

ECOLE POLYTECHNIQUE
DE THIES

DEPARTEMENT: MECANIQUE

PROJET

Gm. 0631

DE FIN D'ETUDES

THEME: EVALUATION DE L'ETAT
DE CORROSION PAR LES
ULTRA _ SONS

AUTEUR: ABDOULAYE N'DIAYE

DIRECTEUR: MAURICE DUVAL

REMERCIEMENTS

- Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à M. MAURICE DUVAL, par d'une part l'intérêt lié au sujet qu'il m'a proposé, et d'autre part par les orientations opportunes qu'il a su donner à mon ^{travail} durant toute la session.
- Mes remerciements vont aussi à l'endroit de M. JEAN CLAUDE WARMOES et par sa disponibilité, ses conseils précieux qui ont amplement contribué à l'aboutissement de ce travail.
- Je ne saurais tourner cette page sans remercier le personnel du centre de calcul qui n'a ménagé aucun effort pour me prêter l'assistance qu'il faut.

SOMMAIRE

L'ingénieur, dans sa vie de tous les jours, est constamment confronté à des problèmes d'exploitation et de contrôle.

Dans le domaine des canalisations métalliques où l'action corrosive cause beaucoup de dégâts, le contrôle relève d'une grande importance.

Bien souvent des réseaux sont abandonnés à leur sort, ils périssent et les collectivités ne bénéficient plus, dans le temps, des services qu'elles ~~sont~~ en droit d'en attendre.

Cette étude s'attèle surtout à guider le chargé de l'entretien dans le déroulement du contrôle.

A partir des résultats obtenus sur le traitement de séries statistiques observées ou simulées le contrôleur pourra localiser les zones de faible épaisseur et en déduire suivant les conditions d'exploitation la durée de vie probable des composants du réseau.

TABLE DES MATIERES

	Page
Page - titre	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
Table des matières	iv
INTRODUCTION	1
PARTIE I	
DONNEES SUR LA CORROSION	
CHAP I : POSITION DU PROBLEME	3
CHAP II : NOTIONS D'ELECTRO - CHIMIE	5
I LES TYPES DE PILES	5
I.1 Les piles à électrodes dissémblables	5
I.2 les piles de concentration	5
I.3 les piles de températures différentielles	6
II LES ASPECTS DE LA CORROSION	8
II.1 L'attaque uniforme	8
II.2 Les piqûres	8
II.3 La Corrosion sélective	9
II.4 La Corrosion intergranulaire	9

II. 5	La fissuration	10
CHAP III :	FACTEURS	11
	DETERMINANTS DE LA CORROSION	
	DES CANALISATIONS DE FER ET	
	D'ACIER	
I.	LE MILIEU AQUEUX	11
I. 1	Influence de l'oxygène	11
	dissous	
I. 2	Influence de la température	13
I. 3	Influence du pH	13
I. 4	Influence du couplage	16
	galvanique	
I. 5	Influence de l'agitation	16
	sur la corrosion dans les eaux	
	naturelles	
I. 6	Influence des sels dissous	18
II -	LES FACTEURS METAL-	21
	LURGIQUES	
II. 1	Différents types de fer et d'acier	21
II. 2	Influence de la Composition	21
II. 3	Effets galvaniques dus au coupla-	22
	ge d'aciers de composants	
	différents	

PARTIE II

TRAITEMENTS STATISTIQUES	23
ET SIMULATIONS	
CHAP I : PREPARATION D'UN PLAN	23
D'ECHANTILLONNAGE	
I : AVANT - ECHANTILLONNAGE	23
II : ECHANTILLONNAGE	26
III : LE CONTROLE	29
III.1 Examen visuel	29
III.2 Inspection par ultra-sons	29
III.3 Examen radiographique	29
CHAP II : ANALYSES STATISTI-	31
QUES	
I NATURE DU PHENOMENE	31
ETUDE	
II AJUSTEMENT PAR UNE LOI	32
THEORIQUE	
CHAP III SIMULATION DE PROFILS	34

PARTIE III

RESULTATS	41
CHAP I : COMPILATION D'OBSER-	41
VATIONS EXPERIMENTALES	

I. ANALYSE GRAPHIQUE	42
II. AJUSTEMENTS	43
II. 1 loi normale	43
II. 2 loi log-normale	43
III DETERMINATION DE LA DUREE DE VIE	44
III. 1 Vitene de Corrosion	44
III. 2 Durée de vie	45
CHAP II : APPLICATION DE LA SIMULATION	47
I. AJUSTEMENT DE LA SERIE SIMULEE	47
II. REGRESSION LINEAIRE	47
CONCLUSION	50
APPENDICES	
A. METHODES STATISTIQUES UTILISEES	51
I. LA LOI NORMALE	51
II. LOI LOG. NORMALE	53
III. LOI BETA	55
IV. VALIDITE DE L'AJUSTEMENT D'UNE LOI THEORIQUE A UNE DISTRIBUTION OBSERVEE	57

B. METHODES DE SIMULATION	61
I. GENERATION D'UNE DISTRIBUTION CONTINUE	61
II. GENERATION D'UNE DISTRIBUTION NORMALE	62
C. TABLES	63
C.1 Distribution de χ^2	63
C.2 Facteurs de Conversion	65
C.3 Classification des fem normales	66
C.4 Susceptibilité à la Corrosion et potentiels d'électrodes	67
D. PROGRAMME PRINCIPAL	68
E. ORGANIGRAMME	

INTRODUCTION

Cette étude a pour objet l'évaluation de l'état de corrosion par les ultra-sous. Cette évaluation dans les systèmes de tuyauterie en service depuis de nombreuses années est un problème commun dans l'industrie. Elle est régie par des facteurs techniques et économiques. Les facteurs qui nous intéressent en particulier sont l'accessibilité et parfois la nécessité d'une inspection en service.

Les méthodes pour mesurer les épaisseurs résiduelles sont la radiographie et les ultra-sous. Cette dernière méthode qui est de loin la plus simple et la moins coûteuse mais qui a le défaut de ne donner que des mesures ponctuelles fera l'objet de ce projet.

A partir des données de corrosion, on va simuler des profils de corrosion susceptibles d'être retrouvés dans un système de tuyauterie.

En entreprenant cette étude, notre

intention est surtout de trouver un modèle schématisant le phénomène de corrosion dans un système de tuyauterie.

Pour mener à bonne fin cette recherche, l'ordinateur a été largement utilisé.

PARTIE I

DONNEES SUR LA CORROSION

CHAPITRE I

POSITION DU PROBLEME

Dans cette étude on ne s'intéressera à la corrosion que dans des cas d'altération des propriétés physiques et mécaniques d'un métal, cas dans lesquels l'humidité est présente.

Si l'on considère un métal dans un milieu agressif humide, on peut comprendre que les phénomènes qui peuvent intervenir sont nombreux et complexes. On peut trouver par exemple le pH comme facteur physique fondamental.

La nature du milieu interviendra. Les canalisations métalliques sont des tubes en métaux ferreux (fontes et aciers), en cuivre ou en plomb. Ces matériaux sont caractérisés par la composition de l'alliage, par les traitements thermiques et mécaniques de fabrication, par l'état superficiel etc...

Le milieu agressif est un liquide ou un gaz humide. Et ces milieux sont très différenciés de par leur structure physique, leur nature chimique, en particulier leur teneur en oxygène.

A ce stade on voit que l'évolution des phénomènes dépendra des valeurs d'un très grand nombre de paramètres et des variations de ces paramètres au cours du temps.

Le phénomène primaire de toute corrosion résulte de l'action de l'eau sur un métal, et cette action est admise comme étant de nature essentiellement électrochimique.

CHAPITRE II

NOTIONS D'ELECTROCHIMIE

I LES TYPES DE PILES

Il ya 3 principaux types de piles qui prennent part aux reactions de corrosion electrochimique.

I. 1 Les piles à electrodes dissemblables

Ce type de piles résulte de dissymétries de structure et de composition du metal et de ce qui l'environne. Un metal contenant des impuretés conductrices à sa surface en phase dispersée ou un tube d'acier relié à un tube de fer sont des exemples de ce type de piles. Ces piles comprennent aussi un metal travaillé à froid en contact avec le même metal recuit.

I. 2 Les piles de concentration

Ces sont des piles constituées de 2 electrodes identiques en contact avec une solution différente. Il ya 2 types de telles piles :

— La pile de concentration saline

Il s'agit de deux electrodes constituées du

même métal baignant dans des solutions de leur sel de concentration différente (voir fig 1). En court-circuitant une telle pile, le métal se dissout de l'électrode en contact avec la solution diluée (anode) et se dépose sur l'autre électrode (cathode).

— La pile d'aération différentielle : Fig 2
 Cette pile résulte de la configuration de deux électrodes : l'une étant dans une solution aérée (cathode), l'autre dans une solution désaérée (anode). La différence de concentration en oxygène produit une différence de potentiel et cause un écoulement de courant. Ce type de piles explique les dégâts importants dans les fissures, telles que celles formées à l'interface de deux tubes couplés, ou d'embouts vissés parce que la concentration en oxygène est plus faible à l'intérieur de la fissure ou des filets, que partout ailleurs.

I. 3 Piles de températures différentes

Les composants de telles piles sont des électrodes de même métal, travaillant à différentes températures, immergées dans un

electrolyte de même composition initiale.

Ces piles se produisent dans les échangeurs de chaleur, dans les chaudières, les éléments de chauffage par immersion etc...

En pratique les piles responsables de la corrosion peuvent être une combinaison de ces trois types.

Théoriquement tous les mécanismes que nous venons de voir tendent vers un état d'équilibre entre le métal et les ions, mais en réalité, cet équilibre ne peut être atteint au voisinage du métal. C'est donc dire que le phénomène primaire est suivi de phénomènes secondaires qui peuvent avoir une grande importance sur l'évolution du phénomène global. On peut entre autres noter la migration des ions dans la solution, l'action chimique de ces ions sur la solution agressive, le dépôt de précipités plus ou moins poreux qui peut accélérer ou ralentir l'attaque du métal en profondeur.

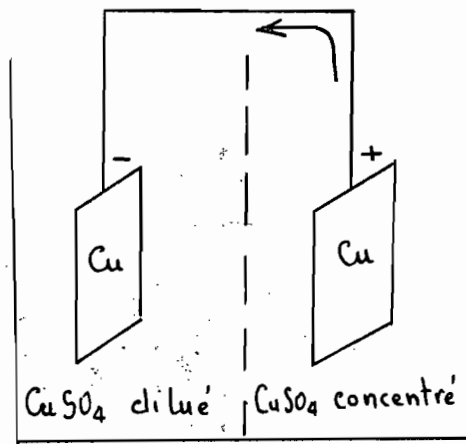
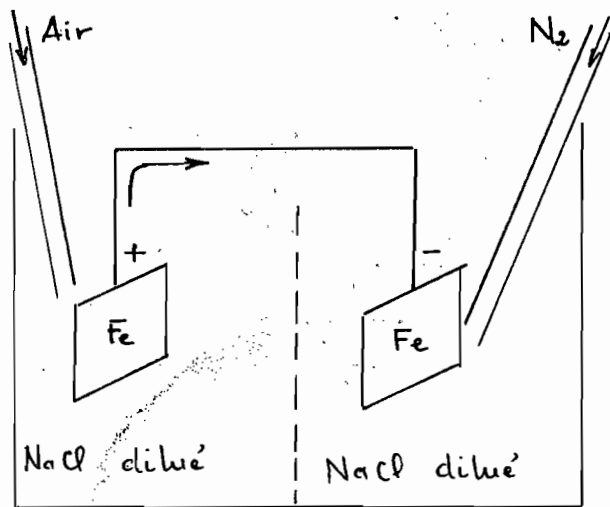
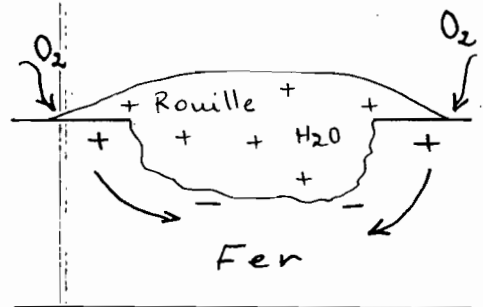


Fig 1: Pile de concentration saline



a)



b) Rouille - Fer

Fig 2: a - b Piles d'aération différentielle

II LES ASPECTS DE LA CORROSION

On trouvera ici les quelques principaux types de corrosion, qui sont classés en tenant compte de l'apparence extérieure ou de l'altération des propriétés physiques.

II. 1 L'attaque uniforme

La vitesse de l'attaque uniforme est mesurée avec diverses unités, la terminologie courante étant la pénétration en mm/an et les $\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{f}$. Ces unités se rapportent à la pénétration dans le métal ou à la perte de poids de métal, et tiennent compte des produits de corrosion adhérents ou non adhérents à la surface.

Pour l'utilisation dans les milieux chimiques, les métaux ont été classés en groupes suivant leur vitesse de corrosion. Et on indique que pour les canalisations, les corps de valves etc..., les vitesses de corrosion admises se situent entre 0,125 et 1,25 mm/an.

II. 2 Les piqûres

C'est un type d'attaque localisée, la vitesse de corrosion étant plus grande en des sites préférentiels de la surface.

De nombreux métaux subissent une corrosion par piqûres appelée attaque par cavitation ou parfois érosion - corrosion, quand ils sont soumis à l'action de liquides s'écoulant à grande vitesse.

Les tubes de Condenseurs en cuivre ou en laiton, par exemple, sont sujets à ce type de corrosion.

II. 3 La corrosion sélective

Dans la corrosion sélective un ou plusieurs composants réactifs de l'alliage se corrodent préférentiellement, laissant un résidu poreux qui peut garder la forme initiale de l'alliage. La dézincification est une attaque sélective qui se produit dans les alliages de zinc, par exemple dans le laiton; le zinc se corrodant préférentiellement.

Les alliages à base de cuivre qui contiennent de l'aluminium sont sujets à cette forme de corrosion, l'aluminium se corrodant préférentiellement.

II. 4 La corrosion intergranulaire :

C'est un type d'attaque localisée aux joints de grains d'un métal, conduisant à une perte de résistance et de ductilité.

Le joint de grain du métal, d'aire limitée, agissant comme anode, est en contact avec de grandes surfaces de grains qui se comportent comme des cathodes. L'attaque est souvent rapide, pénétrant profondément dans le métal.

II. 5 La fissuration

Si un métal se fissure lorsqu'il est soumis à des efforts de traction répétés dans un milieu corrosif, le métal cassant après un certain nombre de cycles d'efforts, on dit qu'il se rompt par fissure - corrosion. Ceci est dû au fait qu'une vraie limite d'endurance n'existe pas habituellement dans un milieu corrosif, le métal cassant après un certain nombre de cycles d'efforts, si faible que soit la valeur de l'effort.

Dans le cas où l'effort de traction est constant, on parle de rupture par "fissuration par corrosion sous tension". La contrainte peut être résiduelle ou résulter d'un effort externe appliqué.

CHAPITRE III

FACTEURS DETERMINANTS DE LA CORROSION DES CANALISATIONS DE FER ET D'ACIER

I LE MILIEU AQUEUX

I.1 Influence de l'oxygène dissous :

I.1.1 L'eau saturée d'air :

Le phénomène est montré à la figure 3.

Dans l'eau saturée d'air, la vitesse de corrosion initiale peut atteindre $100 \text{ mg/dm}^2 \cdot \text{j}$ [1].

Cette vitesse diminue après une période de quelques jours, lorsque le film d'oxyde de fer (rouille) est formé et qu'il agit comme barrière de potentiel.

La vitesse de corrosion dans cet état stable peut être de 20 à $25 \text{ mg/dm}^2 \cdot \text{j}$ [1].

En absence d'oxygène et à température ambiante, cette vitesse est négligeable pour le fer et l'acier.

