

UNIVERSITE D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

18/75

2EX

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة لوطنية للعلوم الهندسية
- المكتبة -

CORROSION DU BETON ET DU
BETON ARME PAR L'ATMOSPHERE
MARINE

PROPOSE PAR :
M. SOLIVERES

ETUDIE PAR :
M. MOKHTARI BOULEFAA

1973

PROMOTION 1970 - 75

UNIVERSITE D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

PROJET DE FIN D'ETUDES

CORROSION DU BETON ET DU
BETON ARME PAR L'ATMOSPHERE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
MARINE
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

PROPOSE PAR :
M. SOLIVERES

ETUDIE PAR :
M. MOKHTARI BOULEFAA

Au terme de mes cinq années d'études à l'E.N.F., je voudrais ici exprimer toute ma reconnaissance aux professeurs qui ont contribué à ma formation d'Ingénieurs mes remerciements vont plus particulièrement à Mr: SOLIVERES et les autres professeurs qui ont suivi la réalisation de mon projet avec toute l'attention nécessaire.

B B L I O G R A P H I E

-ATLAS D'EQUILIBRE ELECTROCHIMIQUE à 25° C. M. Pourbaix

-CAHIERS DE LA RECHERCHE n° 27

Annales de L.J.T.B.T.P

-Documentation reçue de laboratoires

-MONITEUR des travaux Publics et du Batiment.

S O M M A I R E

- 1) CHAPITRE PREMIER: La corrosion
- 2) CHAPITRE DEUXIEME: Le diagramme de M Pourbaix
- 3) CHAPITRE TROISIEME: Corrosion des Ornatures dans le béton. armé par U.R. EVANS
- 4) CHAPITRE QUATRIEME: ...
Recommandations pour l'éllaboration du béton et du béton armé exposés à l'atmosphère marine
- 5) CHAPITRE CINQUIEME: Observations sur le comportement des bétons à l'eau de mer et des structures en béton armé exposées à l'atmosphère marine.
- 6) CHAPITRE Sixième Moyens de lutte contre la corrosion
- 7) CHAPITRE SEPTIEME: Réalisations pratiques.

.../...

Le problème de la corrosion a pris de nos jours une importance considérable étant donnée l'utilisation de plus en plus grandes des métaux et alliages dans la vie moderne. Le développement des nouvelles techniques a conduit les chercheurs à étudier, en plus des phénomènes classiques qui sont souvent encore mal connus, le comportement des matériaux traditionnels placés dans des conditions d'utilisation tout à fait inhabituelles, et aussi à chercher des alliages nouveaux résistants à la corrosion.

La dégradation de la matière et des œuvres réalisées par l'homme du fait de la corrosion, lui impose le devoir de chercher à conserver ce qu'il a créé.

Collectivement cela implique la sauvegarde de la chose construite en tant qu'éléments du patrimoine.

L'utilisation de plus en plus grande de matériaux métalliques, qu'il s'agisse de bâtiments, d'équipements d'usine, d'ouvrage d'art, de matériels électriques, mécaniques ou d'objet manufacturés, nécessite de lutter, contre la corrosion pour assurer le bon fonctionnement de pièces mécaniques mobiles et une conservation durable des structures métalliques fixes.

Du point de vue économique, la corrosion pose un problème important, On estime par exemple que chaque année le quart de la production d'acier est détruit par la corrosion. Le remplacement du matériel corrodé constitue pour l'industrie une charge financière très élevée à laquelle il faut ajouter le manque à gagner correspondant à l'arrêt des installations nécessaires pour effectuer les réparations.

Des chiffres viennent confirmer ces remarques:

La corrosivité de l'eau de mer, pour l'acier, a été constaté de 4g/dm² par an, à la station expérimentale Biarritz, de l'Institut de recherches de la si dérurgie française.

Le taux de corrosion est d'ailleurs variable suivant le milieu environnant.

Le coût annuel de la corrosion en 1967 était estimé à 10 milliards de dollars aux U.S.A par an, quand à l'Europe, une information donne, pour la Suède, le chiffre de 2000 millions de couronnes pour les dommages causés par la corrosion, ce qui correspond à 1,25% du produit national brut, pourcentage qui semble s'appliquer de façon générale aux autres pays.

La corrosion constitue une branche de la chimie puisqu'elle correspond à des réactions intervenant entre un métal et un réactif liquide ou gazeux.

Donc on peut dire de la corrosion: que c'est un phénomène suivant lequel les métaux ont tendance, sans l'action d'agents atmosphériques ou de réactifs chimiques, à retourner à leur état originel d'oxyde, sulfure, carbonate, plus stable par rapport au milieu considéré, et ainsi à subir une détérioration de leur propriétés.

L

.../...

En raison de l'importance des dommages causés, il est indispensable que, dans toutes les branches industrielle, aussi bien à l'échelon artisanal qu'à celui du bureau d'études ou du service entretien des sociétés industrielles, les Ingénieurs, chef d'atelier, contremaîtres, aient un minimum de connaissances des phénomènes de corrosion et de moyens de lutte contre ce fléau mondial.

CHAPITRE PREMIER/ A C O R R O S I O NDEFINITION DU TERME CORROSION:

La corrosion est l'attaque d'un métal provenant de la réaction chimique ou électro-chimique du milieu environnant.

Le terme corrosion peut se rapporter à un processus ou à un dommage causé par ce processus. Lorsqu'aucune incitation n'attaque la matière, il est normalement admis que c'est un métal qui s'attaque.

Le terme corrosion est aussi quelques fois employé pour désigner la dissolution de métaux dans un liquide ou des solvants organiques.

PROCESSUS DE LA CORROSION:

La corrosion d'un métal ou d'un alliage peut se développer suivant différents processus qui caractérisent chacun un type de corrosion.

- Corrosion chimique ou ((corrosion sèche))
- Corrosion électrochimique ou ((corrosion humide))
- Corrosion biochimique
- Corrosion accompagnée d'érosion.

Les phénomènes de corrosion peuvent être de nature chimique, électro-chimique, métallurgique, ou structurale, mécanique, biologique généralement, ce n'est pas un seul facteur mais plusieurs qui interviennent notamment le facteur chimique qui est presque toujours lié au facteur électrochimique.

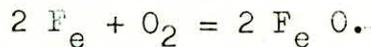
Les réactions donnant lieu à la corrosion sont du domaine des lois de la chimie et de la physico-chimie: les lois de la thermodynamique peuvent s'appliquer aux réactions dues à la corrosion.

.../...

LA CORROSION CHIMIQUE: ou corrosion ((sèche))

Le corrosion sèche se produit par l'attaque d'un métal par seule réaction chimique avec le milieu ambiant, sans intervention de courant électrique.

Le cas de la corrosion sèche est différent de celui de la corrosion humide ou corrosion électrochimique, cependant on constate aussi que le métal instable cherche à revenir à l'état d'oxyde: il y a réaction métal + oxygène formant un oxyde métallique.



C'est la réaction la plus simple donnée à titre d'exemple.

Elle est due à l'action de l'oxygène sans l'effet de hautes températures, quelques fois avec adjonction de gaz provoquant une attaque chimique les principaux phénomènes qui régissent la corrosion chimique sont:

- l'Etat de surface du métal.
- l'Adhérente de l'oxyde.
- Les relations d'orientation cristallographique entre l'oxyde et le métal
- l'orientation cristalline du métal ou de l'alliage,
- l'Etat structural du métal (traitement mécanique et thermique)
- Les caractéristiques physio-chimiques de l'oxyde.

LA CORROSION ELECTROCHIMIQUE OU LA CORROSION LOCALISEE:

Cette corrosion est caractérisée par l'apparition de courants électriques, en dehors de toute source extérieure, c'est-à-dire par déplacements d'électrons au sein de la masse métallique, entre des régimes qui, au contact du milieu d'attaque (electrolyte) se trouvent portées à des potentiels différents.

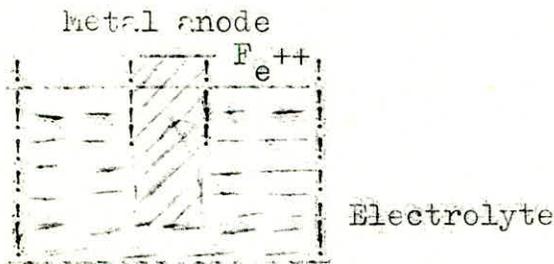
La réaction anodique de dissolution (corrosion) du fer la plus simple est:



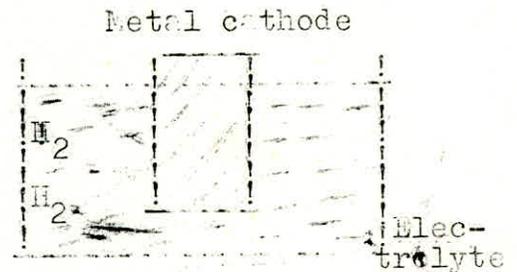
Cela veut dire que le fer se dissout en ions ferreux avec libération de deux électrons.

D'une façon plus générale, on aura les réactions suivantes en corrosion électrochimique, pour un métal divalent:

- à l'anode: $M \rightarrow M^{++} + 2e$
- à la cathode: $\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e \rightarrow 2OH$



Formation d'ions ferreux à l'anode



Action des électrons à la cathode avec dégagement d'hydrogène

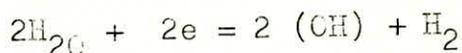
Le potentiel le plus négatif correspond à une surface anodique, où le métal entre en solution dans le milieu qui le baigne sous la forme d'ions hydratés. la cathode est la surface où aucune corrosion ne se produit et où le courant va dans le métal provenant de l'électrolyte. Le composé métal solution qu'est l'oxyde se depose alors sur la surface cathodique.

.../...

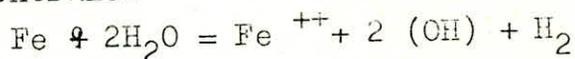
L'anode est l'électrode d'où partent les cations dans l'électrolyte: c'est elle qui se dissout et autour de laquelle se produit une acidification, avec un dégagement éventuel d'oxygène.

La cathode est l'électrode d'où partent les anions, elle n'est pas attaquée et c'est autour d'elle qu'il y a alcalinisation avec dégagement d'hydrogène.

Si on prend comme exemple la corrosion par une électrochimique, le fer immergé dans de l'eau pure, on aura la réaction de réduction cathodique suivante:

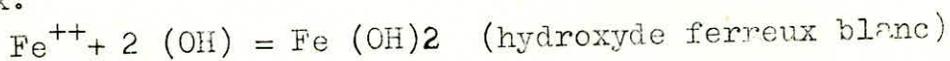


d'où l'équation générale:



Il y a production d'hydrogène formant un film à la surface du métal, c'est le phénomène de polarisation.

Les ions ferreux donnent lieu à la formation d'hydroxyde ferreux:



La corrosion électrochimique est justifiable des lois de la thermodynamique électrochimique: aux lois de l'équilibre chimique s'ajoutent les lois de l'équilibre électrochimique qui font intervenir la tension d'électrode ou la tension de dissolution. Cette dernière est d'après les travaux de Nernst, pour un métal et un électrolyte donnés, fonction de la nature et de la concentration des gaz et substances diverses en solution dans l'électrolyte et non décomposés en ions.

Le potentiel d'un métal plongé dans une solution de sels dissous peut être calculé par l'équation de Nernst:

$$E = E_0 + \frac{RT}{ZF} \log e^C$$

E_0 potentiel d'équilibre

R constante des gaz parfaits (8,314

Z valence

F 96.500 coulombs

C concentration dans la solution en ion / l /

T degré kelvin (298 degrés K= 25°C)

CORROSION BIOCHIMIQUE:

C'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées. Le-mecanisme de ce mode de corrosion peut-être de plusieurs types.

a) chimique par production des substances corrosives telles que CO_2 , H_2S , H_2SO_4 , NH_3 ou d'un acide organique. Par exemple on a observé des cas de corrosion dans des canalisations enterrées, au voisinage de joints contenant du soufre. Celui-ci permet le développement de colonies de thiobacilles dont le métabolisme détermine la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal.

4) CORROSION AVEC CORROSION:

Lorsque les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et contenu à la surface du métal, ils ralentissent en général la vitesse de la corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même, ou bien celui des particules solides qu'il contient. Il y a alors accélération de la corrosion.

Ces différents types de corrosion n'interviennent en général pas indépendamment les uns des autres, ce qui a pour effet de rendre plus complexe l'interprétation des phénomènes.

PRINCIPALES FAONS DE LA CORROSION:

La corrosion peut se développer de plusieurs façons dont on peut distinguer:

LA CORROSION UNIFORME:

Elle se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal on l'observe aussi bien le cas de la corrosion sèche que s'il s'agit de corrosion en milieu liquide.

.../...

- E_0 potentiel d'équilibre
- R constante des gaz parfaits (8,314
- Z valence
- F 96.500 coulombs
- C concentration dans la solution en ion / c /l
- T degré kelvin (298 degrés K= 25°C)

CORROSION BIOCHIMIQUE:

C'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées. Le-mecanisme de ce mode de corrosion peut-être de plusieurs types.

a) chimique par production des substances corrosives telles que CO_2 , H_2S , H_2SO_4 , NH_3 ou d'un acide organique. Par exemple on a observé des cas de corrosion dans des canalisations enterrées, au voisinage de joints contenant du soufre. Celui-ci permet le developpement de colonies de thiobacilles dont le métabolisme détermine la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal.

4) CORROSION AVEC CORROSION:

lorsque les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et contenu à la surface du métal, ils ralentissent en général la vitesse de la corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même, ou bien celui des particules solides qu'il contient. Il ya alors accélération de la corrosion.

