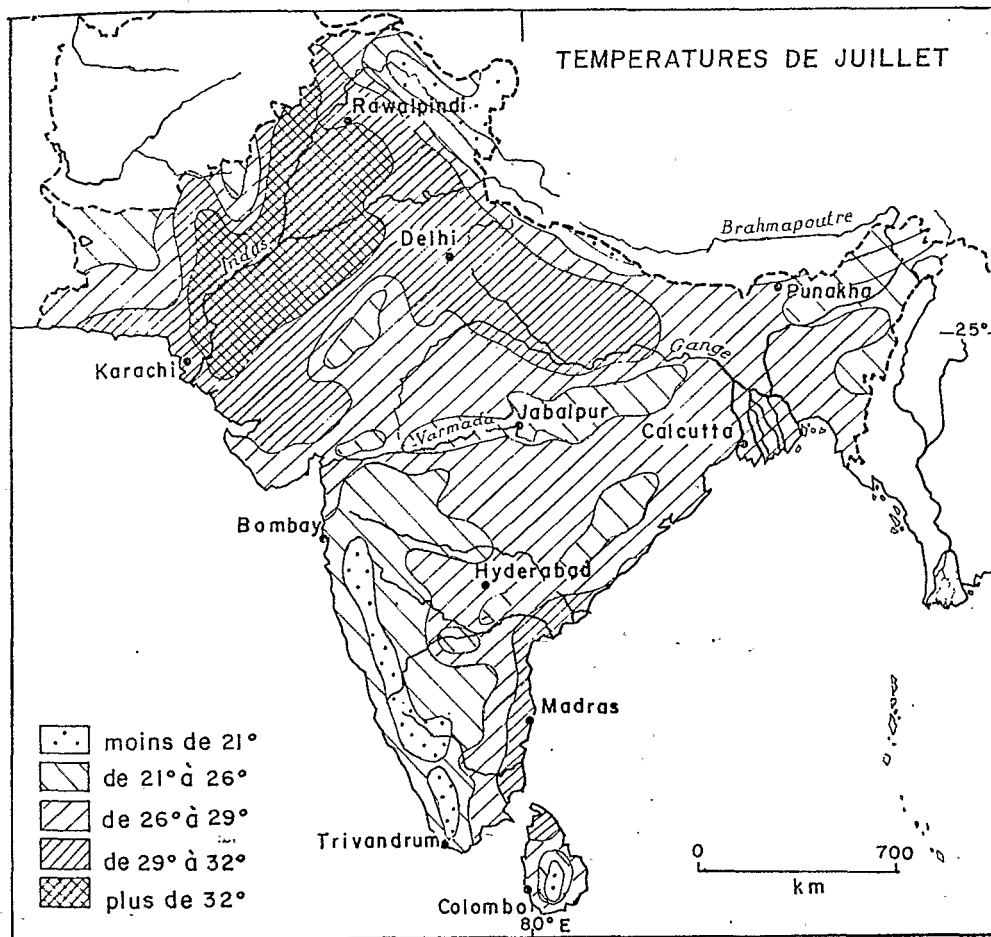


Figure 6. — Corrosion du zinc à Mandapam Camp.



(Humidité, salinité)

Figure 3. — Facteurs climatiques à Digha. (Humidité, salinité.)



qui considèrent surtout l'influence du climat sur la croissance de la végétation ou l'humidité du sol. Nous nous intéressons surtout à la température, à l'humidité de l'air, à la salinité et à la pollution atmosphérique, au rayonnement solaire et aux précipitations qui sont les facteurs qui ont le plus d'action sur les matériaux exposés.

Disons brièvement que dans les plaines indo-gangétiques au Nord-Ouest il existe un domaine sec avec de courtes pluies de mousson, un hiver déjà frais, un été très chaud. Le phénomène dominant est ici la mousson, elle se manifeste sous la forme d'une alternance régulière d'une saison de pluies gouvernée par les vents de mer l'été, et d'une saison sèche à climat continental l'hiver. Les montagnes exposées directement aux vents chargés d'humidité de la mousson d'été, reçoivent des précipitations record.

