

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

EFFET DE LA VARIATION PONCTUELLE DE pH
SUR LA CORROSION DU CUIVRE ET DE LA FONTE DUCTILE

par

Line FORTIN

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE MAÎTRE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES (M.Sc.A)

Avril 1989

© droits réservés Line Fortin 1989.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

EFFET DE LA VARIATION PONCTUELLE DE pH
SUR LA CORROSION DU CUIVRE ET DE LA FONTE DUCTILE

présenté par Line Fortin en vue de l'obtention
du grade de Maître ès Sciences Appliquées (M.Sc.A.)
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. François BRIÈRE, M.E., président

M. Raymond DESJARDINS, M.Ing.

M. Arnold J. Drapeau, Dip. Bact.

SOMMAIRE

Cette étude a été menée en vue d'évaluer les effets d'une variation ponctuelle de pH sur des conduites de distribution d'eau potable de cuivre et de fonte ductile. L'eau utilisée a été distribuée par l'usine de traitement de la ville de Montréal. Le pH de l'eau a été maintenu à une valeur de 7,7 à l'aide d'acide nitrique dilué sur toute la période expérimentale, sauf au moment des variations ponctuelles de pH. Lors de ces variations, le pH a été ajusté à 5,5, 6,6 et 8,5 pendant une durée de 24 heures. Le calcul des vitesses de corrosion a été fait à partir des pertes de poids d'échantillons de métal. Ces échantillons ont été immergés dans l'eau durant différentes périodes allant d'une demi-semaine à huit semaines. Quatre séries d'essais ont été faits afin d'évaluer les effets d'une variation ponctuelle de pH sur le film protecteur. Les variations ponctuelles de pH ont été exécutées après 1, 3, 5 et 6 semaines d'immersion. L'influence du trou servant à accrocher les échantillons métalliques et l'influence des côtés sur la vitesse de corrosion ont également été étudiées. L'étude a permis de constater les faits suivants:

- 1- une variation ponctuelle à pH 8,5 faite après une semaine d'immersion a eu pour effet de réduire la vitesse de corrosion du cuivre. Une variation ponctuelle à pH 6,6 faite après une semaine a réduit la vitesse de corrosion de la fonte ductile. Les diminutions des vitesses de corrosion ont été observées jusqu'à la fin de la période d'immersion;
- 2- les variations ponctuelles de pH faites après trois semaines d'immersion ont augmenté la vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte ductile et ce, pour les trois valeurs de pH. L'augmentation a été observée jusqu'à la fin de la période d'immersion. L'augmentation maximale de la vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte ductile a été observée lors de la variation ponctuelle à pH 5,5;
- 3- les variations brusques de pH faites après 5 et 6 semaines d'immersion n'ont pas eu d'influence significative sur la vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte ductile;
- 4- la présence du trou et des côtés sur les échantillons n'ont pas semblé influencer de façon significative les vitesses de corrosion des deux métaux.

ABSTRACT

The effects of 24-hour short-term changes in water pH on corrosion rates of copper and cast iron were studied for eight weeks. The tap water pH was adjusted using weak nitric acid at a value of 7.7 except during the test day. At that time, the pH was set at values of 5.5, 6.6 and 8.5, therefore giving three distinct experimental units. The effects on the protective corrosion film of sudden pH variations were assessed with a change taking place at four different moments of the experiment: one, three, five and six weeks. Finally, the possible influence of the metal plate shape (hanging hole and sides disturbances) was examined. The study lead to the following conclusions:

- 1- a sudden variation of pH after one week decreased the corrosion rate of copper for pH 8,5, and the corrosion rate of cast iron for pH 6,6;
- 2- a sudden variation of pH after three weeks increased corrosion rates for both metals and three pH values; the maximum increase was observed for pH 5,5;

- 3- a sudden variation of pH after five and six weeks showed no significant impact on corrosion rates of copper and cast iron;
- 4- the metal plate shape (hole and sides disturbances) appeared to have no significant effects on corrosion rates of both metals.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer des remerciements particuliers à mon directeur de recherche, monsieur Raymond Desjardins, professeur agrégé à l'École Polytechnique de Montréal, pour sa disponibilité et son soutien financier, madame Louise Millette, étudiante au doctorat en génie de l'environnement pour ses nombreux conseils durant la phase expérimentale.

J'adresse également des remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet, et à l'École Polytechnique pour son cadre institutionnel.

TABLE DES MATIÈRES

	PAGE
SOMMAIRE.....	iv
ABSTRACT.....	vi
REMERCIEMENTS.....	viii
TABLE DES MATIÈRES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xix
LISTE DES FIGURES.....	xxi
CHAPITRE I - INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE II- REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
2.1 Le potentiel électrochimique.....	4
2.1.1 Courbe courant-tension.....	5
2.1.2 Corrosion dans les réseaux de distribution d'eau potable.....	6
2.2 Diagramme de Pourbaix.....	7
2.2.1 Région d'immunité.....	7
2.2.2 Région corrosive.....	9
2.2.3 État de passivation.....	9
2.2.4 Limites des diagrammes de Pourbaix.....	10

2.3	Les différents types de corrosion.....	10
2.3.1	Transferts d'électrons et d'ions.....	11
2.3.2	Distribution des régions anodiques et cathodiques.....	11
2.3.2.1	La corrosion uniforme.....	12
2.3.2.2	La corrosion galvanique.....	13
2.3.2.3	La corrosion localisée.....	13
2.4	L'indice de Langelier.....	14
2.4.1	Interprétation de l'indice de Langelier..	15
2.4.2	Les limites de l'indice de Langelier.....	15
2.5	Effet des propriétés de l'eau sur la corrosion du cuivre et des métaux ferreux.....	16
2.5.1	L'oxygène dissous.....	16
2.5.1.1	Relation entre l'oxygène dissous et la vitesse de corrosion.....	17
2.5.1.2	Réduction de la diffusion de l'oxygène à travers le film protecteur du cuivre.....	17
2.5.2	Le pH.....	18
2.5.2.1	La corrosion du fer en fonction du pH.....	18

2.5.2.2 Corrosion du cuivre en fonction du pH.....	19
2.5.2.3 Le rôle du pH de la solution adjacente à l'oxyde de cuivre....	19
2.5.2.4 L'ajustement du pH de l'eau.....	20
2.5.3 Le chlore résiduel.....	20
2.5.3.1 Influence du chlore sur la vitesse de corrosion du fer.....	21
2.5.3.2 Influence du chlore sur la vitesse de corrosion du cuivre.....	22
2.5.4 Les chlorures et les sulfates.....	22
2.5.5 Les nitrates.....	23
2.5.6 Le calcium.....	23
2.5.7 La température.....	24
2.5.8 La conductivité.....	24
2.5.9 Résumé des propriétés de l'eau sur la corrosion.....	25
2.6 Les films protecteurs.....	25
2.6.1 Dépôts de carbonates.....	26
2.6.2 Les propriétés semi-conductrices des produits de la corrosion.....	26
2.6.3 Les produits de la corrosion du fer.....	27

2.6.4 Les produits de la corrosion du cuivre...	28
2.6.5 Importance de l'âge du métal sur le développement du film protecteur pour le cuivre.....	29
2.6.6 Conditions favorables à la formation d'un dépôt protecteur.....	30
2.7 Prévention de la corrosion.....	31
CHAPITRE III - MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	34
3.1 Présentation du montage.....	34
3.1.1 Les cellules de contact.....	36
3.2 Les échantillons de métal.....	37
3.2.1 Fabrication et identification.....	37
3.2.1.1 Les échantillons de cuivre.....	37
3.2.1.2 Les échantillons de fonte ductile	37
3.2.2 Description des échantillons non troués..	38
3.2.2.1 Recouvrement des côtés.....	39
3.2.3 Préparation chimique des surfaces.....	40
3.2.4 Calcul de la vitesse de corrosion.....	42
3.2.4 Plan de l'analyse statistique.....	43

3.3	Calendrier expérimental.....	43
3.3.1	Sans variation ponctuelle de pH.....	44
3.3.1.1	Ajustement du pH des bassins.....	44
3.3.1.2	Utilisation des cellules de contact.....	44
3.3.2	Avec variation ponctuelle de pH.....	46
3.3.2.1	Réalisation des variations ponctuelles de pH.....	47
3.3.2.2	Utilisation des cellules de contact.....	48
3.4	Méthodes d'analyse.....	50
3.4.1	Observations quotidiennes	50
3.4.2	Échantillonnage de l'eau.....	50
3.4.3	Procédures d'analyse.....	51
CHAPITRE IV	- PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	53
4.1	Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau	53
4.1.1	Le pH.....	54
4.1.2	L'alcalinité.....	55
4.1.3	La dureté.....	57
4.1.4	L'oxygène dissous.....	58
4.1.5	Le chlore résiduel.....	59

4.1.6 Les sulfates.....	59
4.1.7 Les chlorures.....	60
4.1.8 Les nitrates.....	60
4.1.9 Les métaux.....	62
4.1.10 La conductivité.....	63
4.1.11 Les propriétés physiques de l'eau.....	63
4.1.11.1 La température.....	63
4.1.11.2 Le débit d'eau dans les cellules de contact.....	64
4.2 Perte de poids cumulative par unité de surface.	65
4.3 Vitesse de corrosion.....	66
4.3.1 La perte de poids des échantillons lors des traitements de nettoyage.....	66
4.3.2 Vitesse de corrosion des échantillons de cuivre et de fonte ductile qui n'ont pas subi de variation ponctuelle de pH.....	67
4.3.3 Vitesse de corrosion du cuivre ayant subi une variation ponctuelle de p.H.....	68
4.3.4 Vitesse de corrosion de la fonte ductile ayant subi une variation ponctuelle de pH	71

4.4	Analyse statistique des vitesses de corrosion	73
4.4.1	Vitesse de corrosion du cuivre et la fonte n'ayant pas subi de variation ponctuelle de pH.....	73
4.4.2	Vitesse de corrosion du cuivre suite à une variation ponctuelle de pH.....	74
4.4.3	Vitesse de corrosion de la fonte suite à une variation ponctuelle de pH.....	77
4.5	Aspect visuel des plaques.....	80
4.5.1	Le cuivre.....	80
4.5.2	La fonte ductile.....	80
CHAPITRE V - DISCUSSION DES RÉSULTATS.....		81
5.1	Les propriétés de l'eau.....	81
5.1.1	Le pH.....	81
5.1.2	Les nitrates.....	82
5.1.3	L'alcalinité.....	83
5.1.4	Les chlorures et les sulfates.....	83
5.1.5	La conductivité.....	84
5.1.6	La dureté.....	85
5.1.7	Oxygène dissous et température.....	85

5.1.8 Conclusion des propriétés de l'eau sur la vitesse de corrosion.....	86
5.2 Perte de poids cumulative par unité d surface.	87
5.3 Vitesse de corrosion.....	87
5.3.1 Vitesse de corrosion des échantillons de cuivre et de fonte ductile troués n'ayant pas été exposés à une variation de pH....	87
5.3.1.1 Diminution de la vitesse de corrosion de la fonte ductile....	89
5.3.1.2 Diminution de la vitesse de corrosion du cuivre.....	90
5.3.2 Vitesse de corrosion des échantillons de fonte ductile et de cuivre non troués....	90
5.3.3 Vitesse de corrosion du cuivre suite à une variation ponctuelle de pH.....	91
5.3.3.1 Vitesse de corrosion suite à une variation de pH faite après 1 semaine d'immersion.....	91
5.3.3.2 Vitesse de corrosion suite à une variation ponctuelle de pH faite après 3 semaines d'immersion.....	93

5.3.3.3 Vitesse de corrosion suite à une variation de pH faite après 5 et 6 semaines d'immersion.....	95
5.3.4 Vitesse de corrosion de la fonte ayant eu une variation ponctuelle de pH.....	96
5.3.4.1 Vitesse de corrosion des échan- tillons ayant subi une variation de pH après 1 semaine d'immersion..	96
5.3.4.2 Vitesse de corrosion des échant- illons qui ont subi une variation de pH après 3 semaines d'immersion	98
5.3.4.3 Vitesse de corrosion des échantillons qui ont subi une variation de pH après 5 et 6 semaines d'immersion	99
CHAPITRE VI - CONCLUSION.....	100
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	104
ANNEXE A - EXEMPLE DE CALCUL DE LA VITESSE DE CORROSION.....	115
ANNEXE B - EXEMPLE DE CALCUL DE LA VITESSE DE CORRO- SION DES ÉCHANTILLONS DE MÉTAL NON TROUÉS	116

ANNEXE C - RÉSULTATS BRUTS DES CARACTÉRISTIQUES

PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX UTILISÉES..... 118

ANNEXE D - VITESSES DE CORROSION..... 126

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU	PAGE
3.1 Séquence de lavages.....	41
3.2 Utilisation des cellules de contact qui n'ont pas eu de variation ponctuelle de pH.....	45
3.3 Utilisation des cellules de contact qui ont eu une variation de pH.....	48
3.4 Techniques d'analyses.....	52
4.1 Le pH dans les bassins de 200 L.....	54
4.2 Alcalinité dans les bassins de 200 L (mg/L de CaCO_3).....	55
4.3 Résumé des analyses de dureté (mg/L de CaCO_3)...	57
4.4 Concentration d'oxygène dissous (mg/L).....	58
4.5 Concentrations des sulfates (mg/L).....	59
4.6 Concentration des chlorures (mg/L).....	60
4.7 Concentration de nitrates (mg/L).....	61
4.8 Concentrations moyennes des métaux (mg/L).....	63
4.9 Tests Student entre les vitesses de corrosion des échantillons troués et non troués.....	73
4.10 Tests Student entre les vitesses de corrosion des échantillons de cuivre qui ont subi une variation de pH et ceux qui n'ont pas eu de variation de pH	75

TABLEAU	PAGE
4.11 Analyse de variance: influence de la valeur du pH lors de la variation ponctuelle sur la vitesse de corrosion du cuivre.....	76
4.12 Tests Student effectués entre les vitesses de corrosion des échantillons de fonte qui ont subi une variation ponctuelle de pH et ceux qui n'ont pas eu de variation.....	78
4.13 Analyse de variance: influence de la valeur du pH lors de la variation ponctuelle sur la vitesse de corrosion de la fonte.....	79
5.1 Impuretés contenues dans l'acide nitrique.....	82
B.1 Surface de corrosion des échantillons non troués	116
C.1 Valeur du pH dans les 8 bassins.....	120
C.2 Dureté et alcalinité (mg/L CaCO ₃).....	122
C.3 Oxygène dissous (mg/L).....	123
C.4 Les sulfates et les chlorures (mg/L).....	123
C.5 Les nitrates (mg/L).....	124
C.6 Le calcium et le magnésium (mg/L).....	125
C.7 Le potassium (mg/L).....	126
C.8 Le sodium (mg/L).....	126
C.9 Conductivité des 8 bassins (uS/cm).....	127
C.10 Température moyenne des bassins (°C).....	127
C.11 Débit dans les bassins (L/d).....	127

LISTE DES FIGURES

FIGURE	PAGE
2.1 Courbe courant-tension.....	6
2.2 Diagramme de Pourbaix du fer dans l'eau.....	8
2.3 Diagramme de Pourbaix du cuivre dans l'eau.....	8
2.4 Cellule de corrosion.....	12
2.5 Corrosion du cuivre dans une solution aqueuse...	29
3.1 Schéma du montage expérimental.....	35
3.2 Cellule de contact.....	36
3.3 Échantillon de métal.....	38
3.4 Échantillon de métal non troué.....	39
3.5 Programme des expériences dans les cellules de contact où il n'y a pas eu de variation de pH...	46
3.6 Programme expérimental des échantillons ayant subi une variation ponctuelle de pH.....	49
4.1 Variation de l'alcalinité dans les bassins 7 et 8 sans variation ponctuelle de pH.....	56
4.2 Concentration des nitrates dans les bassins 7 et 8, sans variation de pH.....	62
4.3 Perte de poids cumulative du cuivre et la fonte ductile n'ayant pas subi de variation ponctuelle de pH.....	65

FIGURE	PAGE
4.4 Vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte ductile n'ayant pas subi de variation ponctuelle de pH.....	68
4.5 Vitesse de corrosion du cuivre ayant subi une variation de pH d'une durée de 24 heures après 1 semaine d'immersion.....	69
4.6 Vitesse de corrosion du cuivre ayant subi une variation de pH d'une durée de 24 heures après 3, 5 et 6 semaines d'immersion.....	70
4.7 Vitesse de corrosion de la fonte ductile ayant subi une variation de pH d'une durée de 24 heures après 1 semaine d'immersion.....	71
4.8 Vitesse de corrosion de la fonte ductile ayant subi une variation de pH d'une durée de 24 heures après 3, 5 et 6 semaines d'immersion.....	72

CHAPITRE I

INTRODUCTION

La corrosion des parois internes des conduites de distribution d'eau potable peut engendrer deux types de problèmes. Le premier type de problème est associé à la dissolution du métal et le second, à la formation de dépôts. La dissolution du métal observée lors de la corrosion peut conduire au bris des conduites et à la modification de la qualité de l'eau. La détérioration des conduites d'eau potable est rattachée à des coûts considérables, puisque qu'éventuellement, il faudra réparer ou remplacer les conduites. En 1982, les coûts reliés à la corrosion au Québec ont été estimés 4 milliards de dollars (Piron, 1982). La corrosion des conduites des réseaux de distribution altère la qualité de l'eau en libérant des métaux dans l'eau potable qui peuvent être associés aux maladies cardiovasculaires (Craun et McCabe, 1975). Les métaux peuvent également altérer l'aspect esthétique de l'eau en la colorant (eau rouge due à la corrosion du fer). La formation de dépôts ou de protubérances constatés lors de

la corrosion peut créer des pertes de charge hydraulique pouvant nécessiter un nettoyage rigoureux des conduites.

Il est connu que le pH exerce une influence sur la vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte ductile. L'augmentation du pH de l'eau favorise généralement la diminution de la vitesse de corrosion. Il n'existe cependant pas d'information sur les effets d'un changement brusque de pH (d'une courte durée) sur la vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte ductile. L'expression utilisée pour qualifier un changement brusque de pH est: une variation ponctuelle de pH. L'objectif de cette étude est de vérifier si une variation ponctuelle de pH exerce un effet sur la vitesse de corrosion et si l'effet demeure présent après la variation ponctuelle de pH. Pour ce faire, l'auteure a réalisé plusieurs séries d'expériences dans lesquelles des échantillons de métal baignant initialement dans une eau à pH 7,7 ont subi une variation ponctuelle de pH d'une durée de 24 heures. L'auteure a également étudié l'influence du trou servant à l'accrochage des échantillons de métal, ainsi que la présence des côtés. Cette étude a tenté de répondre aux questions suivantes:

- 1- Quelle est l'influence d'un changement brusque de pH d'une durée de 24 heures sur la vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte ductile?

- 2- De quelle façon est affectée la vitesse de corrosion des échantillons de métal qui ont subi une variation ponctuelle de pH à 5,5, 6,6 et 8,5?
- 3- La vitesse de corrosion est-elle affectée par une variation ponctuelle de pH effectuée après 1, 3, 5 et 6 semaines d'immersion?
- 4- La présence du trou et des côtés sur les échantillons de métal influence-elle la vitesse de corrosion?

Le programme d'essai a été effectué au laboratoire du génie de l'environnement de l'École Polytechnique de Montréal, et s'est poursuivi sur une période totale de 13 semaines.

CHAPITRE II

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

La corrosion est un sujet étudié depuis plus de cent ans. La présente revue bibliographique n'est pas un résumé exhaustif de toutes les découvertes faites dans ce domaine. Elle fait plutôt un survol des principaux points permettant une meilleure compréhension des phénomènes observés lors de cette étude.

2.1 LE POTENTIEL ÉLECTROCHIMIQUE

La corrosion d'un métal s'effectue lorsque le produit de la corrosion présente un niveau d'énergie plus faible que le métal lui-même (Piron, 1982). La corrosion à la surface d'un métal placé dans une eau contenant des électrolytes est un processus électrochimique. En présence d'électrolytes, il se crée une différence de potentiel entre la solution et la surface du métal. Le système doit tendre vers un équilibre stable. La corrosion d'un métal (M) peut être décrite comme suit:



Lorsque la réaction va vers la droite le métal est corrodé, il perd alors des électrons et se dissout. Quand la réaction va vers la gauche, les ions métalliques sont réduits, le métal fait ainsi un gain d'électron. A l'équilibre, les deux réactions (d'oxydation et de réduction), s'effectuent à la même vitesse, et il n'y a alors pas de corrosion observée.

2.1.1 Courbe courant-tension

Lorsque l'on applique un potentiel de plus en plus anodique à partir du potentiel de corrosion, le fer se dissout (région a-b sur la figure 2.1) jusqu'à un potentiel où la vitesse de dissolution est limitée par la diffusion des ions dans la solution, un palier de courant est alors observé (région b-c sur la figure 2.1). Cependant, ce qui caractérise cette courbe courant-tension, ce sont les transitions brusques de courant au potentiel de passivation U_p (région c-d). En effet, lorsque le potentiel appliqué atteint le potentiel de passivation U_p , le courant chute brusquement et devient presque nul. Le métal ne se dissout pratiquement plus; l'électrode entre alors dans un état de passivation. (Epelboin et al., 1975).

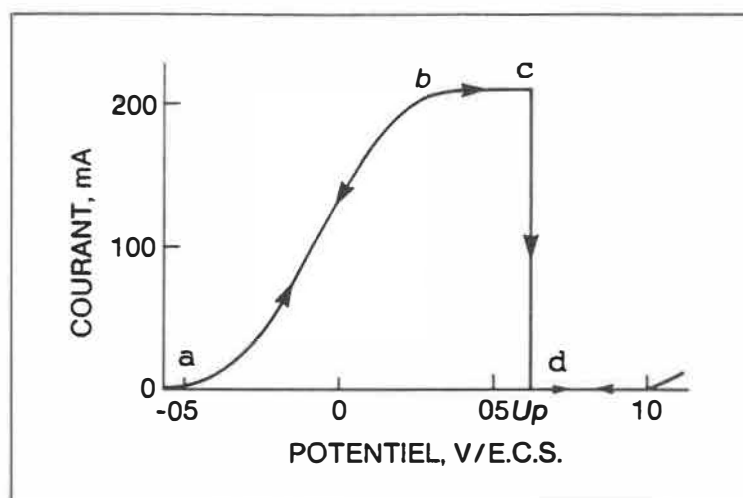


Figure 2.1 Courbe courant-tension.

2.1.2 Corrosion dans les réseaux de distribution d'eau potable

Les métaux les plus utilisés dans les réseaux de distribution d'eau potable sont le cuivre et les métaux à base de fer tel que la fonte ductile. L'application de l'équation (2-1) pour ces deux métaux permet d'écrire:



Dans les réseaux de distribution d'eau potable, l'eau se dissocie avec dégagement d'hydrogène et d'oxygène. Les ions

hydrogène libérés (H^+) sont réduits selon l'équation (2-4) et l'oxygène est réduit selon l'équation (2-5). L'oxygène et les ions hydrogènes deviennent des accepteurs d'électrons.



2.2 DIAGRAMME DE POURBAIX

Les diagrammes de Pourbaix (1963) expriment le potentiel du métal mesuré à l'aide d'une électrode en fonction du pH de la solution. Le diagramme du système fer-eau est présenté à la figure 2-2. Pourbaix a aussi établi des diagrammes tension-pH du cuivre (figure 2-3). Ces diagrammes montrent que certains produits de la corrosion sont stables du point de vue thermodynamique, et qu'ils peuvent être rencontrés sous des conditions de potentiels différents.

2.2.1 Région d'immunité

Il ressort de l'observation de la figure 2-2 que lorsque le potentiel à l'électrode est faible, le fer est dans une zone d'immunité, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de corrosion. Cependant, l'eau n'est pas stable sous ces

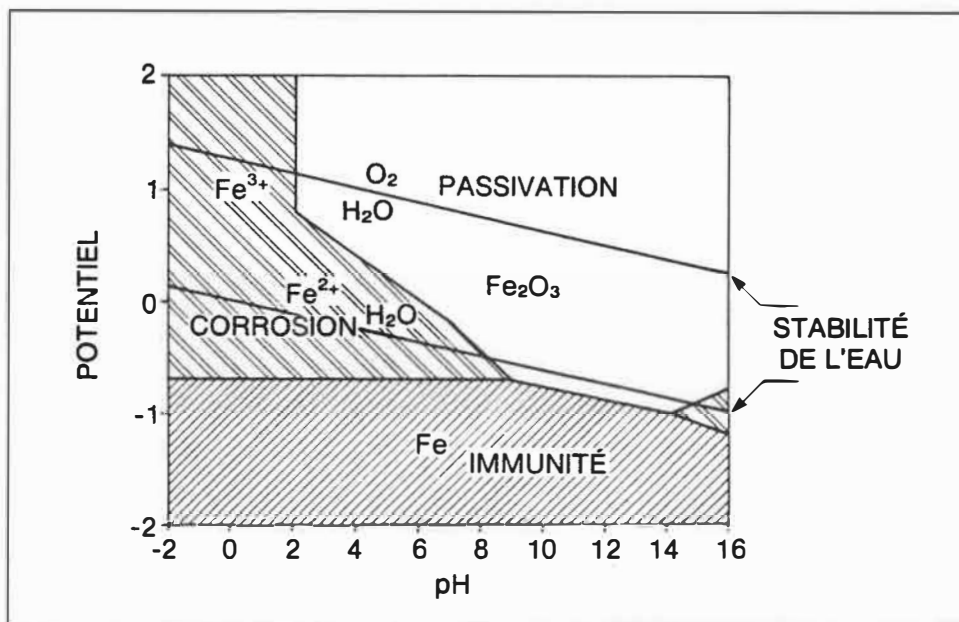


Figure 2.2 Diagramme de Pourbaix du fer dans l'eau.

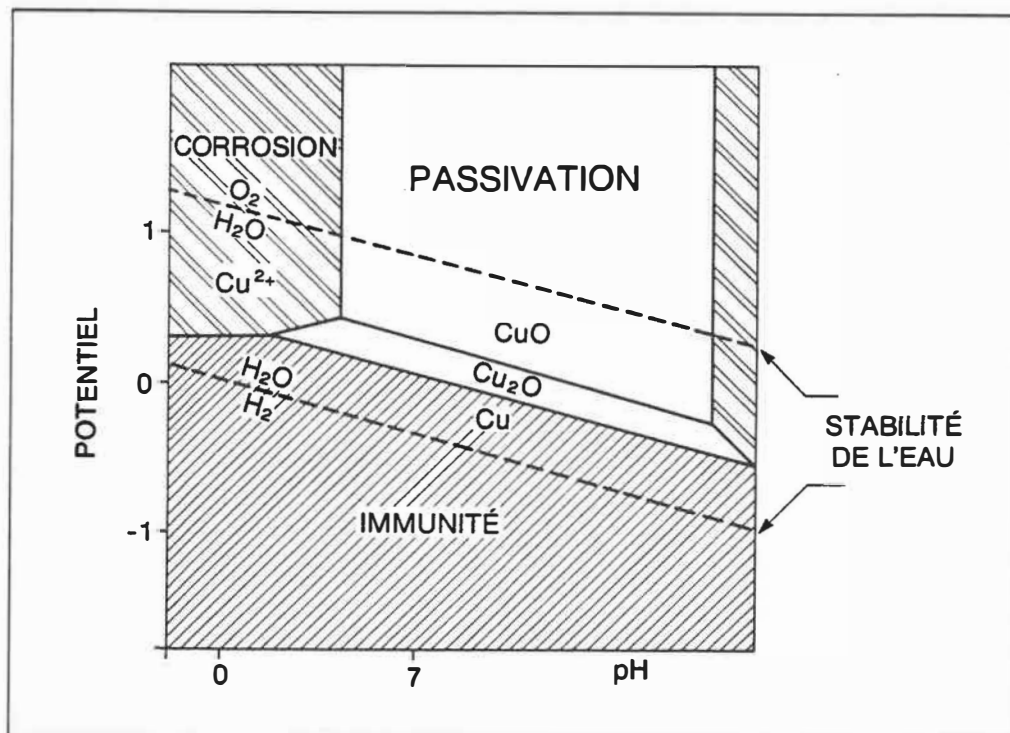


Figure 2.3 Diagramme de Pourbaix du cuivre dans l'eau.

conditions et tend à se dissocier. La région d'immunité du cuivre présente des valeurs de potentiel plus élevées, et peut exister sous des conditions de stabilité pour l'eau (figure 2-3).