Ces différents types de corrosion n'interviennent en général pas indépendamment les uns des autres, ce qui a pour effet de rendre plus complexe l'interprétation des phénomènes.

PRINCIPALES FAONS DE LA CORROSION:

La corrosion peut se développer de plusieurs façons dont on peut distinguer:

LA CORROSION UNIFORME:

Elle se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal on l'observe aussi bien le cas de la corrosion sèche que s'il s'agit de corrosion en milieu liquide.

.../...
.../...
.../...

Les caractéristiques mécaniques du métal rapportées à l'unité de section ou des longueur, ne sont pas modifiées Ex: l'attaque chimique du fer par l'acide sulfurique.

CORROSION PAR PIQUELS:

Elle se localisent en certains points de la surface métallique. Ce type de corrosion peut avoir plusieurs origines, en particulier l'existence d'une solution de continuité dans une couche protectrice découvrant le métal ou bien encore la présence de gouttelettes d'un électrolyte à la surface. Bien que la quantité de métal attaquée soit faible, ce type de corrosion est très dangereux car il se produit en profondeur et peut conduire à la perforation rapide des tôles épaisses.

On observe une diminution de la charge de rupture et de l'allongement des échantillons corrodés.

Les aciers inoxydables immergés dans l'eau de mer sont typiques de cette forme de corrosion par piqures, de même, en atmosphère industrielle polluée de fumées qui se déposent localement il se produit une attaque très localisée, si la surface n'est pas levée régulièrement c'est le cas des éléments de menuiseries métalliques en acier inoxydable.

LA CORROSION PAR AÉVIATION DIFFÉRENTIELLE:

Elle est de nature électrochimique et due à une différence importante d'oxygénation locale du milieu: il se forme une pile dite pile d'Evans: c'est en effet ce dernier qui a expliqué le phénomène. Si on considère une goutte d'eau salée à la surface horizontale d'une tôle de fer parfaitement propre, au bout d'un certain temps on constate la formation d'hydroxyde de fer à la périphérie de la goutte d'eau qui est aérée et forme cathode, alors que le centre non aéré est devenu anode.

LA CORROSION PAR COURANTS VAGABONDS:

Elle cause de graves dommages aux canalisations souterraines situées au voisinage de câbles électriques ou une ligne de transmission électrique. Le courant vagabond et, comme son nom l'indique celui qui circule en dehors des circuits normaux.

Il cherche à suivre les circuits de moindre résistance, tels que canalisations métalliques, l'endroit où il quitte celle-ci subit une attaque anodique quelque fois rapide et locale.

CORROSION PAR CAVITATION ET EROSION:

C'est un type de corrosion dû à des actions mécaniques électrochimiques ou chimiques. Pour qu'il y ait cavitation, il faut que soit créée, dans un fluide en circulation, une forte agitation localisée, produite par des zones de hautes et basses pressions.

Il se forme des bulles, à l'interface métal-liquide qui, par leur violentes percussions en éclatant, provoquent une rupture du film protecteur ou une couche qui ne fera que s'accroître sous l'action électrochimique ou chimique de la corrosion elle-même, suivant qu'il s'agit d'un liquide ou d'un gaz.

LES FACTEURS DE LA CORROSION:

Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et il est très important d'en dresser une liste. On distingue 4 groupes principaux. La corrosion mettant en présence deux partenaires, le métal ou l'alliage et le réactif. Donc la corrosion va dépendre à la fois des caractéristiques du métal et celles du réactif.

- 1) Facteurs définissant les modes d'attaques
 - concentration du réactif, teneur en oxygène P H du

milieu

2) Facteurs métallurgiques:

Composition de l'alliage procédé d'élaboration impuretés
etc...

3) Facteurs de finissant les conditions d'emploi

-Etat de surface forme des pièces sollicitations mécaniques

4) Facteurs dépendant du temps.

vieillessement tensions mécaniques température.

1) CONCENTRATION DU REACTIF:

On ne peut pas toujours savoir à priori si l'augmentation de la concentration d'un réactif favorise ou au contraire diminue la vitesse d'attaque d'un métal. Ainsi, l'attaque du zinc est 4 fois plus grande dans la solution aqueuse de chlorure de potassium de titre N/10 que dans la solution de titre N/10.000 par contre le fer est attaqué dans une solution normale d'acide nitrique alors qu'il ne l'est pas dans une solution 12 N par suite de la passivation du métal.

2) P H DU MILIEU:

De nombreuses réactions chimiques ou électrochimiques, intervenant dans les phénomènes de corrosion, dépendent du P H de la solution. Pourbaix a établi des diagrammes tension pH qui délimitent différents domaines dans lesquels le métal est corrodé, susceptible de se passiver, ou est stable vis à vis du réactif.

Dans le premier cas le produit de corrosion possède principalement une forme soluble. Dans le second cas, c'est un solide insoluble, donc susceptible de protéger le métal (passivation). Dans le troisième cas, aucune réaction n'est thermodynamiquement possible. Il faut indiquer que dans la région de passivation, on n'observera pas forcément la passivité du métal si le produit solide de la corrosion n'isole pas parfaitement le métal du réactif.

3) Etat du surface:

La corrosion était le résultat de l'action que développe à la surface du métal un liquide ou gaz s'il est logique de penser que la nature de cette surface jouera un rôle important sur le comportement du métal vis à vis de la corrosion.

LES INHIBITEURS DE CORROSION:

On appelle inhibiteur de corrosion toute substance qui, ajoutée en très petite quantité dans le réactif corrotif, permet de diminuer ou d'annuler son agressivité vis à vis du métal.

Elle ne modifie donc pratiquement pas la nature ni la concentration du milieu. Les inhibiteurs de corrosion agissent en créant une barrière entre le métal et le réactif? Ils viennent se fixer à la surface du métal sous une forme qui dépend de leur nature. On peut définir plusieurs modes d'action principaux.

1) Formation d'un produit insoluble

La précipitation d'un produit insoluble peut se faire sur les anodes des piles locales, sur les cathodes ou la fois sur les anodes et les cathodes.

a) Inhibiteurs anodiques:

L'anion de l'inhibiteur forme sur les anodes locales avec les cations provenant de l'oxydation du métal, un composé insoluble. Duim, le phosphate de sodium est un inhibiteur de la corrosion du fer par une solution aqueuse de chlorure de sodium, grâce à la formation de phosphate de fer sur les anodes.

b) Inhibiteurs mixtes:

Ils agissent sur les anodes et sur les cathodes. Ainsi le bicarbonate de calcium forme du carbonate de fer sur les anodes et de l'hydroxyde de calcium sur les cathodes.

.../...

2) FORMATION D'UN FILM D'AXYDE SUR LES METAL:

Les chromates et les nitrites, par exemple, déterminent sur le fer ou les aciers la formation d'un film d'oxyde dont l'épaisseur est de 30 à 120 fois plus grande que celle du film d'oxyde formé spontanément à l'air.

3) ADSORPTION

C'est le mode d'action essentiel des inhibiteurs organiques cette adsorption peut résulter de l'existence des forces de Van der Waals entre l'inhibiteur et le métal. Il s'agit alors d'une adsorption physique. Il peut également s'agir d'une chimisorption s'il y a une affinité chimique entre les deux partenaires. Les deux types d'adsorption peuvent intervenir en même temps.

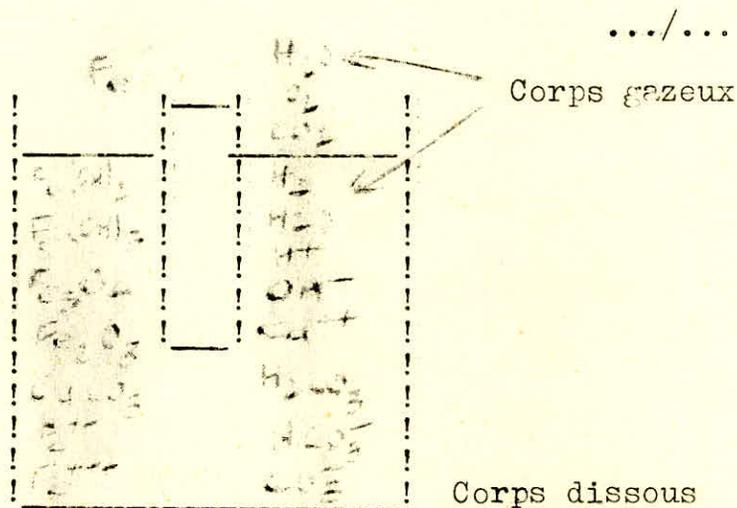
Les inhibiteurs peuvent apporter dans de nombreux cas une solution élégante au problème de la lutte contre la corrosion.

Cependant il faut être prudent dans leur utilisation étant donné le grand nombre de facteurs qui interviennent dans les phénomènes de corrosion. Ainsi, l'action d'un inhibiteur de corrosion est très sensible à l'état de surface du métal ou au pH de la solution, et une variation même très faible de l'une de ces caractéristiques pourra suffire à modifier sensiblement son action.

COMPORTEMENT DE L'ACIER DANS UNE SOLUTION AQUEUSE:

Lorsque du fer se corrode en présence d'air dans une eau de distribution urbaine, il se produit simultanément de multiples réactions: le fer se corrode avec dégagement d'hydrogène et alcalinisation de l'eau selon la réaction $\text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{OH} + \text{H}_2$ dans des régions fortement aérées, les ions ferreux ainsi formés sont oxydés ions ferriques par l'oxygène dissous selon la réaction $4\text{Fe}^{++} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}^{+++} + 4\text{OH}$ et ces ions ferriques réagissent avec des ions hydroxydes selon la réaction dépôt brun d'hydroxyde ferrique; dans les zones moins aérées, l'action de l'oxygène conduit à la séparation, non pas d'hydroxyde ferrique, mais de magnetite Fe_3O_4 . Généralement ces oxydes se déposent sans forme de rouille à une certaine distance de l'endroit où se dissout le fer, en quel cas la corrosion du métal progresse de manière permanente parfois ces oxydes se déposent sans forme adhérente à l'endroit même où se dissout le fer, en quel cas il peuvent recouvrir le métal d'un revêtement plus ou moins protecteur. Parallèlement à ces réactions peuvent se produire d'autres transformations: l'alcalinisation locale de l'eau due au dégagement d'hydrogène ou à la réduction d'oxygène provoque la transformation d'ions bicarbonique selon la réaction $\text{HCO}_3^- + \text{OH}^- \rightarrow \text{CO}_3^{--} + \text{H}_2\text{O}$ avec formation d'ions carboniques qui réagissant selon la réaction $\text{CO}_3^{--} + \text{Ca}^{++} \rightarrow \text{CaCO}_3$ avec le calcium dissous, forment du carbonate de calcium, si ce carbonate de calcium se dépose sur le métal, ce qui se produit fréquemment dans le cas d'eaux de distribution urbaine, il peut y former, en combinaison avec de l'oxyde ou de l'hydroxyde ferrique, un revêtement adhérent qui protège efficacement le métal contre une corrosion ultérieure.

.../...



Enfin lors de cette corrosion du fer, d'autres réactions peuvent conduire à la formation de petites quantités d'eau oxygénée.

La corrosion du fer donne donc naissance, dans ces conditions, à un grand nombre de corps, sans les trois dissous, solide et gazeux; ces corps réagissent entre eux chimiquement et électrochimiquement, et l'on se trouve devant un problème inextricable si l'on étudie ces réactions isolément il est bon d'utiliser pour l'étude de ces phénomènes complexes des méthodes graphiques qui permettent d'étudier simultanément les équilibres de toutes les réactions CHIMIQUES et électrochimiques, qui peuvent se produire.

Diagramme de Pourbaix

A	<u>Immunité du fer dégagement d'hydrogène</u>
B	<u>Dissolution du fer sans rouille</u>
C	<u>Corrosion du fer avec rouille</u>
D	<u>Corrosion "caustique" (formation de ferrites)</u>
E	<u>Possibilité de rouille généralisée</u>
F	<u>Possibilité d'oxydation rapide (figures ou autoprotection)</u>
G	<u>Passivation probable</u>
H	<u>Le fer peut redevenir actif, mais en milieu très fortement oxydant</u>

(A P I T R E T R O I S

Corrosion des armatures dans le béton armé

La corrosion des armatures dans le béton armé provien surtout de ses constituent ciment, sables, granulats, adjurents ajoutés aux ciments, et des milieux dans lesquels le béton est exposé. Dans ce qui suit on va étudier surtout le rôle joué par les adjurants dans la corrosion.

LES ADJURANTS:

On désigne sans le nom d'adjurants du béton, des produit de nature chimique et de propriétés particulières à chacun d'eux, qui ajoutés au béton de ciment à des doses généralement très faibles, calculées et bien réparties dans la masse ont pour but de renforcer ou de développer une ou plusieurs caractéristiques de ce matériau, sans porter préjudice aux autres qualités de ce dernier tout en ce qui concerne la mise en oeuvre que le comportement en service.

L'Adjurant n'est pas un dépont c'est-à-dire un produit capable d'exalter temporairement certaines performances du matériau, au prix, assez souvent, d'une action défavorable ultérieure sur ces mêmes performances, ou d'une action nocive immédiate ou postérieure sur d'autres performances essentielles.

L'adjurant n'est jamais un palliatif. Un palliatif est en effet un produit ou un procédé qui est causé donner au matériau les qualités qui manquent.

Un adjurant n'aura jamais pour mission ou pour effet par exemple, de rendre un béton convenable à partir d'une granulométrie incorrecte ou d'un mauvais dosage, ou d'une compaction insuffisante, ou enfin d'une hétérogénéité.