En saison froide un flux atmosphérique orienté Nord-Sud envoie de l'air d'origine continentale qui provoque un temps frais et sec qui se poursuit par une période de chaleur sèche de mars à mai. La mousson plus ou moins longue commence en juin et se termine en septembre. Les masses d'air océanique venant du Sud-Ouest intéressent d'abord le Dekkan, puis à cause de la barrière de l'Himalaya traversent la plaine gangétique.

La présence d'un relief très varié explique la complexité des climats très variables d'une région à l'autre.

Sur les côtes orientales du Dekkan on observe la mousson du sud-est, des cyclones tropicaux qui se propagent en direction ouest ou nord-ouest. Le principal élément inhibiteur des pluies est l'anti-cyclone subtropical centré sur l'Afrique et l'Asie occidentale. Sur la côte tamil le vent de mousson prend le caractère d'un foehn. Dans les régions intermédiaires du centre et du Nord-Est, les pluies d'été sont importantes mais irrégulières d'une année à l'autre. Pendant les autres saisons, l'anticyclone subtropical s'avance sur le Nord-Ouest du Dekkan, les pluies restent possibles dans les secteurs périphériques, au Bengale, fin avril en automne sur la côte de Coromandel.

Les essais dont nous allons parler ont eu lieu à Digha dans la baie du Bengale, à Mandapam dans le golf du Mannar, sur une île de la côte sud-est, à Pamban en bordure de mer, dans les environs de Calcutta et dans le Sud à Madurai, à 100 km de la mer, non loin d'un hangar de locomotives dont l'atmosphère est assez polluée. Sauf en ce dernier endroit l'influence maritime est très prépondérante et dans tous les cas les essais peuvent être considérés comme ayant eu lieu dans des climats très agressifs, soit maritimes, soit industriels.

On verra sur les figures 1 et 2 la température moyenne de juillet et les précipitations annuelles pour le continent indien.

A la suite nous avons reproduit les données météorologiques concernant les stations dans lesquelles ont eu lieu les essais. Sur les graphiques nous avons porté, quand nous les avons, la température moyenne, l'humidité relative, la salinité atmosphérique, les précipitations, ainsi qu'une donnée concernant l'intensité du rayonnement solaire.

## ESSAIS SUR METAUX NON PROTEGES. MESURE DE LA CORROSION

Des essais portant sur des plaques de différents métaux non protégés ont été faits à plusieurs endroits, dans le but de mesurer l'intensité de la corrosion par perte de poids ou perte d'épaisseur.

A l'aide des résultats de ces essais on a essayé également de montrer l'influence des divers facteurs de la corrosion. C'est une entreprise difficile et on arrive assez rarement à des conclusions bien nettes. Dans une étude importante ayant duré cinq ans à Mandapam Camp (5) dans un climat maritime chaud et humide, avec des précipitations importantes au mois de novembre, les essais ont porté sur de l'acier doux, du zinc, du cuivre, du laiton, de l'aluminium et de l'acier inoxydable 18/8. Il en ressort que l'action combinée des divers facteurs est très complexe et qu'il est difficile par conséquent de prévoir le comportement de tel ou tel matériel surtout non protégé (acier doux).

On peut néanmoins tirer de nombreuses conclusions de ces essais : les valeurs absolues varient beaucoup d'une année sur l'autre, soit pour les facteurs climatiques soit pour la corrosion. On peut également avoir des idées plus précises quant à la meilleure époque pour faire des mises en peinture. Sur la côte, le facteur le plus important est sans doute la salinité atmosphérique ; l'influence de l'humidité de l'air semble assez faible, du fait que même pour les basses valeurs de celle-ci, les sels de l'atmosphère sont assez hygroscopiques pour absorber cette humidité et jouer un rôle d'électrolyte.

