



Université du Québec
à Rimouski

Intégration d'un système hybride d'énergies renouvelables dans le système de protection cathodique à courant imposé ICCP en milieu marin

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

© **Fatiha LOUSSAIEF**

mai 2022

Composition du jury :

Mohamed Yasser Hayyani, président du jury, UQAR

Adrian Ilinca, directeur de recherche, UQAR

Mohamad Issa, codirecteur de recherche, IMQ

Richard Lekene, examinateur externe, Kraft Heinz Canada

Dépôt initial le 5 avril 2022

Dépôt final le 10 mai 2022

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

C'est avec un grand plaisir que je consacre ces quelques lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur **Adrian Ilinca** de l'Université du Québec à Rimouski, de m'avoir offert l'opportunité de travailler avec lui, de son soutien et sa gentillesse tout au long de mon projet. Je tiens à remercier également mon codirecteur, le professeur **Mohamad Issa** de l'Institut maritime du Québec à Rimouski pour les intéressantes discussions que nous avons eu et pour ses conseils avisés.

Même si c'est loin de vous, ma famille, je vous remercie aussi pour toutes vos suggestions, avoir été à mes côtés, et m'avoir soutenu dans mes études.

Je tiens finalement à remercier les amis que j'ai pu rencontrer pendant ma maîtrise, avec qui j'ai passé des moments inoubliables et qui m'ont soutenu pendant celle-ci.

RÉSUMÉ

Les navires sont exposés à l'eau saline pendant toute sa durée de vie. L'effet de l'eau sur l'intégrité des matériaux est donc important. Étant donné que les aciers sont les matériaux métalliques les plus fréquemment exposés à l'eau, la corrosion est discutée ici.

La protection cathodique (PC), après une bonne protection passive, est un moyen efficace d'arrêter le processus de corrosion. Il abaisse le potentiel de la structure métallique protégée à la valeur où la réaction de corrosion ne peut avoir lieu ; ce potentiel est connu comme "seuil d'immunité".

Les systèmes de protection les plus fréquents utilisés dans les navires sont les systèmes de protection à courant imposé. Ces systèmes utilisent des anodes connectées à une source d'alimentation dans le but de créer l'équilibre électrochimique. Les sources d'alimentation sont souvent des groupes électrogènes diesel, mais il y a également l'utilisation d'énergies renouvelables.

Les sources d'énergie renouvelable jouent un rôle indispensable dans le progrès durable en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES). Néanmoins, en raison des lacunes des énergies vertes, un mélange d'énergie des sources ER est nécessaire pour supporter la charge demandée et minimiser la demande sur les générateurs thermiques à base de combustibles fossiles, comme les générateurs diesel.

Cette étude a montré la compatibilité et la fiabilité des énergies renouvelables, notamment solaire et éolienne avec un système de stockage et l'énergie fossile qui se présente ici par les générateurs du navire.

Mots clés : corrosion, milieu marin, protection cathodique, navire, énergie renouvelable, système hybride.

ABSTRACT

Ships are exposed to saline water throughout its life cycle, so the effect of water on material integrity is important. Since steels are the most frequently exposed metal materials to water, corrosion is discussed here.

Cathodic protection (CP), after good passive protection, is an effective way to stop the corrosion process. It lowers the potential of the protected metal structure to the value where the corrosion reaction cannot take place; this potential is known as the "immunity threshold".

The most common protection systems used in ships are the imposed current protection systems. These systems make use of anodes connected to a power source in order to create the electrochemical balance. Power sources are often diesel generators, but there is also the use of renewable energy.

Renewable energy sources play a vital role in achieving sustainable progress by reducing greenhouse gas (GHG) emissions. Nevertheless, due to the shortcomings of RE sources, a mix of RE sources of energy is required to support the required load and minimize demand on fossil fuel-based thermal generators, such as diesel generators.

This study has shown the compatibility and reliability of renewable energies especially solar and wind with a storage system with fossil energy which is presented here by the generators of the ship.

Keywords: corrosion, marine environment, cathodic protection, ships, renewable energy, hybrid system.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	vii
RÉSUMÉ.....	ix
ABSTRACT.....	xi
TABLE DES MATIÈRES.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
LISTE DES FIGURES.....	xix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
Chapitre 1 Corrosion et protection cathodique.....	3
1.1 INTRODUCTION.....	3
1.2 LA CORROSION.....	3
1.2.1 L'importance et le coût de la corrosion.....	3
1.2.2 Définition.....	4
1.2.3 Processus de corrosion.....	6
1.2.4 Types de corrosion.....	8
1.3 LA PROTECTION CATHODIQUE.....	21
1.3.1 Généralités.....	21
1.3.2 Définition.....	22
1.3.3 Types de protection cathodique.....	22
CHAPITRE 2 Réactions électrochimiques et corrosion en milieu marin.....	31
2.1 INTRODUCTION.....	31
2.2 CARACTERISTIQUES ET COMPOSITION DE L'EAU DE MER.....	32
2.2.1 Propriétés physico-chimiques.....	33
2.2.2 Les zones de corrosion.....	36

2.3	CORROSION EN MILIEU MARIN	39
2.4	LES EXIGENCES DANS LES INDUSTRIES MARINES	41
2.4.1	L'Association Internationale des Sociétés de Classification (IACS)	41
2.4.2	Organisation Maritime Internationale (OMI)	42
2.5	CONTROLE DE LA CORROSION	43
2.5.1	Choix des matériaux	44
2.5.2	Prise en compte de la corrosion dans la conception et la maintenance	45
2.5.3	Utilisation de revêtement	48
2.5.4	Contrôle ou traitement de l'environnement	51
2.5.5	Protection cathodique.....	53
2.6	CONCLUSION.....	56
CHAPITRE 3 Les systèmes à courant imposé.....		57
3.1	INTRODUCTION.....	57
3.2	DEFINITION	57
3.3	ANALOGIE ELECTRIQUE DU SYSTEME DE PROTECTION CATHODIQUE	58
3.4	COMPOSANTS CONVENTIONNELLE DES SYSTEME A COURANT IMPOSEE	60
3.4.1	Redresseur.....	60
3.4.2	Les anodes auxiliaires	64
3.4.3	Les électrodes de références	65
3.4.4	Les câbles de liaison	66
3.4.5	Sources d'alimentation externe pour la protection cathodique.....	66
3.5	LES SOURCES D'ENERGIE DURABLE.....	67
3.5.1	Energie électrostatique: Nano-générateur triboélectrique	67
3.5.2	Energie Thermique : Les appareils thermoélectriques.....	72
3.5.3	Energie Solaire : Les panneaux solaires	75
3.5.4	Energie éolienne : Les génératrices éoliennes	77
3.5.5	Système Hybrides	78
3.5.6	Récapitulatif des avantages et inconvénients.....	79
CHAPITRE 4 Modélisation du système hybride Flettner-Solaire-Diesel avec stockage d'énergie.....		83
4.1	INTRODUCTION.....	83