.../...

Les adjuvants sont presque toujours des produits ajoutés en faible quantité (de 0,25 à 3% selon les produits) alors que certaines additions insolubles peuvent atteindre des taux bien élevés.

En résumé, ce qui différencie les adjuvants de tous les autres types de produits d'addition c'est que les adjuvants s'ajoutent très rarement aux ciments, mais le plus souvent aux mortiers et bétons à base de ciment, pour conférer à ces derniers certaines qualités améliorées, ou pour modifier utilement certaines caractéristiques soit à la mise en service soit au comportement ultérieur de ces mortiers et bétons.

Parmi les adjuvants on distingue les fluidifiants, les plastifiants, les accélérateurs, les retardateurs, les entraîneurs d'air, les anti-gels, les hydrofuges.

LE RÔLE DU CIMENT:

De l'acier propre noyé dans du béton ou du ciment portland, en l'absence des sels, reste généralement brillant et inattaqué comme il a été observé au laboratoire et dans des bâtiments détruits après plusieurs années de service.

L'immunité est attribuée à l'alcali libéré pendant l'emploi du ciment mais il n'est pas impossible que les autres constituants du ciment aient une part active dans cette inhibition.

La passivité de l'acier persiste même si l'acier est soumis à l'action anodique de courants vagabonds.

On peut se fier à la passivité de l'acier due au ciment si la surface du métal est propre et brillante, permettant de la sorte au ciment de venir en contact étroit avec toute la paroi externe de l'acier.

.../...

S'il existe des parties de rouille contenant des sels ferreux qui précipiteraient l'alcali ou autre inhibiteur, la possibilité de création de petites zones anodiques et de grandes zones cathodiques semble introduire des risques. Le danger devient plus grand si la rouille contient des sulfates ou des chlorures.

LE ROLE DES CHLORURES:

Si les chlorures sont présents dans le béton soit à dessein, soit par accident, la passivité peut être anéantie et le caractère volumineux du produit formé là où le chlorure ferreux rencontre l'alcali, peut développer des contraintes suffisamment élevées pour faire éclater le béton.

Une recherche menée en 1913 montra que la corrosion se produisait seulement dans le cas où l'on pourrait trouver des quantités considérables de chlorures dans le ciment et il semble incertain dans la plupart des cas que les courants vagabonds aient joué un rôle important, car plusieurs exemples de destruction étaient attribués aux courants vagabonds agissant sur les aciers dans le béton.

La plupart des premiers dégâts enregistrés étaient attribués à la présence du chlorure de sodium, qui était ajouté intentionnellement au béton pour éviter le gel. Cependant, récemment l'addition de chlorure de calcium nécessaire à l'accélération du développement de la résistance, a trouvé une grande faveur dans les travaux de béton quoiqu'il ne soit pas du tout recommandé de l'utiliser dans les cas du béton précontraints. Ce changement d'opinion est intervenu à la suite de l'échec sévère concernant les canaux précontraints Regina (Canada)

.../...

La question de savoir si l'emploi d'un chlorure de calcium devait avoir lieu dans le béton simplement armé est une affaire au sujet de laquelle les avis sont partagés.

Plusieurs expériences ont montré que le chlorure de calcium est moins corrosif que le chlorure de sodium, sans doute parce que le produit cathodique (hydroxyde de calcium ou dans certains cas carbonate de calcium) est moins soluble. On a pensé que dans les ciments contenant du chlorure de calcium, l'activité de l'ion est réduite à un stade de sécurité du à la formation d'ions complexes, mais aucune étude physicochimique ne semble avoir été faite.

Au laboratoire, on a constaté que le ciment contenant du chlorure de calcium produisait de la rouille dans des conditions où le même ciment sans chlorures ne produisait rien même si l'on y ajoute aucun chlorure au béton, il peut attendre l'acier à partir de l'extérieur. Ceci se produit, par exemple près d'une côte, surtout si le béton est poreux et l'enrobaye insuffisant.

A propos de la corrosion des armatures dans les quais à New South Wales, Maore exprime le point de vue souvent à savoir que le désir d'obtenir des malanges ouvrables implique l'addition d'une quantité plus grande que celle requise par l'hydratation, ce qui conduit à l'obtention d'un béton poreux.

Si dans les conditions de service l'humidité contenue dans les vides était la même partout sur l'acier, la corrosion serait légère même si l'enrobaye était faible. Si les conditions ne sont pas uniformes des courants corrosifs s'établiraient et l'acier dans le béton bien sec servirait cathodique par rapport à l'acier dans du béton identique mais complètement saturé.

.../...

La force électromotrice atteint parfois 0,2 volts. Un enrobage épais n'est pas suffisant en soi pour prévenir la corrosion; des blocs de béton avec 0,5 pouce d'enrobage pourraient être rendus anodiques par rapport à ceux qui ont un enrobage de 0,25 pouces simplement en faisant varier convenablement le degré de saturation.

Sur les piles partiellement émergées, la partie complètement émergée était anodique par rapport à la partie sèche, mais la corrosion se poursuit principalement à la jonction des deux.

Plusieurs chercheurs ont constaté que: là où l'acier contient des écailles poudreuses, le rapport important cathode/anode, dans les piles, qui se produisent au niveau des brèches des écailles peut être une cause importante de trouble. Là où le béton est localement fissuré, mince ou perméable; le gaz carbonique et l'oxygène atteindront certaines petites régions de l'acier, le gaz carbonique en neutralisera l'alcalinité qui a lieu dans la confection du béton et ainsi tend à produire une anode locale. Tandis que l'oxygène favorisera la polarité de la cathode, ainsi deux des constituents de l'air agissent en sens inverses, des expériences de laboratoire suggèrent que l'effet de l'acide prévaudra généralement, établissant une petite anode entourée par une grande cathode, combinaison particulièrement dangereuse.

.../...

MANIFESTATION DU CHLORURE DANS LA CORROSION DU BÉTON:

Compte tenu que le chlorure ou une autre influence corrosive perturbe l'acier, les événements peuvent prendre les tournures différentes suivent les circonstances. Si il y a suffisamment d'oxygène il peut se produire une rouille volumineuse par interaction des produits anodiques et cathodiques; les forces de compression doivent se développer, si à certains endroits ces forces sont suffisantes pour faire sauter le béton, des fissures et des fragmentation sont occasionnées laissant l'acier à nu si bien que la situation se détériore par la suite.

Les symptômes de troubles devient être remarqués plus tôt sans forme de souillures de rouille à l'extérieur du béton et celles-ci se développent progressivement.

D'autre part si la profondeur de l'enrobage est grande et que nous sommes en présence du bon béton avec une bonne adhésion, il ne semble y avoir aucune raison pour laquelle on pourrait obtenir de la rouille, la destruction sera évitée.

Si la fonction d'une couche de béton était simplement de ralentir la diffusion interne du sel, de l'oxygène et des autres substances, l'augmentation de l'épaisseur du béton retarderait seulement le jour du début des troubles. La recherche de la possibilité d'anêter le processus de la rouille l'épaisseur d'enrobage nécessaire sont encore mal connues de nos jours.

Quand l'acier est fortement tendu la possibilité de fissuration par corrosion de contrainte doit être considérée.

.../...

EFFET DE LA TENUEUR DES CHLORURES

Il est certain que les corrosions par addition de chlorure peuvent survenir même à dose limitée à 20%, ou même moindre pour des bétons dosés en ciment on constitués d'un ciment inapte à protéger les armatures, ou encore pour des bétons ségrégués, mal compactes, enrobant mal les armatures, et l'on voit dès lors comment on pourrait atténuer les effets de cet adjuvant. Ou reste, de nombreux auteurs sont d'accord sur les points suivants, à savoir que.

La corrosion est au début physibale dans le cas d'utilisation de chlorure (le fer se transforme en rouille en augmentant dix fois son volume) mais savant la progression de la corrosion à tendance à se stabiliser.

Peu d'inconvénient sont à craindre si un certain nombre de précautions sont prises:

- Bonne dilution du chlorure en solution aqueuse.
- Bonne répartition dans la masse.
- Dosage pas trop élevé, de l'ordre de 1% de chlorure par rapport aux poids du ciment.
- Béton de bonne qualité, compact, suffisamment dosé en ciment
- Bon recouvrement et bon enrobage des armatures (1,5 à 2 cm de béton).

Toutefois, si les chlorures sont repartis uniformément dans la masse si le béton est compact, imperméable et non hygroscopique; s'il est dosé en ciment à une teneur suffisamment élevée; si, bien entendu, les produits de l'hydratation du ciment sont protecteurs des armatures; si celles-ci sont, pour les plus proches de la surface,

recouvertes d'au moins trois centimètres de béton non poreux et riche en mortier, si l'adhérence aux armatures est sans faibles, les aciers du béton armé n'ont rien à craindre de la présence du chlorure à une teneur raisonnable, certainement au dessus de l'ordre de 1% du poids du ciment utilisé, et même très probablement plus (mais, toutefois, sans jamais excéder 2%).

La teneur de 2% (en poids du ciment), en chlorure de calcium utilisé comme adjuvant du béton armé est possible sans danger, mais seulement pour les bétons du type "exceptionnel", c'est à dire des bétons richement dosés en ciment (de 350 à 400 kg par mètre cube en oeuvre) de rapport poids ciment supérieur à 2,00, bien compactés, imperméable non hygroscopiques homogènes, avec un excellent enrobage des armatures.

Aucune de ces armatures ne doit avoir sa face la plus proche de la surface externe du béton à moins de 3 cm, ce qui oblige, pour tenir compte des légères irrégularités de mise en place de ces armatures à l'intérieur des coffrages, de prévoir une distance moyenne de 3,5 cm ou mieux encore de 4 cm.

Enfin, si le milieu ambiant est agressif, ou si l'on n'est pas certain d'avoir un béton non hygroscopique, on peut, outre l'emploi d'un plastifiant réducteur d'eau (légèrement entraîneur d'air) protéger la surface du béton par un hydrofuge, le moyen le plus efficace était une pulvérisation d'un "fluote" tel que le fluosilicate de magnésie (ou, à défaut un badigeonnage au silicate de potassium).

La teneur en 2% du chlorure est souhaitable

Un béton compact bien dosé en ciment (350 kg au moins), bien serré autour des armatures, très homogène et suffisamment riche en mortier. Ce béton doit être imperméable et non hygroscopique.

Les armatures doivent être bien enrobées, à 5 cm minimum de la surface externe du béton, suffisamment "aéré" pour éviter toute ségrégation du béton, lorsqu'il est mis en place et vibré.

Emploi d'un ciment protecteur des armatures: portland C.P.A et au même titre, tous les portlands avec addition à 20% de cendres ou de laitier, ciments alumineux, ciment pozzolano, métallurgiques ciments pozzolaniques de 60 à 70% de clinber.

ROLE DE L'AMBIANCE:

Outre la question des teneurs en chlorure et de la proximité des armatures, il faut tenir compte de l'ambiance:

a) Si l'ambiance est bien sèche; il n'y a pas de danger de corrosion des armatures, même à 2% de chlorure, mais ces dernières doivent, de préférence, être recouvertes d'au moins de 2 cm de béton ou de 1 cm de très bon mortier riche en ciment mais ni fissuré, ni faïencé, et bien adhérent.

Pour les pièces où la condensation est à craindre (salles d'eau, salles de bains, cuisines), le béton armé doit être recouvert d'un très bon hydrofuge de surface ou d'une peinture laquée imperméable et bien adhérente.

b) Dans les zones équatorielles voisines de la mer qui sont particulièrement sujettes à la corrosion électrolytique à évolution rapide.

Le recouvrement dans ce dernier cas doit être de plus de 4 cm ou alors la surface du béton, de préférence doit être protégée par hydrofuges à base de fluosilicates.

(C H A P I T R E QUATRE

RECOMMANDATION POUR L'ELLABORATION DU BETON ET DU BETON ARME EXPOSES A L'ATMOSPHERE MARINE

Une tentative de synthèse des principes généraux à observer pour assurer un comportement durable des bétons dans les milieux marins ne peut être absorbée sans reconnaître et souligner l'importance des circonstances locales qui peuvent être diverses.

Il faut avoir une connaissance approfondie des circonstances locales. Cette règle sera le mieux satisfaite en procédant comme cela a été fait dans de nombreux pays, à des essais directs et de durée suffisante sur le comportement de mortiers et de bétons dans le milieu marin local.

Certains de ces essais ne sont pas encore achevés. On peut croire que d'autres restent à faire en d'autres lieux. Ils auront l'avantage de pouvoir être entrepris d'une manière plus informée, plus assurée et éventuellement plus économique que les recherches antérieures, grâce à la connaissance de leurs résultats.

On peut remarquer que ces nouvelles recherches locales ne devaient sans doute pas porter sur la vérification de toutes les règles générales, dont certains peuvent avoir un caractère assez universel, mais plutôt sur des éléments dont le dépendance des circonstances locales peut ressortir particulièrement dans chaque cas.

Les circonstances locales présentant divers aspects plus moins liés. D'abord les circonstances géographiques maritimes ou océanographiques: le régime des marées, celui des courants généraux, le régime des vents et des tempêtes régissant l'agitation de surface et les courants locaux. D'une manière générale le climat, qui définit un ensemble de circonstances d'un ordre plus actif, telles que le régime de la salinité, celui des températures, aussi l'activité biologique marine etc...

.../...

La salinité et les températures extrêmes sont les agents principaux de l'agression marine, surtout par leur combinaison.

