



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Energies renouvelables
Solaire photovoltaïque

Réf. :

Présenté et soutenu par :
KETHIRI Mohamed Fadi

Dimensionnement d'une protection cathodique alimentée en photovoltaïque dédiée à la lutte contre la corrosion à la cimenterie « CILAS Lafarge » Biskra

Jury :

Pr.	ALLOUI Lotfi	PR	Université de Biskra	Président
Dr.	NAIMI Djemai	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Pr.	ZOUZOU Salah-Eddine	PR	Université de Biskra	Examineur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : ENERGIES RENOUVELABLES
Option : SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

***Dimensionnement d'une protection cathodique
alimentée en photovoltaïque dédiée à la lutte contre la
corrosion à la cimenterie « CILAS Lafarge » Biskra***

Présenté par :

KETHIRI Mohamed Fadi

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. NAIMI Djemai

Avis favorable du Président du Jury

ALLOUI Lotfi

Cachet et signature



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : ENERGIES RENOUVELABLES
Option : SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Thème :

**Dimensionnement d'une protection cathodique alimentée en
photovoltaïque dédiée à la lutte contre la corrosion à la
cimenterie « CILAS Lafarge » Biskra**

Dirigé et proposé par : MCA NAIMI DJEMAI

RESUMES

Le monde de l'industrie souffre de la corrosion. Les statistiques révèlent que la corrosion détruit un quart de la production annuelle d'acier, soit 5 tonnes par seconde. L'objectif de cette étude est de résoudre le problème de la corrosion au niveau de la cimenterie par proposition d'une solution qui consiste l'utilisation de la protection cathodique par courant imposé alimenté par le solaire photovoltaïque, ainsi le dimensionnement du système de protection cathodique et le solaire photovoltaïque autonome. Au final, une étude économique et comparative est réalisée entre l'utilisation d'inhibiteurs la solution prise par l'entreprise et la solution proposée.

Mots clés : corrosion, protection cathodique, solaire photovoltaïque, dimensionnement, inhibiteurs.

العربية

العالم الصناعي يعاني من ظاهرة تآكل المعادن. تشير الإحصاءات إلى أن التآكل يدمر ربع إنتاج الصلب السنوي، بمعدل 5 أطنان في الثانية. الهدف من هذه الدراسة هو حل مشكلة التآكل على مستوى مصنع الاسمنت من خلال اقتراح حل يتمثل في استخدام الحماية الكاثودية باستعمال الطاقة الشمسية الكهروضوئية (فوتوفولطية) كمصدر كهربائي، وكذلك حساب منظومة الحماية الكاثودية والطاقة الشمسية الكهروضوئية المنعزلة. في النهاية إجراء دراسة اقتصادية ومقارنة بين استخدام المثبطات وهو الحل المعمول به في المصنع والحل المقترح.

الكلمات المفتاحية: تآكل المعادن، الحماية الكاثودية، الشمسية الكهروضوئية، حساب منظومة الحماية، المثبطات.

ABSTRACT

The industrial world is suffering from corrosion. Statistics show that corrosion destroys a quarter of annual steel production, or 5 tons per second. The objective of this study is to solve the problem of corrosion at the level of the cement plant by proposing a solution, which consists of the use of cathodic protection by imposed current supplied by the photovoltaic solar system, as well as the dimensioning of the protection system. cathodic and autonomous solar photovoltaic. In the end, an economic and comparative study is carried out between the use of inhibitors the solution taken by the company and the proposed solution.

Keywords: corrosion, cathodic protection, solar photovoltaic, sizing, inhibitors.



Dédicace

A mes parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, tendresse, soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes frères, Kenzi, Zohdi, Sadji

Pour leur appui et encouragement,

A toute ma famille pour son soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

Merci d'être toujours là pour moi.

REMERCIEMENTS

Merci 

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

*Je voudrais dans un premier temps remercier, mon Directeur de mémoire docteur **Djemai NAIMI**, Professeur en réseaux électriques à l'Université de Biskra, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

Aux membres de notre jury pour le grand honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce travail.

*A mon maitre et président de thèse professeur **Lotfi ALLOUI**, je vous remercie de l'honneur que vous m'avez fait en acceptant de présider notre jury.*

*A mon maitre et juge de thèse professeur **Salah Eddine ZOUZOU**
Votre présence au sein de notre jury constitue pour moi un grand honneur.*

*Je remercie également toute l'équipe de CILAS Lafarge Biskra surtout **Lotfi MASTOURA**, **Borhan BENNAOUI** et **Mohamed Hadi REDJEMIA** qui ont été les intervenants professionnels, responsables de ma formation, pour leur contribution à la réalisation de la partie pratique de ma recherche.*

Je tiens aussi à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

- *Monsieur Ayache TAYAR qui m'a beaucoup appris sur la protection cathodique. Il a partagé avec moi ses connaissances et expériences dans ce domaine, tout en m'accordant sa confiance et une large indépendance dans l'exécution de missions valorisantes.*
- *Monsieur Youcef MERABTI chef du Laboratoire des énergies renouvelables de l'université de Biskra pour m'avoir accordé des entretiens et avoir répondu à mes questions dans ce domaine. Il a été d'un grand soutien dans l'élaboration de ce mémoire de master.*
- *Monsieur Mohamed Aymen KETHIRI, doctorant, pour ses conseils qui ont été très précieux.*
- *Mes parents, pour leur soutien constant et encouragements.*

Listes Des Tableaux

Tableau (2.1) :	Densités de de courant nécessaires pour chaque type de revêtement.....	28
Tableau (3.1) :	Caractéristique de l’anode FeSi	41
Tableau (3.2) :	La section de fils en fonction du courant électrique maximale.....	43
Tableau (3.3) :	Le choix de la tension de système en fonction de la puissance crête.....	45
Tableau (3.4) :	Critère de dimensionnement et choix d’un régulateur.....	46
Tableau (3.5) :	Résultat des calculs et dimensionnement pour le cas du circuit d’eau industrielle.....	49
Tableau (3.6) :	Résultat des calculs et dimensionnement pour le cas du circuit d’eau potable.....	51
Tableau (3.7) :	Résultat des calculs et dimensionnement pour le cas du circuit d’eau incendie.....	52
Tableau (3.8) :	Résultat des calculs et dimensionnement pour le cas du circuit d’eau brute.....	52
Tableau (3.9) :	Nombre total des équipements essentiels pour la protection cathodique de tous les 4 systèmes.....	53
Tableau (3.10) :	Coût d’investissement de la solution classique.....	54
Tableau (3.11) :	Coût d’investissement de la solution proposée.....	55

Listes Des Figures

Figure (1. 1) :	Réaction d'oxydo-réduction et transport du courant Réaction électrochimique	5
Figure (1. 2) :	Mécanisme de l'oxydation d'un métal à haute température.....	6
Figure (2. 1) :	Protection cathodique par anodes sacrificielles.....	19
Figure (2. 2) :	Protection cathodique par anodes sacrificielles.....	20
Figure (2. 3) :	Protection cathodique d'un métal par couplage galvanique.....	21
Figure (2. 4) :	Protection cathodique d'un métal par courant imposé soutirage.....	24
Figure (2. 5) :	Constitution du poste de soutirage.....	26
Figure (3. 1) :	Cimenterie de groupe CILAS Biskra.....	30
Figure (3. 2) :	Plan du réseau d'eau de la cimenterie CILAS Biskra.....	32
Figure (3. 3) :	Le phénomène de corrosion dans la cimenterie CILAS Biskra.	33
Figure (3. 4) :	Le système de dessalement de la cimenterie CILAS Biskra.....	33
Figure (3. 5) :	Bidons contient un produit pour traitement d'eaux	34
Figure (3. 6) :	Point de soudure dans un pipe d'eaux	34
Figure (3. 7) :	Les éléments de base pour la protection cathodique photovoltaïque	35
Figure (3. 8) :	Schéma simplifié du système d'eau et les lieux d'intégration du système de protection cathodique photovoltaïque au niveau de l'usine CILAS Biskra...	36
Figure (3. 9) :	Convertisseur DC-DC boost	49
Figure (3. 10):	Schéma électrique des éléments nécessaires pour la protection des canalisations du circuit d'eau industrielle de la cimenterie CILAS Biskra...	50

Table de matière

<i>Dédicace</i>	<i>I</i>
<i>Remercîment</i>	<i>II</i>
<i>Listes des tableaux</i>	<i>IV</i>
<i>Listes des figures</i>	<i>V</i>
<i>Table de matière</i>	<i>VI</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>I</i>

CHAPITRE 1 : Etude de la corrosion

1.1	Definition de corrosion	4
1.2	Reaction chimique.....	4
1.3	Lieux de la corrosion	5
1.3.1	Milieu sec	5
1.3.2	Milieu aqueux ou humide	7
1.3.2.1	Corrosion générale.....	7
1.3.2.2	Corrosion localisé	7
1.3.2.3	Biocorrosion	8
1.4	Consequences de corrosion.....	8
1.5	Moyens de lutte contre la corrosion	9
1.5.1	Généralités	9
1.5.2	Catégorie d'alliages et domaines d'emploi.....	10
1.5.2.1	Les aciers inoxydables	10
1.5.2.2	Les alliages de cuivre	10
1.5.2.3	Les alliages d'aluminium	10
1.5.2.4	Les alliages de nickel	11
1.5.2.5	Le titane	11
1.5.2.6	Les alliages de zirconium	11
1.5.3	Protection par la géométrie des pièces	11
1.5.3.1	Corrosion en zone humide	11
1.5.3.2	Corrosion galvanique	12
1.5.3.3	Corrosion-érosion et corrosion-cavitation.....	12
1.5.3.4	Corrosion sous contrainte	12

1.5.4	Emploi d'inhibiteurs de corrosion	12
1.5.4.1	Inhibiteurs anodiques ou passivants	13
1.5.4.2	Inhibiteurs cathodiques	13
1.5.4.3	Inhibiteurs organiques	13
1.5.5	Utilisation de revêtements	14
1.5.5.1	Revêtements métalliques	14
1.5.5.2	Revêtements organiques	14
1.5.5.3	Revêtements étrangers au substrat	15
1.5.6	Protection électrochimique	15
1.5.6.1	Protection anodique	16
1.5.6.2	Protection cathodique	16

CHAPITRE 2 : Protection cathodique

2.1	Principe de la protection cathodique	18
2.1.1	Importance de l'intensité	18
2.1.2	Importances du potentiel	18
2.1.3	Importances de la résistance électrique des éléments du circuit	19
2.2	Protection cathodique	20
2.2.1	Protection par anodes réactives	20
2.2.2	Différents alliages utilisés	22
2.2.3	Protection par poste cathodique (soutirage de courant)	24
2.2.3.1	Généralités sur la conception des systèmes à courant imposé	24
2.2.3.2	Principe de la protection cathodique par courant imposé	25
2.2.3.3	Soutirage de courant.....	25

CHAPITRE 3 : Corrosion à la cimenterie CILAS Biskra

3.1	Description de cimenterie CILAS Biskra	30
3.2	Localisation lieux de la corrosion	31
3.3	Moyens de lutte pris par l'entreprise	33
3.4	Solution proposée	35
3.5	Dimensionnement	37

3.5.1	Dimensionnement de protection du circuit d'eau industrielle.....	37
3.5.2	Dimensionnement de protection du circuit d'eau potable	51
3.5.3	Dimensionnement de protection du circuit d'eau d'incendie	51
3.5.4	Dimensionnement de protection du circuit d'eau brute	52
3.6	Résultats et interprétation	53
3.7	Etude économique	53
3.7.1	Coût d'investissement de la solution classique.....	54
3.7.2	Coût d'investissement de la solution proposée	55
3.7.3	Coût d'investissement après 25 ans	55
	Conclusion Générale.....	58
	Bibliographique.....	61
	Annex.....	64

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Si l'humain redoute le cancer, comme maladie, le monde de l'industrie souffre de la corrosion. Les statistiques révèlent que la corrosion détruit un quart de la production annuelle d'acier, soit 5 tonnes par seconde [Ara 97]. Ce redoutable phénomène trouve sa favorable proie dans la majorité des canalisations industriels notamment dans celles de transport de pétrole, de gaz, et des produits pétroliers sont de grande importance pour l'économie des pays producteurs des hydrocarbures.

Le facteur principal de la détérioration de ces derniers est la corrosion, qui est la cause de 30% des défaillances [GNP 01]. La corrosion est le phénomène de dégradation d'un substrat métallique par le milieu dans lequel il se trouve placé. Elle est due à la tendance des métaux à retourner à l'état stable des minéraux naturels : oxydes, sulfates, carbonates, etc.

Aujourd'hui, le phénomène de la corrosion est devenu problématique pour les scientifiques, les entreprises et les producteurs métalliques. Alors, c'est quoi la corrosion ? comment provoque-t-elle la détérioration du métal ? qu'elles sont les moyens de lutte contre elle ? qu'elle est la solution la plus efficace et économique ?

En général, pour remédier à la corrosion des usines et aux canalisations, nous avons recouru aux inhibiteurs de corrosion, aux revêtements (polymères) et à la protection cathodique. Dans le présent travail, nous allons traiter ce phénomène, définir et expliquer en détail ses causes, ses conséquences et les lieux de localisation sur les ouvrages métalliques et enfin, expliquer les moyens de lutte les plus connus en usage.

Ainsi, nous étudierons l'état de la cimenterie CILAS Biskra, qui souffre de ce phénomène dans certaines structures métalliques, notamment les conduites d'eau, qui sont l'élément principal de la production, si on n'a pas d'eau, on n'a plus de production.

