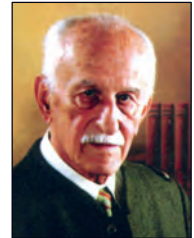


# INTRODUCTION À L'ÉTUDE DE LA CORROSION DES CANALISATIONS D'EAU POTABLE EN FONTE GRISE

Ing. Petre BRADOSCHE  
Toury-Lurcy, Franța



**REZUMAT.** O rețea de distribuție a apei potabile este un sistem complex și eterogen, influențat de numeroși factori fizici, chimici și biologici. Fenomenele de coroziune și deteriorare din interiorul conductei sunt mai ușor de studiat, deoarece depind de calitatea apei și de condițiile de exploatare a rețelei (viteza de circulație a apei, timpul de stagnare în conductă, conținutul de oxigen dizolvat pe care apa îl conține în mod normal). Efectele solului asupra exteriorului canalizării sunt mai dificil de prevăzut, fiind determinate de pilele care se nasc atunci când un metal este îngropat într-un sol umed (ca și când ar fi scufundat într-un electrolit), care suferă frecvente modificări deoarece numeroasele neregularități la interfața metal/sol produc local numeroase și importante diferențe de potențial. Cu toată complexitatea fenomenelor, analiza cazurilor de coroziune a conductelor din fontă neagră face posibilă o estimarea a duratei de viață care îl mai rămâne până să fie scoasă din serviciu și să se prevadă lucrările pentru menținerea în funcțiune, în condiții bune, a rețelei respective.

**Cuvinte cheie:** rețea de distribuție; coroziune, durată de viață.

**RÉSUMÉ.** Un réseau de distribution d'eau est un système complexe et hétérogène sur lequel de nombreux facteurs physiques, chimiques et biologiques influent. A l'intérieur des canalisations, les phénomènes de corrosion et de dégradation sont plus à étudier parce qu'ils dépendent de la qualité de l'eau et des conditions d'exploitation du réseau (vitesse, temps de séjour, teneur en oxygène dissous etc). Les effets du sol sur les canalisations en fonte sont plus difficiles à prévoir étant réglés par l'activité des piles nées quand le métal est enterré (immérgé dans un électrolyte, qui est le sol, qui subit fréquentes modifications) parce que il y a nombreuses hétérogénéités à l'interface métal/sol qui entraînent localement des différences de potentiel. Malgré la complexité des phénomènes, l'analyse des cas de corrosion des canalisations en fonte grise, rend possible l'estimation de leur durée restante de vie et prévoir les travaux à faire pour maintenir en bon état le réseau.

**Mots-clés:** réseau de distribution; durée de vie à la corrosion.

## 1. AVANT-PROPOS

A partir de 1983, par circonstances, j'ai repris mon activité professionnelle en France, d'abord comme ingénieur principal dans une entreprise de production et de distribution d'eau potable (SAUR) jusqu'en 1992, après la retraite, pendant sept ans j'ai continué à travailler comme ingénieur-conseil, ayant mon propre bureau d'études.

Pendant ce laps de temps, j'étais chargé de renouvellement de l'équipement de la société et pendant les dernières années je me suis consacré à l'étude des canalisations en fonte grise, qui étaient parfois en très mauvais état. J'ai acquis les connaissances nécessaires pour faire plusieurs études des réseaux de canalisation des localités de petite et moyenne taille, la plus part en Normandie.

Dans mes études j'ai bénéficié de la collaboration des principaux acteurs dans le domaine : particulièrement de l'Usine Pont-a-Mousson (le principal producteur de canalisations en France) pour l'examen métallographique des échantillons des conduites, l'identification du type de fonte et la mesure de profondeur des corrosions, de l'INRA pour l'analyse des sols, des laboratoires départementaux pour l'analyse des eaux et de EPI-Fraisses pour évaluation de la perte d'épaisseur des conduites, (par ASTM G16 : « Applying statistics to analysis of corrosion data ») et CETIM- Nantes pour mesurer la profondeur des attaques par ultrason.

Plus loin, je présente quelques résultats des ces études faites il y a 15 ans, qui éventuellement peuvent servir au démarrage des recherches similaires en Roumanie.

## 2. LES CANALISATIONS D'EAU POTABLE EN FONTE GRISE

La fonte, cet alliage de fer riche de 2,1 à 6,67 % de carbone (en sous de ce pourcentage ce sont les aciers et les fers industriels), sert depuis 170 ans à la fabrication des conduites d'eau potable. Elle se remarque par une très bonne coulabilité.

D'un point de vue chimique, ces alliages fer-carbone contient une phase eutectique et on distingue les types de fonte par leur pourcentage de carbone (hypo-eutectique 2,11 à 4,3 % de carbone, eutectique 4,3 % et hyper-eutectique 4,3 à 6,67 %). La vitesse de refroidissement a grande importance parce qu'elle est déterminante pour le type de fonte ; quand la vitesse de refroidissement est rapide, le carbone dissout dans le fer n'a pas le temps de migrer loin et forme sur place la cémentite (carbure  $Fe_3C$ ), alors que si la vitesse de refroidissement est lente, le carbone peut se rassembler à une certaine distance pour former du graphite.

Les études que j'ai fait concernaient que les parties des réseaux en fonte grise, à graphite lamellaire (Fig. 1A et 1B) qui sont les plus anciennes et plus abimées ; accidentellement j'ai étudié des échantillons en fonte à graphite sphéroïdal (ductile).

Si le graphite se trouve sous forme de lamelles éparpillées dans la masse, le métal est cassant et présente une faible résistance à la traction ; c'est la fonte primaire, connue sous le nom de fonte grise (en roumain *neagră*).

Si le graphite, suite à de traitements spécifiques, est rendu sous forme plus ou moins sphérique, on obtient la fonte ductile (nodulaire ou sphéroïdale), dont les caractéristiques mécaniques sont supérieures.