Dans les régions septentrionales, le gel est probablement l'élément le plus destructeur. Dans les régions équatoriales, les températures généralement élevées peuvent donner lieu à des mouvements de l'eau dans le béton et à des concentrations salinées qui peuvent conduire à des altérations du béton et des corrosion d'armatures si le béton est armé.

Des éprouvettes prespatiques de béton armé, qui avaient été préalablement fissurées par flexion, ont été immergées partiellement dans des réservoirs contenant de l'eau de mer artificielle à concentration triple et à niveau légèrement variable à la Baiding Research station à Watford (Royaume uni). Les fissures ont été calmatées par des sels déposés, jusqu'à devenir invisibles, et ces éprouvettes se sont ensuite comportées identiquement aux éprouvettes non fissurées de comparaison.

Un autre ordre de circonstances locales, souvent encore en relations avec celles de la géographie et du climat, est celui des matériaux économiquement disponibles. La nature des ciments peut en dépendre, par exemple en raison de la proximité des produits naturels, tels que les pozzolones en Italie méridionale, ou de sous produits industriels, tels que les laitiers basiques de haut fourneau dans les régions d'industrie sidérurgique il peut aussi s'agir des granilats singuliers, le plus souvent caractérisés par des propriétés nocives, parceque reactif tels que les granités Kaolinisés du Portugal, les silex du Danemark, ou encore expensifs.

CONSEILS POUR LA CONSTRUCTION:

Il est utile avant d'élaborer un béton de savoir dans quel milieu il va être placé. C'est pourquoi dans notre cas, il est utile d'énumérer les éléments qui influent sur l'agressivité de la mer.

- a) la rigueur du climat, principalement la rigueur du gel; éventuellement une température moyenne élevée.
- b) la salinité, le pH et la température de l'eau
- c) l'importance de la marée et la situation du béton par rapport aux niveaux extrêmes moyens de la mer.
- d) L'agitation superficielle et l'exposition.
- e) Les actions mécaniques de la navigation (Chocs, frottements etc...).
- f) l'Action biologique marine.

On remarque que l'action de b seule, c'est à dire l'action simple de d'eau de mer calme peut être en général considérée comme modérée, sauf éventuellement si la température moyenne est élevée. L'agression marine globale est le plus souvent la résultante des actions, qui se combinent et se renforcent mutuellement, de tous les éléments définis ci-dessus, selon leur degré d'importance.

COMPOSITION DU BETON:

Il est admis depuis longtemps, que la composition des bétons pour la mer doit permettre une grande compacité après mise en oeuvre. Aussi il conviendrait d'associer la notion de compacité avec celle de l'absorption capillaire.

Il faut une composition granulométrique, réalisant cette compacité, en rapport avec la quantité de ciment par mètre cube de béton. Si l'on peut disposer d'un mélange naturel de sable et de gravier se rapprochant suffisamment d'une granulométrie idéale et assurant une bonne compacité au béton, on ne voit pas ce qui s'opposerait à son emploi, pourvu qu'il soit sain et propre et ne contienne pas un excès de fin. Mais s'il y a lieu de recourir à des matériaux classés par catégories et notamment des concassées, il est très rationnel et préférable de recourir à une granulométrie discontinue comme l'indiquent plusieurs essais il faut éviter l'emploi des sables fins et surtout éliminer les poussières de concassage. Cependant, la quantité de sable peut être augmentée lorsque celle du ciment est diminuée, mais sans que pour cela la finesse du sable soit accrue. Le calibre maximal des granulations variera selon les applications. Pour le béton armé en général il est recommandable de s'en tenir à un calibre maximal assez faible.

Plusieurs expériences ont établi que l'on peut composer des bétons assez compacts et résistants bien à l'action marine sans dépasser le calibre maximal de 20 mm. Par contre pour les gros blocs et les massifs sans armatures, surtout s'ils sont immergés en permanence et peu exposés à la dessiccation et au gel, on peut recourir à des calibres maximaux sensiblement plus gros allant jusqu'à 100 mm et même au delà. Cette disposition permet d'atteindre de grandes compacités et de grandes résistances avec relativement peu de ciment.

QUANTITE DE CIMENT PAR M3 DE BETON:

L'augmentation de la quantité de ciment, dans les limites courantes, augmente la résistance des bétons à l'agression marine, même lorsque le ciment y est sensible par sa nature. Il semble que cela soit dû surtout à l'augmentation de la compacité. On recommande l'emploi des dosages riches en ciment, de 400 à 450 kg/m³ de béton, du moins pour les bétons armés.

Correspondant au fait que tous les éléments de constructions maritimes ne sont pas également exposés à l'attaque marine, on peut concevoir une gamme raisonnable de dosages en ciment répondant à divers degrés d'exposition. Le tableau suivant n'est donné qu'à titre d'exemple plutôt théorique en rapport avec les essais pratiques.

Ces dosages ont été établis par le calcul de manière à prévoir des consistances à peu près identiques, avec des quantités d'eau peu variables et pour la mise en oeuvre à sec.

	B E T O N S			
	A	B	C	D
Gravier 5/20 Kg	1250	1250	1250	1250
Sable 0/2 kg	740	696	630	547
Ciment Kg	225	275	350	450
Eau Kg	158	158	158	180
Compacité du béton	0,853	0,862	0,875	0,911

Le béton A, convient par exemple pour les plaques revêtement d'épaisseur modérée, immergées en permanence et à l'abri de l'agitation de surface.

Le béton B, surtout avec du ciment résistant à l'action marine, peut convenir déjà pour les éléments les plus exposés non armés.

Le béton C, convient pour les éléments en béton armé pas trop exposés notamment prefabriqués et immergés en permanence.

Le béton D conviendrait pour les éléments armés les plus exposés, moyennant les précautions indiquées plus loin.

Pour les deux derniers bétons, on doit recouvrir à du ciment résistant à l'action marine lorsque le danger d'agression est assez élevé.

MISE EN OEUVRE DU BÉTON:

Pour les ouvrages à la mer, elle doit se rapprocher à la perfection. C'est en effet par les imperfections de la mise en oeuvre que périssent généralement tous les bétons et surtout ceux exposés à la mer.

Ces imperfections consistent toujours en discontinuité et des hétérogénéités, vides, dégrégations, nids de graners, mauvaises reprises.

La composition et la consistance du béton doivent être appropriées aux difficultés de mise en oeuvre. Ce qui compte est la qualité du béton mis en place, l'homogénéité et la compacité du béton durci dans toutes ses parties.

Le nouillage sera fait autant que possible à l'eau douce, bien que l'eau de mer puisse être utilisée en cas de nécessité, surtout avec les ciments résistant à l'action marine.

On évitera, le bétonnage sous eau et le bétonnage à sujétion de marée on préférera le bétonnage à sec, dans des familles, batardeaux, cuissons, puits ou enceintes asséchées ou la préfabrication. La mise sous eau ou l'immersion seront faites à l'âge le plus avancé économiquement possible.

.../...

Le problème des reprises doit retenir particulièrement l'attention. Le mieux est de les éviter par une subdivision judicieuse de la construction en plots séparés par des joints étanches ou non, selon les circonstances. Dans les bétons coulés ou injectés sous eau comme les reprises ne sont pas observables ni contrôlables, il faut les éviter par la division en plots et l'organisation correspondante du chantier.

Les arrêtes vives et les sommets étant particulièrement vulnérables à la mer, on ~~chaufrenera~~ ou, l'on arrondira les angles des coffrages on même on préférera pour les piles et piliers des surfaces de coffrages cylindriques.

.../...

PRECAUTIONS SPECIALES POUR LE BETON ARME:
CELLES ONT ESSENTIELLEMENT POUR BUT:

a) d'éviter que les armatures rendent difficile la mise en place du béton et compromettant sa qualité:

b) d'assurer une protection efficace et durable des armatures par le béton contre la corrosion marine de l'acier.

c) d'éviter la fissuration du béton telle qu'elle peut se produire dans le béton armé en exposant ainsi les armatures à la corrosion marine.

Plusieurs essais effectués montrent que l'efficacité de protection d'une armature par une couverture de béton ne se mesure pas seulement par l'épaisseur de cette dernière mais dépend encore davantage et sa qualité et de son invariabilité. Cette épaisseur de couverture est déjà de nature à augmenter les dimensions des éléments en béton armé des ouvrages maritimes elle s'applique aux superstructures aériennes comme aux infrastructures mouillées car les armatures des parties aériennes sont aussi exposées à la corrosion que celles qui sont constamment humides, en raison du caractère corrosif de l'air marin et les embruns, ainsi que les effets de mouillage interettent par les projections marines.

L'épaisseur de couverture doit être suffisante non seulement sur les armatures principales, mais aussi sur les étriers.

Les dimensions des éléments du béton armé à la mer sont aussi majorées pour éviter des nappes et faisceaux d'armatures trop serrées, rendant difficile la bonne mise en place du béton et diminuent en tout état de cause sa compacité locale par effet de paroi, encore accentué par le même effet de la surface décoffrage voisine.

Enfin ces précautions conduisent à sur dimensionner les éléments en béton armé de ouvrages maritimes par rapport au béton armé courant pour des raisons de résistance à la fissuration.

On peut aussi limiter les tensions en service pour éviter la fissuration du béton tendu.

Dans beaucoup d'ouvrage maritimes on limite les tensions d'extensions du béton à 25 Kg/cm² pour éviter la fissuration on a de plus limité les tensions de l'acier à 40kg/mm² (calculée pour les cas les plus défavorables) les armatures doivent être cependant assez rigides et bien finies pour ne pas se déformer et se déplacer pendant la mise en place du béton. Le problème de la position correcte des armatures doit retenir autant l'attention que celui de leur protection dans le cas du béton coulé ou injecté sous l'eau.

De même que l'on aura recours à un ciment de même composition, surtout pour le béton armé, on aura recours aussi à des armatures en acier de même nature et de même origine, pour éviter les tendances à la corrosion qui pourraient résulter des différences caractéristiques entre les aciers.

L'emploi du béton précontraint dans les ouvrages maritimes est relativement récent. Bien que la précontrainte supprime le risque de la fissuration sous l'effet des sollicitations mécaniques, il n'est pas douteux que le souci de la protection des armatures et des encrages métalliques contre la corrosion sous tension doit être poussé à l'extrême. Les impératifs de la qualité du béton à la mer s'accordent avec ceux du béton précontraint.

En ce qui concerne la protection des armatures de précontrainte les éléments préfabriqués et à précontrainte proprement dite paraissent pose le moins de problèmes.

OBSERVATIONS SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS A L'EAU
DE MER ET DES STRUCTURES EN BETON ARME EXPOSEES A L'ATMOS-
PIERE MARINE:

La résistance des mortiers et des ciments à l'action de l'eau de mer est un facteur d'une importance prépondérante pour la conservation dans le temps des ouvrages maritimes toutes les recherches entreprises jusqu'à présent ont donné des renseignements intéressants mais elles sont loin d'avoir fourni une vue d'ensemble sur le phénomène de dégradation des mortiers et des bétons car des multiples paramètres sont à considérer.

La confrontation des résultats des essais fait par plusieurs chercheurs dont A.MIGLIARDITASCO, permet de tirer des éléments utiles pour les problèmes relatifs à l'emploi des bétons en milieu marin.

Le comportement des bétons et des mortiers exposés à l'action directe ou indirecte de l'eau de mer a maintes fois donné lieu à des études fort intéressantes mais qui n'ont pas pour autant complètement résolu le problème.

Les bétons réglementaires employés pour les ouvrages maritimes se divisent en deux catégories:

- a) Les bétons hydrauliques.
- b) Les bétons de ciment.

Les premiers, dont le liant est un mortier de pouzzolone et de chaux étaient les seuls dont on pouvait disposer jusqu'à la fin du XIX siècle pour les ouvrages maritimes et leur emploi est encore recommandé aujourd'hui pour certains ouvrages.

...../.....

.../...

Des bétons ont montré une conservation dans le temps tout à fait exceptionnelle: des ouvrages romains dont la construction remonte à plus de vingt siècles existent toujours, et leur résistance aux actions chimiques est presque parfaite: par contre, ils présentent certains inconvénients: on ne trouve pas ces matériaux pozzolaniques en de nombreux endroits, le processus de durcissement est assez lent et leurs qualités de résistance mécanique sont médiocres.

Le rythme des travaux actuels alliés à une mécanisation très poussée des chantiers et la nécessité de concevoir et de réaliser des ouvrages légers de sections résistantes réduites, présentant des qualités mécaniques élevées, sont des facteurs qui, à partir de la fin du XIX^e siècle, ont conduit les constructions d'ouvrages maritimes à adapter de plus en plus des bétons de ciment armés ou non armés.

Cependant, les premières applications réalisées, presque exclusivement avec du ciment Portland, tout en ayant satisfait pleinement les exigences des chantiers équipés de façon moderne, ont présenté avec le temps des phénomènes de dégradation plus ou moins marquée, à caractère presque toujours évolutif qui, dans certains cas, ont été particulièrement graves, allant même jusqu'à provoquer la destruction de certains ouvrages.

Ces conséquences de l'emploi des bétons de ciment ont alarmé les techniciens de la construction d'ouvrages maritimes qui ont admis la nécessité d'une étude précise des phénomènes de dégradation et des mesures à prendre pour les éliminer, ont tout au moins pour réduire leur importance.

.../...

.../...

La confrontation des observations faites dans divers pays et exposées au cours de nombreux congrès qui se sont tenus jusqu'à présent a contribué, pour une large part, au développement des connaissances théoriques et expérimentales de ce sujet et à l'adoption de mesures pratiques. La plupart des chercheurs s'accordent pour attribuer la corrosion chimique du ciment à l'action des sulfates et chlorure de magnésium, en présence de chlorure de sodium, sur les produits d'hydratation de l'aluminat tricalcique et sur la chaux libérée par hydrolyse de C_3S .

