

L'ACIER GALVANISÉ DANS LES CIRCUITS D'EAUX: RÈGLES POUR ASSURER LA PÉRENNITÉ DES INSTALLATIONS*¹

J. LÉDION¹, L.NÉEL²

¹ ARTS, 151, boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris

Tél 01.44.24.63.15 - Fax 01.42 16.92.13

Messagerie : jean.ledion@ensam.eu

² CEFACOR 28, rue Saint-Dominique 75007 PARIS

Résumé : En milieu aqueux, l'acier galvanisé a pour but de remédier aux risques de corrosion rencontrés sur l'acier noir, surtout dans le cas où sa protection par un dépôt calco-ferrique n'est pas possible. La galvanisation permet de déposer du zinc, en surface de l'acier, afin de le protéger contre la corrosion et ainsi augmenter substantiellement la durée de vie des installations. La longévité de la protection dépend alors de la qualité de l'eau et des conditions d'utilisation du réseau.

La résistance à la corrosion de l'acier galvanisé, est liée à deux phénomènes successifs au cours du temps :

a/ Dans une première phase transitoire, qui est parfois longue (jusqu'à 2 ans), la couche de zinc, et d'alliages fer-zinc, se corrode et se recouvre ainsi d'un produit de corrosion de plus en plus protecteur qui est, dans la majorité des cas, l'hexahydroxydicarbonate de pentazinc ou en abrégé HCPZ (PZHC, en terminologie anglo-saxonne) de formule proche de $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$.

On voit donc, d'après la formule, que pour que ce produit se forme et se maintienne, il est nécessaire que les teneurs en OH^- , CO_3^{2-} , et Zn^{2+} soient suffisantes au voisinage des interfaces. Il est donc impératif que l'eau contienne un minimum d'oxygène (au moins 4 mg/L) pour que les réactions d'oxydation et de réduction soient suffisamment rapides pour avoir une production d'HCPZ. C'est pour cela qu'il faut absolument éviter, lors de la *mise en service* des installations, les *phases de stagnation*, ainsi qu'une *augmentation excessive de la conductivité*. L'alcalinisation ne doit être trop élevée pour produire essentiellement l'HCPZ et non pas des hydroxydes moins protecteurs. Ceci se traduit par l'exigence d'un TAC minimum de 8 degrés français et d'un pH allant de 6,5 à 8,5. Pour le praticien, les valeurs limites des différents paramètres liés à l'eau peuvent être utilement empruntées à la norme NF P 40 201 (dernière version en Octobre 2000). Au-delà de ces limites, l'emploi de l'acier galvanisé reste possible : divers exemples concrets sont examinés. Mais il convient alors de s'adresser à un spécialiste pour s'en assurer.

b/ En phase ultérieure, le zinc et ses alliages ayant été consommés par la corrosion, le fer sous-jacent va se corroder, mais sous un dépôt protecteur qui, s'il est correct, limite l'hydratation des produits de corrosion du fer. Ces produits ainsi obtenus, différents de ceux que l'on obtient habituellement dans l'eau, peuvent alors continuer à protéger le métal alors que tout le zinc a disparu. Par ailleurs, des études récentes montrent que le zinc ne joue pas de rôle particulier dans la formation de biofilms.

Les retours d'expérience de l'acier galvanisé au contact de l'eau sont nombreux et sont le reflet de l'utilisation répandue de cette protection de l'acier contre la corrosion.

¹* *Cet article a fait l'objet d'une communication orale, à l'occasion de la 21^{ème} édition du colloque « Journées Information Eaux », organisé par l'APTEN (Association de Professionnels du Traitement des Eaux et des Nuisances) à l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers (ENSIP), du 4 au 6 novembre 2014.*

INTRODUCTION

L'usage du zinc s'est répandu partout depuis déjà deux siècles sous forme d'acier galvanisé, c'est-à-dire d'acier revêtu à chaud, par immersion dans un bain de zinc fondu, d'une couche de zinc et d'alliages de zinc (cf. figure 1 et tableau I) de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur (classiquement : 80µm). Ce type de revêtement est à distinguer des revêtements électrolytiques où la couche déposée par électrolyse ne dépasse pas une épaisseur de quelques microns. En milieu aqueux, seul le premier type de revêtement est utilisable. Cependant, le zinc reste un métal corrodable. Il ne résistera à la corrosion que si, à sa surface, se forme un produit de corrosion protecteur. C'est de la qualité de ce produit protecteur que dépendra, ultérieurement, la tenue en service de la structure à protéger. Il est donc absolument nécessaire que, dans un premier temps, le zinc se corrode pour que l'on obtienne ce produit protecteur, et ce, dans un temps raisonnable, sinon tout le zinc sera consommé par la corrosion. On comprend ainsi le rôle crucial de la mise en route d'une installation en acier galvanisé. Durant cette phase, il est donc important de régler le système pour que les conditions thermodynamiques et cinétiques soient favorables à la formation rapide du produit de corrosion protecteur. Lorsque celui-ci sera bien en place, des conditions de fonctionnement plus classiques pourront être envisagées.

