PROTECTION DES RACCORDS DE CANALISATION EN FONTE DUCTILE : LES REVETEMENTS PAR CATAPHORESE

PROTECTION OF CAST IRON FITTINGS: CATAPHORESIS COATINGS

G. NOUAIL Ingénieur
SAINT-GOBAIN PAM
Centre de Recherche et Développement
BP109
54704 Pont-à-Mousson cedex
FRANCE

J.M. PEDEUTOUR Ingénieur
SAINT-GOBAIN PAM
Centre de Recherche et Développement
BP109
54704 Pont-à-Mousson cedex
FRANCE

Protection des raccords de canalisation en fonte ductile :
les revêtements par cataphorèse
Protection of cast iron fittings: cataphoresis coatings

G. NOUAIL - J.M. PEDEUTOUR

Résumé

Les nouvelles réglementations à venir, concernant les matériaux destinés à être au contact de l'eau potable, de même que celles relatives aux conditions d'hygiène et de sécurité dans les usines (faible émission de solvants) ont conduit SAINT-GOBAIN PAM à développer, il y a quelques années, un nouveau type de revêtements pour les raccords moulés en fonte, avec un souci constant d'améliorer la qualité de ses systèmes de protection.

La solution retenue est un revêtement barrière époxyde, appliqué uniformément à l'épaisseur souhaitée, par cataphorèse, à la fois à l'intérieur et à l'extérieur.

Après une brève description du procédé employé, l'article présente le principe de protection de ces nouveaux revêtements. Différents essais ont été réalisés pour déterminer les propriétés mécaniques et le comportement en corrosion de ces nouveaux systèmes de protection, tels que des essais accélérés au laboratoire, des essais de vieillissement naturel et des essais sur site. La formulation du revêtement et les essais de migration répondent aux exigences réglementaires concernant les matériaux destinés à être en contact avec l'eau potable (respect des paramètres de la directive européenne sur l'eau potable).

En raison de ses performances, ce nouveau type de revêtement a été retenu pour la protection des raccords employés avec les tuyaux revêtus de zinc-aluminium de la gamme NATURAL®[1].

Abstract

The new forthcoming regulations on materials intended to be in contact with drinking water and on health and hazards in plants (low emission of solvents) have led SAINT-GOBAIN PAM to develop, a few years ago, a new type of coating for cast iron fittings, with the aim of constantly improving the quality of their protective systems.

The choice was made on an epoxy barrier coating uniformly applied at the desired thickness both internally and externally by a cataphoretic electrodeposition process.

After a short description of the process used, the paper presents the protection principle of these new coatings. Various tests are performed in order to assess the mechanical properties and the corrosion behaviour of the new protective systems such as: laboratory accelerated tests, natural weathering tests and tests in aggressive ground. The coating formulation and the migration tests comply with the regulatory requirements for materials in contact with drinking water (conformity to drinking water parameters of the European Directive).

Thanks to its improved performances, this new type of coating has been adopted for the protection of fittings to be used with the zinc-aluminium + epoxy coated NATURAL pipes[1].

[1] cf. www.pamline.fr

1 Introduction

Les raccords et les pièces accessoires destinés à être montés sur les canalisations en fonte ductile, doivent offrir des durées de service à l'identique de celles obtenues sur les tuyaux. Or ces pièces sont souvent de forme complexe. Leur grande diversité, tant dimensionnelle que géométrique, ne permet généralement pas une mise en œuvre aisée des systèmes de protection retenus pour les tuyaux. La réalisation industrielle relativement simple d'une protection sur une pièce cylindrique devient beaucoup plus compliquée dès lors que la pièce à revêtir ne présente plus de symétrie de révolution simple. C'est la raison pour laquelle la mise en place des protections sur les pièces de raccordement s'est longtemps effectuée au trempé. Ce procédé, s'il n'a pas beaucoup évolué en comparaison d'autres types de mise en œuvre des revêtements, reste toujours la base pour les pièces de formes complexes dans l'industrie (quincaillerie, pièces automobiles, …), avec une conséquence majeure qui est la mise en place simultanée de la protection sur les parois intérieure et extérieure des organes tubulaires.

Pour les raccords et accessoires des canalisations d'eau en fonte ductile, les nouvelles réglementations, à la fois sur les conditions de rejet de solvants dans l'atmosphère, sur les conditions de travail en sécurité et sur les exigences en matière "d'alimentarité", ont réduit depuis quelques années le champ d'utilisation de la solution à base de vernis bitume.

Les réflexions concernant les améliorations du système de protection des tuyaux en fonte ductile, qui ont récemment conduit à l'introduction du revêtement à base d'alliage de zinc à 15% d'aluminium, se sont accompagnées d'une démarche parallèle pour la protection des raccords et accessoires et ont abouti à une solution dont le domaine d'utilisation s'accorde avec celui des tuyaux.

Les contraintes économiques, coût de fabrication important, ont conduit à favoriser un procédé permettant de réaliser simultanément les opérations de revêtement extérieur et intérieur, avec toutes les contraintes découlant d'une résistance vis à vis des agressions par le milieu extérieur (au cours des phases de stockage, transport, manutention, et séjour dans le sol) et par les différents types d'eaux véhiculées.

Dans le cas du transport et de la distribution de l'eau potable, il y a de plus lieu de respecter les exigences de la directive relative aux eaux destinées à la consommation humaine [1] et les réglementations nationales sur les matériaux et produits au contact de ces eaux.

2 Le procédé de revêtement

Le procédé retenu est celui d'un dépôt par cataphorèse d'une peinture à base époxy sur les pièces accessoires et raccords en fonte ductile. Le procédé consiste à plonger la pièce à revêtir dans un bain de peinture : celle-ci est électriquement "chargée", et la pièce est portée à un potentiel cathodique. Sous l'influence du champ électrique, les particules de peinture sont attirées par la pièce. La figure n°1 schématise le fonctionnement dans la cellule de cataphorèse.

Au fur et à mesure que la peinture recouvre la pièce, la circulation du courant ne s'effectue plus qu'au droit des zones non revêtues, ce qui assure un niveau de fermeture quasi complet du film de peinture déposée. Ce procédé est auto-régulateur et permet la mise en place d'une épaisseur régulière sur toute la pièce. Les zones difficilement accessibles en raison de la

géométrie de la pièce sont également recouvertes. Cela constitue une différence importante par rapport aux procédés classiques de revêtement.

A la suite du passage dans le bain de peinture, la pièce est placée dans une étuve où s'effectue la cuisson.

Avant son passage dans le bain de peinture, la pièce est soumise à une préparation de sa surface comprenant plusieurs étapes : nettoyage mécanique à la sortie du moule de fonderie, nettoyage chimique. Une conversion de la surface de la fonte est ensuite réalisée dans un bain phosphatant avant le dépôt de la peinture. Diverses opérations de rinçage sont effectuées entre ces différentes étapes.

La figure n°2 offre un schéma simplifié d'une chaîne de revêtement des raccords en fonte ductile par le procédé de cataphorèse.