I.1.2 Pressions partielles d'oxygène :

La figure 4 montre qu'au delà d'une concentration critique de $12 \text{ cm}^3/\text{l}$, la vitesse tombe

à une faible valeur. On constate également, en présence d'eau distillée, un écart à la relation linéaire donnant la vitesse de corrosion en fonction de la concentration en O_2 .

La valeur critique de la concentration augmente avec les sels dissous et avec la température et décroît avec l'augmentation de l'agitation et du pH.

Pour un pH voisin de 10 la concentration critique de O_2 atteint la valeur de l'eau saturée, $6 \text{ cm}^3/\text{l}$. Elle est encore plus faible pour des solutions alcalines.

Pour de plus hautes pressions partielles d'oxygène, tout l'oxygène qui atteint la surface ne peut être réduit, l'excès est alors disponible pour former le film d'oxyde passif.

I.1.3 L'action des bactéries anaérobies :

Ces bactéries prolifèrent seulement dans des conditions d'absence plus ou moins totale d'aération, et dans le domaine de pH compris entre 5,5 et 8,5.

La corrosion du fer dans les eaux naturelles, anormalement élevée, a été attribuée à ces bactéries. Ces bactéries réduisent les sulfates

inorganiques en sulfures en présence d'hydrogène ou de matières organiques, et sont accélérés dans ce processus par la présence du fer. Le rôle de la bactérie est donc d'agir comme dépolarisant.

I. 2 Influence de la température

Quand la corrosion est contrôlée par la diffusion de O_2 , la vitesse de corrosion pour une concentration donnée augmente avec la température. La figure 5 illustre l'évolution du phénomène selon que le système est clos ou non. La chute de la vitesse de corrosion au-dessus de $30^\circ C$ est liée à une diminution marquée de la solubilité de O_2 dans l'eau quand la température s'élève.

En système fermé la réaction va continuer jusqu'à ce que tout l'oxygène soit consommé. Dans le cas où la corrosion est contrôlée par le dégagement de H_2 , la vitesse augmente plus rapidement avec la température que précédemment.

I. 3 Influence du pH

L'influence du pH sur la corrosion du fer, dans de l'eau aérée, à la température au-

biente, est montrée à la figure 6.

La figure montre trois domaines :

- Dans le domaine de pH compris en 4 et 10, la vitesse de corrosion est indépendante du pH et dépend de la vitesse à laquelle l'oxygène diffuse vers la surface du métal. La principale barrière de diffusion que représente l'hydroxyde ferreux est continuellement renouvelée par le processus de corrosion.

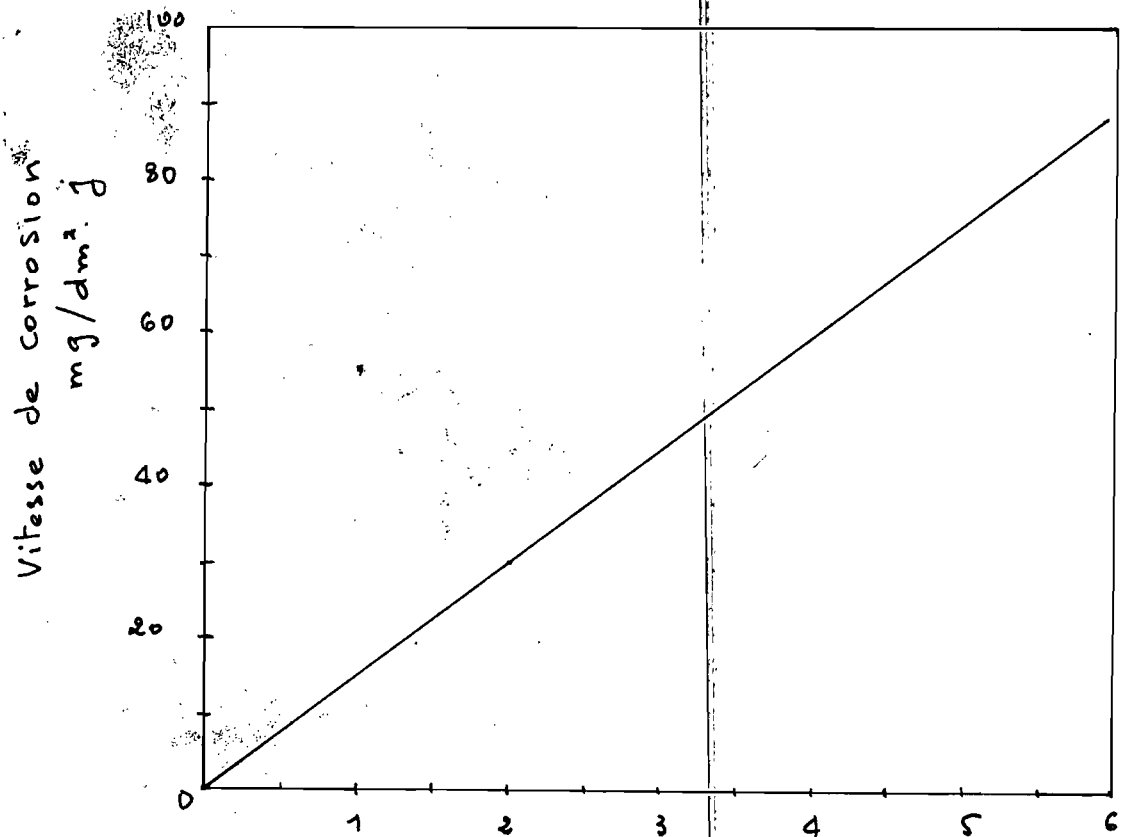
Compte tenu du pH de l'eau dans ce domaine la surface du fer est toujours en contact avec une solution alcaline saturée d'hydroxyde ferreux hydratée, dont le pH est environ 9,5

- Dans le domaine de $\text{pH} < 4$, le film d'oxyde est dissous et le pH à la surface du fer diminue, le fer est plus ou moins en contact avec une solution aqueuse.

L'augmentation de la vitesse de corrosion, résulte à la fois, d'une vitesse appréciable de dégagement d'hydrogène et de dépolari-sation par l' O_2

- Au dessus de pH 10, l'augmentation de l'alcalinité du milieu accroît le pH à la

surface du fer. La vitesse de corrosion diminue car le fer devient rapidement passif en présence d'alcali et d' O_2 dissous.



Concentration en O_2 dissous cm^3/l

Fig 3: Influence de la concentration en O_2 sur la corrosion d'un acier doux dans de l'eau faiblement agitée, à $25^\circ C$, contenant du $CaCl_2$

(Essais: UHLIG, TRIADIS et STERN)

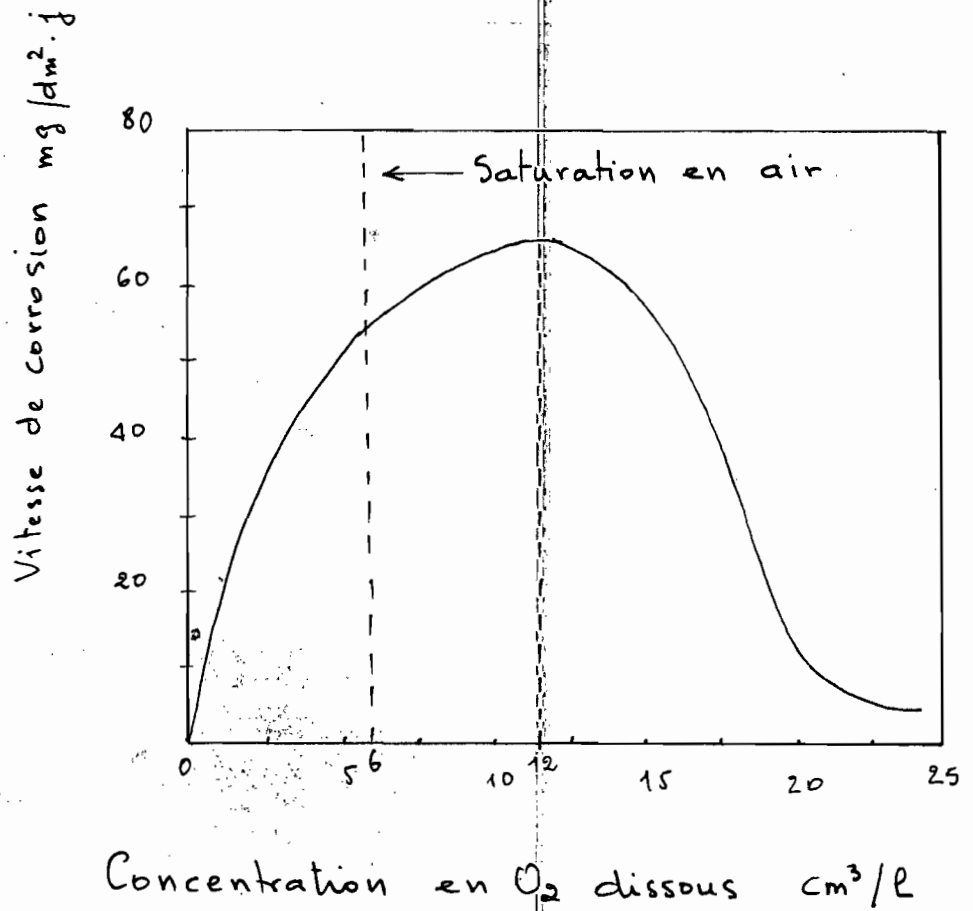


Fig 4 : Influence de la concentration en O_2 sur la corrosion d'un acier doux dans de l'eau distillée, faiblement agitée, à la température ambiante (UHLIG, TRIADIS et STERN)

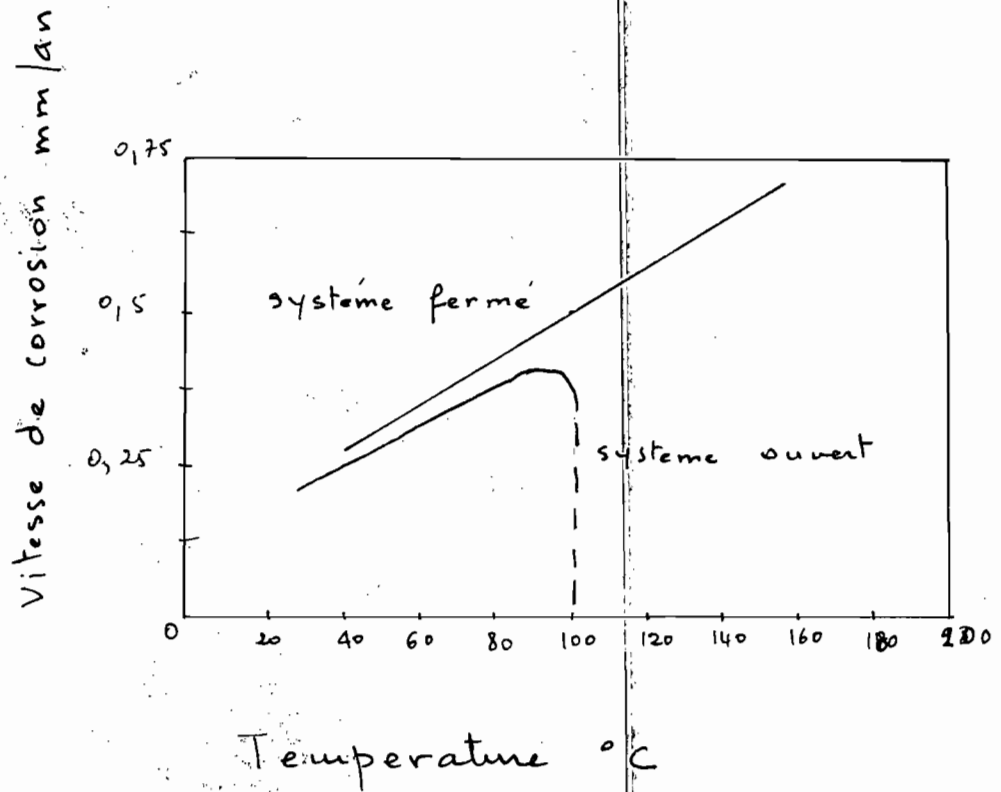


Fig 5 : Influence de la température sur la corrosion du fer dans l'eau contenant de l' O_2 dissous (Corrosion, Causes and preventions, F. SPELLER, p.168, Mc-Graw Hill, 1951)

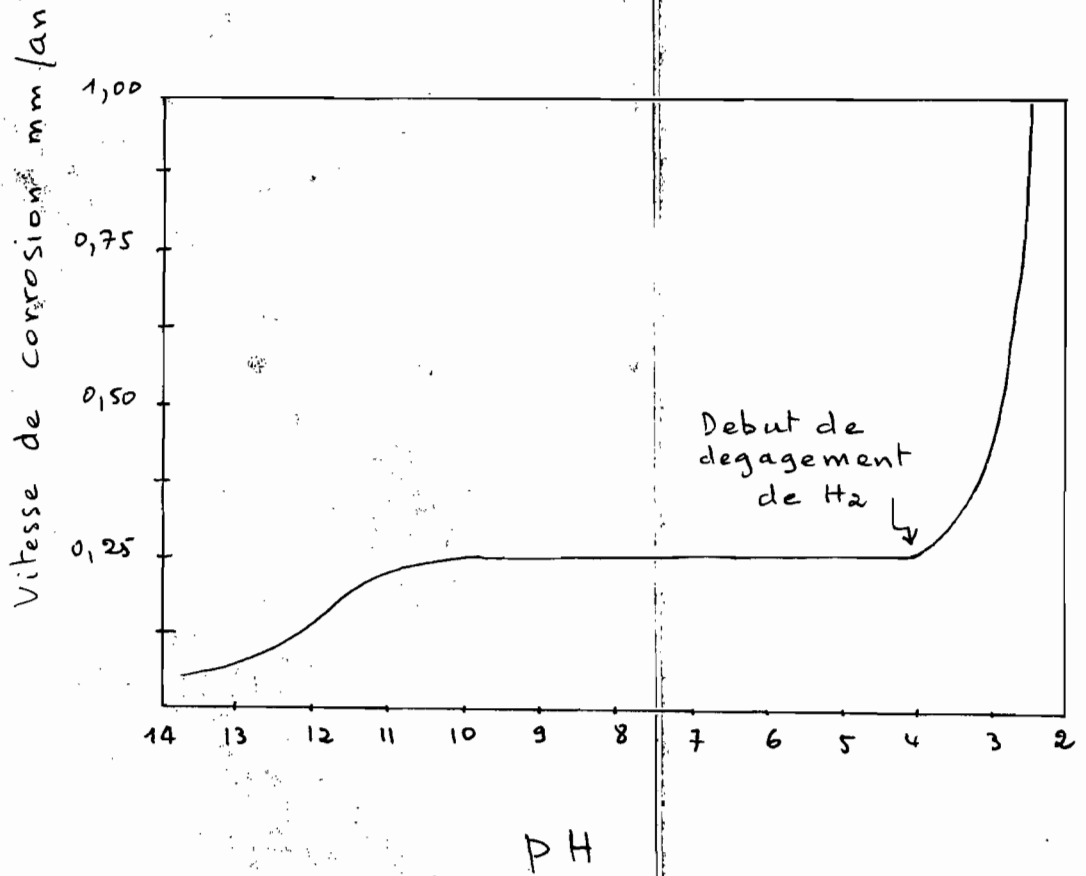


Fig 6 : Influence du pH sur la corrosion du fer dans l'eau aérée, à température ambiante

(WHITMAN, RUSSEL ET ALTIERI)

I. 4 Influence du couplage galvanique :

Les expériences de WHITMAN et RUSSEL établissent que la perte de poids du fer couplé au cuivre était la même que si toute la surface était du fer. Elles montrent aussi que la pénétration réelle dans le fer augmente quand celui-ci est couplé à un métal plus noble. Cela met en évidence l'influence du couplage galvanique sur la vitesse de corrosion du métal le moins noble. Tous les métaux nobles accélèrent la corrosion de manière identique sauf si le film d'oxyde de surface, par exemple sur le plomb, agit comme barrière de diffusion de l'oxygène ou si le métal est un mauvais catalyseur de la réduction de l' O_2 .