La fabrication des tuyaux en fonte a évoluée rapidement en France seulement après la guerre ; avant les canalisation ont été fabriquées pendant des décennies par couler en moule verticale, technique qui s'est améliorée très peu au fil des ans ; après la guerre fabrication est entrée dans une phase rapide de perfectionnement, par centrifugation, d'abord de la fonte lamellaire et à partir de 1963 de la fonte ductile. Plus important est encore l'amélioration de la protection, par zinc à l'extérieur et par cimentation à l'intérieure. La fabrication des tuyaux en fonte grise a cessée en 1969 (Fig. 2).

Les conduites en fonte moulée ont des parois plus épaisses que les conduites centrifugées et présentent des différences d'épaisseur parfois appréciables, (important pour leur durée de vie).

Le réseau constitue pour le distributeur de l'eau la partie la plus délicate de l'ensemble d'installation qu'il exploite, pour deux raisons :

- les canalisation ne sont pas visibles et leur inspection est difficile;

- elles s'étendent sur grandes surfaces et les conditions du sol sont très différentes.

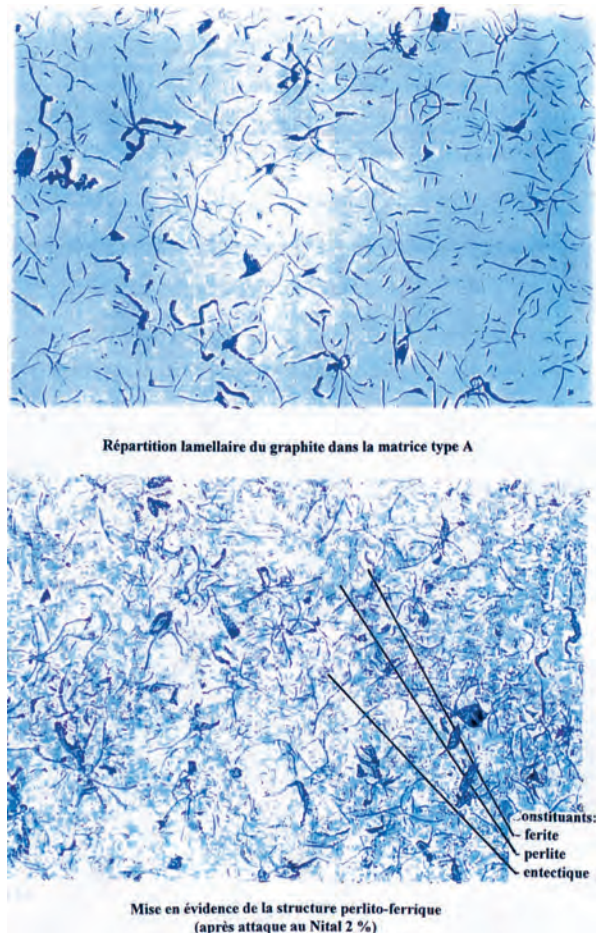


Fig. 1. Répartition du graphite et structure de la fonte grise moulée.

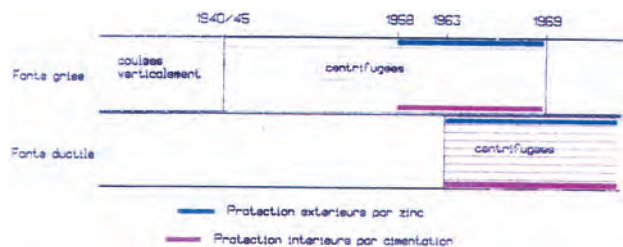


Fig. 2. Historique des canalisation françaises en fonte.

Il s'avère que l'état des canalisation subit des dégradations avec le temps, qui peuvent arriver à la fracture ; leur mauvais état est associé habituellement au vieillissement. Certains symptômes extérieurs indiquent leur dégradation, comme par exemple: l'augmentation des fuites et des défaillances, diminution de la capacité de portage hydraulique et mauvaise qualité de l'eau (Fig. 3).

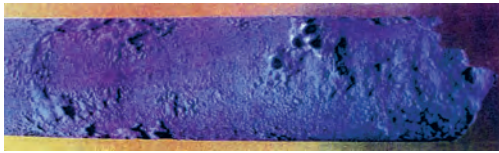


Fig. 3. Corrosion avec fracture de la conduite.

Pour assurer la qualité de l'eau et l'économicité du service, sont nécessaires travaux de maintenance (curage, protection intérieure) et à la limite le remplacement des conduites hors-service. Mais le renouvellement de canalisations peut se faire également pour des raisons indépendantes de leur mauvais état.

En France AGHTM\* a trouvé que 42 % du renouvellement des canalisations est du au mauvais état des canalisations (fréquences des fuites, corrosion, rétrécissement de diamètres, qualité de l'eau, impact des ruptures) et 58 % est fait pour des raisons indépendantes de l'état des conduites (augmentation des diamètres, réfection de voirie, branchements etc).

Une première approche pour estimer l'état d'un réseau est la connaissance de son âge ; ainsi pour la ville de Saumur, le taux du renouvellement et d'entretien, de 70 %, était à peu près celui qui a été estimé selon le nombre de défaillances, corroboré avec l'âge des canalisations.

### 3. LA CORROSION DE LA FONTE GRISE

En fonte le carbone se trouve sous la forme de graphite, mais elle contient aussi des quantités non négligeables de silicium et de quelques fois de phosphore, qui favorise la formation d'eutectique (phosphoreux dans mes études).

Par corrosion la nature cherche de récupérer le fer qui lui a été enlevé par la voie de l'oxydation ; en effet la fonte est séparée en deux (Fig. 4) :

- les éléments qui ne sont altérés par corrosion, le graphite et l'eutectique, qui restent sur place, dénommés résidus ;
- les produits de corrosion, principalement oxydes et hydroxydes de fer, dont une partie est rejetée hors de parois, constituant des excroissances ou bien diffusé dans le milieu extérieur ; une partie reste toutefois sur place enfermée dans les éléments non altérés.