3 Développement des protections par cataphorèse à SAINT-GOBAIN PAM

Les premières réalisations de revêtement par cataphorèse concernent la fonte à graphite lamellaire dès 1990, pour des raccords de conduites d'évacuation des eaux usées à l'intérieur des bâtiments. Les épaisseurs pratiquées étaient de l'ordre de 35 µm, près de deux fois supérieures à celles généralement obtenues par le procédé de cataphorèse ; progressivement le procédé est envisagé, puis retenu et amélioré, pour la protection des raccords enterrés des canalisations d'eau en fonte ductile.

Les études sur les revêtements par cataphorèse sont alors poursuivies, principalement sur la formulation de la peinture pour répondre aux critères de conformité au contact avec l'eau potable tout en maîtrisant les incidences sur les caractéristiques de tenue mécanique et de performance en anti-corrosion. En particulier, les rôles et conséquences d'un traitement de conversion de surface de la fonte préalable à la mise en place de la peinture sont analysés en collaboration avec les fournisseurs. Le choix se porte sur un traitement de "Parkérisation ". Son action est multiple. En premier lieu, il permet d'assurer une meilleure adhérence de la peinture sur le substrat. De plus, dans le cas de petits dommages locaux lors des opérations de transport, la présence de cette couche empêche le développement important de rouille brune au stockage. A plus long terme, elle limite les conséquences du vieillissement de la peinture et régule la progression du processus de corrosion à l'interface entre la peinture et le substrat en fonte.

A partir de 1994, le revêtement époxy déposé par cataphorèse se substitue à la protection par vernis-bitume : il est de couleur noire et son épaisseur est de l'ordre de 35 µm. Il reçoit l’agrément nécessaire pour l'utilisation au contact de l'eau potable.

Le développement d'un système de protection à plus large domaine d'emploi pour les tuyaux en fonte ductile, à base de zinc-aluminium, conduit à rechercher un revêtement pour les raccords et accessoires, dont les performances soient compatibles avec celles recherchées pour les tuyaux. La connaissance des caractéristiques des revêtements par cataphorèse et de leur mécanisme de protection conduisent à privilégier ce procédé de mise en œuvre tout en recherchant les moyens de déposer des épaisseurs plus fortes de peinture, permettant d'obtenir la pérennité de la protection escomptée dans le domaine d'emploi étendu visé. La relation entre épaisseur et temps de migration de l'eau à l'interface entre métal et peinture permet d'accroître la durée de vie.

Le dépôt de peinture en plus forte épaisseur par le procédé de cataphorèse nécessite alors un nouveau développement, notamment au niveau de la formulation du liant utilisé : modification du type de molécules. Cette recherche se double de contraintes techniques, liées d'une part au respect des exigences nécessitées par le futur contact de la peinture avec l'eau potable, d'autre part à la modification de couleur affectant le choix des pigments (couleur bleue retenue pour le domaine de l'eau potable).

Les résultats obtenus, tant pour la mise en œuvre industrielle (capabilité de l'installation) que pour les performances des produits finis (tenue mécanique, propriétés anti-corrosion, alimentarité, …) conduisent à retenir ce nouveau revêtement pour les raccords qui sont proposés avec les tuyaux dotés d'un revêtement d'alliage ZnAl 85-15 et d'une finition bouche-pores époxy de couleur bleue [2, 3], pour constituer la gamme NATURAL®.

4 Description du principe de protection

Le principe de protection d'une peinture déposée par le procédé de cataphorèse s'apparente à celui d'un revêtement "barrière". La peinture s'oppose au contact direct du milieu environnant avec la fonte ductile. Cette fonction barrière est obtenue pour des épaisseurs faibles (35 à 70 µm) par le procédé même de dépôt. L'épaisseur et la régularité du film de peinture jouent un rôle important, de même que le réseau de polymère, sur la pérennité de cette fonction.

Au contraire des procédés d'application au pistolet ou au trempé, le procédé de cataphorèse permet d'obtenir, pour une même épaisseur de peinture, un niveau de fermeture et une régularité d'épaisseur qui annihilent les risques de formation de piles généralement rencontrées avec les peintures. Ces piles sont de types galvaniques, en raison de la proximité sur la pièce revêtue de zones nues (porosités, manques locaux, …) ou en sous-épaisseur (arêtes, "zones d'ombre", …), conduisant à la formation de zones placées à des potentiels électrochimiques différents, générant dès lors des piles de corrosion. Le développement de ces piles favorise des attaques locales à la surface de la pièce et sa dégradation. Au contraire, la peinture déposée par cataphorèse, en raison de la régularité de couverture de la pièce (épaisseur régulière, faible taux de zones nues) empêche la formation prématurée de ces piles de corrosion.

De plus, par la fermeture du film déposée par cataphorèse, et par la régularité d'épaisseur, la peinture ne se comporte pas comme un élément cathodique comme il est rencontré avec une finition bitumineuse. Cet effet cathodique se traduit par un ennoblissement de la fonte revêtue par rapport à la fonte nue. Cette situation conduit à une augmentation de la vitesse de corrosion de la fonte nue au droit d'une blessure dans la protection par peinture. Par ailleurs, le rapport des surfaces anodique et cathodique est défavorable, ce qui accroît la vitesse de pénétration de l'attaque de la fonte.

La pérennité de la fonction barrière est liée principalement au processus de diffusion de l'eau au travers du film de peinture.

Certes, le vieillissement de la peinture déposée par cataphorèse au contact du milieu environnant intervient au cours du temps. Il résulte principalement de la diffusion d'eau et de la migration d'autres espèces du milieu au travers du film de peinture. Mais la peinture déposée par cataphorèse diffère du revêtement barrière conventionnel, présentant par ailleurs

une épaisseur plus importante (par exemple, poudrage époxy de 250 µm), par un délai plus faible avant que l'eau migrant au travers du film n'atteigne l'interface avec le support en fonte. Une fois cette migration effectuée, un processus de corrosion s'amorce, contrôlé par la couche de conversion de surface à base de phosphatation.

Le processus d'altération conduit à un phénomène de corrosion de type généralisé, et non pas localisé comme avec des peintures classiques. Les cinétiques de corrosion sont ainsi réduites. De plus, le film de peinture, en conservant une certaine intégrité, réduit fortement les échanges entre le milieu environnant et la surface de la fonte.

La décohésion du film de peinture d'avec la surface de fonte se produit par la formation de petites cloques qui coalescent de proche en proche pour conduire au soulèvement du film de peinture sans pour autant conduire à des zones de fonte exposées directement au milieu environnant.

Les peintures déposées par cataphorèse diffèrent des revêtements "barrière" étanches par le délai plus faible pour conduire à la décohésion du film peint. La flexibilité du film de peinture, en raison de sa plus faible épaisseur, est un élément favorable au maintien d'une couche "continue" au contraire des risques de fissures rencontrés avec un matériau plus rigide.