L'influence de la température doit être prise en considération compte tenu du degré de pollution.

Les précipitations peuvent accélérer la corrosion en fournissant un électrolyte mais aussi la ralentir en éliminant les sels déposés sur la surface métallique.

### L'influence de la salinité atmosphérique dans le cas d'acier doux

L'accroissement de la salinité d'avril à juin provoque une augmentation de la corrosion, mais il ne semble pas exister de relation linéaire. D'autres influences peuvent venir compliquer les choses ; par exemple les précipitations qui enlèvent des produits salins déposés sur les plaques, les vents qui changent de direction et diminuent le dépôt salin.

Dans une autre étude l'influence de la date du début des essais est bien mise en évidence.

A Digha, dans le golfe du Bengale, en atmosphère marine, la corrosion est maximale entre avril et juin en liaison avec la haute salinité atmosphérique. Il semble qu'une plaque dont l'exposition débute pendant une période de corrosion intense, se corrode moins en moyenne annuelle (4).

Par exemple les essais commencés pendant la période d'avril à juin sont exposés à une corrosion intense avant la mousson, mais pendant celle-ci le NaCl est éliminé et le taux annuel de corrosion est plus bas.

Au contraire, les essais commencés pendant l'hiver, à partir d'octobre, subissent d'abord une faible corrosion, mais ils ne sont pas lavés par la pluie, la rouille contient plus de chlorure et le taux annuel de corrosion est plus élevé.

Dans une autre étude effectuée à Mandapam Camp il semble que la rouille formée dans une atmosphère moins corrosive en décembre soit plus protectrice, surtout si cette période dure longtemps.

Pour donner quelques chiffres, la perte par corrosion peut varier de 250-500 mg/dm<sup>2</sup>/mois de novembre à avril et de 100-200 mg/dm<sup>2</sup>/les autres mois. Les moyennes portant sur l'année ne reflètent pas ces différences assez importantes.

L'angle d'exposition des plaques donne lieu à des résultats très contradictoires. Il semble que l'exposition horizontale soit la plus corrosive mais d'autres auteurs trouvent que c'est la position verticale. En tout cas un changement d'angle d'exposition a beaucoup d'influence. La hauteur du lieu d'exposition influe par sa relation avec la salinité.

La comparaison des expositions diurnes et nocturnes semble difficile étant donné la complexité des facteurs mis en jeu : rosée, ensoleillement, condensation, etc.

Il semble que les essais ont repris la méthode et les types envisagés par Ambler et Bain, dans un travail effectué au Nigeria. De même pour la distance du bord de mer.

Tous ces essais portant sur l'acier doux non protégé donnent une idée de l'agressivité du climat vis-à-vis des métaux ferreux, en supposant que la protection à prévoir est en relation directe avec le climat environnant, bien que la proportion soit assez difficile à évaluer. Les pertes en poids dues à la corrosion varient beaucoup d'une période à l'autre, et on peut se poser la question de savoir quoi prendre pour assumer une protection efficace, considérer l'agressivité maximale ou au contraire moyenne. Cependant une réponse satisfaisante peut être déduite d'une communication que nous considérons un peu plus loin.

### Corrosion du zinc

L'influence de la période de début des essais est différente de celle de l'acier doux et on constate des variations inexplicables. Il n'a pas été fait d'analyse des produits de corrosion comme dans le cas de l'acier doux.

A Madurai la perte en poids est de 250-360 mg/dm<sup>2</sup>/mois en avril et novembre (7) ; elle s'abaisse à 60-80 mg/dm<sup>2</sup>/mois pendant les autres mois. A Mandapam Camp elle varie de 60-400 mg/dm<sup>2</sup>/mois suivant les saisons.