La graphitisation est donc le résidu resté en lieu et en place du métal, constitué d'un enchevêtrement d'écailles de graphite et d'eutectique phosphoreux (si la

fonte contenait du phosphore) et d'oxydes et hydroxydes de fer qui y sont enfermés (Fig. 5).

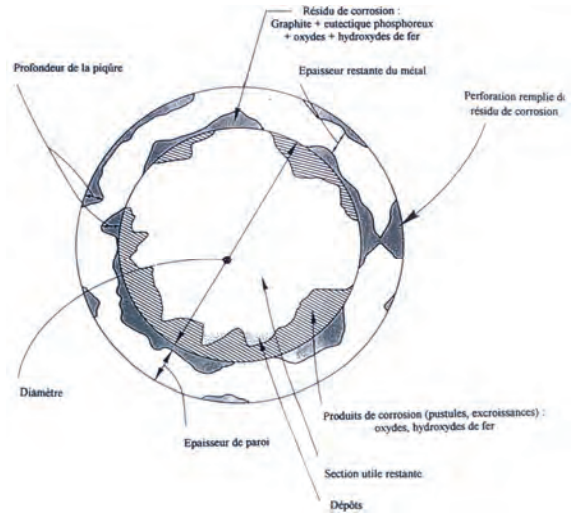


Fig. 4. La corrosion de la fonte grise.

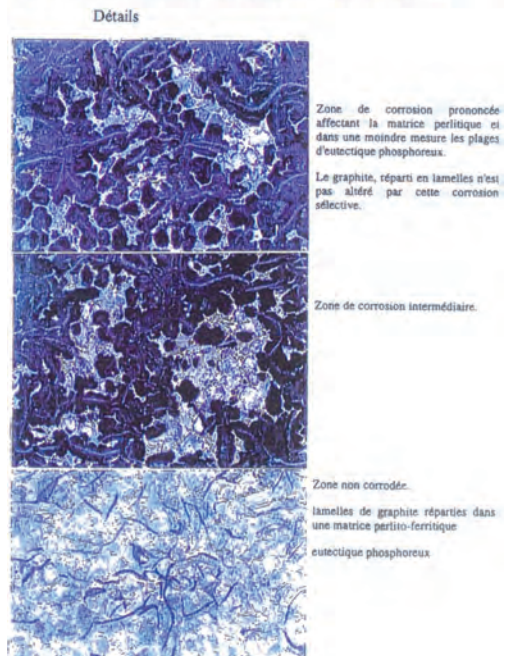
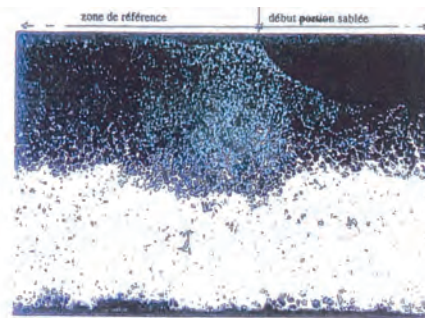


Fig. 5. Avancement de la corrosion dans les parois d'une conduite.

\* AGHTM, actuellement ASTEE (Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement) a pour mission de promouvoir les études de recherche en matière de génie urbain et rural, entre autres la distribution de l'eau, la corrosion et la protection des réseaux d'hydrologiques.Æ

Le résidu de corrosion permet de conserver la forme des canalisations sans changer apparemment les dimensions physique, mais la résistance est fortement affaiblie, le résidu de corrosion assurant un minimum pour maintenir la forme d'origine du tuyau. Il est possible que la corrosion pénètre à travers l'épaisseur totale de la paroi sans avoir de fuite. Le résidu de corrosion, surtout dans le cas des fontes grises phosphoreuses, l'eutectique est assez résistant pour supporter des pressions assez élevées. La capacité du résidu de corrosion de remplir ce rôle structural est une propriété importante des canalisations en fonte grise.

Il y a néanmoins diverses formes de résidus, plus ou moins résistantes, dont quelques uns se détachent laissant apparaître des trous.

La surface intérieure des conduites est généralement et uniformément recouverte de produits de corrosion de faible épaisseur, parsemée par des pustules (excroissances locales là où il y a des attaques plus importante). Ces dépôts réduisent la section utile de la conduite et par la suite à une perte de charge hydraulique.

Les pustules sont formées d'une carapace plus ou moins dure d'oxydes et hydroxydes de fer contenant à l'intérieure des produits plus mous (Fig. 6).

La corrosion peut produire également des excroissances à l'extérieure des conduites, mais elles sont d'habitude plus localisées.

### 3.1. Processus de corrosion

Les métaux sont des éléments instables par rapport au milieu environnant ; ils cherchent à retrouver leur équilibre en revenant à l'état primitif stable qui est celui du minerai. Le temps de revenir est très variable, allant de quelques mois à des millénaires.

La corrosion est le résultat des réactions électrochimiques entre un métal et son milieu, au cours desquelles le métal passe de la forme élémentaire à la forme combinée, avec un élément non métallique plus stable (oxydes, hydroxydes, sulfures etc.) et il perd ses propriétés mécaniques.

Le processus peut être chimique quand se produit dans un milieu non ionisé (la rouille) ou électrochimique quand le métal se trouve en contact d'un électrolyte (solution aqueuse conductrice d'électricité qui peut se dissocier en anions et cations et produit la corrosion).

Selon Pourbaix\*, la corrosion des métaux en milieu humide est essentiellement électrochimique et se traduit toujours par la perte du métal qui passe en différents composants, selon la forme sous laquelle le fer se présente et la composition de l'électrolyte dans lequel le métal est immergé.