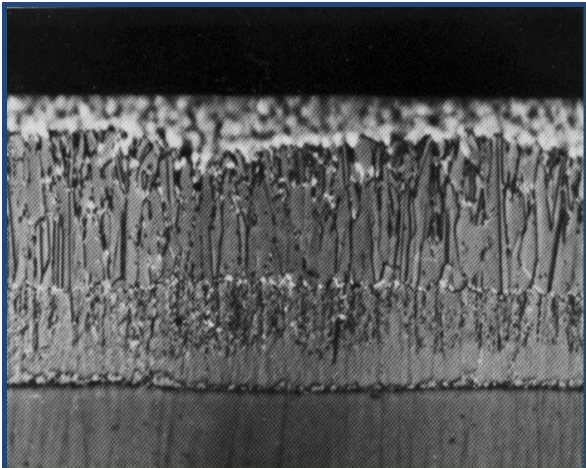
	COUCHE	% Zinc (Zn)	% Fer (Fe)	DURETÉ VICKERS
	← ETA	≈ 100	< 0,03	70
	← DZETA	94 à 95	5 à 6	17 9
	← DELTA	88 à 93	7 à 12	244
	← GAMMA	72 à 79	21 à 28	400 à 500
	← ACIER	0	≈ 100	159

Figure 1 : structure du revêtement métallique

I – RAPPELS SUR LES PRODUITS PROTECTEURS

1.1. Rôle des produits de corrosion protecteurs

Lorsqu'un acier galvanisé est recouvert d'un produit de corrosion protecteur, on attend de celui-ci plusieurs fonctions [1]:

- a) Limiter progressivement la réaction cathodique de l'oxygène qui, en milieu aqueux, reste le moteur principal de la corrosion,
- b) Permettre de passer progressivement d'une corrosion « dans l'eau » à une corrosion dans un milieu spongieux, fortement enrichi en ions Zn^{2+} , qui est appelé à se déshydrater progressivement,

Tableau I : Les épaisseurs déposées

Nature des produits Epaisseur (E)	Epaisseur minimale du revêtement
Acier $E < 1,5$ mm	45 μm
Acier $1,5 \leq E \leq 3$ mm	55 μm
Acier $3 < E \leq 6$ mm	70 μm
Acier $E > 6$ mm	85 μm
Ecrous / Boulons	
Filetage $6 \leq d < 20$ mm	45 μm
Filetage $d \geq 20$ mm	55 μm
Pièces moulées (fonte - acier)	
$E < 6$ mm	70 μm
$E \geq 6$ mm	80 μm

- c) Favoriser ainsi, à la longue, dans ce milieu fortement déshydraté, une corrosion très lente du fer du substrat quand le zinc aura été en grande partie consommé,
- d) Entraîner ainsi la formation de produits de corrosion du fer, protecteurs, car différents de ceux qui se forment en milieux aqueux classiques (oxyhydroxydes non protecteurs),
- e) Et, finalement, assurer une protection contre la corrosion après disparition totale du zinc.

1.2. Principaux produits de corrosion protecteurs possibles

Dans les eaux naturelles ou industrielles les anions susceptibles de donner des composés peu solubles avec le zinc sont en nombre limité [2]. Les trois principaux sont :

- a) L'hydroxyde de zinc, $Zn(OH)_2$, qui peut exister sous plusieurs formes cristallines ou amorphe. Son pouvoir protecteur est souvent médiocre.
- b) Le carbonate de zinc $ZnCO_3$ ou smithonite dont le comportement protecteur est généralement excellent, mais dont les conditions thermodynamiques et cinétiques de formation font que sa présence en milieu aqueux est relativement rare.
- c) L'hexahydroxydicarbonate de pentazinc (HCPZ ou PZHC en pays anglo-saxons) dont la formule est $Zn_5(CO_3)_{2-x}(OH)_{6+2x}$, et dont la structure la plus stable thermodynamiquement est obtenue pour $x=0$. Dans la pratique x est toujours différent de zéro, ce qui entraîne une

crystallinité très variable de ce produit. A noter qu'il s'agit du produit de corrosion le plus classique et le plus répandu en corrosion dans les eaux.

- d) Les hydroxysulfates de zinc, assez rares en milieu aqueux, mais fréquents en corrosion atmosphérique (sites urbains ou industriels).
- e) Les hydroxysilicates de zinc, assez rares, mais qui peuvent se former dans des eaux très douces (faibles TH et TAC) riches en « silice ».

Ainsi, hormis quelques cas particuliers, c'est généralement l'HCPZ qui se forme dans les eaux et c'est pour cela que l'on doit rechercher quelles sont les meilleures conditions thermodynamiques et cinétiques qui doivent présider à sa formation, et ceci pour avoir le meilleur produit protecteur.

1.3. Caractérisation de l'HCPZ

Comme indiqué précédemment, la cristallinité et la stœchiométrie de l'HCPZ peuvent être très variables. C'est pourquoi, il est commode d'utiliser la spectrométrie d'absorption infrarouge pour caractériser la qualité de l'HCPZ et voir s'il est associé à d'autres produits de corrosion.

En effet, la spectrométrie infrarouge ne fait, elle, aucune différence entre composés organiques et inorganiques. Elle voit seulement les mouvements (vibrations par exemple) des atomes les uns par rapport aux autres. L'important est que les informations concernant les divers types de composés se trouvent être séparées, la fréquence dépendant de la masse des atomes aussi bien que de la longueur des liaisons. Ces informations peuvent être traitées indépendamment. De manière générale, la masse des groupements d'atomes à l'origine d'une bande augmente de l'infrarouge proche à l'infrarouge lointain, c'est-à-dire de $\lambda = 2,5\mu\text{m}$ à $50\mu\text{m}$ en longueur d'onde, ou encore, en prenant $1/\lambda$, de $4\ 000$ à $200\ \text{cm}^{-1}$ en nombre d'ondes (ν^*).