2.2.2 Région corrosive

La corrosion est observée lorsque le pH est faible (inférieur à 6,5 pour le cuivre) et le potentiel à l'électrode relativement élevé. Les espèces ioniques stables pour le fer sont Fe^{2+} ou Fe^{3+} , et pour le cuivre le Cu^{2+} .

2.2.3 Etat de passivation

Lorsque le potentiel à l'électrode et le pH sont élevés, le produit solide de la corrosion du fer est le $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s})$ (figure 2-2). L'oxyde de cuivre quant à lui peut être composé de $\text{CuO}(\text{s})$ et de $\text{Cu}_2\text{O}(\text{s})$ (figure 2-3). Ces produits peuvent dans certains cas former un dépôt à la surface du métal et ainsi le protéger. Le métal atteint alors un état de passivation qui a pour effet de réduire la vitesse de corrosion. La nature chimique de même que les propriétés physiques et structurales du film protecteur influencent la corrosion du métal (Stone et al., 1987). La vitesse de corrosion du fer en état de passivation est souvent inférieure à $0,01 \text{ g/m}^2\text{.d.}$

2.2.4 Limites des diagrammes de Pourbaix

Les diagrammes tension-pH peuvent être fort utiles lors des études préliminaires de la corrosion. Leur utilisation pour expliquer le comportement de métaux immergés dans des solutions d'électrolytes permet de dégager les conditions théoriques de la corrosion. Cependant, les diagrammes de Pourbaix ne peuvent décrire de façon complète toutes les formes ioniques présentes dans l'eau, de même que la composition de tous les produits solides résultant de la corrosion, puisque plusieurs données ne sont pas disponibles dans la pratique. Ces diagrammes indiquent seulement l'existence d'une possibilité de corrosion à partir des considérations énergétiques. Ils ne donnent aucune indication sur la cinétique des réactions de la corrosion.

2.3 LES DIFFERENTS TYPES DE CORROSION

Il existe plusieurs types de corrosion. La façon dont le métal est attaqué dépend du métal lui-même, de la formation de l'oxyde métallique et de son dépôt à la surface du métal, ainsi que des conditions hydrauliques du système. La corrosion peut être qualifiée d'uniforme, de localisée ou de galvanique.

2.3.1 Transferts d'électrons et d'ions

Dans tous les types de corrosion, il est toujours question des deux composantes d'une cellule électrochimique à savoir: l'anode et la cathode. L'anode et la cathode sont des sites dans le métal qui présentent une différence de potentiel. L'oxydation et la dissolution du métal s'effectue à l'anode. Les électrons libérés par la réaction anodique migrent vers la cathode où ils rencontrent un accepteur d'électron tel l'oxygène.

Dans la solution, les ions positifs libérés se déplacent vers la cathode, et les ions négatifs libérés à la cathode vont vers l'anode, afin de maintenir la solution électriquement neutre (figure 2-4).

2.3.2 Distribution des régions anodiques et cathodiques

Les différentes formes de corrosion sont principalement influencées par la distribution des régions anodiques et cathodiques sur la surface du métal. Si ces régions sont microscopiques et très rapprochées les unes des autres, la corrosion peut être relativement uniforme sur toute la surface. Cependant, si les régions anodiques et cathodiques sont dispersées et présentent une forte différence de potentiel, des noyaux de corrosion peuvent apparaître, quelquefois ils donnent l'aspect de dépôts irréguliers aussi nommés tubercules (Larson, 1975).

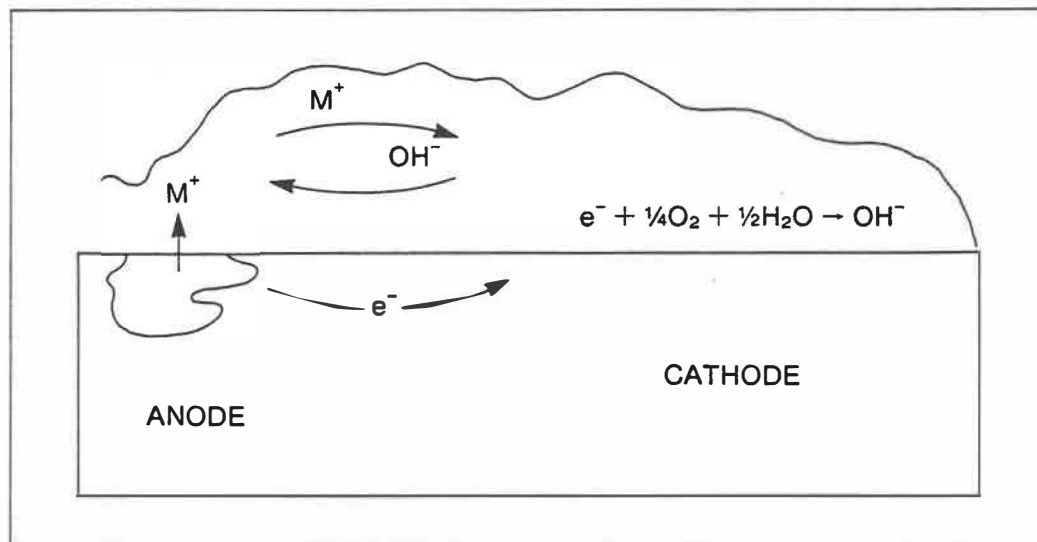


Figure 2.4 Cellule de corrosion.

2.3.2.1 La corrosion uniforme

Lors d'une corrosion uniforme, la surface du métal peut être considérée comme une polyélectrode (Petrocelli, 1960; Mancy, 1966). Chaque site à la surface du métal peut rapidement passer du type anodique au type cathodique. Comme les sites anodiques se déplacent sur le métal, la perte de métal sera relativement uniforme sur toute la surface. La corrosion interne dans les conduites de distribution d'eau potable est plus souvent uniforme que localisée, réduisant ainsi les risques de rupture (AWWA Research Foundation, 1985).

2.3.2.2 La corrosion galvanique

Lorsque le système est composé de métaux différents, les régions cathodiques et anodiques sont fixes, une corrosion de type galvanique peut alors être observée. Ce type de corrosion est le résultat du contact entre deux métaux différents. L'un des métaux sert d'anode alors que l'autre remplit la fonction de cathode. La vitesse de la corrosion galvanique augmente avec l'augmentation de la différence de potentiel entre les deux métaux. La différence de potentiel est généralement augmentée par le rapprochement des deux métaux, de même qu'en accroissant la minéralisation ou la conductivité de l'eau. Lorsque deux métaux sont mis en contact ou qu'ils baignent dans une solution commune, c'est le métal le moins noble (le moins inerte chimiquement) qui sert d'anode et qui se corrode. Le cuivre et ses alliages par exemple accélèrent la corrosion de l'acier lorsqu'ils sont mis en contact direct (Hartley, 1982).

2.3.2.3 La corrosion localisée

On assiste à une corrosion localisée pouvant mener à la formation de vésicules lorsqu'il y a des imperfections dans le métal tel que des faiblesses menant à la rupture du film protecteur, ou des régions du métal qui subissent de fortes tensions. Une attaque localisée peut aussi bien

survenir dans le cas de la corrosion galvanique que lors de la corrosion d'un métal seul. L'endroit où s'exerce la tension est appelé la région anodique. Habituellement la région anodique est plus petite que la région cathodique, la corrosion à l'anode conduit alors plus rapidement à une perforation du métal que la corrosion uniforme.

2.4 L'INDICE DE LANGE LIER

L'indice de Langelier (IL) est le plus connu des indices de la corrosion. Il permet d'ajuster le pH de l'eau à une valeur supérieure au pH de saturation, afin de provoquer une précipitation de carbonate de calcium. Ce dépôt s'il est adhérent et imperméable, protégera l'intérieur des conduites des attaques de la corrosion. Le pH de saturation (pH_s) peut être calculé à l'aide de l'équation 2-6.

$$pH_s = A + B - \log [Ca^{2+}] - \log [HCO_3^-] \quad (2-6)$$

Pour une température donnée, les crochets indiquent une concentration molaire (mol/L) des ions calcium et des ions bicarbonates. Le calcul du pH d'équilibre de même que la définition des constantes A et B sont décrites dans APHA, AWWA, WPCF (1985). L'indice de Langelier est calculé à l'aide de l'équation 2-7.

$$IL = pH - pH_s \quad (2-7)$$

2.4.1 Interprétation de l'indice de Langelier

Une valeur positive de l'indice de Langelier indique que l'eau a tendance à précipiter du carbonate de calcium ($\text{CaCO}_3(\text{s})$), ce qui signifie que l'eau est incrustante. Lorsque l'indice de Langelier est négatif, l'eau est alors sous saturée en CaCO_3 et devient agressive. Une valeur de zéro indique que l'eau est à son pH d'équilibre, elle n'a alors tendance ni à dissoudre, ni à précipiter des carbonates de calcium (Desjardins et al., 1983).

2.4.2 Les limites de l'indice de Langelier

L'indice de Langelier présente cependant plusieurs faiblesses. Il est difficile à calculer, puisque qu'il est affecté par toutes les substances présentes dans l'eau de même que par les éléments qui forment le dépôt. Il est de plus sensible aux changements de températures (Flynn, 1984). Il a également été observé que sous certaines conditions, un dépôt de carbonate de calcium peut être formé même si l'indice de Langelier est négatif. Ce phénomène peut s'expliquer par l'augmentation du pH de l'eau à proximité du métal. L'utilisation de l'indice de Langelier est limitée. Il arrive à prédire si le CaCO_3 va précipiter ou demeurer en solution, mais il ne peut pas prédire en quelle quantité.

2.5 EFFET DES PROPRIÉTÉS DE L'EAU SUR LA CORROSION DU CUIVRE ET DES MÉTAUX FERREUX

Plusieurs facteurs chimiques et physiques peuvent influencer la corrosion du fer et du cuivre dont: l'oxygène dissous, le pH, le chlore résiduel, les chlorures, les sulfates, les nitrates, le calcium, la température et la conductivité.

2.5.1 L'oxygène dissous

L'oxygène dissous est depuis longtemps reconnu comme étant l'un des plus importants agents responsables de la corrosion des métaux à base de fer (Walker et al., dans AWWA Research Foundation, 1985). Il peut influencer la vitesse de corrosion de différentes façons. L'oxygène peut servir d'accepteur d'électrons et par la suite être réduit en ion (OH^-), ce qui favorise l'oxydation du métal.

Lors de la corrosion du cuivre, l'oxygène est le seul accepteur d'électron, contrairement au fer pour qui l'ion hydrogène peut également servir d'accepteur d'électrons. C'est une des raisons pour laquelle le cuivre offre une meilleure résistance à la corrosion que le fer.

2.5.1.1 Relation entre l'oxygène dissous et la vitesse de corrosion

L'oxygène dissous exerce un double effet sur la corrosion de l'acier. Il peut augmenter ou réduire la vitesse de corrosion de ce métal, selon les constituants minéraux de l'eau (Larson, 1966;1939). Une relation linéaire entre la concentration d'oxygène dissous et la vitesse de corrosion de l'acier est observée lorsque la concentration d'oxygène est inférieure ou égale à 9 mg/L. La vitesse de corrosion est plus faible pour une concentration en oxygène dissous supérieure à 9 mg/L (Cox et Roedtheli, 1931).

2.5.1.2 Réduction de la diffusion de l'oxygène à travers le film protecteur du cuivre

Stone et al. (1987) ont effectué des recherches sur la corrosion du cuivre dans l'eau potable. Ils ont étudié l'importance de l'état de surface du métal, en faisant deux séries d'expériences, l'une avec des électrodes de cuivre neuves, et l'autre avec des électrodes âgées ayant été placées dans l'eau quelques mois avant l'expérience. Les vitesses de corrosion aussi bien pour les électrodes de cuivre neuves que pour les électrodes âgées, augmentent de 50% à 100% pour une augmentation correspondante d'oxygène

dissous. L'augmentation est cependant plus grande pour le cuivre propre que pour le cuivre âgé. Ces résultats sont en accord avec le principe de la limitation de la diffusion de l'oxygène à travers le film protecteur.

2.5.2 Le pH

2.5.2.1 La corrosion du fer en fonction du pH

De nombreux chercheurs dont Eliassen et Lamb (1953), Uhlig (1971), Ahmadi (1981), Boffardi et Schweitzer (1984) ont étudié l'influence du pH sur la corrosion du fer. Une variation du pH entre 6,0 et 9,5 pendant une courte période, a peu d'effet sur la vitesse de corrosion d'échantillons d'acier nettoyés. Cependant, il est connu que le pH affecte certaines réactions secondaires tel l'oxydation des ions ferreux (Fe^{2+}), ce qui a un effet direct sur la formation des dépôts, qui eux influencent la vitesse de corrosion.

Desjardins et al. (1983) ont étudié la corrosion de la fonte ductile mise en contact avec des eaux présentant une faible concentration de minéraux. Les résultats montrent que la fonte ductile est stable dans une eau ayant un pH supérieur ou égale à 7,5. De la corrosion localisée (formation de crevasses) a été constatée sur les échantillons de fonte ductile immergés dans une eau à pH de 6,5.

Millette (1985) a fait des expériences en utilisant

l'eau de la ville de Vancouver qui est une eau naturellement acide. Cet auteur a trouvé que l'addition de chaux hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) afin d'augmenter le pH de l'eau de 5,5 à 8,1 a entraîné une augmentation de la vitesse de corrosion de la fonte ductile de 15%. Les échantillons étaient placés dans des cellules à écoulement par gravité.

2.5.2.2 Corrosion du cuivre en fonction du pH

Lorsque le pH de l'eau est supérieur à 3,5, l'oxydation du cuivre favorise la formation d'un oxyde métallique qui réduit la corrosion (Hilburn, 1985). L'augmentation du pH peut amener le cuivre à un état de passivation en réduisant de façon marquée l'intensité du courant anodique (AWWA Research Foundation, 1985).

Stone et al. (1987) ont observé qu'une augmentation du pH de 6 à 8, diminue la vitesse de corrosion du cuivre de presque 50%.

2.5.2.3 Le rôle du pH de la solution adjacente à l'oxyde de cuivre

Hilburn (1983) suggère que la vitesse de corrosion du cuivre peut être limitée par la diffusion lente des ions OH^- en provenance de la surface d'oxyde de cuivre. Il en résulte une augmentation du pH de la solution adjacente à l'oxyde, ce qui a pour effet de favoriser la précipitation

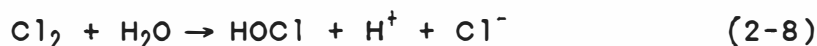
du $\text{Cu}(\text{OH})_2$ et des carbonates qui ont une faible solubilité. Cette précipitation réduit la vitesse de croissance de l'oxyde.

2.5.2.4 L'ajustement du pH de l'eau

L'approche traditionnelle pour réduire les effets de la corrosion est d'ajouter à l'eau potable de la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). La chaux peut éliminer les problèmes d'eau rouge puisqu'en augmentant la concentration de calcium, on favorise la précipitation des produits de la corrosion du fer. Il est recommandé de maintenir le pH de l'eau potable à 7,5 afin d'améliorer la protection contre la corrosion (Desjardins et al., 1983). Lane (1978) recommande d'ajuster le pH à une valeur plus élevée, soit entre 8,5 et 9,0.

2.5.3 Le chlore résiduel

Lorsque le chlore est ajouté à une eau ayant un pH supérieur ou égal à 3,5, le chlore se transforme en acide hypochloreux (HOCl) selon l'équation 2-8.



L'acide hypochloreux est le principal agent responsable de l'action bactéricide (Flynn, 1984). La transformation du chlore en acide hypochloreux et par la suite en ion hypochlorite (équation 2-9) est fonction du pH. Pour une

eau à $\text{pH}=7,5$ (et à 25°C), 75% du chlore ajouté demeure sous la forme HOCl , alors qu'à $\text{pH}=8,0$, il ne reste plus que 20% d'acide hypochloreux. Fair et al., dans Flynn (1984) ont montré que l'acide hypochloreux (HOCl) est 80 fois plus efficace que l'ion hypochlorite (OCl^-) pour la désinfection.

En général, les vitesses de corrosion du cuivre et de la fonte sont plus faibles lorsque le pH est élevé. Par contre, une augmentation du pH entraîne une baisse du pouvoir désinfectant du chlore. Il faut donc faire un compromis quant à l'ajustement du pH .

2.5.3.1 Influence du chlore sur la vitesse de corrosion du fer

Le chlore peut accélérer la vitesse de corrosion de l'acier de deux façons soit:

- 1- en augmentant le potentiel d'oxydo-réduction des électrolytes, ce qui favorise la conversion du fer en fer ferreux et par la suite en fer ferrique;
- 2- par une séquence de réactions chimiques produisant des ions hydrogènes, de l'acide hypochloreux (HOCl), des ions hypochlorites (OCl^-), et des ions chlorures (Cl^-), (équations 2-8 et 2-9).

La présence de HOCl et OCl^- joue un rôle dans l'évaluation du caractère corrosif de l'eau, puisque ces deux substances sont des oxydants puissants (Pisigan et

Singley, 1987). Larson (1955) et Volkening (1950) ont noté que la vitesse de corrosion de l'acier augmente lorsque la concentration de chlore libre est de 0,4 mg/L ou plus. Par contre, le chlore sous la forme de monochloramine réduit la vitesse de corrosion de l'acier lorsqu'il est présent à des concentrations variant de 0,4 à 3,6 mg Cl_2/L (Larson, 1975).

2.5.3.2 Influence du chlore sur la vitesse de corrosion du cuivre

Les résultats d'analyses électrochimiques montrent que la vitesse de corrosion du cuivre augmentent de 20% lorsque le chlore résiduel libre passe de 0 à 1,0 mg/L. Ces études ont été réalisées sur des réseaux de distribution d'eau potable situés dans l'état de Washington (Nakhjiri, 1984). Afin de limiter la corrosion du cuivre Atlas et al. (1982) recommandent de ne pas dépasser une concentration en chlore libre de 2 mg/L.

2.5.4 Les chlorures et les sulfates

Des études faites par plusieurs auteurs ont permis de vérifier l'influence de ces deux anions sur la vitesse de corrosion. Ahmadi (1981), Okamoto et Shibata (1978), Hatch et Rice (1959), Larson et Skold (1957) ont étudié le comportement du fer en présence de chlorures et de sul-

fates. Ils ont observé que la vitesse de corrosion du fer augmente avec l'augmentation de la concentration des chlorures (Cl^-) et des sulfates (SO_4^{2-}). L'augmentation de la vitesse de corrosion serait causée par la présence de failles dans le film protecteur.

Les résultats de Tékeu (1983) montrent que la vitesse de corrosion de la fonte augmente et tend asymptotiquement vers une limite lorsque les concentrations de chlorures et de sulfates augmentent. Toutefois, quand la concentration des chlorures dépasse une valeur située entre 200 et 380 mg/L, la vitesse de corrosion moyenne commence à diminuer.

2.5.5 Les nitrates

Les résultats de Tékeu (1983) indiquent que la corrosion de la fonte ductile augmente avec la concentration des nitrates pour des concentrations inférieures à 100 mg/L environ.

2.5.6 Le calcium

Lors d'études effectuées sur l'eau des Grands Lacs, il a été observé que la concentration de calcium a une grande influence sur la vitesse de corrosion de la fonte ductile. Le calcium en présence d'alcalinité présente un effet inhibiteur. L'ion calcium (Ca^{2+}) est nécessaire à la formation du dépôt protecteur (Sontheimer et al., 1981).

De plus, la vitesse à laquelle le dépôt s'établit est augmentée par une plus forte concentration en calcium (Larson et Skold, 1957; Pisigan, 1981 dans Pisigan et Singley, 1985).

2.5.7 La température

Une augmentation de température peut avoir deux effets opposés. D'un côté, elle peut augmenter la vitesse de réaction de presque tous les processus électrochimiques, et augmenter ainsi la vitesse de corrosion. D'autre part, elle peut diminuer la solubilité des gaz, avec pour effet de réduire la vitesse de corrosion si ces gaz sont des accepteurs d'électrons tel l'oxygène. Une augmentation de température peut également diminuer la vitesse de corrosion en modifiant l'équilibre calco-carbonique, et favoriser la précipitation de carbonates de calcium lorsque l'eau présente de la dureté non carbonatée.

2.5.8 La conductivité

L'augmentation de la conductivité jusqu'à une valeur de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ augmente la vitesse de corrosion du cuivre, au-delà de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ elle a moins d'effet. (Stone et al., 1987) . Cependant, une faible conductivité tend à localiser les cellules de concentration et augmenter la pénétration par noyautage (Vik, 1986). Pisigan et Singley (1987) ont

observé qu'une augmentation de la conductivité due aux ions Na^+ et $\text{H}(\text{CO}_3)^-$ accroît l'attaque corrosive sur le métal.

2.5.9 Résumé des propriétés de l'eau sur la corrosion

Un survol des propriétés de l'eau potable montre que les propriétés suivantes exercent une réelle influence sur la vitesse de corrosion du cuivre et des matériaux à base de fer:

- l'augmentation de l'oxygène dissous, des chlorures, des sulfates, des nitrates et du chlore résiduel ont généralement pour effet d'augmenter la vitesse de corrosion;
- un pH de même qu'une concentration en calcium élevés peuvent favoriser une diminution de la vitesse de corrosion.

2.6 LES FILMS PROTECTEURS

Il existe deux types de dépôts constituant les films protecteurs, le premier est composé d'un oxyde métallique formé durant l'état de passivation, le second est composé de carbonates et il est le résultat du dépôt des produits chimiques contenus et transportés dans l'eau. L'oxyde métallique du fer est communément appelé de la rouille. L'oxyde recouvrant le cuivre a une épaisseur microscopique et est généralement invisible.

2.6.1 Dépôts de carbonates

La formation d'un dépôt tel que le carbonate de calcium $\text{CaCO}_3(\text{s})$ et les carbonates de fer lors de la corrosion du fer et de l'acier, sont normalement plus épais et plus poreux que les films formés en état de passivation (Sontheimer et al., 1981). Ils ne réduisent pas la vitesse de corrosion autant que les oxydes métalliques. La formation de dépôt sur des conduites de fer diminue la vitesse de corrosion en diminuant la vitesse de transfert de l'oxygène à la surface du métal. Le film formé lors de l'état de passivation exerce un contrôle de la réaction à l'anode alors que les dépôts tel le CaCO_3 agissent en réduisant les réactions cathodiques.

2.6.2 Les propriétés semi-conductrices des produits de la corrosion

Il est connu depuis plusieurs années que la plupart des produits de la corrosion ne sont pas de nature isolante mais présentent plutôt des propriétés semi-conductrices. Il ressort des études de Craig (1984) que les oxydes métalliques ne sont pas électriquement neutres. Ils peuvent présenter un excès ou un déficit de cations ou d'anions. Les oxydes métalliques ayant un surplus d'électrons sont des semi-conducteurs de type n, et ceux qui ont perdu des

électrons sont nommés de type p. Le Fe_2O_3 est un semi-conducteur de type n, tandis que le FeO est un semi-conducteur de type p.

Sato, dans Di Quatro et al. (1985) a également étudié les propriétés semi-conductrices de la couche formée à partir des produits de la corrosion du cuivre. Il a observé que la présence des deux types de semi-conducteurs n et p, ainsi que l'adsorption des anions peut expliquer les différentes stabilités électrochimiques, constatées pour la couche protectrice qui croît sur le métal à l'état de passivation.

2.6.3 Les produits de la corrosion du fer

Les produits de la corrosion du fer étudiés dans les recherches de Singley et al. (1985), Ainsworth (1981) et Sontheimer et al. (1981) sont généralement composés de goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$), de lepidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$), de magnétite (Fe_3O_4), de calcite ($\text{CaCO}_3(\text{c})$) et d'aragonite ($\text{CaCO}_3(\text{a})$). Pisigan et Singley (1985) ont également observé du Fe_2O_3 . D'autres produits de la corrosion peuvent originer de l'eau elle-même mentionnons, le dioxyde de manganèse ($\text{MnO}_2(\text{s})$), de même que le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{s})$) (Kölle et Rösch, dans AWWA Research Foundation, 1985).

Pisigan et Singley (1985) ont analysé par diffraction de rayons-x les produits de la corrosion de l'acier doux

obtenus après une période d'immersion de 1, 5, 10, et 20 jours. Ils ont identifié de l'aragonite seulement sur les échantillons immergés pendant 5 jours, la présence de magnétite étant de plus en plus évidente, à mesure que le lepidocrocite décroît.

2.6.4 Les produits de la corrosion du cuivre

Les conduites de cuivre qui ont été en contact avec de l'eau potable révèle la formation d'un oxyde de cuivre. La présence de carbonates dans l'eau favorise la précipitation de calcite ou de malachite ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) (Rossum, 1985; Treweek et al., 1985 et Kristiansen et al., 1972).

Hilburn (1985) indique que le film protecteur peut être composé de plusieurs couches. Le film peut d'abord être formé d'un oxyde de cuivre (Cu_2O), pouvant se développer jusqu'à une épaisseur de 0,2 μm avant que les contraintes ne puissent le briser ou le fissurer. Le premier film peut être recouvert d'une couche poreuse composée de Cu_2O , CuO , $\text{Cu}(\text{OH})_2$ et de certaines espèces de carbonates de cuivre (figure 2.5). Kruger, dans AWWA Research Foundation (1985) indique que le dioxyde de carbone dissous favorise la formation du Cu_2O par rapport au CuO .

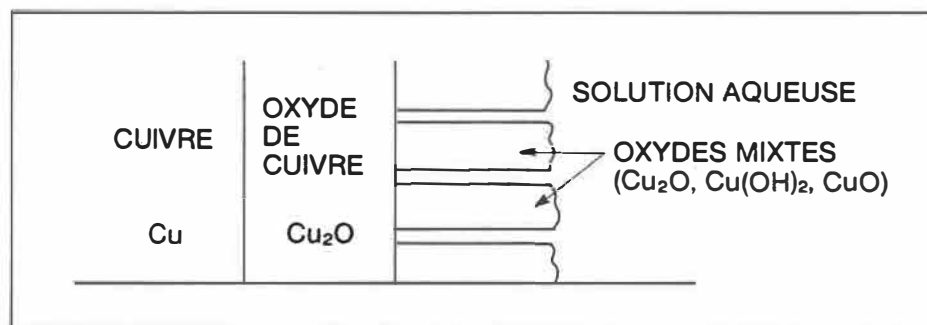


Figure 2.5 Corrosion du cuivre dans une solution aqueuse.

2.6.5 Importance de l'âge du métal sur le développement du film protecteur pour le cuivre

Selon les études de Stone et al. (1987) et Reiber et al. (1987), il se développe à la surface d'une conduite de cuivre neuve un oxyde métallique épais. Durant la période de formation de cet oxyde, le métal se corrode à une vitesse plus grande que les surfaces âgées, l'épaisseur de l'oxyde produit une protection substantielle. A partir des résultats obtenus, il est permis de suggérer que le transport des réactifs à travers le film de même que la vitesse de réaction à l'interface sont les facteurs limitant la vitesse de corrosion de l'eau du robinet. Les surfaces

âgées sont plus représentatives de l'état de surface des conduites de cuivre constituant les réseaux de plomberie domestique, puisque les parois internes de la plupart des conduites sont recouvertes d'un film protecteur. Les produits de corrosion sont différents dans les vieilles conduites. Une enveloppe semblable à une coquille recouvre les produits de la corrosion intérieurs. Cette sorte de structure a d'abord été proposée par Butler et Ison (1966), et plus récemment par Kölle et Rösch, dans AWWA Research Foundation, (1985).

