



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

– المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة – عنابة

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE – ANNABA

Département d'Électronique, d'Électrotechnique et Automatique

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGÉNIEUR D'ETAT

Domaine : Science et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Production Electrique et Energies Renouvelables

Présenté par

**SARA BENAMER
FAIZA HAMMADOU**

ETUDE DE LA CONCEPTION D'UN SYSTEME DE PROTECTION CATHODIQUE PAR COURANT IMPOSE (ICCP) AU NIVEAU DU PORT D'ANNABA

Encadré par

Dr. Tarek MESSIKH
ENSTI Annaba

Membres du jury :

Pr. Mourad HOUABES	Président	ENSTI Annaba
Dr. Azzeddine DEKHANE	Examineur	ENSTI Annaba
Dr. Badri REKIK	Examineur	ENSTI Annaba

Année 2024

ملخص

التآكل هو مشكلة رئيسية للبنية التحتية للموانئ، ولا سيما الأرصفة والجدران الساندة لأنه يقلل من مقاومتها الميكانيكية وعمرها الافتراضي. هذه الظاهرة تثير القلق بشكل خاص في البيئات البحرية بسبب وجود المياه المالحة وعوامل التآكل الأخرى. تعتبر الحماية الكاثودية حلاً فعالاً. يركز هذا العمل على الحماية الكاثودية بالتيار المفروض لمكافحة التآكل، وهي طريقة تعتمد على تحويل الهياكل المعدنية إلى كاثودات لمنع أكسدةها. هذه الطريقة تستخدم تياراً كهربائياً خارجياً، يتم الحصول عليه بواسطة محول مقوم، لتوفير حماية مستمرة وقابلة للتعديل، مما يضمن حماية مثالية على المدى الطويل. تركز دراستنا هذه على تطبيق هذه الطريقة على رصيف محطة الحاويات في ميناء عنابة.

تتضمن هذه الدراسة كل الخطوات اللازمة لتطبيق طريقة الحماية الكاثودية بالتيار المفروض مثل حساب التيار اللازم، تحديد خصائص المحول - المقوم، وموزع التيار. ولتقييم هذه الطريقة تمت مقارنتها بطريقة أخرى مستعملة في نفس المجال وهي أنودات التضحية. على الرغم من أن أنودات التضحية أبسط وأقل تكلفة في التركيب الأولي، إلا أنها تظهر قيوداً فيما يتعلق بالتحكم وطول العمر. الحماية الكاثودية بالتيار المفروض لها تكلفة أولية أعلى، لكن هذا النظام يوفر حماية أفضل على المدى الطويل وصيانة أسهل لذي فهو حل أكثر فعالية من حيث التكلفة نظراً لانخفاض تكاليف الصيانة وطول عمره. لذلك يوصى باستخدام الحماية الكاثودية بالتيار المفروض في ميناء عنابة بسبب فعاليتها المتفوقة ومزاياها الاقتصادية على المدى الطويل. يمكن أن تكون التوصيات والاستنتاجات المستخلصة من هذه الدراسة مرجعاً للموانئ والبنى التحتية البحرية التي تواجه مشاكل تآكل أخرى مشابهة. تختتم الدراسة بتحليل مالي مفصل للطريقتين. يشمل هذا التحليل تكاليف التركيب والصيانة والاستبدال، وتبرز الفوائد الاقتصادية للحماية الكاثودية بالتيار المفروض على المدى الطويل.

ABSTRACT

Corrosion is a major problem for port infrastructure, particularly docks and sheet piles, as it reduces their mechanical strength and lifespan. This phenomenon is particularly concerning in marine environments due to the presence of saltwater and other corrosive agents. To combat corrosion, cathodic protection (CP) has proven to be an effective solution. This work focuses on impressed current cathodic protection (ICCP), a method that involves transforming metal structures into cathodes to prevent their oxidation. ICCP uses an external electric current, powered by a rectifier transformer, to provide continuous and adjustable protection, thus ensuring optimal long-term protection. The study examines the application of ICCP to the quay of the container terminal at the Port of Annaba.

This work includes measurements of the sheet pile surface, current density, calculation of current demand, rectifier transformer characteristics, and current discharge. It then evaluates the effectiveness, durability, and costs associated with each method. While sacrificial anodes are simpler and less expensive to install initially, they have limitations in terms of control and lifespan. The results show that ICCP is a more cost-effective solution due to its reduced maintenance costs and extended lifespan. Impressed current cathodic protection is recommended for the Port of Annaba due to its superior effectiveness and long-term economic benefits. This method allows for the extension of the lifespan of port infrastructure, reducing maintenance costs and improving the durability of the structures. The recommendations and conclusions of this study can serve as a reference for other ports and maritime infrastructure facing similar corrosion issues, as although it has a higher initial cost, it offers better long-term protection and easier maintenance. A detailed financial analysis of the two methods concludes the study, taking into account installation, maintenance, and replacement costs, and highlighting the long-term economic benefits of ICCP.

RÉSUMÉ

La corrosion est un problème majeur pour les infrastructures portuaires, notamment les quais et les palplanches, car elle réduit leur résistance mécanique et leur durée de vie. Ce phénomène est particulièrement préoccupant dans les environnements marins en raison de la présence d'eau salée et d'autres agents corrosifs. Pour lutter contre la corrosion, la protection cathodique (PC) se révèle être une solution efficace. Ce travail se concentre sur la protection cathodique par courant imposé (ICCP), une méthode qui consiste à transformer les structures métalliques en cathodes pour prévenir leur oxydation. L'ICCP utilise un courant électrique extérieur, alimenté par un transformateur redresseur, pour fournir une protection continue et ajustable, garantissant ainsi une protection optimale sur le long terme. L'étude se penche sur l'application de l'ICCP au quai du terminal à conteneurs du port d'Annaba.

Ce travail incluant des mesures de la surface du la palplanche, la densité de courant, calcule du besoin en courant, caractéristique de transfo-redresseur et le déversoir du courant. Ensuite pour évalue l'efficacité, la durabilité et les coûts associés à chaque méthode. Bien que les anodes sacrificielles soient plus simples et moins coûteuses à installer initialement, elles présentent des limitations en termes de contrôle et de durée de vie. Les résultats montrent que l'ICCP est une solution plus rentable en raison de ses coûts de maintenance réduits et de sa durée de vie prolongée. La protection cathodique par courant imposé est recommandée pour le port d'Annaba en raison de son efficacité supérieure et de ses avantages économiques à long terme. Cette méthode permet de prolonger la durée de vie des infrastructures portuaires, réduisant ainsi les coûts de maintenance et améliorant la durabilité des structures. Les recommandations et conclusions de cette étude peuvent servir de référence pour d'autres ports et infrastructures maritimes confrontés à des problèmes de corrosion similaires, malgré un coût initial plus élevé, offre une meilleure protection à long terme et une maintenance plus facile. Une analyse financière détaillée des deux méthodes conclut l'étude. Cette analyse prend en compte les coûts d'installation, de maintenance et de remplacement, et met en évidence les avantages économiques de l'ICCP sur le long terme.

DEDICACE

Nous dédions ce modeste travail à :

Nos chers parents

Nos frères : Asma, Ziad, Nour Malak et Douaa et nos cousins

L'ensemble des ingénieurs aux Port Annaba : Monsieur Nasri Kamel, Monsieur

Omar Mimouni Monsieur Adel Amiar et spécialement monsieur Kadour

Abdelhak.

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers le Dr. Tarek Messikh, notre directeur de mémoire, pour sa guidance, son soutien et ses précieux conseils tout au long de ce travail. Sa patience et son expertise ont été essentielles dans la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à l'École Nationale Supérieure des Technologies et d'Ingénierie pour avoir fourni les ressources nécessaires à la réalisation de ce projet. Nous sommes reconnaissants envers le corps professoral et le personnel administratif pour leur assistance et leur disponibilité.

Nous souhaitons exprimer notre reconnaissance envers nos familles pour leur soutien indéfectible et leur compréhension pendant cette période intense de recherche et d'écriture.

Leur amour et leurs encouragements ont été une source d'inspiration constante.

Nous tenons également à remercier nos amis et nos proches pour leur soutien moral et leurs encouragements tout au long de ce parcours académique.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire. Leurs contributions ont enrichi notre travail et nous ont permis d'atteindre les objectifs de cette étude. Merci à tous ceux qui ont rendu cette réalisation possible.

Contents

ملخص	ii
ABSTRACT.....	iii
RÉSUMÉ	iv
DEDICACE	v
REMERCIEMENTS	vi
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ABREVIATIONS.....	xi
LISTE DES ANNEXES.....	xii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : CORROSION ET PROTECTION CATHODIQUE	3
1.1 Introduction	3
1.2 La corrosion.....	3
1.3 Causes de la corrosion.....	3
1.4 Processus de corrosion	4
1.5 Protection et lutte contre la corrosion	5
1.5.1 Domaines d'application de la protection cathodique.....	5
1.6 Protection cathodique des palplanches.....	6
1.7 Conclusion.....	6
CHAPITRE 2 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	7
2.1 Introduction.....	7
2.2 Définition d'une palplanche	7
2.3 Définition de la protection cathodique	7
2.4 Les types de la protection cathodique	8
2.4.1 La protection cathodique par courant imposé	8
2.4.2 Applications de la protection cathodique par courant imposé	9
2.4.3 La protection par anode sacrificielle	9
2.4.4 Applications des systèmes d'anodes galvaniques.....	9
2.5 Nouvelles technologies et avancées dans la protection cathodique	10
2.6 Conclusion.....	10
CHAPITRE 3 : CONCEPTION DE ICCP AU SEIN DU PORT D'ANNABA.....	11
3.1 Protection cathodique par courant imposé	11
3.2 Dimensionnement de la palplanche.....	11
3.3 Le courant de la protection cathodique par courant imposé.....	12
3.3.1 Surface de la palplanche.....	12

3.3.2	Densité de courant	12
3.3.3	Calcul le courant de la protection cathodique	13
3.4	Déversoirs de courant.....	13
3.4.1	Résistance du circuit.....	14
3.4.2	Voltage requis	15
3.5	Unité transformateur redresseur	16
3.6	Discussion et analyse des résultats	17
3.7	Conclusion	18
	CHAPITRE 4 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE ICCP ET SACP.....	19
4.1	Introduction	19
4.2	La protection cathodique par anode sacrificielle de la palplanche.....	19
4.2.1	Le principe de SACP	19
4.2.2	Anode Aluminium.....	19
4.3	Protection Palplanches	20
4.4	Étude comparative entre les deux méthodes	21
4.5	Les avantages et les inconvénients des deux méthodes de la PC.....	21
4.6	Étude financière de la méthode par courant imposé	22
4.7	Étude financière de la méthode par anode sacrificielle.....	23
4.8	Conclusion.....	24
	CONCLUSION GENERALE	25
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	27
	ANNEXES.....	29

