



DIRECTION DE LA RECHERCHE
Département Géomatériaux et Géo-Procédés

document public

**Etude de la corrosion par coupons
en acier au carbone placés en zones
monophasique et diphasique
sur la centrale géothermique
de Chelles (Seine et Marne)**

**projet "Contrôle de la corrosion et des
dépôts dans les systèmes géothermaux
de haute et de basse enthalpie**

sous la direction de I. Ignatiadis

**A. Abou Akar
M. Lafforgue**

**travaux cofinancés par :
la CCE DG XII et le BRGM
(contrat n° JOU2-CT-92-0108) et l'Ademe**

**février 1994
R 37832**

Mots clefs : Corrosion, dépôt, coupon de corrosion, fer, sulfures, bactéries sulfato-réductrices, puits de production, puits d'injection, T.A.I.[®], monophasique, diphasique, .

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

ABOU AKAR A. et LAFFORGUE M. (1994) - Etude de la corrosion par coupons en acier au carbone placés en zones monophasique et diphasique sur la centrale géothermique de Chelles (Seine et Marne). Rapport BRGM n° R 37832 GGP DR 94, 91 p., 0 fig., 8 tabl., 15 pl., 6 ann.

© BRGM, 1994, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

AVANT PROPOS

Cette étude a bénéficié du soutien financier de la Commission des Communautés Européennes (CCE, DG XII), programme de recherche et développement sur l'énergie non nucléaire (contrat n° JOU2-CT-92-0108) et de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (Ademe).

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à Monsieur Ch. COVA, Député-Maire et Président du Syndicat Mixte pour la Géothermie de Chelles ainsi qu'à Monsieur GYURISS, directeur de la centrale géothermique qui ont bien voulu mettre à notre disposition les installations de la centrale pour y mener nos expériences.

Nous remercions également le cabinet Géo-Production Consultants pour avoir mis à notre disposition le T.A.I.® et les porte-coupons et mené à bien les manoeuvres sur site.

Enfin nous remercions tous nos collègues du B.R.G.M. qui ont contribué à la réalisation de cette étude.



RESUME

Cette étude a été menée sur le puits de production artésien de la centrale géothermique de Chelles (Seine et Marne), fonctionnant sans traitement par additif injecté au fond du puits de production. La corrosion y était étudiée par le cabinet G.P.C. depuis 1987 par coupons de corrosion placés en tête des deux puits (production et injection).

En février 1992, nous nous sommes associés au cabinet G.P.C. pour étudier la corrosion en tête des deux puits par coupons de corrosion et par dosage du fer. Les résultats montrent qu'en tête du puits d'injection, la vitesse de corrosion calculée par perte de poids des coupons est plus importante que celle calculée au puits de production. Elle est due à la présence des bactéries sulfato-réductrices qui transforment les sulfates en sulfures et qui sont connues pour être plus actives dans les conditions régnant dans le puits d'injection (température plus faible, départ des gaz CO₂ et H₂S). En plus, cette corrosion dans le puits d'injection semble avoir été favorisée par des interventions effectuées au niveau des canalisations de surface.

Pour l'étude de la corrosion en zones monophasique et diphasique, un tube auxiliaire d'injection d'additif (T.A.I.®) a été descendu, en avril 1992, dans le puits de production jusqu'à 150 mètres de profondeur. Des dispositifs porte-coupons ont permis de placer des coupons de corrosion à trois profondeurs différentes : 150 m (zone monophasique), 60 m (point de bulle) et 4 m (zone diphasique). Les vitesses de corrosion, mesurées par la méthode de perte de poids des coupons exposés au fluide, montrent une légère augmentation de cette vitesse avec le dégazage du fluide. Ces résultats ont été confirmés par dosage du fer en tête du puits de production et en tête du T.A.I.® L'examen des sections polies des coupons au microscope métallographique montre que les produits de corrosion sont constitués de mackinawite, d'oxydes et d'oxy-hydroxydes de fer. Ces produits ont la forme initiale du coupon et l'on observe sur leur surface une ex-croissance de sulfures de fer (pyrrhotite majoritaire) parfois associés à des carbonates ou dilués dans une matrice de silice. Cette métallographie n'a pu mettre en évidence une corrélation entre ces dépôts d'une part (nature et proportion) et le passage de la zone monophasique à la zone diphasique d'autre part.

La présente étude a été menée en absence d'additif de traitement. Après la réhabilitation du puits qui a eu lieu en août-septembre 1993, l'étude sera poursuivie en présence d'inhibiteur avec comme objectif l'étude de l'effet de l'additif sur l'évolution des phénomènes de corrosion et de dépôts.



TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION	9
1. GEOCHIMIE DES EAUX DU DOGGER ALIMENTANT LA CENTRALE DE CHELLES	11
2. PROCEDURE DE PREPARATION DES COUPONS DE CORROSION	13
3. ETUDE DE LA CORROSION DES COUPONS PLACES EN SURFACE	15
3.1. Description des porte-coupons	15
3.2. Exploitation des résultats	15
3.3. Discussion	17
4. ETUDE DE LA CORROSION DES COUPONS PLACES DANS LE PUIT DE PRODUCTION	19
4.1. Expérimentation sur site	19
4.2. Exploitation des résultats	20
4.2.1. Calcul des vitesses de corrosion	20
4.2.2. Observation des dépôts formés sur les coupons	23
4.3. Discussion	25
CONCLUSION	29
BIBLIOGRAPHIE.....	31
Liste des abreviations.....	35
Liste des tableaux	37
Annexe 1 : Analyses chimique et isotopique du fluide alimentant la centrale.....	39
Annexe 2 : Description des porte-coupons en surface	47
Annexe 3 : Description des porte-coupons immergés dans le puits de production	51
Annexe 4 : Résultats des mesures de vitesse de corrosion en surface Photos des coupons corrodés Teneurs en fer dans le fluide géothermal	57
Annexe 5 : Résultats des mesures de vitesse de corrosion dans le puits de production Photos des coupons corrodés.....	67
Annexe 6 : Examen des sections polies au microscope métallographique.....	77

INTRODUCTION

Dans la plupart des exploitations en basse enthalpie de l'aquifère du Dogger du Bassin de Paris, la production d'eau géothermale s'effectue grâce à l'utilisation d'une pompe immergée. Cette pompe doit :

- assurer en tête du puits une pression supérieure à celle du point de bulle afin d'éviter le dégazage du fluide,
- supprimer les phénomènes de cavitation dans les pompes en surface,
- réduire les risques de précipitation.

Les exploitations, qui fonctionnent par artésianisme, subissent le dégazage du fluide, en particulier lors de son exploitation à fort débit. Ce dégazage n'est pas sans effet sur les phénomènes de corrosion et de dépôt qui ont lieu sur les parois du tubage. Ainsi, nous nous sommes proposés d'étudier la corrosion en zones monophasique et diphasique selon deux approches : l'une bibliographique, l'autre expérimentale. L'étude bibliographique a déjà fait l'objet d'un premier rapport (Boisdet A. *et al.*, 1992).

Cette étude expérimentale présente un triple intérêt ; elle permet :

- de contribuer à l'amélioration des connaissances sur la corrosion en milieu diphasique : la majorité des travaux de recherche en corrosion étant consacrée soit à la phase aqueuse, soit à la phase gazeuse sèche, mais très peu de travaux traitent de la corrosion en milieu diphasique.
- pour les exploitants : de bien situer la corrosion en zone diphasique par rapport à la corrosion en phase aqueuse et de prendre les mesures nécessaires pour y remédier : augmentation de la pression, ajout d'une pompe, traitement par inhibiteur de corrosion.
- pour le B.R.G.M. : d'acquérir des connaissances en matière de vitesse de corrosion et nature des dépôts formés pour les intégrer dans le code de calcul MODEP actuellement en cours de développement (Boisdet A. *et al.*, 1992 ; Abou Akar A. et Ignatiadis I., 1994).

Quatre méthodes permettant d'approcher la vitesse réelle de corrosion des canalisations et des tubages des centrales géothermiques sont actuellement utilisées (Ignatiadis *et al.*, 1993 et 1994). Ces différentes méthodes (la diagraphie -diamètreur et outil ultrasonique-, les méthodes électrochimiques -mesure de la résistance de polarisation-, le dosage du fer total et du fer dissous en tête du puits, et les coupons de corrosion immergés dans le fluide) ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients, mais aucune d'entre elles ne permet de connaître avec exactitude l'évolution de l'état d'un tubage donné à la suite de sa dégradation par corrosion. Le choix d'une ou de plusieurs méthodes est basé sur le critère classique : coût, délai, faisabilité. La confrontation des résultats permet une synthèse des différentes vitesses de corrosion estimées.

L'usage des diamètreurs (la diagraphie) a l'avantage d'estimer approximativement la vitesse de corrosion (globale cependant, c'est à dire depuis la mise en service de l'installation) en tout point du tubage, ainsi que l'épaisseur du dépôt formé. Cette technique a l'inconvénient

d'être très coûteuse et nécessite en général l'arrêt du puits, donc celle de l'exploitation. Elle est effectuée lors de l'opération de réhabilitation des puits : curage et mise en place d'un tube d'injection d'additifs en fond de puits.

Les méthodes électrochimiques (mesure de la résistance de polarisation, impédancemétrie) permettent d'estimer la vitesse de corrosion en temps réel en un point donné de la canalisation. Ces méthodes ont par contre l'inconvénient de nécessiter un matériel sophistiqué, coûteux et fragile, et ne peuvent être utilisées qu'en surface.

Le dosage du fer total et du fer dissous en tête de puits a l'avantage d'être rapide et peu coûteux, par contre il a l'inconvénient de ne donner qu'une indication grossière sur la corrosion dans le puits, puisqu'il ne tient pas compte du fer déposé sur les parois sous formes d'oxyde, d'oxyhydroxyde, de sulfure et de carbonate, ni du fer contenu dans le fluide issu du réservoir.

Enfin, la dernière méthode consiste à placer des coupons de corrosion à l'intérieur des veines fluides. Les coupons sont fabriqués de préférence dans la même matière que celle de la canalisation. Le retrait périodique de ces coupons permet, grâce à l'évaluation de leur perte de poids, d'estimer une vitesse de corrosion moyenne de la canalisation durant cette période. Les dépôts peuvent être examinés, soit par Diffractométrie des rayons X, soit par observation des sections polies au microscope métallographique ou électronique à balayage. Ces dépôts sont en outre intacts, contrairement à ceux récupérés à l'issue du curage d'un puits. Cette technique est relativement peu coûteuse, elle peut être appliquée en tout point d'une canalisation et même dans le puits par utilisation d'un dispositif porte-coupons.

C'est cette dernière méthode qui a été choisie pour l'étude de la corrosion dans le puits de production de Chelles. Les coupons sont fixés à un tube auxiliaire d'injection (T.A.I.®) par l'intermédiaire d'un dispositif porte-coupons initialement mis au point par Géo-production Consultants (G.P.C.), puis amélioré en collaboration étroite avec notre équipe.

1. GEOCHIMIE DES EAUX DU DOGGER ALIMENTANT LA CENTRALE DE CHELLES

La centrale géothermique de Chelles a été mise en service en décembre 1986. Elle exploite une eau géothermale de minéralisation moyenne (environ 21 g/l). A titre comparatif, la minéralisation des eaux de l'aquifère du Dogger du Bassin de Paris évolue de 5,8 g/l pour l'eau géothermale alimentant la centrale de Fontainebleau, jusqu'à 35 g/l pour celle alimentant la centrale de Meaux-Beauval II. En mars 1987, les teneurs de l'eau géothermale de Chelles en sulfures et en mercaptans (Rojas J. *et al.*, 1989) étaient respectivement de 1,2 mg/l et de 0,7 mg/l, elles sont aujourd'hui de l'ordre de 9 mg/l pour les sulfures (13 mg/l à débit d'été) et de 1 mg/l pour les mercaptans. Nos différentes interventions sur site menées depuis février 1992 pour le remplacement des coupons de corrosion ont été également l'occasion pour effectuer des mesures et des analyses sur place (T, pH, E_h, conductivité, GLR, alcalinité totale, sulfures et mercaptans) et des prélèvements pour les analyses chimiques et isotopiques au laboratoire. Les conditions d'exploitation de la centrale les jours d'intervention ainsi que les résultats des analyses sont reportées en annexe 1. A titre comparatif, les résultats de la mission d'échantillonnage effectuée par notre équipe en mars 1987 ont été également reportés dans ce même tableau.

L'examen des résultats d'analyse montre une stabilité dans l'ensemble des différents paramètres physico-chimiques. L'augmentation des teneurs en sulfures depuis 1987 est un phénomène observé dans tous les sites sud et est du Dogger du Bassin de Paris, il est la conséquence de l'augmentation de l'activité bactérienne (bactéries sulfato-réductrices) le long des parois des tubages et/ou dans le proche réservoir (Ignatiadis, 1990 ; Ignatiadis *et al.*, 1991 ; Ignatiadis, 1994). La variation de la teneur en sulfures pendant la durée de cette étude (annexe 1) doit être corrélée à la variation du débit entre l'hiver (période d'exploitation normale de la centrale et donc débit maximal) et l'été (période d'exploitation réduite de la centrale et débit cinq fois plus faible).

Le dosage du fer total et du fer dissous était au début effectué en tête du puits de production. Dans la suite, il a été également effectué en tête du T.A.I.[®] et en tête du puits d'injection. Ceci dans un but de corrélérer :

- d'une part, le fer dosé en tête du puits de production et en tête du T.A.I.[®] aux vitesses de corrosion calculées par perte de masse des coupons fixés à ce T.A.I.[®] à trois profondeurs différentes.
- d'autre part, le fer dosé en tête du puits de production et en tête du puits d'injection aux vitesses de corrosion calculées par perte de masse des coupons fixés sur les porte-coupons placés en tête de ces deux puits.

La teneur en fer dans le fluide prélevé en tête de puits de production peut être considérée comme faible pour un puits fonctionnant sans traitement anti-corrosion. A noter les teneurs en fer plus faibles en tête du T.A.I.[®] et plus élevées en tête du puits d'injection. Ces écarts seront commentées dans la partie 4.2.1. "calcul des vitesses de corrosion".

2. PROCEDURE DE PREPARATION DES COUPONS

Les coupons utilisés dans cette étude sont en acier au carbone API K55, le même que celui des tubages des puits des centrales géothermiques. Il est à préciser cependant que cette nuance correspond à des propriétés mécaniques minimales requises plutôt qu'à une composition chimique bien déterminée. L'analyse chimique de ces coupons a abouti à la composition élémentaire suivante (tabl. 1) :

Elément	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
Pourcentage	0.35	1.24	0.34	0.01	0.004	0.085	0.15

Tabl. 1 - Composition chimique de l'acier API K55 utilisé pour la fabrication des coupons.

Les coupons utilisés par le bureau d'études chargé depuis 1987 du suivi de l'installation ont les dimensions suivantes : $L = 40$ mm, $l = 20$ mm et $e = 2$ mm. Deux orifices de 6 mm de diamètre permettent leur fixation avec des vis en téflon sur le porte coupons. L'I.M.R.G. dispose d'une variété de coupons (géosonde, corroprobe, etc...) pour ses différentes études. Les normes citées ci-dessus ont cependant été adoptées pour la réalisation de cette étude. Après son lancement et compte tenu de la modification des porte-coupons fixés sur le T.A.I.® (cf. § 4.1), des coupons sans orifices ont été utilisés.

Du point de vue de leur état de surface les coupons sont différents, ceux du bureau d'études sont cisailés, après réduction de l'épaisseur jusqu'à 2 mm, ils présentent ainsi un état de surface similaire au tubage, les nôtres sont usinés, rectifiés sur les 6 faces et leur préparation se termine par un microbillage qui leur assure un état de surface uniforme et sans défaut. Ils sont ensuite dégraissés et stockés sous vide dans un dessiccateur contenant du silicagel. La corrosion en surface a été étudiée avec les deux variétés de coupons (mais seuls nos résultats seront présentés dans ce rapport) alors que la corrosion dans le puits de production le fut seulement avec nos coupons.

A la veille de leur mise en place sur site, les coupons sont dégraissés une seconde fois au toluène dans un bain à ultra-sons, puis rincés à l'alcool isopropylique, ils sont ensuite séchés, pesés au 0,1 mg près et conservés jusqu'au lendemain à l'abri de l'humidité (flacon contenant du silicagel).



3. ETUDE DE LA CORROSION DES COUPONS PLACES EN SURFACE

3.1. DESCRIPTION DES PORTE-COUPONS

Depuis 1987, la corrosion des canalisations de surface de la centrale géothermique de Chelles est étudiée à la fois en tête des puits de production et d'injection. Un porte-coupons conçu pour recevoir 7 coupons de corrosion est introduit dans l'axe d'une canalisation horizontale aussi bien à l'injection qu'à la production. Le système de fixation des coupons permet l'exposition de leurs deux faces basales à l'eau géothermale. Ce système de fixation ainsi que la mise en place des porte-coupons en tête du puits sont illustrés en annexe 2.

Le bureau d'études G.P.C. assure depuis 1987 le suivi de ces opérations. Les porte-coupons sont retirés tous les trois mois et les coupons sont retirés et remplacés, ils sont ensuite desquamés afin de calculer leur perte de poids, puis leur vitesse de corrosion moyenne.

Depuis février 1992, et parallèlement à l'étude de la corrosion des coupons dans le puits de production (cf. § 4 et annexe 3), nous plaçons en permanence 4 coupons en surface : deux en tête du puits de production (T.P.P.) et deux en tête du puits d'injection (T.P.I.). Les emplacements réservés à nos coupons sont ceux portant les numéros P/4, P/7, I/4 et I/7 (cf. annexe 2).

3.2. EXPLOITATION DES RESULTATS

Dix-huit coupons ont été placés et retirés jusqu'au 10 juin 1993. Un tableau récapitulatif est présenté en annexe 4, il précise pour chacun de ces coupons :

- les dates d'introduction et de sortie.
- la durée d'immersion.
- sa masse initiale et sa masse après desquamation.
- la perte de masse subie et la vitesse de corrosion calculée.
- ses caractéristiques géométriques, communes à tous les autres coupons.
- une ligne commentaire précisant l'état de surface des coupons après desquamation.

Le classement de ces coupons est chronologique par date d'introduction. Leur durée d'immersion est en général de l'ordre de trois mois, mais un maintien de six mois avait été tenté afin de comparer des vitesses de corrosion moyennes (calculées sur trois mois) à des vitesses de corrosion moyennes (calculées sur six mois). Les coupons portant les numéros 1, 2, 5, 6, 9, 13, 14, 17 et 18 sont relatifs au puits d'injection, les autres coupons 3, 4, 7, 8, 10, 11, 12, 15 et 16 sont relatifs au puits de production (annexe 4).

L'examen des vitesses de corrosion montre que la corrosion des coupons est en général deux fois plus importante à l'injection qu'à la production. En exploitation normale, cette vitesse est de l'ordre de 0,12 mm/an dans le puits de production et de l'ordre de 0,22 mm/an dans le puits d'injection.

La corrosion n'est pas toujours uniforme malgré des vitesses de l'ordre de 0,1 mm/an considérées comme acceptables par les exploitants des sites géothermiques. L'examen des coupons révèle souvent la présence d'une corrosion par piqûre ou localisée dont l'importance est reportée sur le tableau figurant en annexe 4 (-, +, ++, +++) sur la ligne commentaire.

