

Titre I

LA CORROSION

DEFINITION, FACTEURS ET METHODES D'ETUDES

I.- LA NOTION DE CORROSION

Lorsqu'un métal ferreux rouille par oxydation ferrique, ou bien qu'un ciment se désagrège par dissolution de la chaux, la notion de corrosion évoque à la fois une transformation du matériau et une perte de matière qui aboutissent à la dégradation et éventuellement à la destruction d'un ouvrage. En première approximation l'on pense aux effets d'actions chimiques. Il en est de même pour le géologue ou le minéralogiste qui observe par exemple l'altération des silicates dans les roches cristallines.

Or comme l'indique l'éthymologie latine (cum rodere) la corrosion est le résultat d'actions concurrentes, complexes, qui exigent en même temps :

- Une affinité du matériau attaqué pour telle modification de son équilibre chimique et de sa structure moléculaire ou atomique;
- Un réactif d'attaque, "substances corrosives", qui peut agir par voie chimique directe mais aussi par ses propriétés physiques;
- Enfin un certain nombre de conditions variables : température, humidité, charges électriques ou encore influences du milieu biologique.

Prenons deux exemples simples :

1 - La corrosion de bétons à ciment Portland

Dans son étude sur l'agressivité des eaux en Guyane, M. THIEBAUD (1) a fait des essais de laboratoire sur deux témoins de béton identiques en poids et en composition, à base de ciment Portland, 315, marque "Hermès", d'une teneur de 66,5% de Ca O.

Ces témoins, grossièrement concassés et introduits, séparément, chacun dans un flacon jaugé, ont été plongés, l'un dans de l'eau distillée (pH = 6), l'autre dans de l'eau de la nappe phréatique (pH = 5,3). Après de courtes agitations, suivies de larges repos, l'équilibre des pH fut atteint à pH 12,15, après 6 jours dans les deux cas.

Les mesures de la chaux dissoute ont montré que l'eau de la nappe présentait sensiblement le même pouvoir dissolvant que l'eau distillée : 4,85% du poids du ciment mis en oeuvre dans le béton.

L'agressivité d'une eau acide, telle qu'on en trouve dans les sols granitiques de Guyane, sur le Portland est donc démontrée. C'est un phénomène chimique simple.

Mais quand on sait que les eaux de mer, ou bien les eaux de marécages littoraux riches en sulfates ou sulfures, tendent à attaquer les ciments riches en chaux, alors interviennent toutes les conditions qui projettent ces eaux sur les ouvrages de surface, ou qui favorisent la pénétration dans les nappes phréatiques de telles eaux agressives pour les ouvrages enterrés. Citons la variation saisonnière des pluies, le coefficient de la marée.

L'action des hommes intervient aussi. Ainsi, lors des travaux de fouille pour les fondations du nouvel hôpital à Cayenne, on a constaté qu'au niveau de la nappe, vers 5 m de profondeur, le sol accusait un pH plus bas que celui de l'eau. Voici ce que M. THIEBAUD (1) en écrit :

" La remontée de l'acidité de l'eau de pH = 5,3 par rapport à celui du sol au même niveau, pH = 4,95, peut s'expliquer par le fait que l'eau se trouve dans le sol à une pression de 200 gr/cm² et qu'au moment de la résurgence il y a probablement un départ de CO₂ libre dû à la détente provoquée par la mise en équilibre des pressions, et peut-être aussi par une différence de température entre celle de l'intérieur du sol et celle de l'air libre."

On voit donc que les réactions chimiques éventuelles sur un ouvrage en ciment dépendent en bonne partie de l'intervention d'actions physiques naturelles ou artificielles.

2 - La corrosion des métaux

M. R. EVANS (2), qui est considéré par les spécialistes comme "le père de l'anticorrosion moderne", s'est

intéressé spécialement à la corrosion des métaux. Voici comment il définit la corrosion : " toute transformation par laquelle un métal passe de l'état élémentaire à celui de combinaison". Il en résulte, selon cet auteur:

- soit une couche, en film croissant en épaisseur, d'oxyde ou de sulfure en atmosphère sèche;
- soit une solution de chlorure ou de sulfate, si le métal est plongé dans un électrolyte contenant les ions Cl ou SO₄.

Il précise que les réactions filmogènes en général se ralentissent avec l'épaississement du film, qui devient ainsi protecteur. Par contre, sans film, les réactions ne se ralentissent que si le réactif s'épuise, d'où la possibilité d'une corrosion croissante si le réactif est renouvelé.

Il va de soi que toute condition qui favorise le renouvellement des ions agressifs dans l'électrolyte, devient ipso facto cause de corrosion.

De plus, A.J. MAURIN (3) indique que lorsqu'un métal est plongé dans un électrolyte, la discontinuité spécifique de la couche limite due aux défauts du revêtement protecteur, à l'hétérogénéité des oxydes etc... constitue un ensemble poreux perméable à l'eau. Il se crée alors une "infinité de couples Volta microscopiques avec des éléments de métal protégé et de métal susceptible." Il en résulte au total une oxydation par effet statistique d'électrolyse.

Les phénomènes chimiques relèvent dès lors de processus électro-chimiques.

C'est la règle dès qu'un métal est en présence d'eau de mer.

Ajoutons ici, pour illustrer notre propos l'exemple d'un cas particulier cité par A.J. MAURIN (3) : la "tuberculation" des ouvrages métalliques à la mer. Il s'agit d'une modification de l'oxydation par l'action d'une symbiose de bactéries aérobies au contact de l'eau et de bactéries anaérobies, sous l'oxyde de fer qui joue le rôle d'un obstacle à la diffusion de l'oxygène.

Des actions complexes du même genre jouent dans la destruction des peintures sur les carènes de navires.

*
* *

Ainsi, mis à part l'oxydation de métaux à l'air sec, cas relativement exceptionnel, et la dissolution simple de la chaux d'un ciment sous l'effet d'une eau acide d'un sol granitique homogène (cas du puits de la maison forestière du Tour de l'Ile), la corrosion est rarement un phénomène uniquement chimique. En simplifiant on peut dire que la corrosion est un phénomène électrochimique ou biochimique et le plus souvent les deux à la fois, surtout en milieu tropical chaud et humide.

En bref il témoigne de l'affinité des métaux à retourner à l'état de minerais et de la chaux des ciments à s'hydrater. Mais les mécanismes de ces transformations sont complexes et dépendent de l'interaction de nombreux facteurs.

II - LES FACTEURS DE CORROSION

Une étude analytique des facteurs de corrosion nécessite une distinction formelle entre les agents d'une part, et les mécanismes d'autre part, avant que de définir les diverses causes de corrosion dont la classification (présentée en III^o partie) résultera du jeu des uns sur les autres, compte tenu du matériau affecté.

1.- Les Agents de Corrosion

Ils sont d'abord d'ordre climatique et plus généralement géographique. Notre problème se situant en zone quasiment équatoriale nous nous bornerons à l'étude des agents climatiques propres à cette zone et aux données de la géographie physique locale puisqu'il s'agit plus précisément de corrosions sur des canalisations enterrées dans la ville ou aux abords de Cayenne.

Ils sont ensuite d'ordre biologique, soit naturels et à ce titre étroitement liés aux agents géographiques, soit artificiels du fait des travaux des hommes, forcément multiples dans une ville.

1.1. Les Facteurs climatiques

1.1.1. L'Humidité

Dans les climats équatoriaux, propices à la croissance de la "forêt de la pluie" (rain forest, des auteurs anglo-saxons) on admet que l'humidité atmosphérique, ou tension de vapeur moyenne, est de 80%. A Cayenne-Rochambeau, la moyenne annuelle serait de 85%.

La nuit, spécialement aux approches du jour, l'atmosphère peut atteindre la saturation.

Dans la journée les valeurs descendent en moyenne vers 65%. A Cayenne-Ville, 60% est une valeur fréquente.

Naturellement, ces valeurs varient avec le cycle saisonnier, sous l'influence de la pluviométrie, de l'insolation, du vent.

Ainsi, des études récentes faites sur l'évaporation à Cayenne (J. FOUGEROUZE 4), montrent deux maxima : l'un durant le "petit été de Mars" (Février, Mars-Avril) en liaison avec les vitesses moyennes maximales de l'Alizé de N.E., même s'il n'y a pas de petite saison sèche sensible; l'autre d'août à novembre, du à la forte insolation de la saison sèche.

Selon M. DARUTY de GRANPRÉ (5) qui s'est intéressé à la tropicalisation des matériels électriques, l'humidité agit sur les matériaux :

- par absorption : tissus, papiers, bois, qui ont des structures fibreuses ou encore matières poreuses ou cellulaires.
- par diffusion directe : certains produits, comme les polyamides.
- par condensation : verre, porcelaine, qui peuvent perdre ainsi de leur rigidité diélectrique.
- enfin par ses variations qui peuvent entraîner des foisonnements de matériaux hygroscopiques ou au contraire des fissurations (cas des vernis d'isolation) qui facilitent la pénétration de l'eau et aussi l'action d'autres agents.