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Phénomène de la corrosion dans les pipelines.	3
Figure 1-2 : Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion [4].	4
Figure 1-3 : Palplanche en acier.....	6
Figure 2-1 : Les différents types d'une palplanche.	7
Figure 2-2 : Principe de la protection cathodique par courant imposé.....	8
Figure 2-3 : Principe de la protection cathodique par anode sacrificielle.....	9
Figure 3-1 : Palplanche type PU 32	11
Figure 3-2 : Organigramme de la protection cathodique d'une palplanche.....	12
Figure 3-3 : Vue d'ensemble des anodes	13
Figure 3-4 : Coupe de l'Agencement de l'Anode dans la palplanche.....	14
Figure 3-5 : Chemin de câble le long du quai	14
Figure 3-6 : Electrode de référence fixe Ag/AgCl	15
Figure 3-7 : Transfo Redresseur Auto Potentiel 30V/40 A (Type).....	16
Figure 3-8 : Schéma électrique de design	17
Figure 3-9 : Schéma électrique d'une zone.....	17
Figure 4-1 : Anode en aluminium	19
Figure 4-2 : Rideaux de palplanche protégés par anode sacrificielle.....	24

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Caractéristiques du quai Terminal à Conteneurs	11
Tableau 3-2 : Dimension d'une palplanche	11
Tableau 3-3 : Densités de courant dans chaque zone.....	12
Tableau 3-4 : Courants nécessaires pour la PC.....	13
Tableau 3-5 : Construction finale	15
Tableau 4-1 : Comparaison entre les deux méthodes de la PC	21
Tableau 4-2 : Comparaison entre les deux méthodes de la PC	22

LISTE DES ABREVIATIONS

PC	Protection cathodique
ICS	Impressed current system
<i>E_{cor}</i>	Potentiel de corrosion
<i>E_{prot}</i>	Potentiel de protection cathodique
NACE	National Association of Corrosion Engineers
ICCP	Impressed current cathodic protection
MMO	Mixed Metal Oxyde
Larg	Largeur utile
Epai	Epaisseur
Haut	Hauteur
<i>L_p</i>	Longueur palplanche
NB	Nombre du palplanche
Ma	Masse anodique
I	Consommation en courant de protection
Na	Nombre d'année du service
<i>R_{acier}</i>	Résistance de la structure
<i>R_c</i>	Résistance du câblage
<i>R_{a/e}</i>	Résistance anode/Electrolyte
SACP	Sacrificiel anodic cathodic protection
ml	Mètre linéaire

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Caractéristique transfo-redresseur

Annexe B : EN NF 12496 du 10 Août 2013

Annexe C : ANNEXES MATERIAUX

INTRODUCTION GENERALE

La durabilité et la sécurité des infrastructures portuaires sont des enjeux cruciaux pour le développement économique et la compétitivité des régions maritimes. Le port d'Annaba, en tant que l'une des principales portes d'entrée maritime de l'Algérie, n'échappe pas à cette exigence. Parmi les nombreux défis auxquels ces infrastructures sont confrontées, la corrosion constitue une menace majeure, particulièrement pour les structures métalliques immergées telles que les quais, les jetées et les palplanches.

La corrosion est un processus électrochimique naturel qui dégrade les métaux par réaction avec leur environnement, conduisant à une diminution de leur résistance mécanique et de leur durée de vie. Dans les environnements maritimes, la présence de l'eau salée et d'autres agents corrosifs accélère ce phénomène, rendant impérative l'adoption de mesures de protection efficaces. La corrosion des palplanches est un phénomène omniprésent dans les environnements marins et géotechniques, où ces structures métalliques sont soumises à des conditions corrosives.

La corrosion, processus électrochimique complexe, résulte de réactions entre le métal des palplanches, l'eau et les substances chimiques présentes dans le sol ou dans l'eau environnante. Ce processus inexorable engendre une détérioration progressive des palplanches, pouvant compromettre leur stabilité et leur fonctionnalité. Les palplanches, utilisées dans une variété d'applications telles que la construction de quais, de digues, de fondations souterraines et de parois de soutènement, sont exposées à des environnements corrosifs qui accélèrent le processus de corrosion. Les facteurs tels que la salinité de l'eau, le pH du sol, la présence de substances chimiques agressives et les variations de température contribuent à cette détérioration.

Parmi les différentes techniques de protection contre la corrosion, la protection cathodique se distingue par son efficacité éprouvée. Cette méthode consiste à transformer la surface métallique en cathode d'une cellule électrochimique, empêchant ainsi l'oxydation du métal. L'application de la protection cathodique peut se faire par l'utilisation d'anodes sacrificielles ou par l'emploi de courant imposé, ce dernier étant souvent préféré pour les grandes structures en raison de son efficacité et de sa capacité de contrôle. Le système de protection cathodique alimenté par transformateur redresseur est une des solutions les plus avancées dans ce domaine, permettant de réguler avec précision le courant de protection et d'assurer une protection optimale sur le long terme.

Cette étude se concentre sur l'application de la protection cathodique alimentée par transformateur redresseur au quai du port d'Annaba. Le choix de cette technologie repose sur ses nombreux avantages, notamment sa capacité à fournir une protection continue et ajustable, ainsi que sa robustesse face aux variations des conditions environnementales. La protection cathodique par courant imposé, lorsqu'elle est correctement conçue et maintenue, peut prévenir de manière significative la corrosion des structures métalliques immergées, prolongeant ainsi leur durée de vie et réduisant les coûts de maintenance.

Dans ce contexte, le présent travail vise à explorer en détail les aspects théoriques et pratiques de la protection cathodique. Il s'agit notamment de comprendre les principes fondamentaux de la

corrosion, de définir les mécanismes spécifiques de la protection cathodique, et de détailler les composants et le fonctionnement d'un système alimenté par transformateur redresseur. En outre, une étude de cas sera présentée pour illustrer l'application concrète de cette technologie au quai du port d'Annaba.

Ce travail s'articule autour de quatre chapitres, chacun explorant des aspects clés de la protection cathodique. Le premier chapitre décrit les principes fondamentaux de la corrosion et les mécanismes de la protection cathodique par courant imposé. Le deuxième chapitre présente des recherches bibliographiques sur les définitions et le fonctionnement de la protection cathodique par soutirage de courant et par anode sacrificielle. Le troisième chapitre traite du dimensionnement des palplanches pour le terminal à conteneurs du port d'Annaba, en étudiant les composants et les sources d'alimentation du système de protection cathodique. Le quatrième chapitre effectue une étude comparative entre la méthode par courant imposé et la méthode par anodes sacrificielles, en analysant leur efficacité, leur durabilité et leurs coûts respectifs. Cette analyse financière vise à fournir des recommandations éclairées pour la gestion et la protection des infrastructures portuaires. L'étude se termine par une conclusion soulignant l'importance de la protection cathodique pour la pérennité des infrastructures maritimes.

CHAPITRE 1 : CORROSION ET PROTECTION CATHODIQUE

1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter une vue d'ensemble du problème de la corrosion et ses enjeux majeurs. Nous examinerons en détail les causes de ce phénomène électrochimique complexe, ainsi que les mécanismes qui en sont à l'origine. Cette analyse approfondie permettra de mieux comprendre les différentes stratégies de lutte contre ce fléau qui ronge les infrastructures métalliques.

1.2 La corrosion

La corrosion se définit comme une dégradation du matériau ou de ses propriétés, résultant d'une réaction chimique avec l'environnement. Cette définition souligne que la corrosion est un phénomène préjudiciable : elle détruit le matériau ou diminue ses propriétés, le rendant ainsi inapproprié pour l'usage prévu. Un autre phénomène de dégradation des matériaux est l'usure, qui se manifeste par une perte progressive de matière à la surface d'un solide, causée par le frottement ou l'impact. Bien que principalement mécanique, l'usure peut être influencée par les interactions chimiques entre le matériau et l'environnement, qui peuvent accélérer ou ralentir la dégradation. Ainsi, l'étude de la corrosion et de la protection des métaux inclut également les phénomènes de dégradation résultant des sollicitations mécaniques et chimiques combinées [1,2].



Figure 1-1 : Phénomène de la corrosion dans les pipelines.

1.3 Causes de la corrosion

La corrosion est la détérioration d'un métal provoquée par une réaction chimique avec son environnement immédiat. Dans la majorité des cas, il s'agit de l'oxydation électrochimique des métaux en réaction avec un oxydant, tel que l'oxygène. Divers facteurs peuvent accélérer la corrosion, notamment la présence de poussière, l'humidité, une humidité relative élevée, des températures élevées, le sel, les acides, les solvants et autres produits chimiques. La vitesse de la corrosion dépend non seulement de l'environnement, mais aussi du type de métal. Par exemple, la fonte s'oxyde rapidement et forme de la rouille rouge lorsqu'elle est exposée à l'air à l'état naturel,

nécessitant ainsi un film protecteur. D'autres métaux, comme l'acier inoxydable, possèdent une résistance supérieure à la corrosion sans nécessiter de revêtement spécial [2,3].

1.4 Processus de corrosion

La corrosion du métal est un processus de dégradation qui se produit généralement en présence de matériaux dans des environnements humides, sur des terrains humides ou immergés dans l'eau, soumis à des réactions électrochimiques. Dans ce contexte, des réactions électrochimiques se produisent par transfert de charges entre des réactifs neutres ou ioniques et un matériau conducteur, appelé électrode, qui agit comme source ou puits d'électrons [3]. Les réactions d'oxydation (corrosion) se produisent sur les surfaces anodiques du métal, tandis que les réactions de réduction se produisent sur les surfaces cathodiques, créant ainsi des piles galvaniques.

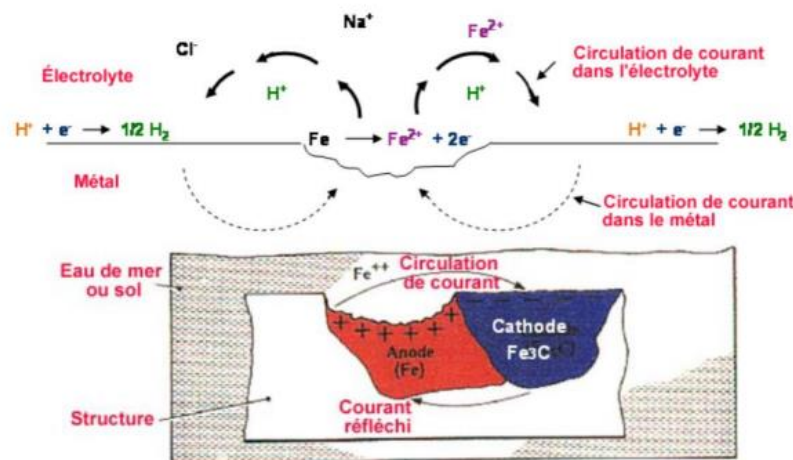


Figure 1-2 : Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion [4].