### Corrosion de l'aluminium

Variante de 40 mg/dm<sup>2</sup>/mois en mai et septembre à Mandapam Camp à 5 mg/dm<sup>2</sup>/mois les autres mois, elle est maximale le premier mois mais ensuite elle décroît beaucoup. L'aluminium en temps que constituant de peinture semble donner de bons résultats comme nous le verrons plus loin.

## Essais de protection de matériel métallique

Un bon exemple de matériel métallique protégé nous est exposé dans la « Corrosion Research on Indian Railway » (6).

Dans un climat côtier du Sud de l'Inde, à Pamban, on a essayé de développer l'usage de goudrons, bitumes, dérivés de l'huile de noix de cajou qui sont des produits indigènes. Dans l'emploi des résines epoxy on a essayé le remplacement des solvants coûteux par des émulsions aqueuses. Des essais en service ont été faits sur des wagons d'acier qui présentaient des détériorations dues à la corrosion au bout de 7 ou 8 ans de service, particulièrement aux fermetures des portes, sur les panneaux de côté, les planchers des dessous de lavabo.

On a employé des mélanges de bitumé et de CNSL résines epoxy : ces mélanges ne nécessitent pas de durcisseur, la surface ne devient pas très dure en séchant, ce qui est appréciable pour les objets soumis à des sollicitations dynamiques. Après vingt et un mois de services les observations montrent que les résultats sont satisfaisants.

Sur un ouvrage métallique fixe, le pont de chemin de fer de Pamban à côté de Rameswaram, on essaya d'abord une protection consistant en deux couches de peinture au minium suivies d'une couche de l'oxyde rouge, sur les tendeurs, trois couches de minium suivies de quatre couches plus deux couches de primaire au chromate de zinc et deux couches de peinture à l'aluminium.

Des essais comparatifs de métallisation sur des témoins ont montré une meilleure tenue de l'aluminium par rapport au zinc. Les témoins conservés sans maintenance sont en bon état après trois ans de service dans des conditions particulièrement sévères (brouillard salin).

Un autre genre de protection de matériel métallique pendant le transport et le stockage a été étudié particulièrement lors d'une expédition polonaise en Inde, lors du passage de la mer Rouge et pendant le stockage à Barauni (8).

Ont été étudiées la protection par emballage d'un ensemble de pièces métalliques et la protection de chaque pièce séparément, cette dernière s'étant révélée moins efficace.

Pendant le transport le meilleur emballage s'est révélé être une caisse de bois brut garnie de tôle d'acier à l'intérieur.

Cette tôle d'acier est très utile également pendant le stockage pour éviter que les termites pénètrent à l'intérieur de la caisse en amenant de la terre chargée d'humidité.

L'influence de la température est très grande, sur le pont exposé au soleil la température peut atteindre 70 °C, finalement il s'établit une sorte d'équilibre thermique du fait de l'inertie des matériaux et la température est suffisamment élevée pour qu'il ne se produise pas de condensation. La protection des matériaux, tôle noire et différents aciers a été réalisée à l'aide de différentes huiles et graisses, sans que leur action puisse être nettement différenciée sauf pour l'huile de broche qui s'est révélée insuffisante.

Les points importants à considérer sont surtout la viscosité des graisses employées en fonction de la température, il faut qu'elle reste suffisante pour adhérer à la surface protégée.

La rugosité de celle-ci a une certaine influence; il semble qu'un nettoyage sablé soit favorable, sans être cependant trop poussé; la surface ne doit pas être complètement dépoussiérée, l'huile trouve ainsi une base d'accrochage plus solide.

De même on a observé une corrosion fissurante plus importante sur des échantillons cylindriques lisses.

Un autre point à considérer est la formation possible d'émulsion des huiles employées pour la protection, avec l'eau des embruns. Les antifongiques employés durant le stockage n'ont pas donné de résultats bien probants.

Parmi les protections par peinture une combinaison résine Alkyde avec poudre d'aluminium a donné les meilleurs résultats.