Le fer plongé dans une solution acide (très avide d'électrons) va s'oxyder pour passer à l'état d'ion soluble ferrique  $Fe^{3+}$  ou ferreux  $Fe^{2+}$  et peut donner :

- hydroxyde ferreux  $Fe(OH)_2$  qui se dissout
- hydroxyde ferrique  $Fe(OH)_3$  qui se précipite ou
- carbonate ferreux  $Fe(CO)_3$  ou
- sulfure ferreux  $FeS$

Lorsqu'un métal est plongé dans un électrolyte un certain nombre d'atomes métalliques passent dans la solution sous forme d'ions avec des charges positives et le métal prend une charge négative. Les phénomènes qui se produisent à l'interface phase métallique/phase aqueuse se présentent sous la forme : d'oxydation ou de réduction de l'ion ferreux et en même temps se produisent plusieurs autres réactions.

Aux réactions d'oxydation correspond un courant électrique qui sort du métal et entre dans l'électrolyte dans la zone anodique constituant une pile dont le

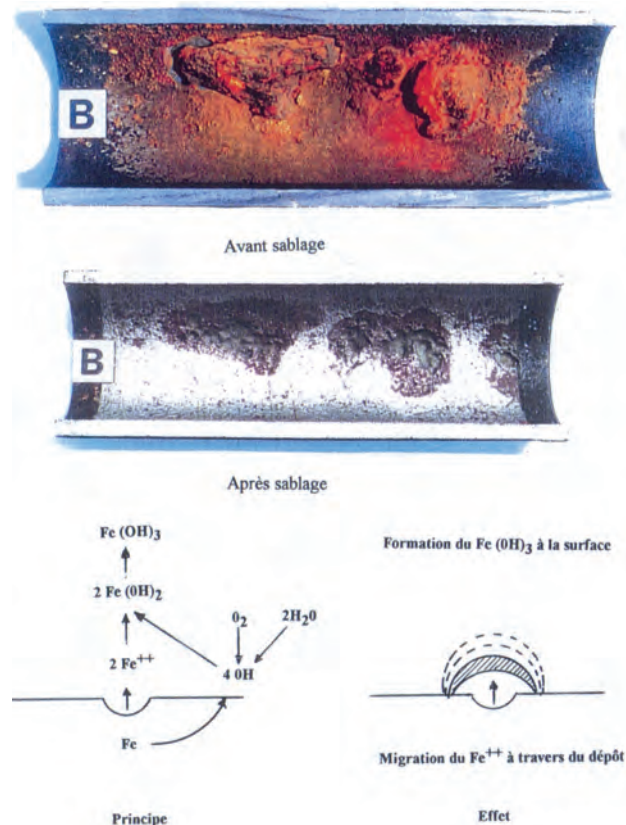


Fig. 6. Corrosion intérieure et la formation des pustules.

\* Pourbaix Marcel électrochimiste belge (1904-1998) a mis au point les diagrammes qui port son nom, appelés diagrammes potentiel-[pH] (1938) indiquent sur un plan E-pH les domaines d'existence ou de prédominance d'un élément.Æ

combustible est l'agent oxydant (OX), le plus souvent  $O_2$  et  $H^+$ .

Nernst\* a fait l'analogie de ce phénomène à la pression osmotique et sur cette base a calculé la valeur du potentiel électrique d'un métal plongé dans une solution d'un de ses sel et a pu l'exprimer ainsi par une formule.

*Le potentiel est d'équilibre* si le métal est immergé dans une solution d'un de ses sels, dans ce cas il est constant et parfaitement définie.

*Le potentiel est de dissolution* dans le cas d'un métal immergé dans une solution aqueuse quelconque. Dans cette situation le potentiel n'a pas une valeur rigoureusement définie et se modifie avec le temps par l'émission d'ions métalliques dans l'électrolyte et aussi à l'interface métal/solution, par de produits de réactions insolubles et des dégagements gazeux.

Toutes les différences intervenues dans le milieu électrolytique environnant (concentration de gaz ou d'aération, variations de l'humidité du sol, changement de la nature du sol etc.) et toutes les imperfections sur la surface de l'électrode (impuretés, irrégularités de fabrication, différences cristallographiques etc.) engendrent sur cette surface, grâce aux potentiels de dissolution, des zones anodiques (négatives) et des zones cathodiques (positives).

Le courant entre dans la solution par la zone anodique et quitte la solution par le site cathodique ; suite à la circulation du courant électrique le métal se dissout et passe en solution à l'anode sous forme de cations produisant la corrosion. La quantité de métal qui passe en solution est proportionnelle à l'intensité du courant.

L'intensité du courant dépend, à son tour, de la différence des potentiels associés à l'anode et à la cathode, ainsi que des résistances qui s'opposent ; du métal des électrodes, du circuit extérieur constitué par l'électrolyte et de la polarisation cathodique des produits de corrosion.

En dehors des courants électrochimiques, peuvent intervenir accidentellement des courants extérieurs d'origine telluriques, dérivés ou induits des circuits aériens etc.

Dans la nature, les solutions aqueuses sont complexes, constituées de plusieurs sels, contenant des ions multiples et diverses zones cathodiques sur même électrode.

Les potentiels de dissolution du fer dans différentes solutions aqueuses varient beaucoup, selon les sels contenus, allant de -0,70 volts pour Na Cl jusqu'à +0,92 volts pour  $MnO_4K$  et le potentiel est donc très variable.

Il est important la dimension de l'anode pour la quantité de métal perdue par la corrosion ; par une anode de petites dimensions, la perte est faible mais très

localisée, la corrosion peut se présenter sous forme de piquûres profondes (Fig. 7).