2.6.6 Conditions favorables à la formation d'un dépôt protecteur

Lane (1978) suite à des études effectuées dans l'état d'Illinois a observé qu'une dureté de 80 à 120 mg/L CaCO_3 , qu'une concentration en calcium et qu'une alcalinité d'au moins 60 mg/L CaCO_3 constituent des conditions propices à la formation d'un dépôt protecteur. Sous ces conditions, l'apport en carbonate de calcium et la capacité tampon sont suffisamment élevées pour favoriser la formation d'un film protecteur.

2.7 PRÉVENTION DE LA CORROSION

Selon Hartley (1982) les quatre méthodes principales de prévention de la corrosion sont:

- 1- l'enlèvement des substances cathodiques: lors de la corrosion de l'acier, il se forme une couche d'oxydes appelés calamines. Les calamines sont très cathodiques par rapport au métal. On peut enlever ces calamines par décapage au sable ou quelquefois par décapage chimique. Ces traitements permettent de prévenir la formation de piqûres;
- 2- revêtement et film protecteur: ils forment une barrière physique entre le métal et l'environnement agressif. Ces films protecteurs peuvent être installés en usine (résines, plastiques, galvanisation, produits à base d'asphalte ou de caoutchouc, peintures), ou formés à l'intérieur des conduites tel que les dépôts de carbonate de calcium;
- 3- protection cathodique: un métal fort actif tel le zinc est fixé à une structure en fer que l'on veut protéger. Le zinc libère des électrons qui vont provoquer une réaction cathodique sur le fer. Ce dernier agit alors

comme cathode et est protégé (Piron, 1982);

- 4- inhibiteurs: ce sont des produits chimiques ajoutés à l'eau, qui ont pour effet de réduire considérablement la vitesse de l'oxydation métallique. Les principaux inhibiteurs sont des composés organiques qui s'adsorbent à la surface du métal et créent alors une barrière protectrice. On peut aussi utiliser des agents oxydants qui favorisent la formation d'une mince couche d'oxyde qui protège la conduite (Piron, 1982). Les produits suivants sont également utilisés:
- les polyphosphates s'unissent au fer pour former des complexes qui empêchent la formation de vésicules. Le calcium doit être présent dans l'eau pour que les polyphosphates agissent comme inhibiteurs;
 - les sels de polyphosphates de sodium, l'hexamétaphosphate de sodium (NaPO_3) est particulièrement efficace, il est non-toxique, sans couleur et sans goût;
 - le polyphosphate de zinc et l'orthophosphate de zinc sont certainement les inhibiteurs cathodiques les plus efficaces pour le contrôle de la corrosion dans les systèmes de distribution d'eau (Flynn, 1984). L'ajout du zinc augmente le pouvoir des polyphosphates, ils sont donc plus efficaces que le

- polyphosphate de sodium (Boffardi et Schweitzer, 1984);
- les silicates peuvent également réduire la corrosion de l'acier (Eastman, 1981).

CHAPITRE III

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Ce chapitre est divisé en quatre sections soit:
la description du montage utilisé; la fabrication des échantillons de métal; la présentation du calendrier expérimental; et finalement, les méthodes d'analyse des caractéristiques de l'eau.

3.1 PRÉSENTATION DU MONTAGE

Un bac en polyéthylène ayant une capacité totale de 2600 litres est rempli de 1600 litres d'eau potable, traitée et distribuée par l'usine de traitement des eaux de la ville de Montréal. L'eau est ensuite distribuée dans 8 bassins de 200 litres (87 cm de haut et 57 cm de diamètre). Ces bassins sont remplis environ à toutes les deux semaines. L'eau des bassins de 200 L est ensuite amenée aux cellules de contact à l'aide de pompes. Chaque bassin alimente 2 cellules de contact. Les pompes sont refroidies avec l'eau des bassins à l'aide d'un tube de recirculation, ce qui permet un brassage du liquide. Les pompes et les cellules

sont reliées par des tubes en plastique de type Tygon. Pour prévenir la contamination, tous les constituants du montage y compris les raccords sont faits de matériaux non-métalliques. L'effluent des cellules de contact est ensuite évacué à l'égout. Un schéma du circuit hydraulique est présenté à la figure 3.1. Il est possible de consulter Tékeu (1983) pour plus de détails.

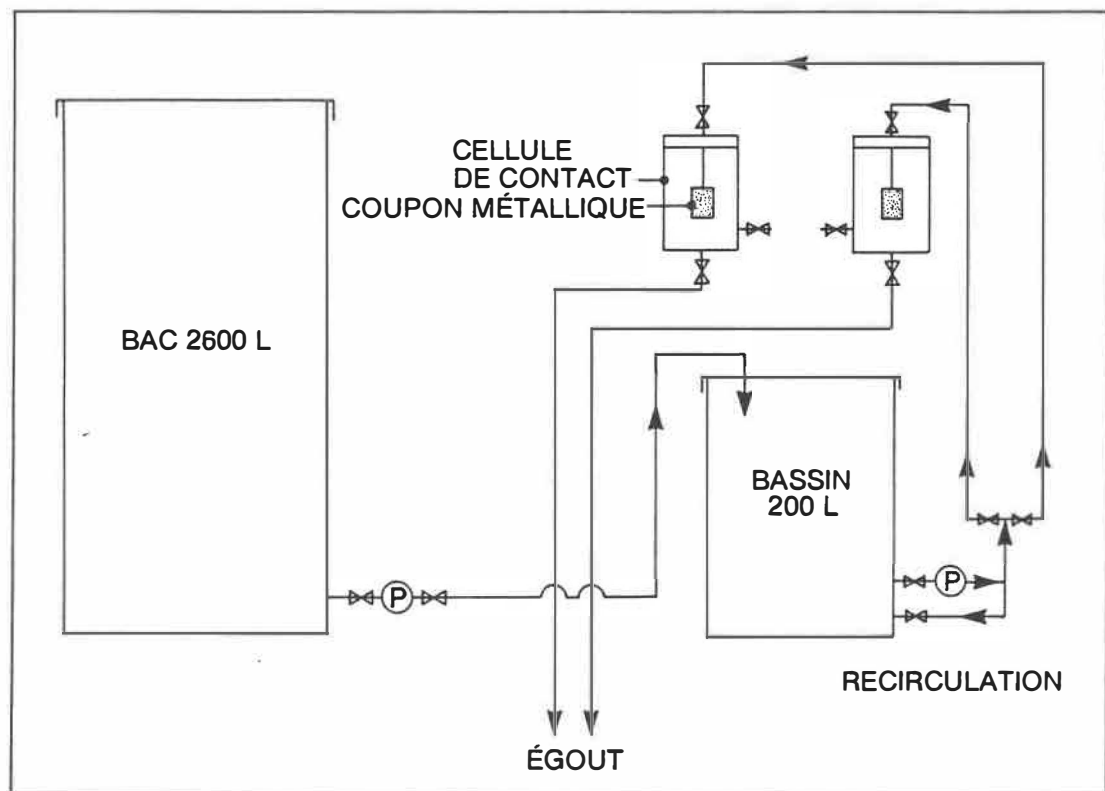


Figure 3.1 Schéma du montage expérimental .

3.1.1 Les cellules de contact

Le schéma d'une cellule de contact est présenté à la figure 3.2. Elles sont fabriquées en plexiglas pour permettre d'observer l'évolution de la corrosion des échantillons métalliques. Elles ont une forme cylindrique (200 mm de haut et 160 mm de diamètre intérieur). La paroi du mur, le couvercle et la base ont une épaisseur de 13 mm.

L'eau arrive par le haut de la cellule et est évacuée par le bas. Le débit dans les cellules est ajusté à une valeur d'environ 5 L/d, d'où un temps de rétention hydraulique d'environ 19 heures. Le débit est contrôlé par une valve en chlorure de polyvinyle (CPV) placée à la sortie. La réalisation des différentes séries d'expériences nécessite 16 cellules de contacts.

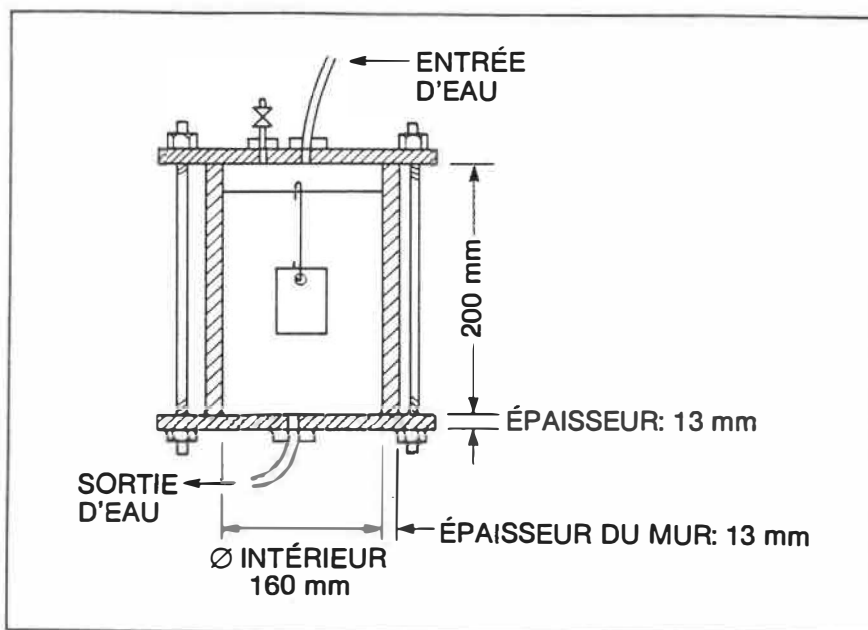


Figure 3.2 Cellule de contact.

3.2 LES ÉCHANTILLONS DE MÉTAL

3.2.1 Fabrication et identification

3.2.1.1 Les échantillons de cuivre

Les échantillons de cuivre ont été faits à partir de conduites de cuivre d'un pouce de diamètre, semi-dure de type L. Ce type de cuivre a été choisi parce qu'il est souvent utilisé dans la construction des systèmes de plomberie domestique. Les échantillons de cuivre sont de forme rectangulaire (40 mm par 30 mm), et ont une épaisseur d'un millimètre (figure 3.3). Le tuyau est d'abord coupé en anneau d'une longueur de 40 mm. L'anneau est ensuite ouvert et aplati et la bande de métal est coupée en sections de 30 mm. Un trou de 5 mm est fait approximativement à 6 mm du côté supérieur. Ce trou permet de suspendre les échantillons de métal dans les cellules de contact à l'aide d'un crochet en CPV. Les plaques sont identifiées à l'aide de numéros étampés au coin droit. Les échantillons de cuivre ont un poids variant de 11 à 13 grammes.

3.2.1.2 Les échantillons de fonte ductile

Les échantillons de fonte ductile ont été fabriqués à partir d'une conduite dont la surface interne est recouverte de ciment. Ce genre de conduite est beaucoup

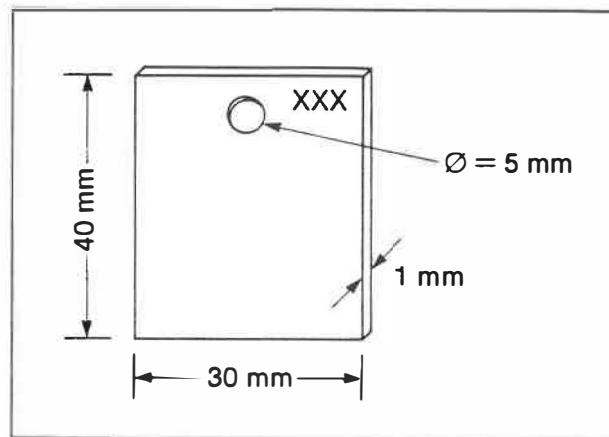


Figure 3.3 Échantillon de métal.

utilisé pour la construction de réseaux de distribution d'eau potable. Le recouvrement de ciment est enlevé lors de la fabrication des échantillons de métal. La technique de fabrication est décrite dans Millette (1985). Les dimensions sont les mêmes que celles des échantillons de cuivre (figure 3.3). Chaque échantillon pèse entre 12 et 13 grammes.

3.2.2 Description des échantillons de métal non troués

Desjardins et al. (1983) ont observé une augmentation de la corrosion près du trou qui peut être associée à une région de tension sur la métal. Le trou a donc été éliminé de la surface des échantillons afin d'étudier son influence sur la vitesse de corrosion. Une tige de verre de 8 cm de long et d'un diamètre de 3 mm a été pliée à l'aide d'un chalumeau. Les deux bras de la tige ont été collés sur la surface métallique préalablement dégraissée à l'acétone

(figure 3-4). Une colle époxy commerciale de marque Devcon c-205 a été utilisée pour le collage. Les plaques ont été suspendues dans les cellules de contact à l'aide d'un crochet de CPV retenu à l'oeillet de verre.

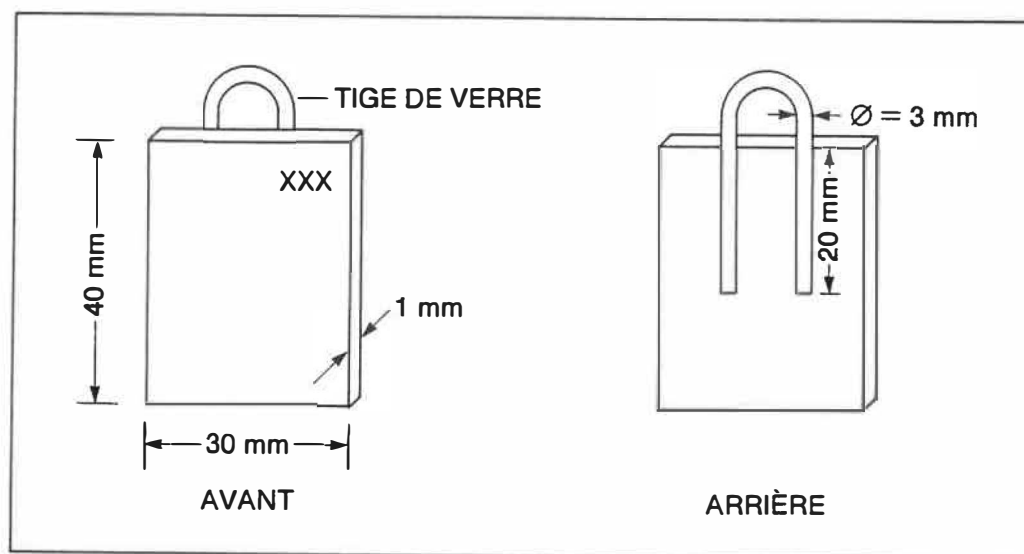


Figure 3.4 Échantillon de métal non troué.

3.2.2.1 Recouvrement des côtés

Les quatre côtés des échantillons de métal ont également été protégés avec de la colle époxy pour réduire les effets de bords. Comme l'époxy est une colle visqueuse qui durcit rapidement, il a été difficile de l'appliquer sans bavure. Il a donc fallu calculer de façon précise la surface de chacune des plaques exposée à la corrosion. L'avant et l'arrière des échantillons de métal ont été

minutieusement tracés sur un plastique transparent. Des photocopies ont été tirées de ces dessins pour ensuite procéder à la planimétrie de surface à l'aide d'un planimètre digital de marque Tamaya, modèle Planix 5. Les surfaces de corrosion de ces plaques sont présentées à l'annexe B.

3.2.3 Préparation chimique des surfaces

La fabrication des échantillons de métal nécessite l'emploi de graisse et de lubrifiant. Les plaques reviennent de l'atelier souillées de marques de doigts et de taches de graisse. Certaines d'entre elles présentent même un début de corrosion. Il est nécessaire de nettoyer les échantillons de métal afin de dissoudre les dépôts protecteurs pouvant entraver la corrosion. Il se produit une certaine perte de métal durant les lavages. Cependant, elle est sensiblement la même pour tous les échantillons de métal troués.

La procédure de nettoyage utilisée est celle proposée par Tékeu (1983). Elle présente quelques modifications par rapport à la procédure de lavage décrite par Larson et King, dans Tékeu (1983). Tel que présenté au tableau 3.1, les échantillons de métal doivent tremper successivement dans 9 solutions. L'acide 5%, dont il est question au bain #2

est composé de 2,5% (volume) d'acide chlorhydrique (HCl) et de 2,5 % (volume) d'acide nitrique (HNO₃).

TABLEAU 3.1 Séquence de lavages.

BAIN #	SOLUTION	FONCTION	DURÉE (minutes)
1	CCl ₄	Dégraisser	1
2	Acide 5%	Prétraitement	2
3	HCl(concentré)	Enlever les produits de la corrosion	1
4	Eau distillée	Enlever l'acide	2
5	Na ₂ CO ₃ (1N)	Neutraliser	1
6	Eau distillée	Enlever la base	1
7	Eau distillée	Enlever la base	1
8	Acétone recyclée	Assécher	1
9	Acétone propre	Assécher	1
		Séchage à l'air	1

Pour procéder au lavage, il est recommandé d'enfiler les échantillons de métal par groupe de 25 sur une ficelle à deux brins, 50% coton, 50% polyester. Il est préférable d'utiliser 8 longueurs de corde, afin d'éviter qu'elle ne casse, surtout lors du traitement à l'acide concentré. Il faut agiter les échantillons de métal dans les bains de solution avec un mouvement de haut en bas, une main après l'autre, afin de favoriser un bon contact entre les surfaces de métal et la solution. Il est préférable de ne pas mettre les échantillons de cuivre en contact avec les échantillons

de fonte ductile. On recommande de changer les bassins 3, 5 et l'eau distillée après avoir lavé 4 séries d'échantillons de fonte non corrodée, ou 8 séries d'échantillons de cuivre non corrodé. Lorsque la fonte est corrodée, il est souhaitable de ne pas laver plus de 2 séries d'échantillons de métal, et remplacer par la suite les solutions dans les bassins 2, 3, 5, l'eau distillée et filtrer le tétrachlorure de carbone. Après le nettoyage, les échantillons de métal sont placés dans un dessiccateur pendant 24 heures avant d'être pesés et utilisés.

3.2.4 Calcul de la vitesse de corrosion

La méthode utilisant des échantillons de métal est sans doute la méthode la plus ancienne, la moins coûteuse, et l'une des plus significatives pour l'étude et le suivi de la corrosion (Mathieu, 1982). Les échantillons de métal après avoir été préalablement nettoyés et pesés, séjournent dans l'eau pendant $\frac{1}{2}$, 1, $1\frac{1}{2}$, 2, 3, 4, 6 et 8 semaines. Ils sont ensuite séchés à l'étuve à 105°C pendant 24 heures, et pesés avec les produits de la corrosion. En dernière étape, les échantillons sont nettoyés et repesés. La vitesse de corrosion est évaluée en calculant la perte de poids avant et après immersion divisée par la surface totale de la plaque et par la durée d'immersion. La vitesse de corrosion

s'exprime en gramme par mètre carré par jour ($\text{g/m}^2\cdot\text{d}$). La collecte régulière des échantillons de métal permet de mesurer la vitesse de corrosion à toutes les $\frac{1}{2}$, 1 ou 2 semaines. Les échantillons de métal ont été pesés à l'aide d'une balance digitale de marque Sartorius 2006 MP, précise à un dixième de milligramme près. Un exemple du calcul de la vitesse de corrosion est présenté à l'annexe A.

3.2.5 Plan de l'analyse statistique

Des tests Students (T) et des tests d'analyse de variance ont été effectués afin de vérifier s'il existe une différence significative entre les vitesses de corrosion des échantillons métalliques qui ont subi une variation ponctuelle de pH, et les vitesses de corrosion des échantillons de métal qui n'ont pas subi de variation ponctuelle de pH. Les analyses ont été faites à l'aide du logiciel SAS/BASICS (SAS Institute Inc., 1985, 1985b).

3.3 CALENDRIER EXPÉRIMENTAL

Cette section présente la méthode expérimentale utilisée pour l'étude de la corrosion des échantillons de cuivre et de la fonte ductile qui n'ont pas subi de

variation de pH, ainsi que la méthode expérimentale utilisée pour les échantillons de métal ayant subi une variation de pH d'une durée de 24 heures.

3.3.1 Sans variation ponctuelle de pH

3.3.1.1 Ajustement du pH des bassins

Le pH dans les bassins de 200 L est ajusté à une valeur de 7,7 à l'aide d'acide nitrique dilué. Le pH initial de l'eau prélevée au robinet est d'environ 7,8. L'ajustement est fait quotidiennement car le pH de l'eau a tendance à monter légèrement. Pour ce faire, il suffit de prélever un litre d'eau et de réajuster son pH à l'aide d'acide nitrique 0,1 N. Il reste ensuite à calculer la quantité d'acide requise pour le bassin de 200 L, et ajouter l'acide en agitant bien pour uniformiser la solution.

3.3.1.2 Utilisation des cellules de contact

L'étude de la corrosion d'échantillons de métal qui n'ont pas subi de variation ponctuelle de pH a nécessité deux bassins de 200 L et quatre cellules de contact. Rappelons que chaque bassin contient l'eau requise pour alimenter deux cellules de contact. Le tableau 3.2 résume l'utilisation de ces quatres cellules.

TABLEAU 3.2 Utilisation des cellules de contact qui n'ont pas eu de variation ponctuelle de pH.

CELLULE	UTILISATION
1	Échantillons de cuivre troués
2	Échantillons de cuivre non troués
3	Échantillons de fonte ductile troués
4	Échantillons de fonte ductile non troués

Les échantillons de métal ont été retirés des cellules de contact après $\frac{1}{2}$, 1, $1\frac{1}{2}$, 2, 3, 4, 6 et 8 semaines d'immersion. La vitesse de corrosion pour chaque durée d'immersion a été mesurée à l'aide de 4 échantillons de métal, ce qui a nécessité un total de 32 échantillons par cellule de contact, la capacité maximale des cellules étant d'environ 18 échantillons. La figure 3.5 présente la programme des essais dans les cellules de contact où il n'y a pas eu de variation ponctuelle de pH. Le symbole "x" marque le début de la période d'immersion d'un doublet d'échantillons, et le symbole "o" signifie la fin de la période d'immersion. Le prélèvement régulier des échantillons de métal permet de mesurer la vitesse de corrosion aux demi-semaines pour les 2 premières semaines d'immersion, aux semaines entre 2 et 4 semaines d'immersion

et finalement, aux 2 semaines entre 4 et 8 semaines d'immersion.

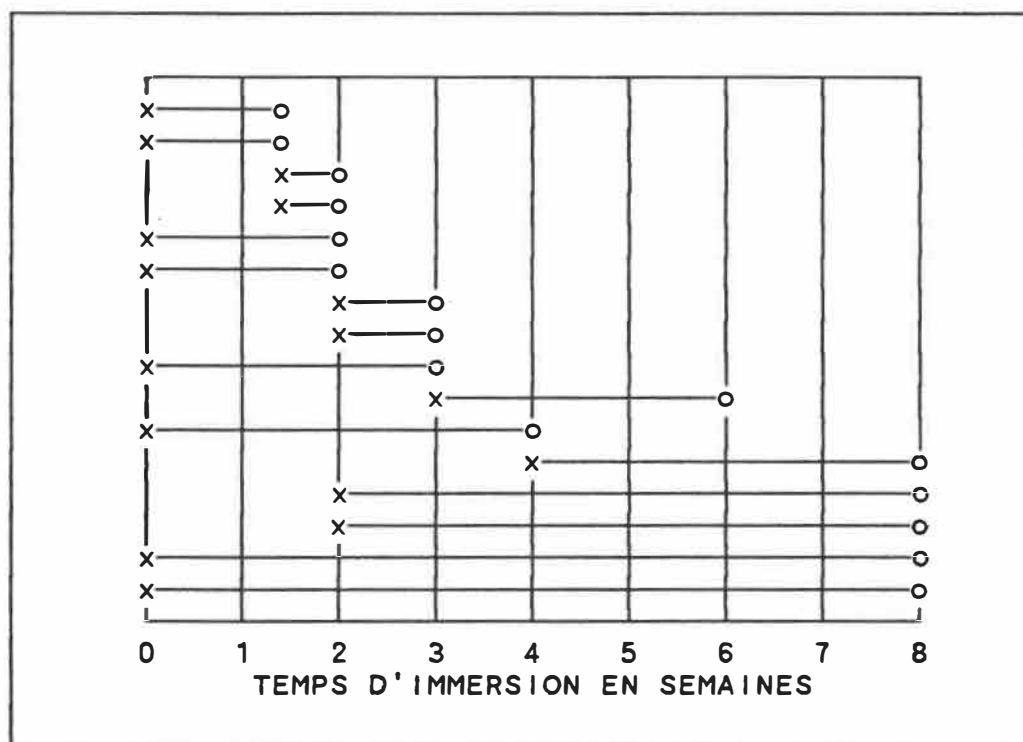


FIGURE 3.5 Programme des expériences dans les cellules de contact où il n'y a pas eu de variation de pH.

3.3.2 Avec variation ponctuelle de pH

Cette étude a permis de vérifier l'influence d'une variation ponctuelle de pH d'une durée de 24 heures sur la vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte ductile. Le pH de l'eau des bassins de 200 L a été maintenu à une valeur constante de 7,7 pendant toute la période expérimentale, sauf durant une journée précise où le pH a été modifié de

façon brusque. Lors de ces variations le pH a été maintenu à 5,5, 6,6 et 8,5 pendant 24 heures. Les variations brusques de pH ont été faites après 1, 3, 5 et 6 semaines d'immersion afin de vérifier l'importance du film protecteur.

3.3.2.1 Réalisation des variations ponctuelles de pH

Les variations de pH ont été faites à l'aide d'un ajusteur de pH automatique de marque "New Brunswick". Cet appareil utilise deux électrodes, dont une électrode de référence au chlorure d'argent. Les électrodes sont placées dans un bassin de 200 L contenant la solution à modifier. La valeur de pH est lue et enregistrée, lorsque cette valeur est plus faible que la valeur désirée, l'ajusteur de pH ajoute une solution basique composée de chaux (1 mg/mL). Dans le cas où le pH de la solution est supérieur au pH désiré, l'appareil ajoute une solution diluée d'acide nitrique (0,1 N). L'ajusteur de pH comprend deux pompes péristaltiques, une pour ajouter l'acide et l'autre pour ajouter la base. Les pompes sont commandées par une minuterie contrôlant le temps d'injection des produits chimiques, et l'intervalle de temps entre chaque injection.

3.3.2.2 Utilisation des cellules de contact

L'étude de l'influence d'une variation ponctuelle de pH sur la vitesse de corrosion a nécessité 12 cellules de contact, leur utilisation est présentée au tableau 3.3. Deux cellules par métal ont été utilisées afin de reproduire en double chaque série d'expérience.

TABLEAU 3.3 Utilisation des cellules de contact qui ont eu une variation de pH.

CELLULE	MÉTAL	UTILISATION
1 et 2	Cuivre	Variation ponctuelle à pH=5,5
3 et 4	Fonte	Variation ponctuelle à pH=5,5
5 et 6	Cuivre	Variation ponctuelle à pH=6,6
7 et 8	Fonte	Variation ponctuelle à pH=6,6
9 et 10	Cuivre	Variation ponctuelle à pH=8,5
11 et 12	Fonte	Variation ponctuelle à pH=8,5

La figure 3.6 présente le programme expérimental des échantillons de métal ayant subi un changement brusque de pH. Le symbole "x" marque le début de l'immersion d'une paire d'échantillons, et le symbole "o" signifie la fin de la période d'immersion. Cette séquence a été faite en duplicata dans deux cellules différentes, ce qui a permis d'obtenir quatre résultats de vitesse de corrosion pour chaque durée d'immersion. Chaque plaque n'a subi qu'une

seule variation ponctuelle de pH durant son passage dans les cellules de contact.