En plus de cette corrosion quasiment uniforme, certains cas particuliers de corrosion ont été constatés et méritent d'être examinés plus en détail :

Les coupons 5, 6 et 9 d'une part, 7, 8 et 10 d'autre part sont relatifs à une étude particulière qui avait comme objectif de comparer la vitesse de corrosion moyenne d'un coupon calculée sur une durée de six mois, à celles de deux coupons placés trois mois chacun, le second succédant au premier : 5 en I/4, 6 et 9 en I/7, 7 en P/4, 8 et 10 en P/7. Cependant un percement de la tête du puits de production, survenu durant la seconde période de trois mois, a nécessité l'arrêt de l'exploitation pour son remplacement. Cette perturbation a eu pour conséquence la présence d'un dépôt de boue qui avait la particularité d'être inexistant sur les premiers emplacements (I/1 à I/3, P/1 à P/4) croissant ensuite légèrement à la production (P/5 à P/7) mais d'une façon plus importante à l'injection (I/4 à I/7). Ce dépôt avait entraîné une corrosion importante des coupons en positions finales P/7 et I/7 : 0,35 mm/an pour la position P/7 et une corrosion destructive pour le coupon en position I/7. Ce dernier (n° 9) était également fissuré selon un plan parallèle à sa face basale d'où une impossibilité d'exploitation de sa perte de masse. Il est possible que ces dépôts de boue soient un lieu privilégié pour le développement des bactéries sulfato-réductrices lequel phénomène accentue la corrosion.

Cet incident pourrait être responsable de la légère augmentation de la corrosion du coupon 5 (I/4, 6 mois, 0,24 mm/an) par rapport au coupon 6 (I/7, 3 mois avant l'incident, 0,21 mm/an). A la production, la position P/4 n'ayant pas souffert, le coupon 7 (P/4, 6 mois, 0,05 mm/an) présente une corrosion beaucoup plus faible que le coupon 8 (P/7, 3 mois avant l'incident, 0,08 mm/an) ce qui traduit une diminution de la vitesse de corrosion avec le temps. Après l'incident, la position P/7 contenait un dépôt de boue qui avait entraîné une augmentation importante de la vitesse de corrosion du coupon 10 (0,35 mm/an, cf. annexe 4).

L'étude relative aux coupons 11 à 14 a été perturbée par un remplacement d'un tubage dans la centrale, (en aval de la production mais en amont de l'injection). Pendant cette réparation, le circuit géothermal était détourné, ce dysfonctionnement (arrêt de la circulation du fluide autour des coupons, entrée d'oxygène) pourrait être responsable de la vitesse de corrosion élevée observée à l'injection (0,76 mm/an), alors qu'à la production, la vitesse de corrosion moyenne mesurée était de l'ordre de 0,14 mm/an (valeur habituelle).

La dernière série d'expériences concerne les coupons 15 à 18. Un dépôt fin (ressemblant à la boue) était présent encore cette fois à l'injection (positions I/1 à I/7) alors qu'aucun incident n'avait été signalé durant cette période. Les coupons étaient très détruits cette fois-ci (cf photos 5 et 6 en annexe 4). L'examen des dépôts par Diffractométrie des rayons X (DRX) a

montré qu'ils contenaient plus de 90 % de mackinawite. Du côté de la production, les deux vitesses de corrosion relevées sont de même ordre de grandeur que les vitesses habituelles (0,13 mm/an).

On peut aussi corrélérer ces vitesses de corrosion aux teneurs en fer dosées dans le fluide géothermal prélevé en tête de puits. Ces dosages d'abord limités au puits de production ont été étendus dans la suite au fluide issu du tube auxiliaire d'injection (T.A.I.®) et du puits d'injection. Ces teneurs figurant en annexe 4 montrent une corrosion plus importante à l'injection ce qui est compatible avec les vitesses de corrosion évaluées par perte de poids des coupons.

3.3. DISCUSSION

Cette corrosion plus importante en tête du puits d'injection paraît à priori inhabituelle. En effet, un fluide refroidi et monophasique est habituellement moins corrosif qu'un fluide diphasique (eau+gaz) plus chaud. Pour expliquer ces faits, il faudrait tenir compte de l'activité bactérienne. En effet, les bactéries sulfato-réductrices (BSR), en produisant localement du sulfure d'hydrogène, peuvent jouer un rôle prépondérant dans la corrosion des tubages et sont connues pour être plus actives dans les conditions régnant dans le puits d'injection (température plus faible, départ des gaz toxiques H₂S et CO₂). L'augmentation de l'activité bactérienne après l'échangeur et dans le puits d'injection a ainsi pour conséquence une augmentation locale de la teneur en sulfures donc de l'acidité du fluide et par la suite une augmentation de la corrosion (production de Fe²⁺) lequel phénomène favorise la précipitation des sulfures de fer. Sachant que la mackinawite est le produit initial de la réduction bactérienne des sulfates (Smith *et* Miller, 1975) et qu'elle s'est révélée très majoritaire lors de l'analyse des dépôts, l'hypothèse de l'activité bactérienne paraît la plus vraisemblable.

Meyer *et al.* (1958), ont étudié la corrosion de l'acier au carbone dans les milieux suivants (H₂O + H₂S, H₂O + NaCl + H₂S, H₂O + NaCl + H₂S + CO₂). Les résultats de leur étude se résume comme suit : dans tous les cas, c'est la mackinawite (les auteurs l'appellent kansite) qui se forme en premier. Dans l'eau pure, la mackinawite se transforme en pyrrhotite puis en pyrite ce qui réduit la vitesse de corrosion. En milieu NaCl, la vitesse de corrosion continue à augmenter mais moins fortement qu'en présence de NaCl + CO₂ : En augmentant la solubilité de la mackinawite (augmentation de la force ionique et donc baisse du coefficient d'activité), le NaCl empêche sa transformation en d'autres sulfures plus stables. Ainsi la production de cette mackinawite non protectrice se perpétue et la corrosion continue, mais le rajout du CO₂ réduit la vitesse de corrosion de l'acier. Ces résultats confortent nos hypothèses et il est possible que l'activité bactérienne dans le puits d'injection soit renforcée par le départ d'une partie du CO₂ (suite au dégazage du fluide). Ce départ d'une partie du CO₂ favorise la corrosion dans le puits d'injection alors que sa présence dans le puits de production la ralentit, probablement par formation de la sidérite FeCO₃ considérée comme un dépôt protecteur.

Cette augmentation de la vitesse de corrosion en milieu NaCl peut être aussi expliquée par le fait que les ions Na⁺ et Cl⁻ piégés dans le réseau de la mackinawite augmentent la conductivité électronique de cette mackinawite et par conséquent le gradient de concentration du fer existant entre l'acier et le dépôt. Autrement dit, les ions chlorures en diffusant dans les

pores de la mackinawite depuis la solution jusqu'à l'acier favorisent la migration inverse du fer en jouant le rôle d'un pont. Sachant que la solubilité du FeCl_2 est très élevée (100 g/l), le risque de précipitation de ce sel est très faible. La mackinawite est ainsi un "dépôt insoluble anionique" (Crolet, 1988 et 1990) non protecteur qui le reste en présence de NaCl mais qui a tendance à évoluer vers un dépôt insoluble cationique protecteur (pyrrhotite, pyrite) en absence de NaCl.

Il est intéressant de préciser à ce sujet que des phénomènes similaires à ceux constatés sur le doublet de Chelles ont été constatés sur le doublet de la centrale géothermique de Meaux-Hôpital (Ouzounian *et al.*, 1986). La teneur en fer à la sortie de l'échangeur de chaleur était similaire à celle dosée en tête du puits de production, mais inférieure à celle dosée en tête du puits d'injection. Pour les auteurs, l'activité bactérienne due au refroidissement du fluide était renforcée par la diminution de la vitesse d'écoulement de ce fluide dans l'échangeur et qui a pour effet de placer cette activité bactérienne dans des conditions plus favorables pour la réaction de réduction des sulfates. L'examen des dépôts recueillis dans le puits d'injection a par ailleurs révélé qu'ils étaient riches en mackinawite.

Une autre alternative aux mécanismes proposés ci-dessus consiste à envisager l'effet du départ du sulfure d'hydrogène gazeux sur l'augmentation de l'activité bactérienne dans le puits d'injection. Cette hypothèse est basée sur le fait que le fluide du puits d'injection s'est débarrassé du sulfure d'hydrogène gazeux après son passage dans le dégazeur ce qui a pour effet de relancer l'activité bactérienne. Il faut cependant envisager cette hypothèse avec beaucoup de réserve : en effet, il est difficile de considérer le H_2S gazeux comme bactériostatique à des concentrations de l'ordre de 1 à 5 mg/l pour parler d'une relance de l'activité bactérienne à une concentration légèrement inférieure.

L'effet des principaux paramètres physico-chimiques et des conditions d'exploitation de la centrale sur les mécanismes des réactions de corrosion et de formation des dépôts sont détaillés dans deux études récentes (Amalhay *et al.*, 1994a, 1994b).

En conclusion, cette étude montre que la corrosion en surface est plus importante du côté de l'injection, cette corrosion s'est même accentuée en 1993 comme le montre l'état de surface des coupons. Les déblais remontés lors du curage des deux puits en septembre 1993 ainsi que la descente des outils de diagraphie a confirmé les faits constatés sur les coupons.

Vu le nombre d'emplacements de coupons dont nous disposons (deux dans chaque tête de puits), il n'a pas été possible de réserver certains coupons non desquamés à l'observation des sections polies au microscope métallographique comme ce fut le cas avec les coupons fixés sur le T.A.I.® dans le puits de production.

4. ETUDE DE LA CORROSION DES COUPONS PLACES DANS LE PUIITS DE PRODUCTION

En 1991, nous nous sommes associés à Géo-Production Consultants (GPC), bureau d'études chargé du suivi du doublet géothermique de la commune de Chelles (Seine et Marne), pour étudier la corrosion dans le puits de production, notamment dans la zone supérieure où la pression devient inférieure au point de bulle, entraînant le dégazage du fluide. Cette étude a consisté à équiper ce puits d'un tube auxiliaire d'injection T.A.I.[®] (GPC-SCOFLEX) qui a été descendu jusqu'à 150 mètres de profondeur. Des porte-coupons ont été fixés sur ce tube respectivement à 150 m (zone monophasique), à 60 m (hauteur du point de bulle à débit d'hiver) et à 4 m (zone diphasique) de profondeur. Ces coupons, placés à des profondeurs différentes et subissant donc des pressions et des phases fluides différentes (fluide monophasique ou diphasique) pourraient ainsi mettre en évidence l'effet des variantes de ce système sur la vitesse de corrosion des tubages et sur la nature des dépôts formés.

4.1. EXPERIMENTATION SUR SITE

La première intervention sur site a eu lieu en août 1991. La tête du puits de production fut démontée et remplacée par une autre, munie de deux entrées inclinées, l'une étant équipée d'un sas permettant le passage du T.A.I.[®] (cf photos en annexe 3). Une chute du débit, par rapport à la saison précédente (mais indépendante de cette intervention), a été constatée lors du redémarrage de la centrale en automne et a retardé le lancement du projet.

L'idée de départ consistait à réaliser trois porte-coupons ayant chacun une capacité de six coupons et assurant la continuité du T.A.I.[®] ; c'est à dire permettant le passage du produit de traitement et assurant la continuité électrique des câbles de renforcement et qui sont au nombre de quatre. Ces câbles, outre leurs propriétés mécaniques, peuvent être en effet utilisés comme câbles d'une sonde de pression ou de température. Cette idée n'a pas pu cependant aboutir. Une fixation directe des coupons sur le tube, avec des vis, a été tentée en février 1992 (cf photos en annexe 3), mais cette idée a été aussi abandonnée vu le risque élevé de perdre les coupons lors de la manoeuvre du tube dans le puits. L'idée retenue pour supporter les coupons fut finalement celle d'un système cylindrique coulissant autour du tube. Pour des raisons liées à la géométrie de la tête de puits, il a fallu réduire la taille du support et limiter ainsi le nombre des coupons à trois par support.

Les coupons de corrosion ont été conçus au départ pour une fixation similaire à celle utilisée en surface, d'où la présence de deux orifices de fixation dans un certain nombre d'entre eux (voir tableau en annexe 5). Les coupons fabriqués dans la suite étaient identiques du point de vue matériau et dimension, mais ne comportaient plus d'orifices de fixation.

En avril 1992, le tube auxiliaire d'injection a été descendu dans le puits jusqu'à 150 mètres de profondeur (Rapport GPC, 1992). Des porte-coupons par série de deux et de capacité trois chacun ont été fixés sur ce tube respectivement à 150, à 60 et à 4 mètres de profondeur.

Outre les porte-coupons, des coquilles de protection ont été conçues par l'I.M.R.G. et testées avec succès lors des opérations de remplacement des coupons qui ont eu lieu en juillet puis en octobre 1992. En effet, il fallait protéger à chaque opération de remontée et de redescente du T.A.I.[®] les coupons dont le séjour dans le puits devait être maintenu jusqu'à la prochaine relève (étude s'étendant sur six ou neuf mois). Chaque fois qu'un porte-coupons apparaît hors du sas, les coupons sont récupérés soit entièrement et le problème ne se pose plus, soit partiellement ou pas du tout et le porte-coupons est enveloppé dans une coquille de protection (voir photos correspondantes en annexe 3). Ces coquilles étanches sont ensuite remplies d'eau géothermale. A la redescente du T.A.I.[®], elles sont démontées, les coupons neufs sont posés dans les emplacements libres et l'ensemble est rapidement introduit dans le puits, par le sas.

Six interventions ont eu lieu au total : avril, juillet et octobre 1992, janvier, mars et juin 1993. Cependant, celles de janvier et de juin 1993 ont été consacrées uniquement au retrait de tous les coupons sans les relayer. La première fois dans un but de tester les nouveaux porte-coupons, la seconde pour libérer le puits en vue de sa future réhabilitation prévue pour la période d'août-septembre 1993.

4.2. EXPLOITATION DES RESULTATS

4.2.1. Calcul des vitesses de corrosion

L'examen des coupons à l'issue du premier retrait effectué en juillet 1992, a révélé la présence d'une corrosion cavernueuse sur la plupart d'entre eux. Ce type de corrosion dû au système de fixation sur le porte-coupons rendait impossible toute mesure de vitesse de corrosion. Un autre dispositif porte-coupons a été mis au point en collaboration avec GPC et testé au début de l'année 1993. Les tests ont été concluants et l'étude a pu reprendre en mars 1993. Ce nouveau dispositif en téflon comportait des emplacements plats pour les coupons. Des enduits résistants à l'eau ont été étalés sur les coupons et sur leur support afin d'assurer une meilleure étanchéité contre l'infiltration de l'eau géothermale sous les coupons.

Un tableau récapitulatif des résultats obtenus pour l'ensemble de cette étude figure en annexe 5. Seuls les coupons introduits en mars 1993 ont été testés avec les nouveaux portes-coupons. Pour chacun de ces coupons, le tableau précise :

- les dates d'introduction et de sortie.
- la durée d'immersion.
- sa masse initiale et sa masse après desquamation.
- la perte de masse subie et la vitesse de corrosion calculée.
- ses caractéristiques géométriques.
- une ligne commentaire précisant l'état de surface des coupons après desquamation.

Le classement de ces coupons est chronologique par date d'introduction. Comme pour les coupons de surface, leur durée d'immersion est en général de l'ordre de trois mois, mais des maintiens de six et de neuf mois avaient été tentés afin de comparer des vitesses de corrosion

moyennes calculées sur trois, six et neuf mois et de suivre une éventuelle évolution des produits de corrosion lors de l'observation des sections polies au microscope.

L'examen des surfaces des coupons après desquamation montre la présence systématique, mais d'intensité variable, de piqûres sur la face exposée au fluide. L'on a cependant une absence de corrosion caverneuse de ce côté, ce qui est tout à fait normal du fait de l'exposition continue de cette face au fluide et l'absence d'une zone de stagnation de l'eau. Ces piqûres ne sont cependant pas profondes et constituent une transition vers la corrosion uniforme qui, à l'échelle microscopique, est constituée d'un grand nombre de piqûres très rapprochées l'une de l'autre.

L'examen de la face basale, c'est-à-dire celle qui était posée sur les porte-coupons, révèle la présence d'une corrosion caverneuse quasi-systématique, mais d'intensité variable (+, ++, +++). De toute l'étude menée avec le premier dispositif porte-coupons, seuls les coupons 17 et 18 avaient échappé à cette corrosion caverneuse révélant ainsi une vitesse de corrosion, ramenée cependant à la totalité de la surface des coupons, de l'ordre de 0,05 mm/an et inférieure ainsi à celle mesurée en surface (0,12 mm/an). Dans les autres cas, la corrosion caverneuse a engendré, selon son importance, des vitesses de corrosion allant jusqu'à 0,7 mm/an (exprimées par rapport à la surface totale du coupon).

L'utilisation des nouveaux dispositifs porte-coupons a permis de remédier à ce problème de corrosion caverneuse et de rendre ainsi exploitables les calculs de perte de masse des coupons. Après retrait des coupons et élimination de l'enduit, la plus grande partie de leurs faces abritées était brillante ce qui traduisait une très légère infiltration d'eau dans l'espace intercalaire. Après desquamation des coupons destinés aux calculs des pertes de masse, des corrosions localisées mais très superficielles ont été repérées sur ces faces abritées. C'est pour cette raison que dans le tableau de l'annexe 5, figurent deux vitesses de corrosion : la première est relative à la surface totale du coupon, la seconde est relative à la surface réellement exposée s'il n'y avait pas eu infiltration, c'est-à-dire l'une des deux faces basales. Sachant qu'il ait toujours eu une infiltration d'eau sous les coupons, c'est la vitesse exprimée par rapport à la surface totale qui serait retenue.

Calcul de la vitesse apparente de corrosion par perte de masse des coupons

Les vitesses de corrosion calculées (voir tableau et coupons portants des références à trois chiffres) sont faibles et de même ordre de grandeur que celles relevées pour les coupons n° 17 et 18 précédemment cités. Les moyennes de ces vitesses de corrosion pour les trois profondeurs étudiées sont reportées dans le tableau 2 :

L'examen de ces valeurs montre une légère augmentation de la vitesse de corrosion avec le dégazage du fluide. Cependant, vu ces faibles valeurs ainsi que le nombre limité des mesures (4 par profondeur), il serait prématuré de conclure à une augmentation systématique de cette vitesse avec l'apparition et la croissance de la phase gazeuse. Il est cependant important de préciser que ces premiers résultats sont en accord avec ceux relevés dans la littérature concernant ce genre d'études (cf § 4.3).

Profondeur (en m)	Vitesse de corrosion moyenne (en mm/an) exprimée par rapport à la surface totale	Vitesse de corrosion moyenne (en mm/an) exprimée par rapport à la surface exposée
150	0,050	0,118
60	0,056	0,131
4	0,065	0,151

Tabl. 2 - Vitesses de corrosion moyennes calculées par perte de poids des coupons pour les trois profondeurs.

Calcul de la vitesse apparente de corrosion à partir des teneurs en fer total et fer dissous

Il est aussi possible de corréliser les vitesses de corrosion calculées ci-dessus aux teneurs en fer dosées dans le fluide géothermal prélevé en tête de puits de production et en tête du T.A.I.[®] (tabl. 3, le détail de ces teneurs figure en annexe 4). Le T.A.I.[®] étant en acier inoxydable, on peut négliger sa corrosion devant celle du puits de production et supposer ainsi que le fluide prélevé en tête de ce tube est représentatif du fluide géothermal du puits de production se trouvant à sa base, c'est à dire à 150 mètres de profondeur.