Schématiquement, les groupements O-H sont les premiers à apparaître entre 4000 et $3000\ \text{cm}^{-1}$, suivis des liaisons organiques (surtout entre 3000 et $1000\ \text{cm}^{-1}$), puis les groupements CO_3 , SO_4 , SiO_4 , de 1550 à $600\ \text{cm}^{-1}$, et enfin les oxydes métalliques entre 600 et $200\ \text{cm}^{-1}$.

Par ailleurs, cette technique prend en compte la symétrie des groupements d'atomes et de la maille cristalline, ce qui permet de distinguer les variétés allotropiques d'un même composé chimique. Au-delà d'une approche qualitative, des mesures quantitatives sont possibles. C'est pourquoi il est intéressant de pouvoir mesurer les quantités de matière prélevées. L'information se trouve inscrite sur les documents sortant du spectromètre, mais il faut savoir l'en extraire avec certitude. Le principe est simple, car après broyage de l'échantillon dans du bromure de césium (transparent à l'infrarouge) servant de dispersant, on comprime l'ensemble sous forme d'une pastille dont l'aire présentée au spectromètre est constante. Dans ces conditions, les absorbances sont additives et, pour un groupement donné, l'absorbance A est proportionnelle à la masse m du groupement présent

dans la pastille. La pratique est un peu plus complexe. Elle dépend notamment de la qualité des spectres obtenus. [3] [4]

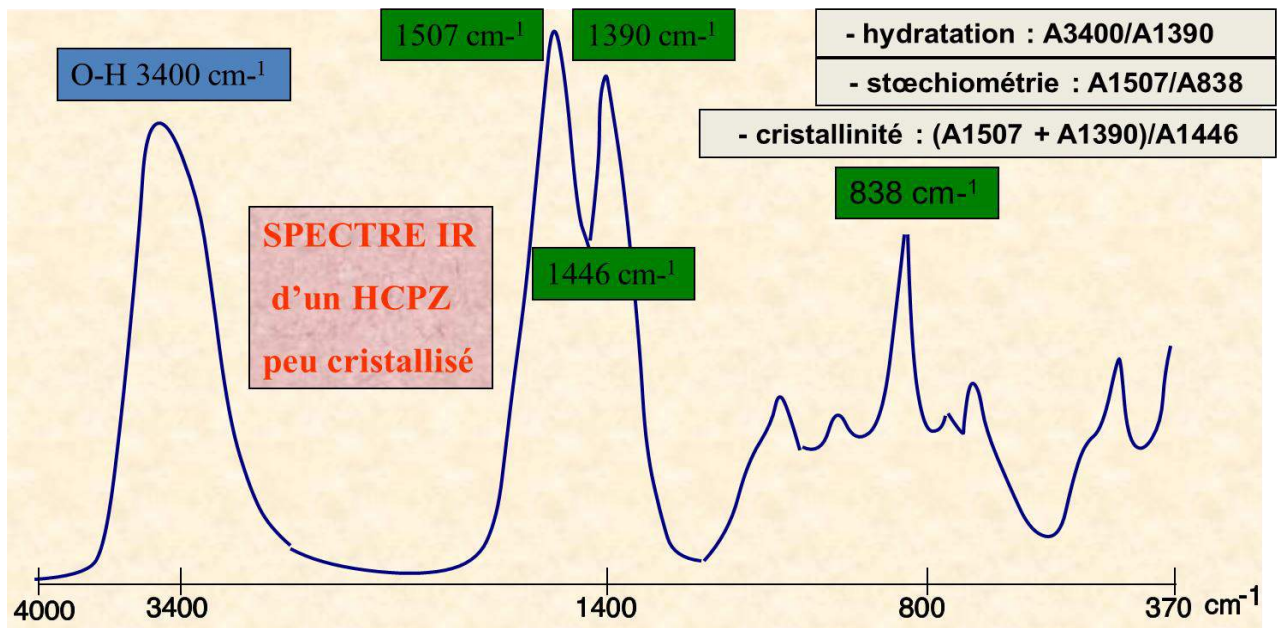


Figure 2 : spectre d'un HCPZ de cristallinité médiocre

La figure 2 donne, à titre d'exemple, le spectre d'un HCPZ de qualité assez moyenne. On voit que ce produit peut être identifié par quatre bandes principales indiquées sur la figure. Mais on peut également caractériser la qualité de cet HCPZ en utilisant les ratios d'absorbance qui sont également reportés sur la figure. L'un de ces ratios concerne l'hydratation du produit, les deux autres permettent de se faire une idée de la cristallinité et de la stœchiométrie du produit. Ces paramètres sont surtout intéressants d'un point de vue comparatif, lorsqu'on examine divers produits protecteurs. Ainsi, on peut observer, sur la figure 3, les spectres de 2 produits de corrosion du zinc, qui sont tous les 2 des HCPZ, mais qui traduisent deux types de corrosions. Dans le premier cas (trait plein) l'acier galvanisé a été au contact de l'eau d'un réseau public alimenté en eau provenant de l'Oise. L'HCPZ a été formé dans des conditions favorables et présente donc une bonne cristallinité entraînant ainsi une bonne tenue à la corrosion après plusieurs années de fonctionnement. Dans le second cas (trait pointillé) il s'agit d'un HCPZ qui résulte d'une corrosion anormale dans un réseau d'eau chaude sanitaire alimenté pourtant par une eau comparable (eau de réseau public alimenté en eau de Seine). Ce réseau comportant du cuivre en amont du zinc, la corrosion du zinc a été accélérée et a donné cet HCPZ quasi amorphe, non adhérent et donc sans effet protecteur. Ces deux exemples montrent bien que les produits de corrosion protecteurs peuvent être appréhendés par cette méthode d'analyse et que si la nature du produit de corrosion est