4.2	ÉTUDE DE CAS.....	84
4.2.1	Présentation du navire	84
4.2.2	Trajet et demande énergétique du navire.....	85
4.2.3	Système de protection cathodique.....	88
4.3	CONFIGURATION DU SYSTEME HYBRIDE.....	91
4.4	MODELISATION DU SYSTEME	92
4.4.1	Modélisation génératrice	92
4.4.2	Modélisation énergie solaire PV	94
4.4.3	Modélisation du rotor Flettner.....	99
4.4.4	Modélisation du banc de batteries	101
4.4.5	Modèle Simulink du Système Global.....	104
4.5	ÉTUDE FINANCIERE	106
4.5.1	Coût actuel net (NPC)	106
4.5.2	Coût de la consommation du carburant en intégrant l'énergie renouvelables.....	109
4.6	CONCLUSION.....	111
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	113
	Annexes	115
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	119

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Les différentes formes de corrosion [12].	9
Tableau 2 Caractéristiques de l'anode galvanique [10]	25
Tableau 3 Avantages et inconvénients des anodes sacrificielles	26
Tableau 4 Avantages et inconvénients de la protection cathodique	28
Tableau 5 Concentration des principaux constituants de l'eau de mer [32]	32
Tableau 6 méthodes de contrôle de l'environnement [31]	52
Tableau 7 Les formes de sources d'alimentation possibles un système de protection cathodique à courant imposé d'un navire.	66
Tableau 8 Tableau récapitulatif des travaux traitant les nanogénérateur triboélectrique	71
Tableau 9 Les avantages et les inconvénients des systèmes d'alimentation solaire pour CP.	80
Tableau 10 Les caractéristiques du navire à étudier	84
Tableau 11 Caractéristiques de la génératrice C15 utilisé à bord du navire [120]	87
Tableau 12.	91
Tableau 13 Caractéristiques financière des composantes du système hybride proposé [116, 131]	107
Tableau 14 Évaluation du coût de la consommation de carburant.	110

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Répartition des coûts de corrosion [6].....	4
Figure 2. Diagramme de flux des processus de corrosion et des types de dommages [7].	6
Figure 3. Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion [9].	7
Figure 4. (a) Représentation schématique de la corrosion uniforme et (b) un acier vieillissant [6].....	11
Figure 5. Principe de corrosion par piqûres [7].	12
Figure 6. Exemple : Puits sur acier inoxydable 304 après exposition à un environnement marin simulé (3,5 g/L NaCl) [16].....	13
Figure 7. Principe de corrosion caverneuse [7].	14
Figure 8. Représentation schématique de la corrosion galvanique [17].	15
Figure 9. Présentation schématique de la réaction de corrosion dans le couplage galvanique du zinc et du platine [18]	16
Figure 10. Erosion de corrosion sur la surface intérieure d'un tuyau coudé [6].	17
Figure 11. Surface interne de la section de tuyau en acier de carbone endommagé par la cavitation [18].....	17
Figure 12. Frettage de méplats de cuivre plaqué or cobalt en contact avec de l'or massif dans un contact électrique. (a) Après 1000 cycles. (b) Après 104 cycles. (c) Après 105 cycles. (d) Après 106 cycles. [18].....	18
Figure 13. Corrosion intergranulaire [7].....	19
Figure 14. Corrosion à haute température de l'acier 18K induite par 1% H_2S dans Ar [20]	21
Figure 15. A gauche : Diagramme de Pourbaix du système Fe- H_2O – A droite : Diagramme d'Evans schématisant le principe de la protection cathodique : j_A et j_c représentent les densités de courant anodique et cathodique du métal dans le milieu considéré [23]	22

Figure 16. Protection d'une canalisation souterraine avec une anode [9].	24
Figure 17. Système de protection par courant imposé[9].	28
Figure 18. Répartition géographique de la salinité des océans [33].	33
Figure 19. Évolution de la concentration en dioxygène dissous en $\mu\text{mol/kg}$ en surface, à 200 m de profondeur et à 2000 m de profondeur Les zones en rouge montrent la présence de forte teneur en oxygène et en bleu les faibles teneurs (données eWOCE) [35].	34
Figure 20. Solubilité du CO_2 dans l'eau pure en fonction de la température [38].	35
Figure 21. Profil de vitesse de corrosion en fonction des différentes zones d'exposition en milieu marin [23]	36
Figure 22. Profil de vitesse de corrosion d'acier selon type d'atmosphères [40]	37
Figure 23. Diagramme de polarisation avec une concentration en oxygène croissante [44].	39
Figure 24. Lignes de courant issues de la corrosion naturelle [39].	40
Figure 25. Série galvanique du graphite et de divers métaux et alliages dans l'eau de mer (vitesse de l'eau 2.4 à 4 m/s, durée d'immersion : 5 à 15 jours, température : 5 à 30 °). © ASTM G82	45
Figure 26. Schéma de l'ajout de corrosion et de la tolérance de perte de corrosion [52].	46
Figure 27. IACS CSR concept net d'échantillonnage pour les éléments de structure locaux [28].	47
Figure 28. Surépaisseur de corrosion pour les composants structurels typiques des citernes à cargaison chauffées [53].	47
Figure 29. Différentes étapes du mécanisme de revêtement par immersion (dip-coating) [59]	49
Figure 30. Pulvérisation thermique de métal [60].	50
Figure 31. Application de peinture par pulvérisation sans air sur le dessus des navires [56].	51
Figure 32. Représentation schématique de l'action de l'inhibiteur sur la surface du métal nu : (a) inhibition anodique, (b) inhibition cathodique, (c) inhibition anodique-cathodique [7]	53
Figure 33. Lignes de courant résultant de la protection cathodique [39].	54

Figure 34. Schéma de protection cathodique sacrificielle [56]	55
Figure 35. Schéma de principe d'un système à courant imposé [56].....	55
Figure 36. Conception du système de protection cathodique à courant imposé pour un navire [68]	58
Figure 37. Circuit équivalent de métaux protégés cathodiquement[70].....	60
Figure 38. Circuit redresseur de pont monophasé [71].....	61
Figure 39. Circuit redresseur de pont triphasé [71]	62
Figure 40. Redresseur contrôlé au silicium (SCR) [69].....	63
Figure 41. Schémas fonctionnels pour le mode de commutation et redresseurs standard	64
Figure 42. La structure d'électrode de référence Ag/AgCl [73]	65
Figure 43. le fonctionnement de l'effet triboélectrique [87]	68
Figure 44. Une étude bibliographique de la base de données SCI sur les articles publiés chaque année dans le domaine du TENG au 31 décembre 2019 et la répartition géographique des auteurs.[86].....	69
Figure 45. L'expérience de Seebeck [101]	72
Figure 46. Le refroidisseur thermoélectrique à semi-conducteur de type ancien avec des côtés chauds et froids [102]	73
Figure 47. Schéma d'un module thermoélectrique (générateur) [103]	74
Figure 48. Système de récupération d'énergie à l'échappement [105].....	75
Figure 49. Système d'alimentation solaire pour CP [71]	76
Figure 50. Présentations des panneaux solaires [108]	77
Figure 51. Génératrices éoliennes pour CP [71].....	78
Figure 52. Conception d'un système hybride (WT-PV) avec CPU [109].....	79
Figure 53. Configuration générale du système de production d'énergie hybride [112].....	79
Figure 54. Transporteur de cargaisons générales classes RO-RO	84
Figure 55. Illustration de la route maritime reliant le port de Radès en Tunisie au port de HaydarPaşa à Istanbul en Turquie.....	85