La décohésion plutôt uniforme sur toute la surface empêche la formation de piles de corrosion locales, les cinétiques d'attaque de la fonte sont donc réduites. De plus, l'homogénéité de l'altération du film de peinture ne conduit pas à la manifestation des piles de type galvaniques comme celles observées avec les revêtements par peinture classiques.

La couche de conversion (du type phosphatation) sous la peinture, outre son rôle au niveau des propriétés d'accrochage de la peinture, joue dans la grande majorité des sols un rôle d'inhibiteur ou de couche "passive" limitant la réactivité de la surface de la fonte.

5 Performances des revêtements

La caractérisation du système de protection par peinture déposée par cataphorèse s'est intéressée aux diverses sollicitations rencontrées au cours de la vie des pièces de raccords : sollicitations mécaniques (manutentions, transport et pose), vieillissement au stockage (pluie, humidité, ensoleillement, …), agressions par les milieux sols, eaux véhiculées, maintien de la qualité des eaux transportées, …

5.1 Illustration des propriétés physiques du revêtement

Les atouts des peintures déposées par cataphorèse par rapport aux peintures "classiques" sont principalement :

- la régularité d'épaisseur,
- l'uniformité de couverture sur la pièce,

liées au principe "autorégulateur" du procédé.

5.1.1 Contrôle d'épaisseur

Les contrôles d'épaisseurs effectués sur trois types de revêtement (peinture bitumineuse, époxy déposé par cataphorèse, poudrage époxy) démontrent la supériorité du procédé de cataphorèse, en termes de capabilité.

A titre d'exemple, sont reportés au tableau n°1 les résultats d'une campagne de contrôle sur des pièces industrielles. Les épaisseurs ont été mesurées à l'aide d'un capteur magnétique en 40 points de la surface de la pièce. Trois pièces ont été concernées pour chaque variante de revêtement.

Tableau n°1 : Contrôle d'épaisseur sur pièces de fabrication industrielle

Revêtement	Vernis-bitume	Epoxy noir par cataphorèse	Epoxy bleu par cataphorèse	Epoxy par poudrage
Epaisseur moyenne [µm]	100	64	82	400
Ecart-type [µm]	24	12	8	100
Dispersion [%]	24	19	10	25

5.1.2 Contrôle de fermeture du revêtement

Les niveaux d'épaisseur des revêtements de peinture déposée par cataphorèse (35 ou 70 µm) ne sont pas suffisants pour qu'un contrôle d'étanchéité de revêtement par les moyens couramment employés pour les revêtements "barrière" puisse être effectué. Le test du balai électrique se pratique en général pour des épaisseurs supérieures à 100 µm. Cette limitation découle des caractéristiques des appareils disponibles sur le marché (tension minimale de l'ordre de 500 V). L'adoption des critères d'épreuve normalisés (par exemple 5V/µm d'épaisseur) conduit à des tensions de test pour les revêtements déposés par cataphorèse qui sont inférieures à la tension minimale délivrée par la plupart des dispositifs du commerce. Ce revêtement ne peut donc pas être considéré comme "étanche au balai électrique", au sens habituel.

Le test adopté pour contrôler la fermeture des films minces est celui de l'essai à l'éponge. La pièce est reliée au pole négatif d'un générateur de tension, le pôle positif est raccordé à une électrode métallique dotée en son extrémité d'une éponge imbibée d'une solution saline. La tension d'épreuve est sélectionnée sur le générateur. On déplace lentement l'électrode sur la surface de la pièce revêtue. La présence de défauts de fermeture dans le revêtement entraîne la fermeture du circuit électrique, déclenchant l'activation d'un signal avertisseur sonore ou lumineux. Selon la tension d'épreuve, des défauts de tailles différentes sont révélés.

Le tableau n°2 illustre les résultats obtenus sur des pièces industrielles avant un essai de corrosion [4]. La tension de test est de 9 V. La vitesse de prospection est de l'ordre de 1 cm/s. Dans le cas des pièces revêtues de la finition bitumineuse, la détection de porosité est particulièrement féconde : le revêtement est poreux et présente une absence de fermeture. Pour les pièces revêtes de peinture époxy bleue déposée par cataphorèse (70 µm), seuls quelques rares points isolés sont mis en évidence.

Tableau n°2 : Contrôle de fermeture du revêtement – Test à l'éponge 9 V

Revêtement	Vernis-bitume	Epoxy bleu (Cataphorèse)
Epaisseur moyenne [µm]	100	82
Niveau de fermeture	Absence de fermeture	Quelques porosités locales

5.1.3 Contrôle de l'adhérence

Une autre étape de la caractérisation physique des revêtements déposés par cataphorèse concerne l'adhérence du revêtement sur le substrat. Des différents moyens de caractériser cette propriété, le test de quadrillage est apparu le mieux adapté.

En effet, le recours à l'essai de traction [pull-off test] se heurte à deux écueils : la faible épaisseur du film de peinture et la rugosité de surface des pièces de fonderie. Les lieux de décohésion observés, à l'interface entre colle et peinture, et certaines valeurs particulièrement élevées de l'adhérence (colle pénétrant les rugosités) nous ont fait exclure ce moyen d'essai.

L'évaluation par recours au test de délamination cathodique particulièrement prisé (présent dans différentes spécifications pour les pièces de raccords dotées de revêtement barrière) trouve avec les peintures déposées par cataphorèse une limitation théorique (niveau de surtension cathodique incompatible avec la présence de la phosphatation). De plus, ces conditions de sollicitations s'écartent notablement de celles rencontrées en pratique avec les revêtements sur pièces de raccord en fonte (pas de protection cathodique).

Les résultats d'un test de quadrillage réalisé selon la norme NF EN ISO 2409 [5], sont présentés au tableau n°3. Ils permettent une comparaison entre une peinture bitumineuse et une peinture époxy déposée par cataphorèse. Il est difficile de proposer une comparaison avec un revêtement époxy de plus forte épaisseur, le test de quadrillage étant dédié aux films minces.

Tableau n°3 : Contrôle d'adhérence du revêtement – Test de quadrillage

Revêtement	Vernis-bitume	Epoxy bleu (Cataphorèse)
Epaisseur moyenne [µm]	100	82
Niveau d'adhérence	0 - 1	0 - 1

Le revêtement déposé par cataphorèse présente un niveau d'adhérence comparable à celui de la peinture bitumineuse. Lors des essais de mise au point du revêtement, différentes solutions de conversion de la surface avant la mise en peinture ont été analysées sous l'aspect de l'incidence vis-à-vis de l'adhérence. Le tableau n°4 indique les résultats observés. Il ressort que la mise en œuvre du traitement de conversion n'altère pas les caractéristiques d'adhérence de la peinture.

Tableau n°4 : Contrôle d'adhérence du revêtement – Test de quadrillage

Type de conversion	Sans	Type 1	Type 2	Type 3
Niveau d'adhérence	0 - 1	0 - 1	0 - 1	0 - 1

5.2 Illustration du mécanisme de protection

5.2.1 Absence d'effet cathodique

La manifestation dite "d'effet cathodique" résulte des hétérogénéités d'épaisseur et de vieillissement différentiel (absorption d'eau) qui conduisent à ennoblir de façon plus ou moins

importante la fonte revêtue ; elle est à l'origine de mini-piles galvaniques locales conduisant à terme au développement d'une corrosion localisée dont la cinétique d'attaque est plus élevée que l'auto corrosion de la fonte nue dans le milieu.