Pour résoudre ce problème, nous allons proposer une solution qui consiste en l'utilisation de la protection cathodique par courant imposé alimenté par le solaire photovoltaïque comme source d'énergie électrique. Au final, une étude économique et comparative est réalisée entre l'utilisation d'inhibiteurs et la solution proposée qui est la protection cathodique par courant imposé alimenté en photovoltaïque.

Ce mémoire est réparti en trois chapitres:

Le premier chapitre expose les définitions du phénomène relatif à la corrosion et seront présentés ainsi les réactions chimiques, lieux, conséquences, et moyens de lutte.

Par contre le deuxième chapitre présente la protection cathodique avec ces deux principales méthodes utilisées dans les ouvrages métalliques.

Quant au troisième chapitre, il est consacré à l'étude du cas de la corrosion au niveau de la cimenterie CILAS de la Wilaya de Biskra.

Enfin, ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale où on mettra en évidence tous les résultats et les solutions suggérées.

CHAPITRE 1
ETUDE DE LA
CORROSION

Introduction

Dans ce chapitre, les définitions de phénomène relatif au la corrosion seront présentés ainsi les réactions chimiques, lieux, conséquences, moyens de lutte et conclusion.

1.1 Définition de corrosion

Le phénomène de corrosion est défini par un échange d'électrons par le biais de réactions d'oxydoréduction sur une interface. Cette réaction engendre le passage du métal sous forme ionique en solution. La réaction de corrosion peut être induite par différents facteurs provenant de l'environnement. Ces facteurs sont d'origine :

- chimique (apport d'un élément agressif par l'environnement),
- électrochimique (deux métaux différents induisant un système de pile galvanique),
- biologique (acidification du milieu par les bactéries/champignons, formation de biofilm).

1.2 Réaction chimique

La réaction de corrosion des métaux peut être écrite de manière très générale suivant la réaction d'oxydation d'un métal : **[Hlz, 78]**



Où :

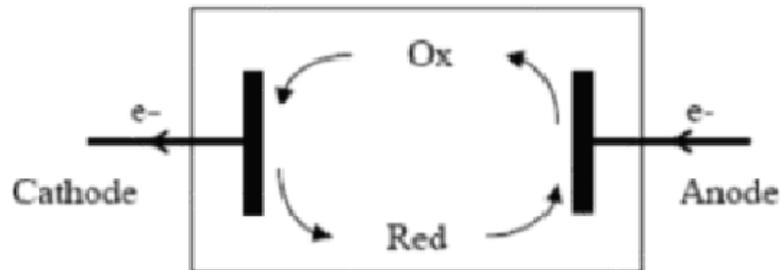
M : est le métal sous forme solide,

Mn⁺ : le métal sous forme ionique au degré d'oxydation n,

n : le nombre d'électrons échangés.

On dit qu'il y a **oxydation** lorsqu'un métal sous certaines sollicitations électrochimiques **perd** des électrons, et lorsque ce métal **capte** dans les mêmes conditions ces mêmes électrons dans ce cas on parle de **réduction**. **[Mor,66]**

Exemples :



Figure(1.1) : Réaction d'oxydo-réduction et transport du courant (Réaction électrochimique)

1.3 Lieux de la corrosion

1.3.1 Milieu sec

Il s'agit le plus souvent de l'attaque d'un métal M par un gaz G selon une réaction du type



Où X est un produit de corrosion le plus souvent solide. Le gaz considéré est souvent l'oxygène mais il faut aussi tenir compte d'autres gaz tels que SO_2 , CL_2 , Br_2 ou H_2S .

1.3.1.1 Mécanisme

En présence d'un environnement sec contenant de l'oxygène et essentiellement à haute température, le métal, instable, tend à revenir sous sa forme oxydée stable. Il se recouvre alors d'un film d'oxyde qui croît progressivement avec une vitesse égale à la vitesse de corrosion. La Figure (1-3) schématise la réaction d'un métal avec l'oxygène dans le cas des couches d'oxyde minces.

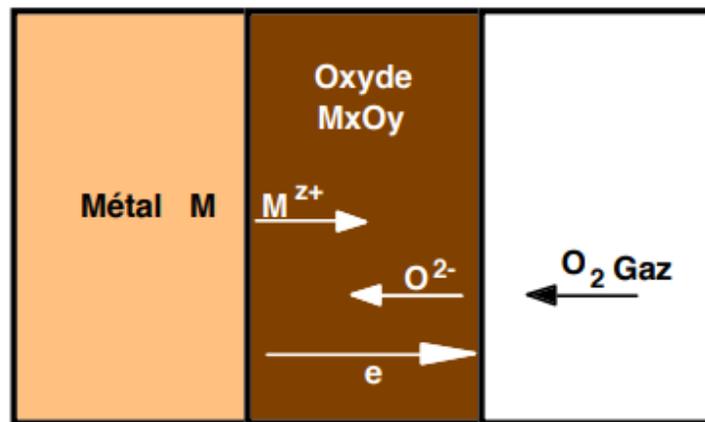
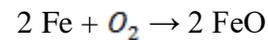
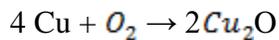
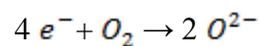
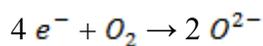
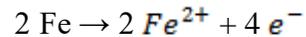
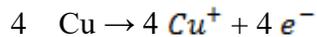


Figure (1.2) : Mécanisme de l'oxydation d'un métal à haute température

Exemples



Ces deux réactions se décomposent de la manière suivante:



1.3.2 Milieu aqueux ou humide

1.3.2.1 Corrosion générale

a) Corrosion atmosphérique

La corrosion aqueuse est de nature électrochimique. Elle est caractérisée par l'apparition de courant électrique en dehors de toute source extérieure, c'est à dire par déplacement d'électrons au sein de la masse métallique.

b) Mécanisme

Comme son nom l'indique, la corrosion atmosphérique désigne la réaction de l'oxygène de l'air à température ambiante avec un métal lorsqu'à la surface de ce dernier l'humidité et les polluants forment un film d'électrolyte.

La corrosion atmosphérique de l'acier peut être schématiquement décrite par la réaction suivante :



1.3.2.2 Corrosion localisée

Ce phénomène survient au contraire lorsque le matériau est mis en présence d'un environnement présentant vis à vis de lui un comportement sélectif.

Cette sélectivité peut avoir des origines multiples tant au niveau du matériau (alliage hétérophase, présence d'inclusions, protection de surface localement défectueuse, matériau bimétallique...) qu'au niveau de l'environnement (variation locale de composition, de pH ou de température). Elle se diversifie en 3 autres types :

- ✓ La corrosion galvanique
- ✓ La corrosion par piqûres
- ✓ La corrosion par effet de crevasse
- ✓ La corrosion intergranulaire
- ✓ La corrosion-érosion et la corrosion-cavitation [HHU]

1.3.2.3 Biocorrosion

La biocorrosion, appelée encore corrosion bactérienne, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme en jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement. Lorsque les colonies de microorganismes se fixent à la surface du matériau, elles créent ce que l'on appelle alors un biofilm. **[J.Ch]**

1.4 Conséquences de la corrosion

Voici des divers exemples de accidents causés principalement par la corrosion, afin de mettre en évidence la relation entre corrosion et sécurité industrielle.

a) Cas 1 : fuite d'une conduite souterraine

Une fuite de 80 000 litres d'isobutane vers une conduite souterraine de 250 mm de diamètre survenu à Lake Charles (Louisiana, USA) en 1968. Ledit tuyau passant grâce à une unité d'alkylation et 2 réservoirs de stockage, la conduite de soupape était située dans une au-dessous de. Les boulons de la soupape ont été fortement corrodés par des fumées s'échappant d'un ligne d'acide sulfurique située à proximité. Une petite fuite s'était développée dans la valve due à la corrosion, mais cela n'a pas été remarqué car la fosse était remplie avec de la boue et de l'eau de pluie. Lorsque la valve était complètement manquante, un grand une quantité d'isobutane a été libérée, formant un nuage de vapeur couvrant 5 acres. La vapeur a explosé avec une force équivalente à 10 tonnes de TNT, tuant 7 personnes. Le feu avait brûlé pendant 2 semaines.

b) Cas 2 : explosion de raffinerie

Une défaillance catastrophique s'est produite en 1984 dans une raffinerie aux États-Unis, a provoqué une explosion causée par la rupture d'un absorbeur d'amine.

Résultat: 17 morts de dégâts matériels supplémentaires dépassant 500 millions de dollars.

[C.M.S 86]

c) Cas 3 : chute de toit de piscine

En 1985, le toit d'une piscine de 200 tonnes (en Suisse) s'est effondré tuant 12 gens. Après examen, il a été constaté que la catastrophe était le résultat du stress corrosion des supports en acier inoxydable supportant le toit. Toutes les conditions étaient mûres pour la corrosion sous contrainte, l'action de la contrainte depuis que le crochet est allumé et l'action d'un environnement corrosif spécifique. Dans ce cas, ce sont les ions chlore dans l'atmosphère de la piscine a certainement traité l'eau de la piscine [BIn 89].

d) Cas 4 : chute d'un pont

En 1967 (15 décembre), le pont «Point Pleasant» dans l'Ohio s'effondre. L'enquête indique que la cause de cet accident est encore une fois le stress corrosion (rapport d'accident de la route 1971) Une fissure de 2,5 mm de profondeur a été développé après une barre de la structure du pont. L'incident a causé la mort de 46 personnes. Dorlot et al. (1986) ont montré que les défauts du matériau pouvaient agir en tant que concentrateurs de stress et ainsi amplifier la contrainte locale, elle peut alors atteindre une valeur égale à la valeur théorique sans la valeur de la contrainte appliquée est très élevée. Dans ce cas, la fissure de 2,5 mm a joué le rôle de contrainte concentra.

e) Cas 5 : chute d'un avion

En 1988, la corrosion était responsable des dommages causés à un Boeing 737 Taiwanais. L'avion était utilisé pour transporter du poisson dans des sacs en plastique contenant de l'eau de mer. L'eau salée est très corrosive, elle avait fait son travail, l'un des les portes de l'avion touchées par la corrosion sont dépressurisées et l'avion écrasé. [BIn 81]

1.5 Moyens de lutte contre la corrosion**1.5.1 Généralités**

La prévention de la corrosion doit être envisagée dès la phase de conception d'une installation. En effet, des mesures préventives prises au bon moment permettent d'éviter de nombreux problèmes lorsqu'il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet, notamment

pour des industries telles que le nucléaire, l'industrie chimique ou l'aéronautique, où les risques d'accident peuvent avoir des conséquences particulièrement graves pour les personnes et l'environnement. La protection contre la corrosion comprend les méthodes suivantes :

- Choix judicieux des matériaux;
- Forme adaptée des pièces;
- Ajout d'inhibiteurs aux circuits;
- Utilisation de revêtements;
- Protection électrochimique.

1.5.2 Catégorie d'alliages et domaines d'emploi

1.5.2.1 Les aciers inoxydables

Ce sont des alliages fer-chrome contenant au moins 12% de chrome dont la structure dépend des éléments d'addition. La résistance à la corrosion des aciers inoxydables est essentiellement due à la formation en surface d'une couche passive qui apparaît naturellement à l'air et qui est constituée d'un oxyde riche en chrome, de faible épaisseur (environ 10 nm), et résistant.

1.5.2.2 Les alliages de cuivre

Le cuivre résiste bien à la corrosion dans l'eau de mer, l'eau douce froide ou chaude, et les acides non oxydants désaérés et dilués. Son utilisation doit être évitée en présence d'acides oxydants, d'ammoniaque et d'amines, d'eau à grande vitesse de circulation (érosioncorrosion), d'acide sulfhydrique, de soufre et de sulfures.

1.5.2.3 Les alliages d'aluminium

L'aluminium est un métal très actif qui doit sa résistance à la corrosion à la formation d'une couche d'alumine (Al_2O_3) protectrice. Il est couramment utilisé en présence d'ammoniaque, d'eau distillée, d'atmosphère industrielle ou urbaine, de soufre, de sulfures, et de fréons. Il faut

éviter de l'employer dans les acides forts et les milieux caustiques, le mercure et ses sels, l'eau de mer ou l'eau contenant des métaux lourds comme le fer ou le cuivre.

1.5.2.4 Les alliages de nickel

Le nickel résiste bien aux milieux caustiques (soude, potasse...) et aux acides non oxydants dilués. Son utilisation est à éviter en présence d'acides et sels oxydants, d'hypochlorites, d'eau de mer, et d'environnements soufrés ou sulfureux

1.5.2.5 Le titane

Comme l'aluminium, il doit sa résistance à la formation d'un oxyde protecteur (TiO_2). Il est très utilisé en aéronautique et dans l'industrie en présence d'eau de mer, d'acide nitrique, de solutions oxydantes (FeCl_3 , CuSO_4), et d'hypochlorites.

1.5.2.6 Les alliages de zirconium

Le zirconium est un métal très oxydable qui se recouvre, comme l'aluminium et le titane, d'un oxyde protecteur de formule ZrO_2 (zircone). Il est utilisé dans l'industrie chimique (milieux oxydants, milieux caustiques, acide chlorhydrique) et dans l'industrie nucléaire soit directement (usines de retraitement des déchets) soit sous forme d'alliage, le zircaloy (Sn 1,5%, Fe 0,2%, Cr 0,1%) pour le gainage des éléments combustibles. [ESP 18]

1.5.3 Protection par la géométrie des pièces

Il est possible de diminuer les risques de corrosion en donnant aux objets une forme adaptée aux conditions d'utilisation, et ainsi d'influencer notablement leur durée de vie. Nous aborderons ici quelques solutions types couramment employées pour limiter les risques en fonction du type de corrosion à redouter.