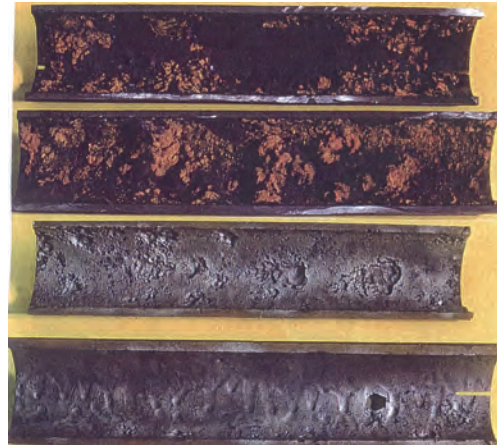


Fig. 7. Corrosion de l'intérieure (attaques mixtes groupées, autant sur la partie supérieure, qu'inférieure)

A la perte de métal correspond une perte de résistance mécanique du tuyau, mais le métal restant perd aussi une partie de sa résistance initiale par la corrosion inter-cristalline.

La fonte grise présente toutefois la qualité de conserver une certaine résistance par les résidus de corrosion, graphite et autres), suffisante pour boucher les éventuels trous, ainsi que les défaillances des canalisations en fonte grise se manifestent parfois par fractures (Fig. 3), particulièrement sous les voies du trafic poids lourds.

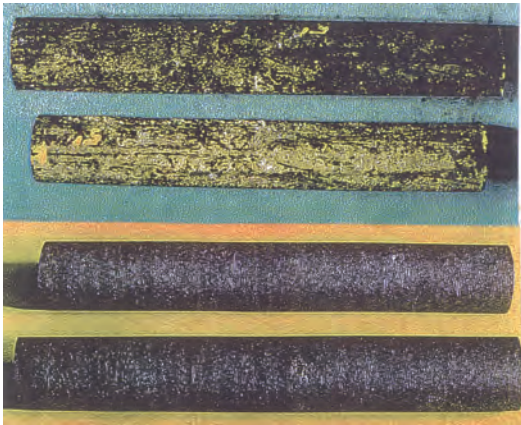
Les attaques de corrosion sont de trois types (piquûres, cratères et mixtes) et se présentent sous quatre modes de répartition (isolées, localisées, groupées et uniformes, Fig. 8):

- corrosion uniforme par plaque (plages) se produit lorsque les surfaces anodiques sont grandes par rapport aux surfaces cathodiques (Fig. 9);
- corrosion localisée par piquûres (cratères, crevasses) lorsque les surfaces anodiques sont petites ; elle est dangereuse, ca leur effet sur des surfaces réduites est particulièrement brutale (Fig. 10);
- corrosion inter-cristalline lorsque les anodes se constituent autour de cristaux d'alliages ou de composés divers inclus à l'intérieur de la masse métallique (Fig. 11).

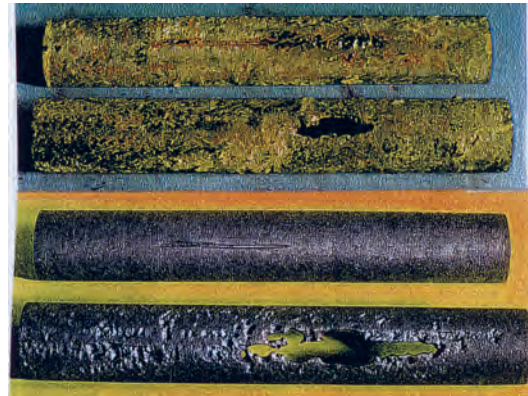
Types d'Attaques			Répartitions des Attaques				Localisation		
Piquûre P	Cratère C	Mixte M	Isolée I	Localisée L	Groupée G	Uniforme U	Généralisation		
Diamètre équivalent ≤ 2 mm							Généralisation supérieure		
> 2 mm							Généralisation inférieure		
							GS	GL	GI

Fig. 8. Types d'attaques, répartition et localisation.

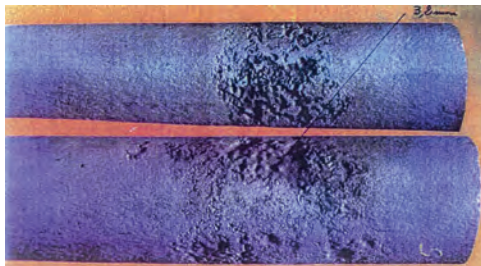
\* Equation de Nernst (physicien et chimiste allemand, 1864-1941, prix Nobel de chimie 1920) en électrochimie il détermine la tension d'équilibre (E) de électrode par rapport au potentiel standard (E0) du couple redox mis en jeu.



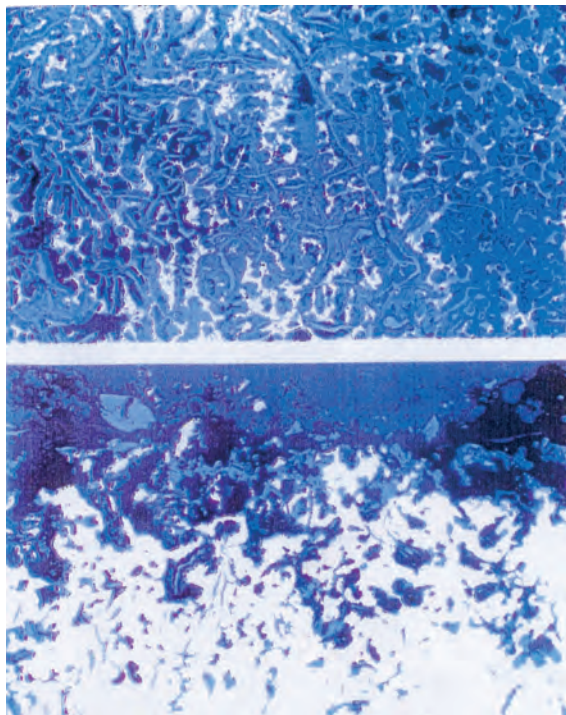
**Fig. 9.** Corrosion extérieure, par attaques mixtes, répartition uniforme ( DN 60, profondeur 1,4 mm, surface corrodée 5%, sol limon, âge 34 ans)



**Fig. 12.** Perforation par corrosion extérieure (DN 60, argile sableuse, 48 ans).



**Fig. 10.** Corrosion extérieure localisée (profondeur max. 3,2 mm, surface corrodée 10%).



**Fig. 11.** Début de corrosion au niveau de intercrystallin.

### 3.2. Corrosion intérieure due à l'eau véhiculé

Le métal plongé dans l'eau est soumis à deux réactions complémentaires : à l'anode l'oxydation qui a pour effet la dissolution de celui-ci et à la cathode la réduction qui dépend des caractéristiques de l'eau, qui détermine la topologie de la corrosion.