I. 5 Influence de l'agitation sur la corrosion dans les eaux naturelles : Fig. 7 :

Dans les eaux naturelles, le pH est généralement trop élevé pour que le dégagement de H_2 joue un rôle important.

L'agitation de l'eau augmente tout d'abord la vitesse de corrosion en apportant plus d' O_2

à la surface du métal (dépolarisant)
 . Pour des agitations assez fortes, de l'oxygène en quantité suffisante peut atteindre la surface et créer une passivité partielle. Si cela se produit, la vitesse de corrosion diminue.
 . Si l'agitation augmente encore, un phénomène d'érosion à la surface augmente à nouveau la vitesse de corrosion.

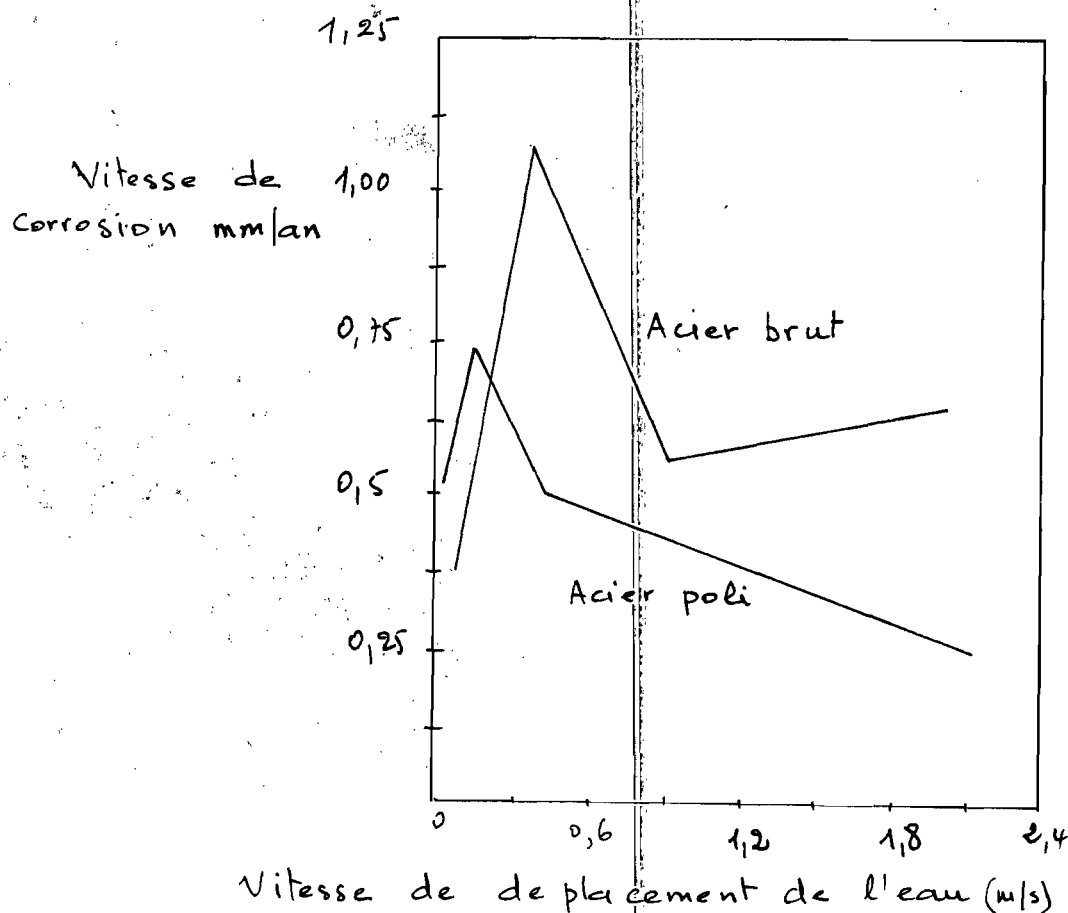


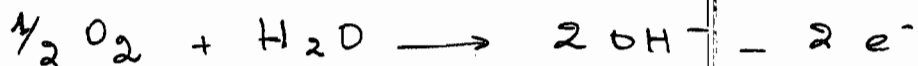
Fig 7: Influence de l'agitation sur la corrosion de canalisations en acier doux contenant de l'eau à 21°C (Essais : 48 heures RUSSEL, CHAPPELL et WHITE, 1927)

I. 6 Influence des sels dissous

L'influence de la concentration en NaCl sur la corrosion du fer dans l'eau saturée d'air à température ambiante est montrée à la figure 8. Puisque la dépolarisation par O_2 contrôle la vitesse de corrosion pour toute concentration en NaCl, il faut s'expliquer pourquoi la vitesse augmente tout d'abord, atteignant un maximum pour 3% NaCl (concentration de l'eau de mer) puis décroît. On sait que la solubilité de O_2 décroît continuellement avec la concentration en NaCl, ce qui explique la diminution de la vitesse aux plus hautes concentrations en NaCl.

Une explication a été tentée [1] : il s'agit d'un changement dans la nature de la barrière de diffusion que forme le film d'oxyde qui se produit à la surface du fer.

Dans l'eau distillée de faible conductivité, les cathodes et les anodes doivent être relativement forés les uns des autres. Par conséquent les ions OH^- qui se forment à la surface de la cathode suivant la relation



sont toujours à proximité des ions Fe^{2+} qui se forment aux anodes les plus proches et il en résulte un film de $Fe(OH)_2$ adhérent à la surface du métal.

Dans les solutions de NaCl, la conductivité est plus grande, aussi les anodes et les cathodes peuvent être loin les uns des autres. Pour de telles cathodes, NaOH ne réagit pas instantanément avec $FeCl_2$ formé aux anodes; au contraire, ces substances diffusent dans la solution et réagissent pour former $Fe(OH)_2$ loin de la surface du métal. Le $Fe(OH)_2$ ainsi formé ne fournit donc aucune barrière protectrice à la surface du métal.

Au dessus de 3% NaCl, la décroissance continue de la solubilité de l' O_2 devient plus importante que les changements intervenus dans la barrière de diffusion, et la corrosion diminue.

On peut noter l'influence des sels "à métaux alcalins" dont le comportement est identique à celui de NaCl.

Les sels acides provoquent une corrosion avec dégagement de H_2 et dépoliarisation par O_2

avec des vitesses de corrosion identiques pour les milieux de même pH.

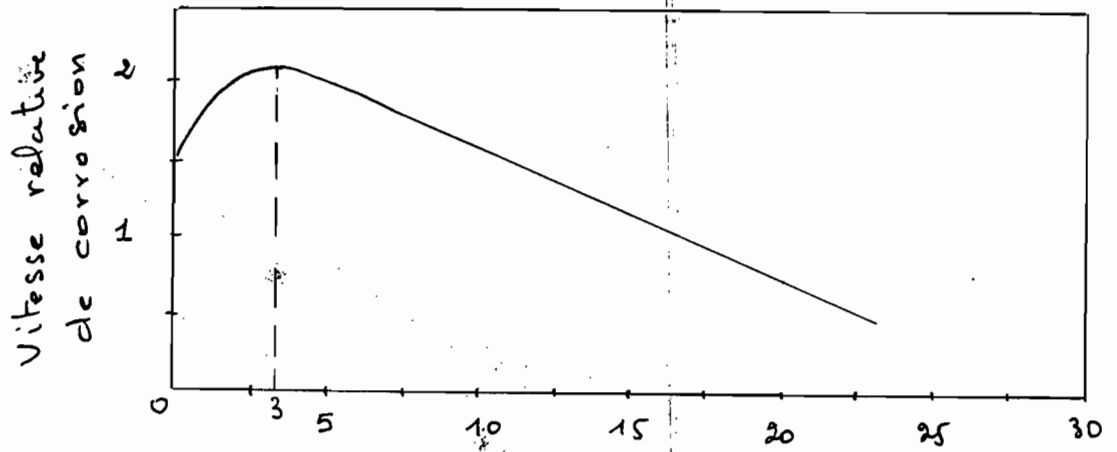
Les sels alcalins qui donnent des pH > 10 agissent comme des inhibiteurs de corrosion en présence d'oxygène dissous. NaOH est un exemple.

Les sels oxydants sont soit de bons dépolarisants ou soit d'efficaces inhibiteurs.

Influence des sels contenus dans les eaux naturelles

Les eaux naturelles contiennent des sels de calcium et de magnésium que l'on peut trouver dissous à différentes concentrations. Quand cette concentration est élevée, on parle "d'eau dure", sinon on parle d'eau douce.

TILLMANS, LANGELIER et BAYLIS ont subdivisé les eaux naturelles en deux groupes, celles qui sont sursaturées en CaCO_3 et les non-saturées. Puisque seules les eaux saturées ou sursaturées favorisent la formation du film, un critère analytique fut proposé pour permettre d'apprécier la corrosivité de l'eau : c'est l'indice de saturation.



Concentration en NaCl en poids (%)

Fig 8: Influence de la concentration en NaCl sur la corrosion du fer dans des solutions aérées, à température ambiante.

II LES FACTEURS METALLURGIQUES

II. 1 Différents types de fer et d'acier

Compte tenu de l'influence du pH, on a vu que la corrosion du fer ou de l'acier dans les eaux naturelles n'est influencée que par la diffusion d' O_2 . Ainsi donc quelque soit le procédé de préparation de l'acier (BESSMER ou FOUR MARTIN), qu'il s'agisse d'un fer forgé ou d'une fonte, cela a peu d'influences sur la corrosion dans les eaux naturelles, eau de mer comprise.

II. 2 Influence de la composition

Comme déjà indiqué, la composition du fer ou de l'acier, en ce qui concerne les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés commerciaux, n'a pratiquement aucune influence sur la vitesse de corrosion dans les eaux naturelles et dans les sous-sols.

Dans les acides, les éléments suivants : carbone, azote, soufre, phosphore, arsenic, silicium et cuivre contribuent à l'augmentation de la vitesse de corrosion.

II. 3. Effets galvaniques dus au couplage d'aciers de composants différents.

Bien que les composants d'alliages ne puissent avoir un effet déterminant sur la vitesse de corrosion dans les eaux et les sous-sols, la composition est néanmoins d'importance capitale sous les relations galvaniques et en conséquence sur la corrosion des aciers couplés entre eux. Par exemple un acier faiblement allié ou au Nickel ou Chrome est cathodique vis à vis d'un acier ordinaire et de la fonte dans la plupart des milieux naturels.

PARTIE II

TRAITEMENTS STATISTIQUES ET SIMULATIONS

CHAPITRE I

PREPARATION D'UN PLAN D'ECHANTILLONNAGE

Il faut distinguer trois phases dans l'élaboration de l'échantillonnage :

- L'avant - échantillonnage
- L'échantillonnage proprement dit
- L'après - échantillonnage ou phase de contrôle

I L'Avant - échantillonnage :

Dans cette phase initiale du contrôle d'une installation, il s'agira de collecter toutes les informations nécessaires pour la poursuite des travaux.

Un réseau constitue une unité dans son ensemble, et une unité fort complexe ;

Le fluide ne s'y comporte pas, malgré les difficultés de l'analyse de certains cas de corrosion, suivant des règles autres que celles des équilibres physico-chimiques. Et il faut noter que l'action réciproque du fluide et de la paroi des canalisations est fonction de nombreux paramètres très difficiles généralement à identifier.

Sur l'installation, il faudra connaître les dates de mise en service des diverses canalisation composant le réseau.

La disponibilité de fiches d'entretien sera d'une grande utilité si l'on veut retracer l'historique du réseau : réparations intervenues, changements de canalisation, d'autres accessoires du réseau.

Des schémas et dessins d'ensemble donnant la configuration du réseau permettront de localiser les conduits horizontaux, verticaux, les changements de direction, les vannes, les joints, les raccords et les réservoirs. Sur ce dessin on pourra

relever les endroits où il y a variation dans le matériaux utilisé ou variation de température du fluide véhiculé.

On notera également la nature du fluide, sa composition, son comportement électro-chimique, la présence de gaz dissous ou d'autres composés, pour apprécier son degré d'agressivité vis à vis des composants de l'installation.

Une nomenclature détaillée des matériaux de construction utilisés, avec indication de leur mode d'élaboration (alliages coulés, laminés, traitement thermique, traitement de surface etc...) doit nécessairement figurer dans le compte-rendu.

La technologie du montage de l'équipement devra être décrite en termes précis.

Ceci concerne plus particulièrement les procédés de fixation de différentes pièces. Cette vue d'ensemble d'un réseau nous permettra de planifier le contrôle et de mettre sur pied des séries d'échantillons homogènes susceptibles de répondre à notre préoccupation qui est d'avoir une représentation

assez fidèle de la corrosion dans le réseau.

II. L'ECHANTILLONNAGE

Il s'agira de localiser les points où les mesures devront être effectuées. Le nombre de mesures et leur localisation est d'une grande importance sur la représentativité et "l'interprétabilité" des résultats.

Pour des considérations de coût et de temps, on ne procédera pas à un échantillonnage exhaustif. On fera plutôt ce qu'on appelle un "sondage par choix raisonné".

Il consiste à construire, à partir des informations recueillies sur l'installation étudiée, un échantillon qui ressemble autant que possible à ce réseau.

La deuxième restriction à laquelle il va falloir procéder est de diviser le réseau en un certain nombre de groupes homogènes et à répartir l'échantillon entre ces groupes afin de réduire les fluctuations d'échantillonnage.

Pour réaliser cette "stratification" il faudra choisir des critères de contrôle qui soient en corrélation avec les variations

d'épaisseurs.

On peut citer des exemples de critères de contrôle pour une installation de refroidissement de transformateurs :

- température de l'eau
- écoulement plein ou non
- épaisseur de la canalisation.

Cette stratification nous permettra lors de la compilation des résultats d'analyser ensemble tous les relevés obtenus à partir de canalisations appartenant à un échantillon défini par l'un des critères retenus.

Cette démarche confère aux estimations une précision accrue.

Le deuxième niveau qu'il faut franchir dans cette phase de préparation est la localisation précise des points de mesures.

La valeur raisonnable de 12 points par 6 mètres de canalisation peut être retenue.

Comme montré sur la figure 9, on regroupe les points par 3 sur 4 endroits différents afin de pouvoir apprécier les variations à courte et à longue distance.

Une telle disposition nous permet également

d'apprécier l'effet d'accumulation de dépôts dans la partie inférieure des tuyaux.