	Fer dissous (mg/l)	Fer total (mg/l)
puits de production	0,30 - 0,41	0,34 - 0,47
T.A.I. [®]	0,17 - 0,24	0,18 - 0,44

Tabl. 3 - Teneurs minimales et maximales en fer total et en fer dissous du fluide prélevé en tête de puits de production et en tête du T.A.I.[®]

Les teneurs en fer en tête de puits de production et en tête du T.A.I.[®] permettent de calculer les vitesses de corrosion apparentes respectivement pour tout le tubage du puits de production et pour la partie située au-dessous du T.A.I.[®]. Ces calculs sont effectués avec comme hypothèses une teneur en fer dans le réservoir négligeable et une absence de dépôt sur les parois. Ils tiennent compte de la géométrie des tubages (longueur, diamètre) et du débit de l'eau géothermale (Ignatiadis *et al.*, 1994). Les vitesses de corrosion apparentes calculées à débit d'hiver (230-270 m³/h) sont reportées dans le tableau 4. Elles seront discutées et comparées aux vitesses de corrosion évaluées par perte de poids dans le chapitre 4.3.

	Vitesses de corrosion (en mm/an) calculées à partir de la teneur en fer dissous	Vitesses de corrosion (en mm/an) calculées à partir de la teneur en fer total
pour tout le tubage du puits de production	0,061 - 0,076	0,066 - 0,096
pour le tubage situé en dessous du T.A.I. [®]	0,036 - 0,053	0,038 - 0,097

Tabl. 4 - vitesses de corrosion apparentes (minimales et maximales) calculées à partir des teneurs en fer total et en fer dissous du fluide.

Précisons à ce sujet qu'il est possible d'éliminer les deux hypothèses ci-dessus en effectuant des prélèvements d'eau géothermale en fond de puits comme ce fut le cas lors de la réhabilitation du doublet d'Orly 1 et de celui de Ris-Orangis (Ignatiadis *et al.*, 1992 ; Ignatiadis *et* Abou Akar, 1992 ; Ignatiadis *et al.*, 1994) et ce grâce à l'utilisation du T.T.F.P. (CFG-Forplex) ou du préleveur de fond du B.R.G.M.

4.2.2. Observation des dépôts formés sur les coupons

Parallèlement aux mesures de vitesses de corrosion par évaluation de la perte de poids des coupons et par dosage du fer dans le fluide géothermal, il a été procédé à l'examen des sections polies au microscope métallographique afin d'examiner les dépôts et leurs stratifications. A titre indicatif, l'épaisseur des produits de corrosion à l'intérieur du contour initial des coupons (ce fait est commenté ci-dessous) a également été convertie en vitesse de corrosion (mm/an) et reportée sur les photographies figurant en annexe 6.

Lors de leur retrait, les coupons sont mis avec soin dans un flacon de même taille afin d'empêcher les secousses et conservés dans l'eau géothermale ; au laboratoire, ils sont séchés sous vide et mis en résine, ceci dans un but de protéger les dépôts (très fragiles) lors du découpage des coupons. Les chutes de coupons toujours englobés de résine sont ensuite placées dans une pastille pour confectionner des sections polies. Le fait de disposer de 4 ou 5 sections par coupon permet d'apporter plus de renseignements sur la nature des dépôts formés.

A ce jour, six coupons issus des trois profondeurs ont été examinés, les trois premiers (3, 11 et 28) avaient été placés sur les anciens porte-coupons, les trois autres (102, 105 et 108) sur les nouveaux. Le tableau 5 résume les données relatives à leur immersion :

N° de coupon	3	11	28	108	102	105
Date d'immersion	14/4/92	14/4/92	21/10/92	10/3/93	10/3/93	10/3/93
Date de retrait	29/1/93	29/1/93	29/1/93	28/6/93	28/6/93	28/6/93
Durée d'immersion en jours	290	290	100	110	110	110
Durée d'immersion en mois	9.7	9.7	3.3	3.7	3.7	3.7
Profondeur (m)	150	60	4	150	60	4

Tabl. 5 - Durée et profondeur d'immersion des coupons dans le puits de production.

Les trois premiers coupons (3, 11 et 28) ont été placés dans les anciens porte-coupons et ont ainsi subi une infiltration d'eau sous leur seconde face basale ; leur corrosion comme celle des autres fut souvent localisée (cf § 4.2.1 et annexe 5 : ligne commentaire), un exemple de cette corrosion est montré sur la photo 5, mais dans l'ensemble les dépôts formés sur les deux faces basales étaient similaires. Les clichés correspondant à ces trois premiers coupons portent les numéros 1 à 7 (annexe 6).

L'examen des sections polies au microscope métallographique (annexe 6) fait tout d'abord ressortir un fait surprenant et très intéressant : les produits de corrosion gardent en "mémoire" la forme initiale du coupon. L'observation des sections à faible grossissement montre en effet le contour initial du coupon comme une ligne de séparation : la mackinawite,

les oxydes et les oxydes de fer hydratés (oxy-hydroxydes) sont à l'intérieur, c'est-à-dire du côté du métal, la mackinawite semble être formée en premier, puis elle est envahie par les oxydes de fer dans la suite (photos 3 et 6). Les autres sulfures de fer, pyrrhotite et pyrite sont à l'extérieur, les carbonates (il faut faire appel à d'autres techniques pour discerner le FeCO_3 du CaCO_3) sont minoritaires et se rencontrent en général à l'extérieur du dépôt de sulfures, mais nous verrons que dans certaines conditions ils deviennent majoritaires et jouxtent le métal. La pyrite semble être très minoritaire et c'est la pyrrhotite qui semble dominer. Cette dernière est parfois dispersée dans une matrice de silice.

La métallographie à elle seule ne montre pas de différence entre les trois profondeurs étudiées en matière de nature du dépôt formé. Une telle différence pourrait par contre être décelée par combinaison de plusieurs techniques d'analyses (MEB, DRX, microsonde) répétées sur un nombre suffisant de coupons.

Les trois derniers coupons (102, 105 et 108) étaient collés par des enduits spéciaux sur les nouveaux supports, et l'enduit était également versé entre ces coupons et les plaquettes de séparation. Ils n'exposaient ainsi qu'une de leurs faces basales au fluide géothermal. Les tests préliminaires (sur 2 semaines) avaient révélé l'absence d'infiltration d'eau, mais lors de cette étude qui a duré 110 jours, l'eau a pu s'infiltrer sans causer cependant des dégâts importants : corrosion quasi uniforme mais très superficielle. Les clichés relatifs à cette seconde série de coupons portent les numéros 8 à 14 (annexe 6).

L'examen des sections polies montre que la face exposée à l'eau géothermale a des allures similaires à celles de la première série, des oxydes et des oxy-hydroxydes de fer dans la partie interne du coupon entourant souvent un résidu de mackinawite et des sulfures de fer (pyrrhotite majoritaire) sous forme de dépôt à l'extérieur des oxydes.

La face opposée (face abritée) est souvent peu corrodée comme le montre la photo 9. Les dépôts sont essentiellement constitués de carbonates. Des analyses complémentaires (MEB, microsonde, DRX) permettront de savoir s'il s'agit de la pure sidérite FeCO_3 , produit de corrosion du fer, ou d'un mélange FeCO_3 et CaCO_3 avec une part de CaCO_3 non négligeable. Les sulfures de fer sont très minoritaires, la photo 10 montre les carbonates dominants de part et d'autre de la ligne de séparation, la mackinawite persiste à l'intérieur de cette ligne et l'on observe un début de cristallisation de la pyrrhotite à l'extérieur.

Les produits de corrosion déposés sur les coupons issus des profondeurs 150 et 4 mètres (référéncés 109, 113, 114, 117 et 106, 115, 116, 118 dans l'annexe 5) ont été soigneusement récupérés pour être examinés par Diffractométrie des Rayons X (DRX). Les résultats de cette analyse sont consignés dans le tableau 6. Ce tableau montre que les phases cristallisées sont minoritaires comparées aux phases colloïdales amorphes constituées vraisemblablement d'oxydes et d'oxy-hydroxydes de fer. Précisons que la pyrrhotite dont la présence a été mise en évidence par métallographie n'apparaît pas dans le diffractogramme. Ces résultats doivent cependant être considérés comme ponctuels puisqu'ils sont relatifs à une expérience unique de trois mois réalisée entre le 10 mars et le 28 juin 1993. Il est difficile d'exprimer l'importance des phases en pourcentage puisque la DRX n'est pas une méthode d'analyse quantitative et que l'incertitude sur les pourcentages avancés augmente avec le nombre des phases présentes (cristallisées et amorphes) ce qui est le cas de cette analyse. Les correspondances suivantes

sont donc données à titre indicatif et doivent être considérées avec prudence : (faible : ~ 20-25 %, traces : ~ 5 %, infratraces : ~ 1 %).

Provenance	4 mètres	150 mètres
Nature des phases		
mackinawite Fe_9S_8	faible	faible (+)
pyrite FeS_2	traces	traces
sidérite $FeCO_3$	infratrace	infratrace
calcite $CaCO_3$	traces	traces
quartz SiO_2	non détecté	probable (infratrace)
soufre	faible (-)	faible/traces
phases colloïdales amorphes au rayons X	vraisemblablement importantes	vraisemblablement importantes

Tabl. 6 - Nature et abondance des différentes phases présentes dans les dépôts issus des coupons de corrosion.

4.3. DISCUSSION

Les causes de la corrosion par piqûre sont très controversées. Cette corrosion peut être due aussi bien à la structure de l'acier (différentes phases présentes, présence d'inclusions) qu'au dépôt le recouvrant. Pour Wranglen (1974a, 1974b), les zones d'attaque sélective sont celles entourant les inclusions (considérées comme nobles) de sulfures métalliques (Fe, Mn, Ca) dans l'acier. Certains auteurs parlent d'une attaque sélective de la ferrite (Wallwork *et* Harris, 1974), lors de cette attaque, la cémentite (Fe_3C) joue le rôle d'une cathode qui accélère la dissolution de la ferrite (Hoar *et* Havenhand, 1936, Staicoplus, 1961, Cron *et al.*, 1971, et Crolet, 1993). Pour Goldberg *et* Owen (1979), les défauts présents dans le dépôt facilitent le passage des espèces agressives jusqu'au métal. Les zones du métal mises à découvert seraient anodiques alors que les zones protégées joueraient le rôle d'une cathode. Il est certain aujourd'hui que l'on puisse avoir une combinaison de tous ces effets et il serait difficile de déterminer la contribution de chaque mécanisme : Les aciers au carbone ne sont jamais homogènes, les inclusions de métaux ou d'autres éléments sont toujours présentes et les dépôts sont souvent poreux, non protecteurs ou peuvent être rendus fragiles par différents phénomènes extérieurs.

Pour ce qui est de l'augmentation de la vitesse de corrosion avec le dégazage du fluide géothermal, l'étude bibliographique (Boisdet *et al.*, 1992) a révélé une augmentation de la vitesse de corrosion en milieu diphasique. A cette étude, nous rajouterons l'article récent de Palacios *et* Shadley (1993) relatif à l'étude de la corrosion de l'acier en milieu aqueux (3 % NaCl, CO_2) à 71°C mais dépourvu de H_2S . Les résultats de cette étude révèlent une augmentation de la vitesse de corrosion de l'acier en milieu diphasique. Cette étude montre également une diminution de la vitesse de corrosion de l'acier avec la vitesse du fluide ainsi qu'une formation préférentielle de la sidérite $FeCO_3$ (dépôt protecteur) en milieu aqueux monophasique et à faible vitesse de circulation.

La comparaison des vitesses de corrosion calculées à débit d'hiver (230-270 m³/h) par dosage du fer en tête du puits de production et en tête du T.A.I.[®] montre une corrosion plus importante le long des derniers 150 mètres du tubage du puits de production (zone diphasique) que sur la partie située en dessous du T.A.I.[®] (zone monophasique). Ces vitesses de corrosion apparentes sont également du même ordre de grandeur que celles calculées par perte de poids des coupons, la comparaison devant être effectuée :

- d'une part entre celle calculée en tête de puits et celle calculée par la perte de masse des coupons se trouvant à 4 mètres de profondeur,
- d'autre part entre celle calculée en tête de puits et celle calculée par la perte de masse des coupons se trouvant à 150 mètres de profondeur.

A débit d'été (50-60 m³/h), les teneurs en fer dosées dans le fluide donnent des vitesses de corrosion apparentes plus faibles que celles calculées à débit d'hiver. Cette baisse de la vitesse de corrosion apparente peut être expliquée par une croissance du dépôt de sulfures de fer sur les parois des tubages, lequel phénomène est favorisé par une baisse du débit (Amalhay *et al.*, 1994b).

La formation et la stratification des dépôts peut être expliquée par le fait que la mackinawite, les oxydes et les oxy-hydroxydes de fer seraient des produits de la corrosion du fer des coupons alors que la pyrrhotite et la pyrite seraient précipités ailleurs, du moins en grande majorité et déposés par le fluide géothermal. Le mécanisme serait probablement le suivant : la mackinawite se forme en premier et suite à un appauvrissement voire un épuisement local du milieu en sulfures, le fer produit par la corrosion précipite avec les autres ions présents (OH⁻, HCO₃⁻) pour former les oxy-hydroxydes et le carbonate de fer (minoritaire). L'appauvrissement local du milieu en sulfures aura aussi comme conséquence une redissolution de la mackinawite ce qui explique l'invasion de cette dernière par les oxydes de fer. Les arguments soutenant cette hypothèse ont été avancés et longuement discutés (Amalhay *et al.*, 1994a et 1994b) lors de la conférence internationale sur la géothermie en Europe organisée par la CCE, l'Ademe et le BRGM à Orléans en février 1994.

Cette stratification des dépôts (oxydes de fer à l'intérieur, sulfures de fer à l'extérieur) a déjà été observée au B.R.G.M. par Honegger *et al.*, (1986). Plus tard, Ramanarayanan *et Smith* (1990) ont évoqué cette même stratification où toutefois les sulfures de fer mélangés avec la magnétite Fe₃O₄ sont essentiellement constitués de pyrrhotite. Leur expérience avec un fluide proche de l'eau géothermale furent cependant menées à 220°C dans un autoclave.

Le curage du puits de production en septembre 1993 a permis la récupération de produits de corrosion déposés sur les parois internes des tubages depuis de début de son exploitation. Cependant, la nouvelle technique de curage utilisée (Rapport GPC, 1993) ne permet la récupération des dépôts dans le bac de filtration qu'après la fin du curage. Pour cette raison, il n'a pas été possible de déterminer la côte du prélèvement et le mélange récupéré doit être considéré comme issu de plusieurs profondeurs. La Diffractométrie des Rayons X a permis de déterminer la nature des phases présentes dans ce mélange (tabl. 7).

L'analyse chimique élémentaire du dépôt recueilli a permis de calculer le pourcentage massique de chaque espèce chimique présente dans le dépôt. Les résultats de cette analyse sont reportés dans le tableau 8. La somme des pourcentages massiques de ces éléments est égale à 71,5 %, sachant que toutes les espèces susceptibles d'exister dans les eaux du Dogger

et dans les tubages en acier ont été dosés et que l'hydrogène ne représente qu'un faible pourcentage en masse, on peut dire que l'oxygène constitue le complément à 100 %, ce qui correspond à un pourcentage de l'ordre de 28 %. Cette dominance de l'oxygène comparée aux sulfures (11,5 %) est la conséquence du séjour prolongé des dépôts issus du curage dans le bac de filtration et dans un mélange eau douce/eau géothermale donc riche en oxygène qui a vraisemblablement dissout les sulfures de fer et précipité le fer libéré sous forme d'oxydes et d'oxy-hydroxydes.

Nature des phases	proportion	Nature des phases	proportion
mackinawite Fe_9S_8 sidérite $FeCO_3$ magnétite Fe_3O_4	faible faible faible	pyrite FeS_2 calcite $CaCO_3$ quartz SiO_2	non détectée non détectée non détectée
Pyrrotite Fe_7S_8 Hématite Fe_3O_4 Goethite $\alpha-FeOOH$ Lépidicrocite $\gamma-FeOOH$	traces traces traces traces	phases colloïdales amorphes aux rayons X	négligeables

Tabl. 7 - Nature et abondance des différentes phases présentes dans les dépôts issus du curage du puits de production.

Fe %	S %	Cl %	Si %	Na %	Ca %	Mg %	C total %	C min %	Al %
48,00	11,50	0,60	1,68	0,25	4,15	0,15	3,35	2,70	< 0,5
K %	Mn %	Ti %	P ppm	Li ppm	Be ppm	B ppm	V ppm	Cr ppm	Co ppm
< 0,40	0,40	0,024	560	< 10	< 2	58	22	972	52
Ni ppm	Cu ppm	Zn ppm	As ppm	Sr ppm	Y ppm	Nb ppm	Mo ppm	Ag ppm	Cd ppm
290	582	504	< 20	414	< 20	< 20	368	< 0,2	< 2
Sn ppm	Sb ppm	Ba ppm	La ppm	Ce ppm	W ppm	Pb ppm	Bi ppm	Zr ppm	PP %
< 10	< 10	132	< 20	26	< 10	1032	< 10	244	1,32

Tabl. 8 - analyse chimique élémentaire des dépôts issus du curage du puits de production.

les concentrations sont exprimées sur produit séché à 105°C.

% : pourcentage massique

ppm : partie par million (mg/kg)

PP : perte de poids par calcination à 405°C.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude consistait à étudier les phénomènes de corrosion-dépôts à la fois en zone monophasique et diphasique d'un puits artésien et de corréler ces phénomènes à la nature de la zone étudiée, ceci en absence et en présence d'un traitement par inhibiteur. Il était également prévu d'étudier la vitesse de corrosion et la nature des dépôts, pour chacune de ces profondeurs, en fonction du temps et ce par prélèvement étalé d'une série de coupons immergés le même jour.

Cette étude a pris au début un retard lié à un problème d'exploitation de la centrale. Le porte-coupons prévu initialement, et qui devrait assurer une continuité du T.A.I.[®] et un balayage des coupons par l'eau géothermale identique à celui effectué en surface, a été modifié. Un problème de corrosion caverneuse s'est posé avec les premiers porte-coupons utilisés (rendant ainsi inexploitable les mesures des vitesses de corrosion) et a nécessité leur amélioration.

L'étude effectuée avec les nouveaux porte-coupons fut exploitable en vitesses de corrosion. Elle a abouti à des vitesses de corrosion très faiblement croissantes quand on passe de 150 à 60 puis à 4 mètres de profondeur, ce qui signifie que la corrosion en zone diphasique est à peine plus importante qu'en zone monophasique. Ces vitesses n'ont pu être confirmées par des mesures répétitives à cause de l'arrêt de l'exploitation pour la réhabilitation du puits durant l'été 1993, elles sont cependant en accord avec les vitesses de corrosion apparentes du tubage du puits de production déduites des teneurs en fer dosées en tête de ce puits et en tête du T.A.I.[®]

En tête du puits d'injection, la vitesse de corrosion calculée par perte de poids des coupons est plus importante que celle calculée au puits de production. Elle est due à la présence des bactéries sulfato-réductrices qui transforment les sulfates en sulfures et qui sont connues pour être plus actives dans les conditions régnant dans le puits d'injection (température plus faible). En plus, cette corrosion dans le puits d'injection semble avoir été favorisée par des interventions effectuées au niveau des canalisations de surface.