1.5.3.1 Corrosion en zone humide

La corrosion atmosphérique, forme de corrosion la plus fréquente, ne se produit qu'en présence d'humidité. La géométrie des composants employés devra donc viser dans ce cas à éviter

les zones de rétention d'eau soit en prévoyant un bon drainage, soit en assurant, par leur géométrie, la vidange complète des récipients.

1.5.3.2 Corrosion galvanique

Un contact électrique et électrolytique entre des matériaux différents peut donner lieu à la formation d'une pile galvanique pouvant entraîner une corrosion accélérée du métal le moins noble. Lorsque des impératifs autres que la résistance à la corrosion empêche l'utilisation de matériaux adaptés, on peut se prémunir contre ce risque en incluant dans le circuit une "pièce sacrificielle" aisément remplaçable ou en supprimant le contact entre les matériaux au moyen d'un isolant.

1.5.3.3 Corrosion-érosion et corrosion-cavitation

Le risque d'apparition de ces phénomènes peut être diminué par une conception appropriée des canalisations véhiculant des fluides à vitesse élevée. On évitera en particulier les variations brutales de section créant des zones de turbulence ou les changements brusques de direction.

1.5.3.4 Corrosion sous contrainte

Une action préventive peut être entreprise sur la géométrie des structures. En effet, pour une même sollicitation globale appliquée, la distribution des contraintes dans une pièce peut dépendre de sa géométrie. On adoptera donc dans la mesure du possible des formes permettant de supprimer ou au moins de réduire les zones de concentration de contraintes. [CET]

1.5.4 Emploi d'inhibiteurs de corrosion

Un inhibiteur est une substance chimique que l'on ajoute en petite quantité au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion du matériau métallique à protéger. Leur domaine d'utilisation recouvre les milieux acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement. En général, les inhibiteurs sont classés en fonction de leur mode d'action. On distinguera ainsi :

- Les inhibiteurs anodiques.
- Les inhibiteurs cathodiques.
- Les inhibiteurs induisant une précipitation.
- Les inhibiteurs organiques.

1.5.4.1 Inhibiteurs anodiques ou passivants

Leur mode d'action consiste à élever la valeur du potentiel de corrosion du matériau afin de l'amener à une valeur pour laquelle il y a formation d'un film passif protecteur. La concentration en inhibiteur doit être suffisante pour atteindre l'intensité critique de passivation.

1.5.4.2 Inhibiteurs cathodiques

Au contraire des précédents, l'action de ces inhibiteurs se traduit par une diminution de la vitesse de la réaction cathodique et donc par un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs moins nobles. Suivant leur mode d'action, on peut les classer en trois catégories :

- Les poisons cathodiques : ils rendent plus difficile la réduction des ions H^+ .
- Les précipités cathodiques : les carbonates de calcium et de magnésium ont tendance à précipiter sur les sites cathodiques qui présentent un pH plus élevé.
- Les désoxygénants : au-dessus d'un pH de 6, la corrosion de l'acier est liée à la présence d'oxygène dissous.

1.5.4.3 Inhibiteurs organiques :

Ils constituent un groupe important qu'il est difficile de classer dans les catégories précédentes car ils modifient à la fois les réactions anodique et cathodique en affectant l'ensemble de la surface. [TEC]

1.5.5 Utilisation de revêtements

1.5.5.1 Revêtements métalliques

On les emploie couramment pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique. On peut aussi les appliquer sur d'autres substrats comme le cuivre ou le laiton, comme c'est le cas par exemple pour les revêtements de chrome sur les robinets. D'une manière générale, on distinguera deux types de revêtements métalliques :

- Les revêtements anodiques : le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. C'est le cas du procédé de galvanisation (revêtement de zinc) que nous avons déjà évoqué. En cas de défaut du revêtement, il y a formation d'une pile locale et ce dernier se corrode en protégeant cathodiquement le métal de base. La protection reste donc assurée tant qu'une quantité suffisante de revêtement est présente. Plus que l'absence de défaut, c'est donc l'épaisseur qui est un élément important de ce type de revêtement. En général, elle est comprise entre 100 et 200 μm .
- Les revêtements cathodiques : le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base, aggravée par le rapport "petite surface anodique" sur "grande surface cathodique". Dans ce cas, la continuité du revêtement est donc le facteur primordial.

1.5.5.2 Revêtements organiques

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou moins imperméable entre le matériau et le milieu. Ils se divisent en trois familles :

- ✓ Les peintures et vernis;
- ✓ Les bitumes;
- ✓ Les revêtements polymériques.

- Les peintures et vernis

Une peinture est un mélange composé de particules insolubles (les pigments) en suspension dans un milieu aqueux ou organique constitué par un liant et un solvant. Les pigments assurent l'inhibition de la corrosion et peuvent également avoir une fonction décorative.

- Les bitumes :

On les utilise principalement pour protéger des structures enterrées en acier ou en fonte. Ils se présentent en général sous la forme d'un revêtement épais (de l'ordre de 5 mm), dont la plasticité réduit considérablement les risques de dégradation mécanique.

- Les revêtements polymériques :

Il existe une grande variété de ce type de revêtement comme les thermoplastes (polyéthylène, polypropylène, PVC, PTFE...), les caoutchoucs (naturel ou synthétique), et les thermodurcissables (polyuréthane, époxydes, polyesters...).

1.5.5.3 Revêtements étrangers au substrat

On regroupe dans cette catégorie les revêtements à base de ciment utilisés en génie civil et que l'on applique aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de canalisations enterrées en acier ou en fonte. D'autres matériaux sont aussi utilisés comme l'émail que l'on applique sous forme de pâte (barbotine) et qui offre une bonne protection contre les gaz à haute température (tuyères d'échappement). [AFN]

1.5.6 Protection électrochimique

Parmi les moyens employés pour lutter contre la corrosion, la protection électrochimique doit son originalité au fait qu'elle consiste à agir de manière contrôlée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent lors du phénomène de corrosion. En effet, cette méthode consiste à imposer au métal à protéger une valeur de potentiel pour laquelle la vitesse d'attaque devient très faible, voire nulle. On distingue la protection cathodique qui consiste à abaisser le potentiel d'électrode du métal, et dont le principe est connu depuis longtemps puisque les premières

observations de ce phénomène sont dues à Sir H. Davy qui remarqua en 1824 que lorsque deux métaux différents (Cu et Zn) plongés dans un milieu corrosif sont reliés électriquement, la vitesse de corrosion de l'un augmente alors que celle de l'autre diminue.

1.5.6.1 Protection anodique

Elle repose sur la propriété qu'ont certains matériaux à se passiver dans des milieux corrosifs lorsque leur potentiel est maintenu à une valeur correcte. Nous rappellerons rapidement les conditions devant être remplies pour qu'un métal puisse être passif.

La technique de protection anodique peut être envisagée dans des milieux tels que les acides oxygénés (nitrique, sulfurique, ou phosphorique), les nitrates alcalins, pour des métaux tels que l'acier ordinaire ou inoxydable, le titane, le zirconium, l'hafnium, ou le niobium. Les alliages à base de cuivre ne sont pas passivés. Parmi les exemples industriels d'utilisation, on peut citer la protection d'une cuve de camion-citerne en acier inoxydable destinée au transport d'acide sulfurique. Avant d'employer cette méthode, il est nécessaire d'avoir recours à des essais préliminaires permettant de déterminer la densité de courant correspondant à l'établissement de la passivité ainsi que le domaine de potentiel pour lequel le matériau reste passif, c'est à dire l'étendue du palier de passivité.

1.5.6.2 Protection cathodique

Ainsi que nous venons de le voir, elle consiste à abaisser le potentiel du métal à protéger à une valeur inférieure à E_p , potentiel de protection en dessous duquel la réaction d'oxydation du métal devient négligeable. Cet abaissement du potentiel est obtenu par passage d'un courant entre la surface à protéger (cathode) et une électrode auxiliaire (anode). [M.HE]

Conclusion

On a vu dans ce chapitre la corrosion en générale (définition, relation chimique, lieux, conséquence et tous les moyens utilisés pour la lutte contre elle).

On va voir dans le prochain chapitre la protection cathodique en détaille comme une solution pour la lutte contre la corrosion.

CHAPITRE 2
PROTECTION
CATHODIQUE

Introduction

Dans ce chapitre la protection cathodique est présentée avec ces deux principales méthodes utilisées dans les ouvrages métalliques.

2.1 Principe de la protection cathodique

La protection cathodique a pour but d'amener à l'interface métal - électrolyte un excès d'électrons, c'est à dire un excès de charges négatives d'où abaissement du potentiel du métal par rapport à l'électrolyte pour éviter le départ des ions métalliques positifs dans la solution, on empêche ainsi toute réaction d'oxydation.

En pratique, on atteint ce but par circulation d'un courant entre deux structures : celle à protéger constituant la cathode d'où le nom de protection cathodique, et celle qui est sacrifiée l'anode (figure 2.1 et 2.2).

La protection cathodique est caractéristique par :

- a) Le potentiel pris par la structure protégée
- b) L'intensité du courant de protection
- c) La résistance électrique des éléments du circuit

2.1.1 Importance de l'intensité

Le potentiel d'une structure protégée est lié à l'intensité du courant de protection. L'intensité du courant de protection doit donc être telle que la structure soit protégée en tout point. Cependant, il est important que sa valeur ne dépasse pas de beaucoup la valeur minimale de façon à ne pas consommer une puissance inutile.

De plus une intensité de courant trop forte peut aussi, par dégagement d'hydrogène occasionner le décollement du revêtement. Une intensité importante de protection risquerait également de perturber les structures métalliques voisines.

2.1.2 Importances du potentiel

Pour qu'une structure soit protégée on admet que son potentiel par rapport au milieu ambiant doit s'abaisser à une valeur négative (-0,85 V) pour l'acier par rapport à l'électrode de

référence cuivre- sulfate de cuivre au-delà de laquelle il n'y a plus corrosion de l'acier ? En pratique on choisit souvent -1V.

Le potentiel est un point qui représente le critère de protection indiscutable, la mesure s'effectue à l'aide d'une électrode de référence impolarisable et d'un voltmètre à résistance élevée. Les mesures de potentiel sur différents points d'une structure renseignant immédiatement sur l'efficacité de la protection cathodique appliquée.

2.1.3 Importances de la résistance électrique des éléments du circuit

Une structure protégée cathodiquement doit présenter une parfaite continuité (dans le cas d'une protection par soutirage la résistance d'anode ne doit pas dépasser un ohm).

Une structure protégée doit être isolée par rapport au milieu, afin de limiter les courants de protection. Le revêtement doit jouer le rôle d'un isolant électrique et doit donc présenter une bonne résistance d'isolement, cette qualité est généralement caractérisée par la résistance transversale de contact au mètre linéaire.

Il est important que le revêtement ne présente aucun défaut, son application doit donc être surveillée de très près. La structure doit également être isolée de toutes les autres structures métalliques par l'emploi de joint isolant. [Mor 66]

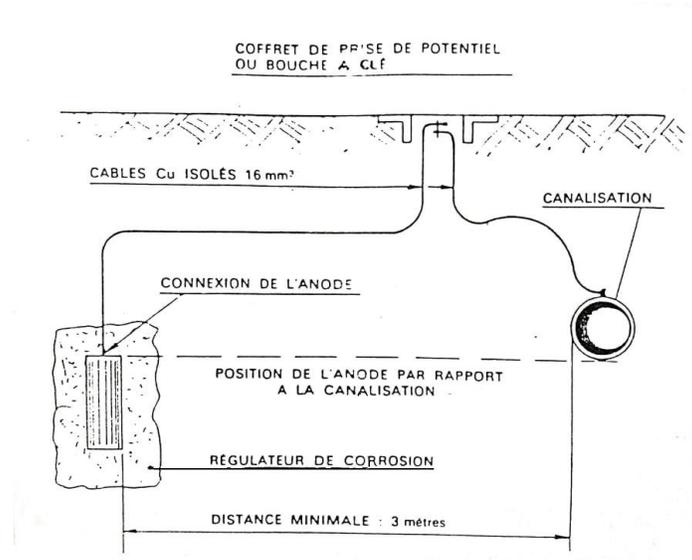


Figure (2.1) : Protection cathodique par anodes sacrificielles

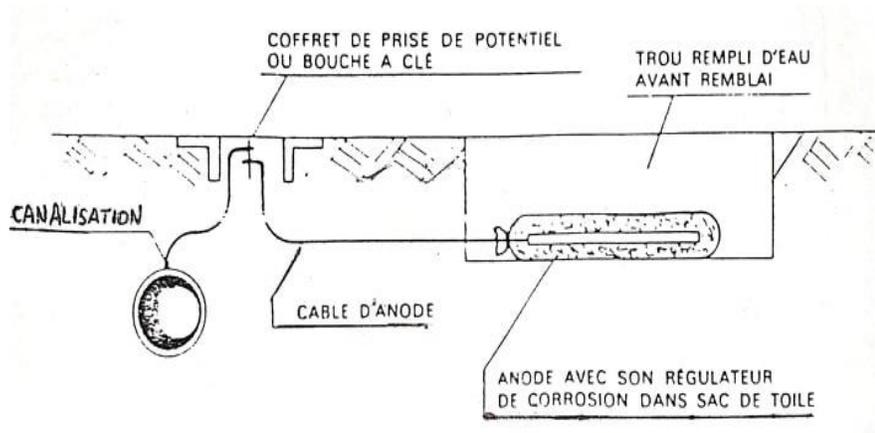


Figure (2.2) : Protection cathodique par anodes sacrificielles

2.2 Protection cathodique

Les méthodes de protection actives exposées ci-dessous peuvent être principalement :

- ✓ **Protection par anodes réactives**
- ✓ **Protection par soutirage de courant.**

2.2.1 Protection par anodes réactives

D'une manière générale, les anodes réactives sont utilisées, en dehors des applications propres, en eau de mer. Pour abaisser le potentiel d'un métal par rapport au sol, on peut le réunir à un métal plus électron- négatif que lui, dans le milieu considéré. On crée ainsi une pile dont la structure à protéger est la cathode.