Figure 56. Résultats du calcul distance et de durée de navigation d'après le logiciel Shiptraffic	86
Figure 57. Illustration de la consommation du carburant du navire en utilisant une génératrice diesel pour assurer la demande énergétique (l'électrification).	87
Figure 58. Résumé des potentiels par rapport aux électrodes de référence Ag/AgCl/eau de mer recommandées pour la protection cathodique de divers métaux dans l'eau de mer [121].....	88
Figure 59. Densités de courant de conception typiques [121]	89
Figure 60. Les caractéristiques de redresseur utilisé dans le navire (Annexe 2)	90
Figure 61. Schéma du système hybride proposé.....	91
Figure 62. Modélisation de la génératrice sur Matlab-Simulink.....	93
Figure 63. Résultats présentés par le site « Atlas Solar Mondial » pour le port Radés Tunis	95
Figure 64. Profil de rayonnement solaire au port de Radés Tunis	95
Figure 65. Résultats présentés par le site « Atlas Solar Mondial » pour le port Istanbul	96
Figure 66. Profil de rayonnement solaire au port d'Istanbul.....	96
Figure 67. Organigramme de l'algorithme P&O	97
Figure 68. Modèle des panneaux solaires sur Matlab-Simulink	98
Figure 69. Les courbes V-I et V-P du réseau PV	99
Figure 70. Angles de vitesse du navire et du vent.....	100
Figure 71. Puissance délivrée par le rotor Flettner en fonction de l'angle du vent réel pour un cap du navire de 0 comme indiqué par la flèche et pour une vitesse du navire de 6 m/s (moitié supérieure) et 10 m/s (moitié inférieure).	101
Figure 72. Schéma de l'état de charge de la batterie [127].	102
Figure 73. Organigramme de l'algorithme de contrôle de la batterie.	103
Figure 74. Modèle des batteries sur Matlab-Simulink	104
Figure 75. Modèle Simulink d'un système hybride WT-PV avec Batteries de stockage...	105
Figure 76 Coût du cycle de vie NCP des composantes du système hybride.....	108

Figure 77 Contribution de chaque composante au NCP	108
Figure 78 Période de récupération du coût de chaque cas	111

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AC	Source d'alimentation
BAT	Batteries
CA	Courant alternatif
CC	Courant continue
CP	Cathodic Protection
CPU	Cathodic Protection Unit
CPMM	Comité de protection du milieu marin
DOD	Depth of Discharge of the battery
FG	Fuel Generator
GES	Effet de Serre
ICS	Impressed Current System
ICCP	Impressed Current Cathodic Protection
IACS	Association Internationale des Sociétés de Classification
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NACE	National Association of Corrosion Engineers
NPC	Net Present Cost

OMI	Organisation maritime internationale
PV	PhotoVoltaïque
P&O	Perturb & Observe
PIB	Produit Intérieur Brut
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
PVA	film d'alcool polyvinylique
PSPC	Performance Standards for Protective Coatings
R&D	Recherche & Développement
SCR	redresseurs contrôlés au silicium
TENG	TriboElectric NanoGénérateur
TEC	ThermoElectric Cooler
TEG	ThermoElectric Générateur
TSCF	Tanker Structure Cooperative Forum
WT	Wind Turbine

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La corrosion est une cause majeure de défaillances structurales marines vu l'agressivité liée au milieu. Ce phénomène peut entraîner la dégradation des matériaux structuraux, faciliter les fissures de fatigue, les ruptures fragiles et les ruptures instables, l'intégrité de toute la structure de la coque peut être considérablement affectée [1].

Les études sur la corrosion marine comme [2-8] se sont considérablement accrues au cours des dernières décennies parce qu'il est fortement nécessaire de prévoir mieux la dégradation due à la corrosion, en particulier dans les pétroliers qui ont fait l'objet de catastrophes remarquables.

Pour préserver la résistance de la structure d'un navire contre la corrosion, la protection cathodique (CP) est l'une des pratiques les plus courantes pour protéger les parties immergées des surfaces. CP fonctionne en fournissant suffisamment de courant continu à la surface immergée de la structure pour réduire le potentiel d'acier dans l'électrolyte afin de supprimer les activités de corrosion de sorte que la vitesse de corrosion devient insignifiante [6]. Son alimentation se fait à partir des génératrices auxiliaires du navire.

D'autre part, le transport maritime joue un rôle indispensable au bon fonctionnement de marché international. Selon le rapport de la CNCED 2018, plus de 80% des échanges commerciaux se font par voie maritime [9].

En effet, avec la croissance économique mondiale, la demande d'électricité augmente et, par conséquent, la consommation de combustibles fossiles augmente. Ces dernières sont responsables des émissions nocives, y compris les gaz à effet de serre (GES), qui contribuent au réchauffement de la planète.

Dans le contexte actuel, ces problèmes sont abordés de plusieurs façons. L'une des approches populaires consiste à réduire la consommation d'énergie fossile et la remplacer par les énergies vertes. Le but de cette étude est l'intégration d'un système d'énergie hybride dans lequel différentes ressources énergétiques (solaire, éolien, hydroélectrique, diesel, etc.) répondent à la demande énergétique.

L'avantage le plus important des systèmes hybrides est que lorsque des ressources énergétiques sont utilisées ensemble, la fiabilité du système s'améliore. De plus, la réduction des coûts des technologies d'énergie renouvelable résultant de la R&D et de l'accélération du déploiement les rend plus attractives pour les investisseurs [10].

Ce travail s'articule autour de quatre chapitres. Le premier chapitre met l'accent sur le phénomène de corrosion en général en présentant son impact économique, son procédé électrochimique, ses types et aussi ses méthodes de contrôle.

Le deuxième chapitre s'intéresse sur la corrosion principalement en milieu marin, qui commence par la compréhension de la nature du milieu et de ses caractéristiques électrochimiques. Par la suite, les exigences et les réglementations internationales sont établies et les diverses méthodes de contrôle de la corrosion en milieu marin sont mentionnées.

Le troisième chapitre parle de la protection cathodique par courant imposé. Cette partie étudie les composantes du système de protection cathodique ainsi que ses sources d'alimentation qui peuvent être une source conventionnelle (c'est-à-dire les génératrices) ou peuvent être une source d'énergie durable (comme énergie thermique, éolienne ou solaire)

Le quatrième chapitre présente un exemple du navire de transport. Il consiste à intégrer un système hybride constitué par des génératrices, des panneaux solaires, une éolienne et un banc de batteries pour l'alimentation du navire, principalement du système de protection cathodique. Ce travail traite de la modélisation du système hybride ainsi que de sa faisabilité économique.

CHAPITRE 1

CORROSION ET PROTECTION CATHODIQUE

1.1 INTRODUCTION

Ce chapitre vise à introduire le phénomène de la corrosion par la présentation de son impact environnemental, son impact économique et son procédé de développement électrochimique. La corrosion peut se manifester sous différentes formes qui sont bien illustrées dans la partie "type de corrosion". À la suite de cette étude, la principale technique de contrôle actif de la corrosion est la protection cathodique qui se présente comme une protection à anode sacrificielle et une protection à courant imposé.

1.2 LA CORROSION

1.2.1 L'importance et le coût de la corrosion

La corrosion est l'un des problèmes majeurs, dont la gravité peut mettre en danger la sécurité de la structure et provoquer une défaillance catastrophique des ponts, des installations nucléaires, des composants d'avions et des équipements utilisés dans la chimie, la pétrochimie, le transport et la construction. La corrosion est un phénomène spontané qui se développe lentement [1, 11]. Ce taux est principalement affecté par l'environnement, la composition du métal et les propriétés métallurgiques, chimiques et électrochimiques [12]. Étant donné qu'il faut beaucoup de temps pour évaluer le degré de corrosion, il est souvent sous-estimé dans la conception des équipements et des structures industrielles.