Lorsque l'eau contient *oxygène* en dissolution (le cas normal d l'eau potable), à la cathode se produit la réduction de cet *oxygène* avec libération d'ions hydroxyde (OH) ; si la teneur est faible (moins de 4 ml/l, cas des extrémités de réseau où l'eau est stagnante) le milieu est acide et à la cathode il y a réduction d'ions  $H^+$  et production d'hydrogène.

Le couple d'électrodes s'établit également dès lors que deux métaux différents sont en contact, le métal avec le potentiel de dissolution plus faible devient cathode et l'autre anode et se corrodé.

Le même phénomène se produit en présence d'un seul métal, dans les circonstances suivantes :

- si la teneur en *oxygène* n'est pas homogène, les zones les moins *oxygénées* deviennent anodiques et se corrodent, tandis que les parties situées en zone aérée jouent le rôle de cathode et restent intactes. La corrosion se produit à 7-8 mm au dessous de la ligne d'eau; la différence d'*oxygénation* peut se produire soit en cas de présence d'air dans les conduites, soit s'il y a des dépôts) ;

- si la surface du métal est hétérogène à cause de différences de composition, couche d'*oxyde*, défaut de fabrication ou de traitement.

Le processus de corrosion des conduites par l'eau véhiculée est plus ou moins bien connu, mais on connaît mal les facteurs et les circonstances qui exerce

une influence sur la vitesse de corrosion. De tout-à-fait le pH est important :

- si  $pH > 7$  la vitesse d'oxydation de  $Fe^{2+}$  pour qu'il s'oxyde en  $Fe^{3+}$  près de la paroi est il donne de l'hydroxyde ferrique dans l'eau ;

- si pH est inférieur à 9 les particules de  $Fe(OH)_3$  sont attirées par les parois et forment des dépôts, qui favorisent la formation de couples d'aération différentielles et l'apparition des corrosions ponctuelles et de pustules (Fig. 6).

- si pH est supérieur à 9 les particules de  $Fe(OH)_3$  restent en suspensions dans l'eau et donne de l'eau rouge ;

- si pH est compris entre 6 et 7, la vitesse d'oxydation du  $Fe(OH)_3$  n'est pas suffisante pour qu'il s'oxyde près de paroi et le fer se retrouve dans l'eau donnant de l'eau colorée ;

- si le pH est inférieur à 6, la vitesse d'oxydation est très lente et le  $Fe(OH)_3$  ne peut être produit en quantité, que si le temps est très long et la corrosion est dans ce cas d'habitude uniforme.

Les bactéries ne provoquent pas elles mêmes la corrosion, mais en amplifient les effets en développant les phénomènes, soit par les bactéries ferrugineuses, soit par bactéries sulfato-réductrices lorsque la teneur en oxygène est faible.

*Couche protectrice.* Sous certaines conditions, il peut se former à la surface du métal un dépôt ferri-calcique qui isole la conduite de l'eau véhiculée. Cette couche composée principalement de carbonate de calcium, d'hydroxyde ferrique et de carbonate ferreux en proportions variables se produit si :

- les teneurs en calcium et en bicarbonate sont suffisantes et la température est adéquate pour que le carbonate de calcium se précipite ;

- l'eau est légèrement entartrée par rapport à l'équilibre calco-carbonique ;

- la teneur en oxygène dissous est supérieure à 6 gr/l pour que la corrosion soit de type « oxygène ».

Cette protection naturelle peut être entravée par certains facteurs :

- si l'eau est agressive, l'augmentation de pH près de la paroi ne suffit pas pour réaliser localement le dépôt de  $CaCO_3$  ;

- si les teneurs en calcium et/ou en bicarbonates sont faibles, la formation de la couche protectrice est trop lente pour prendre de vitesse la corrosion ;

- si est très entartrée,  $CaCO_3$  risque de précipiter en dehors de dépôt initial de  $Fe(OH)_3$  et de ne pas adhérer à la paroi ;

- si la minéralisation de l'eau est importante, les réactions de corrosion sont accélérées et la formation du

dépôt-protection est perturbée par la précipitation de  $CaCO_3$  en dehors du dépôt initial ;

- lorsque le pH est inférieur à 7, le précipité de  $Fe(OH)_3$  manque sur la paroi et le dépôt ferrite-calcique n'adhère pas correctement ;

- lorsque le pH est inférieur à 6, l'élévation locale de pH est si faible que le dépôt ne peut pas se former.

Il y a également autres entraves à la formation du dépôt ferrite-calcique, dues à l'exploitation du réseau (le temps de séjour prolongé, vitesse d'écoulement de l'eau, particules en suspension dans l'eau, poches d'air).

Les conséquences de la corrosion intérieure peuvent être résumées ainsi :

- ✓ la teneur en Fe excessive (plus de 0,2 mg/l) ;
- ✓ tubercules qui diminuent le diamètre et augmentent la rugosité produisant une perte de charge ;
- ✓ la fragilisation du réseau par des perforations, suivies de fuite de faible débit unitaire, mais nombreuses et difficiles à détecter et réparer.

### 3.3. Corrosion extérieure par le sol

Le sol est un ensemble de trois phases : solide (débris minéraux et organique), liquide (eau) et gazeuse (air).

C'est un milieu poreux, hétérogène, discontinu, souvent colloïdal avec des liaisons chimiques, physico-chimiques et physico-mécaniques spécifiques.