Au cours de phénomène de corrosion, les quatre éléments doivent être présents :

- **La zone anodique (zone positive) :** C'est la zone de la réaction d'oxydation où le métal libère des ions dans l'électrolyte ce qui entraîne la corrosion de la structure métallique. Les réactions anodiques :



- **La zone cathodique (zone négative) :** C'est la zone où se produit la réaction de réduction, dans laquelle les ions présents dans l'électrolyte sont réduits à la surface de la cathode. La réaction de réduction des ions hydrogène dans l'eau est la plus courante, et l'hydrogène se forme selon le processus chimique suivant :



- **L'électrolyte :** Présent dans l'eau de mer ou le sol, il permet le passage du courant électrique par le déplacement d'ions.
- **Le chemin métallique :** La zone anodique et la zone cathodique sont électriquement reliées entre elles par un milieu conducteur [5-7].

Lorsque la protection cathodique par courant imposé (ICCP) est appliquée, le courant continu fournit des électrons au métal, ce qui modifie les réactions à la surface du métal :

Réaction à l'Anode de la Source de Courant :

- Le courant continu est fourni par un redresseur connecté à une anode sacrificielle ou inerte, où l'oxydation de l'anode se produit. Par exemple, pour une anode en titane revêtue de platine, la réaction peut être :



- Ces électrons sont fournis à la structure métallique à protéger.

Réaction Cathodique à la Surface Métallique Protégée :

- Les électrons fournis par le redresseur neutralisent les cations métalliques et préviennent la formation de Fe^{2+} :



De plus, la réduction de l'oxygène peut se produire à la surface protégée, utilisant les électrons fournis :



1.5 Protection et lutte contre la corrosion

La corrosion représente un défi majeur pour la durabilité et la fiabilité des structures métalliques, souvent entraînant des coûts élevés et des risques de défaillance. Pour lutter contre ce phénomène, diverses stratégies de prévention et de protection sont mises en œuvre. Une solution particulièrement efficace est la protection cathodique. Ce procédé vise à inhiber la corrosion en rendant la surface métallique à protéger cathodique, en utilisant un autre matériau plus facilement oxydable ou en appliquant un courant électrique. La protection cathodique transforme ainsi les surfaces métalliques en zones de réduction plutôt qu'en zones d'oxydation, freinant ainsi le processus de corrosion. Cette technique, largement utilisée dans des environnements marins et souterrains, permet de prolonger la vie des structures métalliques tout en réduisant les coûts associés à leur maintenance et à leur remplacement [8-10].

1.5.1 Domaines d'application de la protection cathodique

La protection cathodique est une technique essentielle pour prévenir la corrosion des structures métalliques immergées ou enterrées, prolongeant ainsi leur durée de vie et assurant leur sécurité [9]. Voici quelques domaines d'application courants de la protection cathodique :

- Protection des pontons
- Protection des pieux
- Installation sur les piles de ponts, viaducs
- Protection des quais
- Palplanches
- Toutes les structures en béton armé immergées dans l'eau de mer
- Toutes les pièces métalliques immergées dans l'eau de mer

1.6 Protection cathodique des palplanches

Les palplanches, souvent utilisées pour les structures de soutènement et les barrages, sont exposées à des environnements sévères qui peuvent provoquer une corrosion rapide. La protection cathodique est une méthode efficace pour protéger ces structures métalliques en réduisant la vitesse de corrosion à un niveau acceptable [11,17].

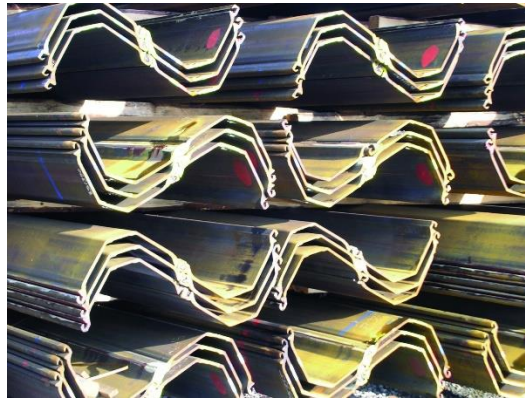


Figure 1-3 : Palplanche en acier

La protection cathodique fonctionne en abaissant le potentiel électrochimique des palplanches pour réduire les réactions anodiques qui causent la corrosion. Il existe deux principales méthodes de protection cathodique :

- La protection cathodique par courant imposé : agit en altérant le potentiel du métal à protéger à travers l'injection d'un courant électrique visant à diminuer la vitesse de corrosion. Les anodes sont reliées à un générateur de courant continu, qui peut fonctionner en mode permanent ou cyclique, assurant ainsi la fourniture continue d'un courant stable [6,12].
- La protection cathodique par anode sacrificielle : agit en altérant le potentiel du métal à protéger à travers l'injection d'un courant électrique, ce qui réduit la vitesse de corrosion. Les anodes sacrificielles sont spécialement conçues pour avoir un potentiel électrochimique plus négatif que le métal à protéger, ce qui permet de ralentir la corrosion du métal [6,13].

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré divers aspects de la protection cathodique et le problème de la corrosion. Dans le prochain chapitre, nous aborderons en détail les recherches bibliographiques sur la protection cathodique des palplanches.

CHAPITRE 2 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Introduction

La recherche de nouvelles méthodes de construction et la croissance des dommages aux structures, influencés par divers paramètres, ont incité les ingénieurs et chercheurs à adopter des techniques de construction efficaces, pratiques et économiques, telles que l'utilisation répandue des palplanches dans les secteurs du bâtiment et des travaux publics.

2.2 Définition d'une palplanche

Une palplanche (composée de "pal" et "planche") est un pieu conçu pour être enfoncé dans le sol. Les palplanches servent à créer des murs de soutènement. Des batardeaux, des palées ou des écrans imperméables. Les rideaux qu'elles forment sont comparables à des murs ou des parois qui supportent la pression des terres en place, des remblais ou des variations de niveaux d'eau. On distingue :

- Les palplanches à module ou à inertie se comportent comme des poutres verticales, utilisant la butée au niveau de leur encastrement dans le sol et supportant les pressions dues aux dénivellations de terrain et d'eau (appelées palplanches Larsen).
- Les palplanches plates, quant à elles, permettent de créer des enveloppes cylindriques fermées, contenant des matériaux dont les pressions génèrent des forces de traction importantes dans les joints. [7,14]

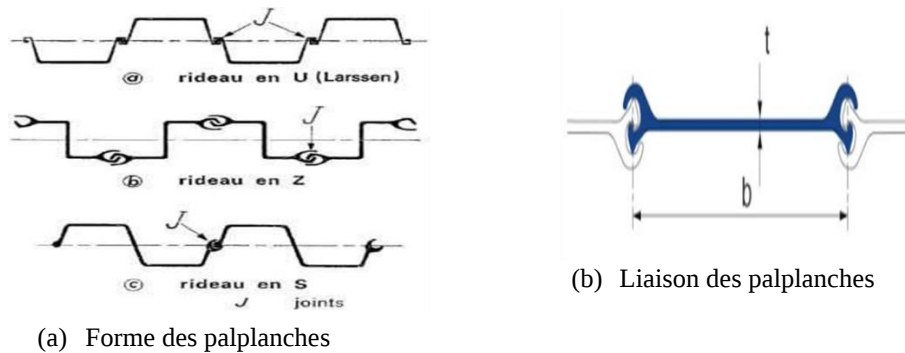


Figure 2-1 : Les différents types d'une palplanche.

2.3 Définition de la protection cathodique

Lorsqu'un métal entre en contact avec un électrolyte conducteur (eau ou sol), il s'établit spontanément un système d'échange ionique à l'interface métal/électrolyte sous l'effet du potentiel développé. Cet événement électrochimique continu produit simultanément deux phénomènes : une dissolution métallique aux sites anodiques produite par les réactions d'oxydation d'une part, et une formation d'un dépôt métallique créée par les réactions de réduction aux sites cathodiques d'une autre part. L'utilisation de la protection cathodique est basée sur l'injection d'un courant continu qui permet d'abaisser le potentiel naturel du métal de la zone active vers la zone d'immunité.

La protection cathodique est une technique de lutte active contre la corrosion. Son principe consiste à abaisser le potentiel électrochimique d'un métal jusqu'à son domaine d'immunité.

C'est le déplacement de potentiel de corrosion E_{COR} du métal vers un potentiel E inférieur à un potentiel de protection E_{PROT} de telle sorte que l'oxydation du métal devienne thermodynamiquement défavorable. La densité de courant anodique doit correspondre à une vitesse de réaction très faible pour assurer une vitesse de dissolution du métal acceptable pour la durée de vie attendue de la structure. La valeur de E_{PROT} est une donnée empirique et dépend des matériaux à protéger et de divers facteurs environnementaux. La norme NF EN 12463 donne différentes valeurs admises pour E_{PROT} dans différentes situations [15-17].

2.4 Les types de la protection cathodique

2.4.1 La protection cathodique par courant imposé

Le système de protection cathodique par courant imposé dans la figure 2-2 diffère du système de protection cathodique par anode sacrificielle en ce sens que la génération du courant ne dépend pas de la différence de potentiel entre l'anode sacrificielle et la structure protégée (cathode). Dans le cas de la protection cathodique par courant imposé (ICCP), une alimentation électrique externe est requise, fournissant un courant continu pour imposer le flux électrique nécessaire.

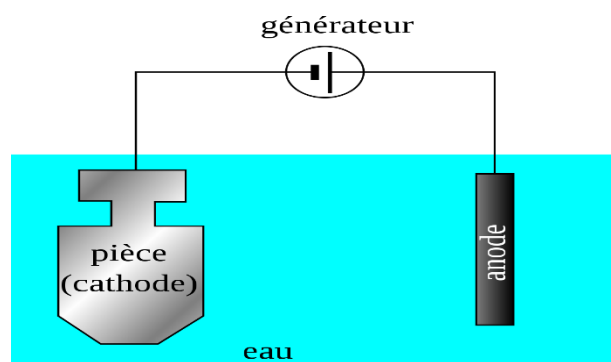


Figure 2-2 : Principe de la protection cathodique par courant imposé

La protection cathodique par courant imposé (ICCP) est une méthode efficace pour prévenir la corrosion des structures métalliques immergées ou enterrées, comme les pipelines, les réservoirs et les coques de navires. Le courant continu est essentiel dans ce processus car il permet de polariser la structure protégée, la transformant en cathode d'une cellule électrochimique. En appliquant un courant continu depuis une source externe (généralement un redresseur), les électrons sont fournis à la structure métallique, compensant ainsi les pertes d'électrons dues aux réactions de corrosion naturelles. Ce flux constant d'électrons empêche les ions métalliques de se dissoudre dans l'environnement environnant, stoppant ainsi la réaction anodique responsable de la corrosion. En outre, le courant continu assure une distribution uniforme de la protection sur toute la surface de la structure, même dans les zones difficilement accessibles ou irrégulières. Cela garantit une protection complète et efficace, prolongeant la durée de vie des installations métalliques tout en réduisant les coûts de maintenance et les risques de défaillances structurelles [6-18].