## COMPORTEMENT DES MATIERES PLASTIQUES

Signalons des essais dans le sud de l'Inde sur du PVC dur en plaque (9). Alors que pour certains produits on s'attend à une durée de vie de dix ans, dans l'industrie du bâtiment on envisage une durée de cinquante ans. Il est donc nécessaire de faire des essais sur place de longue durée. Ceux-ci ont duré dix ans au maximum avec des retraits et des examens périodiques. Il en ressort que la vitesse de vieillissement n'est pas toujours la même, les résultats varient suivant les années d'exposition. On signale des cas de défaillance de plaques de PVC non pigmenté et transparent, utilisées dans le bâtiment en Europe. En tout cas les changements dans l'aspect extérieur ne semblent pas correspondre avec les changements mesurés dans les propriétés mécaniques.

On a donc deux problèmes différents suivant qu'on s'intéresse à l'aspect extérieur ou aux propriétés internes du matériau d'après son emploi. En ce qui concerne le polyéthylène nous disposons d'une étude (10) sur des feuilles destinées à l'emballage, exposées directement dans une station située à l'atmosphère au nord de Calcutta. L'influence dominante dans ces essais a été le rayonnement solaire. Nous reproduisons un diagramme donnant l'intensité de ce rayonnement à différentes époques de l'année.

Après une exposition de trois mois pendant la période d'avril à juin, la feuille de polyéthylène est complètement détériorée alors que la feuille conservée en caisse fermée se comporte mieux. Les processus de dégradation se traduisent, entre autres, par une réduction de la lumière transmise, et une diminution de la résistance à la déchirure, la perméabilité à la vapeur d'eau semble ne pas varier beaucoup. Il conviendrait donc d'utiliser ce genre de matériau pour l'emballage avec une certaine prudence lorsque l'action directe de la lumière solaire est à craindre, l'utilisation comme matériau barrière derrière les parois d'une caisse reste très acceptable.

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) « La tropicalisation », par A. Delrieu, aux Editions Desforges, 1974, Paris.
- (2) « Corrosion et tropicalisation ». Bibliograph. A. Delrieu, ORSTOM, 1975, Paris.
- (3) Rajagopalan, « Prevention of corrosion of metals and planning for the future », Indian Chem. Manufacturer, 1972, 10, (3), 9/16.
- (4) S. Rao Addanki et Key, « Corrosion of mild steel in the marine atmosphere at Digha », NML Techn. Journal. Vol. 13, février 1971, 27/31.
- (5) K.S. Rajagopalan, P. Annamamei, « Atmospheric Corrosion of metals at Mandapam India », Brit. Cor. Journal, 1971. Vol. 6, n° 4.
- (6) Shri K.C. Choudhuri, « Corrosion Research on Indian Railways », Point Industry News. 1973. Vol. 2, n° 1.
- (7) K.S. Rajagopalan, P. Annamalai, « Atmospheric corrosion of metals at Madurai », Chemical Age of India, 1968, 19/10.
- (8) J. Zawadski, L. Kowalkiewicz, « Polska ekspedycja do Indii w zakresie zabezpieczenia przeciwkorozyjnego urządzeń transportowanych i składowanych », Prace Inst. Mech. Precyz. 1967. Volume 15, n° 56, 41/50.
- (9) Robert J. Meyer, « Weltweite, geographisch differenzierte Bewitterungsprüfungen an Hart PVC », Farben und Lacke, n° 4, 1971.
- (10) D. Wroblewska, « Influence de l'action directe du milieu tropical sur les feuilles de polyéthylène », Corrosion, traitement, protection, 1969. Vol. 17, n° 7, oct.-nov., 335/42.
- (11) Rajagopalan, « Some aspects of reinforcement corrosion and its prevention », J. Scien. Ind. Res. 1969, 28 (10), 382/95.
- (12) Chopra S.K. Taneja, « Latex cement coatings for the protection of reinforcement in cellular concrete », Indian Conc. J., 1971, 45, (10), 425/7.