La présence de l'eau contenant des sels dissous permet de considérer le sol comme un électrolyte et on peut lui mesurer la résistivité, l'acidité, le potentiel redox\* etc.

La corrosion dans le sol se passe comme dans tous les cas des métaux plongés dans un électrolyte, par ionisation du métal, c'est-à-dire formation des micro-piles suivant les lois de l'électrochimie.

L'amorce du phénomène est ainsi expliquée, mais l'évolution du processus ultérieure est moins bien connue. Parce que l'électrolyte sol est beaucoup plus hétérogène que l'eau véhiculée à l'intérieure des canalisations et les conditions environnantes plus différentes et par conséquence, l'intensité de la corrosion est plus variable.

Malgré les recherches, dans la période que j'ai fait les études, n'était pas établie une corrélation certaine entre la corrosion des conduites et les caractéristiques physico-chimiques du sol. C'est un procès en continue évolution, parce que au cours de la corrosion les produits ils mêmes sont modifiés au voisinage de l'ouvrage, le milieu de corrosion peut changer.

---

\* le potentiel redox (d'oxydo-réduction) est une grandeur empirique mesurée en volts, qui s'exprime par le rapport à une référence, souvent mesurée par une électrode normale à hydrogène ; dans notre cas à un couple de réactions inverses et simultanées, l'une d'oxydation, l'autre de réduction.

La corrosion extérieure est généralement due aux piles formées par les différences locales de composition et/ou de concentration de l'électrolyte baignant le métal :

- dilution locale suite à des fuites prolongées ou enrichissement localisé ;
- réactions chimiques qui modifient localement la concentration de l'électrolyte (horizons hétérogènes, concentration différente en gaz) ;
- variation d'humidité entre deux points du sol, due à l'évapotranspiration ou par différence des propriétés entre horizons (passage entre sols de nature différente) ;
- différences d'aération (métal/sol humide peu aéré – sol moins humide aéré/métal).

Pour le fer, la partie anode corrodée correspond aux zones humides et la zone cathodique aux endroits plus secs.

La présence d'oxygène dans le sol est très importante : le processus anodique est ralenti par l'accès de l'oxygène qui aboutit à une passivation relative du métal (cas du sable et des sols à faible taux d'humidité). Il produit une corrosion initiale assez rapide, mais les réactions sur la cathode favorisent l'alcalinisation de l'interface, ce qui explique la passivation.

Les produits de corrosion (hydroxydes ferreux et ferriques) s'accumulent au voisinage de métal et surtout en présence d'ions  $\text{Ca}^{++}$  forment une couche protectrice qui freine l'activité anodique ; par contre l'activité anodique est accélérée par l'absence de passivation lorsque l'oxygène ne pénètre pas à l'anode et la passivation se produit qu'en absence des ions de chlorures et sulfates (les sols lourds, argileux, humides).

Donc le rôle de l'oxygène est double :

- ✓ il facilite la corrosion lorsqu'il est susceptible de se réduire sur les cathodes ;
- ✓ il est ralentisseur, lorsqu'il facilite la passivation ou la formation d'un produit protecteur.

L'oxygène peut-être diminué localement soit par des bactéries anaérobies dépolarisantes, soit par hétérogénéité physique de la surface du métal travaillé (fissures etc.).

En dehors des piles électrochimiques, il y a des piles dues aux causes extérieurs (telluriques, courants induits de nature industrielle).

En résumé les facteurs suivants augmentent la corrosivité du sol :

- les teneurs en eau élevées des sols lourds ;
- les sols riches en sulfates et/ou en chlorures ;
- la résistivité, pH acide, potentiel d'oxydation-réduction faible ;
- la présence des bactéries.

L'investigation des sols comporte trois étapes :

- une étude géologique sur cartes afin d'identifier les zones à faible risque (sables) et les zones à risque élevé (argiles, marnes) ;

- renseignements auprès des services publics concernant la pollution de la terre (par effluents divers, dépôt et remblais divers, installations utilisant le courant électrique continu) ;

- prélèvement des échantillons de sol pour déterminer (la nature du sol, la présence de la nappe phréatique, la résistivité, le pH).

De tous ces informations, la mesure de la résistivité est retenue comme le moyen le plus appropriée pour évaluer la corrosivité du sol, parce qu'elle permet d'estimer la concentration de l'électrolyte et l'intensité probable des échanges électrochimiques.

En France, la résistivité des sols varie entre 50 ohm-cm et 300 000 ohm-cm, ainsi :

– marne, argiles plastiques	500 à 2000 ohms-cm
– limons argileux	2000 à 4000
– limons calcaires	3500 à 10 000
– sols sablonneux	5000 à 15 000
– sable sec/graves	20 000 à 200 000

Une résistivité inférieure à 3000 ohms.cm indique des sols corrosifs et entre 3000 et 5000 ohms.cm des sols douteux (exemple de corrosion extérieure, Fig. 12).

### 3.4. L'apparition et le développement de la corrosion

Il est dépendent de plusieurs facteurs, parfois interdépendants, c'est qui rend difficile l'identification du rapport cause/effet et l'évolution des phénomènes.

1) D'abord, c'est la capacité du métal à subsister dans l'état, qui est fonction de son potentiel de dissolution par rapport aux conditions environnementales, particulièrement la surface en termes de netteté et protection.

2) Après sont les conditions de formation des piles électrochimiques sur la pièce métallique, c'est-à-dire les imperfections de la surface métallique et les caractéristiques du liquide dans lequel la pièce est plongée.

Le métal se corrode si le système a une énergie positive (Nernst) ou si la différence de potentiel produite sur la pièce en corrosion est capable de générer un courant électrique suffisamment fort pour vaincre les résistances du circuit. Pour un métal donné avec son potentiel de dissolution la création des micro-piles dépend de conductivité de l'électrolyte (présence de l'oxygène et des sels formant des ions complexes).