La corrosion est une dépense importante dans l'estimation des coûts de production et des investissements dans toute industrie. Selon une étude récente, le coût annuel direct de la corrosion aux États-Unis est estimé à environ 276 milliards de dollars US [13]. La perte est

estimée à plus de 3 % du produit intérieur brut mondial (PIB) [14]. La figure 1 montre le résultat de l'étude sur la répartition des coûts de corrosion « Analyse informatique des paramètres de système et de conception de l'électrodéposition pour les applications marines des États-Unis » réalisée par la « *Federal Highway Authority* » des États-Unis en collaboration avec la National Association of Corrosion Engineers (NACE) en 2001.

Le coût direct de la corrosion est considéré comme le coût de remplacement des structures corrodées et de la main-d'œuvre. Les pertes indirectes ont augmenté de plusieurs milliards de dollars. Les pertes suivantes sont considérées comme des coûts indirects : perte de produit, temps d'arrêt, perte d'efficacité, contamination du produit, métal et aliments, et conception de structures et d'équipements, par exemple, en utilisant des matériaux plus chers et de haute qualité.

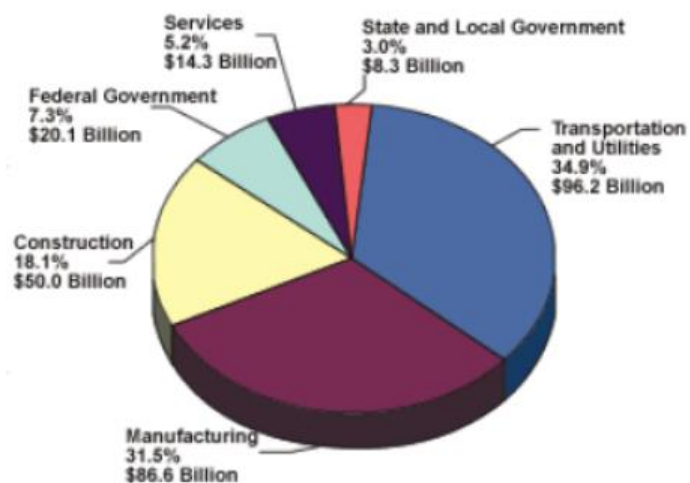


Figure 1. Répartition des coûts de corrosion [15]

1.2.2 Définition

La corrosion est un phénomène irréversible qui entraîne des modifications des propriétés des métaux ou alliages, et qui peut conduire à une altération significative en fonction des métaux ou alliages, de l'environnement ou des systèmes, dont ceux-ci font partie. La corrosion résulte d'un principe fondamental de la thermodynamique et de la cinétique qui

se présente par une interaction chimique, biochimique et électrochimique entre les métaux et alliages et l'environnement [11].

Les environnements corrosifs comprennent l'humidité, l'oxygène, les acides inorganiques et organiques, la haute pression, la température et les chlorures. Au cours de la corrosion, les métaux ont tendance à se convertir en composés plus stables sur le plan thermodynamique tels que les oxydes, les hydroxydes, les sels ou les carbonates [12].

Le résultat de la corrosion est généralement préjudiciable et peut entraîner une perte de matière, une contamination de l'environnement par des produits de corrosion ou une dégradation d'un système technique. Il est important de noter que les dommages de corrosion résultant d'une attaque sur le métal doivent être distingués d'une défaillance par corrosion qui se caractérise par la perte totale de fonction du système technique [16].

Le schéma illustratif de la figure 2 montre les différentes réactions qui peuvent se produire séquentiellement et simultanément au cours du processus de corrosion. Le transport de matériaux et les réactions chimiques peuvent fournir ou éliminer des composants de réaction importants. En plus de l'adsorption ou de la désorption, il existe également une réaction de limite de phase, qui implique principalement des réactions électrochimiques et qui est affectée par des courants externes.

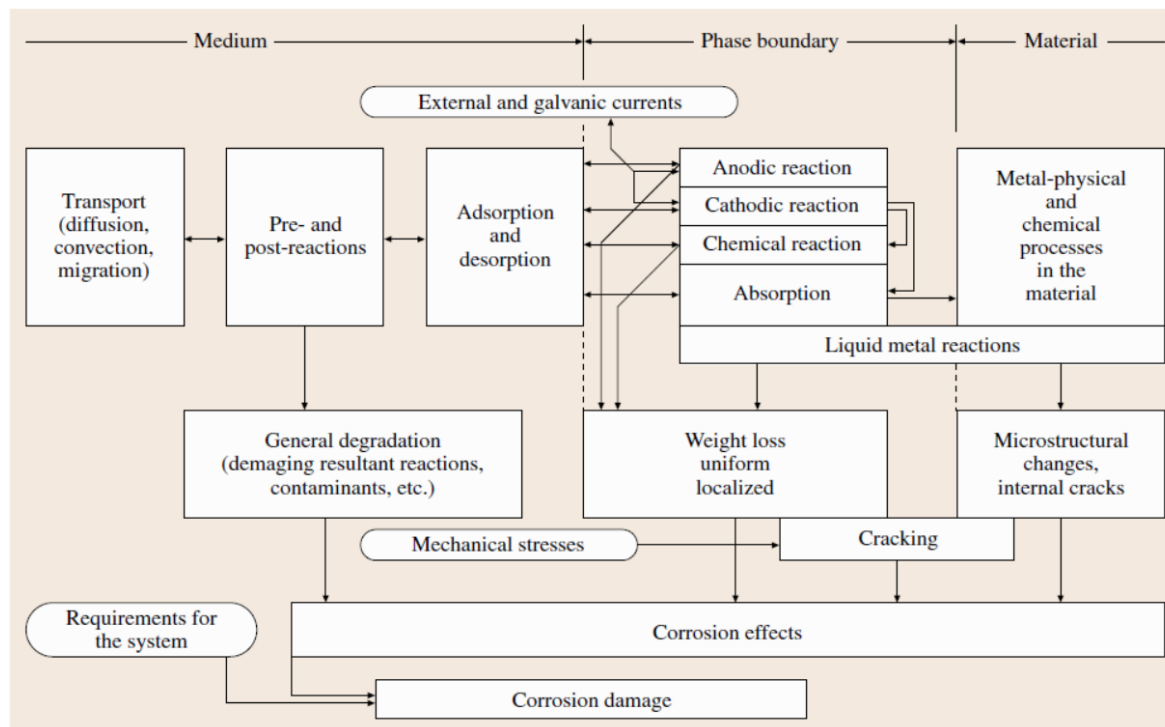


Figure 2. Diagramme de flux des processus de corrosion et des types de dommages [17].

1.2.3 Processus de corrosion

La corrosion du métal est un processus de destruction qui s'effectue généralement par la présence des matériaux en atmosphère humide, terrain humide ou immergés dans l'eau, soumis à des réactions électrochimiques. Dans ce cas, des réactions électrochimiques se produisent par un transfert de charge entre des réactifs neutres ou ioniques et un matériau conducteur, appelé électrode, agissant comme une source d'électrons ou un puit d'électrons [18]. Les réactions d'oxydation (corrosion) se produisent sur les surfaces anodiques du métal alors que les réactions de réduction se produisent sur les surfaces cathodiques permettant ainsi de créer des piles galvaniques (figure 3).