Ce processus d'altération est mis en évidence de façon qualitative par la simple exposition des pièces revêtues à des solutions salines. Après quelques heures d'exposition, le milieu révèle les défauts de fermeture des films, liés aux procédés de mise en œuvre : porosités, zones non revêtues (arêtes, angles morts, …). L'exposition sur des durées plus longues (une semaine) conduit à l'apparition de zones étendues de corrosion sur une peinture classique ; c'est la manifestation du processus de piles galvaniques locales en raison des différences d'épaisseur de peinture. Après un mois, il y a fixation des zones anodiques avec attaque préférentielle. Dans de telles conditions d'essai, il n'y a pas d'altération notable sur les pièces revêtues de peinture déposée par cataphorèse.

Une illustration est proposée sur la figure n°3. Elle permet de comparer l'évolution de l'aspect de viroles prélevées dans des raccords bride-uni de DN 80, après un séjour de six mois dans une solution saline NaCl (100 ohm.cm). Deux types de revêtement sont comparés :

- une protection par vernis-bitume réalisée au trempé, épaisseur #100 µm
- une peinture époxy bleue déposée par cataphorèse, épaisseur #70 µm.

Sur l'un des échantillons de chaque variante, des blessures par chocs (masse tombante) d'énergie 10 et 20 Joules ont été pratiquées.

On constate la nette différence de comportement entre les deux protections : peu d'altérations pour la protection époxy au contraire du fort enrouillement des pièces munies du vernis-bitume. Au niveau des blessures par choc, une attaque de corrosion locale se développe de façon significative sur la pièce avec vernis-bitume. Les zones de choc ne sont pas le siège d'une attaque sensible pour la pièce avec époxy bleu.

La figure n°4 est une autre illustration du comportement de la protection par époxy bleu, d'épaisseur 70 µm déposé par cataphorèse [4]. Elle présente, de façon comparative, les modifications d'aspect de pièces industrielles (raccords bride-uni DN 80) blessées selon deux génératrices par le déversement de 10 kg de graviers calcaires, tombant d'une hauteur de 1 m, puis immergées pour une durée de six mois dans une solution à 5 g/L de NaCl. Les autres revêtements en essai sont une protection par vernis bitume et une peinture époxy noir (épaisseur 35 µm) déposée par cataphorèse. Rapidement la pièce revêtue de vernis-bitume présente des signes d'enrouillements, le cliché illustre son aspect après 2 mois. Pour les deux autres pièces revêtues par cataphorèse, il n'y a pas d'altération notable de la protection après six mois d'exposition à l'eau salée. Une attaque locale est présente avec la peinture noire, de plus faible épaisseur. Pour la pièce bleue, aucune attaque notable n’est présente.

Une illustration quantitative de ce phénomène est visualisée par le suivi d'un macro élément, pile de corrosion recréée, associant une surface de fonte revêtue et une surface de fonte nue (Cf. §5.3.1).

Les illustrations des comportements respectifs des protections par peinture bitumineuse et peinture époxy déposée par cataphorèse montrent à la fois le différé apporté au déclenchement de l'attaque de la fonte par le milieu environnant (en raison du niveau de fermeture et de la régularité d'épaisseur obtenue par le procédé), et l'absence d'effet sensible dans le cas d'une blessure occasionnée lors de la manutention et du transport de la pièce. La blessure n'est alors pas le siège d'une corrosion exacerbée par la fonte revêtue comme c'est le cas avec une peinture bitumineuse.

5.3 Illustration des performances en anti-corrosion

L'évaluation des systèmes de peintures déposés par cataphorèse s'est principalement intéressée à contrôler l'absence de formation prématurée d'attaques localisées et d'effet cathodique du revêtement, par rapport aux peintures classiques de vernis-bitume. En complément, l'action du vieillissement de la peinture sur le développement de la corrosion du substrat a constitué un autre aspect de la caractérisation. A titre d'exemple, quatre tests réalisés sur différents systèmes de protection réalisés par cataphorèse sont présentés ci-après. Ces essais ont été réalisés soit en interne [6] soit par des laboratoires indépendants [4, 7, 8].

5.3.1 Essai dit "de macro élément"

Il consiste à recréer artificiellement une situation de pile de corrosion générée à la suite d'une blessure du revêtement mettant à nu la fonte du support.

La cathode est constituée d'une virole (longueur 100 mm) prélevée dans une pièce de raccord revêtue par cataphorèse (DN 80). L'anode consiste en un petit barreau de fonte nue (diamètre 5 mm) inséré dans un alésage pratiqué dans la virole. Une colle, non conductrice, permet de maintenir le barreau dans l'alésage en l'isolant électriquement de la virole. Le barreau et la virole sont munis d'un conducteur électrique permettant la mesure du courant de la pile et du potentiel mixte. La pile recréée est placée dans le milieu d'essai, solution saline ou terrain reconstitué.

La figure n°6 indique à titre d'exemple les résultats obtenus au cours d'un essai de 24 mois d'exposition dans une solution saline (NaCl 1500 ohm.cm), pour une protection par vernis bitume (épaisseur # 100 µm) et une peinture époxy noire déposée par cataphorèse (épaisseur 35 µm) [7].

L'évolution des débits des piles permet de constater la différence de comportement entre les deux types de protection. Avec le vernis-bitume, les débits échangés dans les deux macro éléments se manifestent de façon importante dès les premiers jours de l'essai pour atteindre un palier puis décroître. L'observation d'une remontée des débits après quelques semaines est probablement à mettre au compte de l'influence de la variation de température selon les saisons. En fin d'essai, les débits sont quasiment nuls ; le démontage des macro éléments montre que les barreaux ont été entièrement consommés dans ces conditions sévères.

Dans le cas de la peinture époxyde appliquée par cataphorèse, les débits des piles sont très faibles au départ de l'essai en raison du niveau élevé de fermeture de la couche de peinture. Progressivement les courants échangés augmentent quelque peu, au fur et à mesure de la diffusion de l'eau dans le film. A l'issue des deux ans d'essai, le niveau du courant de corrosion reste encore très bas. La perte de masse observée sur les barreaux n'atteint que 37% pour ces conditions accélérées.

L'évolution des potentiels mixtes des macro éléments permet de situer le net effet cathodique observé avec la finition bitumineuse. Dès le début de l'essai, la fonte revêtue de vernis-bitume offre des potentiels particulièrement nobles (vers –300 mV/E.C.S.) au contraire de la peinture époxy (-700 mV/E.C.S.). Au fur et à mesure de la poursuite de l'essai, on constate une légère diminution dans le cas du vernis-bitume, à attribuer à la formation des produits de corrosion sur le barreau mais également sur la fonte revêtue (anodes parasites).