Pour les bétons, écrit KLEINLOGEL (6) : " il est bien connu que dans la majorité des cas, c'est la pénétration de l'humidité qui permet et favorise le développement des processus dangereux. "

1.1.2. - la Pluviosité

Elle intervient aussi directement par l'abondance qui la caractérise en climats chauds et humides.

Nulle part, en Guyane, il ne tombe moins de 2 m. d'eau par an. A Cayenne, il tombe plus de 4 m certaines années et la moyenne annuelle se situe vers 3 m.

La pluie peut agir mécaniquement par flagellation et délavage en même temps, comme cela s'observe sur les briques ou les chaussées en latérite.

J. de JUNNEMANN (7) rappelle que l'eau de pluie, qui contient un peu de CO₂, des traces d'ammoniaque, éventuellement des traces d'acide nitrique (pluie d'orage), est particulièrement agressive sur les bétons frais.

Mais l'alimentation pluviale joue surtout sur celle des nappes du sol. Celles-ci subissent du fait de l'infiltration instantanée et aussi par la variation saisonnière un battement tel que les conditions de l'altération, tant des silicates du sol que des matériaux enterrés par l'Homme, sont alternativement celles d'une hydrolyse ou d'une oxydation.

En outre ces eaux peuvent se charger diverssement en sels. Dans sa zone d'action, l'évaporation peut faire remonter ces sels vers la surface. Pour toutes ces raisons les pH d'un profil du sol peuvent varier de manière très complexe.

Enfin toute variation de l'humidité dans le sol fait varier la conductibilité électrique.

On voit donc que l'humidité, plus encore dans le sol que dans l'atmosphère, préside à l'agressivité tant chimique qu'électro-chimique du milieu.

C'est pourquoi A. KLEINLOGEL (6) pouvait écrire dès 1925 ce conseil au sujet des ouvrages en béton :

" Les nappes et infiltrations douteuses, les eaux d'infiltration et les nappes souterraines doivent être examinées en temps voulu, c'est-à-dire avant le début de la construction, quant à leurs propriétés chimiques, afin de déterminer leur danger ou leur innocuité."

C. RAMBERT (8) rappelle que dans son ouvrage de 1925, A. KLEINLOGEL relevait déjà plus de 1000 facteurs ou influences physico-chimiques touchant à la corrosion des bétons.

1.1. 3. La Température

On sait que les climats équatoriaux se caractérisent par une température moyenne annuelle de 25° et des variations de cette moyenne très faible : quelques degrés - A Cayenne la valeur de 26° peut être retenue.

Les variations diurnes ne dépassent pas 15° . Bien entendu il y a des nuances saisonnières en relation avec la pluviosité. Toutes choses égales par ailleurs les variations sont encore amorties sous couvert forestier.

Les températures des sols dépendent essentiellement de ce couvert forestier. En Guyane par exemple (Renseignement Service Météorologique) on trouve :

- Sous forêt : moyenne de 24° avec minima de 21-22° et maxima toujours inférieurs à 30°
- Sous gazon : moyenne 32°, avec maxima de 45°
- Sol nu : moyenne 35°, avec maxima de 50°

Sol nu et gazon présentent les mêmes minima 25-26°

On voit que le gazon est d'une protection médiocre pour un sol.

Par elle-même la température joue par les phénomènes de dilatation et de contraction. De tels effets, en climat équatorial sont relativement faibles.

En fait elle joue surtout par l'accélération et l'intensification des effets d'autres agents, notamment l'humidité.

1.1. 4. La Rosée

Il s'agit d'une éventuelle corrosion, uniquement atmosphérique, résultant précisément du jeu combiné de la température et de la tension de vapeur d'eau. Elle active surtout l'oxydation des métaux à l'air libre. De ce point de vue, il serait intéressant d'étudier le point de rosée sous forêt, mais on n'a que trop peu de données encore.

1. 2. - Autres facteurs géographiques

Ils sont multiples mais on n'en examinera que deux qui intéressent plus spécialement la Guyane et Cayenne : l'altitude et l'existence d'un littoral marin.

1.2. 1. L'Altitude

Les altitudes modestes rencontrées en Guyane, sauf pour quelques "montagnes" (au plus, 800m) de l'intérieur, n'influent guère sur les températures. Le gradient adiabatique n'est d'aucun intérêt du point de vue qui nous occupe.

Par contre, les influences orographiques sur la répartition des pluies sur le territoire sont très notables.

C'est ainsi que le maximum pluviométrique de la Guyane se localise sur les montagnes de Kaw qui ne dépassent 300 m d'altitude qu'en quelques points. L'isohyète annuelle de 4.200 mm longe la façade Nord de la chaîne orientée parallèlement au littoral, s'étale en losange depuis l'Approague jusqu'à la Rivière Tonégrande et déborde vers le Sud-Ouest, sous le vent des crêtes, pour couvrir le bassin de la Rivière Comana. Il en résulte que la pluviométrie diminue vers le Sud-Ouest dans l'intérieur du pays (effet de continentalité) mais aussi vers le Nord-Ouest le long de la côte, de sorte que Mana et Pointe Isère, aux estuaires communs de la Mana et du Maroni, sont moins arrosées que Maripasoula sur le Haut Maroni.

Inversement la saison sèche est plus marquée sur le littoral, car les pluies n'y sont amenées que par l'Alizé de N.E. humide; tandis que dans l'intérieur l'Alizé de S.E. (sec sur la côte) y est moins sec et relaie pendant la saison sèche l'Alizé humide de N.E.

Du climat plus contrasté des côtes il résulte encore que ce sont les "Terres basses" spécialement au nord des montagnes de Kaw, qui connaissent les plus fortes précipitations enregistrées en 24 heures. Outre le pouvoir érosif de tels abats d'eau, il est évident qu'ils modifient brutalement et localement le jeu de tous les autres facteurs climatiques de la corrosion.

Quant à la ville de Cayenne, relativement abritée de tels excès, sa pluviométrie reste forte, pour une station côtière, en raison des nombreux mornes qui l'entourent.

1.2. 2. L'influence du littoral marin

Pour le cas qui nous occupe elle s'exerce sur trois plans. En premier lieu la région dite de "l'île de Cayenne" est un ancien archipel comaté d'une extrême complexité géologique et sédimentologique. En second lieu cette influence s'exerce à travers les actions de l'air salin et de la salinité de l'eau de mer. Enfin les mouvements de la marée introduisent une donnée mécanique qui joue sur le battement des nappes du sol et sur la chimie de leurs eaux.

Un ancien archipel colmaté : l'existence des Ilets de Remire, la tendance de la barre de vase de la Pointe Acoupa, (embouchure de la Rivière de Kaw) à venir s'y accrocher, montrent aujourd'hui ce que devait être l'archipel Cayennais vers le Quaternaire moyen.

L'échantillonnage lithologique des îles, îlots et écueils d'alors se lit aujourd'hui dans l'extrême diversité des roches qui forment les "mornes" ou collines qui entourent Cayenne (B. CHOUBERT 9)

- diorites et gabbros hyléens du Plateau de Mahury, d'âge précambrien le plus ancien (Pointe de l'Hôpital à Cayenne);
- quartzites et amphibolites de la série métamorphisée dite "de Cayenne" qui forment le Massif de Matoury (le Fort Cépérou)
- migmatites au nord de Bourda et du Montabo (Pte des Amandiers);

- granites guyanais de Montagne Tigre et Carrière du 4^e Km;
- granites plus récents et plus potassiques à la Madeleine;
- Enfin des filons de dolérite, beaucoup plus récents (âge secondaire?) aux Ilets Dupont, à la Pte Buzaret.

Dans la ville de Cayenne des pointements de ces roches affleurent probablement mais l'évolution pédologique les rend méconnaissables tels les latérites des Ilets Malouins (Usine électrique), du Terrain Rebard peut-être, ou encore la cuirasse qui couronne le Mt Baduel.