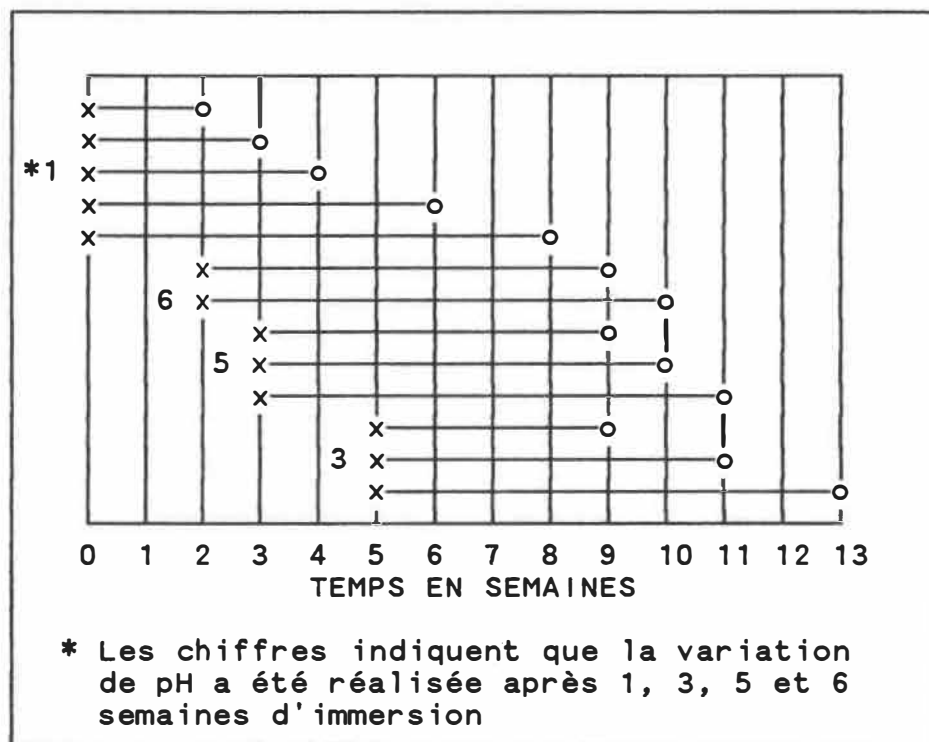


FIGURE 3.6 Programme expérimental des échantillons ayant subi une variation ponctuelle de pH.

L'espace disponible dans les cellules étant limité, il n'a pas été possible de prélever des échantillons de métal avant la variation de pH. La collecte des échantillons de métal ayant subi une variation brusque de pH après 1 semaine d'immersion permet de mesurer la vitesse de corrosion après 2, 3, 4, 6 et 8 semaines d'immersion. Le prélèvement des échantillons ayant subi une variation de

pH après 3 semaines d'immersion, permet de mesurer la vitesse de corrosion après 4, 6 et 8 semaines d'immersion. Pour la variation ponctuelle de pH réalisée après 5 semaines d'immersion, la collecte des échantillons de métal a permis de mesurer la vitesse de corrosion après 6, 7 et 8 semaines d'immersion. Finalement, lors de la variation ponctuelle de pH faite après 6 semaines d'immersion, la collecte des plaques métalliques a servi à mesurer la vitesse de corrosion après 7 et 8 semaines d'immersion.

3.4 MÉTHODES D'ANALYSE

3.4.1 Observations quotidiennes

Le pH de l'eau des bassins a été mesuré et ajusté tous les jours à une valeur de 7,7, à l'exception de la journée où les échantillons de métal ont subi une variation ponctuelle de pH. Les débits dans les cellules de contact ont été ajustés à 5 L/d. La température de l'eau des bassins a également été mesurée régulièrement.

3.4.2 Échantillonnage de l'eau

Les échantillons d'eau nécessaire aux analyses chimiques ont été prélevés à toutes les deux semaines lors du remplissage des bassins de 200 L. L'eau des bassins a été échantillonnée avant et après remplissage à l'aide de

bouteilles en plastique pouvant contenir un litre d'eau. Les analyses effectuées sont la dureté, l'alcalinité, le chlore résiduel, les chlorures, les sulfates, les nitrates et la conductivité. L'oxygène dissous a été mesuré à l'aide de bouteilles à DBO standard de 300 mL. Les échantillons servant à la détermination des métaux ont été entreposés dans des contenants de plastique préalablement lavés à l'acide. Quelques gouttes d'acide nitrique ont été ajoutées afin de maintenir les métaux en solution.

3.4.3 Procédures d'analyse

Le tableau 3.4 résume les techniques d'analyse utilisées au cours de l'expérience. Toutes les analyses ont été exécutées selon "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (APHA, AWWA, WPCF, 1985). L'analyse des métaux a été faite par absorption atomique.

TABLEAU 3.4 Techniques d'analyses.

Paramètres mesurés	Méthodes d'analyse	Appareils	Références APHA, 1985
Alcalinité	Colorimétrie		403
Chlore	Colorimétrie		408 D
Chlorures	Colorimétrie	Spectronic 21	D 512c
Conductivité	Conductance	Metrohm E 365B	205
Dureté	Colorimétrie		314 B
Nitrates	Chromatographie	Wescan (HPLC)	418
Oxygène dissous	Méthode iodométrique		421 B
pH	pH-mètre au calomel	Fisher Accumet modèle 810	424
Sulfates	Turbidité	Spectronic 21	426 C
Calcium	Spectrophotométrie	Perkin-Elmer modèle 403	301 A
Cuivre			"
Fer	à absorption atomique		"
Magnésium			"
Potassium			"
Sodium			"
Zinc			"

CHAPITRE IV

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats des analyses de l'eau contenue dans les bassins de 200 L. Ces analyses ont été effectuées régulièrement, afin de s'assurer que les caractéristiques physico-chimiques de l'eau ne se sont pas modifiées en cours d'expérience. Ce chapitre inclut également la présentation des vitesses de corrosion, ainsi que les analyses statistiques effectuées sur ces résultats.

4.1 LES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU

Les valeurs moyennes des résultats d'analyse physico-chimiques de l'eau pour chaque bassin de 200 L seront présentées sous forme de tableaux, il est cependant possible de consulter les résultats détaillés à l'annexe C.

4.1.1 Le pH

Le tableau 4.1 présente les valeurs de pH mesurés durant la période expérimentale. On y retrouve des valeurs médianes car le pH est une fonction logarithmique.

TABLEAU 4.1 Le pH dans les bassins de 200 L.

Bassin #	pH médian	Min.-Max.	Valeur du pH lors de la variation ponctuelle
1	7,70	7,54-8,08	5,54
2	7,75	7,50-8,08	5,54
3	7,70	7,50-8,03	6,64
4	7,65	7,46-8,04	6,64
5	7,68	7,44-8,06	8,51
6	7,61	7,34-8,02	8,51
7	7,74	7,48-7,98	*
8	7,94	7,65-8,15	*

* Les bassins 7 et 8 n'ont pas subi de variation ponctuelle de pH

Les valeurs médianes sont calculées à partir des mesures quotidiennes du pH de l'eau. La valeur médiane des pH des 8 bassins se situe autour de 7,7. Les valeurs de pH observées dans le bassin #8 sont les plus élevées. La présence de microorganismes peut en être la cause, puisque des moisissures ont été observées à l'intérieur du tube de recirculation d'eau.

4.1.2 L'alcalinité

Le tableau 4.2 présente les mesures d'alcalinité faites sur les 8 bassins de 200 L. La valeur moyenne est de 46 mg/L de CaCO_3 . La figure 4.1 illustre les valeurs d'alcalinité retrouvées dans les bassins 7 et 8. Rappelons que les échantillons d'eau ont été prélevés avant et après le remplissage des bassins de 200 L qui ont eu lieu après 1, 3 et 5 semaines. On observe que l'alcalinité est minimale avant chaque remplissage des bassins et qu'elle monte ensuite à une valeur maximale après les remplissages. Le même phénomène a été observé dans les autres bassins, il sera discuté en détail au chapitre suivant.

TABLEAU 4.2 Alcalinité dans les bassins de 200 L (mg/L de CaCO_3).

Bassin #	Alcalinité moyenne	Écart type	Min.-Max.	Pendant la variation ponctuelle de pH
1	41	18,30	21-68	3
2	48	21,72	17-73	3
3	40	17,24	19-61	15
4	47	19,87	18-73	15
5	47	17,98	18-76	56
6	52	16,93	23-74	56
7	49	16,97	28-67	*
8	45	22,13	14-69	*

* Les bassins 7 et 8 n'ont pas subi de variation ponctuelle de pH

Lorsque le pH de l'eau se situe entre 4,5 et 8,3, l'alcalinité totale de l'eau est surtout sous forme de bicarbonate. C'est donc le type d'alcalinité retrouvé dans l'eau à pH 7,7, et lors des variations ponctuelles de pH à 5,5 et à 6,6. Lorsque le pH se situe entre 8,3 et 11, l'alcalinité totale est sous forme de carbonate et de bicarbonate. On retrouve donc de l'alcalinité sous forme de carbonate et de bicarbonate lors de la variation ponctuelle à pH 8,5.

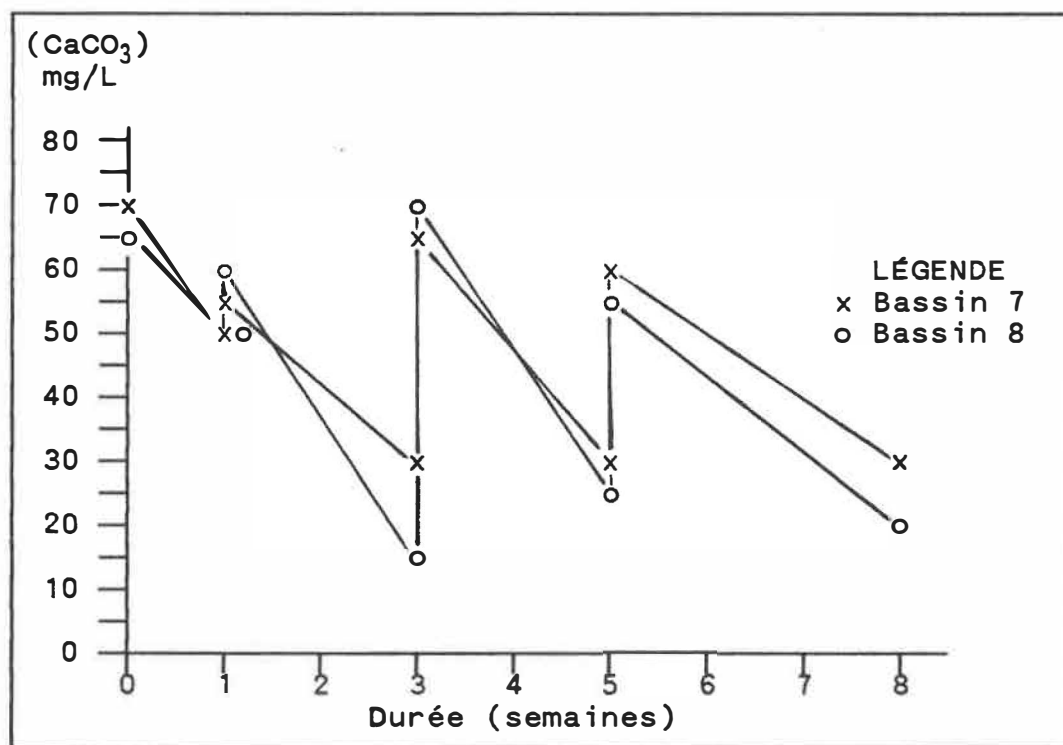


FIGURE 4.1 Variation de l'alcalinité dans les bassins 7 et 8, sans variation ponctuelle de pH.

4.1.3 La dureté

Le tableau 4.3 présente les valeurs moyennes de dureté et les écarts types exprimés en mg/L de CaCO_3 . La moyenne (μ) et l'écart type (σ) sont calculés à partir des équations suivantes:

$$\mu = \Sigma x/n \quad (4-1)$$

$$\sigma = \sqrt{(\Sigma(x-\mu)^2/(n-1))} \quad (4-2)$$

où n = nombre d'échantillons
x = valeur de l'échantillon

TABLEAU 4.3 Résumé des analyses de dureté (mg/L de CaCO_3).

Bassin #	Dureté moyenne	Écart type	Min.-Max.	Pendant la variation ponctuelle de pH
1	114	26,66	63-151	135
2	116	27,65	60-151	135
3	110	24,39	63-143	123
4	116	19,24	81-143	123
5	116	19,24	81-143	131
6	117	18,51	76-145	131
7	124	5,53	117-133	*
8	126	4,92	120-134	*

* Sans variation ponctuelle de pH

La dureté moyenne de l'eau dans les 8 bassins est 117 mg/L de CaCO_3 . L'écart type est beaucoup plus faible dans les bassins 7 et 8 que dans les autres bassins. Ceci peut être dû au fait que de fortes variations de la dureté de l'eau du robinet (de l'ordre de 90 mg/L CaCO_3) ont été observées

pendant les 5 premières semaines d'expérimentation, alors que les bassins 7 et 8 n'étaient pas encore en opération. La dureté de l'eau durant les variations ponctuelles de pH est légèrement supérieure à la dureté de l'eau à pH 7,7, mais elle demeure dans l'écart type. La dureté carbonatée est de 46 mg/L (CaCO_3), alors que la dureté non carbonatée est de 71 mg/L (CaCO_3).

4.1.4 L'oxygène dissous

L'oxygène dissous a très peu varié. Une concentration moyenne de 8,1 mg/L a été mesurée dans l'eau à pH 7,7 et lors des variations ponctuelles de pH. Les résultats sont présentés au tableau 4.4.

TABLEAU 4.4 Concentration d'oxygène dissous (mg/L).

Bassin #	Moyenne	Écart type	Min.-Max.	Pendant la variation ponctuelle de pH
1	8,1	0,41	7,3-8,8	7,9
2	8,0	0,45	7,4-8,9	7,9
3	8,0	0,53	7,2-8,7	8,0
4	7,9	0,54	7,3-8,8	8,0
5	8,0	0,45	7,3-8,8	8,2
6	8,1	0,52	7,1-8,8	8,2
7	8,0	0,37	7,4-8,6	*
8	8,3	0,42	7,7-8,8	*

* Sans variation ponctuelle de pH

4.1.5 Le chlore résiduel

Les usines de traitement d'eau potable cherchent à maintenir une concentration de chlore résiduel entre 0,1 et 0,3 mg/L. L'eau du robinet avait une concentration de chlore résiduel de 0,2 mg/L. Comme cette variable influence la vitesse de corrosion, il a été préférable de l'éliminer en aérant l'eau dans le bac de 2600 L pendant deux semaines avant son transfert dans les bassins de 200 L.

4.1.6 Les sulfates

Le tableau 4.5 présente le résumé des concentrations moyennes de sulfates. Les valeurs sont assez constantes d'un bassin à l'autre (moyenne:25 mg/L). La concentration de sulfates est sensiblement la même lors des variations de pH (moyenne:27mg/L).

TABLEAU 4.5 Concentrations des sulfates (mg/L).

Bassin #	Moyenne	Écart type	Min.-Max.	Pendant la variation ponctuelle de pH
1	24	4,80	13-27	27
2	23	6,89	5-27	27
3	22	6,02	7-28	27
4	25	5,65	10-30	27
5	26	5,91	11-37	26
6	25	5,05	11-29	26
7	27	4,28	17-31	*
8	27	3,78	19-31	*

* Sans variation ponctuelle de pH

4.1.7 Les chlorures

Une concentration moyenne de chlorures de 39 mg/L a été mesurée dans les 8 bassins (tableau 4.6). Les concentrations de chlorures observées lors des changements brusques de pH sont légèrement plus élevés (44 mg/L).

TABLEAU 4.6 Concentration des chlorures (mg/L).

Bassin #	Moyenne	Écart type	Min.-Max.	Pendant la variation ponctuelle de pH
1	35	10,00	18-52	46
2	39	10,15	18-52	46
3	36	10,97	18-54	44
4	40	8,52	23-51	44
5	39	8,23	24-56	41
6	40	9,55	22-55	41
7	43	7,88	35-59	*
8	43	8,73	35-59	*

* Sans variation ponctuelle de pH

4.1.8 Les nitrates

Les concentrations moyennes de nitrates présentées au tableau 4.7 sont élevées (33 mg/L) en considérant que l'eau du robinet contient une concentration inférieure à 0,6 mg/L. La concentration en nitrates est deux fois plus élevée lors des variations à pH 5,5 et 6,6 que lors de la variation ponctuelle à pH 8,5. L'ajout quotidien d'acide nitrique pour maintenir le pH constant contribue à augmenter

la concentration en nitrates entre deux remplissages des bassins (figure 4.2). La concentration des nitrates baisse après chaque remplissage. Cependant, les concentrations ne sont pas aussi faibles que celle de l'eau du robinet, puisqu'il reste toujours un peu d'eau fortement chargée en nitrates dans les bassins.

TABLEAU 4.7 Concentration de nitrates (mg/L).

Bassin #	Moyenne	Écart type	Min.-Max.	Pendant la variation ponctuelle de pH
1	32,2	19,87	10,5-65,0	96,5
2	28,5	21,12	9,5-70,0	96,5
3	33,5	20,21	11,5-64,5	83,0
4	33,1	16,76	14,0-57,5	83,0
5	35,7	17,88	10,0-58,0	42,0
6	26,9	16,51	5,0-50,0	42,0
7	34,1	20,03	7,0-64,0	*
8	39,5	26,06	9,0-75,0	*

* Sans variation ponctuelle de pH

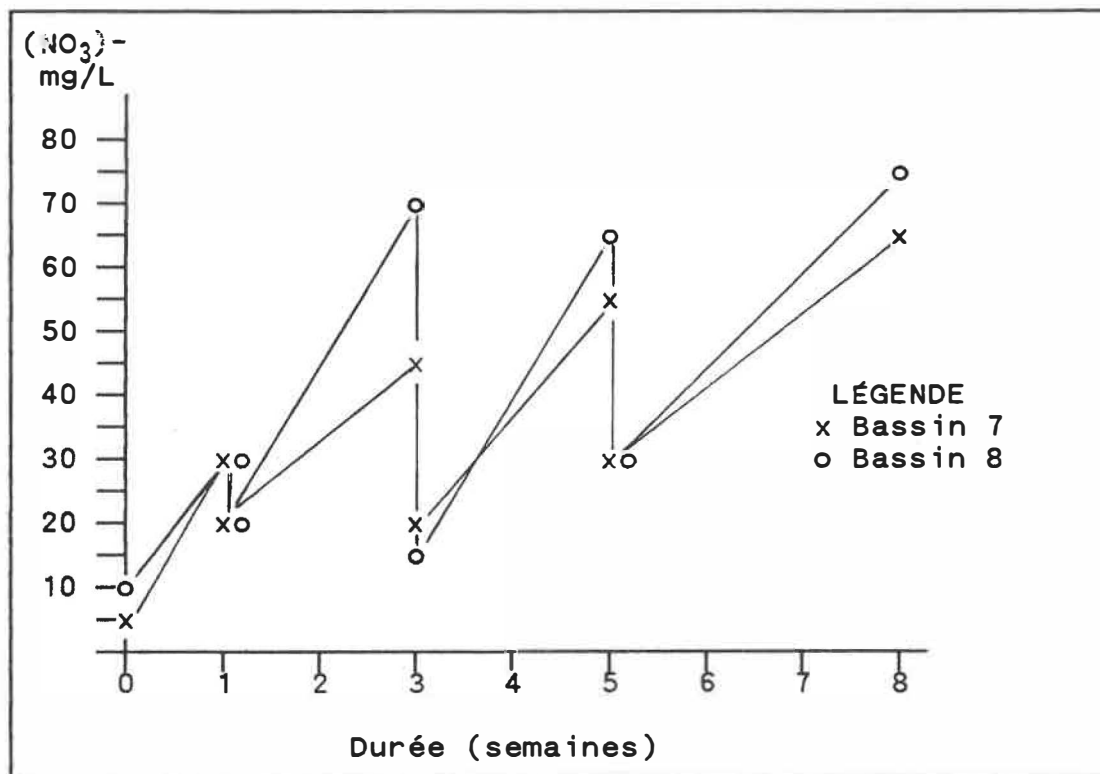


FIGURE 4.2 Concentration des nitrates dans les bassins 7 et 8, sans variation ponctuelle de pH.

4.1.9 Les métaux

La mesure de la concentration des métaux dans l'eau est faite par absorption atomique. Les résultats sont présentés au tableau 4.8. Les valeurs indiquées au moment des variations de pH représentent les moyennes pour les trois variations de pH (à pH 5,5, 6,6 et 8,5). Les concentrations de métaux sont demeurées relativement constantes. La concentration moyenne mesurée pour le calcium est de 36 mg/L et pour le magnésium de 6,5 mg/L.

TABLEAU 4.8 Concentrations moyennes des métaux (mg/L).

Métaux	Moyenne	Min.-Max.	Pendant la variation ponctuelle de pH
Calcium	36	20-46	41
Magnésium	6,5	3,5-7,2	6,8
Potassium	2,6	1,6-10,5	4,0
Sodium	10,65	5,5-11,6	11,4
Cuivre	≤0,09		≤0,09
Fer	≤0,12		≤0,12
Zinc	≤0,018	0,040	0,029

4.1.10 La conductivité

La conductivité moyenne de l'eau dans les 8 bassins est de 234 uS/cm. La valeur moyenne mesurée lors des variations ponctuelles de pH à 5,5, 6,6 et 8,5 est élevée soit, 338 uS/cm. La conductivité est une mesure de la concentration ionique d'une solution, et l'ajout d'acide nitrique augment la concentration de nitrates et par le fait même la conductivité.

4.1.11 Les propriétés physiques de l'eau

4.1.11.1 La température

La température moyenne observée a été de 26°C, avec une plage de variation de 18°C à 30°C. Les températures élevées ont été observées au début de l'expérience. Les variations de température se sont produites de façon

progressives, puisque les variations maximales mesurées d'une journée à l'autre n'ont été que de quelques degrés seulement.

4.1.11.2 Le débit d'eau dans les cellules de contact

Le débit dans les cellules a été difficile à maintenir constant parce que les vannes placées à la sortie des cellules de contact ne permettaient pas un ajustement précis. Le débit moyen mesuré dans les cellules a été de 4 litres par jour. Tékeu (1983) recommandait un débit de 5 litres par jour, afin de ne pas altérer la qualité de l'eau dans les cellules de contact. Un débit quotidien nul a été mesuré à certains moments, alors que le débit maximal enregistré est de 27 L/d.

4.2 PERTE DE POIDS CUMULATIVE PAR UNITÉ DE SURFACE

Le métal immergé dans l'eau se corrode, ce qui engendre une perte de poids. La perte de poids totale ou cumulative exprimée en g/m^2 augmente avec la durée de contact. Il est présenté à la figure 4.3 les pertes de poids cumulatives pour les échantillons de cuivre et de fonte ductile troués n'ayant pas subi de variation ponctuelle de pH. Les échantillons de métal ont été prélevés après $\frac{1}{2}$, 1, $1\frac{1}{2}$, 2, 3, 4, 6 et 8 semaines d'immersion. La perte de poids cumulative est beaucoup plus accentuée pour la fonte ductile que pour le cuivre.

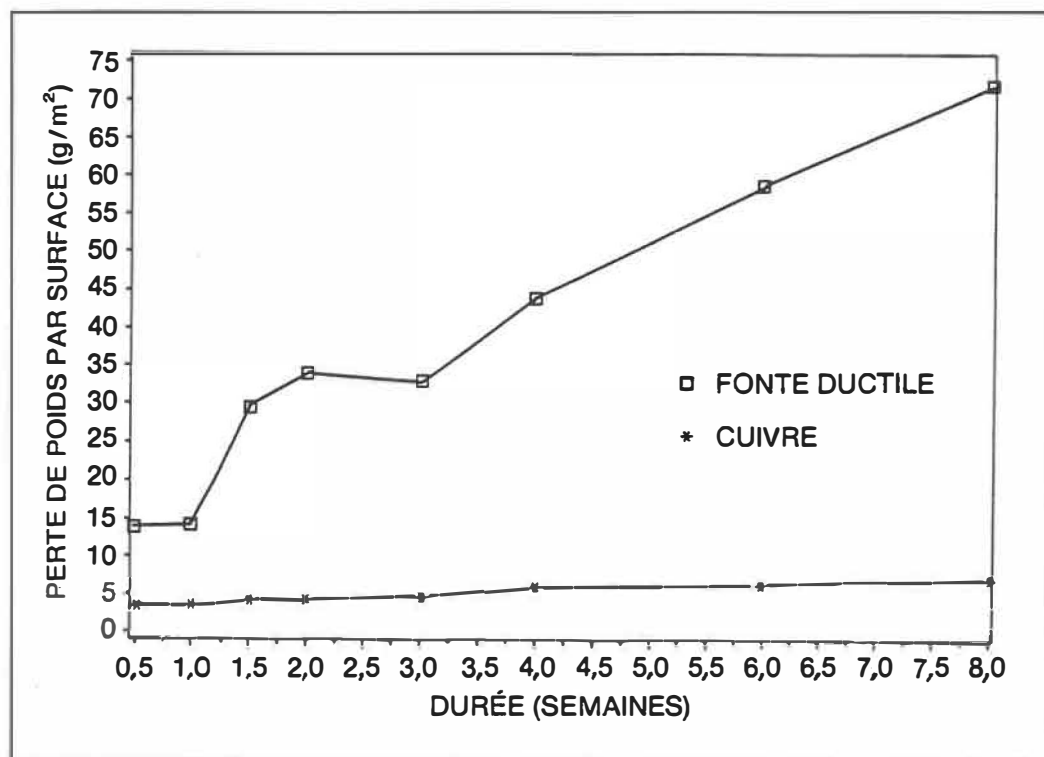


Figure 4.3 Perte de poids cumulative du cuivre et de la fonte ductile n'ayant pas subi de variation ponctuelle de pH

4.3 VITESSE DE CORROSION

La vitesse de corrosion du métal exprimée en $\text{g/m}^2.\text{d}$ est une mesure qui permet de visualiser l'évolution des pertes de poids dans le temps. Les résultats qui ont servi à tracer les figures présentées dans cette section, de même que le programme Fortran utilisé pour calculer les vitesses de corrosion sont présentés à l'annexe D.

4.3.1 La perte de poids des échantillons lors des traitements de nettoyage

Afin de connaître les modifications engendrées par la présence de colle sur les échantillons non troués, 15 échantillons de cuivre et 15 échantillons de fonte ductile ont subi un lavage. Ces échantillons étaient tous troués, et n'avaient pas de colle. Il a été observé que les plaques de cuivre trouées ne subissent pas de perte de poids lors du lavage. Une perte de poids moyenne de 0,0196 gramme a été mesurée lors du lavage de 15 échantillons de fonte ductile troués.

La présence de la colle réduit la perte de poids de la fonte ductile pendant le lavage de 0,0036 g (moyenne de 15 échantillons). La présence de la colle n'influence pas la perte de poids du cuivre durant le lavage. Les échantillons sur lesquels il y avait de la colle ont subi une perte de poids non négligeable lors du séchage à

l'étuve. Pour limiter cette perte, la température de séchage de ces échantillons a été réduite à 60°C. Le passage à l'étuve a entraîné une perte de poids due à la colle de 0,0015 gramme pour le cuivre et de 0,0014 gramme pour la fonte ductile. Il a donc fallu soustraire un poids total de 0,0022 gramme ($-0,0036 + 0,0014$ g) pour pouvoir comparer les résultats obtenus avec les échantillons troués et les échantillons non troués de fonte ductile. Il a fallu additionner pour le cuivre un poids total de 0,0015 gramme pour tenir compte de la perte de poids engendrée lors du passage à l'étuve. Les détails des calculs de vitesse de corrosion tenant compte de la présence de la colle sur les échantillons non troués sont présentés à l'annexe B.