Pour la peinture époxy, la remontée du potentiel vers des valeurs plus nobles est beaucoup plus lente. La différence de potentiel entre fonte nue et fonte revêtue demeure faible et explique les faibles débits observés dans les macro éléments.

La planche n°5 illustre les aspects observés après 24 mois d'exposition des macro éléments dans un autre milieu de caractérisation : eau de Volvic [5]. On constate avec l'époxy déposé par cataphorèse l'absence de fort enrouillement autour du barreau au contraire des deux macro éléments munis de vernis-bitume. La production de rouille au niveau du barreau a été plus intense ; des anodes parasites se sont également développées à la surface de la fonte revêtue. Le démontage des macro éléments à cette échéance de 24 mois a permis de chiffrer l'effet cathodique des deux systèmes de protection, respectivement 12,5% et 4,1% de perte de masse moyenne des barreaux, pour le vernis-bitume et la peinture époxy noire déposée par cataphorèse : soit une réduction par un facteur 3 de la vitesse d'attaque.

5.3.2 Essai de pile sur blessure

Une autre illustration de l'effet cathodique des systèmes de peinture est présentée sur la figure n°7. L'essai a consisté à soumettre un revêtement, localement blessé (traits de scie de largeur de 1, 2 et 3 mm), à une situation de pile de concentration. Une zone de 3 cm de diamètre autour de la blessure est couverte par une petite motte d'un sol **A** alors que le reste de la pièce revêtue est au contact d'un sol **B**. Différentes combinaisons associant argile, sable, calcaire, poussier de charbon, … ont été pratiquées [6]. Les clichés de la figure n°7 illustrent la situation après 15 mois des blessures soumises à des piles de concentration associant une argile (au niveau des blessures) et un sable humidifié par une solution saline (NaCl), pour des pièces en fonte ductile revêtues de vernis-bitume, d'époxy par cataphorèse (35 µm) et d'époxy poudre (250 µm).

On note les aspects très différents de l'état des blessures sur le revêtement de vernis-bitume par rapport à celles des deux revêtements époxy. Une forte attaque de corrosion s'est manifestée avec le vernis-bitume, signe de l'effet cathodique, alors que pour la peinture époxy de 35 µm déposée par cataphorèse, l'attaque est restée très faible, similaire à celle observée avec le revêtement barrière par époxy poudre en épaisseur de 250 µm.

5.3.3 Essai de pile de concentration

Une autre forme de pile de concentration a consisté à simuler le cas d'un raccord placé dans un sol soumis à un battement de nappe [7]. Pour ce faire, deux viroles (longueur 100 mm) prélevées dans un raccord en fonte ductile revêtu ont été associées pour constituer une pile. L'une des viroles est placée dans le sol en permanence noyé par une solution saline (NaCl), l'autre dans le sol alternativement humide ou noyé (par périodes de 3 semaines). Des conducteurs électriques permettent de suivre les courants qui s'échangent entre les deux viroles soumises à cette pile de concentration.

La figure n°9 présente les évolutions des courants observés dans les piles au cours de 24 mois d'essai dans un sol de nature calcaire, pour les protections par vernis-bitume et époxy déposé par cataphorèse (épaisseur 35 µm). La protection obtenue par cataphorèse présente de très faibles débits tout au long de l'essai. Ce n'est pas le cas avec la peinture bitumineuse, qui dès le départ de l'essai conduit à des courants élevés. On constate que les débits des piles de concentration sont gouvernés par les fluctuations du niveau d'eau dans les dispositifs d'essai.

Les plus forts débits des piles sont observés en période de nappe basse (terrain humide et non noyé). C'est la plus forte aération du milieu dans ces conditions qui pilote le débit de la pile.

Les évolutions des potentiels mixtes des piles de concentration permettent de constater que, dans le cas du revêtement époxy déposé par cataphorèse, les valeurs de potentiel sont plus électronégatives que pour le vernis-bitume, les amplitudes de variations selon le niveau d'humidification sont plus réduites. Les situations tendent à se rapprocher pour les durées plus longues d'exposition.

Les planches photographiques associées (Figure n°8) permettent de découvrir la très nette différence d'aspect observée après les 24 mois d'essai sur les deux systèmes de protection. La peinture bitumeuse a vu un développement important de rouille brune qui a cimenté les grains de calcaire au contact direct des pièces. Après un nettoyage à l'eau, la différence entre les systèmes de peinture est plus accentuée : la peinture époxy déposée par cataphorèse ne présente que peu d'attaque de corrosion à la différence de la peinture bitumineuse. L'effet de la pile de concentration semble apparaître ici amoindri en raison de la très forte sollicitation de la virole en partie haute du montage. En effet, dans la pile de concentration, c'est l'élément en position basse dans le montage (calcaire toujours noyé) qui constitue l'anode et qui est donc sollicité dans la pile. Cet effet de la pile s'est manifesté au plus près, en raison de la résistivité du milieu : il s'est traduit par l'apparition de rouille brune dans la partie supérieure de la virole en partie basse du montage. L'aspect particulier de la virole en partie haute suggère la manifestation d'une pile de concentration agissant plus spécifiquement sur cette dernière. On trouve en effet une corrosion plus importante (rouille rouge) au pied et une teinte blanchâtre vers le sommet (due au gravier calcaire).

5.3.4 Caractérisation en terrain

Les revêtements d'époxy obtenus par cataphorèse ont fait l'objet de caractérisation dans des conditions de terrains réels. La figure n°10 présente l'aspect, après six ans passés dans le sable marin de la baie du Mont Saint Michel, d'une série de raccords comportant une protection par époxy en épaisseur de 35 µm. La nature de la conversion de surface avant mise en peinture constitue alors le facteur de l'étude. Peu de différences sont notées après cette échéance. Une bonne tenue des systèmes de protection est observée : peu de signes de rouille brune de la fonte, au contraire des raccords munis de vernis-bitume présentant une intense coloration rouille brune et des traces de corrosion.

La seconde photo représente la mise en place sur le site d'une série de pièces de raccord dotées de différents systèmes de protection réalisés par cataphorèse, dont celui équipant la gamme NATURAL®.

5.4 Contact des revêtements époxy par cataphorèse avec l'eau potable

Le revêtement époxy déposé par cataphorèse bénéficie en France d'une attestation de conformité sanitaire (ACS), et est également conforme aux exigences de la norme BS 6920 en Grande-Bretagne [9].

6 Conclusion

La peinture bitumineuse appliquée au trempé sur les raccords en fonte ductile pour les canalisations d'eau a été remplacée par des revêtements époxy déposés par cataphorèse. Ce procédé permet d'assurer une plus grande régularité d'épaisseur et un niveau plus élevé de fermeture du film de peinture. Ces caractéristiques offrent un meilleur comportement des raccords ainsi revêtus face à la corrosion rencontrée dans les sols, en particulier en évitant la formation d'attaques locales prématurées.