2.4.2 Applications de la protection cathodique par courant imposé

La protection cathodique joue un rôle crucial dans divers secteurs pour empêcher la corrosion et prolonger la durabilité des structures métalliques. Voici quelques applications courantes de la protection cathodique [8,19].

- Les grandes exigences de courant, en particulier pour les surfaces nues ou mal enduites le structures.
- Surmonter les courants parasites ou les problèmes d'interférences cathodiques.
- Protection des grandes boîtes à eau des échangeurs de chaleur, des réchauffeurs autres navires.
- L'intérieur des réservoirs de stockage d'eau.
- Les fonds extérieurs (primaires et secondaires) de stockage hors sol réservoirs.
- Les composants sous-marins des structures offshores.
- Les pieux de fondation et les palplanches, sous terre et dans l'eau

2.4.3 La protection par anode sacrificielle

La protection cathodique par anode sacrificielle dans la figure 2-3 est une méthode de protection cathodique qui utilise une anode sacrificielle galvanique de telle sorte que toute la corrosion soit concentrée sur elle. En d'autres termes, l'anode sacrificielle sera consommée plutôt que le métal à protéger. C'est pourquoi on l'appelle anode sacrificielle. Le courant circule de l'anode (la plus active) vers le métal à protéger (cathode).

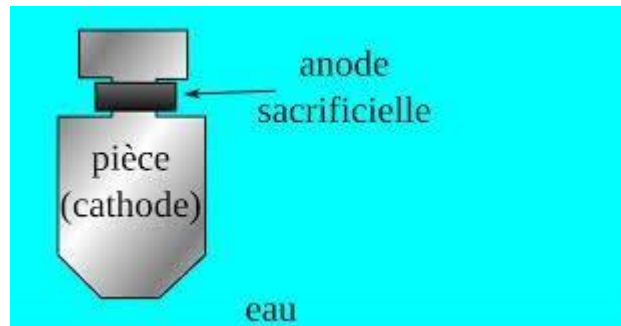


Figure 2-3 : Principe de la protection cathodique par anode sacrificielle.

Ainsi, la différence de potentiel entre l'anode sacrificielle et la structure protégée élimine les réactions d'oxydation sur la structure. Il est bien connu qu'un métal plus actif sera plus facilement oxydé et donc, aidera à protéger l'autre métal en agissant comme cathode. Les anodes sacrificielles sont utilisées pour protéger les navires, bateaux, pipelines, réservoirs, etc. Les anodes sacrificielles doivent être bien réparties et suffisamment proches de la structure à protéger.

2.4.4 Applications des systèmes d'anodes galvaniques

La protection cathodique par anodes sacrificielles (SACP) est une méthode efficace pour prévenir la corrosion des structures métalliques dans divers environnements. Voici quelques applications courantes de la protection SACP

- Lorsqu'une quantité de courant relativement faible est requise.
- Électrolytes à résistivité généralement plus faibles.
- Pour que la protection cathodique locale fournisse du courant à une zone spécifique.
- Lorsqu'un courant supplémentaire est nécessaire dans les zones à problèmes. Certaines structures avec les systèmes de protection cathodique actuels globalement [9,16].

2.5 Nouvelles technologies et avancées dans la protection cathodique

Les récentes avancées technologiques ont considérablement amélioré l'efficacité et la fiabilité de la protection cathodique. Voici quelques-unes des nouvelles technologies et avancées dans ce domaine [15-17].

- Anodes en Zinc et Aluminium avec Additifs : De nouveaux alliages contenant des éléments tels que l'indium et le gallium augmentent l'efficacité des anodes et prolongent leur durée de vie.
- Anodes en Titane Revêtues d'Oxyde Mixte (MMO) : Offrent une meilleure performance et une durabilité accrue, particulièrement dans les systèmes à courant imposé.
- Revêtements Nano structurés : Utilisation de nanomatériaux pour créer des revêtements protecteurs plus efficaces, augmentant la résistance à la corrosion et prolongeant la durée de vie des anodes et des structures protégées.
- Intégration de Panneaux Solaires : Utilisation de panneaux solaires pour alimenter les systèmes de protection cathodique dans les zones éloignées ou difficiles d'accès, assurant une source d'énergie durable et autonome.
- Énergie Éolienne : Exploitation de l'énergie éolienne pour fournir une alimentation complémentaire aux systèmes de protection cathodique, réduisant ainsi la dépendance aux sources d'énergie traditionnelles.
- Capteurs IoT : Intégration de capteurs connectés pour surveiller en temps réel les paramètres de corrosion, tels que le potentiel électrique, la densité de courant et l'état des anodes.
- Détection Précise : Capteurs capables de détecter les moindres variations dans les conditions de corrosion, permettant des ajustements rapides et précis.

2.6 Conclusion

Nous avons couvert de manière exhaustive les concepts clés et les développements récents concernant les palplanches et la protection cathodique. On a préparé pour le chapitre suivant, qui se concentrera sur la protection cathodique par courant imposé et la méthode de calcul nécessaire pour trouver le courant de la protection.

CHAPITRE 3 : CONCEPTION DE ICCP AU SEIN DU PORT D’ANNABA

3.1 Protection cathodique par courant imposé

La protection des infrastructures métalliques Palplanche sera assurée par un système à courant imposé utilisant des anodes faites de Mixed Metal Oxyde (MMO) du quai Terminal à Conteneurs de longueur 240 ml), alimentés des transformateur-redresseur. Le critère de protection applicable pour le système de protection cathodique est de -800 mV ON en prenant en compte la chute ohmique. Et ce par rapport à une électrode d’argent chlorure d’argent. Ce critère doit être atteint en tout point de la structure après la mise en service du système et ce quelles que soient les conditions d’opération. La conception est basée sur la protection de toute la structure comprenant les parties, immergées, et en fiche, pour une période minimale de vingt (20) ans. Le système est conçu en conformité avec les normes et standards en vigueur de la NACE « National Association of Corrosion Engineers », Il existe divers critères d’évaluation de l’efficacité d’un système de protection cathodique (norme NACE RP0169-92), mais la méthode principale consiste à mesurer le potentiel de l’ouvrage [9].

3.2 Dimensionnement de la palplanche

Les principales caractéristiques du quai Terminal à Conteneurs faisant l’objet d’une protection cathodique est résume dans le tableau 3.1 :

Tableau 3-1 : Caractéristiques du quai Terminal à Conteneurs

Caractéristique de la structure	Profondeur en eau	Profondeur en fiche	Temps d’immersion
Palplanches type PU 32	10.30 ml	8.65 ml	11 ans

Figure 3-1 représente une palplanche de type PU 32 et ces dimensions sont représentées dans le tableau 3-2.

Tableau 3-2 : Dimension d'une palplanche

Palplanche Type	Dimension				NB
	Larg (mm)	Haut (mm)	Epai (mm)	Lp (mm)	
Pu 32	600	452	19.5	24	400

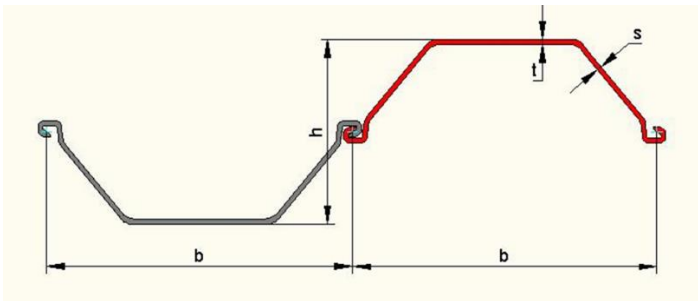


Figure 3-1 : Palplanche type PU 32

3.3 Le courant de la protection cathodique par courant imposé

Le calcul du système de protection cathodique d’un ouvrage de type quai en palplanches suit la procédure décrit dans l’organigramme de la figure 3-2.

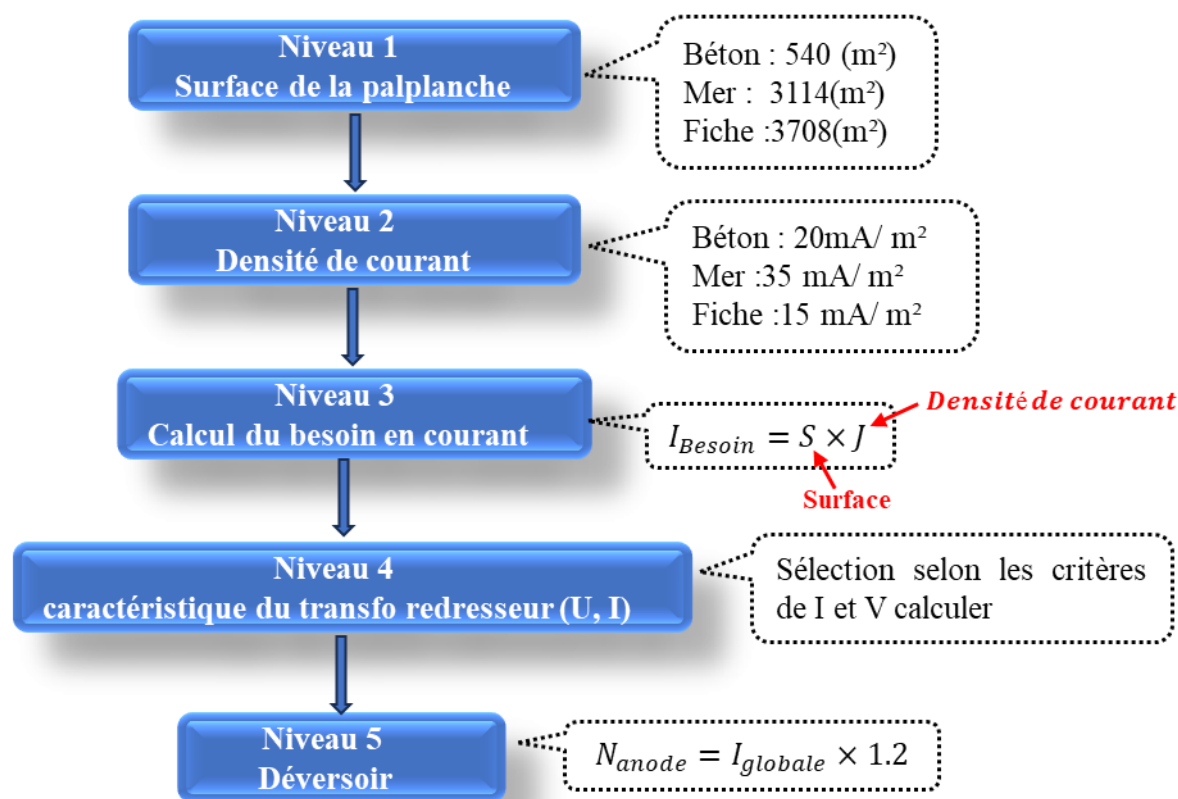


Figure 3-2 : Organigramme de la protection cathodique d’une palplanche

3.3.1 Surface de la palplanche

La surface totale de chaque structure est calculée en tenant compte de la surface dans le béton, la surface en eau de mer et la surface en fiche.