La sédimentation récente (Quaternaire et actuelle) est encore plus complexe (M. BOYE 10) :

- A l'Eémien (transgression marine de + 10 à 12 m) de puissants cordons littoraux sableux obligent l'Oyac à chercher ses embouchures vers Cayenne, par le Tour de l'Ile. Chaque ile ou ilot est taillé en niveaux soit dans la roche décomposée soit dans les colluvions qui en dérivent. Dans les intervalles la mer redistribue les produits, en sédiments à peine marins puisque leur origine continentale est toute proche (11).
- Au Préflandrien, période de régression de la mer, une violente érosion ravine les dépôts éémiens, mais collines et anciens écueils continuent de déverser leurs colluvions détritiques dans les bas-fonds.
- Au Flandrien (nouvelle transgression de + 5 à 6 m) une sédimentation vaseuse d'un type nouveau et franchement marine dépose les argiles bleues de Demerara qui ennoient le paysage et lui donne à peu près sa configuration actuelle. C'est alors que des bancs de sable régularise la côte d'une ile à l'autre (Cordons de Montjoly, de Susini, de Mirza), tandis que les eaux du fleuve Oyac abandonnent progressivement l'estuaire de Cayenne et se déversent finalement par l'estuaire de Mahury à une date sans doute très récente (Dunkerquien?); en tout cas le chenal du Tour de l'Ile existe encore.
- De nos jours, l'envasement se poursuit mais selon un cycle de 22 ans (11 ans d'envasement - 11 ans de dévasement) en liaison avec l'activité des tâches du Soleil (B. CHOUBERT et M. BOYE 13).

*

* *

..//..

Dans de telles conditions il faut s'attendre à d'infinies variations des textures et compositions chimiques des sols de la région et donc à des variations, souvent sur quelques mètres de distance seulement, des pH et des résistivités. L'imbrication entre sédiments marins et colluvions continentales interstratifiées y ajoute des variations verticales. Les granulométries extrêmement diverses règlent la pénétration des eaux de pluie, comme des eaux de mer actuelles.

On conçoit dès lors que les analyses chimiques des eaux des nappes fournissent des résultats déroutants si l'on se contente de quelques sondages.

Salinité des eaux de mer : Air marin à taux d'humidité voisine de la tension de vapeur saturante, vents chargés d'électrolytes ($\text{NaCl} - \text{Mg Cl}^2$) sont des données valables pour tous les littoraux. R. WALLAEYS (14) précise que ces électrolytes étant hygroscopiques ils activent la corrosion chimique, spécialement l'oxydation des métaux. En outre ces dépôts salins sont presque toujours irréguliers, ils'ajoute donc à la corrosion chimique, une corrosion électro-chimique par piles de concentration d'électrolyte et d'oxygène. C'est pourquoi la rouille imprégnée de sels est un facteur d'oxydation continue; même après séchage elle reprend à des taux d'humidité atmosphérique relativement faibles.

Les embruns projettent assez haut sur les rochers comme sur les ouvrages en béton des sels. La moindre fissure est exploitée et le gonflement des sels, quand ils s'hydratent provoque des brisures qui se totalisent et provoquent une alvéolisation. Des exemples s'observent aux pieds de l'Hôtel du Montabo.

Quant à l'eau de mer elle-même, elle constitue une solution électrolytique idéale. On sait qu'elle contient en moyenne 3,5% de sels, sur lesquels il y a :

10%	de	Mg Cl^2
4%	de	$\text{SO}^4 \text{ Ca}$
76%	de	Na, Cl
7%	de	$\text{SO}^4 \text{ Mg}$
3%	de	sels divers

Précisons ici que les conditions océanographiques, réalisées sur le littoral de Guyane par l'existence du courant marin à la côte (J. LE FLOCH 15), en provenance des bouches de l'Amazone et véhiculant des eaux d'origine fluviale (Amazone et fleuves du versant atlantique du Bouclier Guyanais), offrent au total des eaux de mer peu salées : 25‰ au maximum, 10‰ dans les estuaires, en saison de pluie. Ce sont de telles

eaux qui influent sur les pH et les conductibilités des eaux de la nappe phréatique à Cayenne.

Influence mécanique de la marée : A Cayenne la marée est semi-diurne (2 PM et 2 BM en 24h.50 min.) les marnages de 3 m en grande vive-eau à 0,80m en grande morte-eau. Les réactions piezométriques de la nappe ne sont pas connues avec précision ; il y faudrait un cycle annuel d'observations car la pluviométrie modifie le phénomène selon la saison. Il en résulte que les mesures de pH et de résistivité, faute de séries assez nombreuses, apparaissent souvent contradictoires.

Toutefois, dans le cadre du présent travail forcément préliminaire, les prélèvements faits le 17 Août 1962, en période de coefficients croissants de la marée (marées de vive-eau) dans des forages pratiqués à proximité des caissons P. et T. de l'Avenue De Gaulle, semblent montrer une tendance des pH à augmenter entre la PM du matin et la PM du soir. C'est très sensible au carrefour rue Arago. Mais nous manquons pour avancer une hypothèse, de mesures en période de morte-eau.

En tout état de cause, il est évident que les sols et les ouvrages enterrés ont à subir, du fait du battement bi-quotidien des nappes, des conditions alternatives d'oxydation et d'oxydo-réduction.

C'est ici qu'apparaissent les facteurs biologiques de la corrosion, lorsqu'on envisage les conditions biodynamiques de la fixation des vases à la côte par les formations végétales de mangroves (M. BOYE 17) et le rôle qu'y jouent les bactéries anaérobies, notamment en matière de réduction des sulfates (A. LEVEQUE 18).

1. 3 - Facteurs biologiques

1.3. 1 - Action des insectes et animaux

Des faits comme les dégâts commis par les tarets sur les carènes de navires en bois, ou par des crustacés lithofages sur les roches calcaires, les balanes, par exemple, sont bien connus.

Divers rongeurs peuvent également endommager, surtout les matières organiques, telles que bois, caoutchouc, textiles.

..//..

On cite aussi, spécialement en pays chaud et humide, les déprédations dues aux cafards (ravets) et aux fourmis, qui savent s'attaquer à des récipients de certaines matières plastiques. Les ménagères de Cayenne connaissent bien leurs méfaits.

Plus redoutables encore, sous tous les climats mais spécialement les climats tropicaux, sont les termites. En Guyane on sait que l'activité destructrice des "poux de bois" est un danger considérable pour tous les ouvrages en bois ou agglomérés. Pratiquement les termites ne respectent que les bois créosotés.

Des essais ont été effectués à leur sujet par l'Institut d'Enseignements et de Recherches Tropicales (Centre ORSTOM) à Adiopodoumé en Côte d'Ivoire (Cit Daruty de Grandpré 5), sur la résistance de diverses matières destinées à garnir les câbles électriques souterrains. Il en est résulté que ce sont les matières plastiques synthétiques (chlorure de polyvinyle) qui résistent le mieux aux termites. Le caoutchouc synthétique polychloroprène se comporte un peu moins bien. Par contre le caoutchouc naturel est rapidement détruit quand il n'est pas protégé par un vernis suffisamment résistant.

1.3. 2. Moisissures et Microorganismes

On sait que les champignons inférieurs trouvent les conditions optima de leur germination dans une humidité relative de 90% à 100% et sous une température de 22° à 33°. La Guyane réunit parfaitement ces conditions, tout au moins à la saison des pluies.

Tout ce qui est matière à base de cellulose et certaines résines synthétiques, les colles de caséine ou de gélatine sont des terrains d'élection pour le développement d'une végétation mycelienne.

Presque toutes les matières filmogènes usuelles (selon J.L. RABATE 19) vernis, peintures etc... sont susceptibles d'altération mycotique.

Il en résulte, par exemple pour les isolants des matériels électriques un abaissement de la résistance d'isolement. Les vernis peuvent être détruits dans leur épaisseur par le développement des colonies mycéliennes fibrillaires, ou seulement ternis. Les peintures changent de couleur.

Des moisissures apparaissent aussi sur les surfaces métalliques, sur les verres d'optique, sur les céramiques non émaillées. Nous avons observé à Cayenne sur des pièces de vaisselle ébréchée, un développement spectaculaire des mycelia entre le vernis de surface et la faïence à partir des ébréchures.

Différentes listes d'espèces-types à utiliser pour des essais en laboratoire ont été dressées. Les familles les plus souvent citées sont *Aspergillus* et *Penicillium*.

En ce qui concerne le rôle joué par les bactéries, on connaît toute une série d'espèces aérobies qui fixent le fer ferrique. En Guyane notamment elles sont responsables du brunissement des vases marines bleues dès qu'on les expose à l'air.

Quant aux bactéries anaérobies il est aujourd'hui admis par tous les auteurs comme démontré que les bactéries sulfato-réductrices, comme "*Vibrio désulfuricans*", sont responsables de la corrosion de canalisations métalliques enterrées.

1.3. 3. - Actions anthropiques

L'intervention de l'Homme, comme agent de corrosion n'est que rarement directe et voulue, mais les influences indirectes qu'il exerce en ce domaine sont d'une infinie diversité à la mesure de son ingéniosité et des inadverstances.

Prenons le cas simple de la déforestation pour la mise en culture d'un sol. Tout le monde sait qu'il y a dès lors risque d'érosion mécanique surtout si les pentes s'y prêtent. En climat fortement pluvieux le risque est majoré.