Les développements conduits en collaboration avec les fournisseurs ont permis de mettre au point une nouvelle génération de formulations de peinture, autorisant des épaisseurs doublées pour les films déposés. Cette caractéristique offre une espérance de vie plus étendue pour les raccords ainsi revêtus, tout en conservant les propriétés intrinsèques de ce type de revêtement.

Ce développement s'est accompagné du souci de répondre aux exigences de la législation concernant les matériaux au contact des eaux destinées à la consommation humaine.

A partir des caractéristiques du revêtement et des résultats d'une modélisation de la corrosion dans les sols, la protection par un époxy bleu déposé en épaisseur de 70 µm par cataphorèse a été retenue pour les raccords de la gamme NATURAL®, dont les tuyaux sont munis d'une protection par un revêtement à base d'alliage de ZnAl 85-15 et d'une finition époxy bleue.

Le revêtement époxy bleu déposé par cataphorèse est utilisable dans la grande majorité des cas, y compris les terrains corrosifs. Cependant, certaines circonstances exceptionnelles, mais bien définies, nécessitent le recours à une protection spéciale : revêtement époxy poudre, épais, étanche au balai électrique.

Le revêtement époxy bleu par cataphorèse figure parmi les variantes de revêtements des raccords et accessoires de la norme EN 545:2002 [10] (cf. §4.5). Elle en précise le domaine d'emploi dans l'annexe D [10], en le mettant en équivalence avec le revêtement époxy poudre d'épaisseur 150 µm.

Références bibliographiques

[1] - Directive 98/83/CE du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

[2] - G. NOUAIL – Revêtements externes des canalisations en fonte ductile à base de zinc-aluminium 85-15 ; 80ème Congrès AGHTM - Vannes 28 mai-1er juin 2001. pp 38-49.

[3] - G. NOUAIL, A. TOURNIER – Utilisation des alliages de zinc-aluminium comme protection anti-corrosion – Application au revêtement des tuyaux en fonte ; CEOCOR Journées Plénières - Biarritz 2001.

[4] - Etude comparée de trois systèmes de protection de raccords de canalisations en fonte ductile. CSTB - Rapport d'étude n°E 99-0007 – 1999.

[5] - NF EN ISO 2409 - Peintures et Vernis – Essai de quadrillage – Novembre 1994.

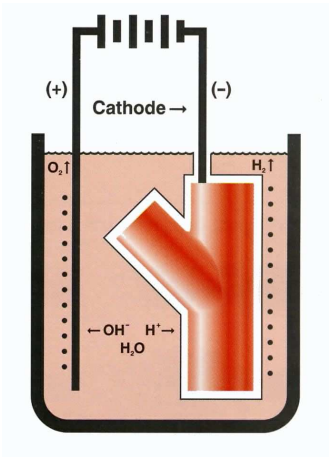
[6] - JM. PEDEUTOUR – Revêtement déposé par électro-déposition. Comportement du point de vue Corrosion. Rapport interne. 1992.

[7] - Analyse comparative de la tenue à la corrosion de revêtements de raccords en fonte ductile. CSTB – Rapport d'étude n°97-371 – 1997.

[8] - Untersuchung der Korrosionsschutzwirkung des Beschichtungssytems EPK auf Formstücken aus duktilem Gusseisen, Abschlussbericht.
Korrosionstechnick Dr HEIM – Rapport n° 1678/06/93 - 1993

[9] - BS 6920 – Suitability of non-metallic products for use in contact with water intended for human consumption with regard to their effect on the quality of the water. 2000.

[10] - EN 545:2002 - Tuyaux et raccords et accessoires en fonte ductile et leurs assemblages pour canalisation d'eau. Prescriptions et méthodes d'essai. Août 2002.



Réaction à la cathode

$$2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow H_2\uparrow$$

Et dépôt de peinture

Figure n°1 : Principe de fonctionnement du dépôt par cataphorèse

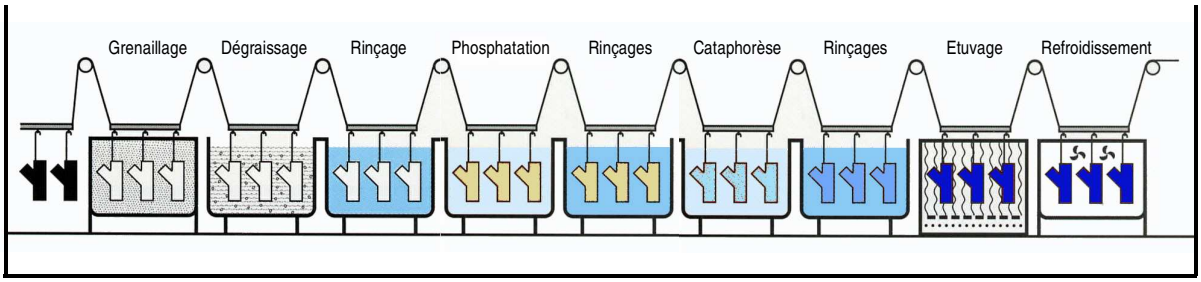
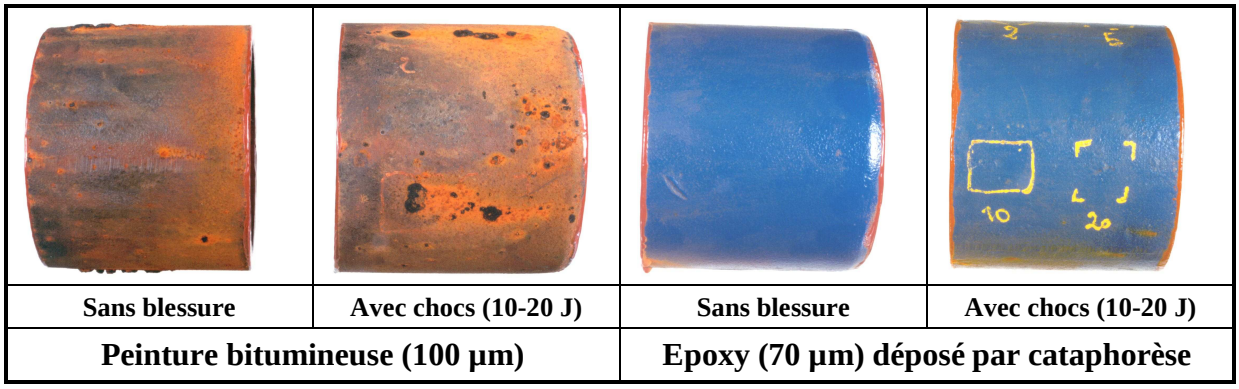


Figure n°2 : Schéma de principe de la ligne de revêtement par cataphorèse

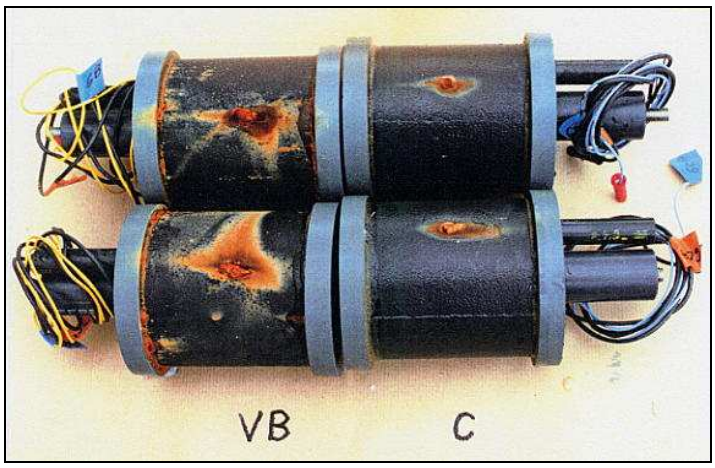


Sans blessure	Avec chocs (10-20 J)	Sans blessure	Avec chocs (10-20 J)
Peinture bitumineuse (100 µm)		**Epoxy (70 µm) déposé par cataphorèse**	

Figure n°3 : Immersion en solution saline [NaCl 100 ohm.cm] - Après 6 mois.