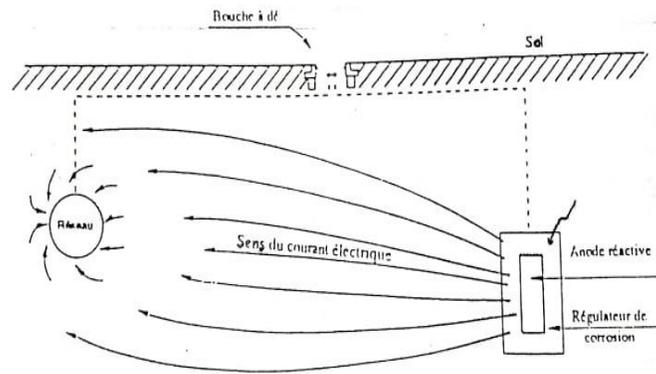


Figure (2.3) : Protection cathodique d'un métal par couplage galvanique

Les métaux plus électronégatifs que le fer qui peuvent constituer une anode sont, par ordre de potentiel croissant (ces potentiels sont pris par rapport au fer à débit nul dans l'eau de mer) :

- Le zinc -0,4V
- Alliage d'aluminium - 0,9V
- Le magnésium - 1,2V

Les anodes sont installées dans le sol comme le montre la fig 2.2, à deux mètres environ de la conduite. Lorsque la liaison est établie entre l'anode et la cathode, le courant parcourant le fil de cuivre dans le sens : ouvrage à protéger - anode.

Le circuit se forme dans l'électrolyte qui est parcouru par un courant d'ions allant de l'anode réactive à l'ouvrage à protéger. Le courant de protection cathodique qui est dû à la tension existant entre le fer et le métal de l'anode constitue un courant corrosif pour l'anode.

Les phénomènes de corrosion sont en quelque sorte transférés de l'ouvrage à protéger, à l'anode en métal, laquelle se remplace facilement. Pour effectuer une sélection entre les différents matériaux pouvant composer l'anode et choisir l'alliage qui convient le mieux, il faut tenir compte des paramètres suivants :

- Le potentiel d'anode dans l'électrolyte (potentiel de repos).
- Régularité du courant débite, et faible polarisation de l'anode, les valeurs des paramètres ci-dessus est essentiellement fonction des facteurs suivants :
 - a) Nature des matériaux composant l'anode.
 - b) Forme et surface de l'anode.
 - c) Résistivité électrique de l'électrolyte environnant et de régulateur de corrosion lorsqu'elle est destinée à être enterrées, les anodes doivent être disposées dans un lit qui a pour but d'abaisser leur résistance et de garantir un niveau faible de la polarisation et sa régularité (backfill ou régulateur de corrosion). **[DSP 17]**

2.2.2 Différents alliages utilisés :

a) Anode de magnésium :

Les anodes de magnésium pour la protection cathodique ne sont pas en magnésium pur, mais à base d'alliage; plusieurs types sont utilisés ayant des compositions et des caractéristiques électrochimiques différentes (addition de ZN et AL) dont les propriétés sont les suivantes :

- Potentiel -1,50 V à- 1,70 V
- Rendement 40 à 60%
- Consommation entre 6,5 et 8 Kg/A/an

Avantages :

- Rayon d'influence élevé
- Force électromotrice élevée
- Faible poids

Inconvénients:

- Coût élevé
- Rendement moyen surcharge locale

b) Anode aux alliages d'aluminium

Les anodes d'aluminium se trouvent recouvre très rapidement d'une couche d'oxyde qui s'oppose au fonctionnement du couple fer -aluminium, empêchant ainsi l'aluminium de jouer son rôle d'anode sacrificielle. On utilise donc des alliages qui évite cet inconvénient électrochimiques (due à la passivation d'aluminium dans l'eau aéré). Intéressant du point de vue de protection cathodique en présence d'eau de mer et présentent des caractéristiques.

- Potentiel - 1,2 à -1,5 V
- Rendement 80 à 90 %
- Consommation réelle 3 à 4 Kg/A/an

Avantages

- Très bon rendement
- Pas de surcharges locales
- Faible poids

Inconvénients :

- Risque d'être polarisée (par formation d'alumine)
- Encrassement facile par le fouling

L'utilisation de ce type d'anode est bien adoptée au milieu marin et aux équipements de stockages.

c) Anode de zinc

Elaborés à partir de zinc à haute pureté avec une teneur en fer particulièrement faible

- Potentiel - 1,5 V
- Rendement 80 % environ
- Consommation réelle 13 Kg/A/an

Avantages :

- Prix réduit par rapport aux alliages d'aluminium
- Bon rendement
- Pas de surcharge à craindre

Inconvénients :

- Poids élevé
- Rayon d'influence limite

Utilisée surtout en protection marine. [MNe 68]

2.2.3 Protection par poste cathodique (soutirage de courant)

2.2.3.1. Généralités sur la conception des systèmes à courant imposé

La protection contre la corrosion, d'un ouvrage métallique enterré pouvait être réalisée par l'application de la protection cathodique. Malheureusement, toute solution de protection, quelle qu'elle soit, n'est jamais complètement efficace parce que la définition des principes et leur application ne sont pas techniquement idéales, soit parce que, avec le temps, les caractéristiques de l'ouvrage se modifient, et que certains paramètres évoluent.

Un revêtement parfait pourrait à lui seul prévenir toute corrosion de ; canalisation, mais un tel revêtement n'est pas réalisable. Il existe toujours dans tous les revêtements protecteurs de canalisation, des perforations et des défauts.

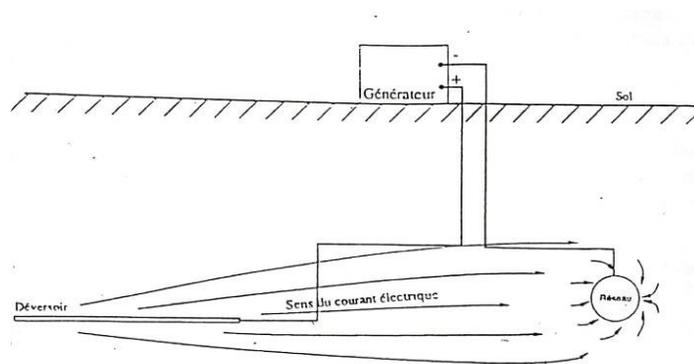


Figure (2.4) : Protection cathodique d'un métal par courant imposé soutirage

La protection cathodique viendra compléter cette protection passive avec efficacité, d'autant que son action ne va porter que sur de plus petite surface de métal en contact avec le sol.

2.2.3.2 Principe de la protection cathodique par courant imposé

Ce mode de protection est appelé, plus communément, protection par soutirage. L'abaissement du potentiel des canalisations à la valeur portant le fer en phase d'immunité (Voir diagramme de Pourbaix), est obtenue en forçant des électrons dans la structure à protéger, suffisamment et rapidement, pour qu'il ne se produise que des réactions cathodiques sur tous les points de sa surface.

Le principe de cette protection, consiste à relier au pôle négatif d'une source à courant continu, l'ouvrage à protéger, tandis que le pôle positif est relié à une pièce conductrice (en métal ou en graphite) enterrée à une certaine distance (figure 2.4).

Le courant partant de cette pièce appelée déversoir, traverse le sol, et est capté par la canalisation et retourne au générateur par circulation dans le métal de la conduite. La canalisation est alors rendue négative par rapport au sol. Si le critère de protection est atteint en tout point, la conduite est protégée « cathodiquement ». L'abaissement de potentiel est variable, et croit depuis les extrémités du réseau les plus éloignées de la connexion, au pôle négatif du redresseur, pour être maximum aux abords de celle-ci. Il doit être suffisant pour que le critère de protection soit partout atteint et maintenu. [Pot]

2.2.3.3 Soutirage de courant

Le soutirage de courant s'emploie chaque fois que l'intensité de courant nécessaire à la protection est importante, par exemple :

- Les conduites enterrées revêtues, dont la longueur dépasse quelques kilomètres.
- Les conduites non revêtues ou dont le revêtement est défectueux.
- Casing de forage.
- Structures marines importantes, dont le revêtement n'est pas possible (coque de navires, pontons, plate formes de forage).
- Les conduites sous-marines revêtues ou non

- Fonds de bacs de stockage.
- a) Constitution de l'installation

L'installation de soutirage de courant comprend (figure 2.5)

- Le branchement basse-tension ;
- Un coffret de soutirage sur un support. Il comprend le disjoncteur, le compteur et le redresseur ;
- Le conducteur de liaison à la prise de terre + ;
- Le conducteur de liaison à la canalisation
- La prise de terre

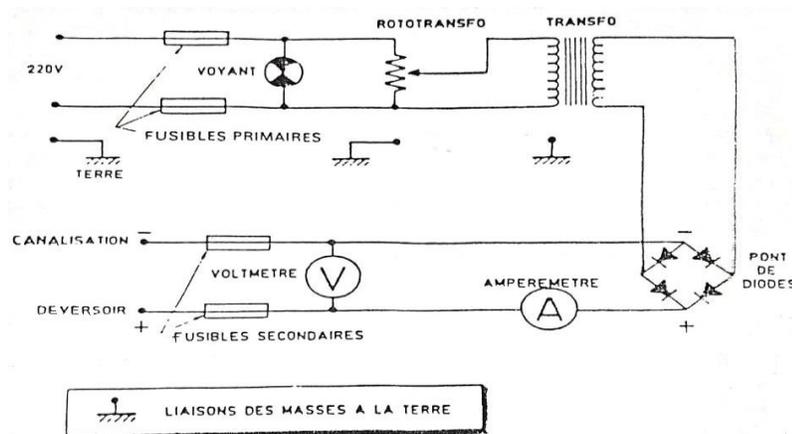


Figure (2.5) : Constitution du poste de soutirage

Le meilleur emplacement pour un poste de soutirage est celui qui permet d'assurer la protection la plus efficace sur la plus grande portée, pour une puissance minimale. Les paramètres qui interviennent pour son emplacement sont :

- La forme générale du réseau et sa longueur.
- Le diamètre des conduites.
- Le degrés d'agressivité des sols où les conduites sont posées.
- Le ou les points les plus favorables pour l'installation de la prise de terre.

- La proximité des lignes B-T.
- L'encombrement du sous-sol en structures diverses.

Remarque : La prise de terre devra pouvoir être posée en un point favorable à une distance d'au moins «30m » des conduites à protéger et aussi près que possible du redresseur pour réduire la longueur des câbles. De plus. Cet emplacement devra être choisi en un point du réseau où le diamètre des conduites est suffisamment important pour avoir la conductibilité longitudinale la plus favorable, afin de diminuer autant que possible le nombre de redresseurs à poser.

b) Conception des systèmes à courant imposé

La conception des systèmes à soutirage de courant doit tenir compte de l'atténuation du courant par chute ohmique dans la structure. L'estimation de cette atténuation, permet de déduire la portée de protection pour un débit donné des anodes, ou inversement le débit qu'il faut assurer pour que la longueur à protéger le soit bien.

En ce qui concerne la conception des systèmes faisant intervenir l'atténuation elle peut se présenter de multiples façons. On peut soit partir du type d'anodes et redresseurs, et estimer leur répartition, on peut en général de la position des postes de soutirage (aux extrémités de la structure) calculer leurs caractéristiques.

La protection cathodique (P.C) par soutirage de courant se définit par deux paramètres :

- La densité de courant nécessaire à la protection.
- Le débit de l'appareil de protection.

La densité de courant nécessaire à la protection est fonction des caractéristiques d'isolement de la structure à protéger (qualité du revêtement, résistivité du sol encaissant la structure). Ainsi le courant nécessaire peut aller de 0,05 à 0,5 mA /m² dans le cas des conduites revêtues jusqu'à 30mA /m pour les structures non revêtues, mais limité généralement à 50mA/m² pour les structures immergées sans revêtement.

Nous présentons un tableau sur les densités de courant nécessaires pour chaque type de revêtement.

Tableau (2.1) : Densités de de courant nécessaires pour chaque type de revêtement

Type de revêtement	Densité de courant protecteur $J_s \text{ mA/m}^2$	Résistivités de revêtement $\Omega. \text{m}^2$
Asphalte-jute	0.7 à 15	20 à 400
Bitumes feutre de laine	0.15 à 0.700	400 à 2000
Bitume laine de verre	0.030 à 0.150	2000 à 10000
Double bitume laine de verre	0.006 à 0.030	10000 à 50000
Matières plastiques	0.001 à 0.006	50000 à 300000

Le débit des appareils est uniquement fonction des caractéristiques de l'installation réalisée, le débit étant défini par la loi d'OHM.

$$I = \frac{V}{R} \quad 2.1$$

Ou, V: La tension de la source de courant continu et R: La résistance du circuit. Généralement,

V se situe dans la catégorie très basse tension (inférieure à 48 v), bien qu'aucune prescription n'impose cette limite. Dans certains cas on est amené à dépasser cette valeur « augmentation du débit I, trop grande résistance du circuit due à des câbles de liaison en grande longueur, grande résistance de déversoir ». En outre la résistance du circuit est, en général conditionnée par celle du déversoir anode. On a donc intérêt à avoir une résistance d'anode déversoir la plus faible possible. Dans chaque cas, le courant de protection devra être déterminé par un essai de soutirage. [AuB 70]

Conclusion

On a vue dans ce chapitre la protection cathodique en générale puis on a détaillé dans ces deux principales méthodes (protection par anodes réactive et par soutirage de courant), avec ces principes, constitution et conception.