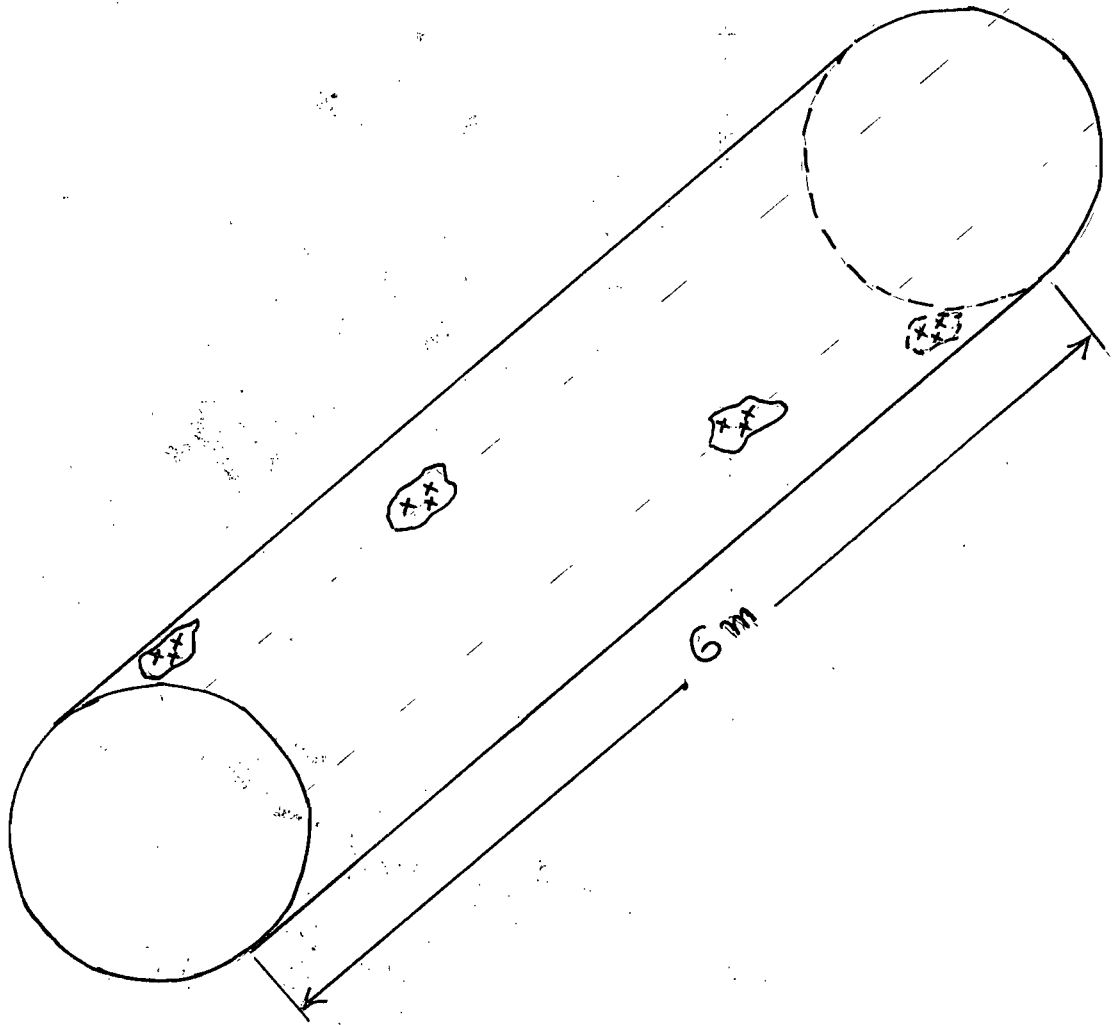


Fig 9 : Représentation des points de mesures sur un tronçon de tuyau de 6 mètres

III LE CONTROLE

Cette phase peut être subdivisée en trois étapes.

III. 1 L'examen visuel de la tuyauterie :

Il consiste à indiquer et localiser les fuites, les dommages visibles incluant la corrosion extérieure, et les anciennes réparations.

III. 2 L'inspection par ultra-sons :

Après bien identifié les points de mesures sur les canalisations, un détecteur à ultra-sons permet de noter les mesures d'épaisseurs sur des relevés déjà préparés.

III. 3 L'examen radiographique :

Quelques radiographies de la tuyauterie aux zones accessibles seront nécessaires pour compléter et confirmer les mesures aux ultra-sons. Elles devraient permettre, premièrement d'identifier la présence ou l'absence de piqûres de corrosion sévères, deuxièmement, de confirmer la variation d'épaisseur estimée de l'échantillon.

Des radiographies des joints soudés bout à bout, des raccords soudés, des changements de direction seront également effectués

pour visualiser l'état des parois de ces composants

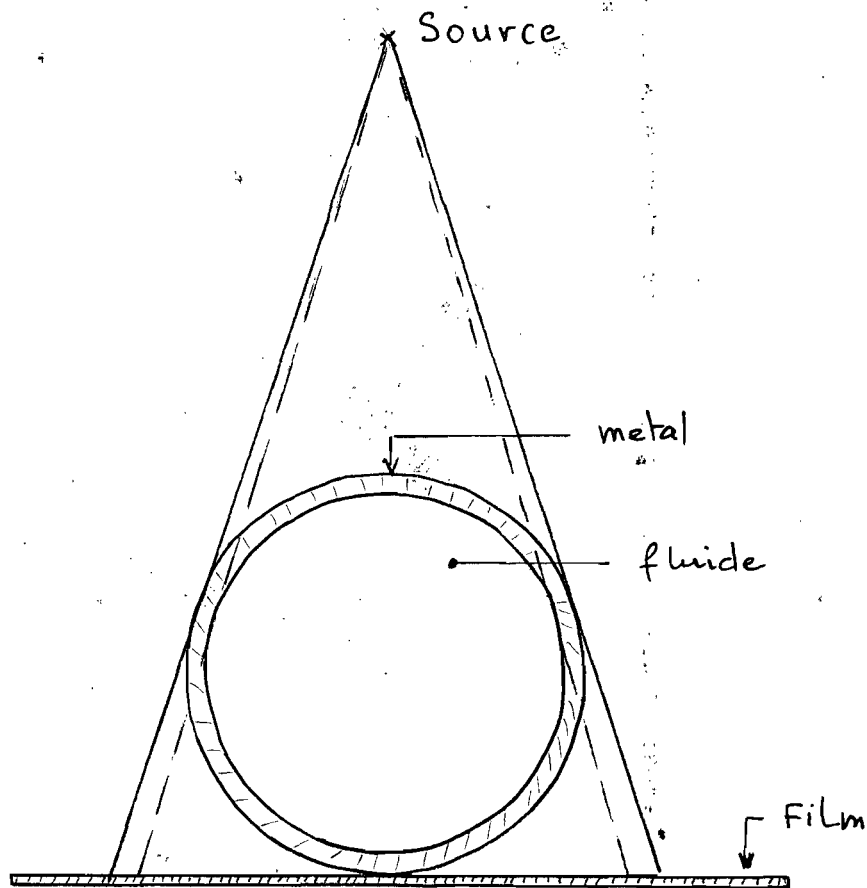


Fig 10 : Configuration pour une prise de radiographie

CHAPITRE II

ANALYSES STATISTIQUES

I NATURE DU PHENOMENE ETUDIE

Nous observons ici la variation d'épaisseur d'un tuyau par suite d'une attaque corrosive. On a montré par ce qui précède que les facteurs intervenant dans ce phénomène peuvent être assez nombreux, et que le phénomène global résulte de l'influence réciproque de ces facteurs entre eux. Par ailleurs le théorème "CENTRAL LIMIT" de la théorie des probabilités nous apprend que si un phénomène est engendré par un grand nombre de causes élémentaires de fluctuations, causes agissant de façon indépendante, alors ce phénomène est généralement susceptible d'être représenté par une loi normale si ces causes se composent de façon additive, par une loi log-normale si elles se composent de façon multiplicative. Mais puisque les conditions de ce théorème

devenement assez générales, dans beau-
 coup de cas (comme celui-ci il n'existe
 pas de limites évidentes dans les conditions
 d'application de 2 distributions citées et
 pour d'autres distributions également.

Dans notre cas, on pourrait en effet
 envisager une distribution du type
 BETA (β).

Dans le traitement des observations exp -
 rimentales, les lois de distribution normale,
 log-normale et de β ont été utilisées.

II AJUSTEMENT PAR LA LOI THEO- RIQUE RETENUE :

Seuls l'analyse de cette distribution emp -
 rique, l'examen de la representation
 graphique, l'histogramme, et le calcul
 des caractéristiques de tendance centrale
 et de dispersion donneront une première
 idée sur la nature du phénomène observé
 et permettront donc de choisir parmi les
 différents types de lois de distribution
 théoriques.

Le test de validité est effectué à l'aide
 de la loi du χ^2 .

Parallèlement une autre approche complémentaire a été adoptée. Il s'agit de générer des profils de corrosion et de voir l'impact de la variation de profils sur la nature de distributions que l'on peut obtenir.

CHAPITRE III

SIMULATION DE PROFILS

Si l'on considère un tuyau corrodé, on peut admettre que le profil de la paroi intérieure ait pris une forme quelconque. Une coupe longitudinale donne le profil aléatoire suivant :



Vu la nature du phénomène étudié, on peut déjà proposer vraisemblablement 3 distributions théoriques pour simuler la distribution statistique des épaisseurs le long de la paroi : il s'agit de distributions normale, log-normale et β . Ces distributions sont continues et unimodales, et pour les générer il faudra utiliser la méthode de MONTE CARLO.

Cette méthode permet d'obtenir une séquence de nombres aléatoires à partir d'une fonction de répartition théorique connue à partir du moment où cette fonction a une expression mathématique facile à manipuler.

Mais les trois fonctions citées n'ont pas cet avantage, et pour la fonction de GAUSS une méthode numérique a été développée pour générer une séquence de nombres aléatoires à partir d'une distribution uniforme (5) et (6). Cette méthode propose l'expression

$$Y = \sum_{i=1}^k \frac{x_i - k/2}{\left(\frac{k}{12}\right)^{1/2}} \quad \text{ou}$$

$x_i \in [0, 1]$ est un nombre aléatoire d'une distribution uniforme

Y est un nombre aléatoire généré par la séquence.

La distribution de la séquence dérivée de cette expression approche une distribution normale de moyenne 0 et d'écart-type 1 lorsque $k \rightarrow \infty$

La valeur pratique de $k = 12$ donne une assez bonne précision.

L'expression devient :

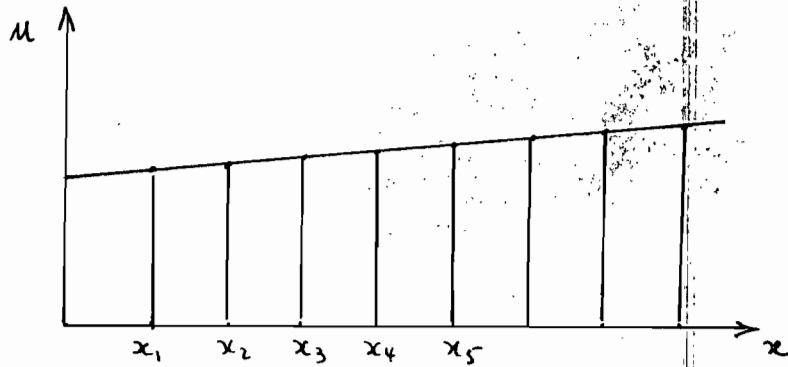
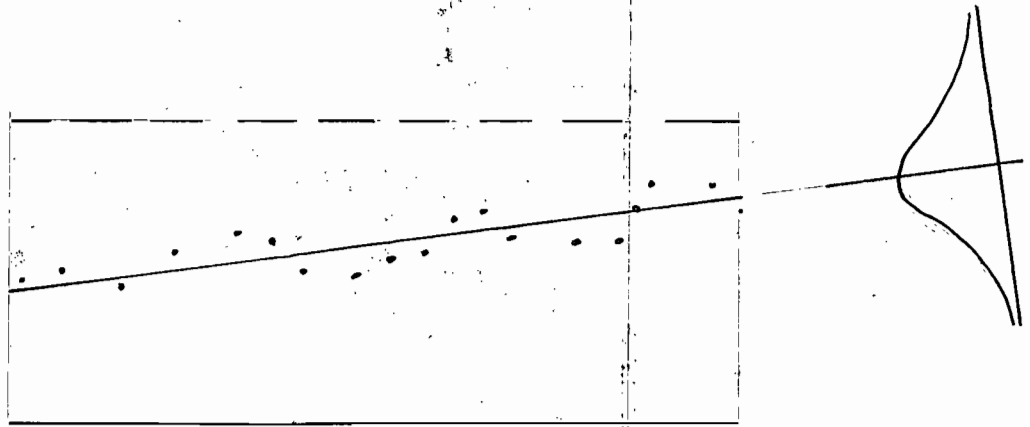
$$Y = \sum_{i=1}^{12} x_i - 6$$

Il faut noter qu'on peut également simuler une distribution BETA (β) en utilisant l'informatique [6].

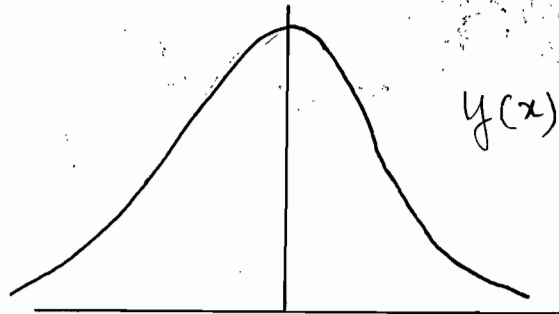
Pour se rapprocher d'avantage d'une situation réelle, on va considérer que le profil aléatoire initial est composé de deux parties : une partie probabiliste et une partie déterministe autour de laquelle fluctue la première.

La partie probabiliste peut être une distribution normale, log-normale ou de Beta. La partie déterministe peut être variée. Elle peut être une droite dont on peut faire varier la pente, une sinusoïde ou une fonction déterministe quelconque.

Dans la suite nous considérerons le cas où la partie déterministe est une droite $u(x)$ et la partie probabiliste une distribution normale $y(x)$.



$$u(x) = mx + b$$



L'épaisseur résultante est donnée par :

$$e(x) = u(x) + y(x)$$

$$e(x_1) = u(x_1) + y(x_1)$$

$$e(x_2) = u(x_2) + y(x_2) \quad \text{etc...}$$

Les $\mu(x)$ seront simulés en se fixant une épaisseur nominale correspondant à l'épaisseur maximale, et une épaisseur minimale :

$$\mu(x) = mx + b$$

à $x = 1$ $\mu = F_2$ épaisseur minimale

à $x = E_3$ $\mu = B_5$ épaisseur nominale

E_3 est le nombre de points sur lesquels on échantillonne, ou est le nombre de valeurs d'épaisseurs que l'on simule
Les 2 conditions précédentes donnent :

$$\begin{cases} m + b = F_2 \\ mE_3 + b = B_5 \end{cases}$$

d'où les coefficients :

$$m = \frac{B_5 - F_2}{E_3 - 1}$$

$$b = F_2 - \frac{B_5 - F_2}{E_3 - 1}$$

La droite $\mu(x)$ est donc complètement déterminée par des hypothèses sur

les épaisseurs minimale et maximale admise.

La génération des $y(x)$ a été décrite précédemment.

La séquence des épaisseurs ainsi générée sera ajustée aux distributions théoriques, normale, log-normale et Beta. Le test de validité de ces différents ajustements sera fait par la loi du χ^2 .

Après la simulation des épaisseurs, on fait une régression linéaire pour recréer une séquence déterministe. Par soustraction à la séquence initiale, on peut obtenir une nouvelle composante probabiliste.

Cette nouvelle composante sera ajustée aux 3 lois théoriques retenues.

Dans ce dernier cas on s'attend à ce que la nouvelle distribution obtenue soit plus serrée autour de sa moyenne que la distribution aléatoire initiale.

Avantages du procédé

Le procédé permet de conserver les informations sur l'ordre dans lequel les valeurs sont obtenues. En effet cet ordre est important pour le traitement des résultats, car il permet de localiser les zones où les faibles épaisseurs ont une forte probabilité de se produire.