3.3.2 Densité de courant

Le courant nécessaire à la protection d'une structure dépend de plusieurs facteurs tel que la résistivité du milieu et la surface à protéger. Les densités de courant sont fixées par expérience. Les densités de courant nécessaires sont utilisées dans les calculs du système de protection cathodique des palplanches sont représenter dans le tableau 3-3.

Tableau 3-3 : Densités de courant dans chaque zone

Zone	Densité
Béton	20mA/m²
Mer	35mA/m²
Fiche	15mA/m²

3.3.3 Calcul le courant de la protection cathodique

Le besoin en courant se traduit par la multiplication de la surface à protéger par la densité de courant nécessaire établie qui se traduit par :

Besoin en courant = Surface × Densité de courant (3.1)

Les surfaces des différentes structures métalliques, ainsi que les quantités de courant nécessaires sont résumées dans le tableau 3-4

Tableau 3-4 : Courants nécessaires pour la PC

Zone	Surface de la zone (m²)	Courant de protection (A)
Béton	540	10.8
Mer	3114	108.99
Fiche	3708	55.62
TOTAL	7362	175.41

L'étape suivante sera le calcul de nombre d'anodes requis pour assurer la protection du quai Terminal à Conteneur.

3.4 Déversoirs de courant

Une anode en platine, sa consommation annuelle est pratiquement très faible, la consommation est de l'ordre 10 µg/A/Année. Pour assurer une durée de vie d'où moins 20 Ans de service et pour une consommation globale en courant de 175.41 A on aura :

Ma = 10 × I × NA × 1.25 (3.2)

Avec :

- Ma : Masse anodique.
- Coefficient 1.25 : représente le coefficient d'usure, une anode est dite consommée lorsqu'elle atteint 75 % de sa masse initiale.
- I : Consommation en courant de protection exprimer en A.
- Na : Nombre d'année de service.

Ma = 10 × 175.41 × 20 × 1.25 = 43 852.50µg = 43.85 mg (3.3)



Figure 3-3 : Vue d'ensemble des anodes

Les déversoirs de courant du système de protection cathodique des palplanches sont constitués d'anodes de titane recouvert d'oxyde de métaux précieux, communément appelés MMO. Une anode est en mesure de délivrer 8 à 12 A pour une utilisation de 20 ans, pour une consommation totale de 221,52 ampères, et en supposant que chaque anode fournit en moyenne 10A, le nombre d'anodes nécessaires est :

$$Nbre_{anode} = \frac{221.52}{10} \times 1.20 = 26.58 \text{ Anodes} \quad (3.4)$$

Cela signifie qu'il faudra arrondir à 28 anodes pour répondre à la consommation globale. Figure 3-4 illustre la coupe de l'agencement de l'anode dans la palplanche.

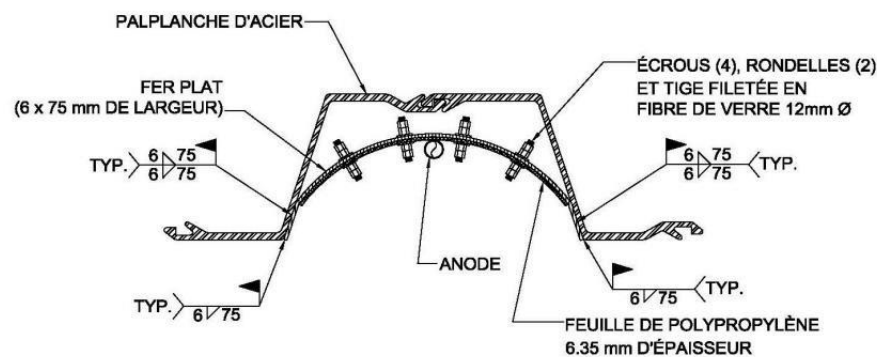


Figure 3-4 : Coupe de l'Agencement de l'Anode dans la palplanche

3.4.1 Résistance du circuit

La résistance du circuit est composée de :

- La résistance de la structure (acier) : $R_{acier}=0.0023\Omega$
- La résistance du câblage : R_c = Résistance du câblage $\times$ Longueur de câblage utilisé, un câble de 16 mm² montre une résistance de 0.0006594 Ω /m, la longueur moyenne de câble utilisé : 300 m. Donc on a $R_c= 0.199 \Omega$
- Résistance anode/Electrolyte : $R_{a/e}=0.3846 \Omega$

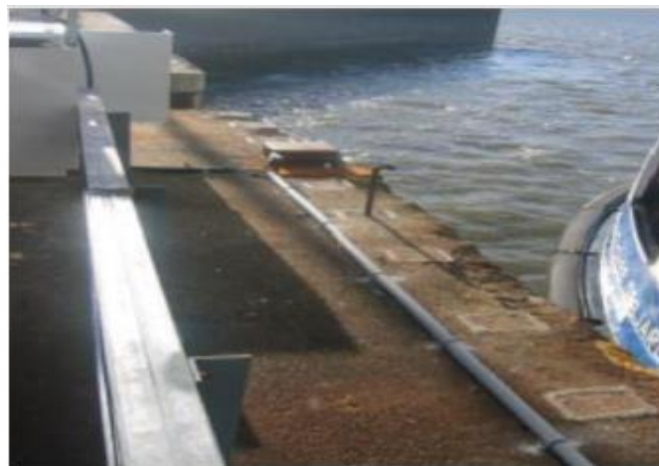


Figure 3-5 : Chemin de câble le long du quai

3.4.2 Voltage requis

Le voltage requis correspond à :

V = Courant requis × Résistance totale (3.5)

Les calculs ont permis de déterminer que 28 anodes sacrificielles sont nécessaires pour assurer une protection cathodique efficace des palplanches du quai du terminal. La longueur totale du quai a été divisée en plusieurs sous-zones distinctes, chacune alimentée par un redresseur dédié. Ces sous-zones nécessitent une alimentation électrique de 30 V/40 A. Le redresseur choisi doit donc être en mesure de fournir ces caractéristiques électriques afin de satisfaire les besoins en courant et en tension de chaque sous-zone. Cette configuration permettra d'obtenir une répartition homogène du courant de protection cathodique sur l'ensemble de la structure métallique des palplanches. Le Tableau 3-5 récapitule la configuration finale du système

Tableau 3-5 : Construction finale

Le poste	Nombre d’Anodes	Nombre de Redresseur	Nombre d’Electrode de référence <i>Ag/Agcl</i>
Quai Terminal à Conteneur	28 unités	01	10

Une électrode de référence est un composant électrique essentiel dans les systèmes de protection cathodique. Il s'agit d'un conducteur qui permet le passage des électrons entre une partie métallique (la structure à protéger) et une partie non métallique (l'électrolyte environnant). Ces électrodes de référence jouent un rôle crucial dans la vérification et le suivi de l'efficacité de la protection contre la corrosion. Elles permettent de mesurer précisément le niveau de polarisation du métal, c'est-à-dire le décalage de son potentiel électrochimique par rapport à sa valeur naturelle. Cette mesure est fondamentale pour s'assurer que le niveau de protection cathodique est bien maintenu dans la plage requise. La figure 3-6 représente le schéma de cette électrode [7].

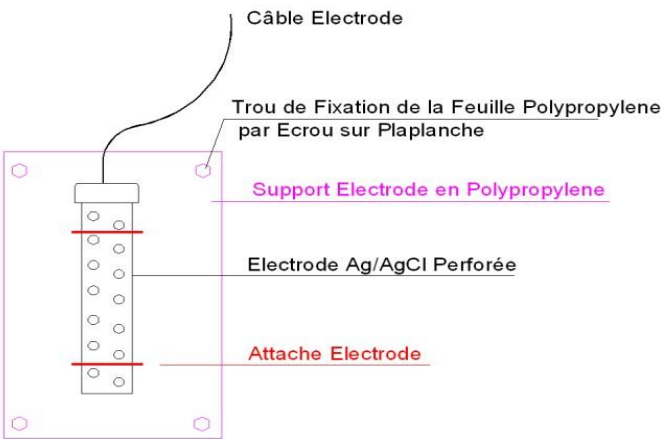


Figure 3-6 : Electrode de référence fixe Ag/AgCl

3.5 Unité transformateur redresseur

Le courant que le poste de soutirage doit débiter est 175.41 A. Donc et afin de faire fonctionner le poste en continue pour une période de 20 Ans et que le poste ne doit pas fonction en plein régime on devra majorer de 20 % le courant théorique pour faire face à tous défauts qui peuvent y être par accident.

Donc :

$$I_1 = I + 20\%I = I \times 1.20 = 175,41 \times 1.20 = 210.49 \approx 211A \quad (3.6)$$

Pour éviter que le redresseur travaille à pleine puissance (après l'extension), il faut le charger à 80%, le courant devient alors :

$$I_{R2} = 211 \times \frac{80}{100} = 211.80A \approx 212A \quad (3.4)$$

On constate qu'on a affaire à un courant en courant continue qui est très élevé, pour une tension de service 30 Volts pour éviter la détérioration des Anodes MMO (on a consultant leur fiches technique chaque anode peut fournir un courant jusqu'à 12 Ampère mais avec une tension maxi de 30 volts. Pour cela on optera pour des postes de 50 A, chaque poste qu'on pourra avoir fournira **U 30 V, I =40 A**. Et pour éviter d'avoir plusieurs postes dans notre cas on a opté pour un seul poste a plusieurs Zones Auto-Potentiel (Chaque zone est capable de fournir un courant de 50 Ampères et une tension de 30 Volts, chaque zone en parallèle avec autres. A la sortie du transformateur on aura 05 pôles anodique et Un pôle commun Négatif. Et vu que la commande du poste est électronique, donc chaque zone est équipée d'électrode de référence permanente type *Ag/Agcl*, qui fournisse au poste en permanence le potentiel en service.