Ce que l'on sait moins, c'est que l'altération physico chimique des silicates du sol y est brusquement accélérée par le micro-climat que l'Homme provoque. On estime que la décomposition des silicates intéressants par leurs alcalins va de 2 à 4 fois plus vite, en climat tropical humide sur sol nu que sous forêt. L'appauvrissement des sols tropicaux qui est le gros problème des agriculteurs de ces pays réside dans cette intervention et le drame est que la dégradation est irréversible, surtout pour les sols granitiques.

Il est évident que les variations de micro-climat ainsi introduites retentissent sur tout ouvrage enterré, surtout à faible profondeur (câbles - canalisations).

Dans une ville, le réseau d'égouts est indispensable. Mais leur manque inévitable d'étanchéité signifie que les eaux polluées et notamment tous les acides organiques qui s'y trouvent ont chance de contaminer la nappe phréatique. En outre, à Cayenne en particulier, le réseau d'égouts n'a pas été étudié en fonction des risques d'invasion d'eau chargées en sulfates et sulfures en provenance des marais au Sud du Canal Laussat sous l'effet de la haute-mer.

Des techniques de progrès, comme la soudure électrique, le transport d'énergie électrique à haute tension, la traction électrique appliquée aux chemins de fer, sont d'un incontestable intérêt. Or ces appareils ou installations émettent dans le sol, parfois même en dépit des précautions prises, des "courants vagabonds" ainsi appelés parce qu'ils varient en intensité, en direction et même dans les trajets qu'ils parcourent. Les dangers qu'ils représentent sont considérables en matière de corrosion électrolytique dans les zones fortement industrialisées.

Ce n'est pas encore le cas de la Guyane, mais ceci nous conduit à considérer les mécanismes de la corrosion qui se ramènent pour l'essentiel, en ce qui regarde les ouvrages enterrés à des phénomènes électrochimiques.

2. Les Mécanismes de la Corrosion

2.1. - La Corrosion chimique

Elle procède soit d'une dissolution simple qui joue au niveau des molécules, soit de l'attaque par des acides ou des bases qui donnent des sels, eux-mêmes corrosifs soit par agressivité chimique, soit par les contraintes mécaniques qu'ils exercent en gonflant. De plus les sels favorisent indirectement la corrosion d'autant plus qu'ils sont solubles.

Elle procède aussi de phénomènes d'oxydation ou d'hydrolyse.

2.1.1. - Acides - Bases - Sels

Nous reprendrons l'exemple des bétons, le plus simple.

Si les bases les plus courantes, soude, potasse, sont pratiquement sans action sur les ciments, qui sont des

complexes basiques, par contre : "tous les acides à l'exception de l'acide phosphorique sont de puissants destructeurs du béton." (cit Ch. RAMBERT - 8)

L'acide sulfurique et l'acide sulfureux sont les plus corrosifs. C'est pourquoi les gaz de combustion et les fumées, notamment celle des locomotives, sont dangereux. L'acide sulfureux qu'il contiennent, combiné avec l'humidité, s'oxyde pour donner des sulfates.

Or les sulfates sont parmi les sels, ceux qui sont le plus redoutables pour ciments et bétons, tout spécialement le sulfate de chaux dont l'action destructrice est très énergique. Une dose de 500 mgr/litre de $SO_4 Ca + 2 H_2O$ peut provoquer la décomposition de la masse de béton (cit. M. THIEBAUT 1).

J. de JUNNEMANN (7) décrit ainsi le mécanisme :

- a - action physico-mécanique, par pénétration dans les pores du béton, et s'il se produit des alternances de recouvrement et d'assèchement, il y a cristallisation des sulfates avec augmentation progressive de volume et éclatement de l'ouvrage.
- b - action physico-chimique, par formation de sulfo-aluminates de chaux, eux aussi gonflants.

De telles cristallisations de sel double, s'effectuent en petits bâtonnets microscopiques en formes d'aiguilles disposées en étoile autour d'un corps de base; d'où le nom de "bacille du ciment" donné à cette maladie du ciment, bien qu'il ne s'agisse aucunement d'une action biologique.

Naturellement cette maladie affecte surtout les ciments type Portland. C'est pourquoi, en présence d'eaux séléniteuses, d'eaux de marais ou d'eaux de mer, on préconise l'emploi de ciments pauvres en chaux et en aluminates tricalciques tels que les ciments sursulfatés ou à base de laitier (ciment au clinker).

Les sulfates de sodium, de potassium, de magnésium, d'ammonium produisent les mêmes effets.

Parmi les chlorures : Sodium, Potassium, Calcium sont inoffensifs en principe quand ils sont purs, mais ils oxydent le fer des bétons. En fait la moindre impureté peut les rendre corrosifs. Ainsi le chlorure de sodium peut rendre un ciment poreux.

...//...

Ce sont les chlorures de magnésium et de fer qui sont les plus agressifs vis-à-vis des ciments riches en chaux. C'est pourquoi les eaux de mer sont redoutables, de par leur composition moyenne en sels. Toutefois la formation de sels insolubles de carbonates de chaux ou de magnésie peut assurer une protection plus ou moins fugaces des ciments, car Na Cl les attaque.

Enfin l'Anhydride carbonique intervient selon les teneurs des eaux en CO_2 libre. En quantité faible il donne des carbonates de chaux insolubles et protecteurs. En excédent il donne au contraire du bicarbonate soluble et devient cause de corrosion.

2.1. 2. - L'oxydation

U.R. EVANS (2) détaille ainsi les mécanismes de l'oxydation :

- A l'air sec - Aux températures ordinaires il n'y a pas de changement apparent du métal, sauf s'il y a présence d'un composé du soufre dans l'air. L'oxydation est très rapide puis se ralentit du fait du film d'oxyde, même imperceptible, qui fait écran à l'oxygène de l'air. L'oxydation ne peut recommencer que s'il y a fissuration du film.
- Oxygène dissout dans l'eau - Sauf pour les métaux alcalins, alcalino-terreux et le thallium, la corrosion est relativement faible en général sur les métaux car leurs oxydes ou hydroxydes sont peu solubles. Mais elle n'est pas négligeable et dépend du métal.
- Sur le plomb, l'eau pure provoque un réseau lâche de beaux cristaux; il n'y a donc pas protection et la corrosion se poursuit.
- Par contre sur le Zinc, le film protecteur est beaucoup plus largement étalé. Toutefois quelques points restent à nu d'où une corrosion en "piqures profondes".
- Pour le Fer, le mécanisme est plus compliqué car l'oxydation comporte deux stades :
 - 1- formation d'hydroxyde ferreux $\text{Fe}(\text{OH})_2$ sur la surface du métal,
 - 2--formation d'hydroxyde ferrique (rouille) à petite distance, là où l'oxygène est plus abondant dans la solution.

Cela tient à ce que $\text{Fe}(\text{OH})_2$ est beaucoup plus soluble que $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - Il ne se forme donc pas de film à la surface du métal et comme l'hydroxyde ferrique n'y adhère pas, son rôle protecteur est nul.

Quant au rôle essentiel que l'oxygène joue dans beaucoup de phénomènes de corrosion, précisons avec P.LACOMBE (20) qu'il peut selon les cas :

- ou bien jouer le rôle d'inhibiteur en oxydant par exemple les ions ferreux en ions ferriques (C'est ce que U.R.EVANS exprime par le mot anglais "déterrent");
- ou bien, au contraire jouer un rôle d'accélérateur de la réaction de corrosion comme agent dépolarisant.

Mais alors on entre dans le domaine de la corrosion électrochimique.

2.1. 3. - L'Hydrolyse

Elle résulte, on le sait, du comportement électrolytique de l'eau faiblement dissociée en ions OH^- et H^+ . Ce sont les conditions de concentration d'une solution en ions H^+ qui sont exprimées par le pH. Autrement dit une eau est d'autant plus acide qu'elle contient plus de (H^+); inversement elle est d'autant plus alcaline qu'elle contient plus de (OH^-).

La constante d'équilibre $K_e = (\text{H}^+) (\text{OH}^-)$ varie en fonction de la température (Loi de Van t'Hoff) qui augmente le coefficient de dissociation. C'est pourquoi l'efficacité de l'hydrolyse double pour une élévation de température de 10° .

De fait l'hydrolyse consiste en une substitution d'ions H^+ aux cations des édifices cristallins.

C'est ce qui se passe dans la dissolution du ciment par l'eau distillée. De manière plus complexe c'est ce qui produit l'effondrement des silicates des roches cristallines. L'échange d'ions rompt les liaisons cationiques entre édifices polyédriques en SiO_4 et AlO_4 notamment, qui passent en solution de même que les ions alcalins. A son tour la plus grande ionisation suractive l'action des bases et des acides (cf. G. ROUGERIE 21). Au niveau du front d'attaque des roches les solutions s'alcalinisent, mais un lessivage soit oblique, soit par dépression de la nappe, rétablit l'acidité. Il en résulte un jeu très variable du pH.