PARTIE III

RESULTATS

CHAPITRE I

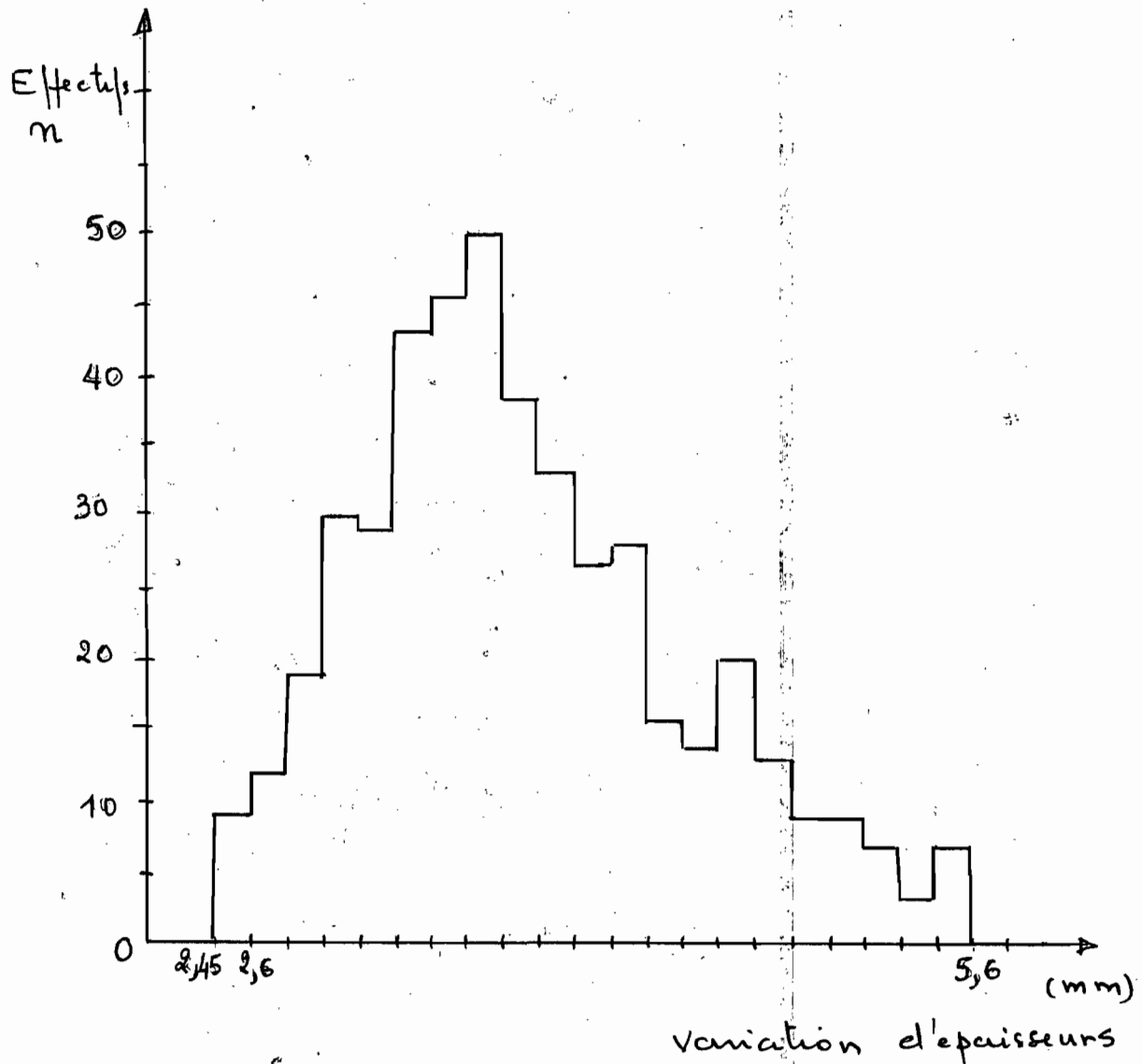
COMPILATION D'OBSERVATIONS EXPERIMENTALES

Des mesures d'épaisseurs ont été relevées sur une canalisation métallique en acier de 160 mm de diamètre et 10 mm d'épaisseur nominale. Les données sont stockées dans la banque de centre de calcul dans le fichier identifié par EP436 FIC.

Les épaisseurs relevées varient de 4,22 à 7,82 mm. L'analyse initiale du phénomène et la représentation graphique des observations nous ont suggéré au lieu d'étudier les épaisseurs relevées d'étudier plutôt les variations qui ont résulté: c'est à dire l'usure. Les variations s'étendent de 2,18 à 5,78 mm.

I. ANALYSE GRAPHIQUE: HISTOGRAMME

L'effectif total est $N = 465$ $K = 0,15$



Avant de procéder à l'ajustement, on peut voir que compte tenu de l'allure de l'histogramme, la distribution observée serait plus proche d'une normale que d'une log-normale.

II AJUSTEMENTS

II. 1 Loi normale

La distance enregistrée entre la distribution observée et la distribution théorique est de $D = 42,33$ avec un nombre de degrés de liberté de $\nu = 22$.

Par interpolation sur la table du χ^2 , on a : $P(\chi^2 \geq 42,33) = 0,008 = 0,8\%$.

Cette probabilité est trop faible pour expliquer les écarts constatés par le seul fait des fluctuations aléatoires.

La loi normale est inadéquate, cette première hypothèse est donc rejetée.

II. 2 Log-normale :

Pour ajuster la distribution obtenue à une log-normale, on ajuste les logarithmes des valeurs à une normale.

L'hypothèse de départ est donc que la nouvelle distribution obtenue suit une log-normale.

La distance enregistrée entre cette nouvelle distribution et la distribution normale est de $D = 24,34$ avec $\nu = 22$.

La table donne $P(\chi^2 \geq 24,37) = 0,333 = 33,3\%$.

Il ya 33,3% de chances pour que l'écart observé soit expliqué par les fluctuations aléatoires.

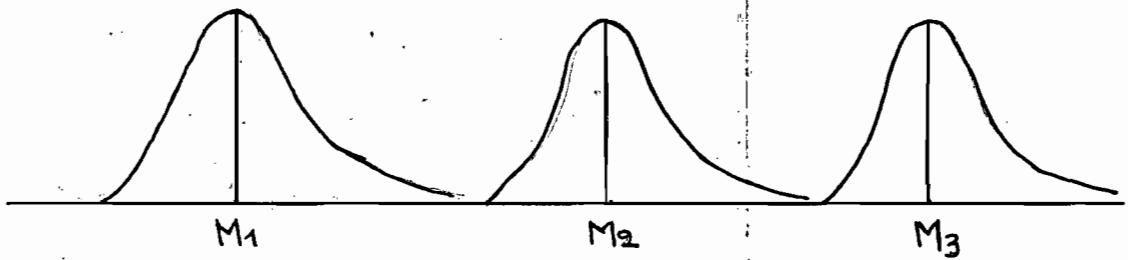
Compte tenu du seuil de 5% généralement admis, ce pourcentage est suffisant pour que l'hypothèse puisse être jugée acceptable. On peut admettre donc que la distribution statistique observée suit une log-normale. Le mode de la distribution est $D_1 = 3,522$
 Son espérance mathématique est $D_2 = 3,717$
 Son écart-type est $D_3 = 0,708$

III DETERMINATION DE LA DUREE DE VIE :

III.1 Vitesse de Corrosion

Connaissant le temps écoulé de puis la mise en service de la canalisation, on peut apprécier sa vitesse de corrosion en tenant compte des caractéristiques de la distribution.

Si l'on suppose que cette vitesse est uniforme, on peut avoir la représentation suivante de l'évolution du phénomène dans le temps.



La distribution garde sa nature mais on observe un déplacement de la moyenne. La moyenne actuelle est $D_2 = 3,717 \text{ mm}$. Si le temps écoulé depuis la mise en service de la tuyauterie est T , la vitesse de corrosion est donnée par

$$V = \frac{D_2}{T} \quad (\text{mm/an})$$

III. 2 Durée de vie

Pour assurer un fonctionnement sécuritaire, compte tenu des contraintes structurales existantes, on admet une limite permise de la corrosion de $L = 9 - 3D_4 = 6,876 \text{ mm}$.
D'où la durée de vie

$$D = \frac{L - D_2}{V} = \frac{3,159}{V}$$

Il ne faut pas perdre de vue que dans le contrôle de la tuyauterie, les figures

de corrosion auront une grande influence. Si le taux de piqures est important, il est évident que cette durée doit être largement réduite, dans certains cas on aura même à remplacer immédiatement la tuyauterie.

CHAPITRE II.

APPLICATION DE LA SIMULATION

I AJUSTEMENT DE LA SERIE SIMULEE

Les résultats de l'ajustement de cette série montrent qu'elle ne suit ni une normale, ni une log-normale. Le recours à d'autres distributions, telles que la distribution Beta, pourrait peut-être donner des résultats positifs.

Dans la pratique, il arrive souvent que l'on ne puisse pas trouver une distribution théorique qui puisse s'ajuster à la série observée. Une alternative consistant dans ce cas à faire une régression linéaire et à étudier la nouvelle distribution ainsi obtenue.

II. RÉGRESSION LINÉAIRE

Dans les mécanismes de corrosion on peut retrouver des variations à longue distance ou des variations à courte distance.

Les variations à longue distance peuvent par exemple être dues à une variation de la température ou de la variation d'écoulement le long de la canalisation ; les variations à courte distance peuvent elles être dues à des dépôts par la partie inférieure de la canalisation ou à des piqûres localisées.

La régression linéaire permet d'isoler les variations à longue distance et de ne considérer que celle à courte distance. Ces dernières sont représentées par la nouvelle distribution obtenue.

Les résultats montrent que cette distribution est moins dispersée que la première et qu'elle suit une log-normale avec une probabilité de $18,7\%$.

A présent on peut tirer beaucoup plus d'informations sur l'état de corrosion qu'on ne pouvait le faire initialement, en considérant les paramètres de la nouvelle distribution obtenue.

Entre autres, les effets dus aux changements de direction, à l'apparition de

piles galvaniques, et tout autre effet de variation à courte distance, seront plus clairement reflétés par la nouvelle distribution obtenue.

CONCLUSION

Au terme de cette étude, qui reste encore à parfaire, on perçoit la difficulté qu'il y a dans la modélisation d'un phénomène aussi complexe que la corrosion dans les systèmes de tuyauterie. Ce travail ne fait état d'aucun aspect d'Anti-Corrosion, mais il s'est surtout intéressé à l'élaboration des mécanismes de l'inspection en service des systèmes de canalisation.

Nous estimons que c'est le moment de dire que les préoccupations des auteurs de projets doivent s'élargir et en quelque sorte s'approfondir, et cela dans le but d'assurer au réseau projeté un service de plus longue durée.

APPENDICES

A - METHODES STATISTIQUES UTILISEES :

I : LA LOI NORMALE

1. Définition

La variable aléatoire normale X est continue et peut prendre les valeurs entre $-\infty$ et $+\infty$ avec une densité de probabilité f tq :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right] \quad \sigma > 0$$

La fonction de répartition est F tq :

$$F(x) = P(X < x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right] dx$$

Si on fait la transformation $T = \frac{X-m}{\sigma}$
On obtient la loi de probabilité normale réduite y telle que :

$$y(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$$

de fonction de répartition Π

$$\Pi(t) = P(T < t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-t^2/2} dt$$

2. Caractéristiques

$$\text{Mode} = m$$

$$\text{Espérance mathématique } E(X) = m$$

$$\text{Variance } V(X) = \sigma^2$$

3. Conditions d'application :Theoreme CENTRAL-LIMIT

La loi normale est d'application très générale. Elle est en effet engendrée sous des conditions très peu restrictives par l'addition de causes de fluctuations nombreuses et indépendantes.

Soit une suite de variables aléatoires indépendantes X_1, X_2, \dots, X_n correspondant aux différents facteurs de fluctuations et vérifiant les conditions suivantes :

. leurs espérances mathématiques m_1, m_2, \dots, m_n et leurs variances V_1, V_2, \dots, V_n existent tous ;

. le rapport $\frac{V_i}{\sum_i V_i} \rightarrow 0$ quand $n \rightarrow \infty$

$$\text{Posons } X = \sum_{i=1}^n X_i$$

$$E(X) = \sum E(X_i) = m \quad \text{avec}$$

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_n$$

les variables étant indépendantes

$$V(X) = V\left(\sum_i X_i\right) = \sum_i V_i = \sigma^2 \quad \text{avec}$$

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2$$

On peut former la variable centrée réduite

$$\frac{\sum_i X_i - \sum_i E(X_i)}{\sqrt{\sum_i V(X_i)}} = \frac{X - m}{\sigma}$$

Le théorème affirme que cette variable tend à suivre la loi normale centrée réduite lorsque $n \rightarrow \infty$, quelque soient les lois de probabilité suivies par les variables X_1, X_2, \dots, X_n .

II LA LOI LOG-NORMALE

Définition

Une variable aléatoire suit une log-normale si son logarithme suit une loi normale. Une variable log-normale est généralement caractérisée par les paramètres m, σ de la loi normale que suit

son logarithme népérien

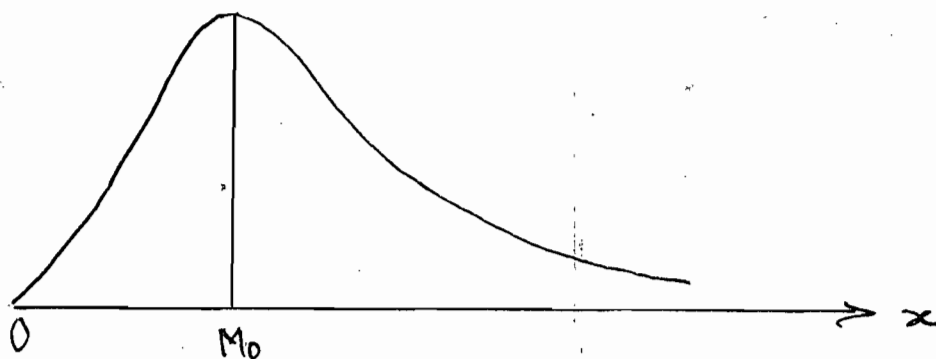
$$\text{Log } X = N(m, \sigma).$$

Sa loi de probabilité est donnée par

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma x} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log x - m}{\sigma}\right)^2\right], x > 0$$

$$= 0 \quad x < 0$$

La loi log-normale a la forme suivante



2. Caractéristiques :

Mode

$$M_0 = e^{m - \sigma^2}$$

Esperance mathématique $E(X)$

$$= e^{m + \sigma^2/2}$$

Variance

$$V(X) = e^{2(m + \sigma^2)} (1 - e^{-\sigma^2})$$

3. Conditions d'application

Elles sont remplies lorsque X est la résultante d'un grand nombre de facteurs indépendants X_i , dont chacun

a un poids négligeable par rapport à l'ensemble, et dont les effets se composent par multiplication.

4. Généralisation de la loi log-normale

X étant une variable log-normale de paramètres m et σ , on peut définir la variable Y par changement d'origine

$$Y = X + x_0$$

$\log(Y - x_0)$ suit une log-normale m, σ

Y est appelée variable log-normale

généralisée. Elle dépend de 3 paramètres m, σ et x_0 .

III LA LOI BETA (β)

Cette loi a pour densité de probabilité f telle que:

$$f(x) = \frac{x^\alpha (1-x)^\delta}{\beta(\alpha+1, \delta+1)} \quad \text{pour } 0 \leq x \leq 1$$

= 0 ailleurs

$$\begin{aligned} \beta(\alpha+1, \delta+1) &= \int_0^1 x^\alpha (1-x)^\delta dx \\ &= \frac{\Gamma(\alpha+1) \times \Gamma(\delta+1)}{\Gamma(\alpha+\delta+2)} \end{aligned}$$

$$\Gamma(m) = \int_0^{\infty} x^{m-1} e^{-x} dx$$

Si m est un entier positif

$$\Gamma(m) = (m-1)!$$

Remarque:

Le calcul des probabilités peut être fait pour la loi normale à l'aide de l'ordinateur. Mais en ce qui concerne la loi beta, ce calcul ne peut plus être conduit dès que l'un des paramètres α ou β prend des valeurs non entières.