Peinture bitumineuse Epaisseur 80 µm	Peinture époxy cataphorèse Epaisseur 35 µm	Peinture époxy cataphorèse Epaisseur 70 µm
Après 2 mois	**Après 6 mois**	**Après 6 mois**

Figure n°4 : Essai d'immersion en eau saline (NaCl à 5 g/L) [4]
[**A gauche :** pièce témoin, non sollicitée. **A droite** : pièce blessée par chute de remblai et mise en eau]



Piles après nettoyage VB = VBI; C = Epoxy par cataphorèse

Figure n°5 : Piles galvaniques (Macroéléments) - Eau de Volvic - Après 24 mois d'essai [7]

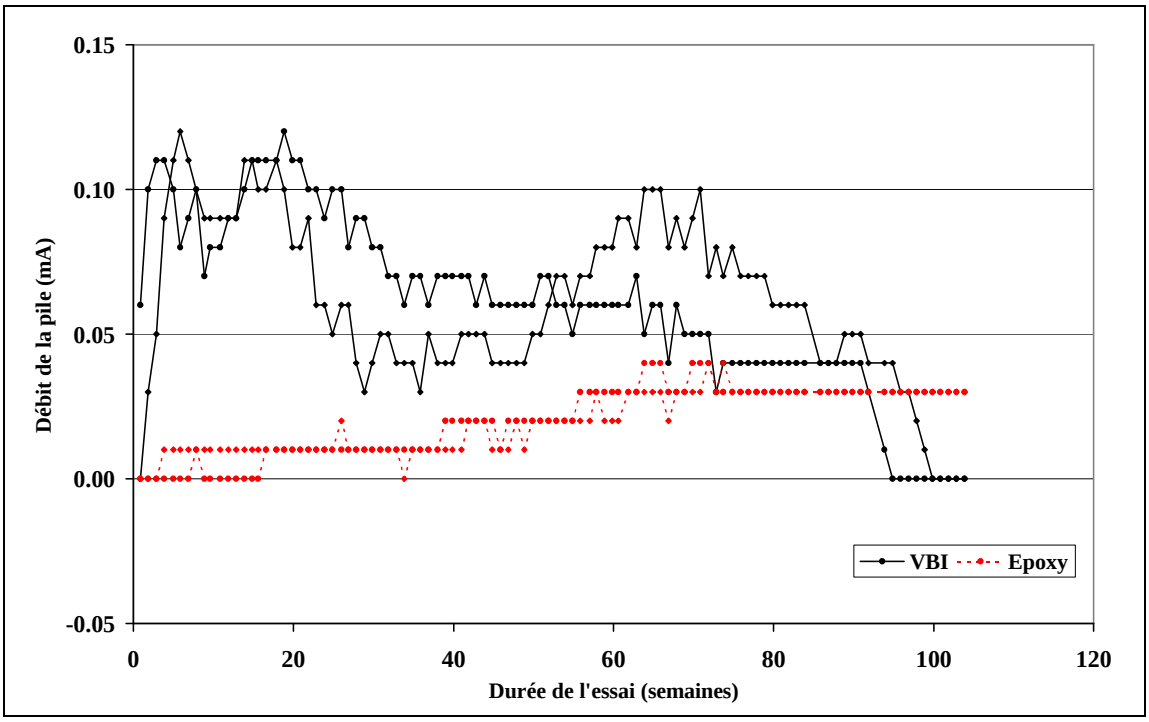


Figure n°6 : Piles galvaniques (Macroéléments) - NaCl 1500 ohm.cm [7]
Evolution des débits et potentiels mixtes des piles

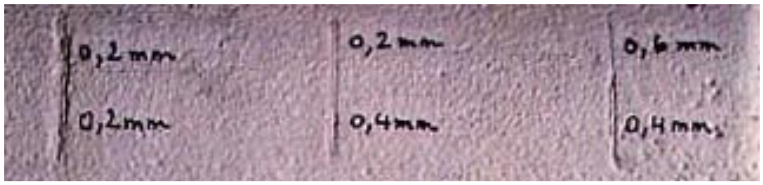
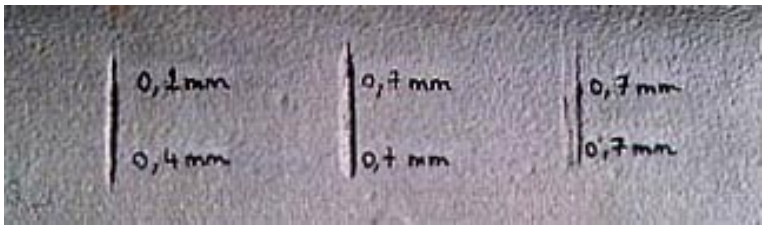
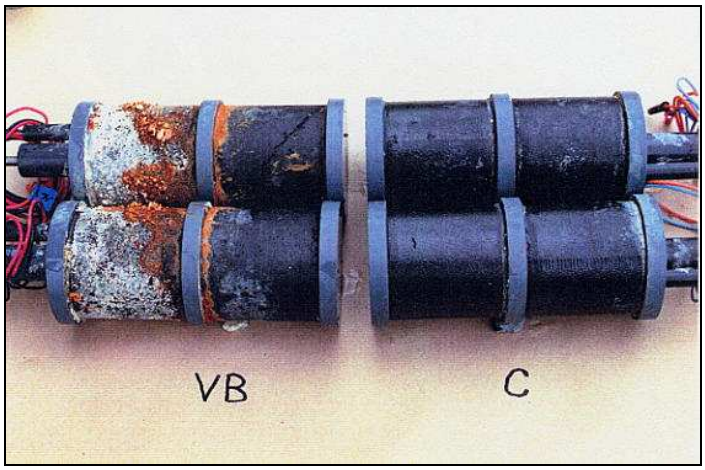
Peinture bitumineuse Epaisseur 80 µm	
Peinture époxy déposée par cataphorèse Epaisseur 35 µm	
Poudre époxy Epaisseur 250 µm	