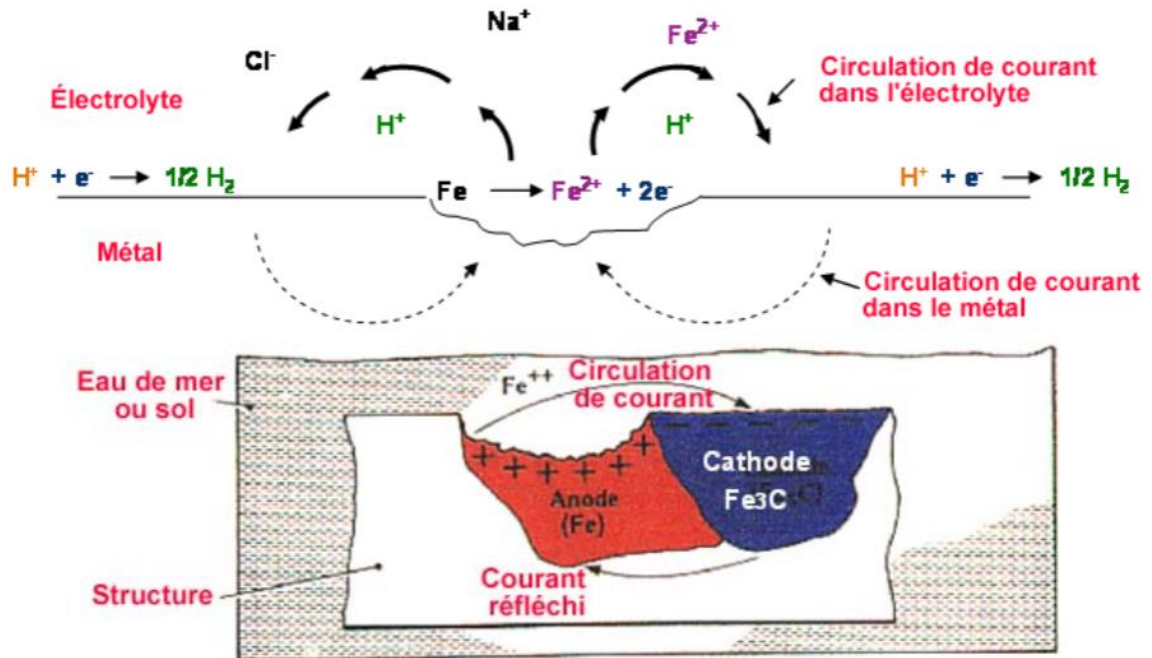


Figure 3. Phénomène de corrosion dans une cellule de corrosion [19].

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 de la réaction de réduction où les ions présents dans l'électrolyte sont réduits sur la surface de la cathode. La réaction de réduction des ions hydrogène dans l'eau est la réaction la plus courante, et l'hydrogène se forme selon le processus chimique suivant :



- **L'électrolyte** : se présente dans l'eau de la mer ou le sol permettant le passage du courant électrique par déplacement d'ions.
- **Le chemin métallique** : la zone anodique et la zone cathodique sont électriquement reliées entre elles par un milieu conducteur.

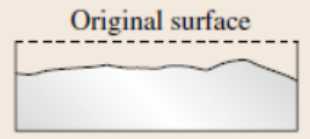
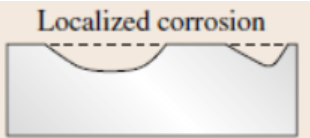
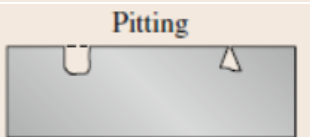
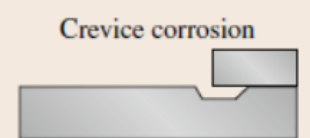

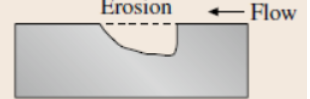
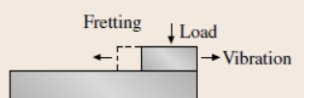


1.2.4 Types de corrosion

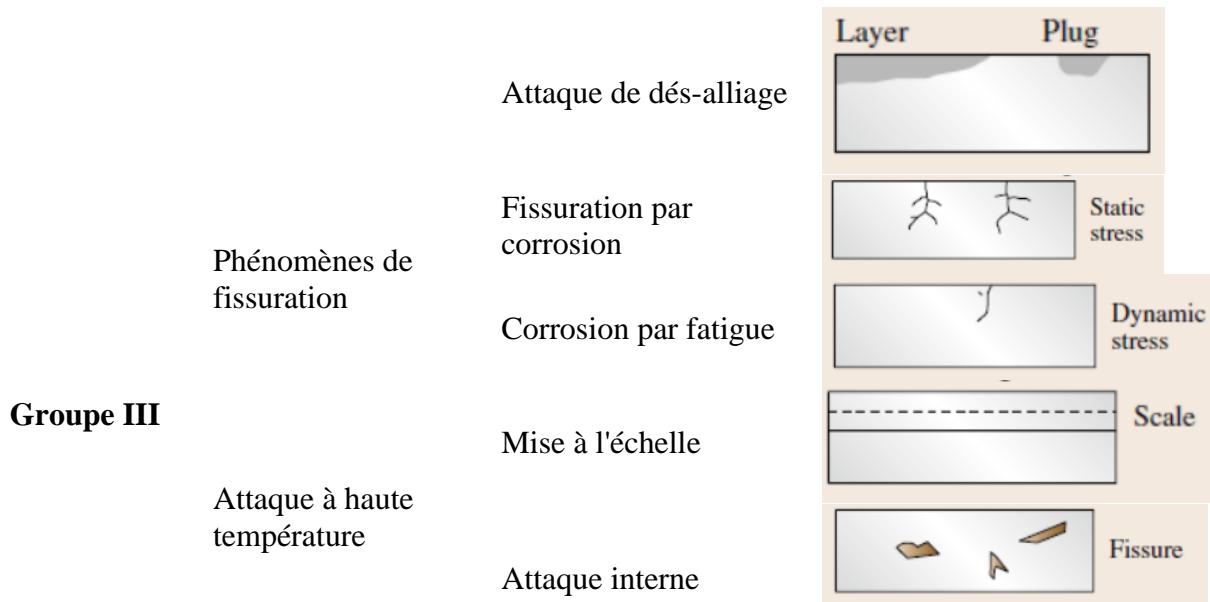
Diverses classifications de la corrosion ont été suggérées dans la littérature [1, 16, 20].

La corrosion a été classée selon la nature, la composition chimique de l'environnement et les propriétés électrochimiques, la température, le type d'attaque et la vitesse d'attaque, la morphologie de l'attaque ou les propriétés de l'environnement, qui peuvent changer au cours de la corrosion. Dilon [20] a introduit huit formes de corrosion qui peuvent être regroupées en trois catégories (Tableau 1).

- **Groupe I** : Ceux qui sont détectés par examen visuel.
- **Groupe II** : Ceux qui nécessitent un moyen d'examen et d'identification.
- **Groupe III** : Ceux qui sont vérifiés par microscopie d'une sorte ou d'une autre (optique, électronique à balayage, etc.). Celles-ci sont parfois apparentes à l'œil nu.