On pourrait par ailleurs arrondir les valeurs trouvées, mais cela peut conduire à des résultats surprenants.

Si α et $\beta \in \mathbb{N}$, f devient

$$f(x) = \frac{(\alpha + \beta + 1)!}{\alpha! \beta!} x^{\alpha} (1-x)^{\beta} \quad 0 \leq x \leq 1$$

= 0 ailleurs.

$$E(X) = \frac{\alpha + 1}{\alpha + \beta + 2}$$

$$V(X) = \frac{E(X)[1 - E(X)]}{\alpha + \beta + 3}$$

IV VALIDITE DE L'AJUSTEMENT D'UNE LOI THEORIQUE A UNE DISTRIBUTION OBSERVEE

Si l'on suppose qu'une variable X suit exactement une loi de probabilité P , le tirage d'un échantillon de taille N dans la population correspondante montrera qu'il existe un écart entre la loi empirique ainsi déterminée et P . Cela est dû au fait que les observations sont toujours entachées de fluctuations aléatoires.

1- Distance entre une distribution et la loi théorique correspondante :

Si les observations sont classées en k classes ou modalités : C_1, C_2, \dots, C_k , on peut associer les probabilités p_1, p_2, \dots, p_k résultant de la loi théorique P .

Pour chacune des classes les effectifs susceptibles d'être observés sont E_1, E_2, \dots, E_k .

L'effectif théorique de C_i est $N p_i$.

Les effectifs observés en réalité sont N_1, N_2, \dots, N_k .

On pose sur C_i

$$e_i = \frac{N_i - N p_i}{\sqrt{N p_i}}$$

et par suite
$$d = \sum_{i=1}^k e_i^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - N p_i)^2}{N p_i}$$

La somme d fournit une mesure de la distance existant entre la distribution observée et la distribution théorique.

D'autre part on peut définir l'écart réduit

$$E_i = \frac{E_i - Np_i}{\sqrt{Np_i}} \quad \text{qui peut être consi-}$$

dérée comme une variable aléatoire centrée réduite

$$D = \sum_{i=1}^k E_i^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(E_i - Np_i)^2}{Np_i}$$

d est une valeur de D observée sur l'échantillon

$$E_1 + E_2 + \dots + E_k = N$$

D suit une loi du χ^2 à $\nu = k - 1$

degrés de liberté.

ν ne dépend que du nombre de classes

2. Test du χ^2

Si r est le nombre de paramètres estimés à partir des observations $\nu = k - r - 1$

Pour la loi normale $r = 2$ car on a :

$$m = \frac{1}{N} \sum_1^k N_i x_i$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_1^k N_i (x_i - m)^2$$

donc $D = k - 3$

En général on s'arrangera à ce que $k \geq 4$ pour réaliser les conditions de convergence de la loi binomiale vers la loi normale

Le test du χ^2 repose sur le raisonnement suivant :

On fait l'hypothèse que le phénomène observé suit la loi théorique supposée P .

• Si il y a une forte probabilité que D prenne une valeur supérieure à la valeur d observée, les fluctuations aléatoires suffisent à expliquer la distance enregistrée : l'hypothèse est jugée acceptable.

• Si par contre il n'y a qu'une faible probabilité, il est beaucoup plus probable que cette valeur observée soit due à l'inadéquation de la loi théorique P : on rejette l'hypothèse que le phénomène observé

Suit cette loi

Remarques :

- . Généralement le seuil de probabilité à partir duquel on accepte ou rejette une hypothèse est fixé entre 2 et 5%.
- . Il faut souligner qu'une hypothèse acceptable n'est pas nécessairement vraie, mais simplement que les informations dont on dispose ne permettent pas de la rejeter. De ce point de vue plusieurs lois théoriques différentes peuvent être jugées acceptables pour représenter un même ensemble d'observations.

B - METHODES DE SIMULATION

I GENERATION D'UNE DISTRIBUTION

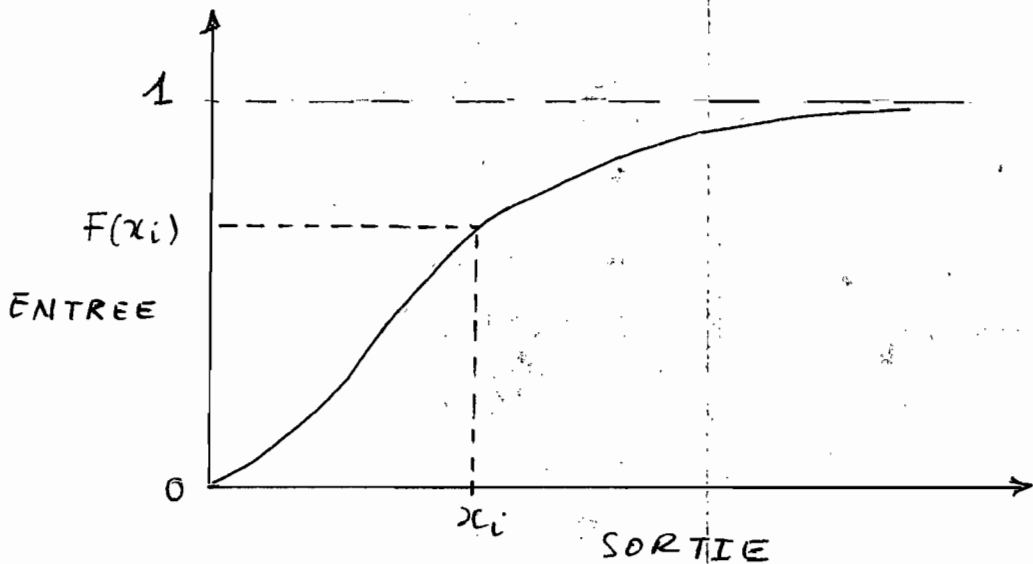
CONTINUE NON UNIFORME : LA METHODE DE MONTE CARLO :

Dans la pratique des distributions le problème consiste généralement à enregistrer une série d'observations sans se préoccuper de la séquence dans laquelle ces observations sont notées. En simulation, on est plutôt confronté au problème inverse. Comment, à partir d'une loi de distribution donnée, générer une succession de valeurs aléatoires qui suivent cette distribution ?

Ce problème peut être résolu en transformant une distribution uniforme en une distribution non uniforme.

Si $f(x)$ est la densité de probabilité désirée, f étant continue, sa fonction de répartition est $F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$
 $F(x) \in [0, 1) \forall x$

Le graphique suivant donne un exemple de F .



On gène les $F(x_i)$ suivant une distribution uniforme ; pour chaque entrée $F(x_i)$ sur l'axe vertical, la sortie x_i est déterminée sur l'axe horizontal. La séquence des x_i est distribuée de façon aléatoire et a pour densité de probabilité $f(x)$.

II GENERATION DE LA DISTRIBUTION NORMALE

Méthode approximative

$$X = \sqrt{\frac{12}{k}} \left(\sum_{i=1}^k R_i - \frac{k}{2} \right)$$

$$\mu_x = 0$$

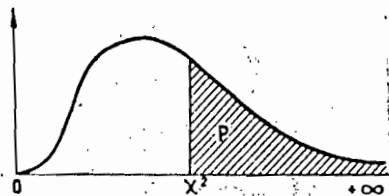
$$\sigma_x = 1$$

$$R_i \in [0, 1)$$

C: TABLEAUX ET TABLES

C-1 Distribution de χ^2 (Loi de K. Pearson).

Valeur de χ^2 ayant la probabilité P d'être dépassée.



ν	$P = 0,90$	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1	0,0158	0,0642	0,148	0,455	1,074	1,642	2,706	3,841	5,412	6,635
2	0,211	0,446	0,713	1,386	2,408	3,219	4,605	5,991	7,824	9,210
3	0,584	1,005	1,424	2,366	3,665	4,642	6,251	7,815	9,837	11,345
4	1,064	1,649	2,195	3,357	4,878	5,989	7,779	9,488	11,668	13,277
5	1,610	2,343	3,000	4,351	6,064	7,289	9,236	11,070	13,388	15,086
6	2,204	3,070	3,828	5,348	7,231	8,558	10,645	12,592	15,033	16,812
7	2,833	3,822	4,671	6,346	8,383	9,803	12,017	14,067	16,662	18,475
8	3,490	4,594	5,527	7,344	9,524	11,030	13,362	15,507	18,168	20,090
9	4,168	5,380	6,393	8,343	10,656	12,242	14,684	16,919	19,679	21,666
10	4,865	6,179	7,267	9,342	11,781	13,442	15,987	18,307	21,161	23,209
11	5,578	6,989	8,148	10,341	12,899	14,631	17,275	19,675	22,618	24,725
12	6,304	7,807	9,034	11,340	14,011	15,812	18,549	21,026	24,054	26,217
13	7,042	8,634	9,926	12,340	15,119	16,985	19,812	22,362	25,472	27,688
14	7,790	9,467	10,821	13,339	16,222	18,151	21,064	23,685	26,873	29,141
15	8,547	10,307	11,721	14,339	17,322	19,311	22,307	24,996	28,259	30,578
16	9,312	11,152	12,624	15,338	18,418	20,465	23,542	26,296	29,633	32,000
17	10,085	12,002	13,531	16,338	19,511	21,615	24,769	27,587	30,995	33,409
18	10,865	12,857	14,440	17,338	20,601	22,760	25,989	28,869	32,346	34,805
19	11,651	13,716	15,352	18,338	21,689	23,900	27,204	30,144	33,687	36,191
20	12,443	14,578	16,266	19,337	22,775	25,038	28,412	31,410	35,020	37,566
21	13,240	15,445	17,182	20,337	23,858	26,171	29,615	32,671	36,343	38,932
22	14,041	16,314	18,101	21,337	24,939	27,301	30,813	33,924	37,659	40,289
23	14,848	17,187	19,021	22,337	26,018	28,429	32,007	35,172	38,968	41,638
24	15,659	18,062	19,943	23,337	27,096	29,553	33,196	36,415	40,270	42,980
25	16,473	18,940	20,867	24,337	28,172	30,675	34,382	37,652	41,566	44,314
26	17,292	19,820	21,792	25,336	29,246	31,795	35,563	38,885	42,856	45,642
27	18,114	20,703	22,719	26,336	30,319	32,912	36,741	40,113	44,140	46,963
28	18,939	21,588	23,647	27,336	31,391	34,027	37,916	41,337	45,419	48,278
29	19,768	22,475	24,577	28,336	32,461	35,139	39,087	42,557	46,693	49,588
30	20,599	23,364	25,508	29,336	33,530	36,250	40,256	43,773	47,962	50,892

Nota. — ν est le nombre de degrés de liberté.

Pour ν compris entre 30 et 100, on admettra que $\sqrt{2\chi^2} - \sqrt{2\nu} - 1$ est approximativement distribué suivant la loi normale centrée réduite ($m = 0, \sigma = 1$).

Pour ν supérieur à 100, on admettra que $(\chi^2 - \nu)/\sqrt{2\nu}$ est approximativement distribué suivant la loi normale centrée réduite ($m = 0, \sigma = 1$).

C 1 (suite)

f	5%	1%	0,1%	f	5%	1%	0,1%
1	3,84	6,63	10,8	41	56,9	65,0	74,7
2	5,99	9,21	13,8	42	58,1	66,2	76,1
3	7,81	11,3	16,3	43	59,3	67,5	77,4
4	9,49	13,3	18,5	44	60,5	68,7	78,7
5	11,1	15,1	20,5	45	61,7	70,0	80,1
6	12,6	16,8	22,5	46	62,8	71,2	81,4
7	14,1	18,5	24,3	47	64,0	72,4	82,7
8	15,5	20,1	26,1	48	65,2	73,7	84,0
9	16,9	21,7	27,9	49	66,3	74,9	85,4
10	18,3	23,2	29,6	50	67,5	76,2	86,7
11	19,7	24,7	31,3	51	68,7	77,4	88,0
12	21,0	26,2	32,9	52	69,8	78,6	89,3
13	22,4	27,7	34,5	53	71,0	79,8	90,6
14	23,7	29,1	36,1	54	72,2	81,1	91,9
15	25,0	30,6	37,7	55	73,3	82,3	93,2
16	26,3	32,0	39,3	56	74,5	83,5	94,5
17	27,6	33,4	40,8	57	75,6	84,7	95,8
18	28,9	34,8	42,3	58	76,8	86,0	97,0
19	30,1	36,2	43,8	59	77,9	87,2	98,3
20	31,4	37,6	45,3	60	79,1	88,4	99,6
21	32,7	38,9	46,8	61	80,2	89,6	100,9
22	33,9	40,3	48,3	62	81,4	90,8	102,2
23	35,2	41,6	49,7	63	82,5	92,0	103,4
24	36,4	43,0	51,2	64	83,7	93,2	104,7
25	37,7	44,3	52,6	65	84,8	94,4	106,0
26	38,9	45,6	54,1	66	86,0	95,6	107,3
27	40,1	47,0	55,5	67	87,1	96,8	108,5
28	41,3	48,3	56,9	68	88,3	98,0	109,8
29	42,6	49,6	58,3	69	89,4	99,2	111,1
30	43,8	50,9	59,7	70	90,5	100,4	112,3
31	45,0	52,2	61,1	71	91,7	101,6	113,6
32	46,2	53,5	62,5	72	92,8	102,8	114,8
33	47,4	54,8	63,9	73	93,9	104,0	116,1
34	48,6	56,1	65,2	74	95,1	105,2	117,3
35	49,8	57,3	66,6	75	96,2	106,4	118,6
36	51,0	58,6	68,0	76	97,4	107,6	119,9
37	52,2	59,9	69,3	77	98,5	108,8	121,1
38	53,4	61,2	70,7	78	99,6	110,0	122,3
39	54,6	62,4	72,1	79	100,7	111,1	123,6
40	55,8	63,7	73,4	80	101,9	112,3	124,8

Les tables 6 et 7 sont extraites de : A. Hald, *Statistical Tables and Formules* (John Wiley and Sons, New York, 1952).

Bornes pour χ^2

f	5%	1%	0,1%
81	103,0	113,5	126,1
82	104,1	114,7	127,3
83	105,3	115,9	128,6
84	106,4	117,1	129,8
85	107,5	118,2	131,0
86	108,6	119,4	132,3
87	109,8	120,6	133,5
88	110,9	121,8	134,7
89	112,0	122,9	136,0
90	113,1	124,1	137,2
91	114,3	125,3	138,4
92	115,4	126,5	139,7
93	116,5	127,6	140,9
94	117,6	128,8	142,1
95	118,8	130,0	143,3
96	119,9	131,1	144,6
97	121,0	132,3	145,8
98	122,1	133,5	147,0
99	123,2	134,6	148,2
100	124,3	135,8	149,4

Pour f supérieur, on prendra comme borne pour χ^2 , avec la probabilité d'erreur β :

$$\chi_{\beta}^2 = \frac{1}{2} [\sqrt{2f-1} + \Psi(1-\beta)]^2$$

C.2

FACTEURS DE CONVERSION

Multiplier la pénétration en mm par an (mm/an) par $27,4 \times$ densité pour obtenir une perte de masse en $\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{j}$.

Multiplier $\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{j}$ par $0,0365/\text{masse volumique}$ pour obtenir mm/an.