4.3.2 Vitesse de corrosion des échantillons de cuivre et de fonte ductile qui n'ont pas subi de variation ponctuelle de pH

Les résultats de vitesses de corrosion du cuivre et de la fonte ductile sans variation ponctuelle de pH sont présentés à la figure 4.4. Les vitesses de corrosion des deux métaux troués diminuent rapidement pendant les trois premières semaines d'immersion, pour ensuite se maintenir à une valeur relativement constante entre 3 et 8 semaines d'immersion. La colle n'a pas résistée à l'immersion prolongée. En effet, les échantillons de cuivre non troués

se sont décollés après 3 semaines d'immersion. Seulement deux échantillons de fonte ductile ont été conservés après $1 \frac{1}{2}$ et 4 semaines d'immersion, tandis qu'à 3 et 8 semaines d'immersion, un seul échantillon de métal est demeuré collé.

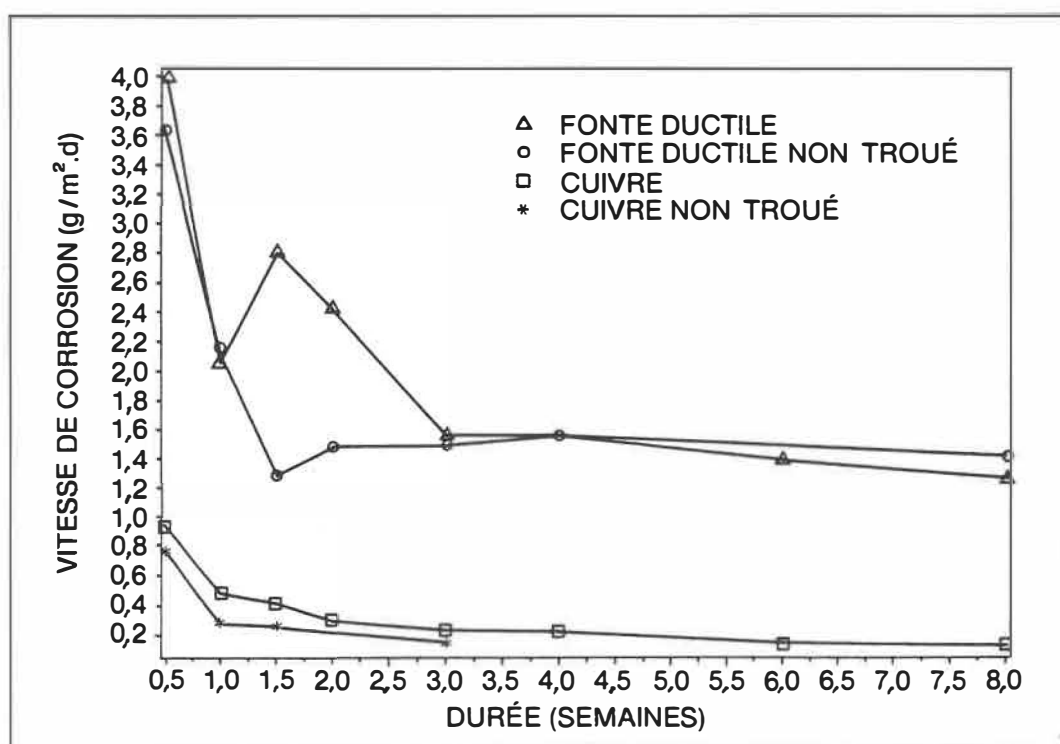


Figure 4.4 Vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte ductile n'ayant pas subi de variation ponctuelle de pH

4.3.3 Vitesse de corrosion du cuivre ayant subi une variation ponctuelle de pH

Les vitesses de corrosion du cuivre ayant subi une variation ponctuelle de pH après une semaine d'immersion sont présentées à la figure 4.5. Les échantillons ont été

enlevés des cellules de contact après 3, 4, 6 et 8 semaines d'immersion. Il est permis de croire qu'avant la variation ponctuelle de pH, les vitesses de corrosion sont comparables aux vitesses de corrosion observées sans variation ponctuelle de pH.

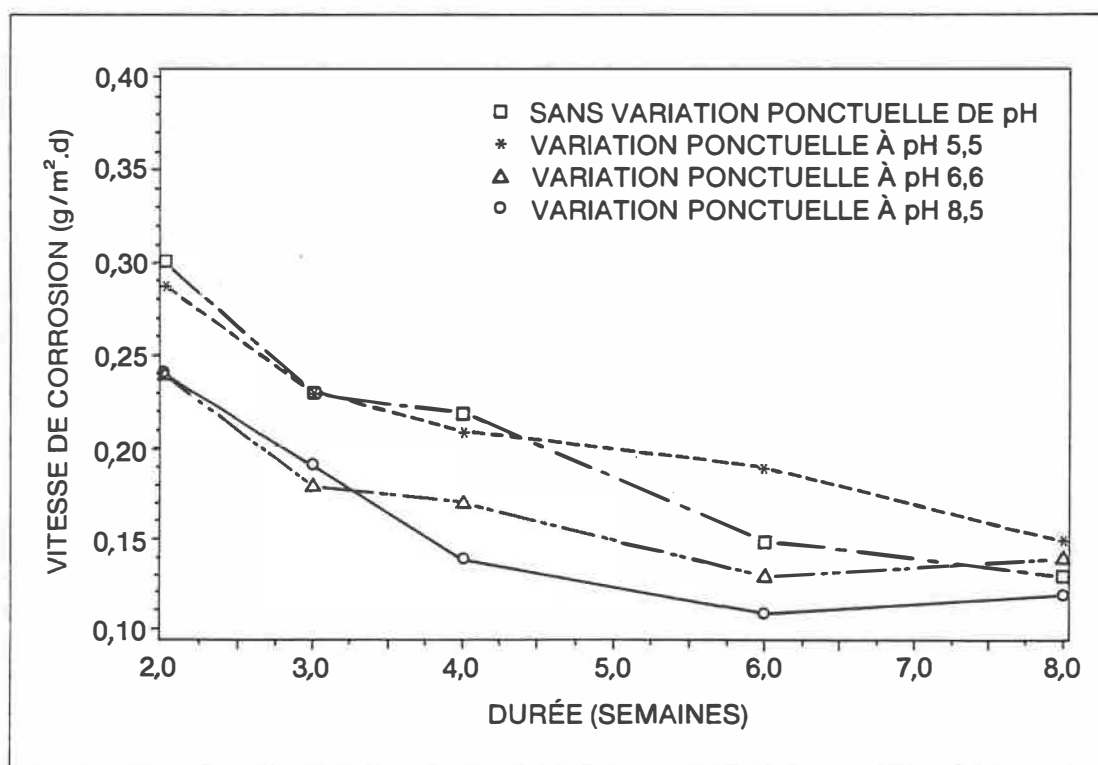


Figure 4.5 Vitesse de corrosion du cuivre ayant subi une variation de pH d'une durée de 24 heures après 1 semaine d'immersion

La figure 4.6 présente les vitesses de corrosion des échantillons qui ont subi une variation de pH après 3, 5 et 6 semaines d'immersion. Toutes les variations ponctuelles de pH favorisent une augmentation de la vitesse de corrosion par rapport à la vitesse de corrosion observée sans variation de pH. Les vitesses de corrosion ont été mesurées après 4, 6, 7 et 8 semaines d'immersion.

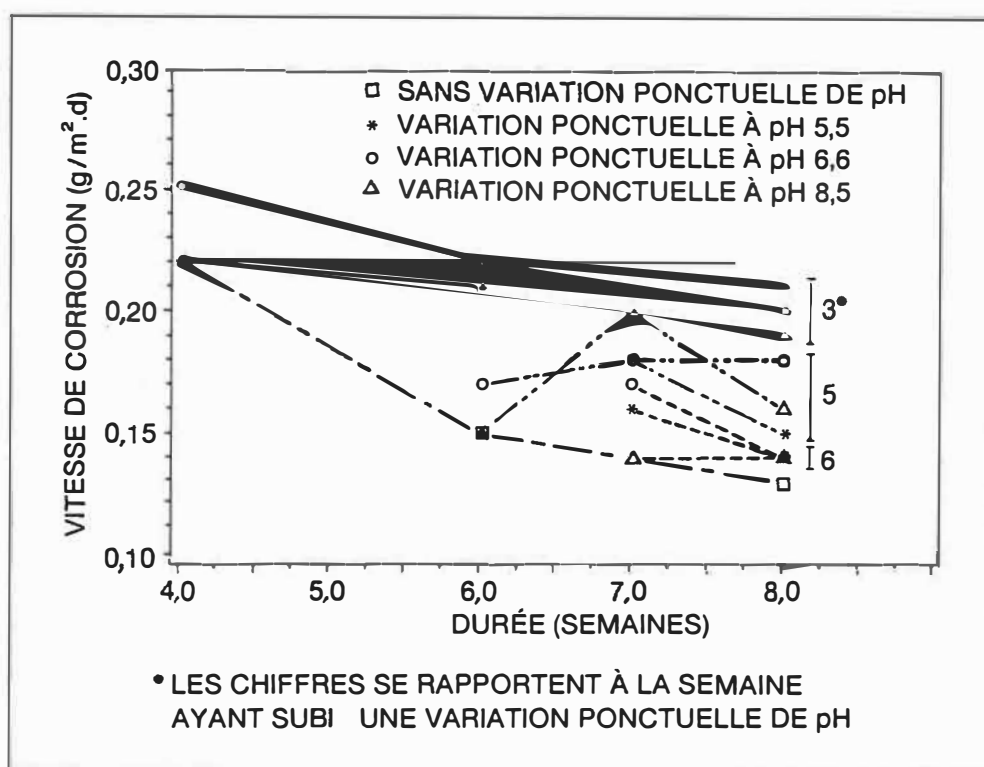


Figure 4.6 Vitesse de corrosion du cuivre ayant subi une variation de pH d'une durée de 24 heures après 3, 5 et 6 semaines d'immersion

4.3.4 Vitesse de corrosion de la fonte ductile ayant subi une variation ponctuelle de pH

Les vitesses de corrosion de la fonte ductile observées à la suite d'une variation ponctuelle de pH réalisée après une semaine d'immersion sont présentées à la figure 4.7. La variation de pH qui a le plus modifié la vitesse de corrosion est celle faite à pH 6,6. Cette variation de pH a créé une réduction marquée de la vitesse de corrosion qui a de plus été observée jusqu'à la fin de la période d'immersion.

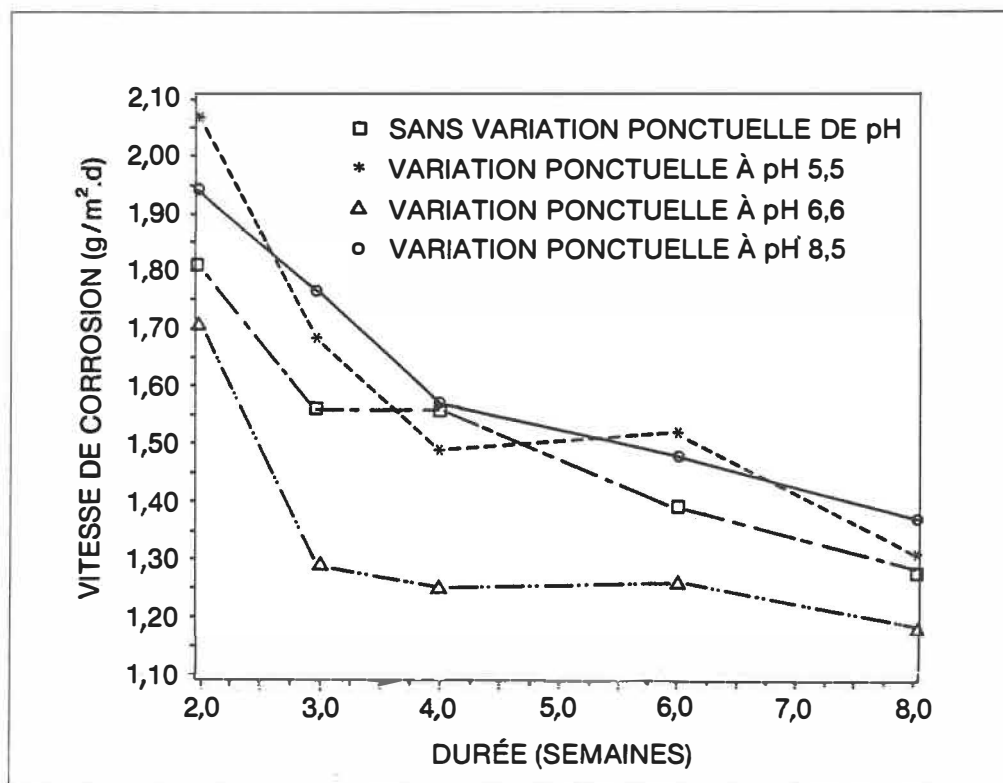


Figure 4.7 Vitesse de corrosion de la fonte ductile ayant subi une variation de pH d'une durée de 24 heures après 1 semaine d'immersion

Les vitesses de corrosion de la fonte ductile observées à la suite d'une variation de pH faite après 3, 5 et 6 semaines d'immersion sont présentées à la figure 4.8. Les variations causant les plus fortes augmentations des vitesses de corrosion sont celles réalisées après 3 semaines d'immersion à pH 5,5 et 8,5. Les variations ponctuelles à pH 6,6 augmentent moins la vitesse de corrosion que les variations à pH 5,5 et 8,5.

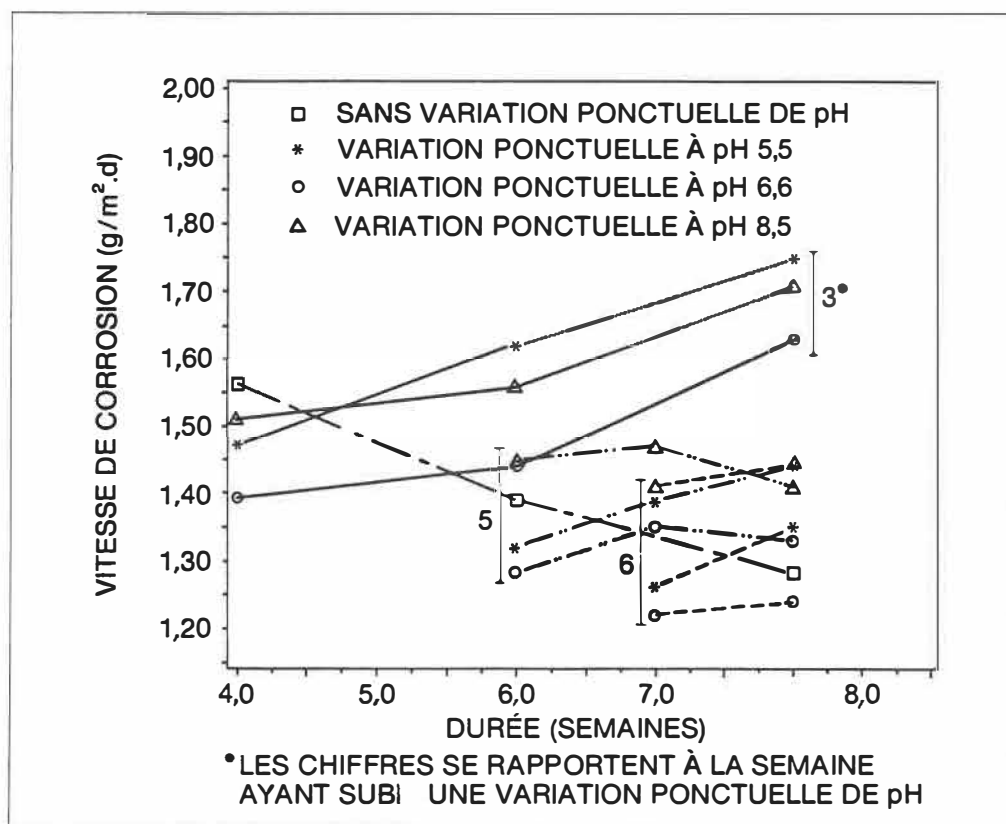


Figure 4.8 Vitesse de corrosion de la fonte ductile ayant subi une variation de pH d'une durée de 24 heures après 3, 5 et 6 semaines d'immersion

4.4 ANALYSE STATISTIQUE DES VITESSES DE CORROSION

4.4.1 Vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte

n'ayant pas subi de variation ponctuelle de pH

Le test Student (T) permet de vérifier si deux groupes de données sont significativement différentes dans un intervalle de confiance de 95%. Les valeurs présentées au tableau 4.9 indiquent la probabilité que la moyenne des 4 vitesses de corrosion des échantillons troués, soit significativement différente de la moyenne des vitesses de corrosion des échantillons non troués. Lorsque la probabilité est inférieure à 0,05, les moyennes sont significativement différentes dans un intervalle de confiance de 95%. Ces valeurs sont soulignées dans les tableaux qui suivent.

TABLEAU 4.9 Test Student entre les vitesses de corrosion des échantillons troués et non troués.

Durée d'immersion (semaine)	Cuivre	Fer
0,5	0,4200	0,0757
1,0	0,1500	0,5602
1,5	0,3546	<u>0,0003*</u>
2,0		<u>0,0001</u>
3,0	0,2802*	
4,0		0,8953*

* Il n'y a que 2 échantillons non troués qui sont restés collés

Les tests Student montrent qu'il n'y a pas de différence entre les vitesses de corrosion des échantillons de cuivre troués et non troués pour les 3 premières semaines d'immersion. Il y a cependant une différence significative entre les vitesses de corrosion des échantillons de fonte troués et non troués après $1 \frac{1}{2}$ et 2 semaines d'immersion.

4.4.2 Vitesse de corrosion du cuivre suite à une variation ponctuelle de pH

Le tableau 4.10 présente les résultats des tests Student effectués entre les vitesses de corrosion des échantillons qui n'ont pas été exposés à une variation de pH et ceux qui ont été exposés à une variation ponctuelle de pH. Chaque groupe de donnée est formé de 8 échantillons. Les vitesses de corrosion des échantillons de cuivre ayant subi une variation ponctuelle de pH à 5,5, 6,6 et 8,5 après 3 semaines d'immersion, sont significativement différentes des vitesses de corrosion des échantillons immergés dans des eaux où il n'y a pas eu de variation de pH aux durées d'immersion de 6 et 8 semaines. Les vitesses de corrosion des échantillons qui ont subi une variation ponctuelle à pH 8,5 après une semaine d'immersion sont significativement différentes des vitesses de corrosion des échantillons qui

n'ont pas eu de variation de pH à la quatrième semaine d'immersion. Les vitesses de corrosion mesurées lors des variations ponctuelles effectuées après 5 et 6 semaines d'immersion, ne sont pas significativement différentes des vitesses de corrosion des échantillons qui n'ont pas été exposés à une variation soudaine de pH.

TABLEAU 4.10 Tests Student entre les vitesses de corrosion des échantillons de cuivre qui ont subi une variation ponctuelle de pH et ceux qui n'ont pas eu de variation de pH.

Moment de la variation de pH (semaine)	*Valeur du pH	Durée de l'immersion (semaine)				
		2	3	4	6	8
1	5,5	0,8086	0,8135	0,8662	0,0728	0,0887
	6,6	0,3223	0,1735	0,0873	0,4663	0,5926
	8,5	0,2214	0,3228	<u>0,0212</u>	0,0697	0,4626
3	5,5			0,9316	<u>0,0174</u>	<u>0,0179</u>
	6,6			0,4215	<u>0,0450</u>	0,0545
	8,5			0,9451	<u>0,0325</u>	<u>0,0132</u>
5	5,5				0,3327	0,2029
	6,6				0,4619	0,1186
	8,5				0,8325	0,0975
6	5,5					0,3990
	6,6					0,5927
	8,5					0,2350

* Valeur du pH lors de la variation ponctuelle

L'analyse de variance permet d'établir si un groupe de variables a une influence significative sur une variable réponse (Clément, 1986). L'analyse de variance assume trois hypothèses de base: l'indépendance, l'homogénéité et la normalité des variables. Les résultats présentés aux tableaux 4.11 indiquent la probabilité que "F" expérimental soit supérieur à la valeur de "F" théorique. Une probabilité inférieure à 0,05 signifie que la valeur du pH lors des variations ponctuelles faites après 1, 3, 5 et 6 semaines a un effet significatif sur la vitesse de corrosion pour chaque durée d'immersion, dans un intervalle de confiance de 95%. Chaque groupe de données comprend 16 échantillons.

TABLEAU 4.11 Analyse de variance: influence de la valeur du pH lors de la variation ponctuelle sur la vitesse de corrosion du cuivre.

Moment de la variation de pH (semaine)	Durée de l'immersion (semaine)					
	2	3	4	6	*7	8
1	0,6209	0,3392	<u>0,0130</u>	<u>0,0106</u>	---	0,2807
3	---	---	0,6536	<u>0,0465</u>	---	0,0579
5	---	---	---	0,6353	0,7720	0,1930
6	---	---	---	---	0,3971	0,8132

* Il y a 12 échantillons à la septième semaine d'immersion

La valeur du pH lors de la variation ponctuelle de pH réalisée après une semaine d'immersion exerce une influence significative sur la vitesse de corrosion des échantillons de cuivre immergés dans l'eau durant 4 et 6 semaines. La valeur du pH a également une importance significative sur la vitesse de corrosion à la sixième semaine lors de la variation brusque de pH effectuée après 3 semaines d'immersion.

4.4.3 Vitesse de corrosion de la fonte ductile suite à une variation ponctuelle de pH

Le tableau 4.12 présente les résultats des tests Student faits sur les vitesses de corrosion de la fonte ductile. Les vitesses de corrosion des échantillons de fonte immergés dans une eau où il y a eu une variation ponctuelle de pH d'une valeur de 6,6 après une semaine d'immersion, sont significativement différentes des vitesses de corrosion des échantillons de métal n'ayant pas subi de variation de pH, pour les périodes d'immersion allant de 2 à 6 semaines. Les vitesses de corrosion des échantillons qui ont subi une variation ponctuelle de pH après trois semaines d'immersion à des pH de 6,6 et 8,5 sont significativement différentes des vitesses de corrosion des échantillons qui n'ont pas subi de variation de pH à la

quatrième et à la sixième semaine d'immersion. Les vitesses de corrosion des échantillons qui ont subi une variation de pH effectués après 5 et 6 semaines d'immersion, ne sont pas significativement différentes des vitesses de corrosion des échantillons de métal qui n'ont pas subi de variation de pH.

TABLEAU 4.12 Tests Student effectués entre les vitesses de corrosion des échantillons de fonte qui ont subi une variation ponctuelle de pH et ceux qui n'ont pas eu de variation.

Moment de la variation de pH (semaine)	*Valeur du pH	Durée de l'immersion (semaine)				
		2	3	4	6	8
1	5,5	<u>0,0074</u>	0,3791	0,4872	0,3624	0,9081
	6,6	<u>0,0003</u>	<u>0,0209</u>	<u>0,0001</u>	<u>0,0394</u>	0,6884
	8,5	<u>0,0317</u>	0,1998	0,8575	0,1731	0,6806
3	5,5			0,5715	0,2813	0,1071
	6,6			<u>0,0264</u>	0,4678	0,2052
	8,5			0,7025	<u>0,0344</u>	0,1416
5	5,5				0,5518	0,5388
	6,6				0,0565	0,8278
	8,5				0,5257	0,5941
6	5,5					0,7758
	6,6					0,8786
	8,5					0,4920

* Valeur du pH lors de la variation ponctuelle

Le tableau 4.13 présente les résultats d'analyse de variance effectuée sur les vitesses de corrosion de la fonte ductile. La valeur du pH lors de la variation ponctuelle de pH faite après une semaine d'immersion exerce une influence significative sur la vitesse de corrosion des plaques de fonte ductile immergées pendant une durée allant de 2 à 4 semaines.

TABLEAU 4.13 Analyse de variance: influence de la valeur du pH lors de la variation ponctuelle sur la vitesse de corrosion de la fonte.

Moment de la variation de pH (semaine)	Durée de l'immersion (semaine)					
	2	3	4	6	*7	8
1	<u>0,0028</u>	<u>0,0094</u>	<u>0,0026</u>	0,0775	---	0,7679
3	---	---	0,6522	0,3461	---	0,0760
5	---	---	---	0,4035	0,6680	0,7912
6	---	---	---	---	0,2483	0,7111

* Il y a 12 échantillons à la septième semaine d'immersion

4.5 ASPECT VISUEL DES ÉCHANTILLONS MÉTALLIQUES

4.5.1 Le cuivre

Les échantillons de cuivre non corrodés ont initialement un aspect rosé, ils sont devenus progressivement brunâtres et verdâtres après 8 semaines d'immersion dans les cellules de contact. Lorsque les échantillons sortent de l'étuve, les surfaces sont lisses, et elles présentent beaucoup de taches bleues, brunes et jaune-or.

4.5.2 La fonte ductile

Des nuages brunâtres entourant les échantillons de fonte ont été observés peu de temps après la mise en opération des cellules de contact. Ces nuages donnaient l'impression de glisser le long des échantillons vers le fond des cellules. Après quelques heures et jusqu'à la fin de l'expérience, l'eau a pris une couleur uniforme légèrement rougeâtre. Les échantillons de fonte sont entièrement recouverts de rouille lorsqu'ils sont retirés des cellules de contact. L'épaisseur de ce dépôt augmente avec la durée d'immersion. Ce dépôt est assez important pour rendre difficile la lecture des numéros d'identification. Il ne semble pas y avoir eu formation de vésicules, les échantillons ont plutôt subi une corrosion uniforme.

CHAPITRE V

DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1 LES PROPRIÉTÉS DE L'EAU

5.1.1 Le pH

L'acide nitrique a été utilisé pour l'ajustement du pH de l'eau à 7,7 et pour effectuer les variations ponctuelles de pH. Cet acide a été utilisé parce qu'il est moins corrosif que l'acide chlorhydrique et qu'il contient moins de métaux. Le tableau 5.1 présente la quantité d'impuretés contenues dans cet acide. L'acide nitrique (HNO_3) ajouté à l'eau se dissocie et libère des ions hydrogène favorisant ainsi une baisse du pH et une augmentation de la concentration de nitrates.

TABLEAU 5.1 Impuretés contenues dans l'acide nitrique.

Éléments	Concentration(mg/L)
Cl-	0,08
(SO ₄)-	0,8
As	0,005
Pb	0,1
Fe	0,1
Cr	0,1
Cu	0,05
Ni	0,05

5.1.2 Les nitrates

Une concentration moyenne de nitrates de 33 mg/L a été mesurée pour une eau ayant un pH ajusté à 7,7. Les expériences de Tékeu (1983) indiquent que la corrosion de la fonte ductile augmente avec la concentration des nitrates pour tendre asymptotiquement vers une valeur maximale, lorsque la concentration de nitrates est inférieure à 100 mg/L. L'augmentation des nitrates entre deux remplissages (augmentation maximale de 16 à 69 mg/L) n'a pas influencé la vitesse de corrosion de la fonte ductile. Les expériences de Tékeu ont cependant été menées sur une durée d'immersion maximale de deux semaines.

5.1.3 L'alcalinité

L'alcalinité de l'eau est définie comme étant la quantité de protons (H^+) requise pour transformer les bicarbonates (HCO_3^-) et les carbonates (CO_3^{2-}) en acide carbonique (H_2CO_3). L'alcalinité est présente dans l'eau, sous forme de carbonate, de bicarbonate et d'hydroxyle.