Du point de vue nature du dépôt formé, l'examen des sections polies au microscope métallographique a montré que les oxydes et les oxy-hydroxydes de fer jouxtent le métal et gardent la forme initiale du coupon, les sulfures de fer (pyrrhotite, pyrite...) constituent le dépôt proprement dit et se forment à l'extérieur du coupon. Seule la mackinawite se rencontre dans la partie interne mélangée avec les oxydes de fer. Une ligne droite très nette sépare très souvent cet ensemble (oxydes/mackinawite) des sulfures externes.

Sur la face abritée du coupon, c'est-à-dire celle collée au support, la corrosion due à l'infiltration de l'eau est faible et les carbonates deviennent majoritaires.

La métallographie ne met pas en évidence une différence (nature et proportion des phases) entre les dépôts recueillis des trois profondeurs étudiées. Des analyses complémentaires (MEB, microsonde, DRX) pourraient apporter une indication sur une telle différence.

Cette première phase de l'étude (c'est-à-dire l'étude des phénomènes de corrosion et de dépôts en absence de traitement) s'est terminée avec le curage du puits de production qui a eu lieu en septembre 1993 et qui a été suivi par l'installation et la mise en service d'une centrale de traitement anti-corrosion par injection d'additif en fonds de puits.

Cette étude a permis de mettre au point, puis d'améliorer, un dispositif porte-coupons ainsi que la technique de fixation des coupons. Cette expérience sera mise à profit pour aborder la seconde phase de l'étude : la corrosion et la formation des dépôts en présence d'inhibiteur de corrosion.

7. BIBLIOGRAPHIE

ABOU AKAR A., IGNATIADIS I. (1994) - A new model for iron sulphide deposition in geothermal wells. *In: Proceedings of the International Symposium, Geothermics 94 in Europe, from Research to Development*, BRGM (ed), Orléans, France, 8-9 February 1994, pp. 215-222.

AMALHAY M., GAUTHIER B., IGNATIADIS I. (1994a) - Influence of some physico-chemical parameters and exploitation conditions on corrosion and scaling in geothermal wells in the Paris bassin. *In: Proceeding of the International Symposium, Geothermics 94 in Europe, from Research to Development*, BRGM (ed), Orléans, France, 8-9 February 1994, pp. 233-240.

AMALHAY M., ABOU AKAR A., IGNATIADIS I. (1994b) - Study of the deposition phenomena in geothermal wells in the Paris Basin. *In: Proceeding of the International Symposium, Geothermics 94 in Europe, from Research to Development*, BRGM (ed), Orléans, France, 8-9 February 1994, pp. 223-232.

BOISDET A., BRAY Ph., IGNATIADIS I., ABOU AKAR A., LAMBERT I. and IRIS P. (1992) - Study of corrosion and scaling in low enthalpy geothermal system. Rapport final du contrat CCE JOULE n°Joug-0005-C. Rapport BRGM n° R 36103, IRG SGN 92, 312 p.

CROLET J.L. (1988) - Mécanismes de la corrosion uniforme sous dépôt de corrosion, *Mét. Corr. Ind.*, 63, n° 757, pp. 279-302.

CROLET J.L. (1990) - Electrochimie de la corrosion sous dépôt de corrosion, *Mét. Corr. Ind.*, 64, n° 764, pp. 91-106.

CROLET J.L. (1993) - Protectivité des dépôts de corrosion. Note interne Elf Aquitaine Production. EP/P/PRO/RTC/ n° 93070, 26 p.

CRON C.J., PAYER J.H. and STAEHLE R.W. (1971) - Dissolution behaviour of Fe-Fe₃C structures as a function of pH, potential and anion - An electron microscopic study. *Corrosion*, vol. 27, p. 1.

Géoproduction Consultants (1992) - Suivi des phénomènes affectant des coupons métalliques témoins de corrosion immergés dans un puits de production géothermique éruptif. Phase I : conception, préparation et installation de la ligne porte-coupons dans le puits de production de Chelles. Rapport GPC n° 92 CHELLES.124/D16, 26 p.

Géoproduction Consultants (1993) - Etude de faisabilité d'une ligne de traitement des effluents en cours de curage de puits géothermiques. Rapport GPC n° 93214.WPS, 40 p.

GOLDBERG A. and OWEN L.B. (1979) - Pitting corrosion and scaling of carbon steels in geothermal brines. *Corrosion*, vol. 35, n° 3, pp.114-124.

HOAR T.P. and HAVENHAND D. (1936) - Factors influencing the rate of attack of mild steels by typical weak acid media. *J. Iron and Steel Inst.*, vol. 133, p. 239.

HONEGGER J.L., BOISDET A., FOUCHER J. C., FABRIOL H., CRIAUD A., BRACH M., FOUILLAC C., MARTIN J.C., MENJOZ A. et ROJAS J. (1986) - Méthode d'exploitation des gisements géothermiques de basse enthalpie ; Rapport annuel d'activités IMRG 1986.

IGNATIADIS I., CHERADAME J.-M., BRACH M., CASTAGNE S. et GUEZENNEC J. (1990) - Reduction by biocide treatment of hydrogen sulphide concentration in a geothermal brine. *In* "Microbially influenced corrosion and biodeterioration". Ed. N.J. Dowling, M.W. Mittelman, J.C. Danco. Proceedings of the International Congress on "Microbially Influenced Corrosion" Knoxville USA 7-12 october 1990, section 8, pp 33-36.

IGNATIADIS I., CHERADAME J.M., LAFFORGUE M. et CASTAGNE S. (1991) - Evolution des teneurs en sulfures dissous dans les fluides géothermaux. Rapport BRGM n° R 33518 IRG SGN 91, 160 p.

IGNATIADIS I., ABOU AKAR A. (1992) - Prélèvement d'échantillons de fluide géothermal en fond de puits de production au moyen du préleveur de fond PRINPIMO sur le site de RIS ORANGIS (GRO-2). Rapport BRGM n° R 36055 IRG SGN 92, 68 p.

IGNATIADIS I., ABOU AKAR A., LAFFORGUE M. et BRAY Ph. (1992) - Prélèvement d'échantillons de fluide géothermal par le tube d'injection d'additifs en fond de puits de production sur le site d'ORLY 1 (GOR-2). Rapport BRGM n° R 34513 IRG SGN 92, 76 p.

IGNATIADIS I., ABOU AKAR A., AMALHAY M., LONGIN G. et LESUEUR H. (1993)- Corrosion et inhibition en géothermie. 1. Recommandations relatives au suivi de l'efficacité des traitements par inhibiteurs en géothermie basse énergie. Note technique n° EBE93T75.

IGNATIADIS I. (1994) - Origins of the increased sulphide concentrations noted in geothermal fluids at production wellheads in the south and east of the Paris Basin. *In*: Proceeding of the International Symposium, Geothermics 94 in Europe, from Research to Development, BRGM (ed), Orléans, France, 8-9 February 1994, pp. 241-248.

IGNATIADIS I., ABOU AKAR A. et AMALHAY M. (1994) - Methods for monitoring corrosion and the efficiency of treatment by corrosion inhibitor of the geothermal projects of the Paris Basin. *In*: Proceeding of the International Symposium, Geothermics 94 in Europe, from Research to Development, BRGM (ed), Orléans, France, 8-9 February 1994, pp. 257-266.

MEYER F.H., RIGGS O.L., McGLASSON R.L. and SUDBURY G.D. (1958) - Corrosion products of mild steel in hydrogen sulphide environments. *Corrosion*, vol. 14, n° 2, pp. 109-116.

OUZOUNIAN G., CRIAUD A., CASTAGNE S. et ROIGNOT G. (1986) - Analyse des causes de colmatage du puits de réinjection et recherche d'un traitement préventif. Rapport C.F.G. n° 86 CFG 02, 27 p.

PALACIOS C.A. and SHADLEY J.R. (1993) - CO₂ corrosion of N-80 steel at 71°C in a two-phase flow system. *Corrosion (Corrosion engineering Science)*, vol. 89, n°8, pp. 686-693.

RAMANARAYANAN T.A. and SMITH S.N. (1990) - Corrosion of iron in gaseous environments and in gas saturated aqueous environments., *Corrosion*, 46, n°1, pp. 66-74.

ROJAS J. et al., (1989) - Caractérisation et modélisation du réservoir géothermique du Dogger, Bassin parisien, France, rapport final. Rapport BRGM n° R 30169 IRG SGN 89, 249 p.

SMITH J.S. and MILLER J.D.A. (1975) - Nature of sulphides and their corrosive effect on ferrous metal: A review. *Br. Corros. J.*, vol. 10, n° 3, pp. 136-143.

STAICOPLUS D.N. (1963) - The role of cementite in the acid corrosion of steel. *J. of Electrochem. Soc.*, vol. 110, p. 1121.

WRANGLER G. (1974a) - Active sulphides and the pitting corrosion of carbon steels. Eds Staehle R.W., *Localized corrosion*, NACE 3, p. 312

WRANGLER G. (1974b) - Pitting and sulphide inclusions in steels. *Corrosion Science*, vol. 14, p. 331.



LISTE DES ABREVIATIONS

D.R.X.	: Diffractométrie des Rayons X
M.E.B.	: Microscope Electronique à Balayage
Ademe	: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
A.N.A.	: Laboratoires d'analyses du BRGM
C.C.E.	: Commission des Communautés Européennes
C.F.G.	: Compagnie Française pour le Développement de la Géothermie et des Energies Nouvelles.
G.P.C.	: Géo-Production Consultants
I.M.R.G	: Institut Mixte de Recherches Géothermiques
T.A.I. [®]	: Tube Auxiliaire d'Injection
T.P.I.	: Tête de Puits d'Injection
T.P.P.	: Tête de Puits de Production
T.T.F.P. [®]	: Tube de Traitement en Fond de Puits
E_h	: Potentiel d'électrode
G.L.R.	: Rapport gaz/liquide
P	: Pression
pH	: Potentiel d'Hydrogène
T	: Température
B.S.R.	: Bactéries sulfato-réductrices.



LISTE DES TABLEAUX

Tabl. 1 - Composition chimique de l'acier API K55 utilisé pour la fabrication des coupons.

Tabl. 2 - Vitesses de corrosion moyennes calculées par perte de poids des coupons pour les trois profondeurs.

Tabl. 3 - Teneurs minimales et maximales en fer total et en fer dissous du fluide prélevé en tête de puits de production et en tête du T.A.I.®

Tabl. 4 - Vitesses de corrosion apparentes (minimales et maximales) calculées à partir des teneurs en fer total et en fer dissous du fluide.

Tabl. 5 - Durée et profondeur d'immersion des coupons dans le puits de production.

Tabl. 6 - Nature et abondance des différentes phases présentes dans les dépôts issus des coupons de corrosion.

Tabl. 7 - Nature et abondance des différentes phases présentes dans les dépôts issus du curage du puits de production.

Tabl. 8 - Analyse chimique élémentaire des dépôts issus du curage du puits de production.

ANNEXE 1

ANALYSES CHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DU FLUIDE GEOTHERMAL

ALIMENTANT LA CENTRALE DE CHELLES

Conditions Opératoires					
Date d'intervention	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992
Circuit géothermal :					
P tête de puits de production (bar)	2	8.8	8.7	2.1	2.8
T tête de puits de production (°C)	63.5	67.0	67.0	69.0	69.0
P tête de puits d'injection (bar)	21.0	10.8	10.1	21.0	19.2
T tête de puits d'injection (°C)	44.5	49.0	48.0	46.0	41.0
Débit du fluide (m3/h)	270	59	53	248	226
Circuit géothermique :					
Température à l'aller (°C)	-	65.5	65.5	65.5	67.0
Température au retour (°C)	-	30.0	48.5	43.0	39.0
Débit (m3/h)	240	58	60	184	216
Mesures et analyses effectuées					
	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992
Température de mesure (°C)	40.0	43.0	30.2	26.8	-
Volume gazeux (ml)	-	209.07	-	-	-
Volume liquide (ml)	-	1930	-	-	-
GLR (gaz/eau)	-	0.11	-	-	-
pH (à T)	6.34	6.35	6.28	6.26	-
Eh mesuré (mv)	-306	-318	-292	-288	-
Eh corrigé (mv/ENH)	-92.9	-107.2	-71.5	-64.9	-
Conductivité à 25°C (mS/cm)	-	35.4	34.9	35.8	-
O2 dissous (ppb)	-	< 5	-	-	-
Alcalinité (mmol/l)	5.2	5.21	-	5.245	-
équivalent HCO3- (mg/l)	317.25	317.86	-	319.99	-
Sulfures (mmol/l)	0.285	0.382	0.329	0.24	-
équivalent [H2S] (mg/l)	9.71	13.02	11.21	8.18	-
équivalent [S2-] (mg/l)	9.14	12.25	10.55	7.70	-
Mercaptans (mmol/l)	0.035	0.031	0.031	0.028	-
équivalent [S2-] (mg/l)	1.12	1.00	0.98	0.90	-
flux de sulfures [S2-] mg/h	2467.3	722.7	559.1	1908.4	-
Analyse de la silice en mg/l (IRG)					
	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992
SiO2 diluée	35.5	32.0	-	30.9	-
SiO2 non diluée	-	36.0	-	29.7	-
Analyse du Fer en mg/l (IRG)					
	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992
Fe dissous	0.30	0.32	0.32	0.30	0.41
Fe total	-	0.35	2.50	0.47	0.41
Fe dissous (T.A.I.)	-	-	0.20	0.24	0.23
Fe total (T.A.I.)	-	-	0.40	0.44	0.24
Fe dissous (à l'injection)	-	-	-	-	0.43
Fe total (à l'injection)	-	-	-	-	0.44

Conditions Opératoires				
Date d'intervention	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993	01/03/1987 Archives
Circuit géothermal :				
P tête de puits de production (bar)	2.8	1.3	9.0	-
T tête de puits de production (°C)	69.2	69.3	67.4	-
P tête de puits d'injection (bar)	17.7	19.8	9.4	-
T tête de puits d'injection (°C)	39.6	42.0	44.3	-
Débit du fluide (m3/h)	233.8	267.0	57.0	-
Circuit géothermique :				
Température à l'aller (°C)	-	-	-	-
Température au retour (°C)	-	-	-	-
Débit (m3/h)	-	-	-	-
Mesures et analyses effectuées				
	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993	01/03/1987
Température de mesure (°C)	33.2	30.0	64.2	-
Volume gazeux (ml)	-	-	-	-
Volume liquide (ml)	-	-	-	-
GLR (gaz/eau)	-	-	-	0.15
pH (à T)	6.24	6.22	5.41	-
Eh mesuré (mv)	-292	-292	-	-
Eh corrigé (mv/ENH)	-73.7	-71.3	-	-
Conductivité à 25°C (mS/cm)	32.6	-	-	-
O2 dissous (ppb)	-	-	-	-
Alcalinité (mmol/l)	-	-	-	-
équivalent HCO3- (mg/l)	-	-	-	312.00
Sulfures (mmol/l)	0.285	0.274	0.418	-
équivalent [H2S] (mg/l)	9.72	9.34	14.25	1.20
équivalent [S2-] (mg/l)	9.14	8.79	13.40	1.13
Mercaptans (mmol/l)	0.029	0.028	0.037	-
équivalent [S2-] (mg/l)	0.94	0.90	1.18	0.68
flux de sulfures [S2-] mg/h	2138.0	2345.7	764.0	-
Analyse de la silice en mg/l (IRG)				
	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993	01/03/1987
SiO2 diluée	-	-	-	-
SiO2 non diluée	-	-	-	-
Analyse du Fer en mg/l (IRG)				
	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993	01/03/1987
Fe dissous	0.32	0.32	0.20	-
Fe total	0.34	0.38	0.40	-
Fe dissous (T.A.I.)	0.17	-	0.17	-
Fe total (T.A.I.)	0.18	-	0.28	-
Fe dissous (à l'injection)	0.93	0.51 ?	0.21	-
Fe total (à l'injection)	1.11	0.42 ?	1.06	-

Etude de la corrosion en zones monophasique et diphasique sur la centrale géothermique de Chelles

Analyse du Fer en mg/l (ANA)	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992
Fe dissous	0.15	0.3	-	0.46	-
Fe total	-	0.3	-	0.41	-
Fe dissous (T.A.I.)	-	-	-	0.36	-
Fe total (T.A.I.)	-	-	-	0.43	-
Fe dissous (à l'injection)	-	-	-	-	-
Fe total (à l'injection)	-	-	-	-	-
Au laboratoire d'ANA (en mg/l)	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992
Li+	2.5	2.5	-	3.3	-
Na+	7642	7330	-	7550	-
K+	98.5	106	-	110	-
NH4+	19	22.5	-	21.3	-
Mg++	237	242.2	-	241	-
Ca++	1105	1092	-	1200	-
Sr++	65.5	64.8	-	60.2	-
Ba++	0.213	0.24	-	0.312	-
Mn++	< 0.015	< 0.015	-	< 0.015	-
Al+++	< 0.3	< 0.3	-	< 0.05	-
Fe++	0.15	0.3	-	0.46	-
Fe total	-	0.3	-	0.41	-
SiO2	38	34	-	42.5	-
F-	3.3	3.8	-	3.7	-
Cl-	12800	12890	-	12700	-
Br-	52.6	61	-	69	-
NO3-	< 0.5	< 0.5	-	< 0.5	-
SO4--	830	814	-	835	-
B+++	12.5	13	-	12.6	-
Au laboratoire d'ANA (en meq/l)	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992
Li+	0.360	0.360	-	0.475	-
Na+	332.41	318.84	-	328.41	-
K+	2.52	2.71	-	2.81	-
NH4+	1.05	1.25	-	1.18	-
Mg++	19.50	19.93	-	19.83	-
Ca++	55.14	54.49	-	59.88	-
Sr++	1.50	1.48	-	1.37	-
Ba++	0.003	0.003	-	0.005	-
Mn++	-	-	-	-	-
Al+++	-	-	-	-	-
Fe++	0.005	0.011	-	0.016	-
Fe total	-	-	-	-	-
SiO2	-	-	-	-	-
F-	0.174	0.200	-	0.195	-
Cl-	361.04	363.58	-	358.22	-
Br-	0.658	0.763	-	0.864	-
NO3-	-	-	-	-	-
SO4--	17.28	16.95	-	17.39	-
H2BO3-	1.16	1.20	-	1.17	-
Cations (meq/l)	412.49	399.07	-	413.98	-
Anions (meq/l)	385.80	388.29	-	383.32	-
Balance ionique (%)	6.47	2.70	-	7.41	-