Il en est de même pour certains vernis ou matières plastiques (cit. DARUTY de GRANPRE 5) que l'hydrolyse ramollit ou même décompose. Il en résulte souvent une élévation de l'acidité qui entraîne à son tour des corrosions.

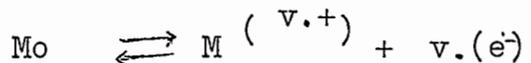
Dans tous les cas on se trouve de nouveau en présence de mécanismes à caractère électrochimique qui jouent à l'échelle ionique.

2. 2. - La corrosion électrochimique

Elle est particulièrement claire dans le cas des métaux.

2.2. 1 - Principes Généraux

" Si l'on met en contact un métal homogène avec une phase liquide ionique elle-même parfaitement homogène tout au long de la surface métal-liquide, écrit R. WALLAEYS (14), le métal a tendance à émettre des ions positifs passant en solution". Il reste alors chargé négativement par ses électrons, dont la charge même tend à s'opposer à l'éloignement des ions positifs. Il s'établit donc un équilibre entre le métal, ses ions et ses électrons. D'après A.J. MAURIN (3) le phénomène peut s'écrire :



M_o étant une électrode d'un métal de valence " v " et polarisée, (e^-) représentant les électrons.

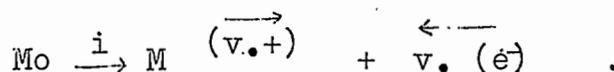
Ce sont les $v \cdot$ charges (+) qui s'opposent aux départ des cathions, lesquels restent adsorbés contre le métal. Et c'est la présence de la couche double électrons/ions à l'interface métal/solution qui crée un potentiel entre le métal et l'électrolyte dit "potentiel d'électrode".

Si un déséquilibre, quelle qu'en soit la cause, amène de nouvelles charges électronégatives, il provoque la libération des cathions qui migrent en accord avec la Loi de Faraday. Sous l'action du courant électrique, M_o perd de la matière : il y a corrosion.

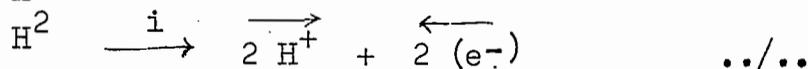
C'est ce qui permet à A.J. MAURIN de définir l'"anode" comme : " ... l'élément corrodé d'un quelconque couple de corrosion et qui tend à capter les électrons."

Cette corrosion demeure stable pour autant que le flux d'électrons se maintient et chaque nouvelle charge $v \cdot (e^-)$ élémentaire libère $M (v \cdot +)$ cathions.

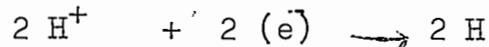
Sous l'action d'un courant "i" le vecteur \vec{i} figure le sens de la migration des éléments en jeu; le phénomène s'écrit



A.J. MAURIN (3) ajoute qu'un schéma identique gouverne la migration des ions H^+



R. WALLAEYS (14) fait observer que le potentiel d'électrode du métal attire l'ion H^+ de la solution qui vient se décharger sur le métal, suivant le schéma



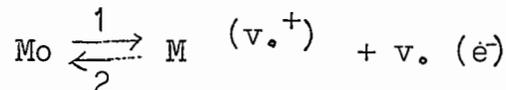
Il arrive que cet hydrogène atomique puisse diffuser à l'intérieur du métal, mais la plus grande partie se combine en hydrogène moléculaire $2 H \rightarrow H_2$, que l'on voit se dégager.

Ainsi R. WALLAEYS fait remarquer : "on voit apparaître ici l'influence du pH ... et l'on comprend que plus la solution sera acide, plus l'attaque sera forte, en accord avec la loi de déplacement de l'équilibre. Elle sera aussi plus rapide parce que le renouvellement d'ion d'hydrogène disponibles au contact du métal sera plus rapide."

C'est pourquoi (cit. P. LACOMBE 20) la plupart des métaux usuels se comportent très différemment selon la chimie des eaux naturelles. Ainsi des eaux fluviales très "dures" c'est-à-dire chargées en calcaire sont moins corrosives pour le fer que des eaux très pures dites "granitiques".

*
* * *

En résumé si l'on écrit l'équilibre sous la forme générale



toute cause qui déplacera l'équilibre dans le sens $\overset{1}{\rightarrow}$ provoquera une corrosion; inversement toute tendance au déplacement dans le sens $\overset{2}{\leftarrow}$ arrêtera la corrosion.

2. 2. 2. Domaines et diagrammes de corrosion

Selon CHAUDRON (cit. J. CHANGARNIER 22), un métal plongé dans un électrolyte peut donc prendre trois états appelés "domaines" :

a - domaine de "passivation" : le métal a un potentiel plus positif que le potentiel de corrosion; il se couvre d'une couche d'oxyde; si elle est uniforme, non poreuse et adhérente, les électrons sont arrêtés et le métal est protégé.

C'est ce qui se produit par exemple (Cit. R. WALLAEYS 14) lorsque le fer ou les aciers inoxydables sont plongés dans une solution concentrée d'acide nitrique et se recouvrent d'une mince pellicule d'oxyde qui arrête l'attaque et confère au métal une résistance à différentes solutions.

b - domaine de "passivité" = Le métal a un potentiel plus négatif que le potentiel de corrosion; il y a alors apport d'électrons à la surface du métal, une gaine continue d'hydrogène s'y forme alors et la dissolution du métal est arrêté.

c - Entre les deux, se trouve de domaine de "corrosion".

Les limites de ces domaines dépendent des potentiels d'électrode (chaque métal a son potentiel normal d'électrode) et du pH de l'électrolyte. Des auteurs comme POURBAIX (23) et A.J. MAURIN (3) ont été conduits à dresser des "diagrammes" de corrosion, par métal. Finalement prévoir l'agressivité d'un électrolyte pour un métal, c'est mesurer le paramètre E (potentiel d'électrode) et le pH.

Des diagrammes du fer et du plomb, par exemple (cit CHANGARNIER 22) on tire les enseignements suivants :

a - Fer : La passivité, en eau pure, est obtenue pour $E = -0,61$ volt (électrode à l'hydrogène) ou $-0,85$ volt (électrode Cu/SO_4Cu).

Pour des pH très alcalins, supérieurs à 12, le fer devient anode et il se forme des ferrites ou des ferrates instables et solubles. Il peut donc y avoir corrosion.

Dans l'eau de mer, riche en ions Cl^- , la passivité est obtenue à des valeurs de potentiel plus négatives ($-0,9$ volts - Cu/SO_4Cu). Cela tient à ce que les ions Cl^- sont dépolarisants, en se combinant avec l'Hydrogène, ils exigent un apport supplémentaire d'électrons pour que la passivité soit atteinte.

b - Plomb : les potentiels d'électrodes influent plus que les pH :

- Pour des potentiels très électropositifs, le plomb pourra être passivé par un film de PbO_2 ,

- En dessous, il y a protection cathodique avec dégagement d'hydrogène;

- Enfin, pour des potentiels encore plus négatifs, il peut se trouver une zone de corrosion cathodique avec formation de plomb métallique finement divisé et un important dégagement d'hydrogène.

.../...

2.2. 3. - La Protection Cathodique

De ces considérations découle le principe de la lutte contre la corrosion par la méthode dite "protection cathodique". Elle consiste essentiellement à imposer à un métal enterré qu'il faut préserver, un potentiel au moins égal à celui de la passivité.

Pratiquement, il en résulte deux grandes catégories de systèmes de protection cathodique (cit. CHANGARNIER - 22).

- a - Protection galvanique par "anode soluble" : Une canalisation métallique enterrée sera protégée si elle est reliée électriquement à un autre métal moins noble, c'est-à-dire avec un potentiel de dissolution plus bas. Ce dernier se corrodera en fournissant un certain ampérage qui assure au métal à protéger les qualités de cathode.

Cette méthode est classiquement employée pour protéger les ouvrages à la mer, les carènes des navires etc..

- b - Protection par "soutirage de courant" : le pôle négatif d'une source de courant continu auxiliaire est relié à la canalisation à protéger, tandis que le pôle positif est relié à une anode en métal ou en graphite, enterrée à une certaine distance. Ce courant partant de l'anode à travers le sol est admis par la canalisation, rendue ainsi cathodique vis-à-vis du sol. La corrosion est répartie sur l'anode artificielle.

Cette méthode est notamment utilisée pour la protection des armatures de béton armé. J. CHANGARNIER indique que les densités de courant à soutirer sont de l'ordre de 1mA au m^2 - Il faut donc que la continuité électrique de tout le ferrailage du béton soit parfaitement assurée et que les anodes ou prises de terre soient enterrées dans un milieu parfaitement en contact avec la structure du béton. Il y a d'ailleurs un risque à éviter, c'est que l'alcalinisation qui se développe autour de la cathode n'amène le métal dans le domaine de corrosion des pH très alcalins.