L'ajout d'acide nitrique fournit des ions H^+ ce qui réduit l'alcalinité en contribuant à transformer un certain nombre de carbonates et de bicarbonates en acide carbonique. L'alcalinité totale mesurée est donc plus faible lors de la variation ponctuelle de pH à 5,5 (3 mg/L $CaCO_3$) que lors de la variation ponctuelle de pH à 8,5 (56 mg/L $CaCO_3$).

L'ajustement quotidien du pH de l'eau contenue dans les bassins contribue également à baisser l'alcalinité entre deux remplissages (figure 4.1).

5.1.4 Les chlorures et les sulfates

L'augmentation de la concentration de chlorures et de sulfates favorise une augmentation de la vitesse de corrosion des métaux ferreux (Ahmadi, 1981). Tékeu (1983) a constaté que l'augmentation est maximale pour une concentration de sulfates de 40 mg/L et une concentration de chlorures de 200 mg/L. Les concentrations moyennes dans les bassins sont relativement faibles et constantes soit: 25 mg/L de sulfates et 39 mg/L de chlorures. La présence de

ces deux anions dans l'acide nitrique peut expliquer les légères variations constatées au cours de l'expérience. Leur présence ne semble pas avoir modifié la vitesse de corrosion de la fonte ductile.

5.1.5 La conductivité

La conductivité moyenne observée lors des variations ponctuelles de pH (338 uS/cm) est supérieure à la valeur moyenne rencontrée pour un ajustement de l'eau à pH 7,7 (234 uS/cm). Cette augmentation est le résultat d'un apport d'ions NO_3^- lors de l'ajout d'acide nitrique. Les légères augmentations des concentrations de chlorures et de sulfates observées lors des variations de pH (tableau 4.5 et 4.6) peuvent également être responsable de l'augmentation de la conductivité. L'augmentation de la conductivité jusqu'à une valeur de 200 uS/cm augmente la vitesse de corrosion du cuivre, mais a généralement moins d'effet lorsque les valeurs de conductivité sont plus élevées (Stone et al., 1987). Il y a eu de fortes variations de la conductivité de l'eau dans les bassins où le pH de l'eau a été ajusté à 7,7 (de 133 à 336 uS/cm). Cependant, ces variations ne coïncident pas avec une augmentation ou une diminution de la vitesse de corrosion des échantillons de cuivre. Les valeurs de conductivité retrouvées durant l'expérience (généralement supérieures à 200 uS/cm), ont eu peu d'effet

sur la vitesse de corrosion du cuivre.

5.1.6 La dureté

De la chaux (Ca(OH)_2) a été utilisée pour effectuer les variations ponctuelles de pH et ce, même pour les variations de pH à 5,5 et à 6,6. L'ajusteur de pH ajoute du lait de chaux lorsque la valeur du pH est inférieure à la valeur désirée. La dissolution de la chaux est une réaction réversible qui fournit des ions calcium et hydroxyles (OH^-). La présence d'ions hydroxyles réduit la concentration d'ions hydrogène en formant de l'eau, le pH est alors augmenté. L'ajout de chaux accroît également la dureté totale en augmentant la concentration en calcium. La dureté est légèrement supérieure lors des variations ponctuelles à pH 5,5, 6,6 et 8,5 (moyenne de 130 mg/L CaCO_3) que lors de l'ajustement du pH à une valeur de 7,7 (moyenne de 117 mg/L CaCO_3).

5.1.7 Oxygène dissous et température

La solubilité de l'oxygène dans l'eau décroît avec l'augmentation de la température. Une température moyenne de 26°C et une concentration d'oxygène dissous moyenne de 8,1 mg/L ont été mesurées. Rappelons qu'à 0°C l'eau peut contenir 14,5 mg/L d'oxygène dissous. Des auteurs dont Cox et Roedtheli (1931) ont observé une relation linéaire entre

la vitesse de corrosion de l'acier et la concentration d'oxygène, pour une concentration en oxygène dissous inférieure à 9 mg/L. Les concentrations d'oxygène dissous observées lors de l'expérience ont sans doute joué un rôle sur la vitesse de corrosion; mais comme les valeurs mesurées sont demeurées constantes, elles ne peuvent être la cause des variations de vitesse de corrosion.

5.1.8 Conclusion des propriétés de l'eau sur la vitesse de corrosion

Les variables qui affectent le plus la vitesse de corrosion tel que les sulfates, les chlorures et l'oxygène dissous sont demeurées relativement constantes. Elles n'ont alors pu entraîner de variations sur la vitesse de corrosion. Les caractéristiques qui ont variées et qui découlent de façon directe de l'ajustement du pH à l'acide nitrique sont les nitrates et l'alcalinité.

L'analyse de l'eau ajustée à un pH de 7,7 montre une dureté de 117 mg/L, une alcalinité de 46 mg/L et une concentration en calcium de 90 mg/L de CaCO_3 . Selon l'étude de Lane (1978), malgré une légère déficience en alcalinité, les conditions sont propices à la formation d'un dépôt de carbonate de calcium.

5.2 PERTE DE POIDS CUMULATIVE PAR UNITÉ DE SURFACE

La perte de poids cumulative mesurée pour la fonte ductile est de $71,45 \text{ g/m}^2$ et celle pour le cuivre de $7,06 \text{ g/m}^2$ après 8 semaines d'immersion. La fonte ductile est un métal moins noble que le cuivre. Elle résiste moins bien à l'attaque de la corrosion que le cuivre. Desjardins et al. (1983) obtenaient des pertes de poids cumulatives pour la fonte ductile de 60 à 65 g/m^2 , et pour le cuivre de 8 à 16 g/m^2 après 4 semaines d'immersion. Millette (1985) a observé des pertes de poids cumulatives pour la fonte ductile de 50 à 60 g/m^2 , et des pertes de poids cumulatives pour le cuivre de 5 à 7 g/m^2 après 4 semaines d'immersion. Tékeu (1983) quant à lui observait des pertes de poids cumulatives pour la fonte de 20 à 30 g/m^2 et pour le cuivre de 1 à 2 g/m^2 , pour une durée totale d'immersion de deux semaines et demie. Les variations constatées dépendent de la composition et du pH de l'eau.

5.3 VITESSE DE CORROSION

5.3.1 Vitesse de corrosion des échantillons de cuivre et de fonte ductile troués n'ayant pas été exposés à une variation ponctuelle de pH

La vitesse de corrosion de la fonte ductile après 8 semaines d'immersion est de $1,28 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$, alors que celle du

cuivre est de $0,13 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$. La vitesse de corrosion de la fonte ductile est donc environ dix fois plus élevée que celle du cuivre. Millette (1985) a également observé que la vitesse de corrosion de la fonte ductile est 10 fois plus grande que celle du cuivre, après 4 semaines d'immersion. Les résultats obtenus par Tékeu (1983) et Desjardins et al. (1983) sont dans le même ordre de grandeur. Lors de la corrosion du cuivre, l'oxygène est le seul accepteur d'électron, contrairement au fer chez qui l'ion hydrogène peut également servir d'accepteur d'électrons. C'est une des raisons pour laquelle le cuivre offre une meilleure résistance à la corrosion que le fer.

Une augmentation brusque de la vitesse de corrosion de la fonte ductile a été observée entre une semaine et une semaine et demie d'immersion. Millette (1985) a également constaté des augmentations de la vitesse de corrosion des échantillons de fonte ductile entre 2 et 3 semaines (sur une période d'immersion totale de 12 semaines). La vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte ductile cesse de diminuer de façon rapide après trois semaines d'immersion, elle entre alors dans une période d'équilibre. Millette a remarqué que la vitesse de corrosion de la fonte ductile devient quasi constante après 3 semaines pour une période totale d'immersion de 4 semaines, et entre 4 et 5 semaines pour une durée d'immersion de 12 semaines. Cet auteur a remarqué que

la vitesse de corrosion du cuivre diminue graduellement avec l'augmentation de la durée d'immersion sans qu'il n'y ait réellement d'équilibre qui s'établit.

5.3.1.1 Diminution de la vitesse de corrosion de la fonte ductile

La vitesse de corrosion de la fonte ductile est élevée dans les premières semaines, elle se stabilise ensuite à une valeur plus faible. La diminution de la vitesse de corrosion peut être attribuée principalement aux facteurs suivants:

- 1- la formation d'un oxyde métallique réduit la vitesse de corrosion en amenant le métal dans un état de passivation. Ce processus passe par l'oxydation du fer ferreux (Fe^{2+}) en fer ferrique (Fe^{3+}) et par la formation subséquente d'oxyde de fer ($\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s})$ et $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s})$) (Flynn, 1984);
- 2- les caractéristiques de l'eau sont propices à la formation d'un film protecteur composé de dépôts de carbonates. La présence d'un dépôt qui adhère à la surface du métal a pour effet de réduire la progression de la corrosion en diminuant la vitesse de transfert de l'oxygène à la surface du métal.

5.3.1.2 Diminution de la vitesse de corrosion du cuivre

La diminution de la vitesse de corrosion du cuivre peut également être due à la formation d'un dépôt protecteur composé de carbonate de calcium et à la formation d'un oxyde de cuivre. La vitesse de corrosion du cuivre durant les premières semaines, peut être limitée par la lente diffusion des ions hydroxyles en provenance de la surface d'oxyde de cuivre. Il en résulte une augmentation du pH de la solution adjacente à l'oxyde, ce qui a pour effet de favoriser la précipitation du $\text{Cu}(\text{OH})_2$ et des carbonates qui ont une faible solubilité. Cette précipitation réduit la vitesse de croissance de l'oxyde et la vitesse de corrosion. La vitesse de corrosion est contrôlée par les caractéristiques de la solution près de l'oxyde de cuivre, et dans les pores de la couches poreuses (Hilburn, 1983).

5.3.2 Vitesse de corrosion des échantillons de fonte ductile et de cuivre non trouée

La vitesse de corrosion de la fonte non trouée est différente de celle des échantillons troués entre une et trois semaines d'immersion (figure 4.4). L'absence du trou sur les échantillons métalliques ainsi que le recouvrement des cotés à l'aide d'une colle époxy a permis une réduction maximale de la vitesse de corrosion de 37% (après une

semaine et demie d'immersion). Il est possible qu'au début de la période d'immersion, la présence du trou et des 4 côtés favorise une corrosion localisée et engendre une augmentation de la perte de poids. A partir du moment où le métal est recouvert d'un dépôt protecteur, ces régions n'exercent plus d'influence significative et les pertes de poids se stabilisent. Les échantillons troués et non troués ont sensiblement les mêmes vitesses de corrosion entre 3 et 8 semaines d'immersion.

Les résultats d'analyse statistique montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les vitesses de corrosion des échantillons de cuivre troués et non troués. La présence du trou et des côtés sur ces plaques n'a pas d'influence sur la vitesse de corrosion de ce métal.

5.3.3 Vitesse de corrosion du cuivre suite à une variation ponctuelle de pH

5.3.3.1 Vitesse de corrosion suite à une variation de pH faite après une semaine d'immersion

Il ressort des tests d'analyse de variance que la valeur du pH au moment de la variation ponctuelle de pH exécutée après une semaine d'immersion exerce une influence significative sur la vitesse de corrosion des plaques de cuivre à la quatrième et sixième semaine d'immersion. La variation ponctuelle à un pH de 8,5 produit une réduction

maximale de la vitesse de corrosion de 37% à la quatrième semaine d'immersion, par rapport à la vitesse de corrosion des échantillons qui n'ont pas eu de variation ponctuelle de pH. La variation ponctuelle à pH 6,6 diminue également la vitesse de corrosion mais de façon moins significative que la variation ponctuelle à pH 8,5. La variation ponctuelle à pH 5,5 n'a pas réellement d'effet si ce n'est qu'elle augmente légèrement la vitesse de corrosion entre 5 et 8 semaines d'immersion. La diminution de la vitesse de corrosion suite à des variations de pH à 6,6 et 8,5 s'estompe avec l'augmentation de la durée d'immersion, les résultats se confondent avec les vitesses de corrosion où il n'y a pas eu de variation de pH après 8 semaines d'immersion. Stone et al. (1987) ont observé une diminution de presque 50% sur la vitesse de corrosion du cuivre pour une augmentation du pH de 6 à 8. Millette (1985) a également observé des vitesses de corrosion plus faibles lorsque les échantillons sont placés dans une eau à pH 8 que lorsqu'ils sont placés dans une eau à pH 6. Quand le potentiel à l'électrode et le pH sont élevés, il se forme un oxyde passivant (CuO(s) et $\text{Cu}_2\text{O(s)}$) à la surface du métal (AWWA Research Foundation, 1985). L'augmentation du pH crée également des conditions plus favorables à la formation d'un dépôt protecteur.

5.3.3.2 Vitesse de corrosion suite à une variation ponctuelle de pH faite après 3 semaines d'immersion

Les tests Student montrent que les variations ponctuelles de pH à 5,5, 6,6 et 8,5 réalisées après 3 semaines d'immersion, ont une influence significative sur la vitesse de corrosion du cuivre à la sixième et huitième semaine d'immersion. La variation ponctuelle faite à un pH de 5,5 produit une augmentation maximale de la vitesse de corrosion de 38% à la huitième semaine d'immersion, par rapport à la vitesse de corrosion obtenue sans variation ponctuelle de pH. La variation ponctuelle faite à pH 6,6 augmente également la vitesse de corrosion mais de façon moindre que la variation ponctuelle à pH 5,5. Il est surprenant d'observer que la variation ponctuelle à pH 8,5 augmente la vitesse de corrosion. L'augmentation est toutefois moins marquée que l'augmentation de la vitesse de corrosion engendrée par la variation ponctuelle à pH 5,5. De plus, l'augmentation de la vitesse de corrosion causée par les trois variations ponctuelles de pH demeurent présente même après 8 semaines d'immersion. Les augmentations des vitesses de corrosion observées lors des trois variations ponctuelles de pH sont contradictoires aux résultats observés par Stone et al. (1987). Cet auteur a noté qu'après trois heures d'immersion, la vitesse de

corrosion d'une électrode de cuivre âgée est plus faible que celle d'une électrode non recouverte d'un film protecteur, pour une même valeur de pH. De plus, la différence de vitesse de corrosion entre les électrodes non protégées et les électrodes âgées diminue lorsque le pH est élevé. Les variations ponctuelles de pH réalisées après 3 semaines d'immersion auraient dû avoir un effet moindre sur les vitesses de corrosion que les variations ponctuelles de pH faites après une semaine d'immersion. Il n'y a aucune référence bibliographique faisant mention d'un tel phénomène. L'auteur pose deux hypothèses afin d'expliquer les augmentations observées sur la vitesse de corrosion.

1- Il est possible que le film protecteur âgé de 3 semaines n'ait pas la même composition chimique et physique que le film âgé d'une semaine. Un changement dans la grosseur des pores par exemple peut rendre le film âgé de trois semaines plus perméable. Ce film protecteur serait alors plus vulnérable à une variation de pH à 5,5 qu'un film âgé d'une semaine. Le transport des réactifs à travers le film de même que la vitesse de réaction à l'interface sont les facteurs limitant la vitesse de corrosion des échantillons immergés dans l'eau du robinet.

2- Les variations de pH à 6,6 et à 8,5 peuvent augmenter la vitesse de corrosion lorsqu'elles sont faites après 3 semaines d'immersion, en favorisant la formation d'un film présentant une structure cristalline différente de celle déjà formée entre 0 et 3 semaines. Il se développe alors des tensions dans le film, résultant de l'incompatibilité entre les réseaux cristallins, ce qui amène le film à la rupture et à la formation de corrosion localisée causant l'augmentation de la vitesse de corrosion.

5.3.3.3 Vitesse de corrosion à la suite d'une variation de pH faite après 5 et 6 semaines d'immersion

Les variations ponctuelle de pH effectuées après 5 et 6 semaines d'immersion n'affectent pas les résultats de façon significative. Les vitesses de corrosion tendent à se confondre avec les vitesses de corrosion des échantillons de cuivre qui n'ont pas subi de variation de pH. Les variations ponctuelles de pH faites après 6 semaines d'immersion affectent encore moins les vitesses de corrosion que les variations de pH faites après 5 semaines. Les données expérimentales permettent de croire qu'après 5 semaines d'immersion, les échantillons de cuivre sont suffisamment bien protégés pour résister à un changement brusque de pH.

5.3.4 Vitesse de corrosion de la fonte ayant eu une variation ponctuelle de pH

5.3.4.1 Vitesse de corrosion des échantillons de fonte ayant subi une variation de pH après une semaine d'immersion

Les tests d'analyse de variance montrent que la valeur du pH lors de la variation ponctuelle de pH réalisée après une semaine d'immersion influence de façon significative la vitesse de corrosion de la fonte ductile de la deuxième à la quatrième semaine d'immersion. Les tests Student font ressortir l'influence plus marquée sur la vitesse de corrosion de la variation ponctuelle à pH 6,6 de la deuxième à la sixième semaine d'immersion. La fonte ductile a subi une réduction maximale de la vitesse de corrosion de 41% après 4 semaines d'immersion pour une variation ponctuelle de pH à 6,6. Cependant, la réduction de la vitesse de corrosion devient moins significative avec l'augmentation de la durée d'immersion. De légères augmentations de la vitesse de corrosion ont été observées lors des variations ponctuelles de pH à 5,5 et à 8,5. Les vitesses de corrosion pour ces deux variations de pH se confondent et ne sont pas significativement différentes. Il peut sembler surprenant de constater qu'une variation à pH 8,5 n'ait pas eu pour effet de réduire la vitesse de corrosion. Cependant, d'autres auteurs ont déjà observé que l'augmentation du pH

ne réduit pas nécessairement la vitesse de corrosion de la fonte ductile. Millette (1985) a constaté que les échantillons de métal immergés dans une eau ayant un pH de 8,1 ont une vitesse de corrosion de 15% supérieure à ceux immergés dans une eau ayant un pH de 5,5. Les résultats de Desjardins et al. (1983) montrent que la fonte ductile est stable dans une eaux ayant un pH supérieur ou égal à 7,5. De la corrosion localisée a été observée sur les échantillons de fonte ductile immergés dans une eau à un pH de 6,5. Stumm, Larson et Skold, dans Montgomery (1985) ont observé une corrosion uniforme de la fonte ductile à pH faible, et une corrosion localisée à pH élevé. Il est probable que ce phénomène soit dû en partie à l'influence du pH sur la charge électrique de l'hydroxyde ferrique ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). La valeur isoélectrique de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ est près du pH neutre. A pH faible, l'hydroxyde ferrique a une charge positive et migre vers la cathode. Cette migration a pour effet de réduire la vitesse de transport des autres ions vers la cathode, et altère ainsi la distribution des régions anodiques et cathodiques sur le métal. A pH alcalin, le $\text{Fe}(\text{OH})_3$ devient chargé négativement et migre à l'anode, ce qui augmente la différence de potentiel entre la cathode et l'anode, la vitesse de corrosion et l'hétérogénéité de la surface de corrosion.

5.3.4.2 Vitesse de corrosion des échantillons ayant subi une variation ponctuelle de pH après trois semaines d'immersion

Les effets les plus marqués suite à des variations ponctuelles effectuées après trois semaines d'immersion ont été observés lors des variations brusques de pH à 5,5 et 8,5. La variation ponctuelle à pH 5,5 a entraîné une augmentation maximale de la vitesse de corrosion de 25% après 8 semaines d'immersion. Les vitesses de corrosion ont toutes été augmentées par une variation ponctuelle de pH faite après trois semaines aussi bien lors des variations à pH acide qu'à pH basique. La variation ponctuelle à pH 6,6 augmente moins la vitesse de corrosion que les variations à pH 5,5 et 8,5. Cela est en accord avec les résultats obtenus suite à des variations de pH effectuées après une semaine d'immersion. La théorie prévoit que le développement d'un film protecteur réduise les effets d'une variation brusque de pH. Une hypothèse peut être avancée pour expliquer l'augmentation observée sur la vitesse de corrosion. Le vieillissement du film protecteur peut modifier les propriétés physiques du film tel que la porosité, l'épaisseur et la composition structurale; le film serait alors plus vulnérable à l'attaque de la corrosion lors d'une variation ponctuelle de pH faite après trois semaines que lors d'une variation de pH fait après une

semaine d'immersion. Cette hypothèse s'appuie sur les constatations faites par Pisigan, dans AWWA Research Foundation (1985), où il est mentionné que le film protecteur du fer est sujet à des modifications physico-chimiques en vieillissant. Des analyses seraient toutefois nécessaires afin de confirmer cette hypothèse. La structure des films est soumise à des réactions métaboliques complexes, et l'approche idéal pour une meilleure compréhension de la structure des dépôts est certainement l'examen microscopique combiné à des analyses aux rayons-x.

5.3.4.3 Vitesse de corrosion des échantillons de fonte qui ont subi une variation ponctuelle de pH après 5 et 6 semaines d'immersion

Les tests statistiques montrent que les vitesses de corrosion ne sont pas affectées de façon significative par une variation ponctuelle de pH réalisée après 5 et 6 semaines d'immersion. Le film protecteur formé à la surface de la fonte ductile après 5 semaines d'immersion offre une bonne résistance aux attaques de la corrosion.

CHAPITRE VI

CONCLUSION

L'étude réalisée afin de vérifier l'influence d'une variation ponctuelle de pH sur la vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte ductile dans l'eau potable, ainsi que l'influence de la présence du trou et des côtés sur les échantillons de métal a permis de d'observer les faits suivants:

1- La corrosion du cuivre et de la fonte ductile n'ayant pas subi de variation ponctuelle de pH

La vitesse de corrosion du cuivre après 8 semaines d'immersion est de $0,13 \text{ g/m}^2.\text{d}$, celle de la fonte ductile de $1,28 \text{ g/m}^2.\text{d}$. La vitesse de corrosion de la fonte est donc environ 10 fois plus élevée que celle du cuivre. Une diminution progressive de la vitesse de corrosion pour les deux métaux a été observée du début à la troisième semaine d'immersion. Par la suite, la vitesse de corrosion est demeurée quasi constante jusqu'à la huitième semaine d'immersion. La troisième semaine est donc une étape importante dans le développement du film protecteur.

2- Vitesse de corrosion du cuivre suite à une variation ponctuelle de pH

Une réduction maximale de la vitesse de corrosion de 37% a été observée lors d'une variation ponctuelle de pH à 8,5 faite après une semaine d'immersion.

Les variations ponctuelles à pH 5,5, 6,6 et 8,5 faites après trois semaines d'immersion ont toutes favorisé l'augmentation de la vitesse de corrosion. Une augmentation maximale de 38% a été observée lors d'une variation ponctuelle à pH 5,5. Les effets négatifs de ces variations ponctuelles de pH sont présents jusqu'à la huitième semaine d'immersion.

Lors des variations de pH réalisées après 5 et 6 semaines d'immersion, les tests statistiques ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les vitesses de corrosion des échantillons de cuivre qui ont subi une variation ponctuelle de pH, et ceux qui n'ont pas subi de variation de pH. Un film protecteur âgé de 5 semaines serait alors suffisamment développé pour résister aux variations brusques de pH.

3- Vitesse de corrosion de la fonte ductile ayant subi une variation ponctuelle de pH

Il existe une similitude entre les résultats obtenus pour le cuivre et ceux obtenus pour la fonte ductile. Cependant, une variation ponctuelle à pH 6,6 faite après une semaine d'immersion est plus favorable à une diminution de la vitesse de corrosion qu'une variation ponctuelle à pH 8,5. Une réduction maximale de la vitesse de corrosion de 41% a été observée lors de la variation à pH 6,6 faite après une semaine d'immersion. Des augmentations de la vitesse de corrosion ont été observées lors des variations ponctuelles de pH effectuées après 3 semaines d'immersion et ce, pour les trois valeurs de pH. Il a été observé une augmentation maximale de 25% lors de la variation ponctuelle à pH 5,5 après 3 semaines d'immersion. Les variations de pH effectuées après 5 et 6 semaines d'immersion, n'ont pas eu d'effets significatifs sur la vitesse de corrosion.

4- Vitesse de corrosion des échantillons non troués

L'ensemble des résultats obtenus pour les échantillons de métal non troués montre que la présence du trou et des côtés n'influencent pas de façon significative la vitesse de corrosion du cuivre et de la fonte ductile.

5- Conclusions générales

Comme la majorité des conduites dans les réseaux de distribution d'eau potable sont généralement vieilles et qu'elles possèdent un film protecteur, une variation brusque de pH n'aura aucun effet sur la vitesse de corrosion. On ignore cependant l'importance de la fréquence et de la durée des variations ponctuelles de pH sur la corrosion du cuivre et de la fonte ductile, puisque ces deux facteurs n'ont pas fait l'objet de cette étude.

Lors d'expérience sur la corrosion en laboratoire, il est recommandé de maintenir un pH stable et d'éviter les variations ponctuelles de pH, particulièrement au début de la période d'immersion afin de ne pas influencer les résultats de vitesse de corrosion.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmadi, A.B., Effects of Water Quality Parameters on Corrosion of Mild Steel, Copper, and Zinc. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade Philosophia Doctor, Université de Floride (1981).
- Ainsworth, R.G., A guide to solving water quality problems in distribution systems. Water Research Centre, Swindon, England (1981).
- APHA, AWWA, WPCF., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 16e édition, Washington (1985).
- Atlas, D., J. Coombs, O.T. Zajicek, The corrosion of copper by chlorinated drinking water. Water Ressource, v16, p 693-698. (1982)
- AWWA Research Foundation., Internal Corrosion of Water Distribution Systems. U.S.A., ISBN 0-915295-0705, pp. 1-80. (1985).

Boffardi, B.P., G.W. Schweitzer., Treating and monitoring corrosion and scale in distribution systems. Water Engineering Management, v131, pp.6-8. (1984).

Butler, G., H.C.K. Ison., Corrosion and its prevention in waters. Leonhard-Hill, London. (1966).

Clément, B., Analyse statistique, tome II. Département de mathématiques appliqués, École Polytechnique de Montréal, pp.425-471. (1986).

Cox, G.L., B.E. Roedtheli., Effect of Oxygen Concentration on Corrosion Rates of Steel and Composition of Corrosion Products Formed in Oxygenated Water. Industry & Engineering Chemical., 23:1012. (1931).

Craig, B.D., Effect of copper of the protectiveness of iron sulfide films. National Association of Corrosion Engineers, vol.40, no.9, pp. 471-474. (1984).

Craun, G.F., L.J. McCabe., Problems associated with metals in drinking water. Jour. AWWA, 67:11:593. (1975).

- Desjardins, R., D. L. Piron, F. Brière, Corrosion behaviour of metal pipes in drinking water of variable pH. Canadian Chemical Engineering Conference, 33' édition, v 1, pp. 257-260. (1983).
- Di Quarto, F., S. Piazza, C. Sunseri, Photoelectrochemical study of the corrosion product layers on copper in weakly acidic solutions. Electrochemical Journal, Vol 30, No 3, pp. 315-324. (1985).
- Eastman, J.A., Factors Affecting Red Water Formation. Final Project Report. Malcolm Pirnie, Inc., Paramus, N.J. (1981).
- Eliassen, R., J.C. Lamb, III. Mechanism of the Internal Corrosion of Water Pipe. Journal American Water Works Association, 45:1281. (1953).
- Epelboin, I., C. Gabrielli, M. Keddam, Rôle de la diffusion dans les phénomènes de passivation et de corrosion localisée du fer en milieu acide. Corrosion Science, Great Britain, Vol 15, pp 155-171. (1975):

Flynn, T.F., Effect of pH on corrosion control, disinfection and trihalomethane (THM) formation. AWWA Annual Conference, pp. 945-954. (1984).

Hartley, R.A., Comment combattre la corrosion. L'ingénieur, Montréal, v 68, n 351, pp 19-25. (1982).