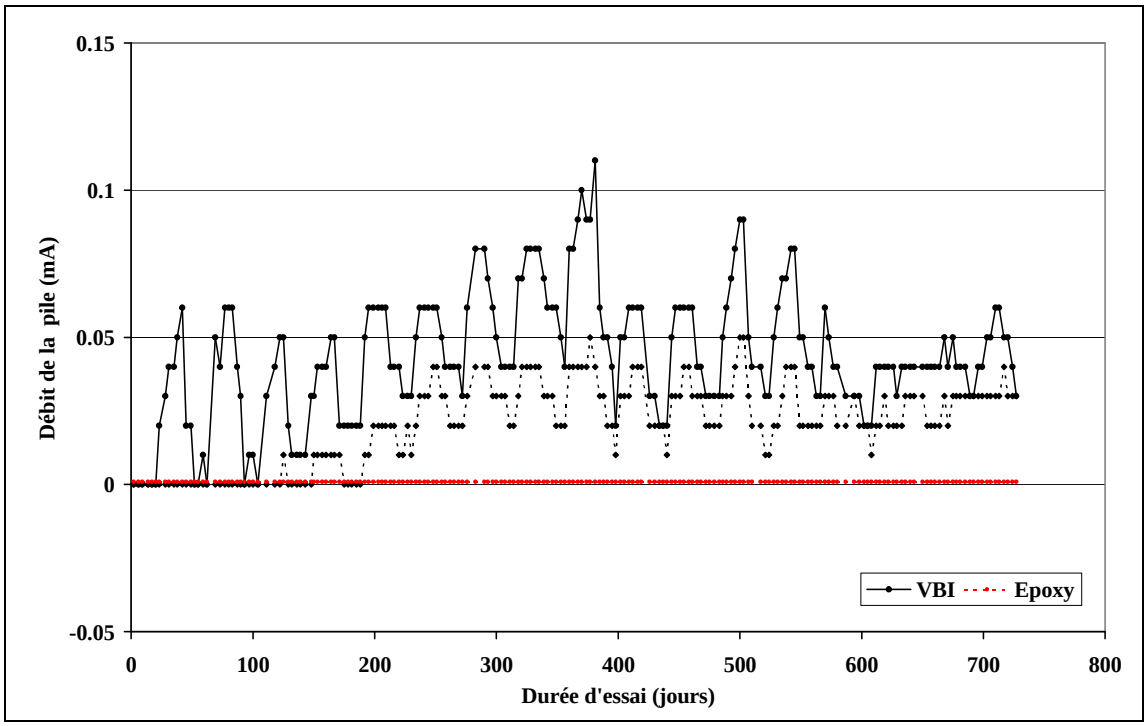
Figure n°7 : Pile de concentration Argile-Sable - Après 15 mois d'essai [6]
Niveau d'attaque de corrosion sur blessures volontaires du revêtement (après sablage)

Piles "VBI" à l'issue de l'essai

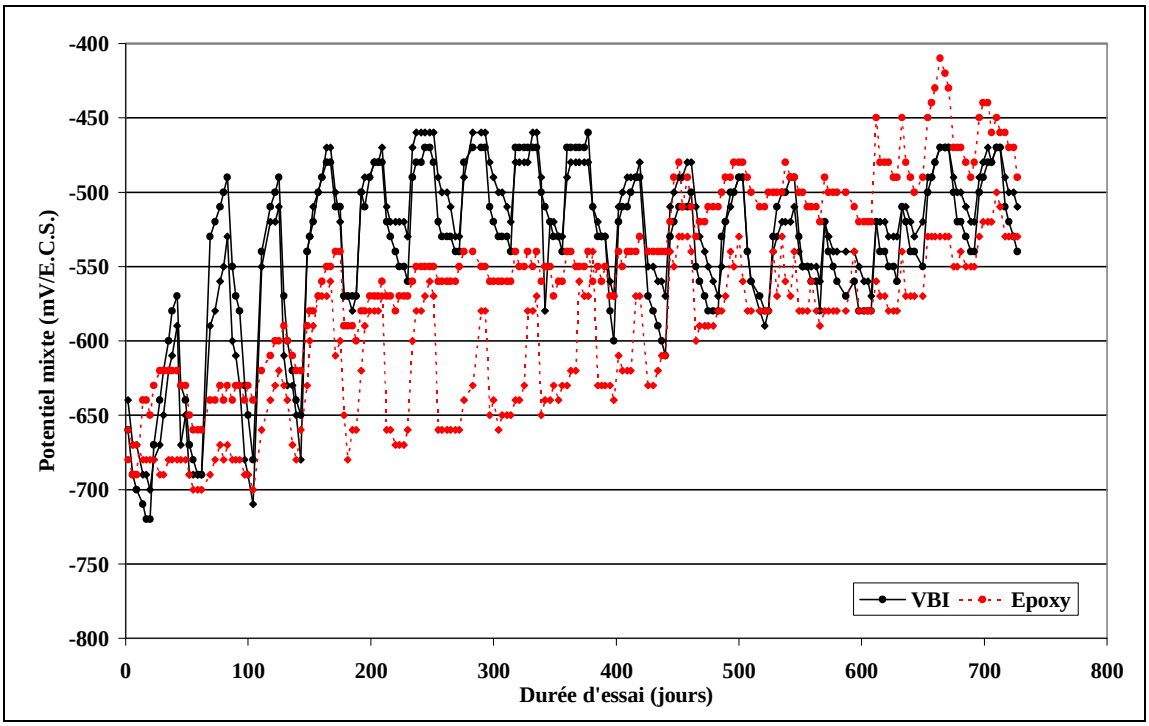


Piles après nettoyage VB = VBI; C = Epoxy par cataphorèse

Figure n°8 : Piles de concentration Calcaire + Nappe saline fluctuante [7]
Après 24 mois d'essai

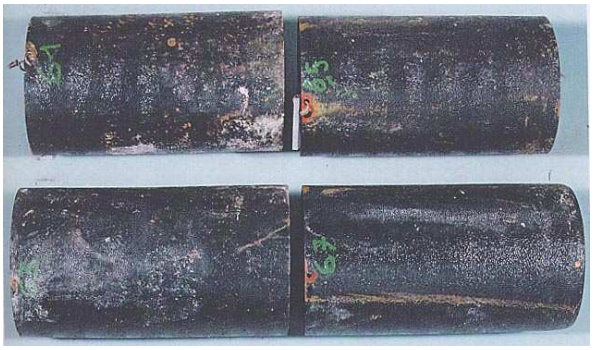


Evolution des débits des piles



Evolution des potentiels mixtes des piles

Figure n°9 : Piles de concentration Calcaire + Nappe saline fluctuante [7]
Après 24 mois d'essai



Evaluation de couches de conversion sous peinture Etat des revêtements 35 µm après 6 ans de séjour	Mise en place sur le site de différents systèmes de revêtement (1998)

Figure n°10 : Caractérisation de revêtements époxy déposés par cataphorèse sur site d'essai (Baie du Mont Saint Michel)