2.2. 4. - Notions de Corrosion chimique et Corrosion électrochimique

Suivant les auteurs le vocabulaire varie selon qu'ils mettent l'accent sur les mécanismes électrolytiques en jeu ou sur le type de résultat atteint.

../..

R. WALLAEYS (14) par exemple désigne par "Corrosion chimique" celle qui : "... est caractérisée par une attaque pratiquement régulière de toute la surface métallique en contact avec le liquide. On peut considérer que le métal comporte en surface des zones anodiques et cathodiques qui voisinent à l'échelle atomique." L'auteur explique que le jeu des départs d'ions métalliques en solution, laissant derrière eux des électrons excédentaires d'une part, et des décharges d'ions H^+ sur les zones cathodiques d'autre part, provoque une : "..... interversion continuelle des polarités, qui explique l'attaque très régulière du métal."

C'est en définitive ce caractère de régularité de l'attaque qui définirait selon cet auteur la "corrosion chimique" d'un métal.

Par suite, toujours selon R. WALLAEYS, la "Corrosion électrochimique" concerne l'attaque irrégulière des métaux par les liquides ioniques. "Cette irrégularité est due à l'existence de piles localisées sur l'intersurface métal/liquide à l'échelle microscopique, comme à l'échelle macroscopique et qui activent la corrosion chimique (c'est nous qui soulignons) par les courants électriques qu'elles entretiennent."

Comment naissent ces piles ? Elles sont dues soit à une hétérogénéité du matériau attaqué, soit à une hétérogénéité du liquide ionique.

C'est que A.J. MAURIN (3) définit comme "auto-corrosion" lorsque seule la résistance intérieure d'une pile volta est en cause.

Si de plus, l'énergie d'une source extérieure au système, apporte une charge électrique (-) capable de rendre le métal anodique, on a alors "allocalcorrosion" soit provoquée, soit accidentelle (par exemple sous l'action de courants vagabonds), mais toujours artificielle.

Ces distinctions, apparamment subtiles, permettent précisément de dresser une classification des causes de la corrosion.

III .- LES CAUSES DE CORROSION

On distinguera essentiellement deux grandes classes selon qu'il y a hétérogénéité du matériau ou bien du milieu ambiant fonctionnant comme électrolyte, sans dissimuler que le plus souvent les deux données interfèrent. C'est pourquoi nous traiterons à part la corrosion biochimique et l'action des courants vagabonds.

1 - Les cas d'hétérogénéité liée au matériau

En réalité le jeu des facteurs et des mécanismes, qui provoquent une corrosion, dépend de la nature du matériau et donc des préparations que l'Homme lui fait subir. Il faudrait autant de classifications que de grands types de matériau : bétons, métaux, matières organiques et plastiques etc...

1.1. - L'action de l'eau sur les bétons

L'action corrosive de l'eau, sous toutes ses formes (états physiques, compositions chimiques) sur un béton dépend avant tout des possibilités qu'elle a de pénétrer dans la masse. Granulométries mal étudiées, défauts de la compacité au moment de la confection, durcissement insuffisant ou trop rapide, éléments du ferrailage mal enrobés, en somme toute raison qui entraîne porosité ou fissuration devient cause de corrosion.

Le rôle de l'eau commence dès le gâchage. A ce stade les eaux très peu chargées (de pluies, de puits, de rivières) sont les meilleures. Par contre sont à proscrire selon J. de JUNNEMANN (7) :

- les eaux de marécage, à cause des sulfates et sulfures et aussi de la présence d'acide humique qui enroberait les agrégats du béton d'un film d'humates colloïdaux noirâtres et visqueux, cause de porosité et en tout cas susceptible d'une chute de résistance du béton jusqu'à 50% pour quelques % seulement d'acide humique.
- les eaux minérales et thermales, en raison de leur teneur en CO_2 en excès (formation de bicarbonates très solubles) qui provoquerait une porosité.
- les eaux séléniteuses, en raison de l'action des sulfates (gonflement par les sulfo-aluminates) cause de fissuration.

../..

Ces actions sont évidemment beaucoup moins à redouter sur les ciments de laitier, sursulfatés, de trass ou de pouzzolane.

Les techniques de compactage (vibrage, précontrainte) sont destinées à éviter dans la mesure du possible porosité et fissuration.

Le temps de durcissement doit, en dépit de quelques inconvénients, surtout sous climats pluvieux, être suffisamment long pour permettre aux phénomènes de retrait, responsables des fissurations, de se stabiliser. A ce sujet les constructeurs savent que l'on peut admettre une certaine fissuration en raison de phénomènes d'autocicatrisation spontanée par colmatage des fissures du fait de cristallisations à partir de solutions saturées d'hydrate de calcium.

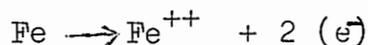
Enfin, dans la "vie" d'un béton, l'action des acides est pratiquement imparable lorsque le ciment est riche en chaux, encore faut-il que l'eau les véhicule dans la masse. A cet égard même en l'absence de porosité et de fissuration, condition idéale jamais complètement réalisée, un enrobage insuffisant du ferrailage d'un béton armé permet l'oxydation des fers, elle même gonflante et en tout cas, ouvre une brèche à la pénétration de l'eau.

1.2. - Les couples galvaniques

Le cas le plus simple est celui de la corrosion d'un métal aux fissures.

1.2. 1 - Corrosion aux fissures

U.R. EVANS (2) a indiqué dans le cas d'une plaque de fer, immergé dans une solution de chlorure de sodium oxygénée, qu'il se forme une croûte relativement épaisse d'oxyde ferrique, en contact d'autant plus étroit avec le métal que l'oxygénation de la solution est élevée. L'oxyde peut devenir protecteur par passivation; mais il se dépose irrégulièrement et pour peu qu'une lacune existe, par exemple par abrasion, cavitation ou du fait de vibrations, la croûte devient cathode et le fer dénudé devient une anode qui se corrode en donnant :



c'est-à-dire une solution sans fin d'ions ferreux qui se combinent avec Cl^- pour donner un chlorure ferreux. Le produit cathodique est Na OH .

Or NaOH et FeCl_2 sont très solubles, la réaction continue du fait du courant et la corrosion électrochimique est plus grave que l'oxydation directe, d'autant plus qu'elle est localisée.

../...

1.2. 2. Couples bi-métalliques

Le schéma est le même si deux métaux sont plongés dans le même électrolyte. R. WALLAEYS (14) prend le cas d'un barreau Zinc, Cuivre. Zn ayant une tension de dissolution plus forte que Cu il émettra dans la solution une quantité supérieure d'ions et sa surface deviendra anode. Cu, au contraire, deviendra cathode et des ions Na se déchargeront sur lui. A l'intérieur du barreau il y aura par suite transport d'électrons du Zn au Cu. Ainsi la réaction ne s'arrêtera qu'avec l'épuisement du zinc, sauf s'il y a arrêt de l'attaque par polarisation due à l'hydrogène à l'état adsorbé. Mais, en ce cas la moindre présence d'oxygène relancera l'attaque par dépolarisation. Cela dépendra du potentiel d'oxydo-réduction de l'électrolyte.

On sait que les métaux ont été classés en série "électrochimique" suivant leur potentiel d'électrode normale. Les métaux "nobles" ont un potentiel d'équilibre électropositif par rapport à l'hydrogène; les métaux les plus corrodables ont un potentiel d'équilibre électronégatif.

Deux métaux de potentiels d'équilibre différents forment donc une pile et le métal anodique se corrode.

De tels couples sont fréquents, par exemple, pour les navires à coques métalliques, l'opposition entre métaux ferreux et pièces en bronze (hélice, arbre, appareils de gouverne) - J. CHANGARNIER (22) cite les réseaux de distribution de propane à canalisations principales en acier et branchements d'abonnés en cuivre qui forment cathode par rapport à l'acier. Dans les canalisations d'eau enterrées en fonte avec boulonnage acier, le couple fer/fonte fonctionne au détriment des boulons d'acier.

Les cas de ce genre sont hautement justiciables de la protection cathodique par anode perdue.

1.3. - Les Causes métallurgiques

P. LACOMBE (20) insiste sur le fait qu'un alliage peut voir son état structural modifié par le temps ou les traitements thermiques subis.

Par exemple un acier inoxydable type 18/8 (fer chrome-nickel) "hypertrempé" c'est-à-dire traité à 1.100° environ, puis trempé modérément à température ambiante, présente une structure microscopique analogue à celle du métal pur. Sa résistance à la corrosion est alors maxima.