Métal	Masse volumique g/cm^3	$\frac{0,0365}{\text{masse volumique}}$	$27,4 \times$ masse volumique
Aluminium	2,72	0,013 42	74,52
Laiton (rouge)	8,75	0,004 17	239,75
Laiton (jaune)	8,47	0,004 31	232,07
Cadmium	8,65	0,004 22	237,01
Niobium	8,4	0,004 34	230,16
Cuivre	8,92	0,004 09	244,40
Cupro-nickel (70-30)	8,95	0,004 08	245,23
Fer	7,87	0,004 64	215,63
Fer silicium (Duriron) 84-14,5	7,0	0,005 21	191,8
Plomb	11,35	0,003 21	310,99
Magnésium	1,74	0,020 98	47,67
Nickel	8,89	0,004 11	243,58
Cupro-nickel (Monel) (30-70)	8,84	0,004 13	242,21
Argent	10,50	0,003 48	287,70
Tantale	16,6	0,002 20	454,84
Titane	4,54	0,008 04	124,39
Étain	7,29	0,005 01	199,74
Zinc	7,14	0,005 11	195,63
Zirconium	6,45	0,005 66	176,73

C. 3

Classification des f. é. m. normales

Réactions d'électrodes	Potentiels normaux d'oxydation E_0 (volts), 25 °C (*)
$\text{Li} = \text{Li}^+ + e^-$	3,05
$\text{K} = \text{K}^+ + e^-$	2,93
$\text{Ca} = \text{Ca}^{++} + 2e^-$	2,87
$\text{Na} = \text{Na}^+ + e^-$	2,71
$\text{Mg} = \text{Mg}^{++} + 2e^-$	2,37
$\text{Be} = \text{Be}^{++} + 2e^-$	1,85
$\text{U} = \text{U}^{+3} + 3e^-$	1,80
$\text{Hf} = \text{Hf}^{+4} + 4e^-$	1,70
$\text{Al} = \text{Al}^{+3} + 3e^-$	1,66
$\text{Ti} = \text{Ti}^{++} + 2e^-$	1,63
$\text{Zr} = \text{Zr}^{+4} + 4e^-$	1,53
$\text{Mn} = \text{Mn}^{++} + 2e^-$	1,18
$\text{Nb} = \text{Nb}^{+3} + 3e^-$	environ 1,1
$\text{Zn} = \text{Zn}^{++} + 2e^-$	0,763
$\text{Cr} = \text{Cr}^{+3} + 3e^-$	0,74
$\text{Ga} = \text{Ga}^{+3} + 3e^-$	0,53
$\text{Fe} = \text{Fe}^{++} + 2e^-$	0,440
$\text{Cd} = \text{Cd}^{++} + 2e^-$	0,403
$\text{In} = \text{In}^{+3} + 3e^-$	0,342
$\text{Tl} = \text{Tl}^+ + e^-$	0,336
$\text{Co} = \text{Co}^{++} + 2e^-$	0,277
$\text{Ni} = \text{Ni}^{++} + 2e^-$	environ 0,250
$\text{Mo} = \text{Mo}^{+3} + 3e^-$	0,2
$\text{Sn} = \text{Sn}^{++} + 2e^-$	0,136
$\text{Pb} = \text{Pb}^{++} + 2e^-$	0,126
$\text{H}_2 = 2\text{H}^+ + 2e^-$	0,000
$\text{Cu} = \text{Cu}^{++} + 2e^-$	0,337
$2\text{Hg} = \text{Hg}_2^{++} + 2e^-$	0,789
$\text{Ag} = \text{Ag}^+ + e^-$	0,800
$\text{Pd} = \text{Pd}^{++} + 2e^-$	0,987
$\text{Hg} = \text{Hg}^{++} + 2e^-$	0,854
$\text{Pt} = \text{Pt}^{++} + 2e^-$	environ 1,2
$\text{Au} = \text{Au}^{+3} + 3e^-$	1,50

(*) Les potentiels normaux de réduction φ^0 ont le signe opposé.

C.4 Susceptibilité à la corrosion et potentiels d'électrode

Potential de dissolution dans l'eau de mer Classification galvanique

<i>Actifs (lire vers le bas)</i>	
Magnésium	Acier inox 18-8, type 304 (actif)
Alliages de magnésium	Acier inox 18-8 à 3 % de Mo, type 316 (actif)
Zinc	Plomb
	Étain
Aluminium 52 SH (*)	Alliage Cu-Zn 60 % - 40 % Zn (Muntz-métal)
Aluminium 4 S	Bronze au manganèse
Aluminium 3 S	Bronze marine 60 % Cu - 39,25 % Zn - 0,75 Sn
Aluminium 2 S	Nickel (actif)
Aluminium 53 S-T	76 % Ni - 16 % Co - 7 % Fe (Inconel) actif
Alclad	Laiton
Cadmium	Bronze d'aluminium
	Alliage de cuivre 85 % Cu - 15 % Zn
Aluminium 17 S-T	Cuivre
	Bronze au silicium
Aluminium 24 S-T	5 % Zn - 20 % Ni - 75 % Cu (Ambrac)
	70 % Cu - 30 % Ni
Acier ordinaire	88 % Cu - 2 % Zn - 10 % Sn (bronze G)
Acier forgé	88 % Cu - 3 % Zn - 6,5 % Sn - 1,5 % Pb (bronze M)
Fonte	Nickel passif
Alliage de (nickel résistant)	76 % Ni - 16 % Cr - 7 % Fe (Inconel) passif
Acier inox à 13 % de Cr type 410 (actif)	70 % Ni - 30 % Cu (Monel)
	Acier inox 18-8 type 304 (passif)
Alliage Pb-Sn (50 - 50)	Acier inox 18-8 à 3 % Mo type 316 (passif)
	<i>Nobles (lire vers le haut)</i>

(*) Aluminiums commerciaux de différentes puretés, aucune correspondance exacte avec la classification française.

D. PROGRAMME PRINCIPAL "EP436PR9"

```

00010 BEGIN
00020 OPEN (6) "P2"
00030 PRECISION 3
00040 PRINT (6) à(10), "*****"
00040: *****"
00050 PRINT (6) à(10), "*", à(95), "*"
00060 PRINT (6) à(10), "*", à(20), "OBJET: PROJET DE FIN D'ETUDES --1985--", à(95
00060: ), "*"
00070 PRINT (6) à(10), "*", à(95), "*"
00080 PRINT (6) à(10), "*****"
00080: *****"
00090 PRINT (6) à(10), "*", à(95), "*"
00100 PRINT (6) à(10), "*", à(20), "AUTEUR: ABDOULAYE NDIAYE -DEPT.GENIE MECANI
00100: QUE-", à(95), "*"
00110 PRINT (6) à(10), "*", à(95), "*"
00120 PRINT (6) à(10), "*", à(20), "SUJET: EVALUATION DE LA DUREE DE VIE D'UNE C
00120: ANALISATION METALLIQUE", à(95), "*"
00130 PRINT (6) à(10), "*", à(95), "*"
00140 PRINT (6) à(10), "*****"
00140: *****"
00150 PRINT (6) à(10), "*", à(95), "*"
00160 PRINT (6) à(10), "*", à(20), "DIRECTEUR DU PROJET: M. MAURICE DUVAL", à(95)
00160: , "*"
00170 PRINT (6) à(10), "*", à(95), "*"
00180 PRINT (6) à(10), "*****"
00180: *****"
00190 PRINT (6) à(10), "*", à(95), "*"
00200 PRINT (6) à(10), "*", à(20), "CE PROGRAMME EST LOCALISE SUR LE DISQUE 1", à
00200: (95), "*"
00210 PRINT (6) à(10), "*", à(20), "ET IL EST IDENTIFIE PAR LE FICHIER EP436PR9"
00210: , à(95), "*"
00220 PRINT (6) à(10), "*", à(95), "*"
00230 PRINT (6) à(10), "*", à(95), "*"
00240 PRINT (6) à(10), "*****"
00240: *****"
00250 PRINT (6)
00260 PRINT (6)
00270 PRINT (6)
00280 PRINT (6)
00290 PRINT (6)
00300 PRINT (6)
00310 PRINT (6)
00320 INPUT 'ES', "H", "DONNER L'ORDRE DE GRANDEUR DU NOMBRE DE MESURE A ENTRER
00320: P=", P
00330 LET A$="PROGRAMME D'AJUSTEMENT D'UNE DISTRIBUTION PAR LA LOI NORMALE"
00340 LET K$="CALCUL DES EFFECTIFS AJUSTES.COMPARAISON AVEC"
00350 LET L$=" LES EFFECTIFS OBSERVES"
00360 LET P$="PROBABILITES AJUSTEES"
00370 LET M$="EFFECTIFS AJUSTES"
00380 LET O$="ECARTS"
00390 LET N$="ETUDE DE L'AJUSTEMENT PAR"
00400 LET R$=" LE TEST DU X2"
00410 LET J$="APPLICATION A LA DISTRIBUTION DES EPAISSEURS LE LONG D'UNE "
00420 LET Q$="CANALISATION METALLIQUE"
00430 LET B$="CALCUL DE LA MOYENNE ET DE L'ECART-TYPE DE LA DISTRIBUTION"
00440 LET C$="CLASSES"

```

```
00450 LET V$="DEBUT",V1$="DEBUT"
00460 LET D$="EFFECTIFS"
00470 LET E$="CENTRE DE CLASSE"
00480 LET F$="VARIABLE D'ENTREE"
00490 LET G$="VARIABLE AUXILLIAIRE"
00500 LET H$="LA MOYENNE DE LA DISTRIBUTION EST M"
00510 LET I$="L'ECART-TYPE DE LA DISTRIBUTION EST V"
00520 DIM A(P)
00530 DIM Y(P)
00540 DIM C(100,35)
00550 DIM F(55)
00560 DIM E(50)
00570 DIM N(50)
00580 DIM B(50)
00590 DIM T(55)
00600 DIM P(50)
00610 DIM M(50)
00620 PRINT (6) a(10),A$
00630 PRINT (6)
00640 PRINT (6)
00650 PRINT (6)
00660 PRINT (6) a(15),J$,Q$
00670 PRINT (6)
00680 PRINT (6)
00690 PRINT (6)
00700 PRINT (6) a(15),B$
00710 PRINT (6)
00720 PRINT (6)
00730 LET N=0,A(0)=0
00740 PRINT 'ES',"I","AVEZ-VOUS DES VALEURS A ENTRER?"
00750 PRINT 'ES',"H","REPONDEZ PAR OUI OU PAR NON."
00760 INPUT T$
00770 IF T$="NON" THEN GOTO 03060
00780 REM _____LECTURE DU FICHIER DE DONNEES EP436FIC_____
00790 OPEN (1) "EP436FIC"
00800 LET N=N+1
00810 READ (1) A(N)
00820 IF A(N)=0 THEN GOTO 00870
00830 LET Q=0
00840 IF A(N-Q)>=A(N-Q-1) THEN GOTO 00800
00850 LET C=A(N-Q),A(N-Q)=A(N-Q-1),A(N-Q-1)=C,Q=Q+1
00860 GOTO 00840
00870 PRINT (6) a(15),"LE NOMBRE D'OBSERVATIONS EST B=" ,N-1
00880 CLOSE (1)
00890 LET B=N-1,E3=B
00900 FOR J=1 TO B
00910 LET Y(J)=A(J)
00920 NEXT J
00930 FOR J=1 TO B
00940 LET A(J)=10-Y(B-J+1)
00950 NEXT J
00960 PRINT
00970 PRINT
00980 PRINT 'ES',"I","LES VALEURS OBSERVEES S'ETENDENT ENTRE ",A(1),"ET ",A(B
00980:)
00990 PRINT (6)
```

```

01000 PRINT (6) a(30), "A(1)=", A(1)
01010 PRINT (6) a(30), "A(B)=", A(B)
01020 PRINT
01030 PRINT
01040 INPUT 'ES', "H", "DONNER LA VALEUR DE L'AMPLITUDE DES CLASSES, K=", K
01050 PRINT
01060 PRINT
01070 PRINT (6)
01080 PRINT (6)
01090 PRINT (6)
01100 PRINT (6) a(14), C$, a(37), D$, a(58), E$, a(80), G$
01110 REM _____-FORMATION DES CLASSES_____
01120 LET A=FPT(A(1)), C=MOD(A, K)
01130 LET F(1)=A(1)-C
01140 LET R=(INT(A(B))+1-F(1))/K
01150 LET O=INT(R)+5
01160 FOR N=1 TO O
01170 LET F(N)=F(1)+(N-1)*K
01180 IF F(N)>A(B) THEN EXITTO 01210
01190 LET E(N)=F(N)+K/2
01200 NEXT N
01210 FOR N=1 TO B
01220 LET J=1
01230 IF F(J)<=A(N) AND F(J+1)>A(N) THEN GOTO 01260
01240 LET J=J+1
01250 GOTO 01230
01260 LET I=1
01270 IF C(I, J)=0 THEN GOTO 01300
01280 LET I=I+1
01290 GOTO 01270
01300 LET C(I, J)=A(N)
01310 LET N(J)=I
01320 LET C=J
01330 NEXT N
01340 LET N(0)=0, A=0, E=0, F=0, G=0
01350 REM _____RECHERCHE DU PLUS GRAND EFFECTIF_____
01360 FOR S=1 TO C
01370 LET E=E+N(S)
01380 IF N(S)>N(S-1) THEN GOTO 01400
01390 GOTO 01430
01400 IF A=N(S) THEN GOTO 01430
01410 LET A=N(S)
01420 LET T=S
01430 NEXT S
01440 LET L=E(T)
01450 REM _____CALCUL DE LA MOYENNE ET DE L'ECART-TYPE_____
01460 FOR N=1 TO C
01470 LET B(N)=(E(N)-L)/K
01480 LET F=F+N(N)*B(N)
01490 LET G=G+N(N)*B(N)**2
01500 NEXT N
01510 LET Y=F/E, H=G/E
01520 LET Z=SQR(H-Y)
01530 LET M=K*Y+L, V=K*Z
01540 FOR D=1 TO C

```

```

01550 PRINT (6) a(10),F(D),a(17),"-",a(18),F(D+1),a(40),N(D),a(60),E(D),a(85)
01550 ,B(D)
01560 NEXT D
01570 PRINT (6)
01580 PRINT (6)
01590 PRINT (6)
01600 PRINT (6)
01610 PRINT (6) a(10),"LE NOMBRE DE CLASSES EST C=",C
01620 PRINT (6)
01630 PRINT (6) a(10),H$, "=",M
01640 PRINT (6)
01650 PRINT (6) a(10),I$, "=",V
01660 PRINT (6)
01670 PRINT (6)
01680 PRINT (6)
01690 PRINT (6)
01700 PRINT (6) a(10),K$,L$
01710 PRINT (6)
01720 PRINT (6)
01730 PRINT (6)
01740 PRINT (6) a(10),C$,a(40),P$,a(70),M$,a(100),D$
01750 REM _____ CALCUL DES PROBABILITES _____
01760 LET X=0,Z1=0,Z2=0
01770 FOR J=1 TO C
01780 LET T(J)=(F(J)-M)/V,T(J+1)=(F(J+1)-M)/V
01790 LET K1=T(J),K2=T(J+1)
01800 FOR N=1 TO 20
01810 LET H1=1
01820 FOR I=N TO 1 STEP -1
01830 LET H1=H1*I
01840 NEXT I
01850 LET K1=K1+(-1)**N*T(J)**(2*N+1)/((2*N+1)*H1*2**N)
01860 LET K2=K2+(-1)**N*T(J+1)**(2*N+1)/((2*N+1)*H1*2**N)
01870 NEXT N
01880 LET P(J)=(K2-K1)/SQR(2*3.1416)
01890 LET Z1=Z1+P(J)
01900 LET M(J)=E*P(J)
01910 LET Z2=Z2+M(J)
01920 PRINT (6) a(7),F(J),a(15),"-",a(16),F(J+1),a(43),P(J),
01930 PRINT (6) a(74),M(J),a(104),N(J)
01940 NEXT J
01950 PRINT (6) a(40)," _____ ",a(71)," _____ ",a(101)," _____ "
01960 PRINT (6) a(43),Z1,a(74),Z2,a(104),E
01970 PRINT (6)
01980 PRINT (6)
01990 PRINT (6)
02000 PRINT (6)
02010 PRINT (6) a(15),N$,R$
02020 PRINT (6)
02030 PRINT (6)
02040 PRINT (6)
02050 PRINT (6) a(10),C$,a(40),D$,a(70),M$,a(100),O$
02060 LET D=0
02070 IF X=0 THEN GOTO 02100
02080 RETURN