L'importance de ces phénomènes est sans aucun doute variable suivant la compacité et la précision des mélanges, en effet si on empêche la pénétration en profondeur de l'agent agressif, on arrive à retarder la désagréation rapide du mortier

La technique moderne s'est orientée vers la recherche des types de ciments résistants à l'eau de mer par réduction de la chaux d'hydrolyse en adoptant des liants à faibles pourcentages de silice tricalcique et en éliminant les aluminates trop basiques.

D'un emploi fréquent des ciments alumineux, de haut fourneau et de pouzzolones qui présentent tous, pour des raisons de caractéristiques de résistance chimique plus élevée? En effet, il est connu que les ciments alumineux contiennent en dépit de la présence de divers aluminates, une faible teneur en aluminat tricalcique, le sel qui soit dangereux pour la formation de sel de candlot, les ciments de haut fourneau donnent par hydrolyse une très petite quantité d'hydrate de calcium en fonction de leur teneur élevée en laitier les ciments pouzzolaniques présentent la particularité de fixer la chaux par la pouzzolane et même de l'absorber pratiquement au fur et à mesure qu'elle est libérée.

.../...

.../...

Parfois il s'est avéré plus avantageux de continuer d'employer les bétons de mortier hydraulique, en palliant l'inconvénient d'une prise haute et d'une résistance mécanique médiocre par l'adjonction dans le mélange de petit, pourcentages de ponzzolane finement broyée ou de ciment ponzzolanique. Il est évident cependant que de telles pratiques, qui sont basées sur l'emploi de bétons hydrauliques classiques améliorés, s'appliquent à des structures maritimes particulières et ne sont pas toujours possibles en effet. Les ouvrages maritimes proprement dits se classent en deux grandes catégories.

- Les constructions massives
- Les constructions légères à claire voie.

Les premières sont adoptées aujourd'hui pour l'édification de murs de quai à l'intérieur des ports et pour certains ouvrages de protection en blocs artificiels par exemple.

On peut utiliser pour leur exécution des bétons hydrauliques car, étant donné leur dimensions, il n'est pas nécessaire d'obtenir des résistances mécaniques élevées.

Les phénomènes éventuels de dégradation chimique dans ce cas là, n'ont pas une importance fondamentale dans la mesure où ils n'affectent qu'un pourcentage réduit de l'ensemble.

.../...

.../...

Par contre le deuxième type d'ouvrage, adopté pour la réalisation de structure échoué ou à air comprimé, exige l'emploi des bétons presque toujours armés, présentant une résistance mécanique élevée et dont les sections sont réduites, ce qui implique que les phénomènes de corrosion ont une importance déterminante pour la conservation ou durée de stabilité des ouvrages.

Il ne faut pas oublier que pour ce genre de structures les actions destructrices d'origine mécanique peuvent avoir une influence notable.

Les courants marins, l'action dynamique des vagues et du l'alternance des marées, les variations thermiques provoquent, surtout dans la zone de niveau moyen de l'eau une dégradation des bétons d'autant plus marquée que les sections des ouvrages sont réduites.

D'après les recherches bibliographiques réunies sur ce sujet, il ressort en règle générale que les actions mécaniques sont d'une importance secondaire à côté des agressions chimiques dont on a parlé et on peut plus facilement les éliminer par une confection soignée du béton et en essayant de lui donner une compacité et une imperméabilité maximales.

Il est incontestable que les deux causes de dégradation sont intimement liées, une perméabilité initiale de la couche supérieure peut par exemple être l'origine d'une dégradation d'origine mécanique qui va ouvrir la voie à l'agression chimique vers le centre des structures mais le processus inverse peut aussi se produire.

.../...

Il est évident que le problème revêt des dimensions différentes lorsqu'il s'agit de béton de ciment armés pour lesquels les phénomènes de désagrégation ont une importance capitale dans la mesure où la vitesse de propagation de la corrosion est très élevée pour le complexe acier béton.

En effet, l'action chimique ou mécanique sur les bétons provoque au début, aussi qu'on l'a déjà dit, une dégradation des couches superficielles qui donne lieu à des fissurations et à une perméabilité accrue: le béton perd aussi les qualités que lui confère son imperméabilité initiale et qui sont nécessaires à la protection efficace des armatures qu'il enrobe.

L'attaque chimique a aussi la possibilité de s'exercer directement sur l'acier qui perd sa "passivité" et qui devient alors corrodable, ce phénomène s'accompagne d'augmentations de volumes qui à leur tour, ont une action destructrice sur la masse du béton parallèlement à une aggravation des mécanismes initiaux ce qui peut entraîner en très peu de temps la destruction de toute la structure.

Ces manifestations de dégradations par corrosion des bétons armés sont très accentuées dans la zone de mûrage mais elles sont également importantes et dangereuses pour les structures exposés à l'action de l'air marin même à une distance éloignée de la côte.

De nombreux articles ont été écrits sur les phénomènes que nous venons de décrire très sommairement mais ils sont surtout théoriques; il peut être intéressant cependant d'exposer rapidement les résultats d'observations faites sur certains des ouvrages portuaires construits au cours de ces dernières années en Italie et de relier aux caractéristiques des matériaux employés et aux conditions d'exécution.

.../...

Parmi les ouvrages en béton hydraulique de chaux et de ponzzolone, on examine.

- a) Les murs de quai avec coffrage immergés
- b) Les murs de quai formés de piles constituées de blocs artificiels.
- c) les ouvrages de protection des blocs artificiels.

- a) Murs de quai avec coffrage immergés.

Ce type de structures n'est pas plus que très employé en Italie car il ne permet d'attendre qu'une profondeur limitée, et de plus, l'exécution des bétonnages et la prise du béton ne sont pas assez rapides.

Généralement la construction de ces murs se limite à une profondeur de 5 à 7 m elle est accompagnée de mesures particulières (caisses à fonds mobiles, participation des scaphondriers pour éviter le délavage du béton entre les coffrages formés par les palplanches provisoires en bois ou en métal.

Le dosage des matériaux le plus fréquemment utilisé est le suivant

Trois volumes de mortier de chaux et de ponzzolane
Cinq volumes de caillutis de 4 à 7 cm.

Quelle que soit leur implantation, ces ouvrages réalisés parfois à des époques fort reculées, ont montré une résistance très élevée à l'action chimique de l'eau de mer. Et leur comportement aux actions mécaniques a été satisfaisant dans la mesure où les conditions de mise en oeuvre ont été bonnes.

Dans de nombreux ouvrages de ce type on a pris l'habitude d'ajouter une certaine quantité même minime de ciment ponzzolanique qui améliore notablement la rapidité de la prise et les caractéristiques mécaniques de résistance.

.../...

.../...

MURS DE QUAI SUR PILES EN BLOCS ARTIFICIELS:

Ce type de structure a été très souvent mis en oeuvre dans les ports Italiens, surtout en compagnie et dans le latium qui sont des régions où l'on trouve en grande quantité d'excellents ponze-zolanes.

La fabrication des blocs, souvent de grandes dimensions, se fait à sec, on utilise des moules métalliques ou en bois puis, après une conservation prolongée, les éléments sont bordés et mis en oeuvre sur des assises d'enrochement.

La lenteur du durcissement du béton et sa résistance mécanique sont les inconvénients majeurs de ce type de construction, de plus, au moment du déchargement des blocs, le risque de fissuration et de rupture. Toutefois par l'adjonction de ciment ponzzolanique broyée, on est armé à pallier ces inconvénients, tout au moins partiellement, la technique moderne sensible désormais s'être orientée vers l'emploi de blocs en béton de ciment.

OUVRAGES DE PROTECTION EN BLOCS ARTIFICIELS:

Les blocs utilisés pour la construction d'ouvrages de protection bien qu'étant fabriqués dans les mêmes conditions que ceux employés pour des ouvrages à l'intérieur du port, ont des dimensions nettement plus grandes, ils atteignent très souvent un poids de plusieurs centaines de tonnes.

Leur résistance mécanique médiocre est un facteur défavorable à leur emploi.

.../...

.../...

L'action mécanique du mouvement des vagues se manifeste violemment au moment des marées, elle corrode et écaille un pourcentage élevé de la couche superficielle du béton. L'emploi de ces blocs éga-lopiens est pour ces raisons pratiquement abandonné.

L'examen de nombreux ouvrages réalisés en béton hydraulique a confirmé ce qu'on savait déjà: La très bonne résistance de ces bétons aux actions chimiques, par contre, leur résistance mécanique est très moyenne, d'une mise en oeuvre délicate, leur emploi doit se limiter aux ouvrages de dimensions réduites situés à l'intérieur des ports.

Parmi les ouvrages en béton de ciment, on a examiné.

- a) des murs de quai
- b) des estacades en béton armé.
- c) des ouvrages de protection.

MURS DE QUAI:

Les murs de quai en béton de ciment examinés ont été construits en utilisant soit des piles indé-pendantes accotées, en blocs artificiels semblables à ceux en béton hydraulique, soit des caissons flot-tants en béton armé ou plus rarement des caissons à air comprimé.

Pour les piles, on a constaté une dégradation plus grande que celle observée sur les blocs fabriqués avec un béton hydraulique; il faut excepter ceux pour lesquels on a employé une grande quantité de ci-ment pozzolanique et qui ont été vibrés convenable-ment. Dans ce cas, on a noté une bonne compacité et par suite l'imperméabilité a même été obtenue pour les couches superficielles, qui, plusieurs années après.

.../...

.../...

Leur bétonnage, sont encore en excellent état, de plus les structures édifiées selon ce procédé ont eu un comportement généralement satisfaisant même lorsqu'elles étaient situées dans des zones particulièrement exposées à l'action de la mer; ce qui démontre ainsi l'importance déterminante accordée à une bonne résistance mécanique.

Les conditions sont différentes pour les structures formées de caissons en béton armé.

Des examens détaillés ont révélé que dans les zones proches du niveau de la mer, les dégradations des bétons pouvaient revêtir une importance considérable, les armatures étaient souvent mises à nu, elles sont dans un état de corrosion avancée et le béton présente des fissures et des tressaillements.

Par contre les zones situées au dessous de ce niveau sont presque toujours dans un meilleur état de conservation; à ce propos on a remarqué que la formation d'inconstations d'origine végétale ou animale avait assuré la protection des couches superficielles contre les actions externes.

.../...

.../...

ESTACADES EN BETON ARME:

La technique Italienne moderne de la construction d'ouvrages maritimes emploie de plus en plus fréquemment des appontements d'accostage à claire voie.

La nécessité de réaliser des ouvrages légers et économiques alliée aux progrès technologiques des matériaux a permis le passage de structures massives à éléments résistants de grande section à des éléments structureux modernes moins lourds et plus souples, pour lesquels on a exploité au maximum les caractéristiques mécaniques des matériaux, en utilisant les critères d'exécution et les techniques de construction les plus avancés.

Ces considérations font que les structures portantes de ces ouvrages peuvent supporter des sollicitations plus grandes et résister à des contraintes élevées dues aux actions mécaniques extérieures telles que le mouvement des vagues et le choc des bateaux qui sont très difficiles à évaluer tout au moins de façon exacte. Ces conditions impliquent les risques de fissuration et ce phénomène est particulièrement dangereux par l'amorce de corrosion que ces zones fissurés constituent.

.../...

OUVRAGES DE PROTECTION:

La plupart des ouvrages de ce genre examinés sont des ouvrages à parois verticales réalisés avec des caissons échoués en béton armé ou avec des blocs artificiel coulés.

Ceux réalisés avec des caissons échoués ne diffèrent que par leur dimensions en général plus grandes, des structures semblables employées pour les murs de quai.