Mais si l'état hypere trempé est partiellement détruit par un traitement de "revenu" entre 600 et 900°, l'acier devient sensible à la corrosion intergranulaire, c'est-à-dire à une véritable décohésion. Il se produit en effet une précipitation préférentielle de carbone dans les joints de grains de l'acier et corrélativement la teneur en chrome s'y appauvrit. Le centre du cristal devient cathode et le joint de grain chargé en carbure Cr₄C devient anode. La corrosion anodique y est d'autant plus sévère que la surface de l'anode, un fin liseré, est très petite par rapport à la surface des cathodes voisines.

La corrosion en ce cas est bien de mécanisme électrochimique mais la raison en est avant tout d'ordre métallurgique. Observons qu'en ce qui concerne le plomb, ces faits ne jouent pas, car le métal est systématiquement recuit.

1. 4. - Les Causes mécaniques

P. LACOMBE (20) cite un autre cas de corrosion intergranulaire dont la cause originelle est d'ordre mécanique. C'est le "Season-cracking" des laitons 70-30 (70% Cu, 30% Zn) où l'action combinée de fortes tensions internes dues à un écrouissage à froid et de vapeurs ammoniacales (exemple des douilles de laiton, stockées dans un parc d'artillerie à proximité d'écuries, favorise de manière spectaculaire la corrosion intergranulaire.

J. CHAUVIN (24) note à ce sujet : "qu'un solide métallique n'est pas formé d'un monocristal mais de "grains", La disposition régulière des atomes n'est respectée qu'à l'intérieur du grain. Mais aux limites intergranulaires les atomes sont à un niveau énergétique plus élevé que celui des atomes constituant le métal parfait, car ils sont à des distances interatomiques supérieures aux distances d'équilibre. Par suite, l'énergie à dépenser lors d'une action de corrosion sera plus faible là où le niveau énergétique est le plus élevé. C'est pourquoi lorsqu'un métal est déformé à une température telle que la recristallisation soit impossible, des désordres se produisent qui augmentent le niveau énergétique et donc facilitent la corrosion. Précisons que des phénomènes de ce genre ne sont pas à craindre pour le plomb qui n'a pas de limite d'élasticité.

2 - Les cas d'hétérogénéité liée à l'électrolyte.

Nous en avons déjà donné un exemple, en corrosion atmosphérique, dans l'inégale répartition des électrolytes d'origine marine projetés avec les embruns.

Nous examinerons les deux causes les plus fréquentes l'aération différentielle et l'effet "pile géologique".

2.1. - L'Aération différentielle

U.R. EVANS (2) a démontré que si deux électrodes équipotentielles d'un même métal sont plongées dans une pile cloisonnée contenant un même électrolyte et si l'on aère l'un des compartiments par barbotage, l'électrode de ce compartiment devient cathode, tandis que l'autre devient anode et se corrode.

C'est ce qui se passe dans le cas d'attaque d'une plaque de fer par une goutte de pluie : la partie couverte devient anode et se corrode en "nid" tandis que la périphérie reste cathode.

En somme tout phénomène physique qui permet à l'oxygène d'arriver plus facilement au contact d'un métal, favorise la corrosion anodique des parties les moins aérées. Naturellement l'importance de l'attaque est fonction de la conductibilité de l'électrolyte qui baigne le métal. Mais elle est aussi fonction du rapport des surfaces anodiques et cathodiques.

De tels "courants d'aération différentielle" selon l'expression d'EVANS se produisent fréquemment. L'auteur cite la corrosion aux recoins, là où des corps non conducteurs (verre - pierre - tissus) appuient sur un métal : il y a attaque anodique là où l'oxygène parvient le moins bien.

A cet égard la corrosion des charpentes métalliques par oxydation est aggravée par un effet mécanique de "coin" entre les pièces car l'oxyde de fer occupe un volume très supérieur à celui de l'acier détruit pour le produire.

Sur les ouvrages enterrés, par exemple dans une zone sableuse de granulométrie homométrique soumise aux battements de la nappe dus à la marée (c'est souvent le cas à Cayenne) les variations d'aération peuvent engendrer des changements de polarité.

Plus généralement sur les canalisations une aération différentielle a pour origine un défaut du revêtement protecteur.

En outre lorsque un métal a commencé à s'oxyder il en résulte à la surface des petites variations topographiques qui suffisent à déclencher une corrosion anodique des creux par rapport aux bosses.

../..

2. 2. Les Piles Géologiques

L'effet "pile géologique" est lié à la Loi de Coehn (cit A.J. MAURIN (3)) : " Si deux corps différents sont en contact intime, celui qui présente la plus forte constante diélectrique est électropositif vis-à-vis de l'autre."

Si l'on admet les valeurs moyennes suivantes :

eau du sol;	constante dielectrique	:	environ	80
sol sec ;	"	"	"	1
Canalisation souterraine (sous revêtement)	"	"	"	4

On voit qu'une canalisation en sol humide est électro-négative et forme l'anode de la pile géologique; au contraire en sol sec elle forme cathode.

Si donc une canalisation passe à travers des formations géologiques très différentes (cas des pipe-lines, des adductions d'eau, cas du projet de canalisations téléphoniques sur l'axe "Banlieue Sud") il se crée tout au long une alternance de zones cathodique et anodiques. Ces dernières connaîtront une corrosion d'autant plus intense que leurs surfaces sont petites. C'est ce qui se passe au franchissement de zones argileuses étroites, par exemple une vallée.

A cet égard l'extraordinaire morcellement des formations géologiques et pédologiques qui portent la ville de Cayenne, y est l'une des causes les plus probables de corrosion de toute canalisation.

Toutefois les dégâts les plus considérables s'observent sur des canalisations à longues sections en terrain sec (sections cathodiques) suivies de sections courtes en terrain humide (section anodique). Dans la canalisation il circule un courant dit de "longue ligne" (cit. J. CHANGARNIER, 22) de sections cathodiques en sections anodiques. On a pu enregistrer des courants de 100 mA. Sur du fer, un tel courant débitant pendant 1 an peut dissoudre près de 100 cm³ de fer.

En fait l'"effet pile géologique" s'ajoute à bien d'autres causes et notamment à la corrosion bactérienne.

3, La Corrosion bactérienne

J. RABATE (19) précise ainsi le mode d'intervention des bactéries .

..//..

- Action directe : sous certaines conditions de prolifération, elles donnent naissance à des composés réactifs corrosifs (acides carbonique, sulfhydrique, acides organiques) ou bien elles occasionnent par leur rassemblement en colonies suffisamment compactes des distributions inégales de potentiel électrique, avec répartition irrégulière de plages anodiques et cathodiques.

- Action indirecte : leur métabolisme engendre des substances organiques qui interviennent comme dépolarisants ou catalyseurs des réactions de corrosion.

Cela semble bien le cas dans la corrosion anaérobie des métaux par les bactéries sulfato-réductrices qui affectionnent les terrains argileux et spécialement les sols marécageux ou de mangrove. Elles utilisent l'hydrogène pour réduire les sulfates en sulfures. Par suite elles produisent de l'oxygène, lequel par dépolarisation cathodique provoque l'attaque électrochimique du métal, notamment des fontes.

En dépolarisant le système électrochimique elles permettent à la corrosion de se poursuivre jusqu'à épuisement des sulfates.

Il va de soi que si un phénomène physique comme la marée réalimente le milieu en sulfates, la corrosion biochimique peut être indéfinie.

Il se pourrait donc bien qu'à Cayenne, leur action directe et indirecte (acides organiques et dépolarisation) y soit une cause fondamentale de corrosion sur tout ouvrage enterré.

4 - La corrosion due aux "Courants Vagabonds"

Le qualificatif de "vagabonds" tient non seulement à leurs tracés souvent inattendus et parfois difficiles à déceler, mais aussi au caractère épisodique des causes qui engendrent ces courants.

" Lorsqu'il sont dérivés de voies ferrées par exemple, ils se déplacent avec les motrices qui leur donnent naissance, écrit B. HEUZE (25), et leur valeur dépend de la charge de celles-ci, ainsi que de l'équilibre général du réseau."

Ils empruntent volontiers tout ce qui est canalisation métallique, enveloppes de câbles électriques et téléphoniques, charpente métallique et même les ferraillements de béton mal isolés.

../..

Ils ont naturellement tendance à retourner vers le pôle négatif des sources d'énergie qui les engendrent.

Ce n'est donc pas leur entrée ou leur circulation dans un ouvrage enterré qui est dangereuse, mais au contraire la sortie dans le sol. Celui-ci par son humidité et les sels qu'il peut contenir est électro-négatif vis-à-vis du conducteur emprunté qui devient anode. La corrosion électrolytique peut alors être très sévère, d'autant plus sévère que la sortie de courant est plus localisée. C'est ce qui se passe pour une canalisation qui recoupe une voie ferrée à proximité d'une sous-station.