```

```

02090 REM _____ CALCUL DES ECARTS _____
02100 FOR J=1 TO C
02110 LET S=(N(J)-M(J))**2/M(J)
02120 LET D=D+S
02130 PRINT (6) a(7),F(J),a(15),"-",a(16),F(J+1),a(44),N(J),
02140 PRINT (6) a(73),M(J),a(102),S
02150 NEXT J
02160 PRINT (6)
02170 PRINT (6)
02180 PRINT (6) "AVANT DE CALCULER LA DISTANCE, IL FAUT, SI NECESSAIRE, ",
02190 PRINT (6) "REAJUSTER LES EFFECTIFS THEORIQUES DE FACON A CE QUE"
02200 PRINT (6) " AUCUN D'ENTRE EUX NE SOIT INFERIEUR A 4.",
02210 PRINT (6) "POUR CELA IL FAUT LES REGROUPER."
02220 PRINT (6)
02230 PRINT (6)
02240 LET A=0,U=0,H=0,S=0,R=0,D=0,T=0
02250 FOR J=1 TO C
02260 LET A=A+N(J),H=H+M(J),R=R+P(J)
02270 IF A)=4 THEN EXITTO 02290
02280 NEXT J
02290 LET N(J)=A,I=J,M(J)=H,P(J)=R
02300 FOR J=C TO 1 STEP -1
02310 LET U=U+N(J),S=S+M(J),T=T+P(J)
02320 IF U)=4 THEN EXITTO 02340
02330 NEXT J
02340 LET N(J)=U,F=J,M(J)=S,P(J)=T
02350 LET X=1
02360 GOSUB 02050
02370 FOR J=I TO F
02380 LET S=(N(J)-M(J))**2/M(J)
02390 LET D=D+S
02400 PRINT (6) a(7),F(J),a(15),"-",a(16),F(J+1),a(44),N(J),
02410 PRINT (6) a(73),M(J),a(102),S
02420 NEXT J
02430 PRINT (6) a(41),"_____",a(70),"_____",a(99),"_____"
02440 PRINT (6) a(44),E,a(73),Z2,a(102),D
02450 PRINT (6)
02460 PRINT (6)
02470 PRINT (6)
02480 PRINT (6)
02490 PRINT (6) a(10),"LA DISTANCE ENREGISTREE ENTRE LA DISTRIBUTION"
02500 PRINT (6) a(10),"OBSERVEE ET LA LOI THEORIQUE EST D=" ,D
02510 PRINT (6)
02520 PRINT (6)
02530 PRINT (6)
02540 PRINT (6) a(10),"LE NOMBRE DE DEGRES DE LIBERTE EST W=" ,C-3
02550 PRINT 'RB',"A CE STADE IL FAUT UTILISER LA TABLE DE LA LOI DU X2"
02560 PRINT
02570 PRINT "CONNAISSANT LE NOMBRE DE DEGRES DE LIBERTTE W=" ,C-3
02580 PRINT "ET LA DISTANCE D=" ,D," UTILIUSER LA TABLE COMME SUIT"
02590 PRINT
02600 PRINT
02610 PRINT 'ES',"H","DETERMINER LA PROBABILITE P(x2)=" ,D,"a EN UTILISANT"
02620 PRINT 'ES',"H","W ET D COMME ENTREES"
02630 PRINT
02640 PRINT

```

```

02650 PRINT
02660 INPUT 'ES','I',"ENTRER SUCCESSIVEMENT LES DISTANCES ET ENSUITE LES"
02670 INPUT "PROBABILITES QUE VOUS ALLEZ TROUVER DANS LA TABLE,EN LES"
02680 INPUT "PRENANT DE LA GAUCHE VERS LA DROITE."
02690 PRINT
02700 INPUT "ENTRER LA PREMIERE DISTANCE,D1=",D1
02710 INPUT "ENTRER LA DEUXIEME ,D2=",D2
02720 INPUT "ENTRER LA PREMIERE PROBABILITE,P1=",P1
02730 INPUT "ENTRER LA DEUXIEME,P2=",P2
02740 LET P=(D-D2)*(P1-P2)/(D1-D2)+P2
02750 LET P=P*100
02760 PRINT (6)
02770 PRINT (6)
02780 PRINT (6)
02790 PRINT (6)
02800 PRINT (6) &(10),"IL Y A DONC ",P,"% DE CHANCES POUR QUE L'ECART DEPASSE
02800:"
02810 PRINT (6) &(15),"LA VALEUR ",D," OBSERVEE"
02820 PRINT (6)
02830 PRINT (6)
02840 PRINT (6)
02850 IF P>5 THEN GOTO 03020
02860 PRINT (6) "PUISQUE P<=5%,CETTE FAIBLE PROBABILITE POUR QUE LA VALEUR",
02870 PRINT (6) " DE L'ECART DEPASSE D DU FAIT "
02880 PRINT (6) "DES FLUCTUATIONS ALEATOIRES, SERA DUE PAR L'INADEQUATION ",
02890 PRINT (6) "DE LA LOI NORMALE:"
02900 PRINT (6) "*** ON REJETTE L'HYPOTHESE QUE LE PHENOMENE OBSERVE ",
02910 PRINT (6) "SUIT CETTE LOI ***"
02920 GOTO 03530
02930 PRINT "*****REGRESSION LINEAIRE*****"
02940 PRINT "SI VOUS VOULEZ FAIRE LA REGRESSION LINEAIRE,TAPER OUI."
02950 INPUT "SINON,TAPER NON ",S$
02960 IF S$="OUI" THEN GOTO 04030
02970 CLOSE (6)
02980 PRINT
02990 PRINT
03000 PRINT 'RB',"***** FIN D'EXECUTION *****"
03010 END
03020 PRINT (6) "PUISQUE P>5%,LES FLUCTUATIONS ALEATOIRES SUFFISENT"
03030 PRINT (6) " A EXPLIQUER LA DISTANCE ENREGISTREE:** L'HYPOTHESE EST "
03040 PRINT (6) "JUGEE ACCEPTABLE **"
03050 GOTO 03530
03060 PRINT 'RB',"ON VA DONC SIMULER DES PROFILS DE CORROSION."
03070 PRINT 'ES',"H","ON LE REALISERA EN GENERANT DES VALEURS D'EPAISSEURS"
03080 PRINT 'ES',"H","COMPOSEES D'UNE PARTIE PROBABILISTE ET D'UNE PARTIE DETE
03080:RMINISTE"
03090 PRINT
03100 PRINT 'ES',"I","A L'AIDE DE TESTS STATISTIQUES,ON FERA DES AJUSTEMENTS
03100:"
03110 PRINT
03120 PRINT
03130 REM _____SIMULATION DE PROFILS_____
03140 INPUT "ENTRER LA VALEUR NOMINALE DE L'EPAISSEUR,B5=",B5
03150 INPUT "ENTRER L'EPAISSEUR MINIMALE QUE VOUS VOULEZ SIMULER,F2=",F2
03160 INPUT "ENTRER LE NOMBRE DE VALEURS QUE VOUS VOULEZ SIMULER,E3=",E3
03170 PRINT

```

```

03180 INPUT "ENTRER LE COEFFICIENT, F4=", F4
03190 INPUT "ENTRER LE COEFFICIENT, F5=", F5
03200 INPUT "ENTRER LA VALEUR DE B1=", B1
03210 PRINT (6)
03220 PRINT (6)
03230 PRINT (6) a(10), "*****SIMULATION DE PROFILS*****"
03240 PRINT (6)
03250 PRINT (6)
03260 LET F1=(B5-F2)/(E3-1)
03270 LET F2=F2-(B5-F2)/(E3-1)
03280 LET Z=0
03290 FOR J=1 TO E3
03300 LET B2=0
03310 FOR I=1 TO B1
03320 LET B3=RND(Z)
03330 LET Z=Z+1
03340 LET B2=B2+B3
03350 NEXT I
03360 LET A(J)=F1*J+F2+(B2-6)/F4-F5
03370 LET Y(J)=A(J)
03380 NEXT J
03390 LET N=N+1
03400 IF N<E3 THEN GOTO 03480
03410 IF V1$="REGRESSION" THEN GOTO 04460
03420 PRINT (6)
03430 PRINT (6)
03440 PRINT (6)
03450 PRINT (6)
03460 LET B=E3
03470 GOTO 00960
03480 LET Q=0
03490 IF A(N-Q+1)=A(N-Q) THEN GOTO 03390
03500 LET C=A(N-Q+1), A(N-Q+1)=A(N-Q), A(N-Q)=C, Q=Q+1
03510 IF N-Q<1 THEN GOTO 03390
03520 GOTO 03490
03530 IF V6$="FIN" THEN GOTO 03810
03540 LET U6$="APRES AVOIR TESTER L'AJUSTEMENT PAR LA LOI NORMALE, NOUS ALLONS
03540 :EN FAIRE DE MEME POUR LA LOI LOG_NORMALE."
03550 PRINT
03560 PRINT
03570 PRINT (6)
03580 PRINT (6)
03590 PRINT (6)
03600 PRINT 'RB', U6$
03610 PRINT (6) a(5), U6$
03620 PRINT
03630 FOR N=1 TO B
03640 LET A(N)=LOG(A(N))/LOG(EXP(1))
03650 NEXT N
03660 LET V6$="FIN"
03670 PRINT
03680 PRINT 'ES', "H", "LES VALEURS QUE VOUS ALLEZ MAINTENANT REGROUPER EN CLAS
03680 :SES"
03690 PRINT 'ES', "H", "SONT COMPRISES ENTRE ", A(1), " ET ", A(B)
03700 PRINT (6)
03710 PRINT (6) a(30), "A(1)=", A(1)

```

```

03720 PRINT (6) a(30), "A(B)=", A(B)
03730 PRINT
03740 PRINT 'RB', "CONNAISSANT CET INTERVALLE VOUS POUVEZ CHOISIR L'AMPLITUDE
03740:"
03750 PRINT 'RB', "ADEQUATE POUR AVOIR UN NOMBRE DE CLASSES SUFFISANT"
03760 PRINT
03770 PRINT
03780 INPUT 'ES', "I", "ENTRER LA NOUVELLE AMPLITUDE DE CLASSE K="; K
03790 GOSUB 03970
03800 GOTO 01070
03810 LET C1$="LE MODE DE LA DISTRIBUTION EST D1"
03820 LET C2$="L'ESPERANCE MATHEMATIQUE DE LA DISTRIBUTION EST D2"
03830 LET C3$="L'ECART-TYPE DE LA DISTRIBUTIOBN EST D4"
03840 LET D1=EXP(M-V**2)
03850 LET D2=EXP(M+V**2/2)
03860 LET D3=(1-EXP(-(V**2)))*EXP(2*(M+V**2))
03870 LET D4=SQR(D3)
03880 PRINT (6)
03890 PRINT (6)
03900 PRINT (6)
03910 PRINT (6) a(5), C1$, "=", D1
03920 PRINT (6)
03930 PRINT (6) a(5), C2$, "=", D2
03940 PRINT (6)
03950 PRINT (6) a(5), C3$, "=", D4
03960 GOTO 02930
03970 FOR I=1 TO 100
03980 FOR J=1 TO 35
03990 LET C(I,J)=0
04000 NEXT J
04010 NEXT I
04020 RETURN
04030 PRINT (6)
04040 PRINT (6)
04050 PRINT (6)
04060 PRINT (6) a(20), "*****REGRESSION LINEAIRE*****"
04070 PRINT (6) a(20), "CALCUL DES COEFFICIENTS DE LA DROITE"
04080 PRINT (6)
04090 PRINT (6)
04100 LET A4=0, A5=0
04110 FOR J=1 TO E3
04120 LET A4=A4+J
04130 LET A(J)=EXP(A(J))
04140 LET A5=A5+A(J)
04150 NEXT J
04160 LET J0=A4/E3, A0=A5/E3
04170 LET A6=0, A7=0
04180 FOR J=1 TO E3
04190 LET A6=(J-J0)*(A(J)-A0)+A6
04200 LET A7=A7+(J-J0)**2
04210 NEXT J
04220 LET M0=A6/A7
04230 LET B0=A0-M0*J0
04240 PRINT (6) a(10), "LA PENTE DE LA DROITE DE REGRESSION EST M0=", M0
04250 PRINT (6) a(10), "SON ORDONNEE A L'ORIGINE EST B0=", B0
04260 PRINT (6)

```



```
04270 PRINT (6) a(10), "LA PENTE DE LA DROITE SIMULEE EST, F1=", F1
04280 PRINT (6) a(10), "SON ORDONNEE A L'ORIGINE EST, F2=", F2
04290 PRINT (6)
04300 PRINT (6)
04310 PRINT (6) a(10), "***ETUDE DE LA NOUVELLE DISTRIBUTION OBTENUE PAR SOUSTR
04310 ACTION**"
04320 PRINT
04330 PRINT "ETUDE DELA NOUVELLE DISTRIBUTION OBTENUE PAR REGRESSION LINEAIRE
04330 ."
04340 PRINT
04350 PRINT (6)
04360 FOR J=1 TO E3
04370 LET A(J)=Y(J)-(M0*J+B0)
04380 NEXT J
04390 LET N=1
04400 PRINT (6)
04410 PRINT (6) a(15), "AJUSTEMENT PAR LA LOI NORMALE"
04420 PRINT (6)
04430 LET V$="DEBUT", V1$="REGRESSION"
04440 COSUB 03970
04450 GOTO 03400
04460 LET L=A(1)
04470 FOR J=1 TO E3
04480 LET A(J)=A(J)-L+2
04490 NEXT J
04500 GOTO 03420
```

- 1^{ere} Editions, Editions ESKA SARL, 1972
- (9) J. STERN, J. DE BARBEYRAC, R. POGGI,
 "Methodes pratiques d'etudes de fonctions
 aleatoires", 1^{ere} Edition, DUNOD, 1967
- (10) B.L. VAN DER WAERDEN, "Statistique
 mathématique", Dunod, 1967
- (11) A. KAUFMANN, G. DESBAZEILLE " Methode
 du chemin critique", 2^{eme} edition,
 Dunod, 1966
- (12) G. FOURGEAUD, A. FUCHS, "Statistique",
 2^{eme} edition, Dunod, 1972
- (13) OCTAVE ONICESCU, "Nombres et
 systemes aleatoires", Editions Eyrolles, 1964
- (14) A. BLANC LAPIERRE "Methodes statis-
 tiques pour l'etude des phenomenes de
 fluctuation", Masson Et Cie, 1963
- (15) B. GRAIS "Methodes statistiques",
 DUNOD, 2^{eme} Edition, 1977

BIBLIOGRAPHIE

- (1) H. H. UHLIG "Corrosion et Protection",
DUNOD, 1970
- (2) MARC NEVEUX "La Corrosion des Con-
duites d'eau et de gaz. Causes et
remèdes", Editions Eyrolles, 1968
- (3) R. W. HAMMING "Numerical methods
for scientists and Engineers", 2^{me}
Edition, Mc Graw Hill Book Company,
1973
- (4) "Programme d'inspection de la
tuyauterie de refroidissement des
redresseurs Aluminerie D'Arvida"
Compagnie nationale de forage et sondage
- (5) G. GORDON "System simulation",
Prentice - Hall, Inc, 1969.
- (6) C. V. FEUVRIER "La Simulation des
systèmes", 1^{ere} Edition, Dunod, 1971
- (7) W. J. Mc GONNAGLE "Essais non
destructifs. Métaux et matériaux divers",
1^{ere} Edition, Editions Eyrolles, 1967
- (8) MARC BOURDEAU et JACQUES GELINAS
"Analyse numérique élémentaire",