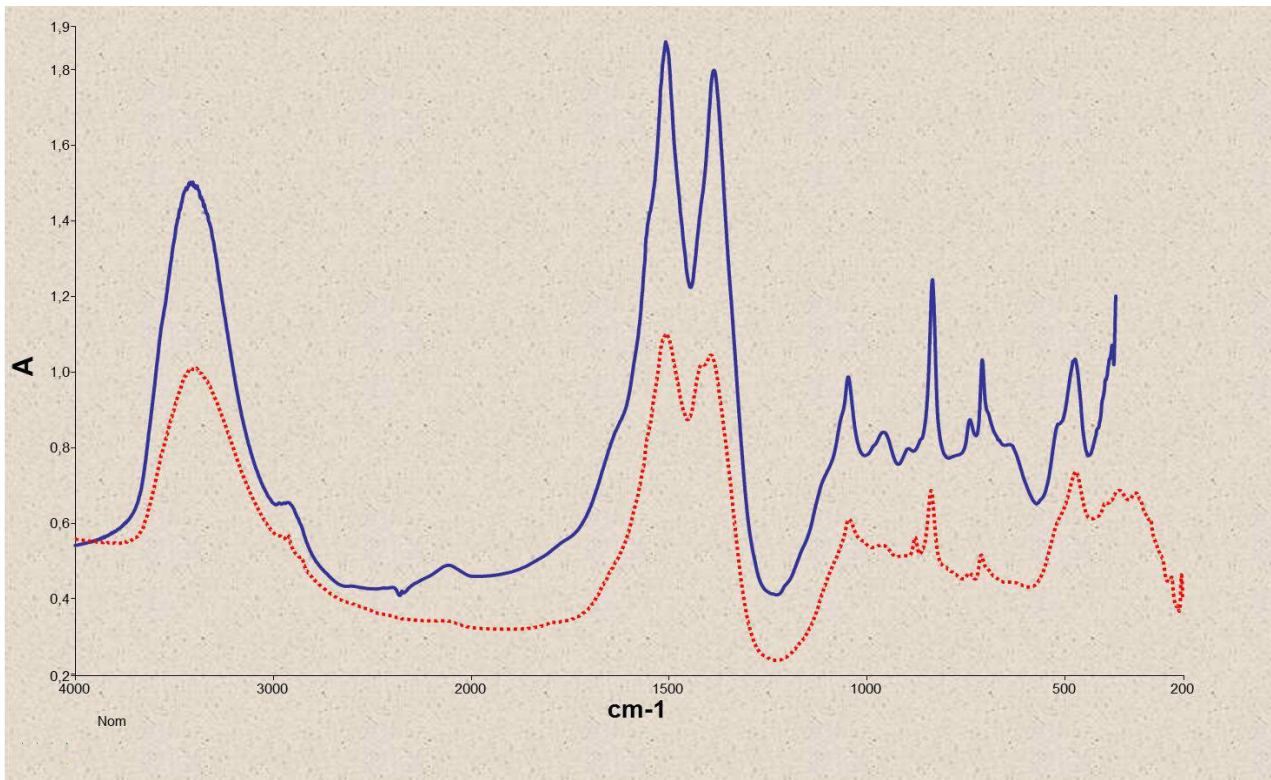


Figure 3 : En trait plein, HCPZ de bonne qualité après plusieurs années de fonctionnement (eau de l'Oise)
 En trait pointillé, HCPZ quasi amorphe après quelques mois de fonctionnement
 (eau de seine, avec cuivre en amont, sur le réseau)

importante, ses caractéristiques structurales le sont bien davantage. Restent maintenant à définir quels sont les conditions thermodynamiques favorables à l'établissement de bons produits protecteurs.

II – CONDITIONS REQUISES POUR L'OBTENTION D'UNE COUCHE PROTECTRICE

L'étude de la stabilité des divers produits protecteurs est relativement complexe, compte-tenu de la diversité de ces composés et de la diversité des eaux utilisées. On se bornera donc aux 3 produits classiques : hydroxyde de zinc, HCPZ et carbonate de zinc.

2.1. Conditions de formation du produit protecteur

Lorsqu'on place du zinc au contact d'une eau, dans une première phase transitoire, qui peut être parfois fort longue (jusqu'à 2 ans) [5], la couche de zinc (et/ou d'alliages fer-zinc) se recouvre d'un produit de corrosion qui est, dans la majorité des cas, l'hexahydroxydicarbonate de pentazinc (HCPZ), de formule proche de $Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$.

On voit donc, d'après la formule chimique, que pour que ce produit se forme et se maintienne, il est

nécessaire que les teneurs en OH^- , CO_3^{2-} , et Zn^{2+} soient suffisantes au voisinage des interfaces. De plus, il ne faut pas que l'eau contienne des ions ou des impuretés qui gênent sa cristallisation correcte (les ions Cu^{2+} par exemple). En conséquence, l'eau la plus dangereuse pour l'acier galvanisé se trouve être l'eau déminéralisée !