Analyse du Fer en mg/l (ANA)	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993	01/03/1987
Fe dissous	0.45	-	-	-
Fe total	0.45	-	-	-
Fe dissous (T.A.I.)	0.38	-	-	-
Fe total (T.A.I.)	0.38	-	-	-
Fe dissous (à l'injection)	1.10	-	-	-
Fe total (à l'injection)	1.10	-	-	-
Au laboratoire d'ANA (en mg/l)	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993	01/03/1987
Li+	-	-	-	1.7
Na+	-	-	-	6557
K+	-	-	-	96
NH4+	-	-	-	22.1
Mg++	-	-	-	211
Ca++	-	-	-	984
Sr++	-	-	-	47.9
Ba++	-	-	-	0.21
Mn++	-	-	-	-
Al+++	-	-	-	0.02
Fe++	0.45	-	-	-
Fe total	0.45	-	-	-
SiO2	-	-	-	30
F-	-	-	-	-
Cl-	-	-	-	12250
Br-	-	-	-	61
NO3-	-	-	-	-
SO4--	-	-	-	885
B+++	-	-	-	13.7
Au laboratoire d'ANA (en meq/l)	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993	01/03/1987
Li+	-	-	-	0.245
Na+	-	-	-	285.21
K+	-	-	-	2.46
NH4+	-	-	-	1.23
Mg++	-	-	-	17.36
Ca++	-	-	-	49.10
Sr++	-	-	-	1.09
Ba++	-	-	-	0.003
Mn++	-	-	-	-
Al+++	-	-	-	-
Fe++	0.016	-	-	-
Fe total	-	-	-	-
SiO2	-	-	-	-
F-	-	-	-	-
Cl-	-	-	-	345.53
Br-	-	-	-	0.763
NO3-	-	-	-	-
SO4--	-	-	-	18.43
H2BO3-	-	-	-	1.27
Cations (meq/l)	-	-	-	356.70
Anions (meq/l)	-	-	-	365.99
Balance ionique (%)	-	-	-	-2.60

Au laboratoire de Géochimie	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992
d D% de l'eau	-32.1	-	-	-	-
d 18O% de l'eau	-3.9	-	-	-	-
d 18O% des sulfates	13.1	-	-	-	-
d 34S% des sulfates	25.1	-	-	-	-
d 34S% des sulfures	9.2	-	-	-	-
Gaz libres (% volumique)	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992
CO2	-	8.113	-	-	-
H2S	-	0.122	-	-	-
H2	-	< 0.005	-	-	-
N2	-	29.860	-	-	-
He	-	0.921	-	-	-
Ar	-	0.379	-	-	-
CH4	-	53.625	-	-	-
C2H6	-	3.713	-	-	-
C3H8	-	2.200	-	-	-
i-C4H10	-	0.330	-	-	-
n-C4H10	-	0.798	-	-	-
C5H12	-	0.454	-	-	-
C6H14	-	0.206	-	-	-
Gaz dissous (mmol/l)	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992
CO2	-	3.70E-03	-	-	-
H2S	-	-	-	-	-
H2	-	< 6E-04	-	-	-
N2	-	6.18E-04	-	-	-
He	-	< 6E-04	-	-	-
Ar	-	3.03E-05	-	-	-
CH4	-	1.50E-03	-	-	-
C2H6	-	1.30E-04	-	-	-
C3H8	-	5.30E-05	-	-	-
i-C4H10	-	5.90E-06	-	-	-
n-C4H10	-	1.70E-05	-	-	-
C5H12	-	9.10E-06	-	-	-
C6H14	-	9.10E-06	-	-	-
Laboratoire "Micromer" (bactéries/ml)	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992
microflore anaérobie	40	-	-	-	-
microflore sulfatoréductrice	65	-	-	-	-

Au laboratoire de Géochimie	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993	01/03/1987
d D‰ de l'eau	-	-	-	-32
d 18O‰ de l'eau	-	-	-	-4.7
d 18O‰ des sulfates	-	-	-	-
d 34S‰ des sulfates	-	-	-	24.8
d 34S‰ des sulfures	-	-	-	-
Gaz libres (% volumique)	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993	01/03/1987
CO2	-	-	-	19.10
H2S	-	-	-	0.06
H2	-	-	-	0.01
N2	-	-	-	25.10
He	-	-	-	0.46
Ar	-	-	-	0.21
CH4	-	-	-	47.80
C2H6	-	-	-	-
C3H8	-	-	-	-
i-C4H10	-	-	-	-
n-C4H10	-	-	-	-
C5H12	-	-	-	-
C6H14	-	-	-	-
Gaz dissous (mmol/l)	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993	01/03/1987
CO2	-	-	-	2.5
H2S	-	-	-	-
H2	-	-	-	-
N2	-	-	-	0.72
He	-	-	-	-
Ar	-	-	-	-
CH4	-	-	-	0.46
C2H6	-	-	-	-
C3H8	-	-	-	-
i-C4H10	-	-	-	-
n-C4H10	-	-	-	-
C5H12	-	-	-	-
C6H14	-	-	-	-
Laboratoire "Micromer" (bactéries/ml)	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993	01/03/1987
microflore anaérobie	-	-	-	-
microflore sulfatoréductrice	-	-	-	-

ANNEXE 2

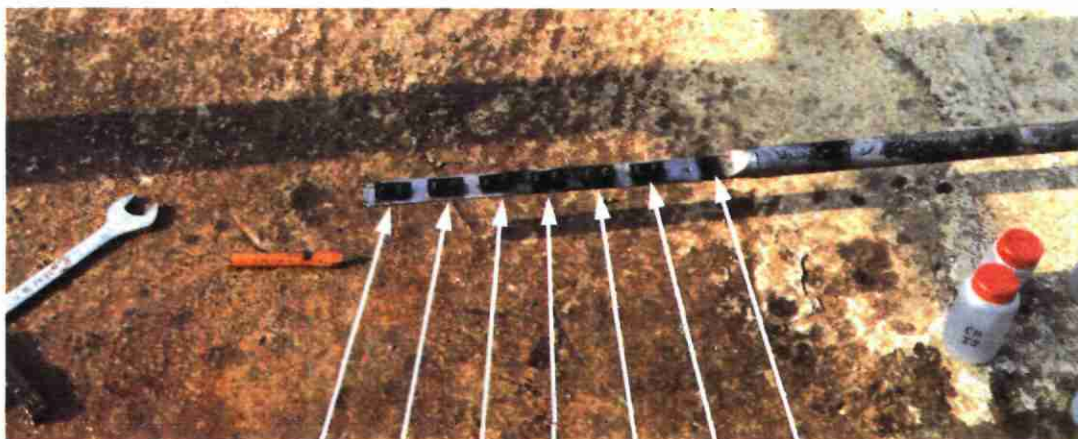
DESCRIPTION DES PORTE-COUPONS EN SURFACE

Photo 1 Installation du sas sur la canalisation en surface.

Photo 2 Vue du porte-coupons après sa sortie, les coupons sont démontés et conservés dans l'eau géothermale.



1



2

or

I/1	I/2	I/3	I/4	I/5	I/6	I/7
P/1	P/2	P/3	P/4	P/5	P/6	P/7

ANNEXE 3

DESCRIPTION DES PORTE-COUPONS IMMERGES

DANS LE Puits DE PRODUCTION

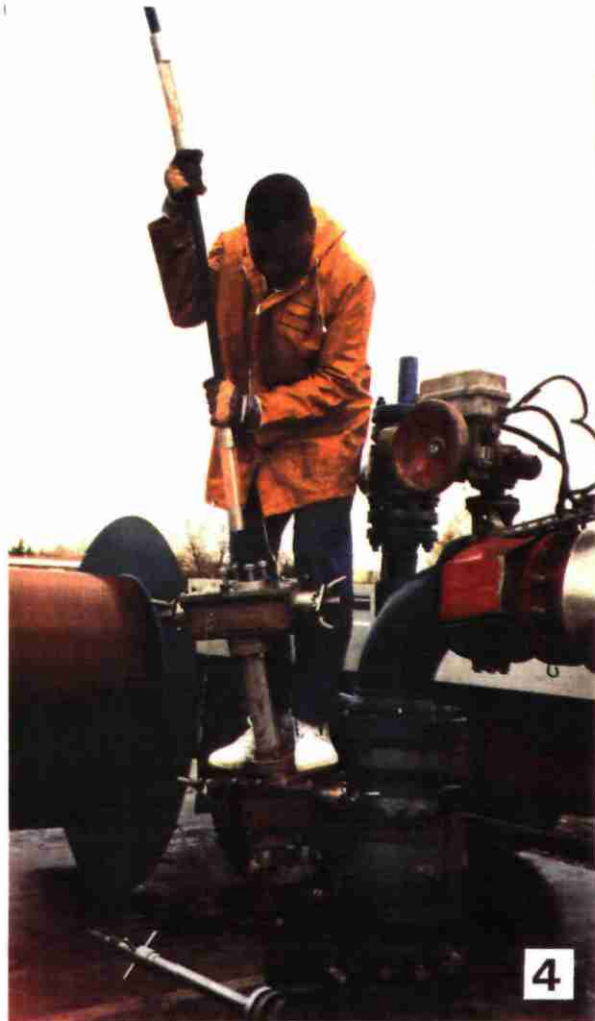
- Photo 3** Fixation directe des coupons sur le tube auxiliaire d'injection :
- a) vue générale du sas, des coupons et des colliers de protection contre les chocs sur les parois.
 - b) introduction du T.A.I. dans le puits.
- Photo 4** Introduction du T.A.I. dans le puits, noter que les deux porte-coupons sont encore vides, l'espacement est calculé pour permettre leur passage l'un après l'autre dans le sas.
- Photo 5** mise en place des coupons et fixation des colliers.



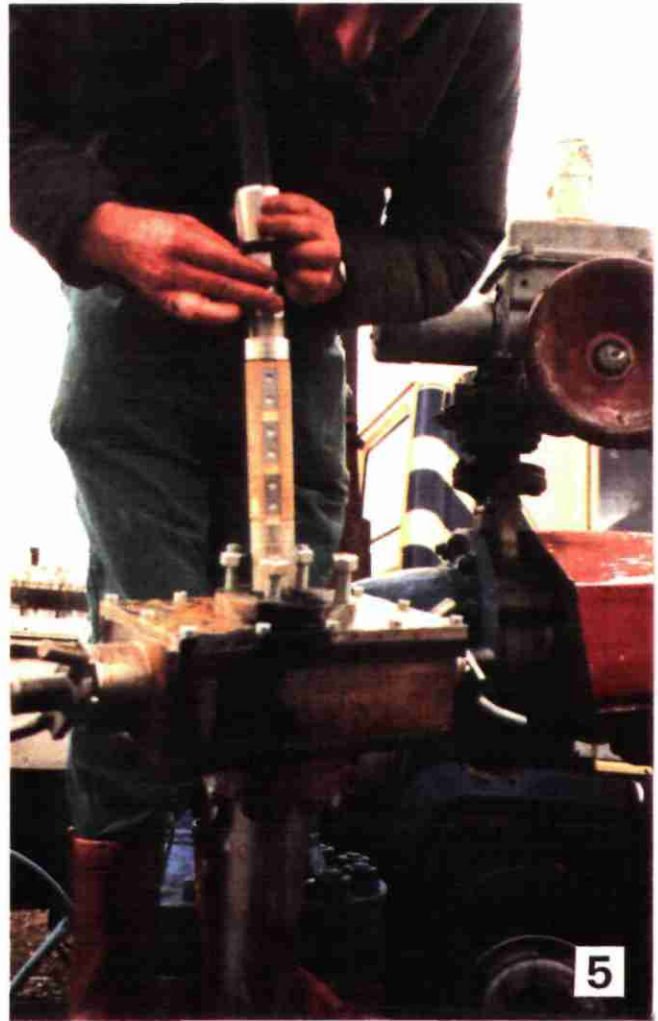
3a



3b



4



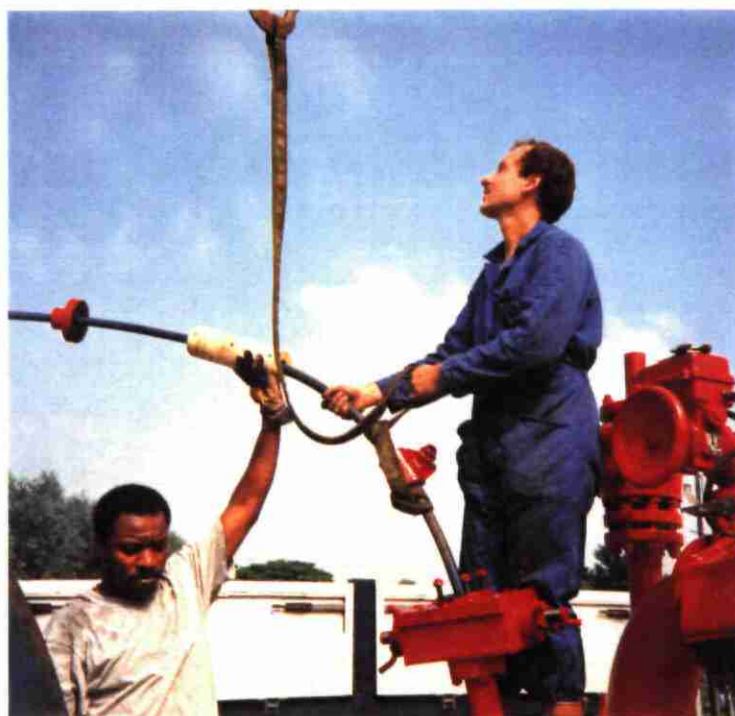
5

Photos 6 a) et b) protection des coupons devant être réimmergés dans le puits par des coquilles étanches remplies d'eau géothermale.

Photos 7 a) et b) nouveau dispositif porte-coupons en téflon, noter la présence d'enduits dans les trous et sous les coupons, entre les coupons et les plaquettes de séparation. Les colliers de fixation ont des formes coniques facilitant leur passage dans la bifurcation.



6a



6b



7a



7b

ANNEXE 4

RESULTATS DES MESURES DE VITESSE DE CORROSION EN SURFACE

PHOTOS DES COUPONS CORRODES

TENEURS EN FER DANS LE FLUIDE GEOTHERMAL

Etude de la corrosion en zones monophasique et diphasique sur la centrale géothermique de Chelles

<i>Centrale géothermique de Chelles : Mesure des vitesses de corrosion en surface</i>									
Référence du coupon	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Position en surface	I/4	I/7	P/4	P/7	I/4	I/7	P/4	P/7	I/7
Mis le	28/02/1992	28/02/1992	28/02/1992	28/02/1992	13/05/1992	13/05/1992	13/05/1992	13/05/1992	13/08/1992
Sorti le	13/05/1992	13/05/1992	13/05/1992	13/05/1992	16/11/1992	13/08/1992	16/11/1992	13/08/1992	16/11/1992
Durée d'immersion (jours)	75	75	75	75	187	92	187	92	95
Durée d'immersion (mois)	2.50	2.50	2.50	2.50	6.23	3.07	6.23	3.07	3.17
masse initiale (g)	11.7050	11.5966	11.6179	11.6975	11.6995	11.7214	11.6583	11.6299	11.6904
masse après retour (g)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	10.7951	11.2992	11.5239	11.5129	d.c.
<i>Masse après desquamation (en g) en fonction du temps cumulé (en mn)</i>									
0	11.2869	11.1345	11.4397	11.5229	***	11.2287	***	11.5014	***
5	11.1688	11.0137	11.3544	11.4226	10.1591	11.1233	11.4017	11.4013	***
10	11.1441	10.9967	11.3129	11.3895	10.0790	11.0728	11.3506	11.3759	***
15	11.1298	10.9865	11.2923	11.3699	10.0405	11.0388	11.3191	11.3644	***
20	11.1227	10.9798	11.2855	11.3602	10.0215	11.0220	11.3060	11.3569	***
25	11.1169	10.9767	11.2829	11.3578	10.0116	11.0093	11.2998	11.3527	***
30	11.1127	10.9745	11.2807	11.3553	10.0040	11.0026	11.2941	11.3492	***
35						10.9997		11.3456	***
40									
perte de masse (g)	0.5923	0.6221	0.3372	0.3422	1.6955	0.7217	0.3642	0.2843	***
Longueur (mm)	40	40	40	40	40	40	40	40	40
largeur (mm)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
épaisseur (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
diamètre trou (mm)	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Surface exposée (mm ²)	1726.90	1726.90	1726.90	1726.90	1726.90	1726.90	1726.90	1726.90	1726.90
densité (g/cm ³)	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86
Vitesse corrosion (mm/an)	0.212	0.223	0.121	0.123	0.244	0.211	0.052	0.083	***
commentaire	c.u.	c.u.	c.u.	c.u./c.l.-	c.l.+	c.u./c.l.+	c.u.	c.u./p-	c.e.
Référence du coupon	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>perte en masse (en g) entre 2 desquamations en fonction du temps cumulé (en mn)</i>									
5	0.1181	0.1208	0.0853	0.1003	***	0.1054	***	0.1001	***
10	0.0247	0.017	0.0415	0.0331	0.0801	0.0505	0.0511	0.0254	***
15	0.0143	0.0102	0.0206	0.0196	0.0385	0.034	0.0315	0.0115	***
20	0.0071	0.0067	0.0068	0.0097	0.019	0.0168	0.0131	0.0075	***
25	0.0058	0.0031	0.0026	0.0024	0.0099	0.0127	0.0062	0.0042	***
30	0.0042	0.0022	0.0022	0.0025	0.0076	0.0067	0.0057	0.0035	***
35						0.0029		0.0036	***
40									***

N.D. : non déterminé ; c.u. : corrosion uniforme ; c.l. : corrosion localisée ; p : corrosion par piqûre ; -, +, ++, +++ : degré d'importance
c.e. : coupon endommagé

Etude de la corrosion en zones monophasique et diphasique sur la centrale géothermique de Chelles

<i>Centrale géothermique de Chelles : Mesure des vitesses de corrosion en surface</i>									
Référence du coupon	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Position en surface	P/7	P/4	P/7	I/4	I/7	P/4	P/7	I/4	I/7
Mis le	13/08/1992	16/11/1992	16/11/1992	16/11/1992	16/11/1992	16/02/1993	16/02/1993	16/02/1993	16/02/1993
Sorti le	16/11/1992	16/02/1993	16/02/1993	16/02/1993	16/02/1993	10/06/1993	10/06/1993	10/06/1993	10/06/1993
Durée d'immersion (jours)	95	92	92	92	92	114	114	114	114
Durée d'immersion (mois)	3.17	3.07	3.07	3.07	3.07	3.80	3.80	3.80	3.80
masse initiale (g)	11.6354	11.6769	11.6277	11.6313	11.6379	11.6241	11.7212	11.6935	11.5104
masse après retour (g)	11.159	11.5413	11.3851	9.5283	9.4154	11.3795	11.4322	c.e.	c.e.
<i>Masse après desquamation (en g) en fonction du temps cumulé (en mn)</i>									
0	***	11.4430	11.3049	9.2081	8.9759	11.3097	11.3495	***	***
5	10.7047	11.3504	11.1792	9.1738	8.9417	11.2050	11.2356	***	***
10	10.6046	11.3216	11.1165	9.1578	8.9273	11.1472	11.1835	***	***
15	10.5223	11.3121	11.0875	9.1542	8.9239	11.1333	11.1521	***	***
20	10.4728	11.3047	11.0694	9.1514	8.9193	11.1221	11.1241	***	***
25	10.4387	11.3016	11.0612	9.1501	8.9182	11.1202	11.1046	***	***
30	10.4140	11.2990	11.0570	9.1485	8.9162	11.1197	11.1020	***	***
35	10.3972								
40	10.3854								
perte de masse (g)	1.2500	0.3779	0.5707	2.4828	2.7217	0.5044	0.6192	***	***
Longueur (mm)	40	40	40	40	40	40	40	40	40
largeur (mm)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
épaisseur (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
diamètre trou (mm)	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Surface exposée (mm ²)	1726.90	1726.90	1726.90	1726.90	1726.90	1726.90	1726.90	1726.90	1726.90
densité (g/cm ³)	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86
Vitesse corrosion (mm/an)	0.354	0.110	0.167	0.726	0.796	0.119	0.146	***	***
commentaire	c.l.+	p+	p++	c.l.-/p-	c.l.-/p-	c.l.-/p+	c.l.-/p++	c.e.	c.e.
Référence du coupon	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>perte en masse (en g) entre 2 desquamations en fonction du temps cumulé (en mn)</i>									
5	***	0.0926	0.1257	0.0343	0.0342	0.1047	0.1139	***	***
10	0.1001	0.0288	0.0627	0.016	0.0144	0.0578	0.0521	***	***
15	0.0823	0.0095	0.029	0.0036	0.0034	0.0139	0.0314	***	***
20	0.0495	0.0074	0.0181	0.0028	0.0046	0.0112	0.028	***	***
25	0.0341	0.0031	0.0082	0.0013	0.0011	0.0019	0.0195	***	***
30	0.0247	0.0026	0.0042	0.0016	0.002	0.0005	0.0026	***	***
35	0.0168								
40	0.0118								