Figure 3-7 : Transfo Redresseur Auto Potentiel 30V/40 A (Type)

Grâce à cette configuration chaque Zone du poste ne fonctionne pas dis que le potentiel est au maximum, mais il se mettra en service automatiquement dis que le seuil de potentiel bas. Sur ce poste qu'on a installé, chaque zone du poste à comme consigne comme suite Potentiel Min = -800 mV, Potentiel Maxi -1400 mV. Ci-après les schémas électriques qui la philosophie de design.

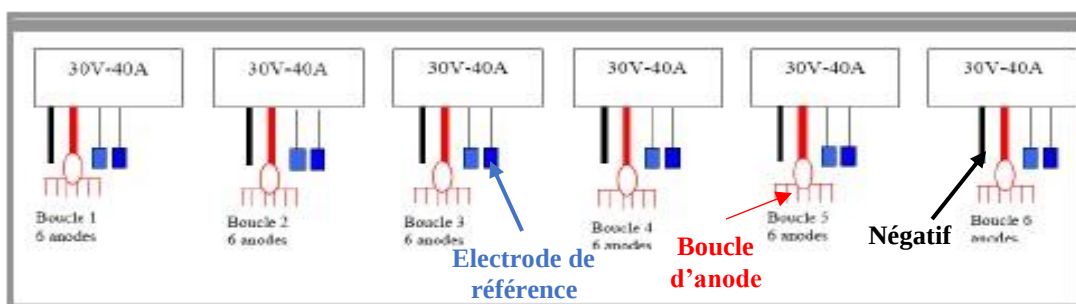


Figure 3-8 : Schéma électrique de design

3.6 Discussion et analyse des résultats

Le calcul de la protection cathodique des palplanches, basé sur les normes telles que la NACE SP0176, repose sur des principes théoriques rigoureux. Cependant, lors de la mise en œuvre pratique sur les quais, plusieurs facteurs peuvent entraîner des divergences significatives. Les variations des conditions environnementales, telles que la salinité et la température de l'eau, ainsi que la complexité géométrique des structures, peuvent affecter les résultats.

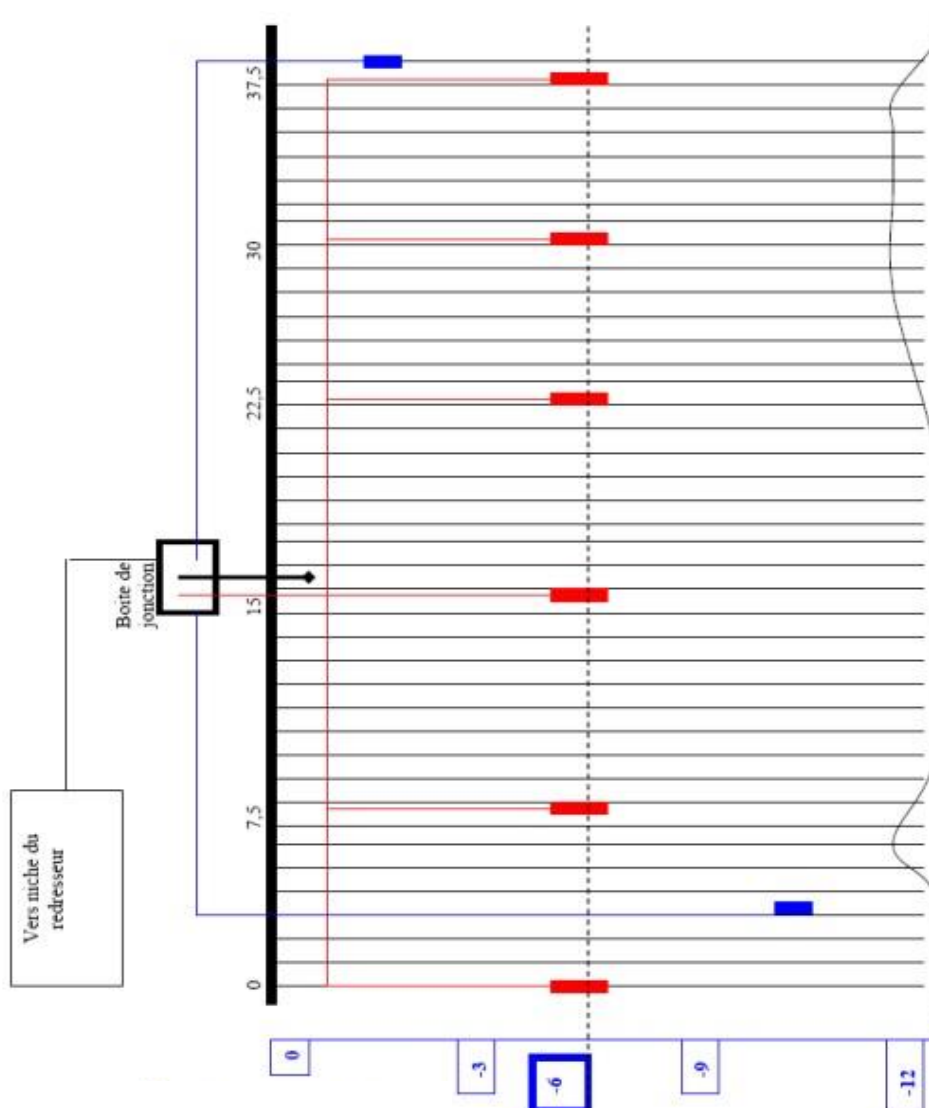


Figure 3-9 : Schéma électrique d'une zone

De plus, les difficultés d'installation, les interférences électrochimiques imprévues et les limitations budgétaires ajoutent des couches de complexité. Ainsi, malgré une planification minutieuse basée sur les calculs normatifs, il est souvent nécessaire de réaliser des ajustements en fonction de la réalité du terrain et des spécificités du quai, afin d'assurer une protection optimale contre la corrosion. Pour mieux illustrer ce concept, figure 3-9 représente le schéma électrique du design

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué tous les calculs nécessaires pour la mise en œuvre de la méthode de protection cathodique par courant imposé (ICCP) des palplanches. Nous avons détaillé chaque étape, de la collecte des données à l'application des formules spécifiques à cette méthode, en veillant à garantir la précision et la pertinence de nos résultats. Dans le chapitre suivant, nous procéderons à une évaluation approfondie de la méthode ICCP en la comparant avec la méthode de protection cathodique par anodes sacrificielles (SACP), afin de déterminer l'efficacité relative de chacune dans le contexte de notre étude.

CHAPITRE 4 : ETUDE COMPARATIVE ENTRE ICCP ET SACP

4.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'étude de la protection cathodique par anodes sacrificielles. Les calculs nécessaires au dimensionnement de ce système seront détaillés. Un tableau comparatif avec la méthode par courant imposé précédemment étudiée sera ensuite établi. Enfin, une discussion concise sur le choix de la meilleure approche de protection cathodique pour le projet conclura ce chapitre.

4.2 La protection cathodique par anode sacrificielle de la palplanche

4.2.1 Le principe de SACP

Dans le domaine de la protection cathodique des structures immergées, qu'elles soient en contact avec de l'eau salée ou douce, trois types d'anodes principaux sont disponibles. Chacun de ces types d'anodes présente des caractéristiques spécifiques qui le distingue des autres, offrant ainsi des avantages particuliers en fonction des besoins et des conditions d'application. Les trois types d'anode qu'on peut les utilisées sont les suivants :

- Anode en Aluminium
- Anode en Zinc
- Anode en Magnésium

Pour notre étude on opte pour les anodes Sacrificielle en Aluminium.



Figure 4-1 : Anode en aluminium

4.2.2 Anode Aluminium

Additionnée à l'Indium (0.02%) et la zinc (1 à 5%), cette addition a pour rôle d'éliminer la formation de la couche de passivation et d'améliorer son rendement d'utilisation, le potentiel que peut développer cette anode est de -1050 mV par rapport à une électrode $Ag/AgCl$ pour une consommation de l'ordre de 3.2 à 3.5 Kg/A/An.

4.3 Protection Palplanches

Les anodes de préférences qui seront utilisées pour une protection dans l'eau de mer seront de type Anode Galvanique en Aluminium à l'Indium. Les anodes en alliage aluminium-indium présentent une capacité énergétique significativement plus élevée que celles en zinc. En effet, l'aluminium offre une capacité énergétique de 2500 Ah/kg, comparé. Seulement 820 Ah/kg pour le zinc.

En appliquant ces valeurs, un kg d'alliage aluminium indium pourrait théoriquement fournir un courant d'un ampère pendant 2 500 heures, alors que le zinc ne le ferait que pendant 820 heures. Toutefois, dans la pratique, ces chiffres sont généralement ajustés en tenant compte d'un facteur de sécurité de 5 à 10%. En ce qui concerne la consommation globale, une anode en aluminium nécessite environ 3.50kg par ampère par an. Donc pour une durée de vie d'au moins 20 ans, elle sera comme suit :

D'où

$$M = C \times I \times D \quad (4.1)$$

M : Masse Anodique Globale en Kg (Théorique)

C : est la consommation d'une anode en Kg/A.an I : Besoin en courant en A.

D : est la durée de vie d'une anode en an.

Donc la masse théorique global en aluminium sera de :

$$M = 3.50 \times I \times NA$$

$$M = 3.50 \times 175.41 \times 20 \quad (4.2)$$

$$M = 12278.7\text{Kg} = 12279$$

Sachant qu'une anode est considérée en fin d'utilisation lorsqu'elle perd 70 % de son poids initial donc il faut majorer la consommation théorique à 30 %

$$M = M \times 30\% + M \quad (4.3)$$

$$M = 12279 \times 30\% + 12279 = 1596.70 \text{ kg}(15963\text{kg})$$

Pour obtenir une bonne répartition de protection on opte pour des anodes en aluminium ayant poids de 100 Kg (NET) chacune. Le nombre d'anode sera comme suit :

$$Nb = M/P_{anode} \quad (4.4)$$

D'où :

Nb = Nombre d'anode à installer

M = Poids d'anode en Kg

P_{anode} = Poids d'anode Net réel en Kg

$$Nb = \frac{12279}{100} = 122.79 \text{ Anodes} \quad (4.5)$$

Soit le nombre d’anodes à prévoir est de 123 anodes de 100 kg chacune. Le choix des anodes sera effectué en fonction de leur disponibilité sur le marché, qui propose différent type d’anodes en termes de poids et de forme. Dans notre cas, l’anode devra être sous forme de lingot monté sur un support en fer plat approprié, facilitant ainsi sa fixation sur la palplanche ou les pieux, que ce soit par soudage à l’arc sous-marin ou par boulonnage.