Tableau 1
 Les différentes formes de corrosion [20].

Groupe	Types	Figure	
Groupe I	Corrosion uniforme		
	Corrosion localisée		
	Corrosion localisée	Corrosion par piqûre	
	Corrosion localisée	Corrosion caverneuse	
		Corrosion galvanique	
		Corrosion par érosion	
		Effets de vitesse	Corrosion par cavitation
Groupe II		Corrosion par fretting	
		Pourriture de soudure	
	Corrosion intergranulaire	Exfoliation	



1.2.4.1 Corrosion uniforme

Une corrosion uniforme ou généralisée se manifeste avec la même vitesse sur toute la surface métallique exposée à l'environnement corrosif et entraîne une réduction régulière de l'épaisseur. Le métal corrosif doit être uniforme sur le plan de la composition et de la métallurgie. La corrosion uniforme se produit en règle générale sous l'effet de cellules de corrosion sans surfaces anodiques et cathodiques clairement définies. Les taux de corrosion sont mesurés par des techniques de corrosion électrochimique ou de perte de poids [17]. D'un point de vue technique, la corrosion uniforme est assez facile à gérer, car l'ingénieur concepteur doit seulement inclure une épaisseur supplémentaire au matériau qui équivaut à la perte due à la corrosion sur la durée de vie de la structure.

Un exemple de corrosion uniforme est la corrosion atmosphérique. C'est la dégradation et la destruction des matériaux métalliques et de leurs structures et propriétés, en raison de l'interaction avec l'atmosphère terrestre à sa température de l'air, son humidité, la chimie de l'air et ses valeurs climatiques caractéristiques. La corrosion atmosphérique d'un pont ferroviaire au Vietnam est illustrée à la Figure 4 [12].



Figure 4. (a) Représentation schématique de la corrosion uniforme et (b) un acier vieillissant [15].

1.2.4.2 Corrosion par piqûres

Les piqûres sont une corrosion localisée qui se traduit par des piqûres dans la surface métallique. La corrosion par piqûres est l'une des formes de corrosion les plus coûteuses en raison de son mode d'attaque imprévu. Ce type de corrosion se produit généralement dans les cellules de corrosion où les surfaces de l'anode et de la cathode sont clairement séparées. L'anode est située dans la fosse, tandis que la cathode est généralement située sur la surface environnante (Figure 5).

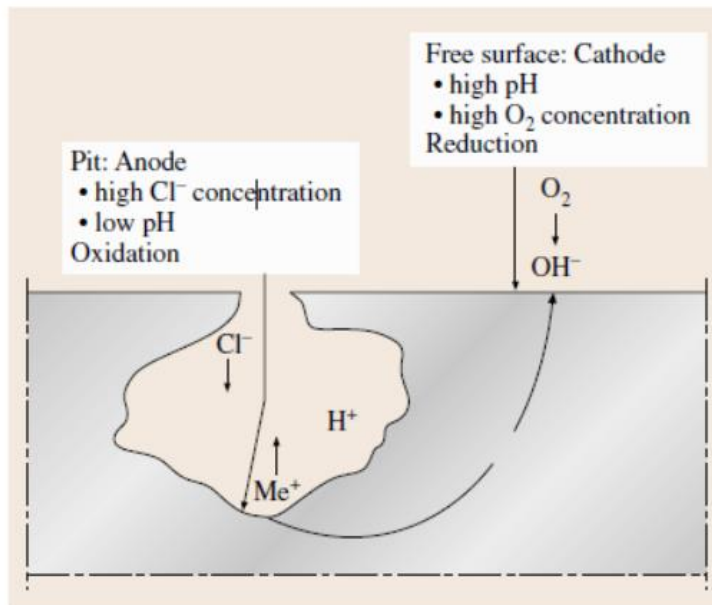


Figure 5. Principe de corrosion par piqûres [17].

La corrosion par piqûres se concentre sur le maillon le plus faible, c'est-à-dire la zone où la couche de passivation peut ne pas être assez résistante. Le mécanisme est très rapide, car une surface endommagée subit des détériorations successives dans un court laps de temps (Figure 6) et ils sont préformés avec une perte de poids minimale.

La piqûre dépend de la température, de la concentration en chlorure et de la valeur du pH. La gravité de la corrosion par piqûres est contrôlée par l'environnement et la concentration de chlorure, acidité de l'électrolyte, concentration en oxydant, température, caractéristiques structurelles, composition du métal ou de l'alliage, concentration en oxygène dissous, potentiel et taux de balayage potentiels [17, 21-23]. L'eau de mer naturelle cause plus de dommages en termes de piqûres que toute autre eau contenant du chlorure.



Figure 6. Exemple : Puits sur acier inoxydable 304 après exposition à un environnement marin simulé (3,5 g/L NaCl) [24].

1.2.4.3 Corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse est l'une des formes les plus dommageables des matériaux qui est associée à une crevasse et qui a lieu dans ou immédiatement autour de la crevasse. Cette détérioration se produit lorsqu'une surface métallique mouillée par un liquide corrosif retenu dans la crevasse est à proximité immédiate d'une autre surface.

En raison de la corrosion dans la crevasse, les conditions peuvent y être modifiées ; par exemple, la valeur du pH peut diminuer et la concentration de chlorure augmenter, et par conséquent la corrosivité peut être plus élevée dans la crevasse qu'à l'extérieur (Figure 7).

À l'origine du phénomène de corrosion localisée se trouve l'hétérogénéité physique du substrat (perforations, rayures profondes...). Dans ce cas, l'échange d'ions avec le milieu est fortement ralenti. En effet, la dissolution des métaux va provoquer l'accumulation d'ions Fe^{2+} dans cet espace restreint, selon l'équation ci-dessous, ce qui provoque une acidification du

milieu. En même temps, les ions Cl^- présents dans le milieu vont migrer vers l'écart pour compenser l'accumulation de charges positives :



Le milieu dans la caverne devient de plus en plus agressif, ce qui accélère la dissolution du métal et augmente d'autant plus l'acidification. Ce phénomène est alors qualifié « d'autocatalytique ».

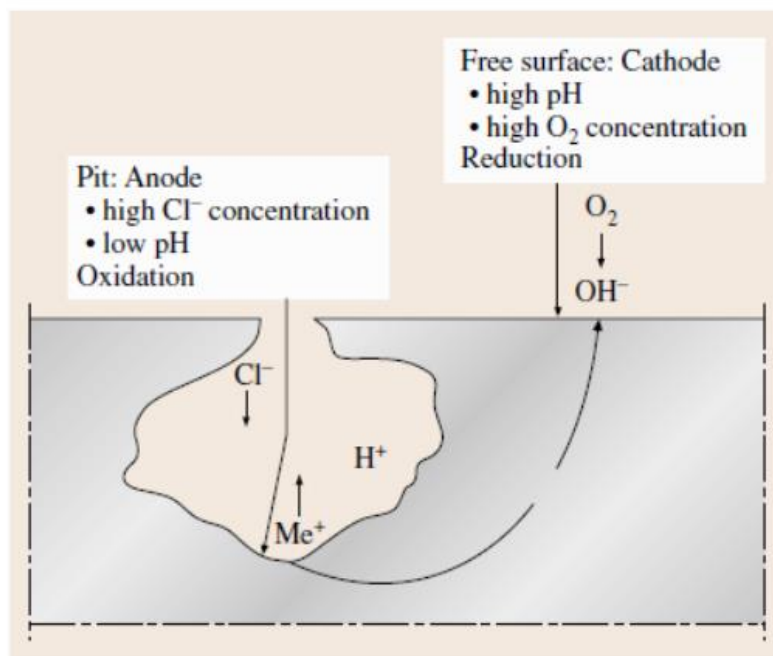


Figure 7. Principe de corrosion caverneuse [17].