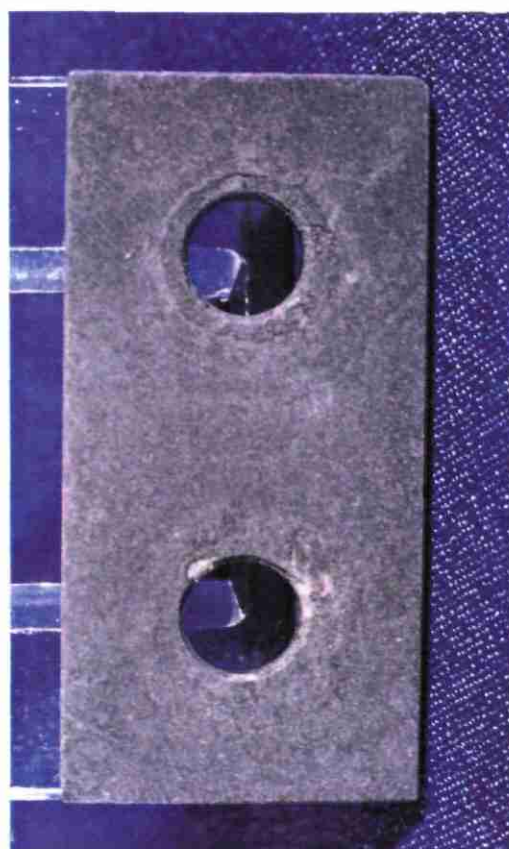
N.D. : non déterminé ; c.u. : corrosion uniforme ; c.l. : corrosion localisée ; p : corrosion par piqûre ; -, +, ++, +++ : degré d'importance
c.e. : coupon endommagé

Photos 1a et 1b :

Vue des deux faces du coupon n° 1 (I/4) immergé 2,5 mois en tête du puits d'injection. Le coupon est faiblement corrodé mais la corrosion devient plus importante du côté des extrémités qu'entre les deux trous de fixation. Ce fut néanmoins l'époque (1992) où les coupons étaient faiblement corrodés (vitesse de corrosion moyenne : 0,21 mm/an) en comparaison aux vitesses de corrosion mesurées en 1993 (0,80 mm/an pour le coupon 14, mais destructrice pour les coupons 17 et 18).

Photos 2a et 2b :

Vue des deux faces du coupon n° 4 (P/7) immergé 2,5 mois en tête du puits de production. Le coupon est à peine corrodé sauf au voisinage des trous de fixation où l'eau a pu s'infiltrer (vitesse de corrosion moyenne : 0,12 mm/an).



Photos 3a et 3b :

Vue des deux faces du coupon n° 14 (I/7) immergé 3 mois en tête du puits d'injection. Il s'agit d'un des deux coupons ayant subi le remplacement d'un tubage à l'intérieur de la centrale (en aval du puits de production). Sa corrosion fut très importante (0,80 mm/an) et non uniforme. Il s'agit d'une alternance de zones à corrosion localisée (parfois profondes) et de zones quasiment intactes.

Photos 4a et 4b :

Vue des deux faces du coupon n° 15 (P/4) immergé 3,8 mois en tête du puits de production. Comme dans le cas précédent, il ne s'agit plus d'une corrosion uniforme, mais d'une corrosion localisée dense et plus ou moins superficielle ne conduisant qu'à une faible vitesse de corrosion (0,12 mm/an). Les zones non corrodées ont gardé leur brillance : métal quasiment intact. A noter que ce coupon a été immergé pendant le même espace de temps que les deux coupons suivants référencés 17 et 18 placés en tête du puits d'injection.

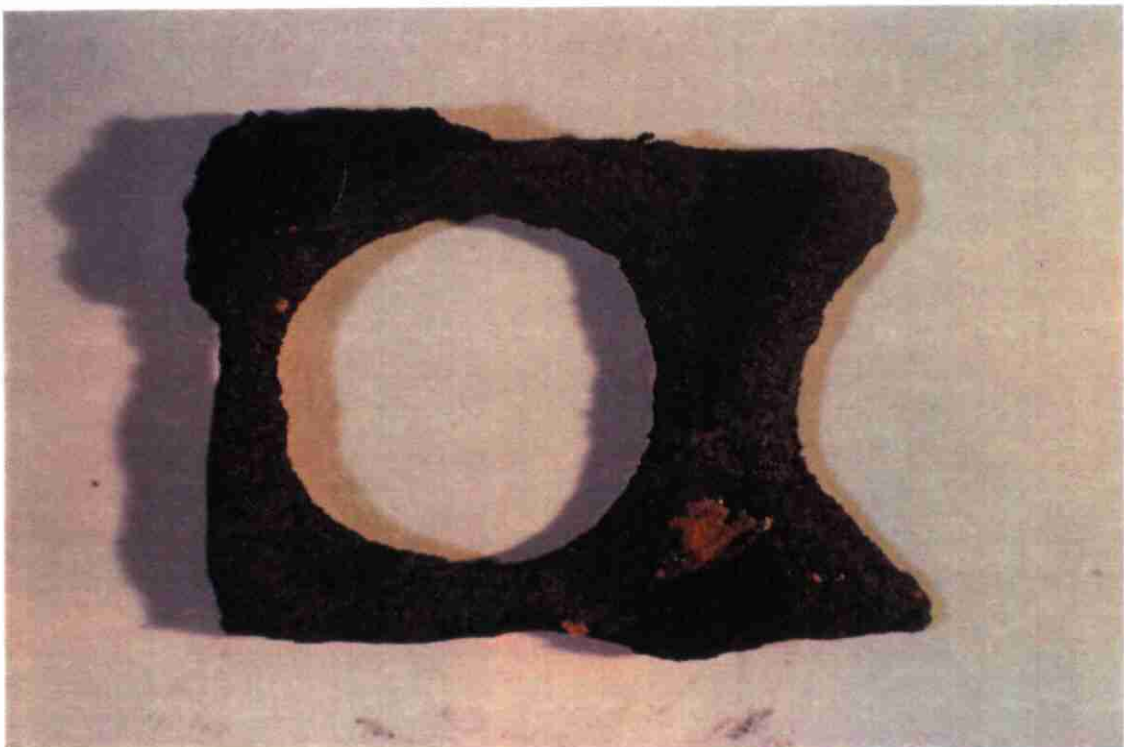


Photos 5 et 6 :

Vue des deux coupons n° 17 (I/4) et 18 (I/7) immergés 3,8 mois en tête du puits d'injection. Leur corrosion fut très destructive cette fois-ci bien qu'aucun incident n'ait été signalé. Noter l'état normal du coupon n° 15 immergé pendant cette même période en tête du puits de production.



5



6

Analyse du Fer en mg/l (IMRG)	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993
Fe dissous (production)	0.30	0.32	0.32	0.30	0.41	0.32	0.32	0.20
Fe total (production)	-	0.35	2.50	0.47	0.41	0.34	0.38	0.40
Fe dissous (T.A.I.)	-	-	0.20	0.24	0.23	0.17	-	0.17
Fe total (T.A.I.)	-	-	0.40	0.44	0.24	0.18	-	0.28
Fe dissous (injection)	-	-	-	-	0.43	0.93	0.51 ?	0.21
Fe total (injection)	-	-	-	-	0.44	1.11	0.42 ?	1.06
Analyse du Fer en mg/l (ANA)	15/04/1992	15/07/1992	13/08/1992	21/10/1992	16/11/1992	29/01/1993	16/02/1993	10/06/1993
Fe dissous (production)	0.15	0.3	-	0.46	-	0.45	-	-
Fe total (production)	-	0.3	-	0.41	-	0.45	-	-
Fe dissous (T.A.I.)	-	-	-	0.36	-	0.38	-	-
Fe total (T.A.I.)	-	-	-	0.43	-	0.38	-	-
Fe dissous (injection)	-	-	-	-	-	1.10	-	-
Fe total (injection)	-	-	-	-	-	1.10	-	-

Teneurs en fer du fluide géothermal dosées à l'IMRG et aux laboratoires du BRGM (ANA)

ANNEXE 5

RESULTATS DES MESURES DE VITESSE DE CORROSION

DANS LE Puits DE PRODUCTION

PHOTOS DES COUPONS CORRODES



Référence	5	6	7	8	17	18	2	22	32	10	25	27	16	30	
Profondeur (m)	150	150	60	60	4	4	150	150	150	60	60	60	4	4	
Mis le	15/04/1992	15/04/1992	15/04/1992	15/04/1992	15/04/1992	15/04/1992	15/04/1992	15/07/1992	15/07/1992	15/04/1992	15/07/1992	15/07/1992	15/04/1992	15/07/1992	
sorti le	15/07/1992	15/07/1992	15/07/1992	15/07/1992	15/07/1992	15/07/1992	21/10/1992	21/10/1992	21/10/1992	21/10/1992	21/10/1992	21/10/1992	21/10/1992	21/10/1992	
Durée d'immersion (jours)	91	91	91	91	91	91	189	98	98	189	98	98	189	98	
Durée d'immersion (mois)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	6.3	3.3	3.3	6.3	3.3	3.3	6.3	3.3	
masse initiale (g)	11.5984	11.6854	11.6362	11.6864	11.627	11.62	11.6199	12.6866	11.5512	11.6284	12.6846	11.6072	11.5843	11.6543	
masse retour avec dépôt (g)							9.861	11.6022	10.5029	10.8929	10.932	10.8528	9.6622	10.1149	
différence (g)							1.7589	1.0844	1.0483	0.7355	1.7526	0.7544	1.9221	1.5394	
masse après desquamation en fonction du temps cumulé															
Référence	5	6	7	8	17	18	2	22	32	10	25	27	16	30	
Temps (mn)	0	11.2591	11.2328	11.4368	11.1493	11.4723	11.5079	9.7764	11.2375	10.1765	10.8325	10.2835	10.4862	9.5118	10.0064
	5	11.1347	11.1198	11.3295	11.0082	11.4464	11.4845	9.6011	11.1684	10.0914	10.6416	10.1889	10.3913	9.3107	9.8027
	10	11.0485	11.0572	11.2811	10.9276	11.4441	11.4814	9.5147	11.146	10.0419	10.5397	10.1321	10.3422	9.0864	9.5822
	15	11.0038	11.0232	11.2557	10.8637	11.4425	11.4798	9.4289	11.1385	10.0264	10.4424	10.1236	10.3066	8.9757	9.4905
	20	10.9733	11.0003	11.2407	10.8239	11.4417	11.4794	9.3661	11.1325	10.0197	10.3723	10.0877	10.2768	8.9115	9.4335
	25	10.9545	10.9897	11.2389	10.7842	11.4414	11.4793	9.2844	11.1275	10.0166	10.3052	10.071	10.2692	8.8791	9.4043
	30							9.2342			10.2604			8.8646	9.3955
masse finale (g)	10.9545	10.9897	11.2389	10.7842	11.4414	11.4793	9.0089	11.1245	10.0152	10.0952	10.0671	10.2665	8.8615	9.3926	
perte de masse (g)	0.6439	0.6957	0.3973	0.9022	0.1856	0.1407	2.611	1.5621	1.536	1.5332	2.6175	1.3407	2.7228	2.2617	
Longueur (mm)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
largeur (mm)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
épaisseur (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
diamètre des trous (mm)	6	6	6	6	6	6	6	0	6	6	0	6	6	6	
densité (g/cm3)	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	
Surface totale (mm2)	1802.30	1802.30	1802.30	1802.30	1802.30	1802.30	1802.30	1840.00	1802.30	1802.30	1840.00	1802.30	1802.30	1802.30	
V corr (mm/an)	0.18	0.20	0.11	0.26	0.05	0.04	0.36	0.40	0.40	0.21	0.67	0.35	0.37	0.59	
surface exposée au fluide	743.45	743.45	743.45	743.45	743.45	743.45	743.45	800.00	743.45	743.45	800.00	743.45	743.45	743.45	
V corr (mm/an)	0.442	0.478	0.273	0.619	0.127	0.097	0.863	0.925	0.979	0.507	1.550	0.855	0.900	1.442	
commentaire (face exposée)	c.u.	c.c.	c.u.	c.c.	c.u.	c.u.	c.u.	c.c. +	p. ++	c.u. /p-	c.u. /p+	p. +	c.c. +	c.c. +	
(face abritée)	c.c. +	c.c. ++	c.c. +	c.c. +	c.u.	c.u.	c.c. +++	c.c. +	c.c. ++	c.c. +++	c.c. +++	c.c. ++	c.c. +	c.c. ++	

N.D. : non déterminé; c.u. : corrosion uniforme ; c.c. : corrosion caverneuse ; p : corrosion par piqûre ; -, +, ++, +++ : degré d'importance

Référence	21	33	35	12	19	23	29	34	24	36	
Profondeur (m)	150	150	150	60	60	60	60	60	4	4	
Mis le	15/07/1992	21/10/1992	21/10/1992	15/04/1992	21/10/1992	21/10/1992	15/07/1992	21/10/1992	21/10/1992	21/10/1992	
sorti le	29/01/1993	29/01/1993	29/01/1993	29/01/1993	29/01/1993	29/01/1993	29/01/1993	29/01/1993	29/01/1993	29/01/1993	
Durée d'immersion (jours)	198	100	100	289	100	100	198	100	100	100	
Durée d'immersion (mois)	6.6	3.3	3.3	9.6	3.3	3.3	6.6	3.3	3.3	3.3	
masse initiale (g)	12.6874	11.7467	11.6278	11.6983	11.5863	12.6899	11.732	11.7123	12.6816	11.6977	
masse retour avec dépôt (g)	11.241	11.101	10.6812	10.7262	11.3786	12.359	10.0859	11.0627	11.9809	11.2408	
différence (g)	1.4464	0.6457	0.9466	0.9721	0.2077	0.3309	1.6461	0.6496	0.7007	0.4569	
masse après desquamation en fonction du temps cumulé											
Référence	21	33	35	12	19	23	29	34	24	36	
Temps (mn)	0	10.8573	10.9697	10.4876	10.4607	11.303	12.2976	9.8611	10.9201	11.7947	11.1844
	5	10.7217	10.8558	10.3585	10.3306	11.1776	12.1836	9.7461	10.8076	11.6395	11.083
	10	10.5597	10.7794	10.2425	10.1549	11.1306	12.0972	9.5628	10.7177	11.525	11.0131
	15	10.4682	10.7164	10.1834	10.003	11.111	12.0551	9.4578	10.6419	11.4625	10.9683
	20	10.3969	10.669	10.1451	9.9164	11.0988	12.0335	9.3661	10.5976	11.4244	10.933
	25	10.351	10.6446	10.1267	9.8761	11.0898	12.0142	9.2904	10.5719	11.3875	10.9181
	30										
masse finale (g)	10.3494	10.6361	10.1244	9.8629	11.0884	12.0095	9.2601	10.5655	11.3671	10.9094	
perte de masse (g)	2.338	1.1106	1.5034	1.8354	0.4979	0.6804	2.4719	1.1468	1.3145	0.7883	
Longueur (mm)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
largeur (mm)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
épaisseur (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
diamètre des trous (mm)	0	6	6	6	6	0	6	6	0	6	
densité (g/cm3)	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	
Surface totale (mm2)	1840.00	1802.30	1802.30	1802.30	1802.30	1840.00	1802.30	1802.30	1840.00	1802.30	
V corr (mm/an)	0.30	0.29	0.39	0.16	0.13	0.17	0.32	0.30	0.33	0.20	
surface exposée au fluide	800.00	743.45	743.45	743.45	743.45	800.00	743.45	743.45	800.00	743.45	
V corr (mm/an)	0.685	0.694	0.939	0.397	0.311	0.395	0.780	0.716	0.763	0.492	
commentaire (face exposée)	p. ++	p. +	p. ++	p. ++	p. ++	p. +	p. +++	p. +	p. +	p. +	
(face abritée)	c.c. ++	c.c. ++	c.c. +	c.c. +++	p. ++	c.c. +	c.c. +++	c.c. ++	c.c. ++	c.c. +	

N.D. : non déterminé ; c.u. : corrosion uniforme ; c.c. : corrosion caverneuse ; p : corrosion par piqûre ; -, +, ++, +++ : degré d'importance

Référence	109	113	114	117	103	110	111	112	106	115	116	118	
Profondeur (m)	150	150	150	150	60	60	60	60	4	4	4	4	
Mis le	10/03/1993	10/03/1993	10/03/1993	10/03/1993	10/03/1993	10/03/1993	10/03/1993	10/03/1993	10/03/1993	10/03/1993	10/03/1993	10/03/1993	
sorti le	28/06/1993	28/06/1993	28/06/1993	28/06/1993	28/06/1993	28/06/1993	28/06/1993	28/06/1993	28/06/1993	28/06/1993	28/06/1993	28/06/1993	
Durée d'immersion (jours)	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
Durée d'immersion (mois)	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	
masse initiale (g)	11.6995	12.688	12.6844	12.6912	11.5732	12.6808	12.665	12.686	11.6042	12.6923	12.6865	12.6957	
masse retour avec dépôt (g)	11.6272	12.5803	12.5757	12.5553	11.4585	12.5518	12.5637	12.5423	11.4646	12.5769	12.6029	12.5913	
différence (g)	0.0723	0.1077	0.1087	0.1359	0.1147	0.129	0.1013	0.1437	0.1396	0.1154	0.0836	0.1044	
masse après desquamation en fonction du temps cumulé													
Référence	109	113	114	117	103	110	111	112	106	115	116	118	
Temps (mn)	0	11.6272	12.5803	12.5757	12.5553	11.4585	12.5518	12.5637	12.5423	11.4646	12.5769	12.6029	12.5913
	5	11.5019	12.5214	12.5198	12.4837	11.3912	12.4823	12.4777	12.4706	11.3829	12.501	12.522	12.5249
	10	11.4762	12.4996	12.4998	12.466	11.3482	12.4602	12.4707	12.4463	11.3281	12.4427	12.4503	12.4702
	15	11.464	12.4925	12.4967	12.461	11.3373	12.4465	12.4427	12.436	11.3015	12.4213	12.4346	12.4508
	20	11.457	12.4864	12.494	12.4596	11.3351	12.4403	12.438	12.4289	11.292	12.4134	12.4225	12.4465
	25	11.4548	12.4846	12.4931	12.459	11.334	12.4363	12.4359	12.4269	11.2863	12.4082	12.4195	12.4453
	30												
masse finale (g)	11.4547	12.484	12.493	12.4587	11.3339	12.436	12.4351	12.4266	11.2855	12.4075	12.4167	12.4452	
perte de masse (g)	0.2448	0.204	0.1914	0.2325	0.2393	0.2448	0.2299	0.2594	0.3187	0.2848	0.2698	0.2505	
Longueur (mm)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
largeur (mm)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
épaisseur (mm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
diamètre des trous (mm)	6	0	0	0	6	0	0	0	6	0	0	0	
densité (g/cm ³)	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	7.86	
Surface totale (mm ²)	1802.30	1840.00	1840.00	1840.00	1802.30	1840.00	1840.00	1840.00	1802.30	1840.00	1840.00	1840.00	
V corr (mm/an)	0.057	0.047	0.044	0.053	0.056	0.056	0.053	0.060	0.075	0.065	0.062	0.057	
surface exposée au fluide	743.45	800.00	800.00	800.00	743.45	800.00	800.00	800.00	743.45	800.00	800.00	800.00	
V corr (mm/an)	0.139	0.108	0.101	0.123	0.136	0.129	0.121	0.137	0.181	0.150	0.142	0.132	
commentaire (face exposée)	c.u./p-	c.u./p+	c.u./p+	c.u./p++	c.u./p+	c.u./p-	c.u./p++	c.u./p++	c.u./p++	c.u./p+	c.u./p+	c.u./p+	
(face abritée)	c.u./p-	a.c./c.l.--	a.c./c.l.--	a.c./c.l.+	a.c./c.l.+	a.c./c.l.-	a.c./c.l.+	a.c./c.l.+	a.c./c.l.+	a.c./c.l.-/p-	a.c./p-	a.c./c.l.-	

N.D. : non déterminé ; c.u. : corrosion uniforme ; c.l. : corrosion localisée ; p : corrosion par piqûre ; -, +, ++, +++ : degré d'importance
a.c. : absence de corrosion en certains endroits

Photos 7 et 8

Vue des coupons n° 10 et 25 fixés respectivement pendant 6,3 et 3,3 mois sur l'ancien dispositif porte-coupons à 60 mètres de profondeur. Les faces exposées au fluide 7a et 8a présentent une corrosion généralisée avec une densité importante de piqûres. Les faces posées sur le support 7b et 8b présentent des zones de corrosion localisée causée par l'infiltration et la stagnation de l'eau géothermale sur ce côté.