Hatch, G.B., O. Rice., Influence in Water Composition on the Corrosion of Steel. Journal American Water Works Association, 51:719-727. (1959).

Hilburn, R.D., Modeling copper corrosion in water with low conductivity using electrochemical techniques. Journal American Water Works Association, v 75, n 3, pp. 149-154. (1983).

Hilburn, R.D., Controlling copper corrosion by pH adjustment: practical result from mass transport model. AWWA Annual Conference, pp. 1243-63. (1985).

Lane, R., Stabilization needed to control pipe and scale. Water & Sewage Works, pp. 60-63. (1978).

Larson, T.E., Bacteria, Corrosion and Red Water.
Journal American Water Works Association,
31:1186. (1939).

Larson, T.E., Report on Loss in Carrying Capacity of
Water Mains. Journal American Water Works
Association, 45:1061-1071. (1955).

Larson, T.E., R.V. Skold., Corrosion and Tuberculation of
Cast Iron. Journal American Water Works Association,
49:1294. (1957).

Larson, T.E., Deterioration of Water Quality in Distri-
bution Systems. Journal American Water Works
Association, 58:1307. (1966).

Larson, T.E., Corrosion by Domestic Waters. Bulletin 69.
Illinois State Water Survey, Champaign, Ill. (1975).

Mancy, K.H., Dissolved Oxygen- A Corrosion Inhibitor of
Promoter in Water distribution Systems. National
Association of Corrosion Engineers, Boston. (1966).

Mathieu, J.B., Mesure sur chantier de la vitesse de corrosion d'un métal dans l'eau. Eau du Québec, vol.15, no 2, pp. 132-138. (1982).

Millette, L., The effect of pH adjustment on the internal corrosion rates of cast iron and copper water distribution pipes. Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Université de Colombie Britannique, Vancouver, 180 pages. (1985).

Montgomery, J.M., Water Treatment Principles and Design. A Wiley-Interscience Publication, pp 392-435, (1985).

Nakhjiri, K.S., C.E. Herrera, R.D. Hilburn, Seattle distribution system corrosion control study: Volume V. Counteractive effects of disinfection and corrosion control. United States EPA Project Summary, EPA-600/S2-84-066, 3 pages. (1984).

Okamoto, G., T. Shibata., Passivity and Breakdown of Passivity of Stainless Steel. Passivity of Metals. Corrosion Monograph Series, Electrochemical Society, Inc. Frankenthal and Kruger. (1978).

- Petrocelli, J.V., Electrochemistry of Dissolution Processes. The Surface of Metal and Semiconductors, édition H.C. Gatos. John Wiley & Sons. (1960).
- Piron, D.L., Innovation et formation en corrosion. L'ingénieur, Montréal, v68, n 351, pp 11-13. (1982).
- Pisigan, R.A. Jr., J.E. Singley., Evaluation of water corrosivity using the Langelier index and relative corrosion rate models. National Association of Corrosion Engineers, pp. 26-36. (1985).
- Pisigan, R.A. Jr., J.E. Singley., Influence of buffer capacity, chlorine residual, and flow rate on corrosion of mild steel and copper. Journal American Water Works Association, pp. 62-70. (1987).
- Pourbaix, M., Atlas d'équilibre électrochimique. Gauthier-Villars & Cie, Editeur Paris, 644 p. (1963)
- Reiber, S.H. J.F. Ferguson, M.M. Benjamin, Corrosion monitoring and control in the Pacific northwest. Journal American Water Works Association, pp.71-74. (1987).

Rossum, J.R., Pitting in copper water tubing. Journal American Water Works Association, v 77, n 10, pp. 70-73. (1985).

SAS INSTITUTE INC., SAS/GRAPH User's Guide, Version 5' Edition Cary, NC: SAS Institute Inc., 596 p. (1985)

SAS INSTITUTE INC., SAS User's Guide: Basics, Version 5' Edition Cary, NC: SAS Institute Inc., 1290 p. (1985b)

Singley, J.E., R.A. Pisigan, A. Ahmadi, P.O. Pisigan, T.Y. Lee, Corrosion and calcium carbonate saturation index in water distribution systems. United States EPA Project Summary EPA, 600/S2-85-079, 6 pages. (1985).

Sontheimer, H., W Kölle, V.L. Snoeyink, The Siderite Model of the Formation of Corrosion-Resistant Scales. Journal American Water Works Association, 74:572-579. (1981).

Stone, A., D. Spyridakis, M. Benjamin, J. Ferguson,
S. Reiber, S. Osterhus, The effects of short-term
changes in water quality on copper and zinc
corrosion rates. Journal American Water Works
Association, fév., pp 75-82. (1987).

Tékeu, J.C., Étude de l'influence de la composition
chimique de l'eau potable sur la corrosion des
réseaux de distribution d'eau. Thèse présentée en ve
de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor.
École Polytechnique, Montréal, 299 pages. (1983).

Treweek, G.P., J. Glicker, B. Chow, M. Sprinker,
Pilot-plant simulation of corrosion in domestic pipe
material. Journal American Water Works Association,
oct., pp.74-82. (1985).

Uhlig, H.H., Corrosion and Corrosion Control, 2^e édition,
John Wiley and Sons, Inc., New York. (1971).

Vik, E.A., The effects of corrosion control of low
alkalinity waters - Norwegian expériences. Aqua, No 4,
pp. 198-206. (1986).

Volkening, V.B., Corrosion of Steel Pipe by Chlorinated
Seawater at Various Velocities. Corrosion,
6:123-128. (1950).

ANNEXES

ANNEXE A - EXEMPLE DE CALCUL DE LA VITESSE DE CORROSION

1. Surface de corrosion des échantillons de métal

Le calcul des surfaces de corrosion des échantillons de cuivre et de fonte ductile est fait en considérant deux surfaces de corrosion de 12 cm² chacune, moins la surface circulaire occupée par le trou de 5 mm de diamètre. Le programme Fortran présenté en Annexe C utilise comme surface totale de corrosion les valeurs suivantes :

cuivre : 0,002374 m²

fonte : 0,002331 m²

Ces surfaces ont été calculées de façon précise au centième de millimètre près à l'aide d'un vernier digital de marque: NKS Max Cal Electronic Digital Caliper.

2. Exemple du calcul de la vitesse de corrosion

Voici un exemple de calcul de la vitesse de corrosion d'un coupon de cuivre ayant séjourné dans une cellule de contact 4 semaines (28 jours), et n'ayant pas subi de variation ponctuelle de pH.

Numéro du coupon: L-240

Poids avant immersion - Poids après = Perte de poids (g)

12,7319 - 12,7221 = 0,0098

Vitesse de corrosion: 0,15 g/m².d

ANNEXE B - EXEMPLE DU CALCUL DE LA VITESSE DE CORROSION
DES Échantillons DE MÉTAL NON TROUÉS

1. Surfaces des échantillons

Les surfaces des échantillons ayant servi à étudier l'influence du trou et des côtés ont été calculées individuellement, puisqu'il y avait trop de variations d'un échantillon de métal à l'autre. On calcule la surface totale de corrosion en soustrayant les régions où la colle s'est répandue (tableau B.1).

TABLEAU B.1 Surface de corrosion des échantillons de métal non troués

FONTE DUCTILE		CUIVRE	
NUMÉRO	SURFACE (m ²)	NUMÉRO	SURFACE (m ²)
F 16	0,00224	F 1	0,00215
F 49	0,00217	F 9	0,00214
F 58	0,00217	F 13	0,00203
F 81	0,00222	F 34	0,00202
F 6	0,00225	F 71	0,00224
F 11	0,00217	F 74	0,00219
F 37	0,00219	F 76	0,00208
F 41	0,00227	F 82	0,00223
F 93	0,00217	F 44	0,00225
F 26	0,00210	F 73	0,00217
F 59	0,00218	F 49	0,00209
F 64	0,00216	F 54	0,00224
F 77	0,00224	F 78	0,00201
F 98	0,00219		
F 46	0,00227		
F 9	0,00214		
F 63	0,00214		
F 75	0,00222		

2. Exemple du calcul de la vitesse de corrosion

Voici les modifications engendrées par la présence de la colle pour le cuivre et la fonte ductile. Un signe positif signifie un gain de poids dû à la présence de la colle par rapport aux échantillons troués, et un signe négatif représente une perte de poids. Les calculs pour la fonte ductile tiennent compte d'une perte de poids de 0,0196 gramme subie lors du lavage des échantillons troués.

MÉTAL	LAVAGE	ÉTUVE	TOTAL(g)
Fonte :	0,0036	-0,0014	0,0022
Cuivre:	0.0000	-0,0015	-0,0015

Voici un exemple du calcul de la vitesse de corrosion après une semaine d'immersion (7 jours) pour chacun des métaux non troués.

MÉTAL	NO	PERTE(g)	*MODIFICATION (g)	VITESSE DE CORROSION
Fonte	F 11	0,0393	-0,0022	2,44 (g/m ² .d)
Cuivre	F 76	0,0055	+0,0015	0,42 (g/m ² .d)

* Modification engendrée par la présence de la colle sur les plaques de métal

ANNEXE C - RÉSULTATS BRUTS DE CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-
CHIMIQUES DES EAUX UTILISÉES

TABLEAU C.1 VALEUR DU PH DANS LES 8 BASSINS

DATE	BAS1	BAS2	BAS3	BAS4	BAS5	BAS6	BAS7	BAS8
10/08	8.08	8.08	.	.	.	.	.	.
11/08	7.65	7.62	8.03	8.04	.	.	.	.
12/08	7.67	7.60	7.68	7.59	8.06	8.02	.	.
13/08	7.61	7.63	7.65	7.57	7.60	7.61	.	.
14/08	7.65	7.71	7.71	7.63	7.68	7.58	.	.
15/08	7.77	7.75	7.73	7.70	7.69	7.61	.	.
16/08	7.65	7.70	7.70	7.62	7.71	7.56	.	.
17/08	5.74	5.74	7.78	7.73	7.70	7.66	.	.
18/08	7.78	7.73	6.87	6.87	7.56	7.52	.	.
19/08	7.94	7.88	7.78	7.71	8.57	8.57	.	.
20/08	7.74	7.67	7.82	7.75	7.84	7.70	.	.
21/08	7.67	7.62	7.57	7.54	7.49	7.49	.	.
22/08	7.86	7.77	7.72	7.68	7.69	7.68	.	.
23/08	7.77	7.76	7.72	7.65	7.68	7.60	.	.
24/08	7.76	7.70	7.67	7.64	7.70	7.59	.	.
25/08	7.76	7.75	7.73	7.63	7.67	7.58	.	.
26/08	7.79	7.79	7.75	7.69	7.68	7.64	.	.
27/08	7.73	7.76	7.66	7.61	7.60	7.57	.	.
28/08	7.77	7.83	7.79	7.67	7.79	7.67	.	.
29/08	7.77	7.75	7.78	7.64	7.65	7.63	.	.
30/08	7.76	7.75	7.80	7.66	7.68	7.61	.	.
31/08	7.75	7.77	7.76	7.65	7.74	7.64	.	.
01/09	7.75	7.72	7.75	7.62	7.64	7.59	.	.
03/09	7.70	7.68	7.74	7.66	7.65	7.69	.	.
05/09	7.67	7.73	7.74	7.70	7.69	7.75	.	.
07/09	7.68	7.79	7.70	7.68	7.69	7.80	.	.
10/09	7.46	7.50	7.51	7.51	7.51	7.57	.	.
11/09	7.55	7.61	7.53	7.58	7.61	7.60	.	.
13/09	7.62	7.57	7.68	7.58	7.58	7.54	.	.
14/09	.	.	.	.	.	.	7.95	7.97
15/09	7.56	7.61	7.55	7.58	7.56	7.53	7.67	8.04
17/09	.	.	.	.	.	.	7.80	7.93
18/09	7.60	7.76	7.66	7.66	7.63	7.62	7.78	8.08
20/09	.	7.71	.	.	.	7.68	7.68	8.15
22/09	7.86	7.89	7.87	7.90	7.88	7.87	7.84	7.94

TABLEAU C.1 VALEUR DU PH DANS LES 8 BASSINS (SUITE)

DATE	BAS1	BAS2	BAS3	BAS4	BAS5	BAS6	BAS7	BAS8
23/09	7.54	.	.	7.58	.	.	7.56	.
24/09	.	7.67	.	.	7.53	.	.	8.01
25/09	7.57	7.50	7.50	7.46	7.44	7.34	7.48	7.88
28/09	7.77	7.78	.	.	.	.	7.66	8.01
29/09	.	.	7.58	.	.	.	.	7.99
02/10	.	.	.	7.72	.	7.63	.	7.87
04/10	7.88	8.00	7.88	.	7.81	.	7.98	7.91
05/10	5.33	5.33	.	7.80	.	7.66	.	7.72
06/10	.	.	6.44	6.44	.	.	.	.
07/10	.	.	.	.	8.45	8.45	.	.
08/10	7.97	8.02	7.95	7.99	7.98	7.95	7.97	7.96
09/10	7.54	.	7.54	.	7.47	.	7.53	.
12/10	.	7.81	.	7.62	.	7.55	.	8.14
13/10	7.70	.	.	.	7.50	.	7.61	7.91
15/10	.	.	7.54	.	7.56	.	.	8.01
19/10	7.89	7.97	.	7.80	.	.	7.83	8.01
20/10	.	.	7.68	.	7.62	7.67	.	7.94
23/10	7.91	7.98	7.93	7.95	7.95	7.96	7.94	7.98
24/10	.	7.67	.	7.61	.	7.48	.	7.79
26/10	7.65	.	7.67	.	7.76	.	7.68	.
29/10	.	7.60	.	7.55	.	7.34	.	7.93
03/11	7.63	.	7.61	.	7.64	.	7.74	.
05/11	.	7.83	.	7.64	.	7.42	.	7.81
06/11	7.70	7.78	7.72	7.65	7.71	7.50	7.70	7.80
09/11	7.63	7.83	7.67	7.72	7.64	7.59	7.76	7.65
10/11	.	.	7.66	7.81	7.73	7.60	.	.
11/11	.	.	.	.	7.65	7.62	.	.

TABLEAU C.2 DURETE ET ALCALINITE (MG/L CaCO3)

DATE	DURETE								ALCALINITE							
	BA1	BA2	BA3	BA4	BA5	BA6	BA7	BA8	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
18/08	115	115	.	.	116	112	.	.	53	56	.	.	59	74	.	.
18/08	118	118	103	103	.	.	.	.	3	3	19	19	.	.	.	.
19/08	.	.	111	110	116	116	.	.	.	.	56	58	54	54	.	.
10/09	124	126	127	126	126	125	.	.	21	21	23	29	28	42	.	.
10/09	63	60	64	81	93	76	.	.	36	33	30	31	30	35	.	.
16/09	.	.	.	.	.	.	117	120	.	.	.	.	.	.	69	65
22/09	64	60	63	81	89	90	118	133	18	17	19	18	18	23	50	52
22/09	107	116	107	120	117	115	120	122	62	69	60	73	68	69	56	60
06/10	151	151	143	143	.	.	.	.	2	2	10	10	.	.	.	.
07/10	.	.	.	.	145	145	.	.	.	.	.	.	57	57	.	.
08/10	107	128	111	123	117	125	129	125	31	70	31	42	39	41	29	14
08/10	132	126	121	123	122	122	124	124	68	73	60	69	61	72	67	69
23/10	123	125	118	124	126	121	122	126	35	39	30	40	34	41	31	25
23/10	131	127	124	127	131	128	126	126	62	69	61	73	76	72	58	57
09/11	135	135	.	.	.	.	133	134	28	34	.	.	.	.	28	19
10/11	.	.	130	133	.	.	.	.	.	.	27	37	.	.	.	.
11/11	.	.	.	.	134	133	.	.	.	.	.	.	39	43	.	.

TABLEAU C.3 OXYGENE DISSOULS (MG/L)

DATE	BAS1	BAS2	BAS3	BAS4	BAS5	BAS6	BAS7	BAS8
18/08	8.2	7.9	7.4	7.4	7.9	7.1	.	.
19/08	.	.	7.3	7.4	8.1	8.1	.	.
10/09	7.3	7.4	7.2	7.3	7.3	7.5	.	.
10/09	7.9	7.8	7.6	7.6	7.6	7.7	.	.
16/09	.	.	.	.	.	.	8.0	7.7
22/09	8.1	7.6	8.1	7.6	7.9	8.7	7.8	8.3
22/09	8.8	8.9	8.7	8.8	8.8	8.8	8.3	8.5
06/10	7.9	7.9	8.5	8.5	.	.	.	.
07/10	.	.	.	.	8.3	8.3	.	.
08/10	7.5	7.7	7.5	7.4	7.5	7.8	7.4	7.8
08/10	8.3	8.6	8.5	8.2	8.1	8.4	8.0	8.7
23/10	8.2	7.9	8.1	8.2	8.2	8.4	8.6	8.8
23/10	8.4	8.4	8.4	8.6	8.7	8.6	8.3	8.7
09/11	8.0	8.1	.	.	.	.	7.9	8.1
10/11	.	.	8.1	8.1	.	.	.	.

TABLEAU C.4 LES SULFATES ET LES CHLORURES (MG/L)

DATE	SULFATES								CHLORURES							
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
18/08	24	23	.	.	24	24	.	.	40	40	.	.	40	40	.	.
18/08	26	26	25	25	.	.	.	.	39	39	41	41	.	.	.	.
19/08	.	.	25	23	25	25	.	.	.	.	40	40	41	41	.	.
10/09	24	24	24	23	27	26	.	.	38	39	42	40	41	42	.	.
10/09	13	5	7	10	11	11	.	.	18	18	18	23	24	22	.	.
16/09	.	.	.	.	.	.	17	19	.	.	.	.	.	.	35	35
22/09	15	13	14	18	24	19	30	31	19	21	18	26	31	24	40	36
22/09	27	27	26	30	37	28	31	30	31	34	36	40	36	34	39	36
06/10	27	27	28	28	.	.	.	.	52	52	46	46	.	.	.	.
07/10	.	.	.	.	27	27	.	.	.	.	.	.	40	40	.	.
08/10	21	27	21	25	23	25	25	27	25	43	25	37	36	40	38	43
08/10	25	25	22	27	27	26	27	26	38	45	40	45	36	47	39	36
23/10	27	25	24	28	29	28	27	28	33	44	34	35	36	43	43	51
23/10	27	27	26	28	26	28	27	28	40	48	54	51	56	55	59	59
09/11	26	27	.	.	.	.	28	30	43	43	.	.	.	.	50	45
10/11	.	.	26	29	.	.	.	.	.	.	42	50	.	.	.	.
11/11	.	.	.	.	29	29	.	.	.	.	.	.	50	50	.	.

TABLEAU C.5 LES NITRATES (MG/L)

DATE	BAS1	BAS2	BAS3	BAS4	BAS5	BAS6	BAS7	BAS8
18/08	27.8	27.0	.	.	23.0	05.0	.	.
18/08	92.5	92.5	65.0	65.0	.	.	.	.
19/08	.	.	25.0	25.0	36.0	36.0	.	.
10/09	65.0	70.0	64.5	57.5	58.0	44.0	.	.
10/09	10.5	11.8	11.5	21.0	28.5	17.5	.	.
16/09	.	.	.	.	.	.	07.0	09.0
22/09	21.0	26.5	26.0	40.0	46.0	30.5	29.5	28.5
22/09	10.5	09.5	11.7	16.5	12.0	10.0	20.0	22.0
06/10	101.0	101.0	101.0	101.0	.	.	.	.
07/10	.	.	.	.	48.5	48.5	.	.
08/10	41.5	13.0	39.5	37.0	46.0	34.5	50.5	69.0
08/10	14.0	10.5	18.5	14.0	26.0	15.5	19.5	16.0
23/10	49.0	47.5	51.5	48.0	52.0	47.5	55.0	65.0
23/10	25.0	16.5	23.0	16.0	10.0	14.0	27.5	31.5
09/11	57.5	52.5	.	.	.	.	64.0	75.0
10/11	.	.	64.0	55.5	.	.	.	.
11/11	.	.	.	.	55.0	50.0	.	.

TABLEAU C.6 LE CALCIUM ET LE MAGNESIUM (MG/L)

DATE	CALCIUM								MAGNESIUM							
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
18/08	35	35	.	.	36	35	.	.	6.7	6.7	.	.	6.5	6.5	.	.
18/08	36	36	36	36	.	.	.	.	6.6	6.6	6.6	6.6	.	.	.	.
19/08	.	.	36	37	39	39	.	.	.	.	6.8	6.7	6.6	6.6	.	.
10/09	38	38	37	37	37	37	.	.	6.5	7.1	7.0	7.0	7.0	7.0	.	.
10/09	21	20	22	26	28	25	.	.	3.6	3.6	3.8	4.7	5.2	4.5	.	.
16/09	.	.	.	.	.	.	35	35	.	.	.	.	.	.	6.3	6.7
22/09	21	20	21	25	28	25	35	36	3.6	3.5	3.7	4.6	5.1	4.4	6.5	6.8
22/09	33	35	32	36	44	35	37	39	6.0	6.4	5.9	6.6	6.7	6.3	6.7	7.0
06/10	43	43	46	46	.	.	.	.	7.0	7.0	7.0	7.0	.	.	.	.
07/10	.	.	.	.	45	45	.	.	.	.	.	.	7.0	7.0	.	.
08/10	36	41	36	39	39	38	40	38	6.0	6.5	5.8	6.3	6.5	6.3	6.5	7.0
08/10	37	38	36	38	38	38	38	37	6.8	7.0	6.6	6.9	6.8	6.7	6.8	6.9
23/10	38	38	37	38	39	38	38	38	6.6	7.0	6.7	6.9	6.9	6.9	7.0	7.0
23/10	39	40	38	39	39	39	39	39	7.0	7.0	6.9	7.0	7.0	7.1	7.0	7.2
09/11	38	38	.	.	.	.	39	38	7.1	7.1	.	.	.	.	6.9	7.0
10/11	.	.	37	38	.	.	.	.	.	.	7.1	7.1	.	.	.	.
11/11	.	.	.	.	39	39	.	.	.	.	.	.	7.2	7.1	.	.

TABLEAU C.7 POTASSIUM (MG/L)

DATE	BAS1	BAS2	BAS3	BAS4	BAS5	BAS6	BAS7	BAS8
18/08	2.0	2.0	.	.	1.9	1.9	.	.
18/08	2.2	2.2	2.0	2.0	.	.	.	.
19/08	.	.	2.0	2.0	2.8	2.8	.	.
10/09	2.2	2.4	2.4	2.4	2.3	2.4	.	.
10/09	1.7	2.4	1.6	1.7	2.0	2.0	.	.
16/09	.	.	.	.	.	.	2.5	2.2
22/09	2.2	2.1	2.0	2.2	2.2	2.2	2.4	2.7
22/09	2.4	2.8	2.2	2.3	2.6	6.4	7.0	5.0
06/10	10.5	10.5	3.2	3.2	.	.	.	.
07/10	.	.	.	.	3.0	3.0	.	.
08/10	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
08/10	1.9	2.0	2.0	1.9	2.0	2.0	2.2	2.0
23/10	2.0	2.0	2.1	2.0	1.9	2.4	2.0	2.0
23/10	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
09/11	2.3	2.4	.	.	.	.	4.2	2.8
10/11	.	.	2.2	2.4	.	.	.	.
11/11	.	.	.	.	2.4	3.6	.	.

TABLEAU C.8 LE SODIUM (MG/L)

DATE	BAS1	BAS2	BAS3	BAS4	BAS5	BAS6	BAS7	BAS8
18/08	11.50	11.25	.	.	11.00	11.00	.	.
18/08	11.25	11.25	11.25	11.25	.	.	.	.
19/08	.	.	11.50	11.50	11.50	11.50	.	.
10/09	11.25	11.25	11.00	11.25	11.25	11.25	.	.
10/09	5.75	5.75	5.75	7.50	8.75	7.50	.	.
16/09	.	.	.	.	.	.	10.50	11.25
22/09	5.75	5.50	6.25	7.50	8.25	7.50	11.00	11.00
22/09	10.00	10.75	10.00	10.75	10.75	10.00	11.00	11.25
06/10	11.25	11.25	11.60	11.60	.	.	.	.
07/10	.	.	.	.	11.60	11.60	.	.
08/10	10.00	11.60	10.00	11.25	11.00	10.00	11.25	11.60
08/10	11.25	11.25	11.00	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25
23/10	11.60	11.25	10.75	11.25	11.00	11.25	11.60	11.60
23/10	11.60	11.60	11.60	11.60	11.60	11.60	11.60	11.60
09/11	11.60	11.60	.	.	.	.	10.00	10.50
10/11	.	.	11.60	11.60	.	.	.	.
11/11	.	.	.	.	11.60	11.60	.	.

TABLEAU C.9 Conductivité des 8 bassins (uS/cm)

125

Bassin #	Moyenne	Min.-Max.	Pendant la variation de pH
1	217	150-290	314
2	223	137-309	314
3	227	133-375	357
4	208	142-309	357
5	247	135-311	344
6	235	133-307	344
7	254	137-324	*
8	259	142-336	*

TABLEAU C.10 Température moyenne des bassins (°C).

Bassin #	Moyenne	Ecart type	Min.-Max.	Pendant la variation de pH
1	27	1,66	22-30	27
2	27	1,96	20-30	27
3	27	1,72	22-29	27
4	27	1,76	22-29	27
5	27	2,06	21-30	27
6	25	2,15	19-29	27
7	25	2,03	21-29	*
8	25	1,86	21-28	*

TABLEAU C.11 Débit dans les bassins (L/d).