3) Pour la corrosion extérieure, la résistivité du sol est mesurée *in situ* et *au laboratoire*; mais il faut prendre en compte que la résistivité des sols est soumise à des variations cycliques au cours de l'année, en fonction de l'humidité cyclique, d'où la nécessité de connaître le régime hydraulique des sols, parce que le changement d'humidité se traduit par des variations de concentration des sels dans l'électrolyte.



La résistivité du circuit peut être modifiée, également par le taux de gaz ; dans un sol saturé la polarisation des électrodes peut se produire si l'oxygène manque, s'il y a des bactéries sulfato-réductrices ou si l'anode développe un produit peu soluble qui se dépose.

Pour ces raisons, il est difficile de s'en tenir à la seule résistivité comme unique critère de la corrosion.

4) La corrosion intérieure est liée à l'équilibre entre la corrosivité de l'eau et la formation des couches protectrices.

Le caractère agressif ou entartrant de l'eau dépend : de pH, de teneur en carbonate (bicarbonate) de Ca et en sels dissous, de bilan CO<sub>2</sub>, de teneur en O<sub>2</sub> en ions métalliques (Fe et Mg), de température.

Si le pH monte près de cathode le bicarbonate, transformé en carbonate se dépose sous forme d'un film isolant;

Si les eaux sont riches en sulfates et pauvres en oxygène à la température favorable au développement des bactéries sulfato-réductrices, avec une vive activité de corrosion (pustules constituées de sulfure de fer).

Anhydride carbonique (CO<sub>2</sub>), dissout les produits de corrosion renouvelant la surface attaquée et l'oxygène active la corrosion en dépolarisant les cathodes ou, par contre, la ralentir en fixant à la surface du métal des produits stable (hydroxyde de Ca et de Mg).

5) La configuration du réseau et la circulation de l'eau, présentent importance pour deux raisons : un réseau ramifié ou maillé réduit les zones d'eau stagnante où se développent des processus anaérobies qui facilitent la corrosion, les conduites surdimensionnées risquent des dépôts à cause de la faible vitesse de circulation de l'eau avec ses conséquences négatives.

#### 4. ESTIMATION DE LA DURÉE DE VIE D'UNE CANALISATION D'EAU POTABLE

La mesure de perte de métal exprime de manière directe le degré de corrosion et permet d'estimer la durée de vie restante.

Elle peut se faire de deux façons :

– soit par pesée les échantillons, mais il y a des difficultés à le débarrasser parfaitement des produits et des résidus de corrosion, ainsi que de savoir le poids de l'échantillon à l'origine,

– soit d'une façon moins précise, mais facilement réalisable, par le calcul du volume manquant par rapport à la géométrie d'origine de l'échantillon (le calcul est basé sur la profondeur moyenne des piqures).

Une estimation approximative peut se faire à partir de l'âge du réseau, en corrélation avec les caractéristiques de l'eau et des sols, possédant une base d'informations assez vaste.

L'examen d'un réseau commence par la connaissance des pertes d'eau dans son ensemble (par différence entre la quantité pompée et l'eau consommée).

Pour localiser les pertes et identifier les zones plus abimées, le réseau est divisé en secteurs isolé et équipés des compteurs locaux qui enregistrent l'eau passée pendant les heures de faible consommation (pendant la nuit entre 2 et 5 heures). Sur cette base, dans les secteurs en mauvaise état, sont établis le nombre et le lieu des échantillons, qui seront prélevés et analysés.

Les échantillons prélevés sont envoyés au laboratoire (avec le maximum de terre collée) et soumises, après le sablage, à une série d'examen: la résistance résiduelle, la métallographie, l'analyse chimique des composants des produits de corrosion, un examen visuel et optique (pour apprécier l'importance, la fréquence et la nature des attaques).

Avec un catalogue de référence des pustules on fait le classement des attaques par des tuyaux afin de les intégrer dans un système unitaire.

Les travaux, soit pour la remise en état de la canalisation (par curage ou protection-lining), soit le renouvellement, sont décidés après l'estimation de sa durée de vie restante.

Celle-ci qui est calculée par la perte du métal et pour cette raison est importante l'identification le type des attaques, leur localisation, la fréquence et mesurer la profondeur.

L'estimation de la durée de vie nécessite également l'identification des facteurs qui influencent la vitesse de corrosion (extérieure et intérieure), pour quantifier leur poids on emploie une base de coefficients empirique.

#### BIBLIOGRAPHIE & RÉFÉRENCES\*

- [1] \*\*\* Société des fonderies de Pont-A-Mousson, Ed.SODIPA, 1967, 831 p.
- [2] **Gras R.** *Physique du sol pur l'aménagement*, Ed.Masson, 1988, 587 p.
- [3] **Doré F.** *Guides géologiques régionaux Normandie - Maine*, Ed. Masson, 1987,216 p.
- [4] **Boudouresque P.** *Dégradation et corrosion des réseaux de distribution d'eau*, AGMT, nr.10/1987,11p.
- [5] *NFA-50-250 Corrosion par le sol. Evaluation de la corrosivité*, mars 1990
- [6] **Langenfeld M.& Nouail G.** *Méthodes d'examen et d'évaluation des échantillons de tuyaux en fonte, dans le cadre du diagnostic de réseaux en service*, P-A-M, 1998, 15 p.
- [7] *P-A-M Historique des tuyaux fonte fabriqués par Pont-A-Mousson*, juillet,1993,165 p.
- [8] *EPI Evaluation de la perte d'épaisseur des conduites de distribution d'eau potable en fonte lamellaire*,1997/98, 57 p.
- [9] *CETIM Contrôle par Ultra-sons pour mesures d'épaisseur et recherche des piqures*
- [10] **Bradosche P.** *Etudes diagnostic des réseaux des localités : Fleury-les-Aubrais, Saumur, Condé/Noireau, Portbail, Oustréham, Morteaux-Coulboeuf*

\*Documents non publiés