D'après la norme EN NF 12496 du 10 Août 2013 « Anodes galvaniques pour la protection cathodique en eau de mer et dans les boues salines » et dans son Annexe B page 18 il y a un rendement et efficacité que celle des anodes en Zinc.

4.4 Étude comparative entre les deux méthodes

Malgré la ressemblance des deux systèmes, ils sont bien différents. Leurs différences fondamentales sont manifestes dans leur mode opératoire. En effet, l’anode à courant imposé nécessite une source de courant externe, tandis que l’anode sacrificielle fonctionne de manière autonome.

Tableau 4-1 : Comparaison entre les deux méthodes de la PC

Anode sacrificielle	Anode à courant imposé
Indépendant de toute source d’énergie électrique. Il ne peut y avoir d’erreur de branchement (c’est un système autonome)	Alimentation extérieure indispensable. Nécessité de faire attention aux erreurs de branchement. Un transformateur redresseur SCS
Nombre des anodes est 123 anodes à installer	Nombre d’anodes est 28 anodes à installer
Type d’anode est aluminium indium	Type d’anode est mixed metal oxyde MMO
Système facile à l’installation	Système un peu compliqué à l’installation
Entretien peu ou pas d’entretien	Besoin d’entretien des câbles, le coffret de l’alimentation.
Dégradation rapide des anodes	Les anodes se dégradent moins rapidement qui résulte à un système efficace à plus long terme.
Coût de construction élevée	Coût de construction moyenne

4.5 Les avantages et les inconvénients des deux méthodes de la PC

Cette méthode de la protection cathodique contre le phénomène de la corrosion est contenue des avantages et des inconvénients sont représenter dans le tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Comparaison entre les deux méthodes de la PC

	La protection par courant imposé	La protection par anode sacrificielle
Les Avantages	Permet de protéger de grandes structures métalliques de manière uniforme.	Installation facile et rapide, sans besoin d'équipement complexe ou d'alimentation électrique.
	Les systèmes de courant imposé peuvent durer plusieurs décennies avec un entretien régulier.	Fonctionne sans besoin d'une alimentation électrique continue, ce qui est avantageux pour les zones éloignées.
	Permet de contrôler précisément le potentiel de protection.	Nécessite moins de maintenance que les systèmes de courant imposé, bien que les anodes doivent être surveillées et remplacées lorsqu'elles sont consommées.
	Idéal pour les structures de grande taille ou complexes où les anodes sacrificielles ne seraient pas efficaces.	
	Peut être ajustée pour fournir la protection optimale en ajustant le courant appliqué.	
Les inconvénients	Dépend d'une alimentation électrique continue, ce qui peut être un problème dans des zones éloignées ou en cas de panne de courant.	Les anodes sacrificielles ont une durée de vie limitée et doivent être remplacées périodiquement.
	Exige une maintenance régulière et des inspections pour s'assurer que le système fonctionne correctement et pour ajuster les paramètres si nécessaire.	Moins efficace pour les grandes structures ou les structures très complexes en raison de la distribution inégale des anodes
	Plus complexe à installer et à gérer par rapport à la protection par anodes sacrificielles.	Une fois installées, les anodes sacrificielles ne permettent pas de contrôle précis de la protection comme dans les systèmes de courant imposé

4.6 Étude financière de la méthode par courant imposé

Étude et Conception :

- Analyse du site, étude géotechnique et environnementale, et conception du système ICCP adapté aux palplanches.
- Coût estimé : 730 000 DA – 2 920 000 DA

Équipements :

- Anodes : Anodes en alliages de titane avec revêtement de platine ou en matériaux mixtes, spécialement conçues pour un environnement marin
- Coût par anode : 146 000 DA - 438 000DA

- Redresseurs de Courant : Convertisseurs AC/DC nécessaires pour alimenter les anodes.
- Coût : 730 000 – 2 190 000 DA

- Câblage et Connexions : Coût des câbles résistants à la corrosion et des accessoires de connexion.
- Estimation du coût : 438 000 DA 1 022 000DA.

- Système de Monitoring : Systèmes pour surveiller les niveaux de protection et assurer un fonctionnement optimal.
- Coût : 292 000 DA – 1 460 000 DA

Installation :

- Coûts de main-d'œuvre pour l'installation des anodes, des redresseurs, et des câbles sur les palplanches.
- Coût estimé : 2 190 000 DA - 8 760 000 DA.

Energie Électrique :

- Consommation annuelle d'électricité pour alimenter le système ICCP.
- Estimation du coût : 219 000 DA – 876 000 DA/an

Maintenance et Surveillance :

- Inspections régulières, maintenance des équipements, et remplacement des anodes si nécessaire.
- Coût annuel : 438 000 DA - 1 752 000 DA

Remplacement des Composants :

- Durée de vie des anodes et autres composants clés (typique : 15-20 ans pour les anodes, 10-15 ans pour les redresseurs).
- Coût de remplacement des anodes et redresseurs : 4 380 000DA 8 760 000 DA tous les 10-20 ans.

4.7 Étude financière de la méthode par anode sacrificielle

Le prix moyen d'une anode en aluminium est de 2000 DA/kg. Ainsi, le prix d'une anode de 100 kg sera de 200 000 DA. Le poids total des anodes nécessaires est de 15 349 kg. Cela représente donc un coût d'achat total de 30 698 000 DA pour les anodes sacrificielles.

À ce coût d'achat des anodes, il faudra ajouter les frais liés à la fourniture et à l'installation des 200 supports d'anodes, ainsi que les écrous, boulons et coûts de soudure sous-marine (mobilisation des équipements de levage et des postes de soudure pendant la période d'installation).

Ces coûts supplémentaires n'ont pas été pris en compte dans le chiffrage initial de 30 698 000 DA pour les anodes elles-mêmes. Ils devront être évalués précisément pour avoir une vision complète du budget total de cette solution de protection cathodique par anodes sacrificielles.



Figure 4-2 : Rideaux de palplanche protégés par anode sacrificielle

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une évaluation approfondie de la méthode de protection cathodique par courant imposé (ICCP) en la comparant avec la méthode de protection cathodique par anodes sacrificielles (SACP). Cette comparaison a été effectuée sur la base d'une étude financière détaillée de chaque méthode, ainsi que par l'analyse de leurs avantages et inconvénients respectifs. Nos résultats montrent que, bien que chaque méthode ait ses propres mérites, la méthode ICCP se révèle supérieure à la méthode SACP en termes de coûts à long terme, d'efficacité et de maintenance.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce mémoire était de concevoir, d'évaluer et de comparer des méthodes de protection cathodique pour le quai du terminal à conteneurs du port d'Annaba, en mettant un accent particulier sur la méthode par courant imposé alimentée par transformateur redresseur. À travers cette étude, nous avons examiné les mécanismes de corrosion, les principes de la protection cathodique, le dimensionnement des palplanches, et effectué une analyse comparative entre la protection cathodique par courant imposé et par anodes sacrificielles, culminant par une évaluation financière détaillée des deux méthodes.

Dans un premier temps, nous avons établi une compréhension approfondie de la corrosion et des mécanismes sous-jacents qui affectent les structures métalliques maritimes. La corrosion, particulièrement agressive dans les environnements marins, représente une menace majeure pour la durabilité et l'intégrité des infrastructures portuaires. La protection cathodique, en réduisant ou en empêchant les réactions électrochimiques responsables de la corrosion, s'avère être une solution efficace pour prolonger la durée de vie des structures métalliques immergées.

Le dimensionnement des palplanches pour le quai du terminal à conteneurs du port d'Annaba a ensuite été réalisé en tenant compte des spécificités environnementales et des exigences techniques. Le choix du système de protection cathodique par courant imposé, alimenté par transformateur redresseur, repose sur sa capacité à fournir un courant de protection contrôlé et ajustable, garantissant ainsi une protection homogène et efficace des palplanches contre la corrosion.

Une étude comparative approfondie entre la méthode par courant imposé et celle par anodes sacrificielles a été menée. Les résultats ont montré que bien que les anodes sacrificielles soient simples à installer et à maintenir, elles présentent des limitations significatives en termes de contrôle précis et de durée de vie. En revanche, la protection cathodique par courant imposé, offre une performance supérieure, une protection uniforme et une durée de vie plus longue grâce à la possibilité d'ajustement du courant de protection en fonction des conditions environnementales.

L'analyse financière a révélé que, malgré un coût initial plus élevé, la protection cathodique par courant imposé est économiquement plus avantageuse à long terme. Les coûts de maintenance réduits, associés à une meilleure durabilité et à une protection continue, rendent cette méthode plus rentable sur la durée de vie des infrastructures portuaires. Les économies réalisées sur les interventions de réparation et les remplacements fréquents des anodes sacrificielles justifient l'investissement initial plus élevé dans le système par courant imposé.

Cette étude a démontré que la protection cathodique par courant imposé, alimentée par transformateur redresseur, constitue une solution optimale pour la protection des palplanches du quai du terminal à conteneurs du port d'Annaba. Cette méthode offre une protection plus efficace et durable contre la corrosion comparée aux anodes sacrificielles, tout en étant économiquement avantageuse sur le long terme. Les recommandations issues de cette étude peuvent servir de

modèle pour d'autres installations portuaires, contribuant ainsi à la préservation et à la durabilité des infrastructures maritimes.

La recherche future dans le domaine de la protection contre la corrosion pourrait se concentrer sur trois axes principaux :

- L'amélioration des technologies de protection cathodique : Continuer à développer et perfectionner les techniques de protection cathodique afin d'en accroître l'efficacité.
- L'optimisation des coûts : Trouver des moyens de réduire les coûts associés à la mise en place et à l'exploitation des systèmes de protection contre la corrosion, améliorant ainsi leur rentabilité économique.
- L'intégration de nouvelles innovations : Incorporer de nouvelles technologies et approches innovantes pour renforcer davantage l'efficacité globale des systèmes de protection contre la corrosion.

En adoptant ces meilleures pratiques en matière de protection cathodique, les ports et les infrastructures maritimes pourront assurer une meilleure résilience face aux défis posés par la corrosion. Cela contribuera également à soutenir le développement économique et la sécurité maritime.