Dans le prochain chapitre on va proposer la protection cathodique par courant imposé en utilisant le solaire photovoltaïque comme une solution et en vas étudier un cas dans l'usine de cimenterie LAFARGE Biskra.

CHAPITRE 3

CORROSION A LA

CIMENTERIE CILAS

BISKRA

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier le cas de la corrosion au niveau de la cimenterie CILAS de la Wilaya de Biskra. Nous débutons notre étude détaillée sur le problème de la corrosion et les moyens de lutte pris par l'entreprise depuis sa création en vue de proposer une solution efficace et économique au problème que connaît cette entreprise.

3.1 Description de cimenterie CILAS Biskra



Figure (3.1) : Cimenterie de groupe CILAS Biskra

Cette unité de production d'une capacité de 2.7 millions de tonnes de ciment par an, est la cimenterie la plus moderne du groupe LafargeHolcim, leader mondial des matériaux de construction.

CILAS Biskra est le fruit d'un partenariat d'exception, dans le cadre de la règle d'investissement 49/51, entre le Groupe international LafargeHolcim, leader mondial des matériaux de construction et le Groupe Industriel Souakri Frères.

Ce fleuron industriel est un projet Greenfield d'un investissement de 33 milliards de dinars construit en 21 mois, avec une excellente performance en matière de Santé et Sécurité avec 5 millions d'heures travaillées sans accident, emploie plus de 600 personnes et contribue à réduire significativement les importations de ciment. [LAF DZ]

3.2 Localisation lieux de la corrosion

L'usine renferme en son sein 3 types de canalisations :

- Canalisation de gaz
- Canalisation d'air comprimé
- Canalisation d'eau

L'eau est le premier responsable de la corrosion dans l'usine que nous trouvons dans les canalisations (pipes), cette dernière se subdivise en 4 systèmes :

- Eau potable (PW)
- Eau d'incendie (FFS)
- Eau industriel (IW)
- Eau brute (RW)

Le problème de corrosion est beaucoup plus présent dans le réseau d'eau industriel car dans ce dernier l'eau doit circuler durant 24 heures avec un débit et pression variable pour chaque stage de circulation. Notons que l'installation des canalisations a été réalisée par l'entreprise chinoise Sinoma¹

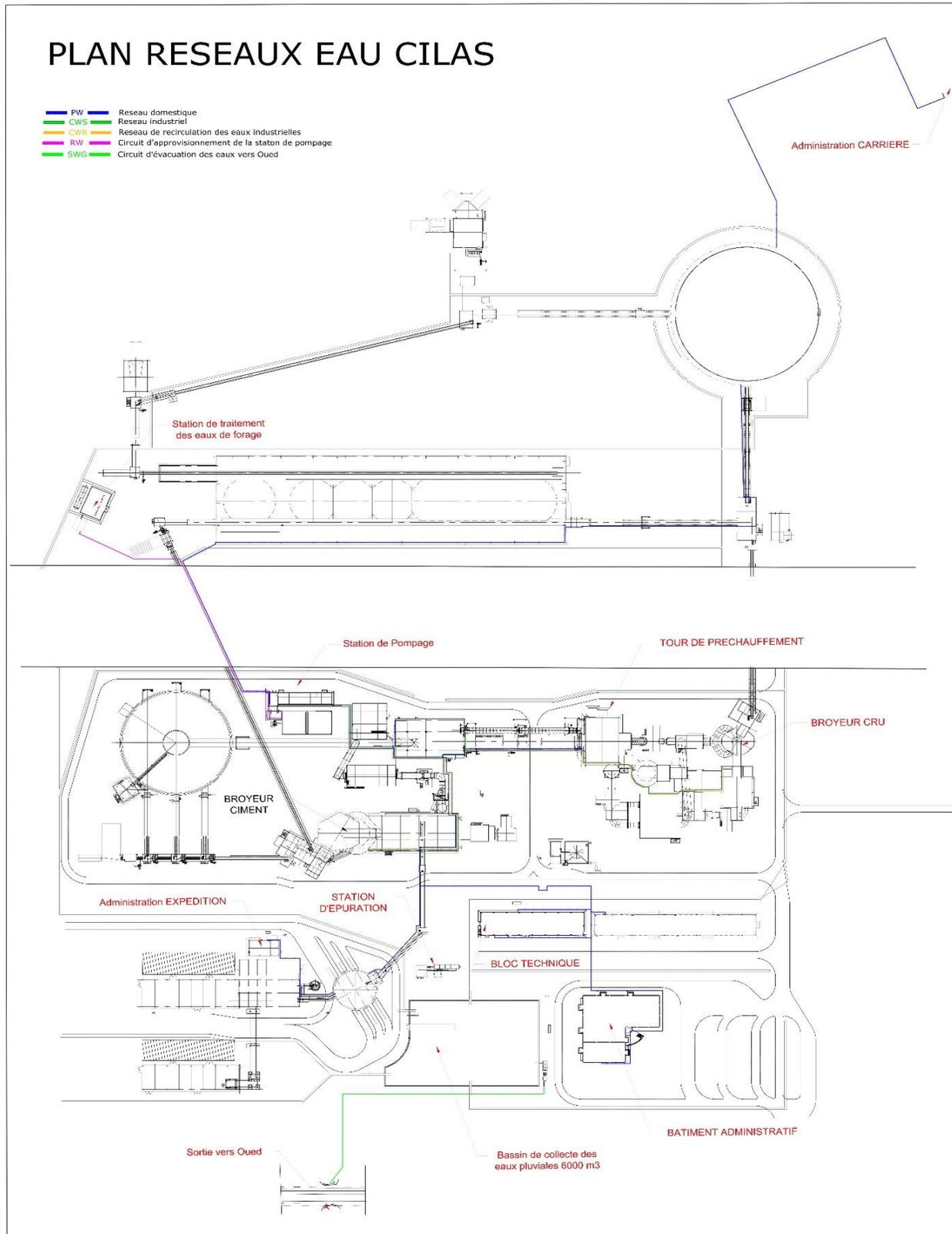


Figure (3.2) : Plan du réseau d'eau de la cimenterie CILAS Biskra



Figure (3.3) : Le phénomène de corrosion dans la cimenterie CILAS Biskra.

Les pipes utilisées sont de type : **Acier carbone.**

3.3 Moyens de lutte pris par l'entreprise :

- **Dessalement d'eau :**

Par la méthode d'osmose inverse qui est un procédé de séparation de l'eau et sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action d'un gradient de concentration et avec une pression de 50 bars. Le type de membrane utilisé dans l'usine est l'enroulé en spirale à cause de son faible coût et de disponibilité facile d'un certain nombre de fabricants.



Figure (3.4) : Le système de dessalement de la cimenterie CILAS Biskra

- **Les solutions chimiques (inhibiteur) :**

Pour le traitement et la réduction des réactions électrochimiques entre l'eau et l'acier, les produits de marque Tresch figurant ci-après sont utilisés : AT 8441 / ALG 60



Figure (3.5) : Bidons contient un produit pour traitement d'eaux

- **Soudage :**

Ci-dessous une photo des points critiques du pipes



Figure (3.6) : Point de soudure dans un pipe d'eaux

- **Changement des conduites et tronçons périodiquement (chaque 3 ou 6 mois).**

Discussion :

La difficulté pour traiter ce phénomène surtout dans les canalisations en hauteur, le changement et le soudage périodiques des vannes et conduites par l'équipe mécanique chargée de l'entretien, restent selon nous, un acte de bricolage et pour preuve l'usine souffre pleinement de ce problème. Les solutions utilisées à ce jour par l'entreprise se sont avérées inefficaces.

3.4 Solution proposée

Nous proposons pour notre part, la protection cathodique avec un courant imposé au moyen d'une source continue reliée à un système solaire photovoltaïque et des anodes métalliques.

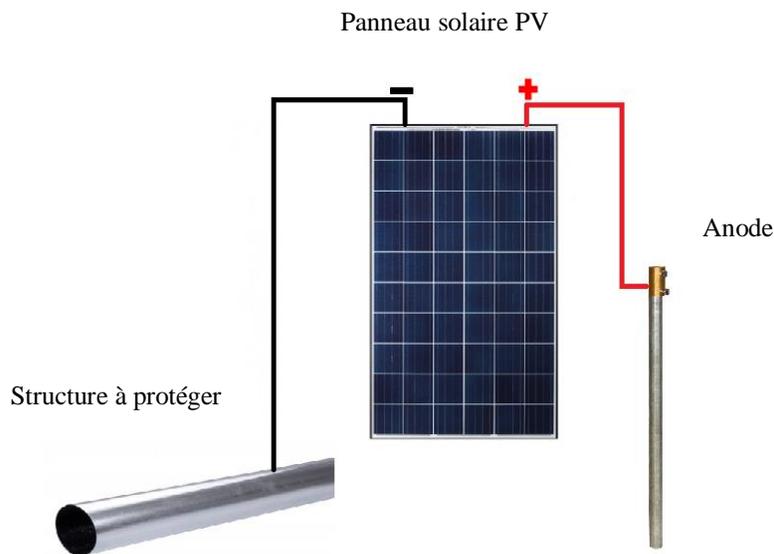


Figure (3.7) : Les éléments de base pour la protection cathodique photovoltaïque

Pour calculer et dimensionner le système de protection proposé, il faut tout d'abord avoir des données d'usine comme la longueur et les tailles des pipes.

- **Dimensions des pipes utilisés (taille)**

DN 250	DN 80
DN 200	DN 65
DN 150	DN 50
DN 125	DN 40
DN 100	DN 25
DN 80	DN 20
DN 65	

- Les différentes longueurs des canalisations d’eaux

Longueur du circuit d’eau potable : 1980 m

Longueur de circuit d’eau d’incendie : 3502 m

Longueur du circuit d’eau brute : 470 m

Longueur du circuit d’eau industrielle : 1825 m

Longueur totale : 7307 m

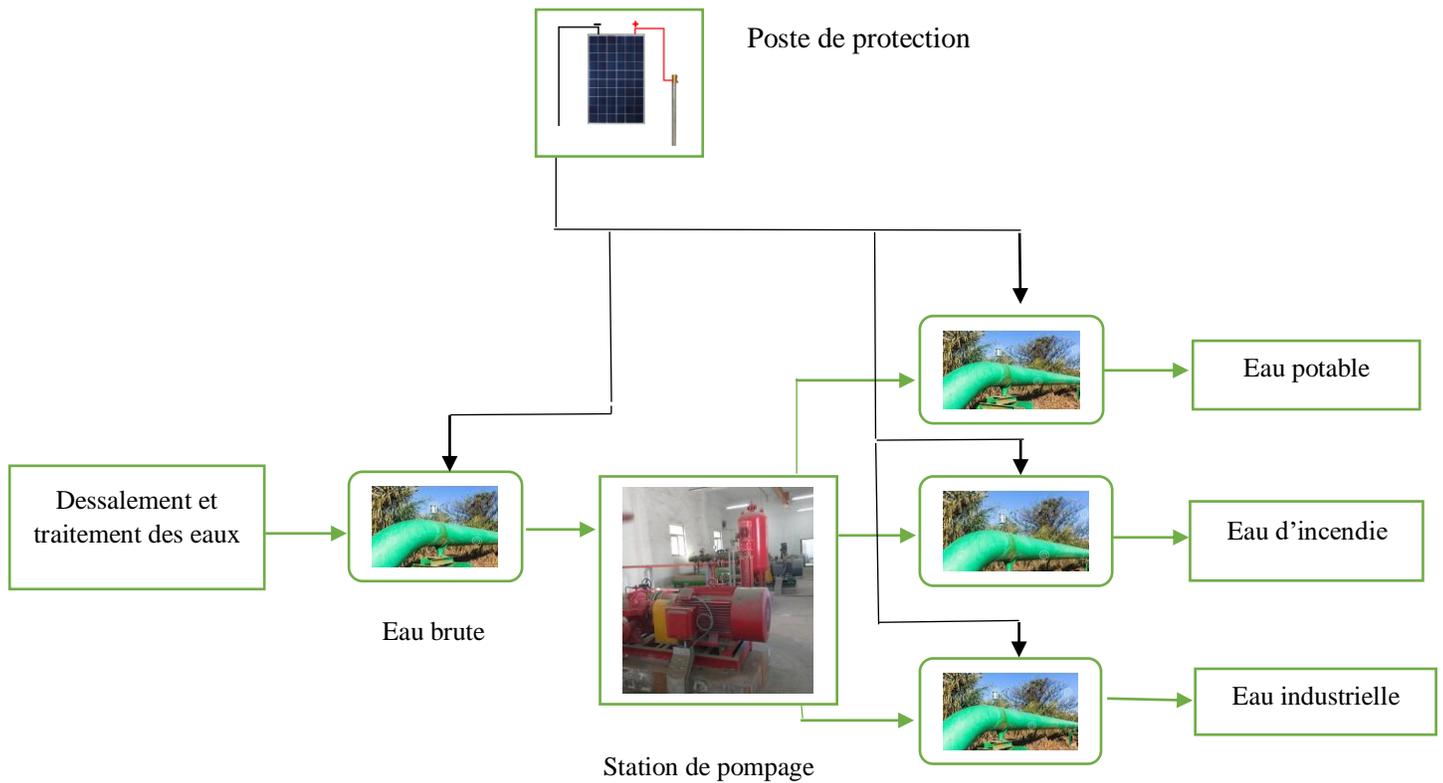


Figure (3.8) : Schéma simplifié du système d’eau et les lieux d’intégration du système de protection cathodique photovoltaïque au niveau de l’usine CILAS Biskra

3.5 Dimensionnement

Pour dimensionner le système, il faut tout d'abord faire des calculs et saisir des données comme suit :

Résistivité électrique de l'eau moyenne ρ_{em} .