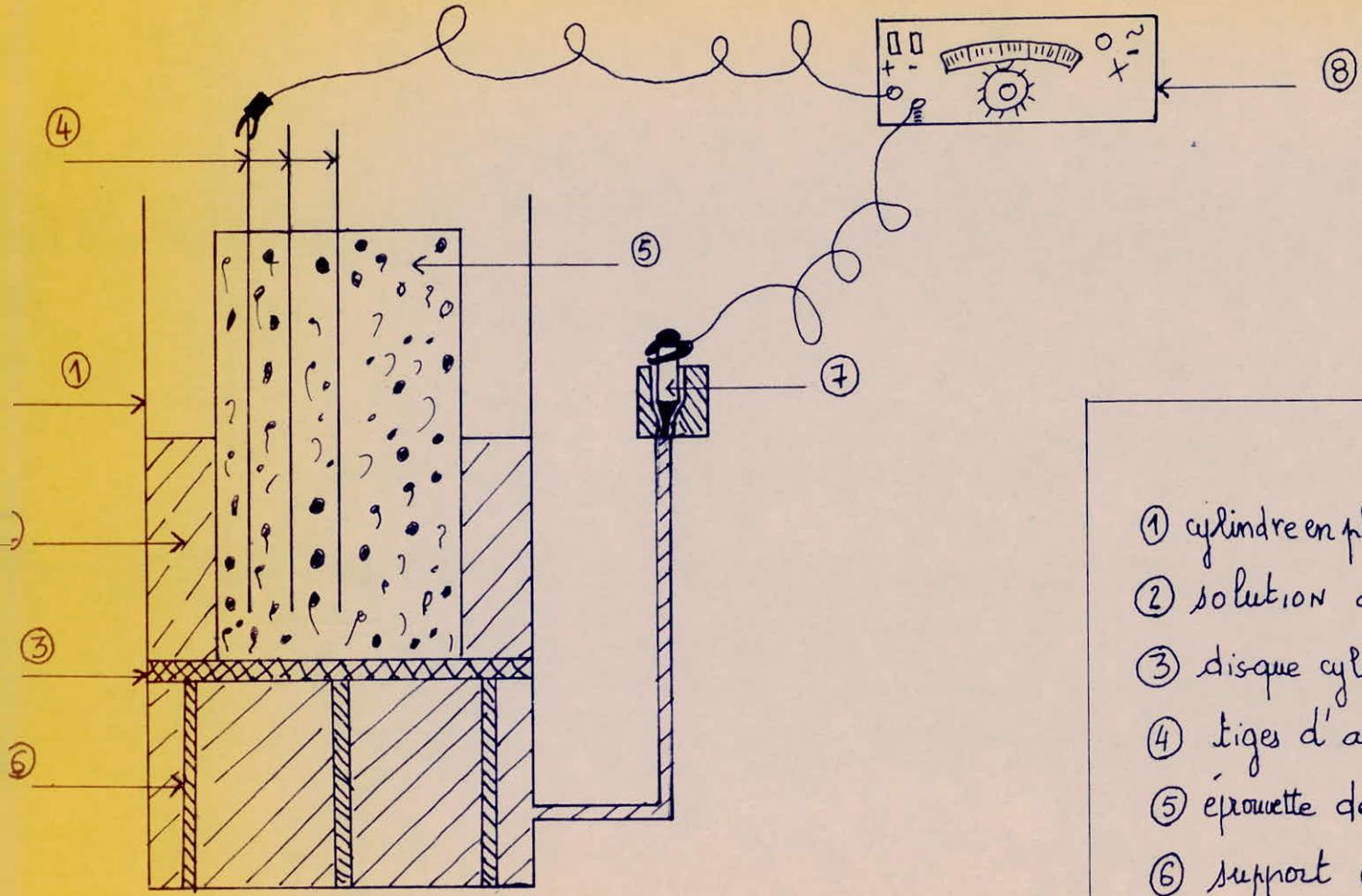
Ils présentent les mêmes avantages et les mêmes inconvénients aggravés par l'importance de forces dynamiques des lames du large agissant sur ces ouvrages de protection.

Les structures en blocs artificiels sont de moins utilisées, en général. Elles sont réservées aux petits ouvrages de protection cotières situés dans des régions où l'on ne trouve pas de carrières de blocs naturels appropriées à proximité de la côté à protéger.

Les blocs qui servent à leur construction peuvent encore avoir des dimensions importantes, ils sont fabriqués en béton de ciment seulement pour accélérer le rythme de leur production.

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

ETUDE DU COMPORTEMENT DES BÉTONS 150, 200, 250



- ① cylindre en plastique $\phi = 20\text{ cm}$ $L = 40\text{ cm}$
- ② solution de NaCl 0,5M par litre
- ③ disque cylindrique percée
- ④ tiges d'aciers de $\phi = 6\text{ mm}$
- ⑤ éprouvette de béton $\phi = 11,2\text{ cm}$ $L = 22\text{ cm}$
- ⑥ support en plastique
- ⑦ Electrode de calomel
- ⑧ millivoltmètre à haute résistance interne

C H A P I T R E VII

1er REALISATION PRATIQUE

ETUDE DU COMPORTEMENT DES BETONS DE DOSAGES DIFFERENTS PLONGES DANS UNE SOLUTION (de 0,5 n par litre).

Une étude de corrosion n'a conduit à des mesures de potentiel de contact béton fer.

Il me semble pratique de chercher des renseignements par cette méthode sur un ensemble (béton armé) si utilise.

Nous nous sommes demandés si c'est possible d'établir des relations entre des bétons dosés différemment et cette prise de tension.

Dans l'étude qui suit, nous nous proposons de voir si les variations sont en fonction du temps, de la différence des dosages ou bien en fonction de la distance des fers à la paroi externe des éprouvettes.

Mon travail d'observation s'est déroulé sur (20) Vingt jours du 28 Avril 1975 jusqu'au 18 Mai.

MATERIAUX UTILISES:

Ciment: J'ai utilisé un ciment C.P.A classe 325

Métal: J'ai utilisé un acier de 6 mm de diamètre.

Principe de l'expérience et conventions:

Il est facile de fabriquer un prisme de béton dans lequel est plongé en son centre, un morceau de fer qui émerge de la surface.

Plongeons ce bloc durci dans la solution $H_2O + NaCl$ de la façon que le fer émerge.

D'autre part plaçons une électrode au colonel dans cette solution eu baigne le cube. Nous constatons que le tout forme une pile dont on peut mesurer la f.e.m.

.../...

.../...

Les chiffres sont affectés du signe + quand l'électrode métallique est positive par rapport à l'électrode au colonel.

Nous avons constitué la chaîne électrolytique suivante; électrode au colonel, eau, béton, fer.

LE TEMPS: l'existence d'une différence de potentiel au contact fer béton peut se rattacher à deux schémas explicites, qui expriment le même fait physique sous des formes différentes.

D'autre part on sait qu'un métal plongé dans une solution constitue une denie pile: ce qui nous permet de considérer l'aspect statique, où des charges opposées apparaissent sur et en face de la surface métallique frontalière entre phases. La solution aqueuse imbibant les parties solides du béton renferme certains constituants qui varient avec le temps en nombre et en concentration.

Il est normal de supposer que la modification de la solution entraîne la variation de la différence de potentiel?

D'autre part le ciment est un mélange qui, au contact de l'eau, entre en réaction, le plus souvent avec dégagement de chaleur, pour se transformer en un autre mélange chimique infiniment moins réactif. Le temps intervient en modifiant l'allure de la réaction.

Donc quelque que soit la façon dont on relie la tension fer ciment aux réactions internes de la pâte hydraulique; il faut supposer que les causes qui lui donnent naissance sont fonction du temps.

.../...

.../...

En conclusion le temps est une variable importante à considérer, soit que l'on envisage le phénomène prise et durcissement, soit que l'on envisage le phénomène plus particulier la corrosion.

DISPOSITIF DE L'EXPERIENCE;

Nous avons fabriqué trois éprouvettes cylindriques dosées différemment et successivement à 150 kg/m³, 200 kg/m³, 250 Kg/m³ chacune des trois éprouvettes comporte trois tiges d'acier de diamètre ($\phi = 6$ mm), plongées jusqu'à 5 cm du fond de l'éprouvette et émergent de la solution dans laquelle baigne l'éprouvette.

Ces tiges d'acier sont placées à distances inégales de la paroi externe de l'éprouvette. La première est placée à 1 cm de la paroi externe, la seconde à 3 cm et la troisième au milieu de l'éprouvette le temps de prise a duré 1 jour j'ai fabriqué 3 dispositifs expérimentaux identiques chaque dispositif comprend.

1 Cylindre en plastique de ϕ diamètre $\phi=20$ cm et de hauteur= 40 cm.

1 disque en plastique percée qui sert de support à l'éprouvette.

2 Cylindres de diamètre ($\phi = 2$ cm) et de longueur L = 15 cm.

1 prisme de plexi-gloss de 4 cm x 4 cm x 8 cm dans lequel est logé l'electrode de colonel.

On plonge les éprouvettes confectionnées dans une solution de NaCl 1N les parties sortantes des tiges d'acier ont été passées au vernis de silicone qui assure une protection efficace de longue durée.

.../...

TABLEAU DES MESURES DES TENSIONS DU BETON DOSÉ A 150 Kg/m³

Temps	1h	2h	3h	4h	6h	8h	24h	36h	2j	3j	5j	6j	7j	8j	9j	10j	12j	13j	14j	15j	16j	17j	19j	20j
tige située à 1cm	196	191	188	183	180	165	162	155	146	143	140	128	121	118	97	91	73	66	64	60	48	44	38	25
tige située à 3cm	220	215	213	211	197	186	175	170	162	157	151	142	138	133	127	122	120	117	115	112	110	105	99	94
tige située au centre	255	248	243	241	235	230	223	216	209	201	195	192	185	180	174	167	161	158	153	150	148	146	145	143

. Les tensions sont en millivolts .

TABLEAU DES MESURES DES TENSIONS DU BÉTON DOSÉ A 200 kg/m^3

temps	1h	2h	3h	4h	6h	8h	24h	36h	2j	3j	5j	6j	7j	8j	9j	10j	12j	13j	14j	15j	16j	17j	19j	20j
tige située à 1cm	356	352	348	345	342	335	322	318	312	302	298	291	287	283	278	271	267	262	256	252	249	246	241	237
tige située à 3cm	391	391	388	383	377	371	365	360	343	337	332	329	325	322	318	315	311	308	303	298	295	291	287	283
tige, située au centre	418	415	411	408	406	404	398	367	361	357	353	350	348	345	342	338	335	331	329	326	323	319	317	314

- Les tensions sont en millivolts -

TABLEAU DES MESURES DES TENSIONS DUBÉTON DOSÉ À 250 kg/m³

Temps	1h	2h	3h	4h	6h	8h	24h	36h	2j	3j	5j	6j	7j	8j	9j	10j	12j	13j	14j	15j	16j	17j	19j	20j
Tige située à 1 cm	398	396	393	391	388	385	372	368	365	361	357	352	348	341	338	335	331	327	323	319	315	311	308	306
Tige située à 3 cm	453	450	448	447	445	442	436	433	430	426	422	418	415	413	410	407	403	401	398	396	394	391	387	385
Tige située au centre	476	473	471	469	467	463	458	455	452	449	447	445	442	439	437	434	431	429	427	425	421	418	415	412

Les tensions sont en millivolts

RESULTATS:

Les résultats relevés sont donnés sous forme de tableaux.

ETUDE DES TABLEAUX:

Etude du tableau n° 1: éprouvette de béton dosé à 150 kg la tige située à 1 cm de la paroi externe accuse beaucoup de points de différence; le premier entre 6h et 8h, le deuxième entre 36h et 2 jours, le troisième entre 8j et 9j, le quatrième entre 15j et 16j etc...)

-La tige située à 3 cm de la paroi externe accuse 1 point de cassure net situé entre 36h et 2 jours. Les mesures sont stables dans l'ensemble.

-La tige située au centre accuse 2 points de cassures successifs.

-Le premier entre 8h et 24h, le second entre 24h et 36h.

-Les autres mesures décroissent normalement.

-On remarque que les potentiels diminuent pour chaque tige.

Les mêmes remarques sont faites pour le tableau n°2 les trois tiges présentent des points de différence.

ETUDE DU TABLEAU N° 3: Eprouvette du béton dosé à 250 kg/m³.

-La première tige accuse 1 point de différence net entre 8h et 24h le potentiel décroît normalement.

-La tige située à 3 cm accuse 1 point de différence net entre 8h et 24h ce point de cassure n'est pas tellement net, la différence de potentiel entre les deux points est de 6 millivolts.

-La tige du centre accuse elle aussi un point de différence net entre 8h et 24h la différence est de 5 millivolts = avant et après ce point le potentiel décroît normalement.

C O N C L U S I O N

De l'étude de ces 3 tableaux, il nous semble logique de tirer conclusions.

Les variations de tension sont bien en relation avec le dosage du béton; On remarque que les mesures de tension relevées pour le béton dosé à 250 kg/m³ sont supérieures à celle du béton dosé à 150 kg/m³ et celle du béton dosé à 200 kg/m³.

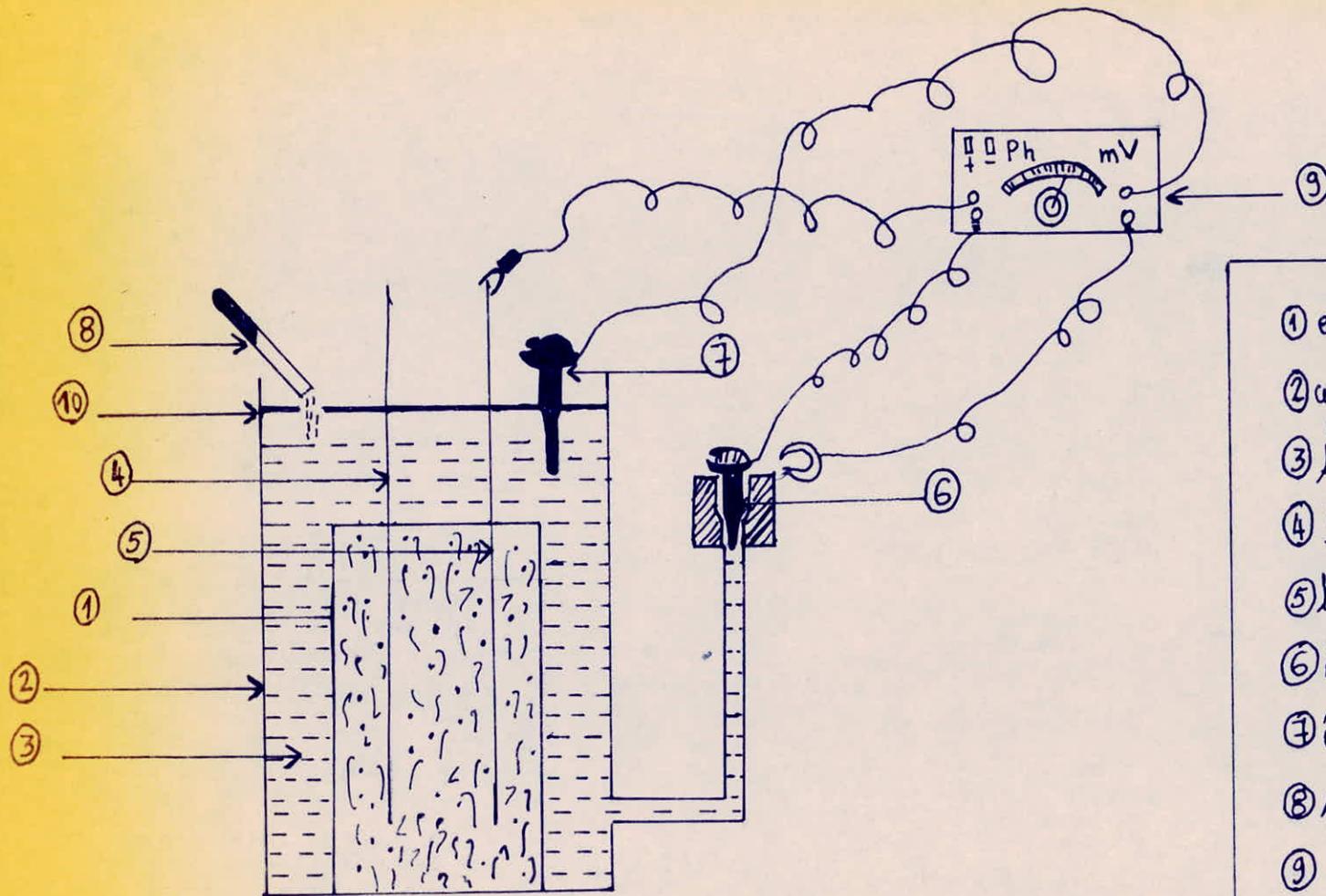
L'Instabilité du potentiel est du et on remarque sur les tableaux à la distance de la tige d'acier à la paroi externe de l'éprouvette.