Pour que ces conditions soient remplies, il est impératif que l'eau contienne un minimum d'oxygène (au moins 4 mg/L) pour que les réactions de réductions produisent suffisamment de OH^- . C'est pour cela qu'il faut absolument *éviter les phases de stagnation* de l'eau lors de la mise en service des installations. Cette alcalinisation doit être aussi suffisante pour produire localement les ions carbonate à partir d'ions hydrogénocarbonate. Ceux-ci doivent donc être aussi en quantité suffisante. Au niveau de l'analyse, ceci se traduit par un TAC minimum de 8 degrés français (1,6 m.mole).

Par ailleurs, il faut que la teneur en CO_2 libre soit limitée pour que le pH de départ ne soit pas trop bas. La valeur de 6,5 semble être un minimum. Pour le praticien, les valeurs limites des différents paramètres liés à l'eau peuvent être utilement empruntées à la norme NF P 40 201 (dernière version en Octobre 2000). Au-delà de ces limites, l'emploi de l'acier galvanisé reste souvent possible, mais il convient alors de s'adresser à un spécialiste pour s'en assurer.

2.2. Stabilité thermodynamique des divers produits protecteurs (aspect simplifié)

Le milieu considéré étant une eau naturelle ou industrielle, il contient à ce titre du carbone inorganique dissous sous forme : de CO_2 dissous, d'ions HCO_3^- et CO_3^{2-} . La gamme de pH envisagée va de 6 à 12 et couvre donc largement l'étendue des eaux utilisables. Sur la figure4, due à J.P.LABBE, on a représenté les domaines de stabilité des trois produits de corrosion possibles, à savoir le carbonate de zinc, l'HCPZ, et l'hydroxyde de zinc. En ordonnée est indiqué le logarithme de la concentration totale en ions zinc dissous et en abscisse le pH. Seules ont été représentées les courbes d'équilibres du produit le plus stable à un pH donné. Les courbes supérieures (vertes) sont relatives à une eau peu chargée en carbone inorganique total, les courbes inférieures (rouges) sont, elles, relatives à une eau fortement chargée en carbone inorganique total. On voit ainsi que la présence importante de carbone inorganique total élargit nettement le domaine de stabilité du carbonate et également celui de l'HCPZ pour des pH plus élevés. En outre, la quantité d'ions en solution nécessaire au maintien de l'équilibre est plus faible. On voit donc, à la lumière de ces quelques considérations, que la présence d'un carbone inorganique total élevé (donc dans la pratique favorable en matière de corrosion car il assure la présence de produits plus stables et donc plus insolubles [5] [6].