Par ailleurs le polyéthylène à haute densité a été utilisé sous forme de tuyau dans l'industrie chimique en particulier, avec, semble-t-il, de bons résultats.

## TENUE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Des problèmes particuliers se posent surtout au niveau de la résistance des armatures métalliques incorporées dans les matériaux de construction pour leur conférer une plus grande solidité (ciment armé) ou pour former une structure porteuse recouverte ensuite de matériaux plus ou moins isolants ou esthétiques.

A l'occasion d'une grande enquête (11) menée dans les régions de Bombay, Delhi, Agra et Patna on a constaté de nombreux exemples de corrosion.

Des fissures apparaissent dans les constructions après 20-25 ans de service. La corrosion des armatures métalliques est généralement manifestée par des fissures dans le plafond juste en dessous de l'armature. Quelquefois des produits d'oxydation de couleur sombre sont apparents. En enlevant des plaques de produits de corrosion on observe que les barres de 1/2 à 3/8 inch de diamètre sont réduites à 1/4 inch.

La corrosion est moins intense lorsque le toit est protégé contre l'exposition directe au soleil et qu'une pente est prévue dans les terrasses pour éviter que l'eau de pluie stagne.

Dans une autre enquête effectuée dans les régions de Mandapam, Trivandrum et Nagpur (sud de l'Inde) on a remarqué que les bâtiments résidentiels situés dans les zones hautement industrialisées présentent une forte corrosion des armatures dans la totalité de la structure.

Les extrémités des poutres métalliques des toits directement exposés supportent les premières attaques.

Dans le cas de structures multiples, les colonnes, encadrements et escaliers sont les parties les plus atteintes, surtout les colonnes face à la mer.

La corrosion des armatures détectée par exemple par le gonflement du plâtre, apparue dans une période de dix à quinze ans après la construction est due surtout à l'épaisseur insuffisante du revêtement.

Lorsque le toit a une pente suffisante, la détérioration est plus lente, même pour des constructions de 40 ans d'âge en ciment. La corrosion la plus intense a lieu dans les toits de WC, les salles de bains et les urinoirs.

Dans le même institut un mélange inhibiteur a été mis au point qui reste actif lorsque les concentrations en chlorure et en sulfate au voisinage des armatures sont maximales.

En ce qui concerne le béton cellulaire (12) employé dans les toitures et les planchers, il est nécessaire de protéger les armatures d'acier doux à cause des pores du béton qui laissent pénétrer l'humidité et les sels corrosifs jusqu'au métal, ceci spécialement en atmosphère marine. L'argile réagit avec la silice et l'environnement de l'armature n'est plus alcalin, ce qui protège habituellement l'acier. D'autre part on ne peut pas employer de revêtements organiques pour protéger l'armature, à cause des forces d'adhésion qui doivent subsister entre l'acier et le corps du béton.

On a donc mis au point une formule à base de ciment Portland, caseïne et latex de caoutchouc d'origine locale, qui semble donner satisfaction.

Nous avons donné quelques chiffres concernant la corrosion métallique. On peut par comparaison avec des formules ayant donné satisfaction dans des climats où l'agressivité est identique, en déduire des compositions pour la protection du matériel ou utiliser celle dont nous avons fait mention.

Ce qui est sans doute plus particulier, c'est l'influence de la date de mise en place du matériau ou du revêtement sur son comportement ultérieur, qui semble se dégager sur divers essais. Il paraît donc très utile de se renseigner sur la particularité climatologique d'un site pour concevoir une protection qu'on effectue à la date optimale pour qu'elle ait toute son efficacité.

On peut souhaiter que d'autres essais soient faits sur du matériel divers, avec plus de précision et surtout que les publications soient faciles à obtenir.