1.2.4.4 Corrosion galvanique

La corrosion galvanique se produit lorsque deux ou plusieurs matériaux métalliques différents sont couplés électriquement dans un milieu conducteur (Figure 8). L'étendue de la corrosion résultant du couplage galvanique est affectée par les facteurs suivants :

- La différence de potentiel entre les métaux ou alliages ;
- La nature de l'environnement ;

- Le comportement de polarisation des métaux ou alliages ;
- La relation géométrique des métaux ou alliages constitutifs.

Le matériau au potentiel de corrosion le plus noble devient alors la cathode de la cellule de corrosion, tandis que le matériau le moins noble est consommé par dissolution anodique. Le rapport de surface des deux matériaux différents est extrêmement important. Si le rapport de surface anode-cathode est faible, le courant galvanique peut être concentré sur une petite surface anodique. La vitesse de corrosion, visible sous forme de perte d'épaisseur au cours du temps, peut alors devenir très élevée pour l'anode. Le figure 9 illustre la réaction de corrosion dans le couplage galvanique du zinc et du platine.

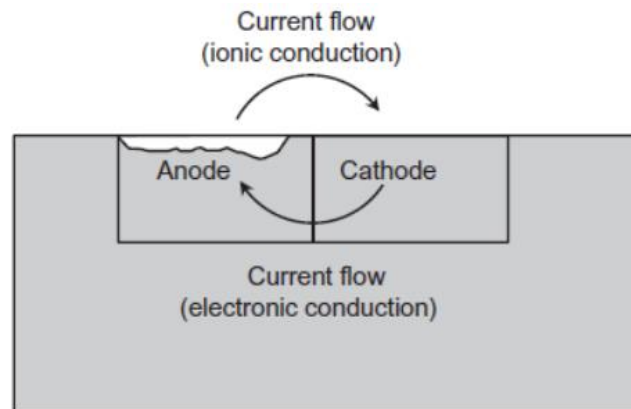


Figure 8. Représentation schématique de la corrosion galvanique [11].

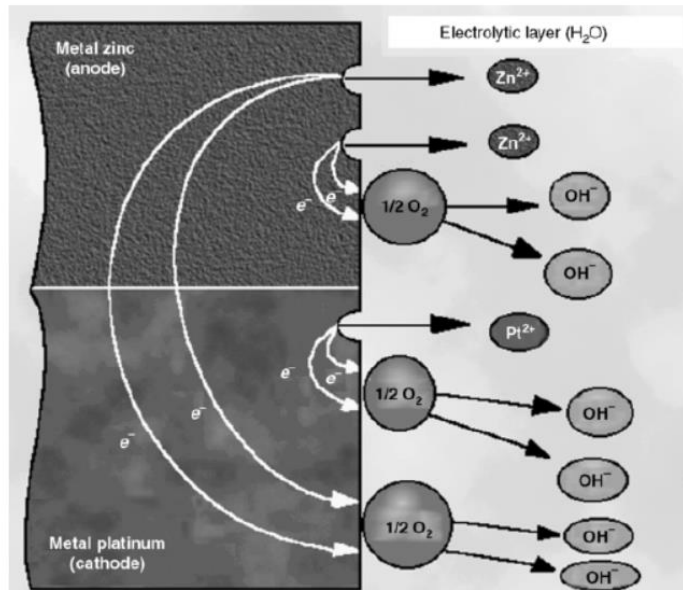


Figure 9. Présentation schématique de la réaction de corrosion dans le couplage galvanique du zinc et du platine [25]

1.2.4.5 Corrosion par érosion

La corrosion par érosion est le dommage cumulatif induit par les réactions de corrosion électrochimique et les effets mécaniques du mouvement relatif entre l'électrolyte et la surface corrosive. La corrosion par érosion est définie comme une dégradation accélérée en présence de ce mouvement relatif. Le mouvement est généralement à grande vitesse, avec des effets d'usure mécanique et d'abrasion. La corrosion par érosion se trouve dans les systèmes tels que les tuyauteries (en particulier les coudes comme à la figure 10), les vannes, les pompes, les buses, les échangeurs de chaleur, les aubes de turbine, les chicanes et les broyeurs [16].



Figure 10. Erosion de corrosion sur la surface intérieure d'un tuyau coudé [15].

1.2.4.6 Corrosion par cavitation

La corrosion par cavitation est causée par la formation et la rupture de bulles de vapeur dans le liquide à la surface du métal. La cavitation se produit sur les turbines hydrauliques, les turbines de pompe, les hélices de navire et de nombreuses surfaces qui sont en contact avec des liquides à grande vitesse soumis à des changements de pression. Si la pression sur le liquide est suffisamment réduite pour le faire bouillir à température ambiante, une cavitation peut se produire [25] (Figure 11).

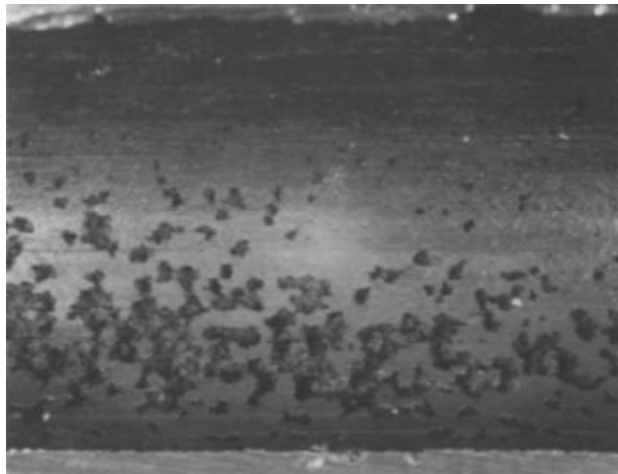


Figure 11. Surface interne de la section de tuyau en acier de carbone endommagé par la cavitation [25].

1.2.4.7 Corrosion par frettage

La corrosion par frettage se produit au niveau de la zone de contact entre deux métaux sous charge et soumis à un léger mouvement relatif par vibration ou d'autres forces. Les dommages commencent par une adhérence locale entre les surfaces de contact et progressent lorsque les particules collées sont arrachées d'une surface et réagissent avec l'air ou un autre environnement corrosif. Les surfaces affectées présentent des piqûres ou des rainures avec des produits de corrosion environnants [25] (Figure 12).