7a



7b



8a



8b

Photos 9 et 10 :

Vue des coupons n° 109 et 110 fixés pendant 3,7 mois sur les nouveaux dispositifs porte-coupons respectivement à 150 et à 60 mètres de profondeur. La face exposée au fluide du coupon 109 (9a) présente une alternance de corrosion localisée (mais superficielle) et de corrosion généralisée. Dans le cas du coupon 110, cette face (10a) présente des piqûres peu profondes notamment près des extrémités. Les faces posées sur le support et protégées par des enduits (9b et 10b) ne sont que très faiblement atteintes sauf aux extrémités où l'on observe une légère corrosion due à une infiltration d'eau géothermale.



9a



9b



10a



10b

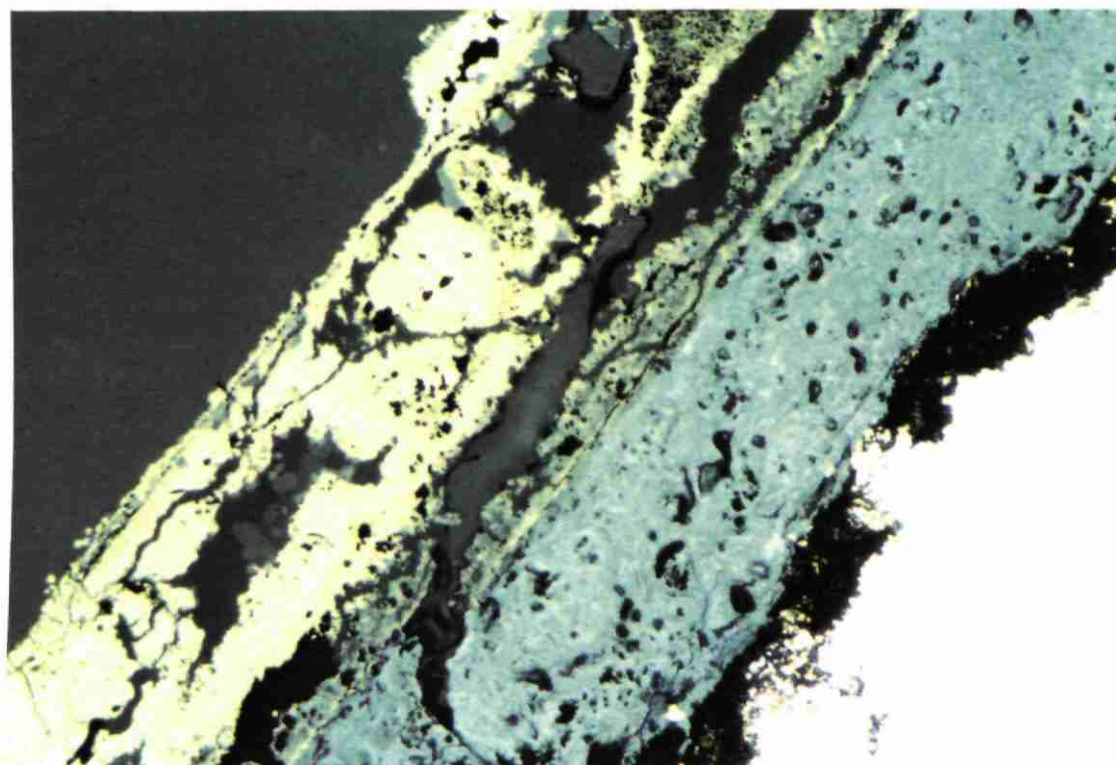
ANNEXE 6

EXAMEN DES SECTIONS POLIES AU MICROSCOPE METALLOGRAPHIQUE

Coupon GCHE 3 :

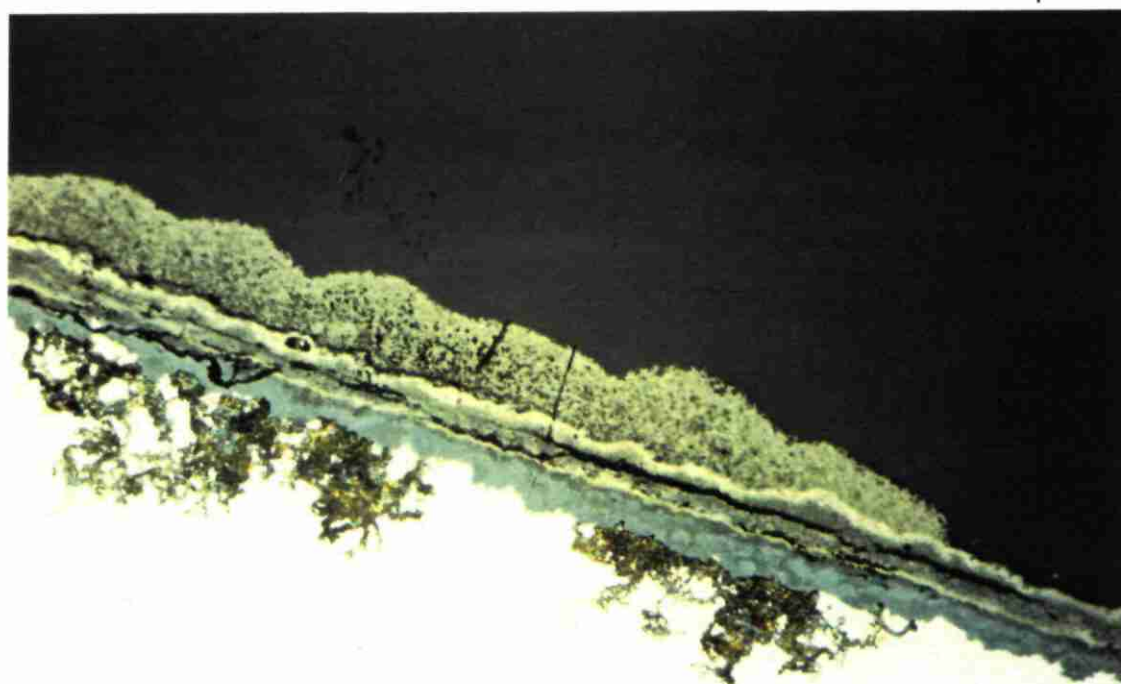
Photo 1 : Les phases blanches à l'intérieur de la ligne de séparation représentent le restant de mackinawite (envahie par la Goethite). De l'autre côté de cette ligne, on peut observer de la mackinawite en association avec la Goethite et jouxtant la silice (Quartz ?) baignant dans la résine. A l'extérieur, on observe des carbonates, de la pyrrhotite microcristalline en compétition avec la pyrite. La rouille sur le métal est antérieure au polissage de la section (x 116).

Photo 2 : Coupon faiblement corrodé, les carbonates sont associés aux hydroxydes de fer. Croissance des sulfures de fer (pyrrhotite foisonnante) à partir de la ligne de séparation. (x 232).



1

100 μ



2

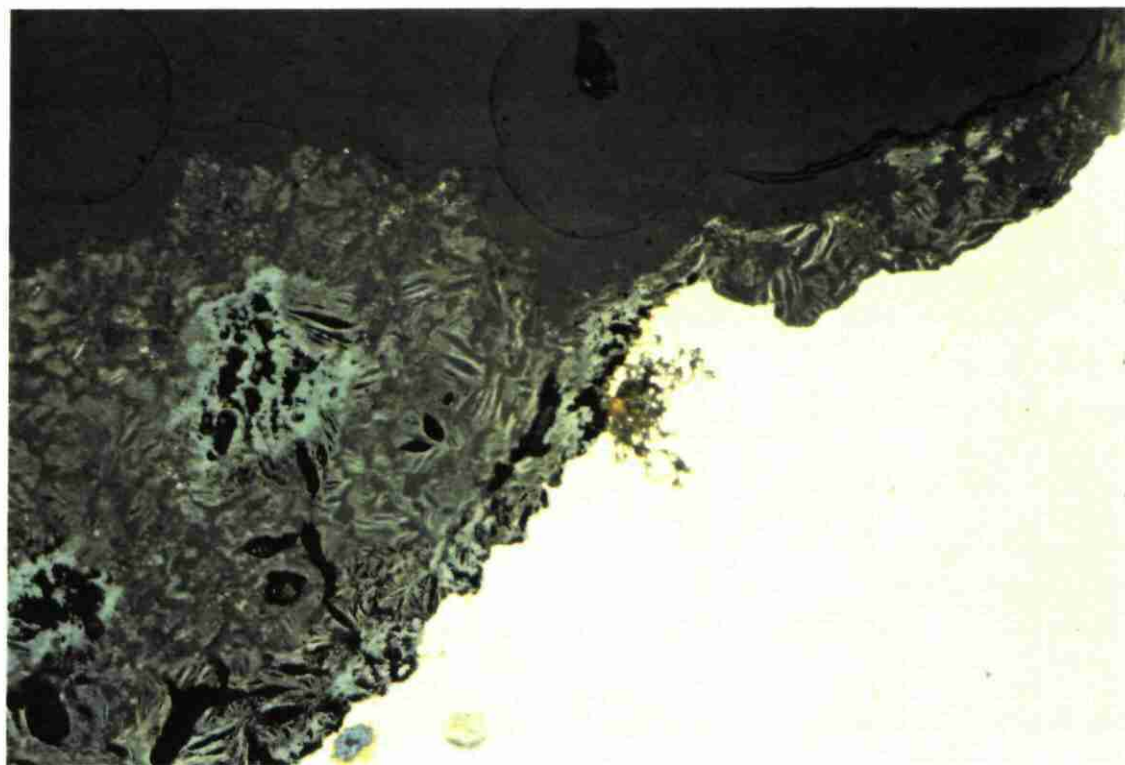
50 μ

Coupon GCHE 3 : (suite)

Photo 3 : Schéma montrant le métal bien grignoté sans oxydes de fer (solubilisés ou évacués) gardant en mémoire le contour initial du coupon. Le métal est entouré de mackinawite sur fond de silice et l'on observe sur la gauche un début d'envahissement de cette mackinawite par la goethite. A noter que la forme de la mackinawite est celle du squelette bactérien (x 232).

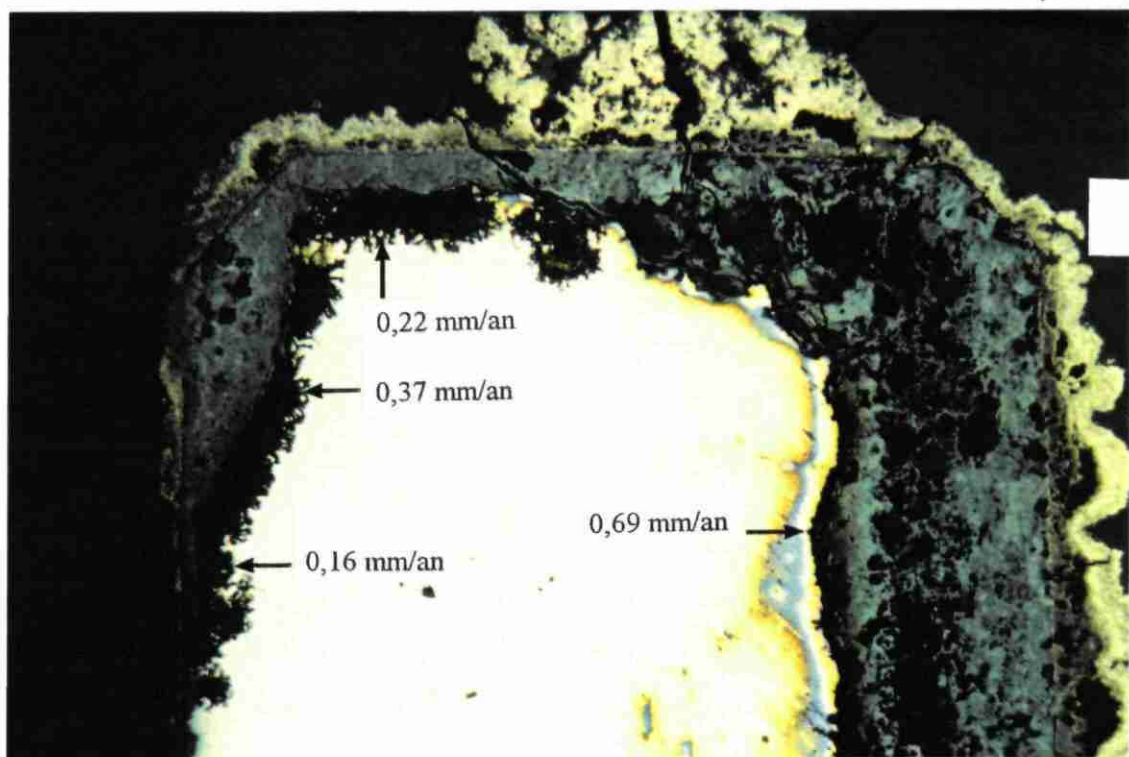
Coupon GCHE 11 :

Photo 4 : Allure générale d'une section avec le métal au centre entouré de produits de corrosion ayant gardé la forme initiale de cette section, la mackinawite supportée par un fond de silice est envahie par les produits d'oxydation du fer. Ces produits sont constitués d'oxydes de fer (Fe_xO_y) et d'hydroxydes de fer hydratés (oxy-hydroxydes) : α -FeOOH (Goethite), γ -FeOOH (Lépidocrocite) et sont difficiles à discerner par la métallographie. Ces produits sont couverts par un dépôt irrégulier de sulfures de fer. Ces sulfures se détachent des FeOOH en ligne droite remplie de résine, c'est un détachement naturel, pas mécanique. A noter la présence de carbonates interstitiels dans les sulfures et l'importance de la corrosion (x 58).



50 μ

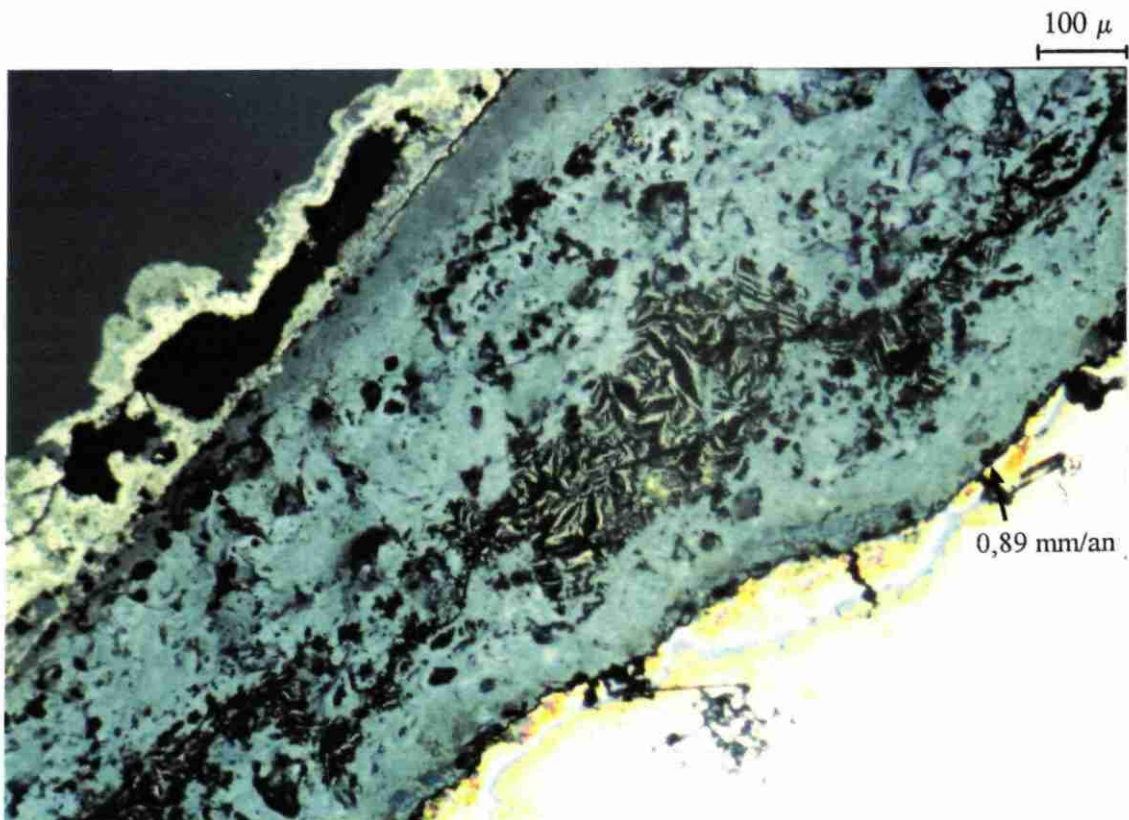
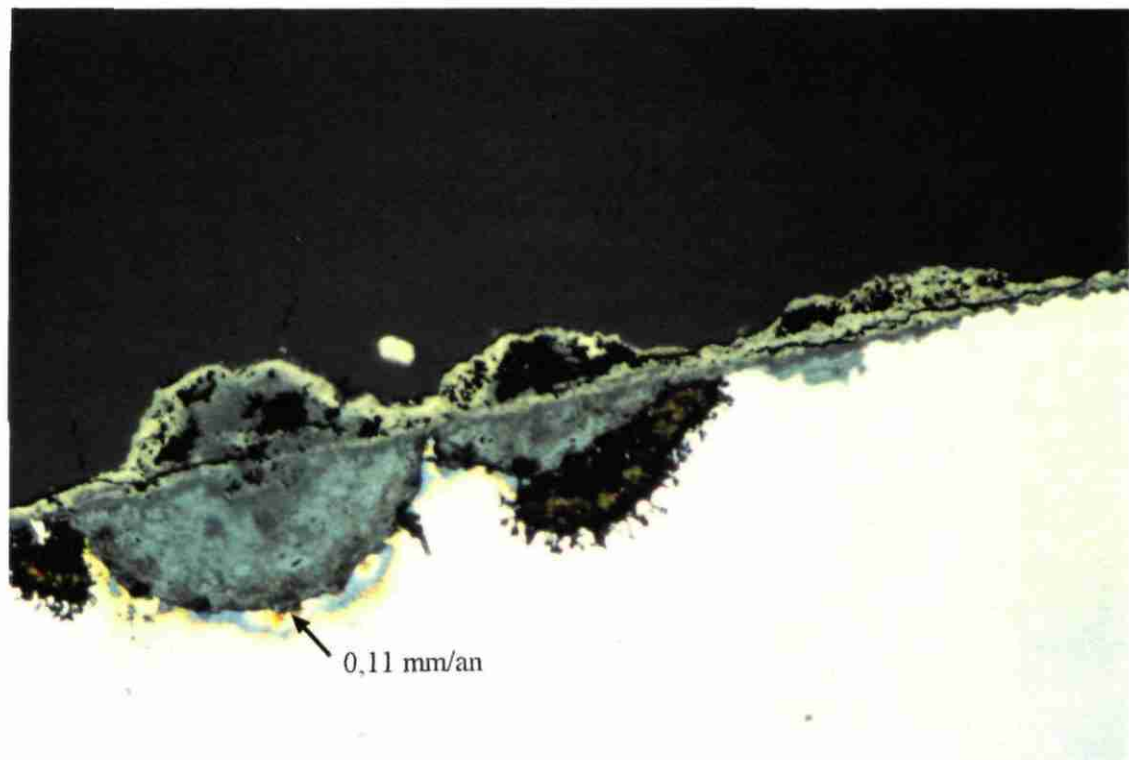
200 μ



Coupon GCHE 11 : (suite)

Photo 5 : Section présentant des corrosions localisées : les poches sont remplies d'oxydes de fer, elles sont recouvertes de dépôts d'oxydes de fer, l'ensemble étant recouvert de sulfures de fer. A noter la superposition et la proportionalité des tailles (x 232).