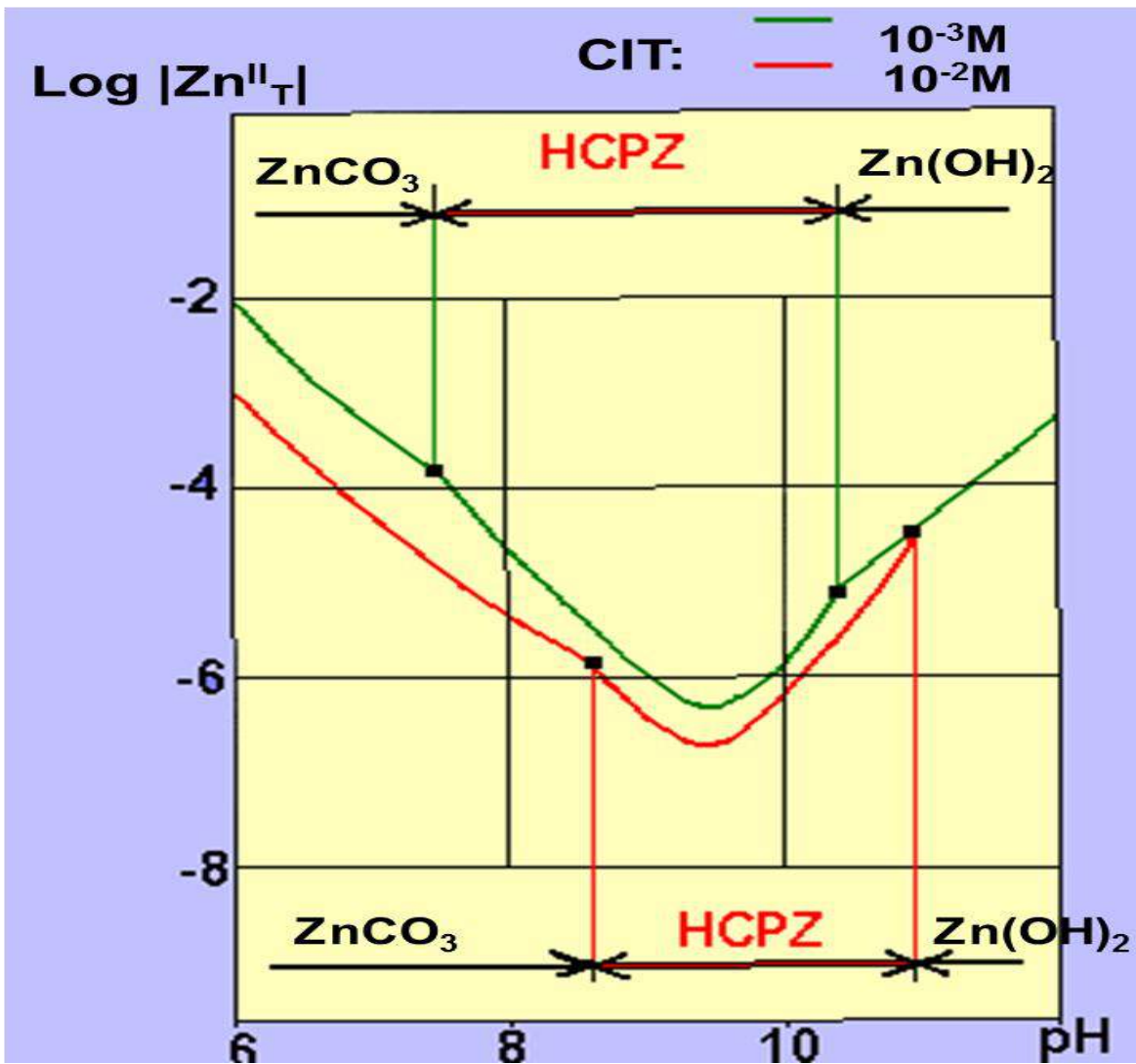


Figure 4 : Domaines de stabilité des trois composés pouvant jouer un rôle protecteur. En abscisse, le pH, en ordonnée, le log de la teneur en ions zinc dissous nécessaire à l'équilibre. Seules sont représentées les parties des courbes correspondant au produit le plus stable thermodynamiquement au pH donné. L'influence du TAC de l'eau est visible à travers le choix de 2 valeurs du carbone inorganique total (10^{-3} M et 10^{-2} M)

Ainsi, le plus important, ce n'est pas l'importante teneur en ions divers, réputés défavorables qui compte, mais surtout la teneur en hydrogencarbonate et le pH. A titre d'exemple, on a reporté sur la figure 5, les spectres de deux HCPZ de bonne qualité, mais formés dans des conditions radicalement différentes. Le spectre en traits discontinus est relatif à une eau froide quasi idéale, bicarbonatée calcique (TH et TAC supérieurs à 20°F), ce qui conduit, évidemment à un produit protecteur toujours en place après 20 ans de fonctionnement. L'HCPZ en trait plein, lui, est relatif à une eau considérée par la norme NF P 40 201 comme impropre à l'usage du galvanisé, à cause de sa teneur extrêmement élevée en sulfate ($1,26\text{g.L}^{-1}$). Cependant l'expérience montre que, dans un temps raisonnable (8 mois) on a déjà obtenu un produit de corrosion protecteur d'excellente qualité. Ceci est dû au

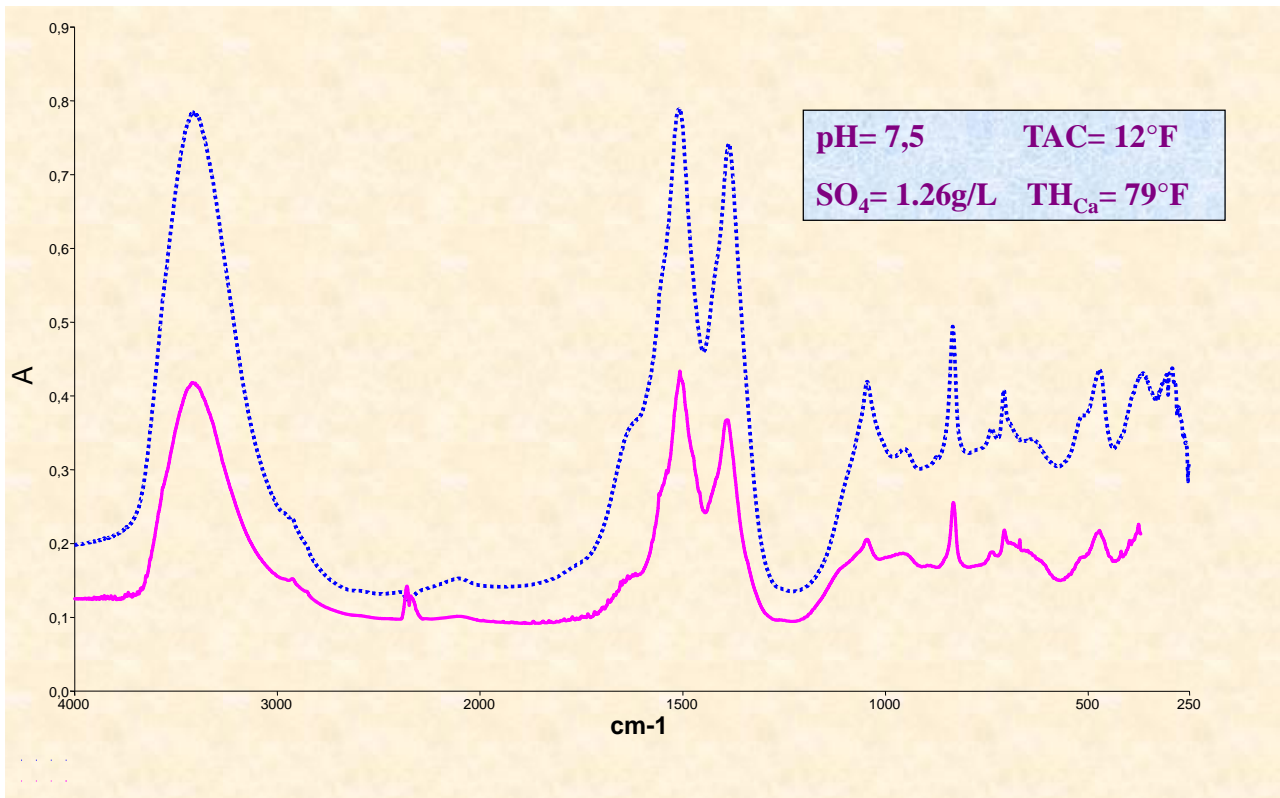


Figure 5 : En trait plein, HCPZ de bonne qualité, bien cristallisé, formé dans l'eau très sulfatée de Gabès, après 8 mois d'écoulement lors de la mise en service, (partie inférieure du tube, couche superficielle). En trait pointillé, HCPZ très bien cristallisé de plus de 20 ans, eau bicarbonatée- calcique de Champagnole (Jura)