Bassin #	Moyenne	Ecart type	Min.-Max.	Pendant la variation de pH
1	7	3,70	1-20	8
2	8	5,08	0-29	8
3	7	4,56	1-2	9
4	8	8,02	0-54	9
5	7	6,12	0-33	11
6	8	5,34	0-25	11
7	8	3,79	1-1	*
8	8	5,87	0-3	*

* Sans variation ponctuelle de pH

Voici le programme Fortran qui a servi à calculer les vitesses de corrosion du cuivre et de la fonte ductile. Les résultats de vitesse de corrosion sont présentés dans les pages qui suivent.

```
C -----CALCUL DE LA VITESSE DE CORROSION-----
C
C CE PROGRAMME CALCULE LES PERTES DE POIDS ET LA VITESSE DE
C CORROSION MOYENNE DES PLAQUES, REGROUPEES PAR DUREES D'EXPO-
C SITION POUR UN MEME PH ET UN MEME MONTAGE, POUR LE CUIVRE.
C
C LE PROGRAMME LIT D'ABORD TOUTES LES PLAQUES ET LE TEMPS DE CON-
C TACT POUR UN PH ET UN MONTAGE DONNE. L'INFORMATION EST TIREE
C DES FICHIERS DUREE.PH.METAL (UNITE 10).
C CE FICHIER DOIT CONTENIR DES LIGNES DE FORMAT 1X,A5,1X,FS.2, AVEC
C LA DUREE INDIQUEE SEULEMENT POUR LA PREMIERE PLAQUE D'UN DOUBLET.
C
C LE PROGRAMME CHERCHE ENSUITE LES VARIATIONS DE POIDS DES PLAQUES
C DANS LES FICHIERS CUMUL.METAL (UNITE 11), TEL QUE FORMATE PAR
C LE PROGRAMME CUMUL.CALC.
C
C LES RESULTATS SONT INSCRITS DANS UN FICHIER DE FORME SOMM.PH.METAL
C (UNITE 12), QUI DOIT ETRE DEJA EXISTANT. LE PROGRAMME DEMANDE LES
C NOMS DES FICHIERS D'ENTREE/SORTIE AU MOMENT DE L'EXECUTION.
C
C DIMENSIONNEMENT ET INITIALISATION DES VARIABLES.
C
C LOGICAL*1 NOM(22), NOM1(22), NOM2(22)
C REAL*8 SUM(60,13)/780*0.0/, NO, LOSS, INTER(13), TRISUM(60,13),
+ CLEAN, AREA
C N=0
C
C DEMANDE DES NOMS DE FICHIERS D'ENTREE, OUVERTURE ET TESTS
C
C WRITE(6,1)
C 1 FORMAT('NOM DU FICHIER DES DUREES:')
C READ(9,2) NOM1
C 2 FORMAT(22A1)
C CALL OPNFIL(10,INF,NOM1,'OKOLD RDOK.')
C IF(INF.NE.0) GO TO 4
C WRITE(6,3)
C 3 FORMAT('NOM DU FICHIER CUMULATIF DU METAL:')
C READ(9,2) NOM2
C CALL OPNFIL(11,INF,NOM2,'OKOLD RDOK.')
C IF(INF.NE.0) GO TO 4
C GO TO 300
C
C IMPRESSION DU MESSAGE D'ERREUR A LA LECTURE, S'IL Y A LIEU
C
C 4 WRITE(6,5) INF
C 5 FORMAT(1X,I5,1X,'IL Y A UN PROBLEME DE LECTURE')
C GO TO 999
```

```

C
C      PROCEDURE POUR UN FICHIER DUREE ENTIER
C
300 READ(10,15)
17 FORMAT(1X)
301 N=N+1
    READ(10,10,END=400) SUM(N,2),SUM(N,1),SUM(N,4)
C
C      RECHERCHE DES DONNEES DANS LE FICHIER CUMUL
C
C      INITIALISATION A LA PREMIERE LIGNE DES DONNEES DANS CUMUL
C
    REWIND 11
    READ(11,7)
    7 FORMAT(1X,/,1X)
C
C      RECHERCHE DES DONNEES DE POIDS
C
100 READ(11,11,END=301) NO,CLEAN,LOSS
    IF(NO.NE.SUM(N,2)) GO TO 100
    SUM(N,3)=LOSS
    AREA=0.002374
    SUM(N,7)=LOSS/AREA
C
C      POUR LA SECONDE PLAQUE DU DOUBLET
C
    REWIND 11
    READ(11,7)
200 READ(11,11,END=301) NO,CLEAN,LOSS
    IF(NO.NE.SUM(N,4)) GO TO 200
    SUM(N,5)=LOSS
    AREA=0.002374
    SUM(N,8)=LOSS/AREA
C
C      CALCUL DES MOYENNES
C
    SUM(N,6)=(SUM(N,3)+SUM(N,5))/2
    SUM(N,9)=(SUM(N,7)+SUM(N,8))/2
    SUM(N,10)=SUM(N,9)/(SUM(N,1)*7)
    GO TO 301
C
C      FERMETURE DES FICHIERS D'ENTREE
C
400 CALL CLSFIL(10,INF,NOM1)
    CALL CLSFIL(11,INF,NOM2)
C
C      MISE EN ORDRE DES RESULTATS PAR DUREE CROISSANTE
C
    NUMBER=N-1
    DO 81 J=1,NUMBER
        DO 82 K=1,10
            TRISUM(J,K)=SUM(J,K)
62      CONTINUE
        DO 83 I=J,NUMBER
            IF(TRISUM(J,1).LE.SUM(I,1)) GO TO 83
            DO 84 K=1,10
                INTER(K)=TRISUM(J,K)
                TRISUM(J,K)=SUM(I,K)
                SUM(I,K)=INTER(K)
84      CONTINUE
83      CONTINUE
81      CONTINUE
C
C      DEMANDE DU NOM DU FICHIER DE SORTIE, OUVERTURE ET TEST
C
    WRITE(6,8)
    8 FORMAT('NOM DU FICHIER DE SORTIE (EXISTANT):')

```

```

      READ(9,2) NOM
      CALL OPNFIL(12,INF,NOM,'OKOLD WROK.')
      IF(INF.EQ.0) GO TO 199
      WRITE(6,9) INF
9     FORMAT(1X,15,1X,'IL Y A UN PROBLEME DE SORTIE')
      GO TO 999
C
C     ECRITURE DES RESULTATS
C
199  WRITE(12,12)
      DO 85 K=1,NUMBER
      WRITE(12,13) TRISUM(K,1),TRISUM(K,2),TRISUM(K,3),TRISUM(K,6),
+                TRISUM(K,7),TRISUM(K,9),TRISUM(K,10),
+                TRISUM(K,4),TRISUM(K,5),TRISUM(K,8)
85  CONTINUE
C
C     FORMATS
C
10  FORMAT(1X,A5,1X,FS.2,/,1X,AS)
11  FORMAT(A7,F9.4,34X,F8.4)
12  FORMAT(1X,'DUREE',1X,'NUMEROS',2X,'PERTES(G)',2X,'MOYENNE',
+          1X,'SUR L''AIRE',1X,'MOYENNE',2X,'TAUX',/)
13  FORMAT(1X,F4.1,2X,A7,1X,F9.4,F9.4,3(2X,F7.2),/,7X,A7,1X,
+          F9.4,11X,F7.2)
C
C     FERMETURE DU FICHIER DE SORTIE
C
      CALL CLSFIL(12,INF,NOM,'RLSE.')
999  STOP
      END

```

Les unités utilisées sont:

Pertes : gramme (g)

Sur l'aire : g/m^2

Vitesse: $\text{g/m}^2.\text{d}$

CUIVRE NON TROUE, SANS VARIATION DE PH

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	MOYENNE	SUR L'AIRE	MOYENNE	VITESSE
0.5	F- 13	0.0068	0.0060	3.35	2.96	0.85
	F- 34	0.0052		2.57		
0.5	F- 1	0.0070	0.0050	3.26	2.33	0.67
	F- 9	0.0030		1.40		
1.0	F- 76	0.0070	0.0063	3.37	2.94	0.42
	F- 71	0.0056		2.50		
1.0	F- 74	0.0023	0.0020	1.05	0.93	0.13
	F- 82	0.0018		0.81		
1.5	F- 44	0.0037	0.0037	1.64	1.64	0.16
1.5	F- 68	0.0080	0.0072	3.51	3.23	0.31
	F -73	0.0064		2.95		
2.0	F- 49	0.0021	0.0021	1.00	1.00	0.07
3.0	F- 54	0.0099	0.0074	4.42	3.45	0.16
	F- 78	0.0050		2.49		

CUIVRE SANS VARIATION DE PH

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRe	VITESSE
0.5	L-380	0.0081	3.41	0.97
	L-374	0.0098	4.13	1.18
0.5	L-206	0.0041	1.73	0.49
	L-152	0.0089	3.75	1.07
1.0	L-217	0.0051	2.15	0.31
	L-388	0.0107	4.51	0.64
1.0	L- 86	0.0060	2.53	0.36
	L-480	0.0096	4.04	0.58
1.5	L-354	0.0188	7.92	0.75
	L- 2	0.0064	2.70	0.26
1.5	L-268	0.0090	3.79	0.36
	L- 31	0.0063	2.65	0.25
2.0	L-338	0.0113	4.76	0.34
	L-462	0.0110	4.63	0.33
2.0	L- 51	0.0106	4.47	0.32
	L-126	0.0066	2.78	0.20
3.0	L-387	0.0115	4.84	0.23
	L-166	0.0080	3.37	0.16
3.0	L-205	0.0109	4.59	0.22
	L-237	0.0142	5.98	0.28
4.0	L-240	0.0098	4.13	0.15
	L- 4	0.0148	6.23	0.22
4.0	L-115	0.0157	6.61	0.24
	L-292	0.0163	6.87	0.25
6.0	L-239	0.0179	7.54	0.18
	L- 1	0.0123	5.18	0.12
6.0	L-244	0.0132	5.56	0.13
	L-429	0.0163	6.87	0.16
8.0	L-143	0.0185	7.79	0.14
	L-257	0.0195	8.21	0.15
8.0	L-337	0.0142	5.98	0.11
	L-364	0.0148	6.23	0.11

CUIVRE: VARIATION A PH 5,5 APRES 1 SEMAINE

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRES	VITESSE
2.0	L-341	0.0073	3.07	0.22
	L- 59	0.0061	2.57	0.18
2.0	L-486	0.0130	5.48	0.39
	L-451	0.0113	4.76	0.34
3.0	L-296	0.0131	5.52	0.26
	L-150	0.0153	6.44	0.31
3.0	L-118	0.0086	3.62	0.17
	L- 80	0.0096	4.04	0.19
4.0	L-277	0.0122	5.14	0.18
	L- 57	0.0161	6.78	0.24
4.0	L-340	0.0119	5.01	0.18
	L-212	0.0159	6.70	0.24
6.0	M- 60	0.0207	8.72	0.21
	L-325	0.0217	9.14	0.22
6.0	L-145	0.0186	7.83	0.19
	L-238	0.0154	6.49	0.15
8.0	L-117	0.0201	8.47	0.15
	L-100	0.0186	7.83	0.14
8.0	L-434	0.0210	8.85	0.16
	L-219	0.0200	8.42	0.15

CUIVRE: VARIATION A PH 6,6 APRES 1 SEMAINE

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRES	VITESSE
2.0	L-322	0.0107	4.51	0.32
	L-200	0.0102	4.30	0.31
2.0	L- 98	0.0057	2.40	0.17
	L-116	0.0049	2.06	0.15
3.0	L-155	0.0076	3.20	0.15
	L-365	0.0071	2.99	0.14
3.0	L- 89	0.0076	3.20	0.15
	L-123	0.0121	5.10	0.24
4.0	L-278	0.0120	5.05	0.18
	L-478	0.0122	5.14	0.18
4.0	L-406	0.0104	4.38	0.16
	L- 24	0.0092	3.88	0.14
6.0	L-289	0.0106	4.47	0.11
	L-171	0.0098	4.13	0.10
6.0	L- 14	0.0134	5.64	0.13
	L-349	0.0178	7.50	0.18
8.0	L-246	0.0123	5.18	0.09
	L- 83	0.0173	7.29	0.13
8.0	L-375	0.0213	8.97	0.16
	L- 48	0.0235	9.90	0.18

CUIVRE: VARIATION A PH 8,5 APRES 1 SEMAINE

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
2.0	L-500	0.0097	4.09	0.29
	L-362	0.0095	4.00	0.29
2.0	L-459	0.0064	2.70	0.19
	L-104	0.0055	2.32	0.17
3.0	L-475	0.0051	2.15	0.10
	L-299	0.0100	4.21	0.20
3.0	L- 35	0.0104	4.38	0.21
	L-189	0.0112	4.72	0.22
4.0	L-494	0.0076	3.20	0.11
	L-332	0.0116	4.89	0.17
4.0	L-275	0.0084	3.54	0.13
	L- 30	0.0085	3.58	0.13
6.0	L-191	0.0099	4.17	0.10
	L-470	0.0100	4.21	0.10
6.0	L-339	0.0101	4.25	0.10
	L-463	0.0137	5.77	0.14
8.0	L- 23	0.0170	7.16	0.13
	L-284	0.0127	5.35	0.10
8.0	L- 6	0.0170	7.16	0.13
	L- 85	0.0146	6.15	0.11

CUIVRE: VARIATION A PH 5,5 APRES 3 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
4.0	L- 32	0.0148	6.23	0.22
	L-202	0.0116	4.89	0.17
4.0	L-414	0.0166	6.99	0.25
	L- 27	0.0142	5.98	0.21
6.0	L-129	0.0175	7.37	0.18
	L-316	0.0202	8.51	0.20
6.0	L- 15	0.0254	10.70	0.25
	L-476	0.0237	9.98	0.24
8.0	L-161	0.0222	9.35	0.17
	L-127	0.0230	9.69	0.17
8.0	L-236	0.0342	14.41	0.26
	L-356	0.0306	12.89	0.23

CUIVRE: VARIATION A PH 6,6 APRES 3 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
-------	---------	-----------	------------	---------

4.0	L-469	0.0123	5.18	0.19
	L-208	0.0120	5.05	0.18
4.0	L-225	0.0211	8.89	0.32
	L-410	0.0217	9.14	0.33
6.0	L-331	0.0193	8.13	0.19
	L-465	0.0173	7.29	0.17
6.0	L-357	0.0218	9.18	0.22
	L-421	0.0272	11.46	0.27
8.0	L-177	0.0198	8.34	0.15
	L- 46	0.0202	8.51	0.15
8.0	L-327	0.0317	13.35	0.24
	L-260	0.0336	14.15	0.25

CUIVRE: VARIATION A PH 8,5 APRES 3 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
-------	---------	-----------	------------	---------

4.0	L-444	0.0139	5.86	0.21
	L-198	0.0098	4.13	0.15
4.0	L-148	0.0188	7.92	0.28
	L-201	0.0142	5.98	0.21
6.0	L- 81	0.0162	6.82	0.16
	L-383	0.0214	9.01	0.21
6.0	L- 94	0.0231	9.73	0.23
	L- 75	0.0224	9.44	0.22
8.0	L- 8	0.0210	8.85	0.16
	L-311	0.0300	12.64	0.23
8.0	L-187	0.0236	9.94	0.18
	L- 20	0.0248	10.45	0.19

CUIVRE: VARIATION A PH 5,5 APRES 5 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
-------	---------	-----------	------------	---------

6.0	L-254	0.0168	7.08	0.17
	L-336	0.0133	5.60	0.13
6.0	L-442	0.0165	6.95	0.17
	L-395	0.0207	8.72	0.21
7.0	L-241	0.0174	7.33	0.15
	L- 28	0.0150	6.32	0.13
7.0	L-193	0.0249	10.49	0.21
	L-167	0.0255	10.74	0.22
8.0	L-108	0.0208	8.76	0.16
	L-138	0.0166	6.99	0.12
8.0	L- 61	0.0210	8.85	0.16
	L-263	0.0203	8.55	0.15

CUIVRE: VARIATION A PH 6,6 APRES 5 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
6.0	L-258	0.0128	5.39	0.13
	L-312	0.0121	5.10	0.12
6.0	L-273	0.0239	10.07	0.24
	L-120	0.0199	8.38	0.20
7.0	L-481	0.0141	5.94	0.12
	L-124	0.0225	9.48	0.19
7.0	L-348	0.0218	9.18	0.19
	L-326	0.0250	10.53	0.21
8.0	L-446	0.0151	6.36	0.11
	L-252	0.0226	9.52	0.17
8.0	L-370	0.0269	11.33	0.20
	L-492	0.0290	12.22	0.22

CUIVRE: VARIATION A PH 8,5 APRES 5 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
6.0	L-485	0.0112	4.72	0.11
	L-186	0.0120	5.05	0.12
6.0	L-151	0.0151	6.36	0.15
	L- 21	0.0189	7.96	0.19
7.0	L-170	0.0182	7.67	0.16
	L-466	0.0201	8.47	0.17
7.0	L-265	0.0316	13.31	0.27
	L-479	0.0216	9.10	0.19
8.0	L-192	0.0181	7.62	0.14
	L-379	0.0213	8.97	0.16
8.0	L-353	0.0223	9.39	0.17
	L-235	0.0192	8.09	0.14

CUIVRE: VARIATION A PH 5,5 APRES 6 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
7.0	L-288	0.0175	7.37	0.15
	L-274	0.0138	5.81	0.12
7.0	L- 66	0.0210	8.85	0.18
	L- 19	0.0200	8.42	0.17
8.0	L-122	0.0212	8.93	0.16
	L-135	0.0164	6.91	0.12
8.0	L-172	0.0178	7.50	0.13
	L-218	0.0193	8.13	0.15

CUIVRE: VARIATION A PH 6,6 APRES 6 SEMIANES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
7.0	L-455	0.0148	6.23	0.13
	L-165	0.0177	7.46	0.15
7.0	L-493	0.0235	9.90	0.20
	L-264	0.0229	9.65	0.20
8.0	L-121	0.0152	6.40	0.11
	L- 63	0.0149	6.28	0.11
8.0	L-290	0.0205	8.64	0.15
	L-381	0.0248	10.45	0.19

CUIVRE: VARIATION A PH 8,5 APRES 6 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
7.0	L-408	0.0123	5.18	0.11
	L-402	0.0169	7.12	0.15
7.0	L- 76	0.0196	8.26	0.17
	L-227	0.0151	6.36	0.13
8.0	L-229	0.0205	8.64	0.15
	L-427	0.0196	8.26	0.15
8.0	L- 16	0.0173	7.29	0.13
	L-352	0.0185	7.79	0.14

FONTE DUCTILE SANS VARIATION DE PH

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
0.5	L-205	0.0309	13.26	3.79
	L- 98	0.0314	13.47	3.85
0.5	L-222	0.0327	14.03	4.01
	L-309	0.0354	15.19	4.34
1.0	L- 96	0.0358	15.36	2.19
	L-490	0.0310	13.30	1.90
1.0	L- 73	0.0360	15.44	2.21
	L-322	0.0312	13.38	1.91
1.5	L- 43	0.0693	29.73	2.83
	L-136	0.0716	30.72	2.93
1.5	L-296	0.0715	30.67	2.92
	L-330	0.0629	26.98	2.57
2.0	L-226	0.0814	34.92	2.49
	L-218	0.0818	35.09	2.51
2.0	L- 71	0.0764	32.78	2.34
	L- 47	0.0756	32.43	2.32
3.0	L- 7	0.0800	34.32	1.63
	L-200	0.0851	36.51	1.74
3.0	L- 21	0.0666	28.57	1.36
	L-253	0.0738	31.66	1.51
4.0	L-290	0.1032	44.27	1.58
	L-453	0.1039	44.57	1.59
4.0	L-114	0.0969	41.57	1.48
	L-125	0.1032	44.27	1.58
6.0	L-276	0.1463	62.76	1.49
	L-185	0.1344	57.66	1.37
6.0	L-141	0.1279	54.87	1.31
	L-342	0.1368	58.69	1.40
8.0	L-302	0.0827	35.48	0.63
	L-196	0.1912	82.02	1.46
8.0	L-482	0.2071	88.85	1.59
	L-139	0.1854	79.54	1.42

FONTE DUCTILE NON TROUEE, SANS VARIATION DE PH

136

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	MOYENNE	SUR L'AI	RE MOYENNE	VITESSE
0.5	F- 49	0.0270	0.0289	12.44	13.10	3.74
	F- 16	0.0308		13.75		
0.5	F- 81	0.0257	0.0268	11.58	12.22	3.49
	F- 58	0.0279		12.86		
1.0	F- 11	0.0371	0.0371	17.10	17.10	2.44
1.0	F- 6	0.0376	0.0375	16.71	16.59	2.37
	F- 41	0.0374		16.48		
1.0	F- 93	0.0267	0.0277	12.30	12.68	1.81
	F- 37	0.0286		13.06		
1.5	F- 25	0.0300	0.0284	14.08	13.42	1.28
	F- 26	0.0268		12.76		
2.0	F- 77	0.0448	0.0461	20.00	20.82	1.49
	F- 98	0.0474		21.64		
2.0	F- 59	0.0473	0.0448	21.70	20.64	1.47
	F- 64	0.0423		19.58		
3.0	F- 46	0.0712	0.0712	31.37	31.37	1.49
4.0	F- 63	0.0967	0.0929	45.19	43.39	1.55
	F- 9	0.0890		41.59		
6.0	F- 75	0.1747	0.1747	78.69	78.69	1.41

FONTE DUCTILE: VARIATION A PH 5,5 APRES 1 SEMIANE

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AI	RE VITESSE
2.0	L-169	0.0666	28.57	2.04
	L-406	0.0615	26.38	1.88
2.0	L-430	0.0707	30.33	2.17
	L-390	0.0715	30.67	2.19
3.0	L- 28	0.0782	33.55	1.60
	L-487	0.0733	31.45	1.50
3.0	L-130	0.0940	40.33	1.92
	L-407	0.0821	35.22	1.68
4.0	L- 58	0.0858	36.81	1.31
	L-227	0.0908	38.95	1.39
4.0	L-140	0.1061	45.52	1.63
	L-427	0.1073	46.03	1.64
6.0	L-304	0.1291	55.38	1.32
	L- 65	0.1270	54.48	1.30
6.0	L-180	0.1676	71.90	1.71
	L-268	0.1698	72.84	1.73
8.0	L-123	0.1859	79.75	1.42
	L-192	0.2079	89.19	1.59
8.0	L-237	0.1418	60.83	1.09
	L-188	0.1466	62.89	1.12

FONTE DUCTILE: VARIATION A PH 6,6 APRES 1 SEMAINE

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRe	VITESSE
2.0	L-137	0.0523	22.44	1.60
	L-187	0.0593	25.44	1.82
2.0	L-175	0.0613	26.30	1.88
	L-173	0.0504	21.62	1.54
3.0	L- 54	0.0645	27.67	1.32
	L- 44	0.0585	25.10	1.20
3.0	L-391	0.0646	27.71	1.32
	L-469	0.0648	27.80	1.32
4.0	L-207	0.0824	35.35	1.26
	L-110	0.0850	36.47	1.30
4.0	L-414	0.0789	33.85	1.21
	L-203	0.0806	34.58	1.23
6.0	L-257	0.1227	52.64	1.25
	L-148	0.1331	57.10	1.36
6.0	L-317	0.1188	50.97	1.21
	L-150	0.1168	50.11	1.19
8.0	L-332	0.1614	69.24	1.24
	L-408	0.1560	66.92	1.20
8.0	L-122	0.1543	66.19	1.18
	L-228	0.1443	61.90	1.11

FONTE DUCTILE: VARIATION A PH 8,5 APRES 1 SEMAINE

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRe	VITESSE
2.0	L-431	0.0768	32.95	2.35
	L-116	0.0670	28.74	2.05
2.0	L-138	0.0558	23.94	1.71
	L-129	0.0536	22.99	1.64
3.0	L-189	0.0970	41.61	1.98
	L-292	0.0928	39.81	1.90
3.0	L-423	0.0768	32.95	1.57
	L-393	0.0770	33.03	1.57
4.0	L-361	0.1103	47.32	1.69
	L-221	0.1033	44.32	1.58
4.0	L-370	0.0957	41.06	1.47
	L-333	0.0996	42.73	1.53
6.0	L-126	0.1517	65.08	1.55
	L-300	0.1546	66.32	1.58
6.0	L-366	0.1368	58.69	1.40
	L-314	0.1382	59.29	1.41
8.0	L-245	0.1700	72.93	1.30
	L-413	0.1864	79.97	1.43
8.0	L- 26	0.1810	77.65	1.39
	L-199	0.1779	76.32	1.36

FONTE DUCTILE: VARIATION A PH 5,5 APRES 3 SEMAINES 138

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
4.0	L-313	0.0794	34.06	1.22
	L-347	0.0840	36.04	1.29
4.0	L- 55	0.1085	46.55	1.66
	L-156	0.1126	48.31	1.73
6.0	L-457	0.1260	54.05	1.29
	L-248	0.1336	57.31	1.36
6.0	L-374	0.1844	79.11	1.88
	L-280	0.1889	81.04	1.93
8.0	L- 74	0.2123	91.08	1.63
	L-380	0.1925	82.58	1.47
8.0	L-107	0.2522	108.19	1.93
	L-476	0.2530	108.54	1.94

FONTE DUCTILE: VARIATION A PH 6,6 APRES 3 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
4.0	L-112	0.0873	37.45	1.34
	L-418	0.0868	37.24	1.33
4.0	L-178	0.0895	38.40	1.37
	L-465	0.1004	43.07	1.54
6.0	L-158	0.1338	57.40	1.37
	L-229	0.1401	60.10	1.43
6.0	L-254	0.1550	66.50	1.58
	L-351	0.1353	58.04	1.38
8.0	L-211	0.2051	87.99	1.57
	L-260	0.2104	90.26	1.61
8.0	L-464	0.2088	89.58	1.60
	L-301	0.2252	96.61	1.73

FONTE DUCTILE: VARIATION A PH 8,5 APRES 3 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
4.0	L-210	0.0851	36.51	1.30
	L-305	0.0857	36.77	1.31
4.0	L-233	0.1113	47.75	1.71
	L- 42	0.1118	47.96	1.71
6.0	L-295	0.1399	60.02	1.43
	L-131	0.1594	68.38	1.63
6.0	L-394	0.1581	67.82	1.61
	L-331	0.1507	64.65	1.54
8.0	L- 61	0.2222	95.32	1.70
	L-278	0.2213	94.94	1.70
8.0	L-319	0.2204	94.55	1.69
	L-272	0.2271	97.43	1.74

FONTE DUCTILE: VARIATION A PH 5,5 APRES 5 SEMAINES 139

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
6.0	L-299	0.1129	48.43	1.15
	L-238	0.1037	44.49	1.06
6.0	L-343	0.1480	63.49	1.51
	L-425	0.1495	64.14	1.53
7.0	L-177	0.1338	57.40	1.17
	L-448	0.1374	58.94	1.20
7.0	L-111	0.1798	77.13	1.57
	L- 63	0.1811	77.69	1.59
8.0	L-256	0.1593	68.34	1.22
	L-242	0.1649	70.74	1.26
8.0	L-269	0.2109	90.48	1.62
	L-446	0.2135	91.59	1.64

FONTE DUCTILE: VARIATION A PH 6,6 APRES 5 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
6.0	L- 11	0.1217	52.21	1.24
	L-337	0.1232	52.85	1.26
6.0	L-485	0.1211	51.95	1.24
	L-265	0.1345	57.70	1.37
7.0	L-193	0.1554	66.67	1.36
	L- 57	0.1520	65.21	1.33
7.0	L-298	0.1518	65.12	1.33
	L- 30	0.1554	66.67	1.36
8.0	L-424	0.1655	71.00	1.27
	L-441	0.1700	72.93	1.30
8.0	L-204	0.1724	73.96	1.32
	L-438	0.1840	78.94	1.41

FONTE DUCTILE: VARIATION A PH 8,5 APRES 5 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRE	VITESSE
6.0	L-398	0.1378	59.12	1.41
	L-344	0.1223	52.47	1.25
6.0	L- 18	0.1525	65.42	1.56
	L-383	0.1550	66.50	1.58
7.0	L-165	0.1562	67.01	1.37
	L-303	0.1416	60.75	1.24
7.0	L-308	0.2089	89.62	1.83
	L- 51	0.1643	70.48	1.44
8.0	L-348	0.1831	78.55	1.40
	L-360	0.1860	79.79	1.42
8.0	L-327	0.1767	75.80	1.35
	L-103	0.1895	81.30	1.45

FONTE DUCTILE: VARIATION A PH 5,5 APRES 6 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRe	VITESSE
7.0	L-486	0.1246	53.45	1.09
	L-184	0.1154	49.51	1.01
7.0	L- 68	0.1645	70.57	1.44
	L-421	0.1697	72.80	1.49
8.0	L- 52	0.1597	68.51	1.22
	L-115	0.1388	59.55	1.06
8.0	L-183	0.2004	85.97	1.54
	L-459	0.2057	88.25	1.58

FONTE DUCTILE: VARIATION A PH 6,6 APRES 6 SEMAINES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRe	VITESSE
7.0	L-336	0.1445	61.99	1.27
	L-483	0.1378	59.12	1.21
7.0	L-409	0.1320	56.63	1.16
	L- 12	0.1390	59.63	1.22
8.0	L-395	0.1572	67.44	1.20
	L-168	0.1666	71.47	1.28
8.0	L-384	0.1685	72.29	1.29
	L-334	0.1556	66.75	1.19

FONTE DUCTILE: VARIATION A PH 8,5 APRES 6 SEMIANES

DUREE	NUMEROS	PERTES(G)	SUR L'AIRe	VITÉSSE
7.0	L-451	0.1648	70.70	1.44
	L- 19	0.1526	65.47	1.34
7.0	L-166	0.1473	63.19	1.29
	L-258	0.1779	76.32	1.56
8.0	L-440	0.1746	74.90	1.34
	L- 6	0.1772	76.02	1.36
8.0	L-124	0.2075	89.02	1.59
	L-323	0.1924	82.54	1.47

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00246598 5