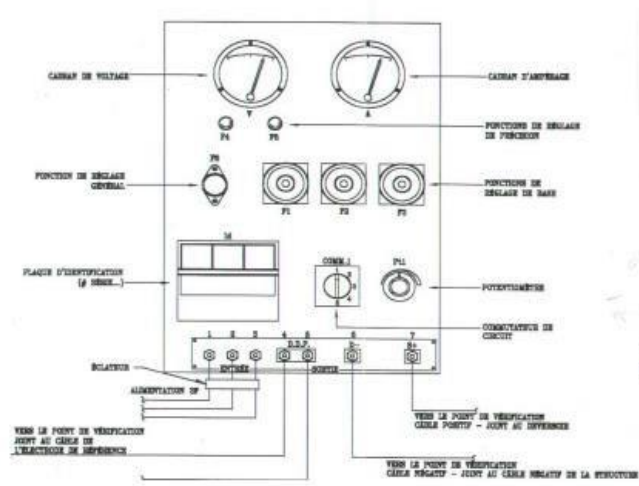
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Landolt. D, « Traité des matériaux », volume 12, « Corrosion et chimie de surface des métaux », presse polytechnique
- [2] Boukhlefa, Chabira, I. M. (2018). La protection cathodique des pipes carburant par panneaux photovoltaïques (mémoire de master). Université Kasdi Merbah, Ouargla
- [3] A.K.N.R. John OM. Bockris, Maria Gamboa-Aldeco, Ed. Modern Electrochemistry. 2000
- [4] Total. « Les utilités protection cathodique »
<https://docplayer.fr/50198778-Les-utilites-protection-cathodique.html>
- [5] Loussaief, F. (2022). Intégration d'un système hybride d'énergies renouvelables dans le système de protection cathodique à courant imposé ICCP en milieu marin (mémoire de master). Université du Québec, Rimouski
- [6] Centre Français de l'Anti-Corrosion 28 Rue Saint-Dominique, 75007 Paris- Site : www.cefracor.org. Réseau Scientifique et Technique du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer
- [7] Bekaoui, I. (2020). Modélisation tridimensionnelle du sol retenu par un rideau de palplanches avec les scénarios de déformation sous l'effet de corrosion (mémoire de master). Université Ahmed Draia, Adrar
- [8] Bouzidi D. (2011). Corrosion et protection cathodique des conduites sous-terraines (mémoire Des ingénieurs). École de technologie supérieure université, Québec
- [9] La protection cathodique guide pratique par : commission, exploitation, chambre syndicale de la recherche et de la protection du pétrole et du gaz naturel technique (1986).
- [10] D.Amokrane, « Corrosion et Protection des Ouvrages », IAP.
- [11] Einar Bardal, « Corrosion and protection », Springer Ltd, UK, 2004.
- [12] B. S.S Zumdahl, « Chimie des solutions ». 1997, Houghton mifflin company.
- [13] V. ASHWORTH, Principles of cathodique protection, Third Edition ed., ElsevierB.V, Ed. 2010, vol. volume 2.
- [14] F Lekmine, « généralité sur la corrosion », 2012, disponible sur le site <http://thesis.univbiskra.dz/3476/2/Chapitre%20I.pdf29/05/2020>.

- [15] F, Ropital, « corrosion et dégradation des matériaux métalliques », éditions Technip paris 2009
- [16] Haj Abderrahmane Saida (2012) : Thèse de magister « étude de l'interaction d'un rideau de palplanches avec le sol de fondation pour les ouvrages portuaires ». Université Mouloud MAMMERI (Tizi Ouzou)
- [17] A. Houy, (1986) "Dimensionnement des ouvrages en palplanches en acier".492 p., M. Houyéd,
- [18] Catalogue générale ; Arcelor Métallique (2006) : « Palplanche ».
- [19] J. C. Scully, « Corrosion Protection, principes fondamentaux », MASSON, ISBN France, 1995
- [20] NF EN 13509 Techniques de mesures applicables en protection cathodique octobre 2003.
- [21] MMO ANODE De Ruban. « Liste de Produits », [<https://shop.jentner.de/fr/Anode-a-oxyde-mixte-MOX-Ir-MMO-100x40-mm-7346.100>],

ANNEXES

Annexe A : caractéristique transfo-redresseur



French standard

NF EN 12496

10 August 2013

Classification index: **A 05-672**

ICS: 77.060

Galvanic anodes for cathodic protection in seawater and saline mud

F : Anodes galvaniques pour la protection cathodique dans l'eau de mer
et les boues salines

D : Galvanische Anoden für den kathodischen Schutz in Seewasser und
salzhaltigem Schlamm

French standard approved

by decision of the Director General of AFNOR.

Correspondence

The European standard EN 12496:2013 has the status of French standard.

Summary

The document describes galvanic anodes intended to seawater and saline muds. It gives the minimum requirements and recommendations for the physical tolerances, the electrochemical characteristics or properties, the test procedures and inspection standards for cast galvanic anodes of aluminium, magnesium and zinc based alloys for cathodic protection ; it doesn't cover the aspects related to quality assurance. This document is applicable to the majority of galvanic anodes used for seawater and saline mud applications, i.e. cast anodes of trapezoidal, "D", or circular cross section and bracelet type anodes.

Descriptors

Technical International Thesaurus: metal protection, corrosion prevention, electrochemical corrosion, cathodic protection, ocean environments, sea water, sludges, anodes, aluminium alloys, magnesium alloys, zinc alloys, chemical composition, tests, electrochemical methods, dimensional tolerances, defects tolerances, acceptability.

Modifications

Corrections

Published and distributed by Association Française de Normalisation (AFNOR — French standard institute) — 11, rue Francis de Pressensé —
92571 La Plaine Saint-Denis Cedex — Tel.: + 33 (0)1 41 62 80 00 — Fax: + 33 (0)1 49 17 90 00 — www.afnor.org

© AFNOR — All rights reserved

Version of 2013-08-P

Annexe C : ANNEXES MATERIAUX

CerAnode Tubular Anode (CPR)

Product data Sheet
for
Model CPR-25SW40VR-1" X 40"

Supplementary Data Sheet: This data sheet is to be used in conjunction with CerAnode Tubular Anode Brochure which describes the general anode configuration and its many features. This sheet is supplementary in that it supplies additional life data information specifically relating to the model number above. It also provides additional quality assurance information. A Certification can be provided at the time of shipment upon request.

Life Testing: Destructive Lot Testing is performed on the Test Coupons processed with the production lot or one sample taken from the lot per CerAnode accelerated test procedure, PSA77-003 Curve A. The Test Report verifies that production processes are under control verifying anode life versus ampere rating. Comparison to historical statistical base is also considered. The Accelerated Endurance Test is based on the measurement of charge density in a 1M Na₂SO₄ electrolyte that simultaneously verifies performance in natural waters, oxygen generation being most aggressive.

Product Description: Anode tube is 25mm Ø and 1000mm (1" x 40") long. The anode tube can be used in a variety of natural water and soil (cable) applications. The following life versus current rating applies.

Note: When used in Vertical Anode Beds with chlorides, a fluoropolymer cable insulation such as Halar® (ECTFE) or Syner® (F40F) must be used.

Life Chart

Anode Application Life Chart	20 yrs amps	30 yrs amps	40 yrs amps
Ampere Rating in Sea Water	35	30	27

Page 1 of 1

P0070625CPR-20SW40VR

4011 Riverside Dr. • Dayton, Ohio 45405 USA • (937) 278-6547 Fx: 4362
CerAnode@apsmaterials.com - www.ceranode.com - www.apsmaterials.com

Certification - Ag-AgCl

BORIN Manufacturing®, 12449 Beach Avenue, Marina del Rey, California 90292
Telephone 310-822-5005, Facsimile 310-822-0782, email borin@borin.com, web-site www.borin.com

Product Description: Sleeth 6" Ag-AgCl reference electrode

Part Number: : SRE-020-SCB - for chloride contaminated concrete service

Manufactured Date: May 18, 2007

Testing Date: May 18, 2007

Tested against a Calomel Cell at 25° Celsius, 77° Fahrenheit	Variance from -48 mV Standard	Quality Assurance Technician	Quality Assurance Supervisor
-42 millivolts	-2 millivolts	Luis Sanchez	Humberto Pina

Serial Number: 2007-0508-608-1

ENTERED
Luis Sanchez

This is to certify that this reference electrodes has been manufactured in accordance with the highest **Quality Assurance Standards** and tested to exceed all relevant and applicable industry standards. This reference electrode has been packaged in excess of standards to insure its safety and have left the factory inspected and in excellent working condition.

In the industry it is generally accepted that a commercial reference electrode must be within 10 millivolts plus or minus of the published Calomel readings. At Borin Manufacturing, we have accepted the following standards being valid but all of the reference electrodes that we manufacture are built and tested to a much higher standard.

Reference Electrodes	Plus Limit	Standard Calomel Values	Negative Limit
Copper-Copper Sulfate Cu-CuSO ₄	+50 millivolts	+60 millivolts	+70 millivolts
Silver-Silver Chloride Ag-AgCl	-58 millivolts	-48 millivolts	-38 millivolts
Zinc-Zinc Sulfate Zn-ZnSO ₄ (66.69 pure)	-915 millivolts	-925 millivolts	-935 millivolts
Zinc-Zinc Sulfate Zn-ZnSO ₄ (98.47 mil-spec)	-985 millivolts	-995 millivolts	-1005 millivolts

REMEMBER: This reference cell has an INDEFINITE SHELF LIFE and is Guaranteed for 30 YEARS.

© Copyright © BORIN Manufacturing
2007-05

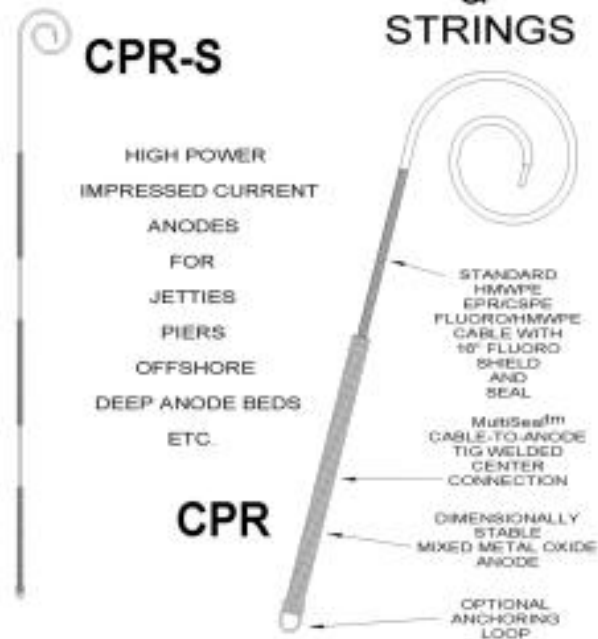
Page 1 of 1

Calibration for (Single) 2007-0508-SCB, Item # 1000-1, 1-3

ISO
9001

CerAnode

TUBULAR POWER RODS & STRINGS



ANODE STRING BURNOUT PROTECTION

CerAnode 7 Year Anode Warranty