fait que le TAC est suffisant (12°F) et que le pH n'est pas trop bas (7,5) et surtout, que l'écoulement de l'eau a été permanent lors de la mise en service. Ce cas particulier, dans une eau a priori défavorable, illustre bien ce qui a été indiqué plus haut (§ 2-1).

2.3. Importance des cinétiques de formation des divers produits protecteurs

L'étude thermodynamique (cf. figure 4) montre qu'aux bas pH on devrait obtenir plutôt du carbonate de zinc, alors qu'aux pH plus élevés, c'est plutôt l'hydroxyde qui devrait se former. L'HCPZ, lui, étant attendu pour les pH intermédiaires. Or, l'analyse de nombreux produits de corrosion, formés dans des eaux et des conditions très variables, montre que, pour des raisons cinétiques, c'est toujours l'HCPZ qui se forme à court terme, même si la thermodynamique prévoit la formation d'un autre produit plus stable.

III – DISCUSSION : CAS DES CIRCUITS DE REFROIDISSEMENT AVEC TOURS AÉRORÉFRIGÉRANTES

Si l'on utilise de l'acier galvanisé dans un circuit de refroidissement, les impératifs signalés ci-dessus restent, bien entendu, totalement pertinents. Cependant, quelques éléments peuvent jouer un

rôle défavorable. On peut citer : l'adoucissement total pratiqué par certains professionnels, l'augmentation importante du pH (pouvant aller jusqu'à 9), la concentration exagérée de l'eau due à un facteur de concentration trop élevé. Lorsque la teneur en sel minéraux augmente, lorsqu'on substitue du sodium au calcium, la conductivité croît fortement et la corrosivité de l'eau vis-à-vis du zinc « neuf » se trouve nettement augmentée, ainsi la solubilité du zinc est augmentée. Par ailleurs, ces circuits sont toujours saturés en oxygène. Or, comme il a été indiqué plus haut, la phase de mise en route d'une installation est cruciale pour la formation de la couche protectrice d'HCPZ.

Deux politiques sont possibles :

1 – Mettre en route l'installation avec une purge importante pour rester limité en concentration et en pH et obtenir ainsi des conditions thermodynamiques favorables,

2 – Lancer l'installation avec son facteur de concentration défini par le traiteur d'eau, mais avec l'emploi d'un inhibiteur approprié (nature et concentration) pour limiter à une valeur raisonnable la vitesse de corrosion du zinc, de telle manière que l'on puisse obtenir progressivement la couche protectrice.

En revanche, quelle que soit la politique choisie, il est impératif, au démarrage, de ne pas laisser l'installation en eau stagnante, ce qui conduirait à la formation d'HCPZ de type non protecteur, d'aspect gélatineux, souvent appelé « rouille blanche » ;

A titre d'exemple, on a reporté, sur la figure 6, les spectres IR des HCPZ obtenus sur une installation pilote, avec la même eau, dans des conditions simulant un circuit aérorefrigérant et avec les mêmes conditions opératoires. On a pu constater qu'en présence d'inhibiteur, la formation de la couche protectrice avait été suffisamment rapide pour donner un HCPZ correct. En revanche, sans inhibiteur, l'eau a pu précipiter, ce qui se vérifie par la présence de carbonate de calcium sous forme de calcite dans la couche d'HCPZ. Ce dernier s'avère à l'aspect, comme à travers le spectre IR, de qualité extrêmement médiocre. Cela est sans doute dû à l'adoucissement de l'eau consécutif à la précipitation de CaCO_3 . En conséquence, la surveillance de l'eau du circuit, lors de la phase de mise en service, est particulièrement importante. Il faut que, durant cette phase, les paramètres TAC et pH restent dans des valeurs compatibles avec les conditions de formation d'un HCPZ de qualité. Par ailleurs, l'excès de concentration va dans le sens de l'augmentation des risques d'obtention d'un HCPZ de mauvaise qualité. L'usage d'inhibiteurs devra aussi être fait avec discernement.