Photo 6 : photo montrant un résidu de mackinawite noyé dans la goethite : la corrosion est forte en cette zone et l'on observe un léger dépôt de sulfures de fer constitué d'un mélange de pyrite-pyrrhotite, d'autres phases pourraient être associées à la pyrrhotite telle que la linnéite qui est un sulfure mixte contenant du nickel et/ou du cobalt (x 116).



Coupon GCHE 28 :

Photo 7 : Vue d'un coin du coupon et des différentes couches qui se superposent :
Fer/Goethite/Mackinawite dans une matrice très riche en silice (90 %)/Goethite
mélangée à des petits grains de carbonate (x 116).

Coupon GCHE 108 :

Photo 8 : Couche épaisse de sulfures de fer (pyrrhotite) en équilibre avec FeOOH,
alternance FeOOH/FeS, traces de mackinawite envahie par la goethite, structure
dentritique pour la pyrrhotite (x 232).



7

100 μ

50 μ

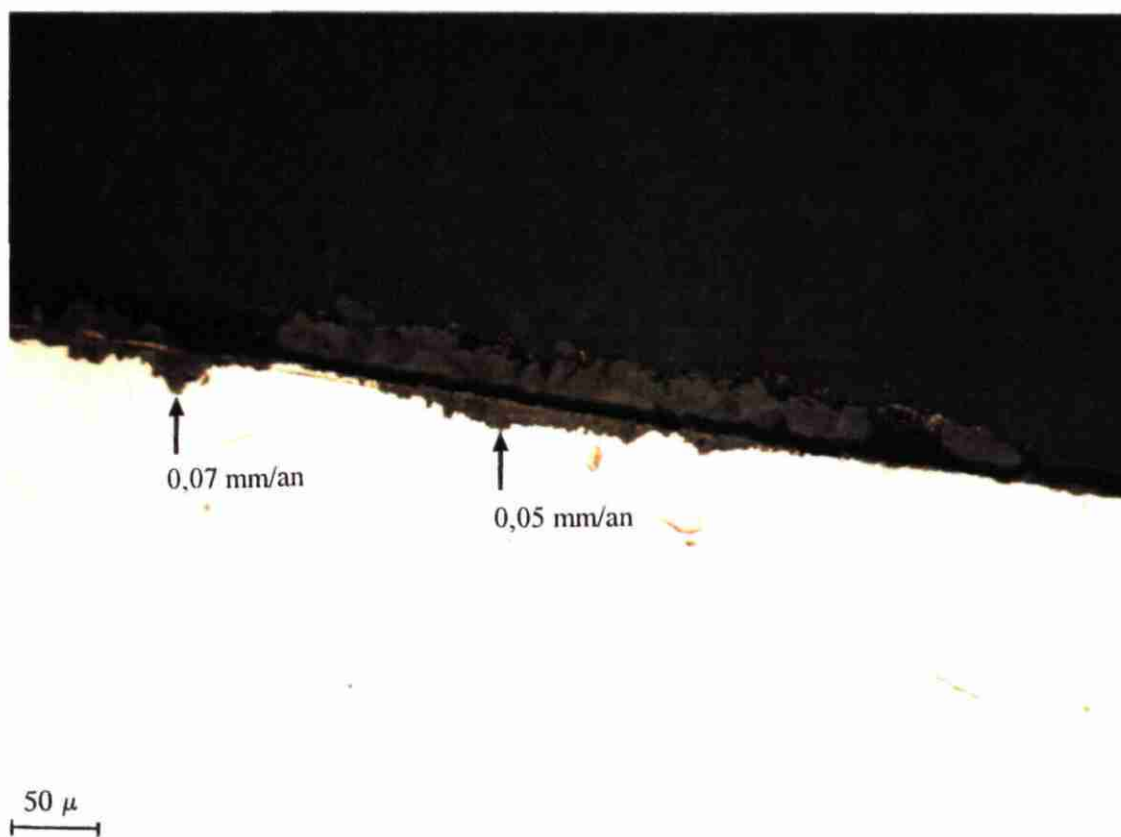


8

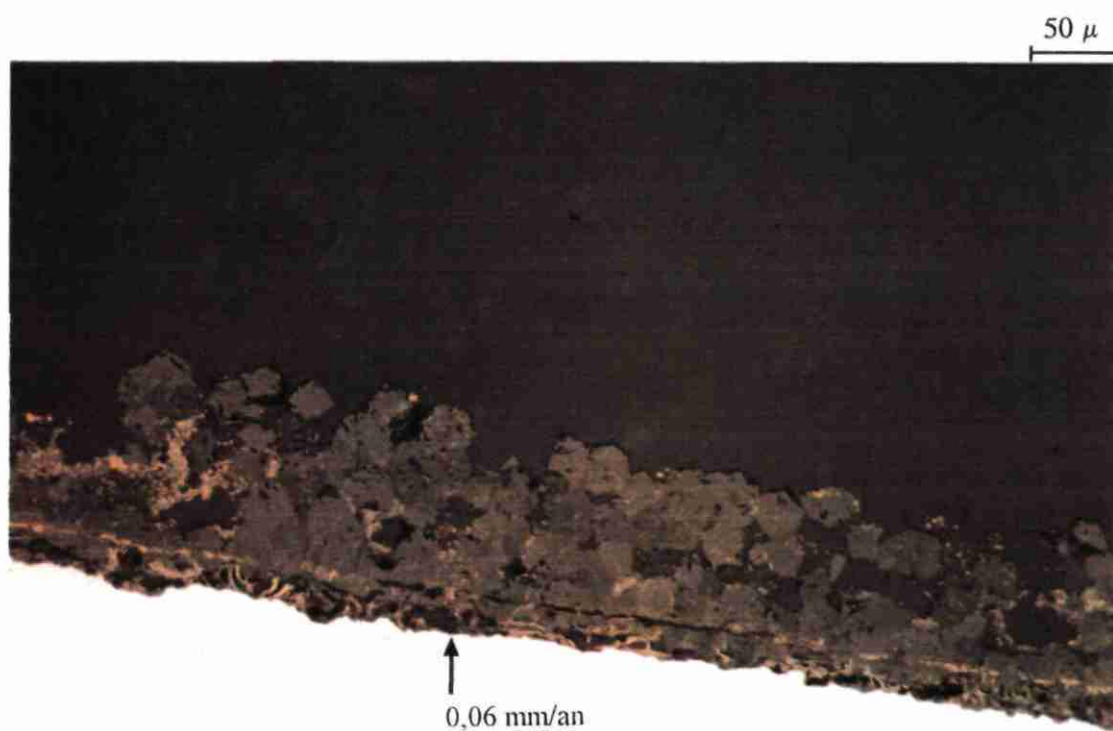
Coupon GCHE 102 :

Photo 9 : Vue de la face abritée d'un coupon : la corrosion est très faible en cet endroit, on rencontre la goethite, la limonite (hydroxyde de fer encore plus hydraté) avec un peu de mackinawite résiduelle à l'intérieur du pourtour initial du coupon et des carbonates à l'extérieur (x 232).

Photo 10 : Vue de la face abritée du coupon montrant des carbonates majoritaires entourant un liseré de mackinawite. Noter le début de cristallisation de la pyrrhotite entre les grains de carbonates (x 232).



9

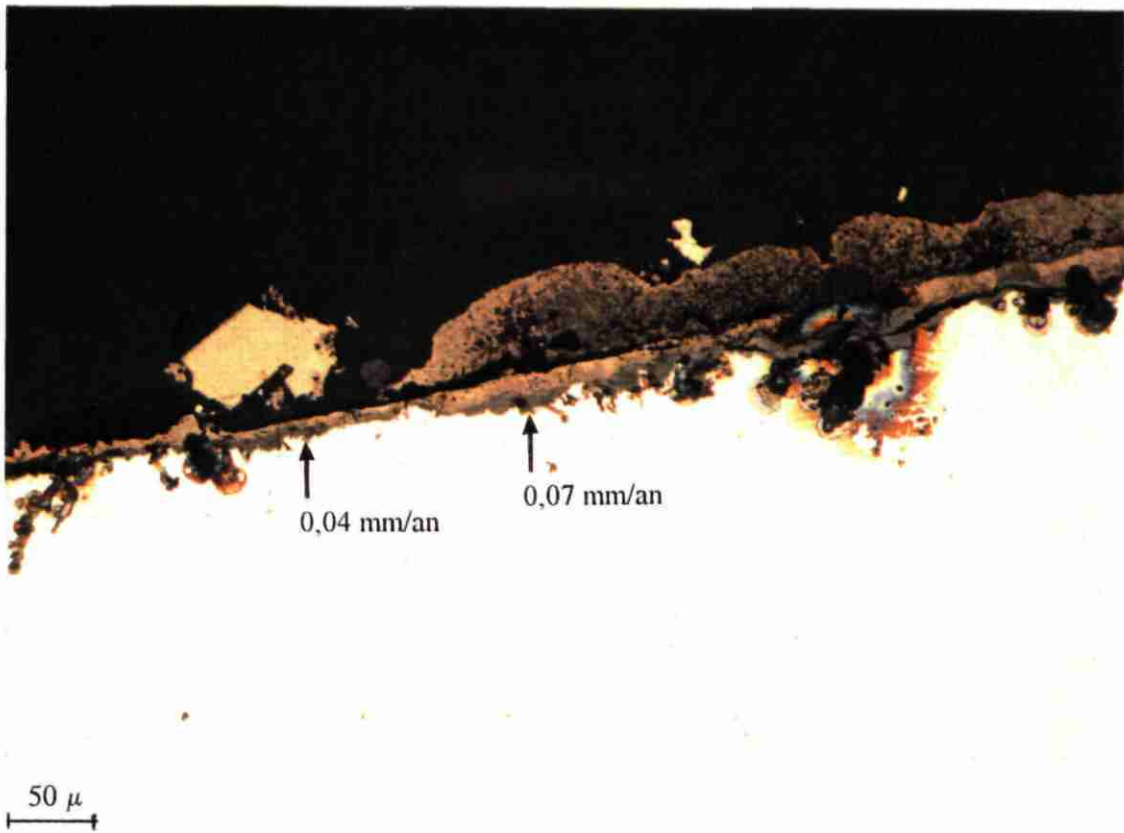


10

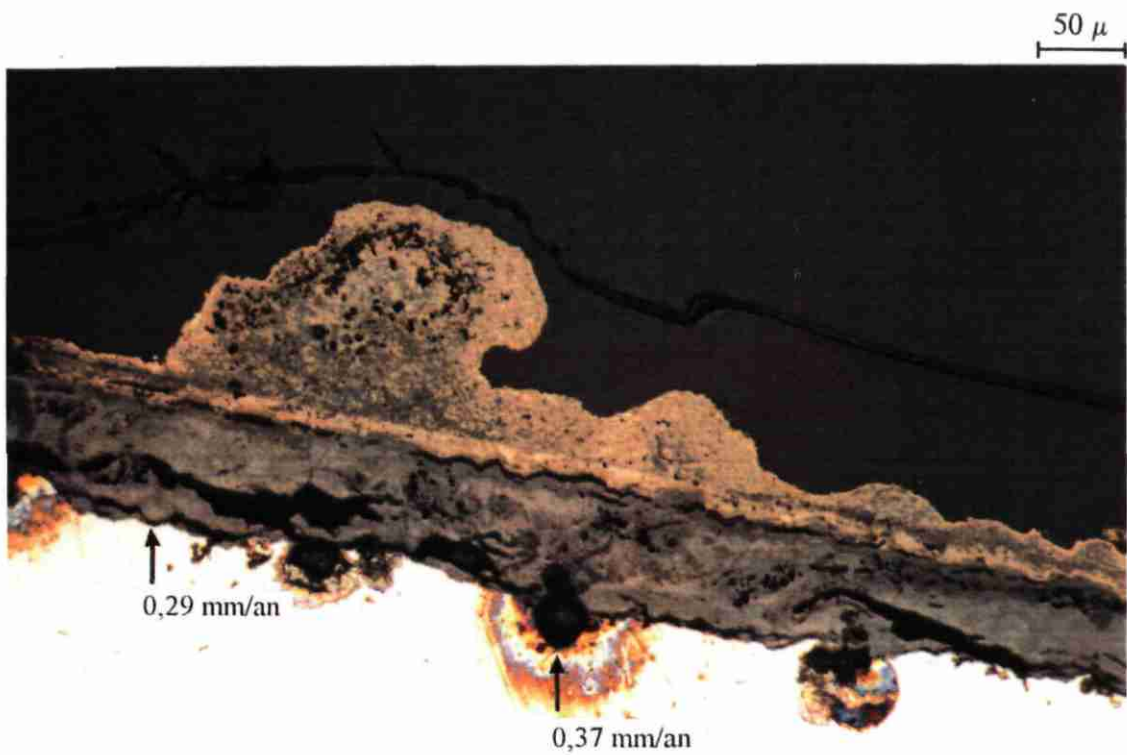
Coupon GCHE 105 :

Photo 11 : Vue de la face exposée du coupon : ex-croissance de sulfures de fer (pyrrhotite) sur les oxyhydroxydes de fer et présence de grains de pyrite (x 232).

Photo 12 : Ex-croissance importante de pyrrhotite sur la goethite (FeOOH). Présence de SiO₂ et de FeOOH avec la pyrrhotite. A noter la présence d'une ligne de séparation bien droite (x 232).



11

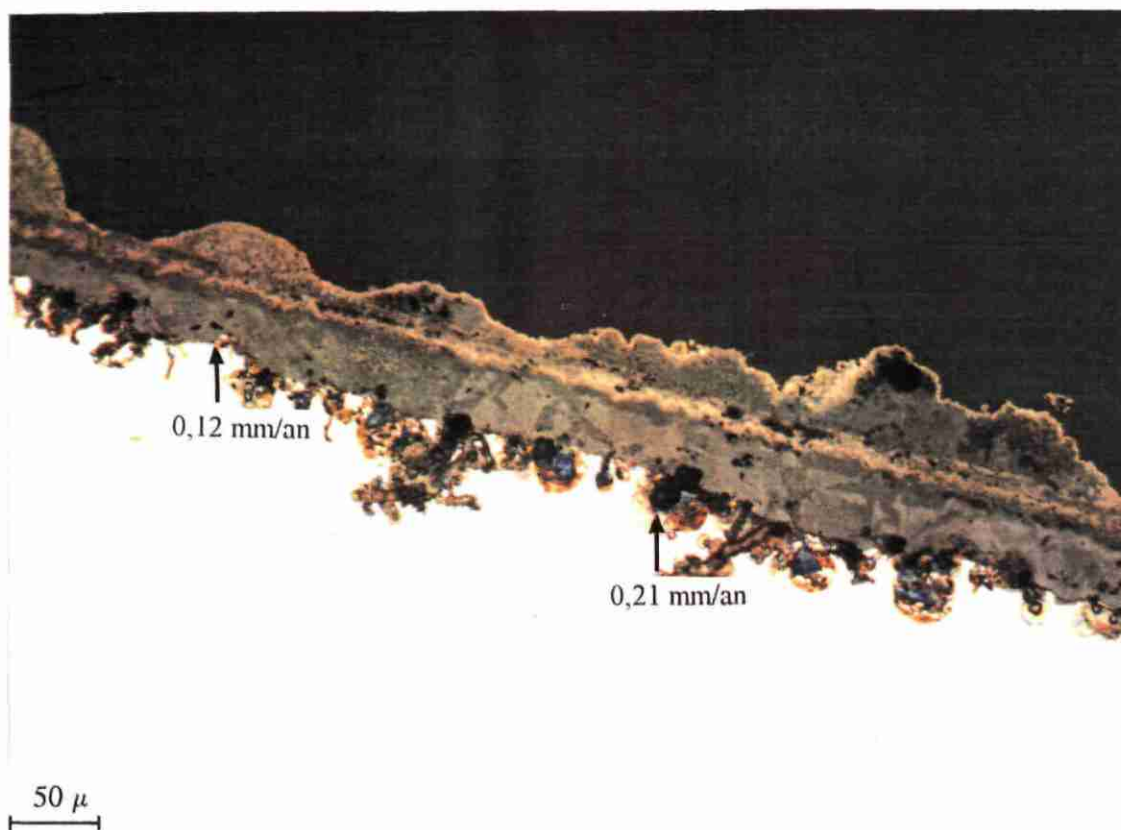


12

Coupon GCHE 105 : (suite)

Photo 13 : Cliché montrant l'alternance oxydes/sulfures/oxydes/sulfures (x 232).

Photo 14 : Vue de la face abritée du coupon montrant dans l'ordre : la mackinawite jouxtant le métal, les carbonates qui lui sont associés, un début de cristallisation de la pyrrhotite du côté des carbonates (à gauche) et une pyrrhotite sur fond de silice à droite (x 232).



13



14

Erratum

contrairement à ce qui a été précisé en pages 13 et 15 :

"depuis 1987"

il faut lire :

"depuis 1989"

En effet, c'est le bureau "Géophase" qui a assuré le suivi de la corrosion entre 1987 et 1989, il fut relayé par "Géoproduction Consultants" en 1989.