Résistivité électrique de l'acier ρ_a .

Calcul de la résistance longitudinale de la conduite R_{l0} .

Résistance d'isolement de la peinture R_r .

Calcul du coefficient d'atténuation α .

Calcul de la résistance d'entrée de la conduite γ .

Potentiels de protection E_{amax} , E_{amin} .

Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage L_p

Calcul du courant nécessaire pour la protection I_{pro} .

Choix de type d'anode.

Calcul nombre des anodes N_a .

Calcul de la résistance électrique du déversoir R_d et la résistance des fils de drainage R_f .

Calcul de la tension nécessaire ΔE .

Calcul de la puissance moyenne de la station cathodique P .

Dimensionnement de système photovoltaïque autonome avec stockage

3.5.1 Dimensionnement de protection du circuit d'eau industrielle

Nous allons dimensionner le système de protection en détaillant le cas du circuit d'eau industrielle d'une longueur de : $L=1825$ mètre.

Application numérique

- Pour l'eau bien traitée sans sel (osmose inverse) et potable, la résistivité est presque

$$\rho_{em} = 400 \quad \Omega \cdot m^2/m$$

- Calcul de la résistance longitudinale de la conduite R_{l0} .

En général, les valeurs de la résistivité ou les résistances longitudinales sont données par l'usine qui fabrique les tubes. Si ces valeurs ne sont pas connues, on peut accepter la valeur de la résistivité de l'acier.

$$\rho_a = 0.245 * 10^{-6} \quad \Omega.m^2/m$$

Nous allons dimensionner les pipelines de dimensions DN 250 (le cas le plus défavorable, c'est-à-dire, nous allons, un petit peu, surdimensionné le système de protection).

Diamètre externe 250 mm
 Diamètre interne 248.1 mm
 Epaisseur 12.5 mm
 Poids 80.3 kg/m

La circonférence du pipeline

$$C = \pi * (d_{ext} - e) * e \quad 3.1$$

$$C = 3.14 * (0.250 - 0.0125) * 0.0125$$

$$C = 9.32 * 10^{-3} \quad m$$

Les structures métalliques traversées par le courant de protection sont considérées comme des conducteurs et tout conducteur présente une résistance au passage d'un courant électrique.

Dans le cas des canalisations, cette résistance est appelée résistance longitudinales et dépend de la nature du matériau et de ses dimensions.

Autrement dit, c'est la résistance transversale, par unité de longueur. Elle s'exprime en $\Omega.m^{-1}$ et elle est donnée par :

$$R_{l0} = \frac{\rho_a}{C} \quad 3.2$$

$$R_{l0} = \frac{0.245 * 10^{-6}}{9.32 * 10^{-3}}$$

$$R_{l0} = 2.62 * 10^{-5} \quad \Omega.m^{-1}$$

- Calcul du coefficient de propagation α (coefficient d'atténuation) résistance d'isolement de la peinture (revêtement) $R_r = 1500 \Omega.m$

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_{l0}}{R_r}} \quad 3.3$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{2.62 \cdot 10^{-5}}{1500}}$$

$$\alpha = 1.32 \cdot 10^{-4} \quad m^{-1}$$

- Calcul de la résistance d'entrée de la conduite γ .

$$\gamma = \frac{\sqrt{R_{l0} \cdot R_r(t)}}{2} \quad 3.4$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2.62 \cdot 10^{-5} \cdot 1500}}{2}$$

$$\gamma = 0.0991 \quad \Omega$$

- Potentiels de protection E_{max} , E_{min} [PCC 99]

On distingue généralement 03 valeurs de potentiel des structures :

- potentiel naturel ou stationnaire du métal dans le sol E_{nat} .
- potentiel appliqué sur le métal, c'est-à-dire le potentiel crée par le poste cathodique E_p .
- potentiel total ou potentiel de protection, c'est-à-dire le potentiel qui s'établit après la connexion du poste de soutirage E_{max} (min). Si les valeurs des potentiels sont mesurées avec les mêmes électrodes de référence, on peut conclure que :

$$E_p \max(\min) = E_{max}(\min) - E_{nat} \quad 3.5$$

L'expérience montre que des valeurs du potentiel naturel des structures métalliques (en acier) dans le sol varient entre -0.23 et -0.73 Volts (par rapport à l'électrode de référence Cu/CUSO₄). Les valeurs les plus répandues sont de -0.45 à - 0.60 volts. C'est pourquoi, si la valeur du potentiel naturel d'une structure n'est pas connue, on peut appliquer la valeur :

$E_{nat} = -0.55$ (par rapport à l'électrode de référence Cu/CuSO₄).

-potentiel maximal de protection par rapport à l'électrode Cu/CuSO₄ :

E_{max} par défaut = -2.5V ;

$$E_{p \max} = -2.5 - (-0.55) = -1.95V$$

-potentiel minimal de protection par rapport à l'électrode Cu/CuSO₄ :

E_{min} = -0.85V ;

$$E_{p \min} = -0.85 - (-0.55) = -0.3 V$$

-0.55V est le potentiel naturel de la conduite dans le sol (par rapport à l'électrode Cu/CUSO₄).

- Calcul de la longueur de protection d'un poste de soutirage L_p

Dans la plupart des temps les canalisations de transport d'hydrocarbures sont assez longues, mais pour notre cas un seul poste suffit pour livrer le courant nécessaire pour protéger la canalisation.

- Calcul du courant nécessaire pour la protection I_{pro}

$$I_{pro} = \frac{|E_{pmax}|}{\gamma(t) * [1 + 2 * e^{(-\alpha * L_p)}] + \frac{\rho_{em}}{2\pi y}} \quad 3.6$$

$$I_{pro} = \frac{1.95}{0.0991 * [1 + 2 * e^{(-1.32 * 10^{-4} * 1825)}] + \frac{400}{2 * 3.14 * 400}}$$

$$I_{pro} = 4.711 \text{ A}$$

L_p : c'est la portée de poste de protection ou la longueur de pipe protégé.

y : c'est la distance entre le poste de protection et la structure à protéger. Dans notre cas, nous avons estimé un lieu qui est de 400 m de point de connexion du pipeline pour éviter l'ombrage des structures géantes.

- Choix de type d'anode

Le type d'anodes utilisées pour cette étude est en fer silicium FeSi à cause de leurs durées de vie; ces caractéristiques sont reportées dans le tableau

Tableau (3.1) : Caractéristique de l'anode FeSi

Composition chimique	14.2%-14.7% de silicium ; 0.6%-0.7% manganèse ; 0.4%-0.8% carbone ; et le reste c'est le fer
Longueur de l'anode	1520 mm
Consommation massique	0.5 Kg/A.an
Profondeur de pose	1.5 m
Espace entre anode	6 m
Coefficient d'utilisation	0.5
Durée d'exploitation	25 ans
Masse Unitaire	23.5 Kg

- Calcul du nombre des anodes

$$Na = 10 * \frac{I_{pro} * t * m}{\mu * M_a} \quad 3.7$$

$$Na = 10 * \frac{4.711 * 25 * 0.5}{0.5 * 23.5}$$

$$Na = 50.11$$

Où :

I_{pro} : Courant de protection (A)

t : Durée de l'exploitation (Ans)

μ : Coefficient d'utilisation d'anode

M_a : Masse d'une anode (Kg)

m : Consommation massique de l'anode (Kg/A.an)

Le nombre d'anodes minimal nécessaire à la protection de la structure doit être un nombre entier. On prendra donc au minimum 51 anodes.

- Calcul de la résistance du déversoir R_d .

On détermine la résistance de fuite du courant d'une prise de terre combinée :

$$R_d = \frac{\rho_{em}}{2 * \pi * l_r} \left[\text{Ln} \frac{2 * l_r}{d_r} + \text{Ln} \frac{l_r}{2 * t} + \frac{\rho_n}{\rho_s} \text{Ln} \frac{d_r}{d_e} \right] \quad 3.8$$

Où :

d_e : est le diamètre de la tige substituée au rail.

d_r : est le diamètre compte tenu du régulateur de corrosion.

l_r : est la longueur de la tige compte tenu du régulateur.

ρ_n et ρ_s : sont des constantes.

$$d_e = \sqrt{\frac{4 * m_a}{\pi * \gamma_a}} \quad 3.9$$

$$d_e = 0.086$$

Où $m_a = 40 \text{ Kg. m}$ et $\gamma_a = 7850 \text{ Kg. m}^{-3}$

Si l'on pose :

$$S = \frac{\pi * d_e^2}{4} = \frac{m}{\gamma_a} \quad 3.10$$

qui implique $m = 46 \text{ m}$

En ajoutant de la poussière de coke sur une épaisseur de 30 cm, on obtient :

$$d_r = d_e + 2 * 0.3 \quad 3.11$$

$$d_r = 0.086 + 0.6$$

$$d_r = 0.686$$

$$l_r = 1 + 2 * 0.3 = 1 + 0.6$$

L : étant la longueur de la tige (prise de terre).

Théoriquement, nous avons un Ampère qui déplace 9Kg/an, alors que la masse totale déplacée en 25 ans est :

$$M = 9 * 25 * I_{pro}, = 225 * 4.711 = 1059.975 \text{ Kg} * A$$

$$l = \frac{M}{m} = \frac{1059.975}{46} = 23.04 \text{ m}$$

Donc :

$$l_r = 23.04 + 0.6$$

$$l_r = 23.64 \text{ m}$$

En remplaçant les valeurs dans l'équation ci-dessous

$$R_d = \frac{400}{2 * 3.14 * 23.64} \left[\text{Ln} \frac{2 * 23.64}{0.686} + \text{Ln} \frac{23.64}{2 * 25} + \frac{0.2}{0.3} \text{Ln} \frac{0.686}{0.086} \right]$$

$$R_d = 13.11 \Omega$$

- Calcul de la résistance des fils de drainage R_f .

Tableau (3.2) : La section de fils en fonction du courant électrique maximale

Section en mm ²	Intensité maximale
1.5	10 A
2.5	16 A
4	25 A
6	32 A
10	40 A
16	63 A

Le courant imposé $I_{pro} = 4.711 \text{ A}$. Donc selon le tableau la section de fils qu'on va choisir est $S = 1.5 \text{ mm}^2$

Le cuivre a une résistivité $\rho_c = 0.0172 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$

$$R_f = \rho_c \frac{y}{S} = 0.0172 * \frac{400}{1.5}$$

$$R_f = 4.58 \Omega$$

- Calcul de la tension aux bornes de sortie station ΔE

$$\Delta E = \Delta E_p + \Delta E_d + \Delta E_f \quad 3.12$$

Où :

ΔE_p : est le potentiel au niveau de la station cathodique.

ΔE_d : est le potentiel au niveau du déversoir.

ΔE_f : est le potentiel au niveau des fils de drainage.

$$\Delta E_p = |E_{\max}| - |E_{\min}| = 1.65 \text{ V}$$

$$\Delta E_d = I_{\text{pro}} * R_d = 4.711 * 13.11 = 61.76 \text{ V}$$

$$\Delta E_f = I_{\text{pro}} * R_f = 4.711 * 4.58 = 21.57 \text{ V}$$

$$\Delta E = 1,65 + 61.76 + 21,57$$

$$\Delta E = 84.98 \approx 85 \text{ V}$$

- Calcul de la puissance moyenne de station cathodique P.

$$P = I_{\text{pro}} * \Delta E = 4.711 * 85$$

$$P = 400.43 \text{ W}$$

Résultats partielle

Il faut imposer un courant $I_{\text{pro}} = 4.7 \text{ A}$, ou un peu plus.

Une tension $\Delta E = 85 \text{ V}$, ou un peu plus.

Une puissance totale de 400 W ou un peu plus.

Il faut 51 anodes de type fer silicium FeSi.

- Dimensionnement le système photovoltaïque autonome avec stockage

Le dimensionnement du système d'alimentation électrique PV passe par quelques étapes :

1. Définir le besoin journalier en énergie, la puissance crête et la tension de système.
2. Calcul et choix du régulateur de charge.
3. Calcul le nombre de panneaux et la méthode de raccordement.
4. Calcul le nombre de batterie et la méthode de raccordement.
5. Un hacheur boost pour élever la tension du système à la tension souhaitée.