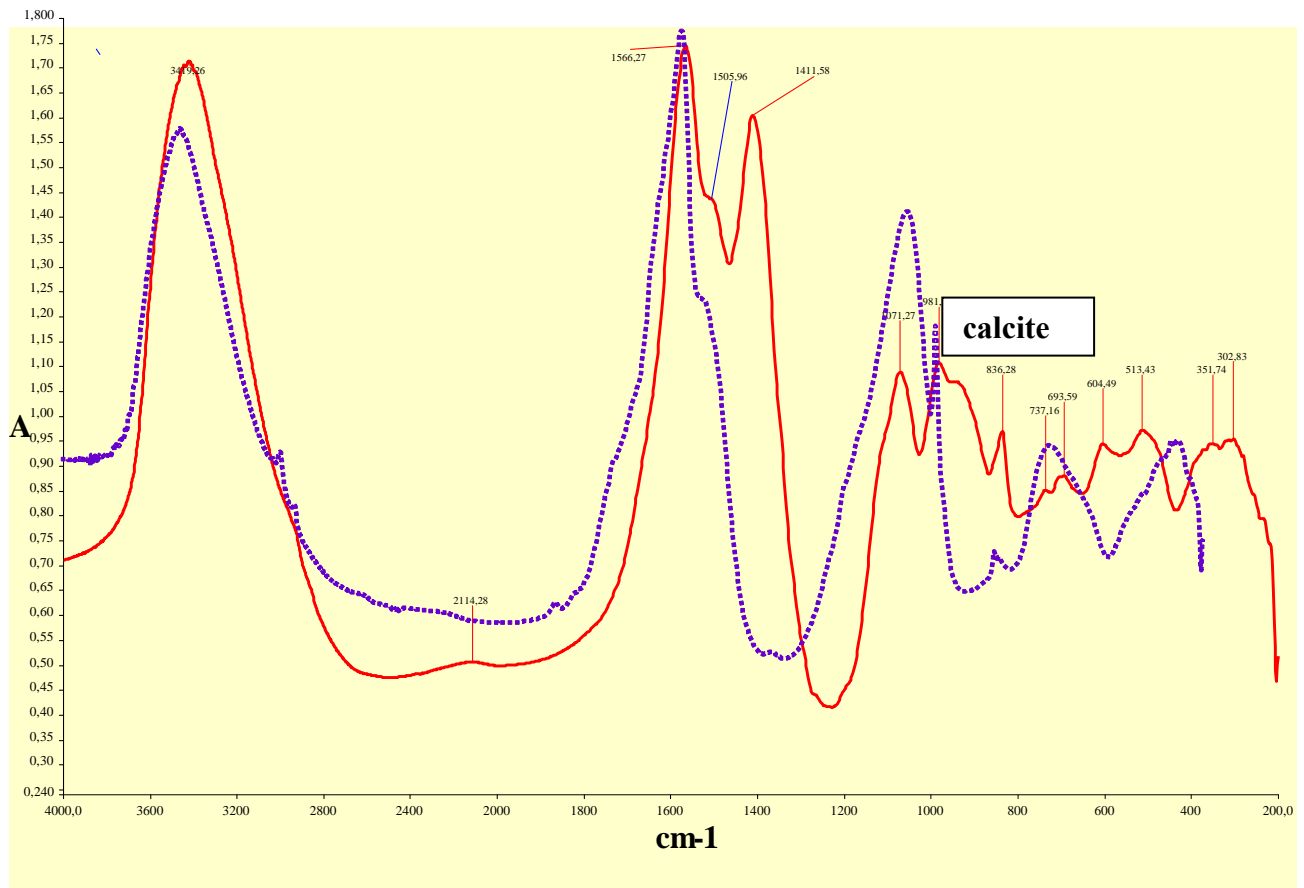


Figure 6 : En trait plein, HCPZ de bonne qualité formé dans une installation pilote en présence d'un inhibiteur ; en trait pointillé, HCPZ très médiocre formé dans la même eau (mêmes conditions), sans inhibiteur (eau bicarbonatée- calcique classique, TH et TAC proches de 20°F).

CONCLUSION

En milieu aqueux, une bonne utilisation de l'acier galvanisé doit reposer, avant toute chose, sur une compréhension correcte du mécanisme de formation des couches de produits de corrosion protecteurs. Ceux-ci demandent un certain temps pour se mettre en place, généralement plusieurs mois. Durant cette période transitoire, il faut veiller à ce que les conditions de pH, de TAC, de minéralisation, de circulation de l'eau, nécessaires à la formation d'un HCPZ de qualité, soient respectées. Si tel est le cas, le système évoluera vers une stabilité de plus en plus grande et sera de moins en moins sensible à des perturbations de fonctionnement limitées dans le temps. Le danger principal se produit, en général, lorsqu'on procède à une mise en eau prématurée suivie d'une période de stagnation, liée à une non utilisation de l'installation. Dans certaines eaux particulières, où ces conditions ne sont pas remplies, on peut quelquefois obtenir une protection contre la corrosion si d'autres produits protecteurs (comme les hydroxysilicates de zinc) sont susceptibles de se former.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Lédion, Pourquoi le zinc?, Galvano 619, (1991), 905-909.
- [2] J.P. Labbé, J. Lédion, Analyse des produits protecteurs à long terme sur conduites d'acier galvanisé, in « Le zinc et l'anticorrosion », Editions de physique, Les Ullis, 1993, 201-205.
- [3] J.P. Labbé, J. Lédion, F.Hui, Infrared spectrometry for solid phase analysis : Corrosion rusts, Corrosion Science 50 (2008) 1228-1234
- [4] R.A. Nyquist, R.O. Kagel, IR Spectra of Inorganic Compounds, Academic Press, New-York, London, 1971.
- [5] P.Callot, L'acier galvanisé au contact avec l'eau liquide. Action protectrice du zinc, in« Le zinc et l'anticorrosion », Editions de physique, Les Ullis, 1993, 8-14.
- [6] J. Lédion, Corrosion resistance of common metals and stainless steels in water, Cahiers de l'ASEES, 8, (2003),11-18,