Les tiges situées à 1 cm accusent beaucoup d'instabilité dans les 3 cas alors que celles, situées à 3 cm et au milieu nous donnent des mesures de potentiel décroissant sans beaucoup de variation.

Les variations de tension sont bien en relation avec l'évolution chimique du ciment, en particulier le 1er changement net dans un temps situé pour la plupart entre 8h et 24h, qui est dépendance avec ce qu'on a convenu d'appeler la fin de prise du ciment.

Le potentiel décroît avec le dosage du béton et aussi avec la distance de la tige considéré à la paroi externe de l'éprouvette. plus la tige est éloignée et plus le potentiel augmente et devient stable.

DISPOSITIF POUR LA MESURE DE LA F.E.M EN FONCTION DU PH



- ① éprouvette de béton $\phi=11,2\text{cm}$, $L=22\text{cm}$
- ② cylindre en plastique $\phi=20\text{cm}$, $L=40\text{cm}$
- ③ solution de NaCl 1N
- ④ tige d'acier étiré $\phi=1,2\text{cm}$, $L=40\text{cm}$
- ⑤ tige d'acier inoxydable $\phi=1,2\text{cm}$, $L=40\text{cm}$
- ⑥ électrode au calomel .
- ⑦ électrode de verre
- ⑧ pipette contenant du H_2SO_4 ou NaOH
- ⑨ pH mètre , millivolt mètre .
- ⑩ Carton épais

2ème REALISATION PRATIQUE
VARIATION DE LA F.E.M EN FONCTION DU PH

Principe:

Dans cette expérience, nous avons étudié la variation de la force électromotrice en fonction du pH de la solution dans laquelle est plongée l'éprouvette de béton.

On mesure la f.e.m existant entre le métal, la solution de NaCl et l'électrode au colomel. Nous avons préparé avec un acier étiré et un acier inoxydable la solution dans laquelle baigne les éprouvettes est une solution de NaCl 1N, ayant un pH initial de 6,7. On fait attaquer cette solution de NaCl par de l'acide sulfurique H_2SO_4 2N, afin de changer le pH du milieu et pouvoir mesurer la f.e.m résultante.

Une fois que la valeur minime du pH est obtenue, on neutralise le milieu obtenu avec une solution de NaOH 2N, jusqu'à ce que le pH dépasse 6,7 et croît en fonction de la solution de NaOH ajoutée.

MATERIAUX:

Ciment: Ciment C.P.A classe 325

Métal: 2 tiges d'aciers diamètre $\varnothing = 12\text{mm}$, longueur $L = 40\text{ cm}$ l'une étirée, l'autre inoxydable.

On fabrique une éprouvette de béton $\varnothing = 11,2\text{ cm}$ $L = 22\text{ cm}$ le béton est dosé à 300 kg/m^3 les 2 tiges sont plongées dans l'éprouvette de béton, à 2 cm chacune du centre et jusqu'à 5 cm du fond de l'éprouvette.

L'éprouvette est logée dans un cylindre en plastique $\varnothing = 20\text{cm}$ $L = 40\text{ cm}$ une solution de NaCl (0,5 n par litre) baigne l'éprouvette. Avant d'être baignée par la solution de NaCl, l'éprouvette a été démontée au bout de 48 heures et plongée dans la solution du NaCl.

..../....

VARIATION DE LA F.E.M EN FONCTION DU PH

Valeur initiale du PH	F.e.m Initiale (mV)	Valeur Finale du PH	F.e.m Finale (mV)
1,3	577	4,1	708
1,8	562	2,2	592
2,9	593	3,4	600
4,2	641	4,2	640
5,0	684	5,1	680
5,8	700	5,6	4,12
6,7	703		
7,9	463	7,5	692
9,0	480	9,3	591
10,4	492	10,2	575
11,3	472	11,2	523
12,4	463	12,1	531

BOIER STIPÉ

Valeur initiale du PH	F.e.m Finale (mV)
1,2	172
1,8	151
2,7	18
4,2	11
5,0	98
5,6	2
6,7	
7,8	14
9,1	58
10,3	97
11,5	122
12,3	220

BOIER INOXYDABLE

.../...

La solution de NaCl à un pH de 6,7 j'ai protégé la solution avec un carton épais jour après jour, j'attaque ma solution avec de l'acide sulfurique H_2SO_4 2N ainsi qu'avec la base NaOH 2N.

Le pH mètre n'indiqua aucun résultat pendant 23 j le 24ème jour, lors de l'attaque du milieu considéré par H_2SO_4 l'aiguille du pH mètre vacilla et indiqua la valeur 5,8. Aussitôt, j'ai pris les mesures de f.e.n; correspondant à l'acier étiré et à l'acier inoxydable.

J'ai continué à attaquer avec du H_2SO_4 , jusqu'à obtenir la valeur du pH = 1,3. Puis j'ai attaqué avec la solution NaOH.

Les parties sortantes des tiges d'acier ont été passé au vernis de silicone qui assure une protection efficace de longue durée.

Les résultats obtenus sont donnés sans forme de tableaux.

..../.....

ETAT DE L'ACIER ÉTIRÉ EN FONCTION DU PH

PH initial	ACIER ÉTIRÉ	Précipité
1,3	teinte noire, recouvert d'hydroxydes jaunes	rouille
1,8	teinte gris - noir légèrement	Legen
2,9	teinte légèrement grise	
4,2	A peine gris, bulles de gaz	
5,0	de même	
5,8	Gris-blanc, bulles de gaz	Léger et blanc
6,7	rien de visible	rien
7,9	gris noir avec rouille par place	abondant rouille couleur d'air
9,0	Noir et dépôt marron	quelques flocons rouille claire
10,4	Noir, brun	quelques flocons
11,3	Net avec quelques adhérence de rouille	quelques flocons
12,4	blanc et gris	

.../...

INTERPRETATION DES RESULTATS

Pour l'acier étiré qui se corrode progressivement sans subir une passivation par formation d'une couche protectrice superficielle on relève le pH initial (des l'instant où la solution ajoutée rentre en contact avec le milieu considéré) et le pH final (lorsque le milieu est stable). A chacun de ces pH correspond une f.e.n.

Pour l'acier inoxydable, on ne peut relever qu'une seule valeur de pH, il n'ya pas sensiblement de variation l'acier inoxydable subit une passivation.

La tension initiale est très variable d'une attaque à une autre le pH varie faiblement surtout dans le cas de la solution acide.

On remarque aussi que les formations de rouille ne prennent jamais un aspect d'attaque intense où tout le fer est rongé. Ce qui nous amène à considérer la relation entre l'effet de corrosion et le pH du milieu ambiant.

On admet qu'une fois que le pH atteint une valeur voisine de 10, l'acier étiré est à peu près inaltéré le tableau de mesure relevé est en concordance avec le diagramme de Pourbaix.

Tous les points figuratifs jusqu'à pH = 5,0 sont la zone de corrosion pour les pH de 5,8 et 7,9, on est à la limite de la corrosion et de la zone de passivité, pour toutes les autres valeurs, nous sommes dans la zone de passivité qui se traduit par un changement de couleur de l'acier et la présence de quelques bulles gazeuses.

.../...

3ème REALISATION PRATIQUE

L'ADHERENCE DES TIGES D'ACIERS DIFFEREMMENT CORRODEES

A. UN BETON DOSE A 300 KG/M3

L'Adhérence est le fait que l'acier nu adhère au ciment hydrodé qui vient à son contact et l'ensemble.

L'Adhérence exige soit une affinité directe, qui peut-être d'ordre chimique, physico-chimique ou électrochimique, entre les 2 matériaux en contact, soit l'existence d'un élément intermédiaire de liaison à l'interface résultant par exemple d'une interaction chimique.

Le maintien de l'adhérence suppose la similitude de certains caractéristiques mécaniques.

On notera, par exemple, que le verre, l'acier et le béton ont des coefficients de dilatation du même ordre (de 9 à 11 millionème de la longueur par degré centigrade en plus ou en moins).

L'Adhérence chimique peut exister par l'intermédiaire des oxydes à l'interface, et se maintenir à différentes températures sans contraintes excessives.

Par contre, les efforts appliqués peuvent intervenir défavorablement à partir d'un certain taux pour le bon maintien de l'adhérence, soit dans la phase élastique, par suite de la différence des modules d'élasticité, soit plus encore dans la phase plastique, l'un des matériaux étant fragiles, c'est-à-dire n'ayant qu'un très faible domaine de déformation plastique.

En ce qui concerne l'adhérence, l'acier et le béton s'associent très bien, car la chaux provenant du ciment forme au contact de l'acier un "ferrite de chaux" assurant la liaison et protégeant contre la formation de rouille.

.../...

.../...

Dans la corrosion du béton armé, on distingue l'attaque du béton lui même et l'attaque des fers, mais les deux corrosions très différentes sont presque toujours indépendantes.

La corrosion du ciment diminue on supprime la protection des armatures contre les ambiances agressives, parfois ce sont les produits même introduits ou existant dans le béton; soit dans le ciment, soit dans les agrégats qui provoquent la corrosion des aciers du béton.

Certains fissures du béton peuvent causer des altérations, par contre l'altération des fers, peut altérer la texture du béton, et produire l'éclatement de celui-ci.

À l'humidité et en présence d'oxygène les aciers ont tendance à former aussitôt du fer hydroxé (la rouille) $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

De son côté le ciment, par hydrolyse de ses silicates libère la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

La chaux, basé forte réagit sur l'oxyde ferrique et donne un film adhérent de ferrite de chaux suivant la réaction. $2\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = 2(\text{FeO}_2)\text{Ca} + 4\text{H}_2\text{O}$.

Le film de ferrite de chaux n'est ni gonflant, ni pareux, ni attaqué par l'eau : il est adhérent.

Notre expérience consiste à étudier l'adhérence entre des tiges d'acier différemment corrodés et un béton dosé à 300 kg et fait à partir du ciment C.P.A. On tire sur les éprouvettes (machine de traction) et on observe par la lecture de la force de traction, quelle est la tige qui adhère le plus au béton.

...../.....

.../...

MATERIAUX:

Ciment portland C.P.4 classe 325

béton dosé à 300 kg/m³

4 tiges d'aciers \emptyset 14 mm proprement rectifiées

L = 20 cm.

On plonge 3 des tiges d'aciers separement dans une solution de NaCl 0,5M par litre les tiges sont plongées complètement.

Une première tige reste 12 jours dans la solution, la deuxième 14 jours, la troisième 16 jours, la quatrième reste à l'air libre.

On retire les tiges d'acier des solution de NaCl, et on introduit chacune d'elles (y compris celle qui restée à l'air libre) dans des éprouvettes de béton dosé à 300 kg/m³ les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes normalisées 7 cm x 7 cm x 28 cm.

De chaque tige, on laisse emerger 5 cm à l'air libre pour pouvoir tenir la tige dans les mors de la machine à traction.

Pour éviter que le béton ne s'effrite, nous avons fabriqué un dispositif qui puisse maintenir convenablement les éprouvettes (voir photo).

.../...

.../...

ETUDE DES GRAPHES:

On remarque, pour tous les diagrammes que la charge augmente au débit peut à peu, cela veut dire que le béton continue à adhérer à l'acier; puis le béton cède: cela se traduit sur le diagramme par un pic; un point net: le béton n'adhère plus à l'acier, la charge diminue considérablement jusqu'à ce que la tige sort complètement de l'éprouvette.

ETUDE DU DIAGRAMME DE LA TIGE D'ACIER N° 1

Cette tige est restée pendant 16 jours dans NaCl, cela veut dire qu'avec le temps, elle s'est corrodée, pas très profondément. On remarque pour cette tige: que le béton n'adhère plus ou très peu à l'acier à partir de la force de traction 1,06 t.

Tige d'acier n°2:

Cette tige d'acier est restée pendant 14 jours dans NaCl elle s'est corrodée: présence d'une couche de rouille qui l'enveloppe pour cette tige, le béton n'adhère plus ou très peu à l'acier à partir de la force de traction de 1,06 t très voisine de 1,06 t de la 1ère tige.