1^{ère} étape : Définir le besoin journalier en énergie, la tension de système

On considère le pipeline comme une charge dont la puissance demandée est

$P_{\text{charge}} = 400 \text{ W}$. à alimenter pendant un $t = 24 \text{ h}$; donc l'énergie totale journalière E_t est calculé comme suit :

$$E_t = P_{\text{charge}} * t \quad 3.13$$

$$E_t = 400 * 24$$

$$E_t = 9600 \text{ Wh}$$

- La puissance crête P_c

$$P_c = \frac{E_t}{f_c * I_r} \quad 3.14$$

$$P_c = \frac{9600}{0.75 * 5.5}$$

$$P_c = 2328 \text{ W}$$

Où :

f_c : facteur de correction constante prise 0.75

I_r : la moyenne du nombre d'heure d'irradiation à Biskra est de $5.5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}$

- La tension de système V_{sys}

Tableau (3.3) : Le choix de la tension de système en fonction de la puissance crête

La tension de système V_{sys}	La puissance crête P_c
12 V	0 à 500 W
24 V	500 à 2000 W
48 V	2000 à 10000 W
96 V	Plus de 10000 W

On a $P_c = 2328$ W et selon le tableau donc la tension de système $V_{sys} = 48$ V

2^{ème} étape : Calcul et choix du régulateur de charge

Les critères de dimensionnement d'un régulateur sont:

Tableau (3.4) : Critère de dimensionnement et choix d'un régulateur

N	Critère de dimensionnement
1	La puissance maximale du champ photovoltaïque doit être inférieure à la puissance nominale du régulateur $P_{Régulateur} = 1.25 * P_c$
2	La tension à vide du champ photovoltaïque (majorée par le coefficient de sécurité de 20%) doit être inférieure à la tension maximale admissible par le régulateur.
3	Le courant de sortie du champ photovoltaïque (majorée par le coefficient de sécurité de 20%) doit être inférieur au courant d'entrée du régulateur.
4	Le régulateur doit être compatible avec la tension du parc de batteries.

$$P_{Régulateur} = 1.25 * P_c$$

$$P_{Régulateur} = 1.25 * 2328$$

$$P_{Régulateur} = 2910 \text{ W}$$

Sur le marché, nous avons trouvé un régulateur MPPT de puissance 3200 W, 48V avec une tension maximale en circuit ouvert du champ PV : $V_{reg} = 150$ V, qui supporte un courant de court-circuit égal à $I_{reg} = 60$ A.

3^{ème} étape : Calcul le nombre de panneaux et la méthode de raccordement.

Nous avons choisi les panneaux de puissance $P_{\text{pan}} = 300 \text{ W}$ avec une tension en circuit ouvert $V_{\text{oc}} = 45.6 \text{ V}$ et un courant de court-circuit $I_{\text{cc}} = 8.88 \text{ A}$

$$N_{\text{pan}} = \frac{P_c}{P_{\text{pan}}} = \frac{2328}{300} = 7.76 \approx 8 \text{ panneaux}$$

Nombre de panneaux raccordées en série $N_{\text{p(s)}}$

$$N_{\text{p(s)}} = \frac{V_{\text{reg}}}{V_{\text{oc}}} = \frac{150}{45.6} = 3.28 \approx 4 \text{ panneaux}$$

Nombre de panneaux raccordées en parallèle $N_{\text{p(p)}}$

$$N_{\text{p(p)}} = \frac{N_{\text{pan}}}{N_{\text{p(s)}}} = \frac{8}{4} = 2 \text{ panneaux}$$

4^{ème} étape : Calcul le nombre de batterie et la méthode de raccordement.

Nous avons choisi les batteries à GEL de capacité $C_b = 370 \text{ AH}$, de tension $V_b = 12\text{V}$ et 1200 cycles en décharge $D = 50\%$ et de rendement de $\eta_b = 90\%$.

La capacité totale du système de stockage :

$$C_{\text{tot}} = \frac{E_t * N}{D * V_b * \eta_b} \quad 3.15$$

$$C_{\text{tot}} = \frac{9600 * 2}{0.5 * 12 * 0.9}$$

$$C_{\text{tot}} = 3555.5 \text{ Ah}$$

C_{tot} : capacité de la batterie en Ampèreheure (Ah).

E_t : énergie consommée par jour (Wh/j).

N : nombre de jour d'autonomie (2 jours).

V_b : tension de la batterie (V).

D : décharge maximale admise (0.5 pour les batteries choisi).

η_b : efficacité de la batterie (90%).

Nombre total de batteries

$$N_b = \frac{C_{tot}}{C_b} = \frac{3555.5}{370}$$

$$N_b = 9.60 \approx 10 \text{ batteries}$$

Nombre de batteries raccordées en série $N_{b(s)}$

$$N_{b(s)} = \frac{V_{sys}}{V_b} = \frac{48}{12}$$

$$N_{b(s)} = 4 \text{ batteries}$$

Nombre de batteries raccordées en parallèle $N_{b(p)}$

$$N_{b(p)} = \frac{N_b}{N_{b(s)}} = \frac{10}{4} = 2.5 \approx 3 \text{ batteries}$$

Nombre de batteries corrigées est $N_b = N_{b(s)} * N_{b(p)} = 4*3$

$$N_b = 12 \text{ batteries}$$

5^{ème} étape : Un hacheur boost pour élever la tension de système à la tension souhaitée.

Nous allons utiliser un convertisseur DC-DC boost 900W, un régulateur élévateur de commande numérique V/C à sortie réglable, 8V-60V à 10V-120V avec un max. de 15A et une alimentation précise du convertisseur boost de commande avec affichage.

À l'aide d'un microprocesseur avancé, le convertisseur élévateur peut ajuster avec précision la tension et le courant de sortie. La fonction de mémoire prend en charge le stockage de 10 groupes de paramètres et elle peut être librement stockée ou rappelée.

Un composant d'alimentation de haute qualité combiné à une boucle CV et CC d'amplificateur opérationnel de précision périphérique améliore fortement les performances globales du module. Le convertisseur prend en charge la stabilité de la tension d'entrée, la fonction de protection et la fonction de régulation de tension constante et de courant constant.

L'affichage à 4 chiffres peut montrer la tension, le courant, la puissance et la capacité en temps réel, et nous pouvons sélectionner tour à tour l'affichage automatique ou manuel. Cela nous permette d'élever la tension de 48 V vers 85 V.

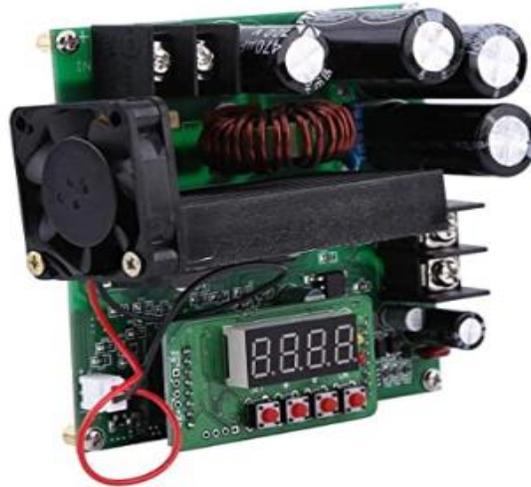


Figure (3.9) : Convertisseur DC-DC boost

Les résultats du calcul et le dimensionnement sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau (3.5) : Résultat des calculs et dimensionnement pour le cas du circuit d'eau industrielle

Caractéristique	Résultats et composants
Longueur L_p	1825 m
La distance entre le poste et le point de raccordement y	400 m
Le courant de protection I_{pro}	4.711 A
Les anodes	51 anodes de type FeSi
La résistance du déversoir R_d .	13.11 Ω
La résistance des fils de drainage R_f	4.58 Ω
La tension à la sortie du poste ΔE	85 V
La puissance moyenne de station cathodique P	400 W
L'énergie journalière consommée E_t	9600 Wh
Les panneaux solaires photovoltaïques	8 panneaux de puissance 300 W
Le régulateur de charge	MPPT de puissance 3200 W
Les batteries de stockage	12 batteries à GEL de capacité 370 AH et 12V
Le hacheur boost	Régulateur élévateur de commande numérique V/C à sortie réglable, 8V-60V à 10V-120V

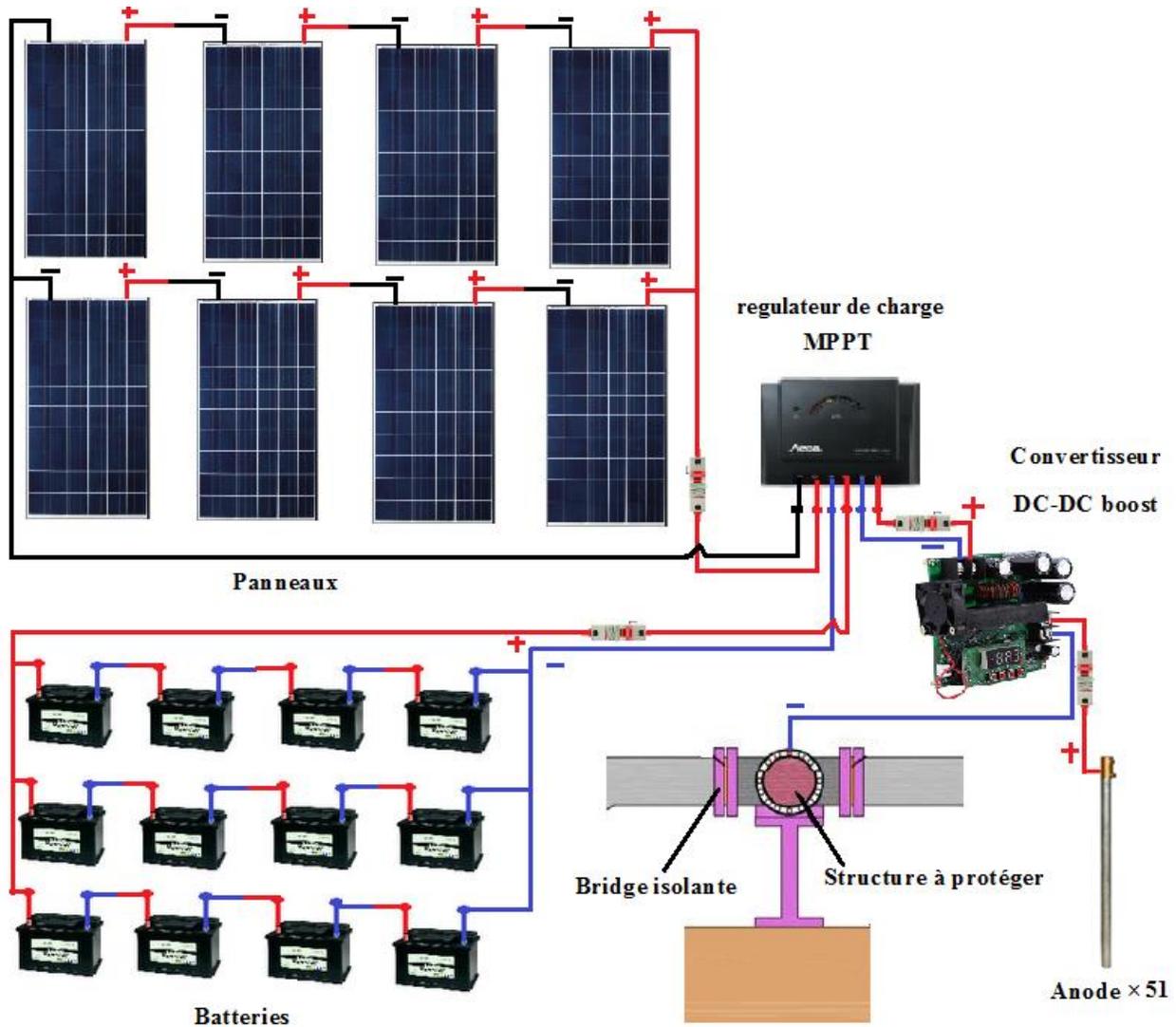


Figure (3.10) : Schéma électrique des éléments nécessaires pour la protection des canalisations du circuit d'eau industrielle de la cimenterie CILAS Biskra.

De la même façon pour dimensionner les réseaux d'eau potable, incendie et brute. La seule qui change pour chaque cas est la longueur de la canalisation. En ce qui concerne le cas d'eau brute, la distance entre le poste de protection et le point de raccordement est $y = 200$ m.

Nous allons calculer et dimensionner en mettant les résultats de chaque étude d'une canalisation dans un tableau.