B. HEUZÉ donne à titre indicatif les estimations suivantes :

- Electrolyse de l'acier : 10 Kg / ampère/au
- " du plomb : 30 " " "

A cet égard il précise que le courant alternatif est environ 1000 fois moins dangereux que le courant continu. Mais il indique que des effets de redressement, donnant une composante continue peuvent être provoqués par les oxydes qu'un courant alternatif rencontre à la surface d'une canalisation.

Les procédés de protection sont de deux types : les uns "passifs" en ce qu'ils limitent ou même annulent les courants qui empruntent les ouvrages; les autres "actifs" en ce qu'ils consistent à neutraliser les courants vagabonds par des courants de signe contraire dans les zones mises en danger.

A la première catégorie appartiennent les "revêtements" à forte valeur diélectrique (par ex. brai de houille armé de tissu de verre); les "déversoirs de courant" autrement dit des prises de terre; les "joints isolants" (par ex. ceux utilisés pour rompre la continuité électrique des gaines en plomb des câbles électrique ou téléphoniques). Mais il y a des dangers si ces procédés sont mal employés. Ainsi un revêtement appliqué uniquement dans la zone électrolysée aura pour effet paradoxal de limiter le nombre des sorties de courant et donc d'accroître la rapidité d'attaque.

Quant aux déversoirs de courant il faut leur assurer une résistance de terre bien inférieure à celle qui limite les échanges entre le conducteur et le sol (quelques centièmes d'ohm). Il faut placer un déversoir à la sortie du courant, mais comme il se déplace de manière capricieuse, le choix est délicat et un déversoir mal placé peut même à son tour capter d'autres courants vagabonds.

- A la deuxième catégorie se rattachent divers dispositifs de "drainage polarisé" ou de "soutirage de courant" qui permettent, par un conducteur électrique interposé, le retour des courants vagabonds vers leur pôle d'attraction.

La mise en place de tels dispositifs demande des études préalables très soigneuses, notamment des mesures du courant qui circule dans les canalisations à protéger, sur potentiel par rapport au sol, la résistivité du sol. Comme il s'agit de courants épisodiques il faut effectuer ces mesures sur appareils enregistreurs de manière à avoir des séries statistiquement interprétables. De telles études demandent du temps et des moyens techniques assez considérables.

C o n c l u s i o n s

Il n'était pas question dans une mise au point sur les principaux aspects de la corrosion, ni de faire un recensement complet de toutes les causes possibles, ni de traiter de manière exhaustive la question et spécialement des moyens de lutte contre la corrosion.

On a surtout voulu montrer la grande complexité des agents et mécanismes mis en jeu, dans un phénomène de destruction qui est synthétique, surtout lorsqu'il s'agit d'ouvrages enterrés.

Si l'on y ajoute le problème de la protection des gaines de plomb des câbles téléphoniques, qui fait partie des préoccupations de l'Administration des Postes et Télécommunications à Cayenne, on peut dire que dans cette ville, à l'exception peut-être des corrosions dues aux courants vagabonds, sont réunies à peu près toutes les conditions requises pour une agressivité maximale des sols et des eaux du sol.

C'est ce que vont montrer les rapports qui suivent (titres II à IV). C'est aussi la raison pour laquelle nous joignons au dossier un exemplaire des "Recommandations concernant la protection des câbles souterrains contre la corrosion" présentées à New-Delhi en 1960, sous l'égide du Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique (C.C.I.T.T.) et publié en 1961 par le Secrétariat Général de l'U.I.T., Palais Wilson à Genève.

M. BOYÉ

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1.- THIEBAUD (M.) : Etude qualitative des eaux de la Guyane (agressivité des eaux). - Rapport dactylographié inédit - IFAT - Cayenne 1961.
- 2.- EVANS (U.R.) : Précis de corrosion - Dunod, Paris, 1952.
- 3.- MAURIN (A.J.) : Manuel d'anticorrosion, 2 T. - Eyrolles, Paris 1961-et 1962.
- 4.- FOUGEROUZE (J.) De divers éléments du climat en Guyane Française. Météo Nale. Gr. Antilles-Guyane, sous-région Guyane-Inini - Rapport ronéo - Mars 1961 - Cayenne.
5. - DARUTY
de GRANDPRE(M) Le matériel compte tenu des conditions climatiques, Journées Intern. de l'électricité dans les pays tropicaux, Commission du matériel, Rap. Gal., Mai 1956, Musée Guimet, Paris.
6. - KLEINLOGEL(A.) Einflüsse auf Beton - Erst & Sohn - Berlin, 1925
- 7.- DE JUNNEMANN(J) Comportement du ciment en contact avec différents composés chimiques.- Cahiers Centre Scient. et Techn. du bâtiment, n° 52, Octobre 1961 - Paris.
- 8.- RAMBERT (Ch.) Les altérations du béton.- Centre d'information et de documentation du bâtiment, Bull. mensuel Mai 1961, Paris.
- 9.- CHOUBERT (B.) Feuille de Cayenne, Carte géologique dét. de la France et du dépt de la Guyane, échelle 1/100.000è, Ministère Commerce et Industrie - Impr. Nale, Paris 1956
- 10.- BOYÉ (M.) New data on the coastal sedimentary formations in French Guiana.- Fifth Geolog. Conf. Georgetown, Oct-Nov. 1959, Proceedings, Geol. Sarvey, Georgetown 1962.
- 11.- TRAVAUX DE SEDIMENTOLOGIE, au sujet de puits creusés par le Service Militaire Adapté à la Montagne Tigre. Inédit. Rapp. I.F.A.T., Cayenne 1962.

- 12.- TRAVAUX DE SEDIMENTOLOGIE sur les puits d'essai de Montjoly (Recherches d'eau pour l'alimentation de la ville de Cayenne) En préparation - I.F.A.T - Cayenne.
- 13.- CHOUBERT (B.)
et BOYE (M.) Envasements et dévasements du littoral en Guyane Française.- C.R. Ac.Sc. T 249, p. 145-47, Paris 1959
- 14.- WALLAEYS (R.) Des phénomènes de corrosion en phases gazeuse, liquide et atmosphérique. Cours post-universitaires de form. prof. des Cadres. Centre de la lutte contre la corrosion. Publ. Sté Chimie Industr, 28 rue St Dominique, Paris.
- 15.- LE FLOCH (J.) Esquisse de la structure hydrologique au large de la Guyane et de l'embouchure de l'Amazone.- Bull. C.O.E.C., VII, 10, 1955.
- 16.- LAFOND (R.L.) Laboratoire Central d'Hydraulique - Mission 1953 - Fasc. G. Sédimentologie. Rapport B.C.E.O.M. 1954
- 17.- BOYE (M.) Les palétuviers du littoral de la Guyane Française, ressources et problèmes d'exploitation.- Cahiers d'Outre-Mer. T. XV, p. 271-290. Bordeaux 1962.
- 18.- LEVEQUE (A.) Mémoire explicatif de la Carte des sols de Terres basses de Guyane Française. Mém. O.R.S.T.O.M. n° 3, 88 p. Paris 1962.
- 19.- RABATÉ (J.L.) La tropicalisation : vernis et peintures pour climats tropicaux humides.- Cours post-universitaires de form. prof. des cadres. Centre de la lutte contre la corrosion. Publ. Sté Chimie Industr. Paris.
- 20.- LACOMBE (P.) Les bases et les facteurs de la corrosion des métaux.- Cours post-universitaires de form. prof. de cadres. Centre de la lutte contre la corrosion. Publ. Sté
- 21.- ROUGERIE (G.) Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire forestière.- Mém. n° 58 I.F.A.N. - Dakar 1960.

- 22.- CHANGARNIER (J.) Protection cathodique des canalisations enterrées.- Cours post-universitaires de form. prof. des cadres, Centre de la lutte contre la corrosion. Publ. Sté Chimie Industr. Paris.
- 23.- POURBAIX Thermodynamique des solutions aqueuses diluées. Béranger - Paris-Liège.
- 24.- CHAUVIN (J.) Le plomb dans la protection contre la corrosion. Cours post-universitaires de form. prof. des Cadres. Centre de la lutte contre la corrosion. Publ. Sté Chimie Industr. Paris.
- 25.- HEUZÉ (B.) Physionomie des courants vagabonds et moyens de protection.- Cours post universitaires de form. prof. des Cadres, Centre de la lutte contre la corrosion, Publ. Sté Chimie Industr. Paris.
- 26.- CENTRE D'INFORMATION DU PLOMB : Corrosion par les liants hydrauliques.- Note ronéo C.I.B. - 10 pl. Vendôme, Paris:

CONVENTION P. ET T.
Département de la Guyane

**ÉTUDE DE L'AGRESSIVITÉ
DES SOLS ET DES EAUX
DE LA VILLE DE CAYENNE**

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

INSITUT FRANÇAIS D'AMÉRIQUE TROPICALE