Tige d'acier n° 3

Cette tige d'acier est restée pendant 12 jours dans NaCl elle s'est moins corrodée que les autres, présence d'une mince couche de rouille.

Pour cette tige le béton n'adhère plus à l'acier à partir de 1,22 t c'est une grande valeur par rapport à 1,06 t: valeurs correspondantes aux tiges n° 1 et tige n° 2.

.../...

.../...

ETUDE DE LA TIGE N° 4

Cette tige d'acier est restée à l'air libre, elle n'a pas été attaquée par NaCl. Son diagramme de traction nous indique 2 pics net, l'un est due à une charge de 0,91t l'autre est due à une charge plus grande: 1,470 t. Pourquoi 2 pics? c'est seulement due à l'hétérogénéité, de la tige d'acier qui était restée à l'air, après le premier pic le béton cède puis se reprend; il se réaffirme une deuxième fois et adhère encore à l'acier jusqu'à la force de la traction 1,470t. On voit bien d'après ce diagramme que le béton est élastique.

C O N C L U S I O N

L'Etude de ces diagrammes nous permet de conclure que le béton adhère plus à un acier propre, net, sans trace de rouille.

-Que l'adhérence dépend du degré de corrosion de l'acier.

-Que les bétons exposés à l'atmosphère marine perdent rapidement une de leurs propriétés fondamentales: l'adhérence au contact de l'eau marine et l'air marin qui contiennent tous deux du NaCl: principal agent de corrosion des armatures dans le béton armé.

-On peut définir à l'aide d'un graphique s'appuyant sur les résultats précédents, une zone d'adhérence entre l'acier $\varnothing = 14$ mm et un béton désé à 300 kg/m³ (ciment C.P.A classe 325).

Ce béton armé est supposé exposé à l'atmosphère marine.

ZONE D'ADHÉRENCE
DE L'ACIER LISSE $\phi = 14$ mm
ET DU BÉTON DOSE À 300 kg/m³

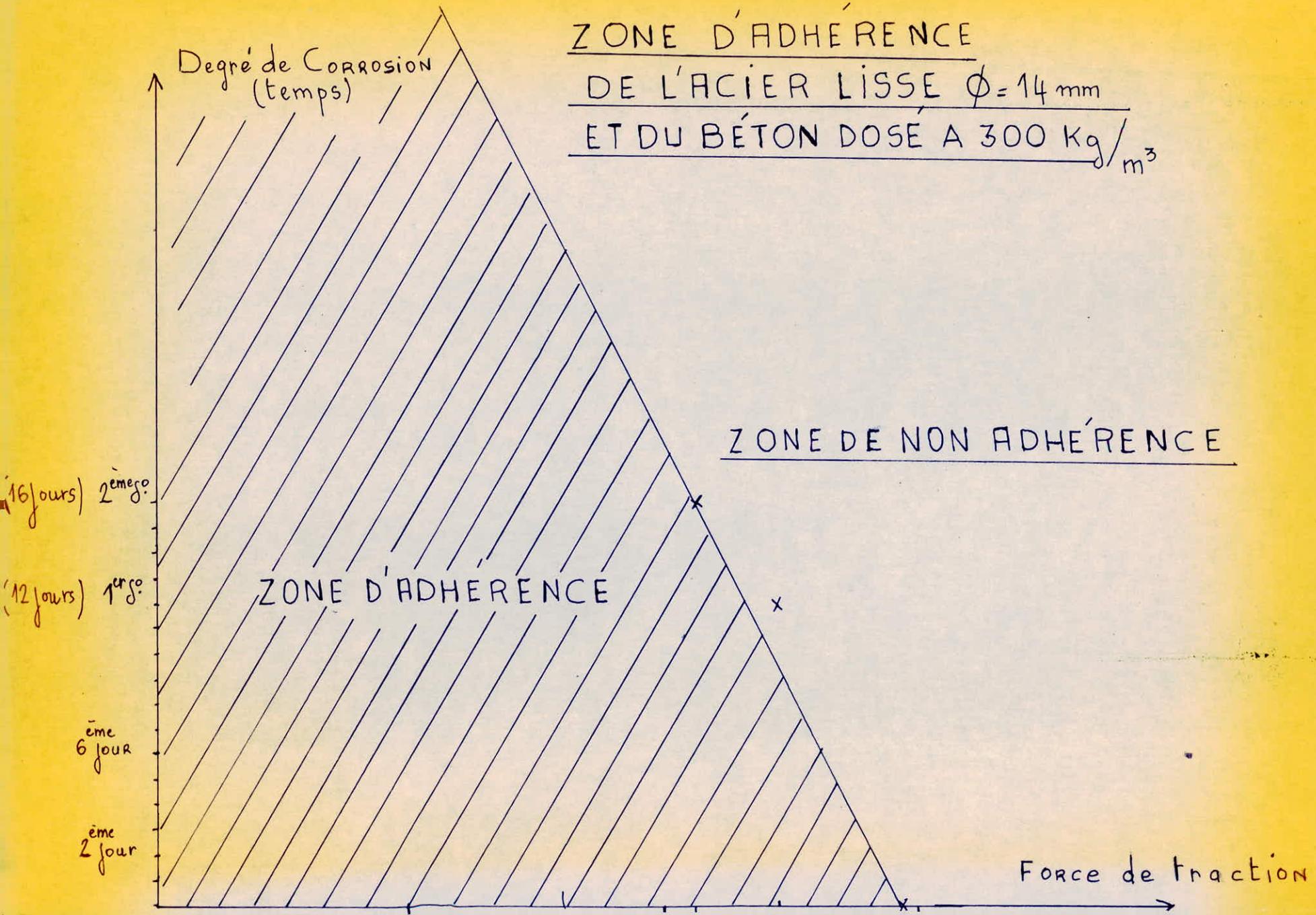


DIAGRAMME DE TRACTION
DE LA TIGE D'ACIER N°1
(celle qui est laissée 16 jours dans NaCl)

BP 018/75

(1)

point de non adhérence entre l'acier et le béton correspondant
à une charge de 1,06t

FORCE DE TRACTION

2,5t

5t

7,5t

10t

Durée de La traction

DIAGRAMME DE TRACTION

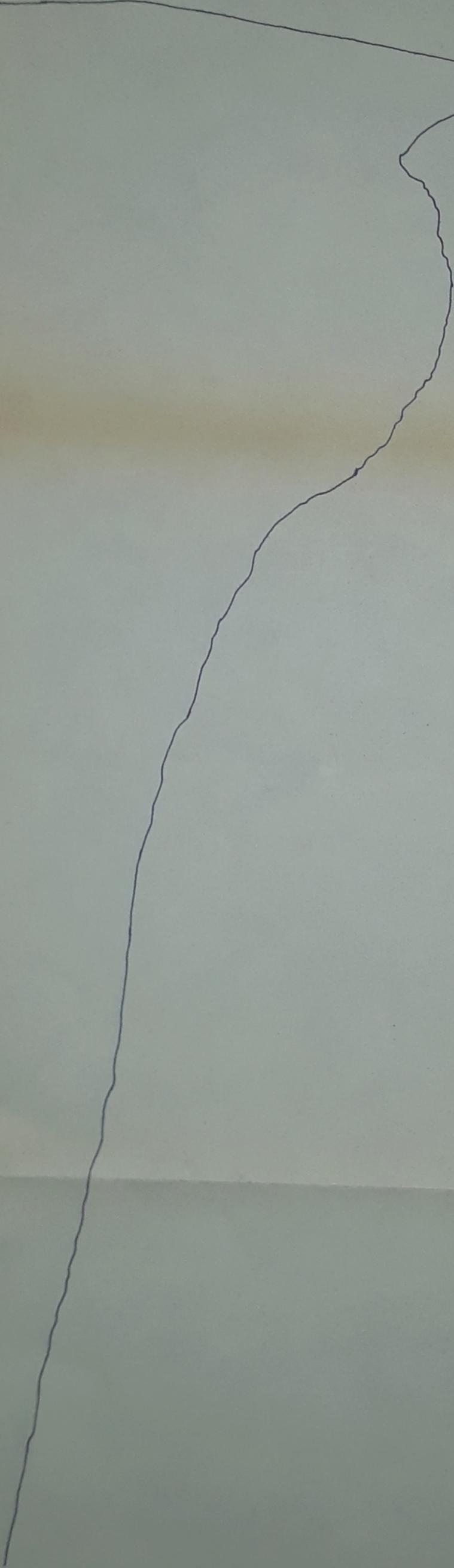
DE LA TIGE D'ACIER N° 3

(celle qui est laissée 12 jours dans NaCl)

BPD18/7

(2)

point de non adhérence entre l'acier
et le béton correspondant à une charge
de 1,220t



0,5t

1t

FORCE DE TRACTION

DE LA TIGE D'ACIER N° 2
(celle qui est laissée 14 jours dans NAACL)

BP 018/75
(3)

point de non adhérence entre l'acier
et le béton correspondant à une charge de 1,065t

0,5t

1t

1,5t

2t

FORCE DE TRACTION

Durée de la traction

BPO 18/75

(4)

DIAGRAMME DETRACTION

DE LA TIGE D'ACIER N°4

(Celle qui était exposé à l'air)

1^{er} point de rupture entre l'acier et le béton
correspondant à une charge de 0,91t

2^{ème} point de rupture

entre l'acier et le béton correspondant
à une charge de 1,470 t

FORCE DE TRACTION

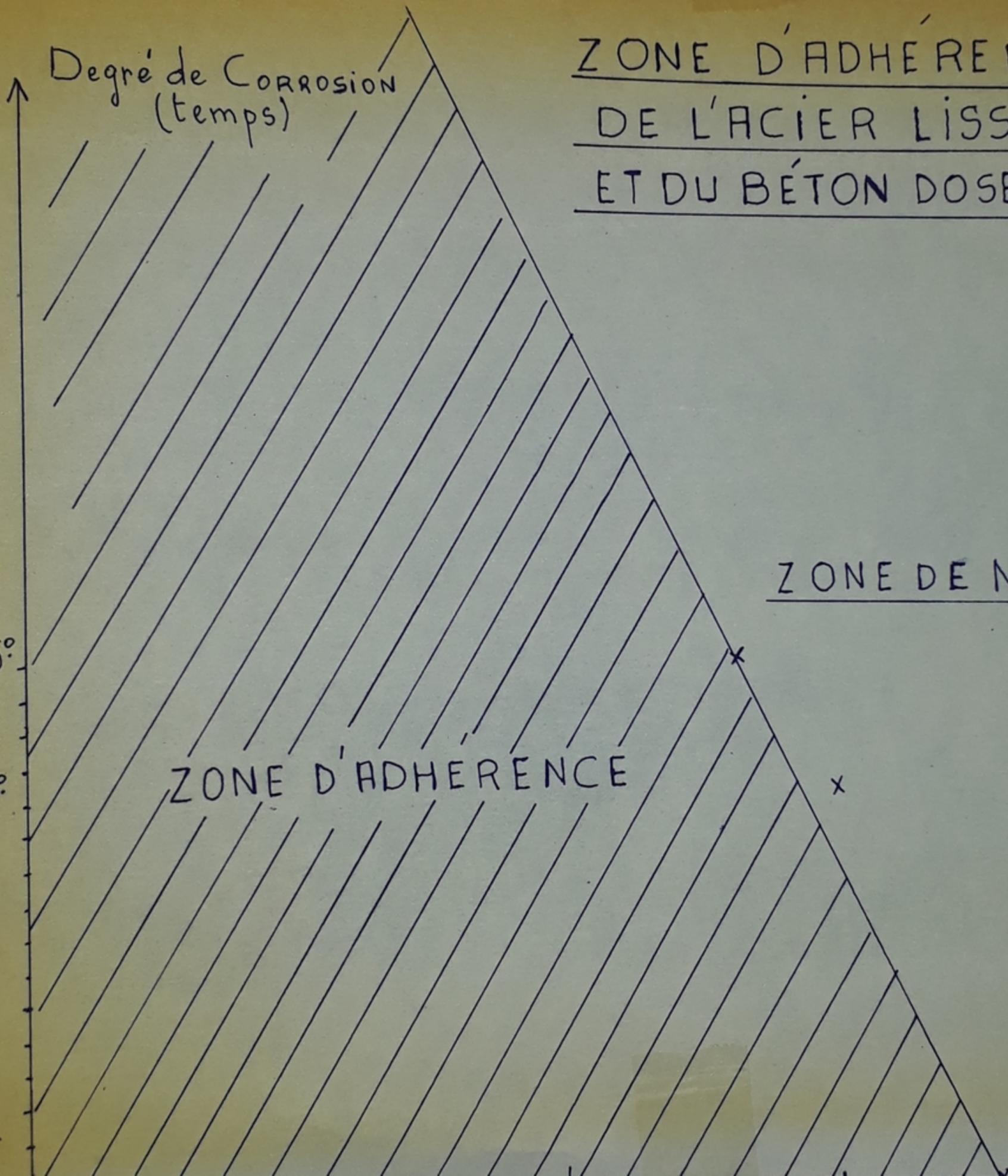
0,5t

1t

1,5t

2t

ZONE D'ADHÉRENCE
DE L'ACIER LISSE $\phi = 14$ mm
ET DU BÉTON DOSE A 300 Kg/m^3



ZONE DE NON ADHÉRENCE

ZONE D'ADHÉRENCE

Force de traction →

Degré de Corrosion
(temps)

(16 jours) 2ème jour

(12 jours) 1er jour

6ème jour

2ème jour