3.5.2 Dimensionnement de protection du circuit d'eau potable

Tableau (3.6) : Résultat des calculs et dimensionnement pour le cas du circuit d'eau potable

Caractéristique	Résultats et composants
Longueur L_p	1980 m
La distance entre le poste et le point de raccordement y	400 m
Le courant de protection I_{pro}	4.745 A
Les anodes	51 anodes de type FeSi
La résistance du déversoir R_d .	13.11 Ω
La résistance des fils de drainage R_f	4.58 Ω
La tension à la sortie du poste ΔE	86 V
La puissance moyenne de station cathodique P	410 W
L'énergie journalière consommée E_t	9840 Wh
Panneaux solaires photovoltaïques	8 panneaux de puissance 300 W
Les régulateur de charge	MPPT de puissance 3200 W et 48V
Les batteries de stockage	12 batteries à GEL de capacité 370 AH et 12V
Le hacheur boost	Régulateur élévateur de commande numérique V/C à sortie réglable, 8V-60V à 10V-120V

3.5.3 Dimensionnement de protection du circuit d'eau d'incendie

Tableau (3.7) : Résultat des calculs et dimensionnement pour le cas du circuit d'eau incendie

Caractéristique	Résultats et composants
Longueur L_p	3502 m
La distance entre le poste et le point de raccordement y	400 m
Le courant de protection I_{pro}	5.089 A
Les anodes	55 anodes de type FeSi
La résistance du déversoir R_d .	13.11 Ω
La résistance des fils de drainage R_f	4.58 Ω

La tension à la sortie du poste ΔE	92 V
La puissance moyenne de station cathodique P	470 W
L'énergie journalière consommée E_t	11280 Wh
Les panneaux solaires photovoltaïques	10 panneaux de puissance 300 W
Le régulateur de charge	MPPT de puissance 3200 W et 48V
Les batteries de stockage	12 batteries à GEL de capacité 370 AH et 12V
Le hacheur boost	Régulateur élévateur de commande numérique V/C à sortie réglable, 8V-60V à 10V-120V

3.5.4 Dimensionnement de protection du circuit d'eau brute

Tableau (3.8) : Résultat des calculs et dimensionnement pour le cas du circuit d'eau brute

Caractéristique	Résultats et composants
Longueur L_p	470 m
La distance entre le poste et le point de raccordement y	200 m
Le courant de protection I_{pro}	3.229 A
Les anodes	35 anodes de type FeSi
La résistance du déversoir R_d	13.11 Ω
La résistance des fils de drainage R_f	2.29 Ω
La tension à la sortie du poste ΔE	52 V
La puissance moyenne de station cathodique P	170 W
L'énergie journalière consommée E_t	4080 Wh
Les panneaux solaires photovoltaïques	4 panneaux de puissance 300 W
Le régulateur de charge	MPPT de puissance 3200 W et 48V
Les batteries de stockage	4 batteries à GEL de capacité 370 AH et 12V
Le hacheur boost	Régulateur élévateur de commande numérique V/C à sortie réglable, 8V-60V à 10V-120V

3.6 Résultats et interprétation

Nous avons 4 systèmes de protection (4 postes) tels que :

Tableau (3.9) : Nombre total des équipements essentiels pour la protection cathodique de tous les 4 systèmes

Nombre total des panneaux photovoltaïques	30 panneaux
Nombre total des batteries de stockage	40 batteries
Nombre total de régulateur de charge solaire	3 régulateurs
Nombre de convertisseur DC-DC boost	3 convertisseurs
Nombre total d'anodes	192 anodes
Longueur total des fils de drainage 1.5 mm ²	1400 mètres
Système de protection	16 fusibles et portes fusibles de 6A
Longueur total du câblage (panneaux-régulateurs-batteries-convertisseurs-anodes) 4 mm ²	180 mètres

Interprétation

Nous avons obtenu un champ photovoltaïque qui couvre une surface importante dans une terre plate, isolé et un peu loin de l'usine pour éviter l'ombrage des géantes structures avec des panneaux inclinés de 35 ° (caractéristique géographique de Biskra) et orienté en plein sud avec un système de protection.

3.7 Etude économique

Nous allons tenter de calculer le coût de la solution prise par l'entreprise et le coût de l'investissement hypothétique dans une installation relative à la solution proposée.

Nous allons calculer les coûts de cet investissement sur une durée de 25 ans. Un tableau nous permet de calculer en tenant compte prioritairement de la durée de vie de 25 ans des éléments suivants : les panneaux solaires photovoltaïque et les anodes. Les autres éléments ont une durée de vie de 5 ans pour le régulateur et le convertisseur DC-DC boost et 3 ans pour les batteries.

Nous ne prendrons pas en compte le coût du nettoyage de l'entretien périodique des panneaux, de l'entretien et le suivi de l'état des pipelines car ils sont maintenus et assurés par les employés de l'usine.

3.7.1 Coût d'investissement de la solution classique C_c

Les prix sont en (toutes taxes comprises) T.T.C et monnaie européenne (Euro)

Tableau (3.10) : Coût d'investissement de la solution classique

N	Elément	Marque	Quantité	Prix unitaire	Prix total
1	AT8441	Tresch pour traitement des eaux	2400 Kg (80 bidons)	232.002	18560.16
2	ALG60	Tresch pour traitement des eaux	3600 Kg (120 bidons)	262.902	31548.24
3	Vanne		12	44.57	534.84
					50,643.24 €

Un total de $C_c = 50,643.24$ €. Si nous calculons en considérant le taux de change officiel des devises, avec un 1 Euro pour 134.59 dinars. Nous avons un coût en dinar algérien de

6,816,073.67 D.A

3.7.2 Coût d'investissement de la solution proposée C_p

Les prix en T.T.C et monnaie étrangère

Tableau (3.11) : Coût d'investissement de la solution proposée

N	Elément	Marque	Quantité	Prix unitaire	Prix total
1	Panneaux Photovoltaïques	Sonde	30	81.28	2438.4
2	Batteries	ULTRACELL	40	428.4	17136
3	Anodes FeSi	Cosider	192	125.35	24067.2
4	Régulateur de charge solaire	MORNINGSTAR	3	1029.35	3088.05
5	Convertisseur DC-DC boost	ABB	3	29.75	89.25
6	Fusibles et porte fusibles de 6A	ENERGICAL	16	1.12	17.92
7	Fil électrique 1.5 mm ²		1400 m	0.33	462
8	Fil électrique 4 mm ²		180 m	0.43	77.4
					47,376.22 €

Un total de $C_p = 47,376.22$ €. En dinar algérien, le coût total est :

6,376,365.45 D.A

Interprétation

Le coût d'investissement sur la solution classique est un peu supérieur au coût de la solution proposée.

3.7.3 Coût d'investissement après 25 ans

- Pour la solution classique C_{c25}

$$C_{c25} = C_c * t \quad 3.16$$

$$C_{c25} = 50643.24 * 25$$

$$C_{c25} = 1266081 \text{ €}$$

Où :

$t = 25$ ans

Un total de $C_{c25} = 1,266,081$ €. L'équivalent est de :

170,401,841.8 D.A

- **Pour la solution proposée C_{p25}**

Si nous prenons en considération les coûts relatifs au renouvellement de quelques composants comme les batteries, régulateurs et convertisseurs DC-DC durant 25 ans, nous aurons un coût total dès la première installation de $C_{p25} = 197,173.42$ €, en monnaie nationale l'équivalent de :

26,537,570.6 D.A

Interprétation :

$\frac{C_{c25}}{C_{p25}} > 6.42$. En conclusion après 25 ans de temps, l'usine aura investi 6 fois plus que la solution proposée.

Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons tenté de montrer que le problème de la corrosion à la cimenterie CILAS Biskra a bien été localisé et que les solutions pour son élimination existent pour l'entreprise.

Pour lutter efficacement contre ce mal, nous proposons une solution efficace, écologique donc propre et renouvelable pour lutter contre la corrosion en appliquant un dimensionnement des systèmes de protection et une étude économique comparative entre les deux solutions en présence.

La méthode proposée et retenue est à nos yeux rentable et bien meilleure que la solution classique et encore utilisée.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La présente étude est la première qui traite le sujet de la corrosion et la protection cathodique par courant imposé à la cimenterie CILAS (Lafarge) Biskra. Cette cimenterie souffre énormément de la corrosion dans les canalisations et surtout le réseau d'eau industriel car par ce dernier l'eau circule durant 24 heures, et que sans eau, nous n'avons plus de production.

L'objectif de cette étude est de résoudre le problème de la corrosion au niveau de la cimenterie. Tout commence par la réalisation d'une étude théorique qui consiste au dimensionnement du système de protection, des lieux d'installation et de la méthode de raccordement. Pour ce faire, une étude économique et comparative est réalisée entre l'utilisation d'inhibiteurs et la solution proposée reste la protection cathodique par courant imposé.

En raison de ce phénomène de corrosion, la cimenterie subit d'énormes pertes économiques et techniques :

- Economiquement, la cimenterie dépense de grandes sommes pour l'achat des inhibiteurs et pour leur utilisation de manière routinière. Si nous procédons à un calcul simple, nous remarquons que le coût d'achat des inhibiteurs est équivalent à la vente de 920 tonnes de ciments par an.
- Techniquement, elle mobilise une équipe spécialisée dans la maintenance, le soudage, remplacement de certaines pièces de la tuyauterie et des vannes ; un travail épuisant et fatigant pour la surveillance d'un pipeline d'une longueur totale de 7,3 kilomètres.

Il existe de nombreuses méthodes pour traiter ce phénomène, notamment le revêtement, la peinture, les inhibiteurs, la protection cathodique sacrificielle et la protection cathodique par courant électrique imposé. Ce dernier a prouvé son efficacité, notamment lors de l'utilisation de ressources de production électrique permanentes et propres comme l'énergie solaire photovoltaïque. Nous citons pour cette occasion quelques avantages de ce type de protection :

- ✓ Durée de vie du système de protection de 25 ans,
- ✓ Un système économique à long terme,
- ✓ Une protection efficace et assurée,
- ✓ Une maintenance simple et pas coûteuse (il suffit seulement de nettoyer les panneaux solaires et surveiller le système solaire : batteries, régulateur, convertisseur.

- ✓ Le courant produit par l'énergie solaire photovoltaïque est autonome par rapport à un courant transporté par un câble de haute tension (où le passage par un transformateur et un redresseur est obligatoire).
- ✓ Le profit économique de pareille étude pour la cimenterie après 25 ans, nous l'estimons à 143,864,271.2 dinars algériens; soit plus de 14.3 milliards de centimes !

Nous recommandons donc l'utilisation de la protection cathodique par courant imposé, alimenté en photovoltaïque dans les installations métalliques importantes, à défaut, il reste possible l'utilisation comme moyen de protection le revêtement ou la peinture.

Pour approfondir et valider les propositions et les résultats obtenus, nous pouvons citer les perspectives suivantes:

- Application de l'étude théorique sur le terrain pour la cimenterie,
- Optimisation du système de production d'électricité,
- Optimisation du nombre d'anodes,
- Utilisation de sources électriques naturelles et renouvelables telles l'énergie éolienne, les piles à combustible et d'autres ressources ...

Nous proposons à cet effet la création d'un système d'alerte en cas de fuite dans les canalisations, nous serons donc les premiers à détecter les fuites avant que des catastrophes se produisent, polluent la nature et engendrent des pertes économiques.

Nous savons que le microprocesseur Raspberry relié à un appareil de détection de fuite de gaz disposant de récepteurs sensoriels pour les gaz ne dépassent pas 1 kilomètre de diamètre, de sorte que dans le cas d'une canalisation longue, nous serons dans l'obligation d'utiliser plus d'appareils de ce genre. A titre illustratif, pour un pipeline de 100 km de long, 100 appareils de détection doivent être utilisés, cela est pour nous un problème à résoudre et obstacle à surmonter.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographique

- [Hlz 79]** H. VON HELMOHOLTZ, "*Studien über electrische Grenzschichten*", Annalen der Physik, No 7, p.337, 1879
- [Mor 66]** Morgan. « Protection cathodique et lutte contre la corrosion », 1966
- [ESP 18]** Elie Sassine. Protection cathodique du béton armé par revêtement électroconducteur autonome, université Toulouse 2018.
- [Lan 93]** D. Landolt, "*Traité des matériaux - 12 - Corrosion et chimie de surfaces des métaux*". Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 1993.
- [HHU]** H.H. Uhlig, Corrosion et Protection (Dunod)
- [J.Ch]** J. Chantereau, Corrosion Bactérienne - Bactéries de la Corrosion (Lavoisier Tech. Doc.)
- [C.M.S 86]** C.M. Schillmoller. (1986). "Amine Stress Cracking", hydrocarbon Processing, p.37.
- [BIn 89]** Battle Institute. Corrosion Prevention and Control, 32 (3), 41. (1989).
- [DSP 17]** Dimensionnement d'un système de protection cathodique pour un bac de stockage d'hydrocarbure université b Tizi-Ouzou 2017.
- [BIn 81]** Battle Institute. Corrosion Prevention and Control, 28 (4). . (1981).
- [TEC]** Corrosion et Inhibition des Puits et Collectes (TECHNIP).
- [AFN]** Revêtements Métalliques et Traitement de Surface des Métaux (AFNOR).
- [CET]** Traitements de Surface : Obligations de Performances et Devoirs d'Environnement (CETIM).

- [M.HE]** M. HÉLIE MATERIAUX METALLIQUES PHENOMENES DE CORROSION, Commissariat à l'Énergie Atomique, Université d'Evry - Val d'Essonne.
- [Mor 96]** Morgan, Protection cathodique et lutte contre la corrosion 1996.
- [MNe 68]** M. Neveux La corrosion des conduites d'eau et de gaz ; Ed. Eyrolles
1968. Paris
- [Pot]** « Protection des ouvrages de transport et de distribution contre la corrosion ». Par l'Association technique de l'industrie du gaz de France.
- [AuB 70]** Aurignac Bourget, « Manuel de protection cathodique ». Editions Technip 1970.
- [PCC 99]** M. KESSAL, CORROSION ET PROTECTION (Protection Cathodique des Conduites) INPED- Boumerdès, du 27 au 29 juin 1999.
- [LAF DZ]** <https://www.lafarge.dz> consulté le 12 mai 2020.

ANNEX



Direction des Ressources Humaines

Service Formation

Djemorah Le 09/04/2020

ATTESTATION de STAGE

Nous soussignés, Société **CILAS SPA** "Ciment Lafarge Souakri" sis à Hammam Sidi El Hadj, Djemorah Wilaya de Biskra attestons que :

Monsieur/ Mademoiselle : **KETHIRI Mohamed Fadi**

Inscrit (e) à : **Faculté des Sciences et de la Technologie _ Université de Biskra**

A effectuer un stage pratique au sein de notre Société du **09/02/2020** au **09/04/2020**

Spécialité : **Master 2 Energie Renouvelable**

Monsieur/ Mademoiselle nous a donné entière satisfaction pendant ce stage



Responsable Formation

Smain **BENGHEZAL**

Responsable Formation