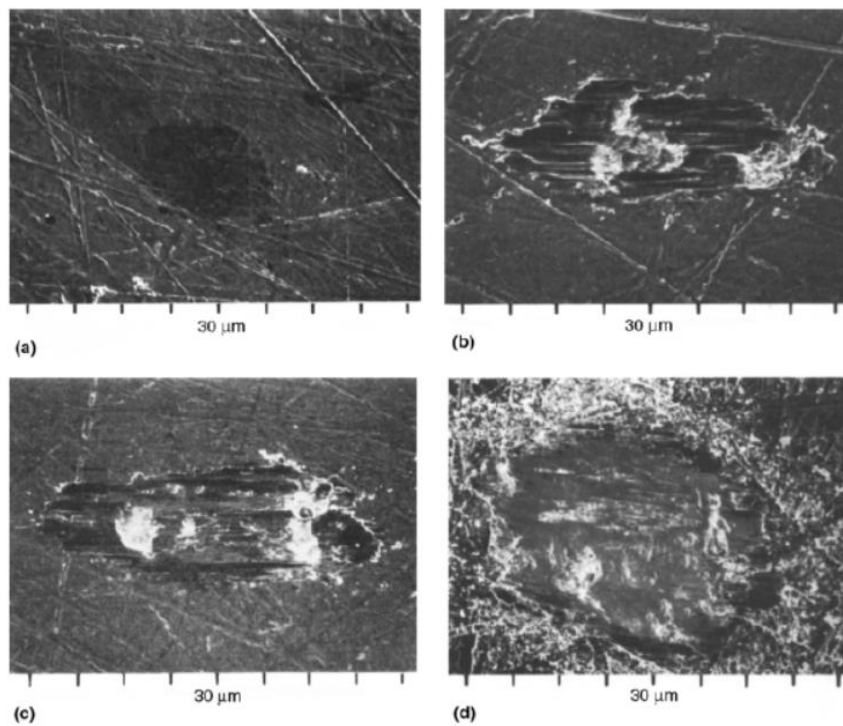


Figure 12. Frettage de méplats de cuivre plaqué or cobalt en contact avec de l'or massif dans un contact électrique. (a) Après 1000 cycles. (b) Après 104 cycles. (c) Après 105 cycles. (d) Après 106 cycles. [25]

1.2.4.8 Corrosion par intergranulaire

La microstructure des métaux et alliages est constituée de grains, séparés par des joints de grains [16]. La corrosion intergranulaire est une attaque qui se produit aux joints de grains au micro-niveau en raison de la précipitation de la phase secondaire et conduira éventuellement à la fissuration des structures granulaires. Cette forme de corrosion est généralement associée à des effets de ségrégation chimique (les impuretés ont tendance à s'enrichir aux joints de grains) ou à des phases spécifiques précipitées sur les joints de grains. Une telle précipitation peut produire des zones de résistance à la corrosion réduite à proximité immédiate. La corrosion intergranulaire se manifeste en trois formes :

- Pourriture de soudure,
- Exfoliation,
- Attaque de dés-alliage.

La corrosion intergranulaire peut se produire dans la plupart des métaux dans des conditions défavorables. La plus connue est la corrosion intergranulaire de l'acier inoxydable (Figure 13) résultant de la formation de carbure de chrome lorsque la concentration en carbone est trop élevée et une chaleur défavorable. Un traitement a eu lieu, par ex. dans la zone affectée thermiquement le long d'une soudure.

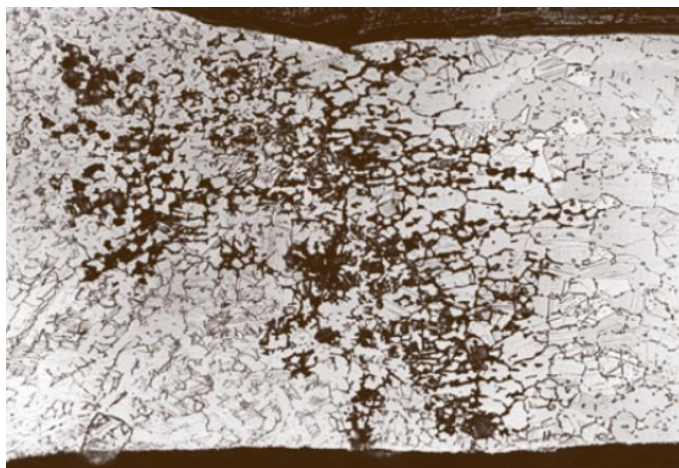


Figure 13. Corrosion intergranulaire [17]

1.2.4.9 Corrosion à haute température

Les métaux et les alliages réagiront pendant le service à haute température avec l'environnement, entraînant une corrosion à haute température [26] qui présente un facteur majeur limitant la durée de vie des composants en service . Ce type de corrosion se définit comme est une attaque chimique par des gaz, des sels solides ou fondus ou des métaux fondus, généralement se produisent à des températures supérieures à 500 °C (930 °F) (figure 14).

Les différents types de corrosion à haute température comprennent : oxydation, nitruration, carburation, chloration, corrosion des fumées et des dépôts, sulfuration [16].

Les applications industrielles à haute température sont par exemple les centrales électriques à combustibles fossiles, usines pétrochimiques et chimiques, conduits d'échappement, turbines à gaz et moteurs à réaction terrestres, etc.

La corrosion à haute température est un défi technique en raison du fait que l'efficacité des processus thermiques et des moteurs augmente avec la température de fonctionnement. Un tel service à haute température est particulièrement dommageable pour la plupart des métaux en raison de l'augmentation exponentielle de la vitesse de réaction avec la température. Dans la plupart des cas, la résistance à la corrosion à haute température n'accompagne pas les bonnes propriétés mécaniques des matériaux de structure. Par conséquent, des revêtements protecteurs doivent être appliqués.

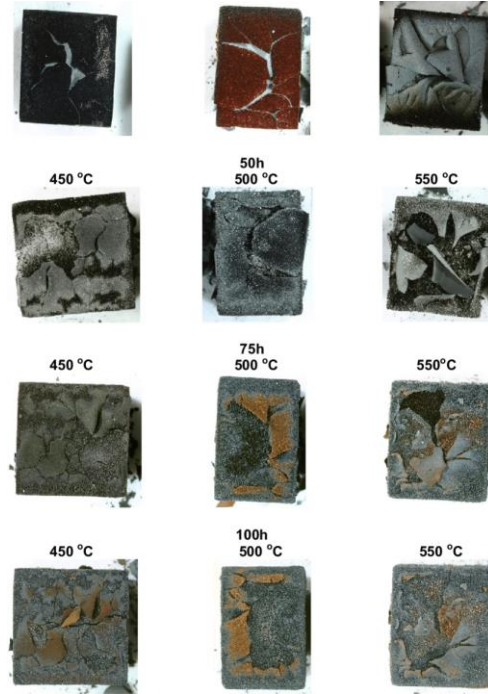


Figure 14. Corrosion à haute température de l'acier 18K induite par 1% H₂S dans Ar [27]

1.3 LA PROTECTION CATHODIQUE

1.3.1 Généralités

La protection cathodique permet de protéger un métal contre la corrosion. Cette technique remonte en 1824 lorsque Sir Humphrey Davy [28] a rapporté que le cuivre pouvait être protégé avec succès contre la corrosion en le couplant avec du fer ou du zinc. Dans les années 1920, la protection cathodique a été utilisée pour la première fois pour protéger les pipelines enterrés transportant du pétrole et du gaz.

Au cours des décennies successives, un immense développement dans les systèmes de protection cathodique a été accompli. La protection cathodique maintenant est bien établie et appliquée aux réservoirs de stockage, aux navires, aux structures de forage offshore, aux condenseurs et aux ponts en béton. Les informations de base sur la protection cathodique sont bien documentées dans plusieurs manuels [29].

1.3.2 Définition

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 (figure 15). C'est le déplacement de potentiel de corrosion E_{cor} du métal vers un potentiel E inférieur à un potentiel de protection E_{prot} (figure 15) 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 [30].

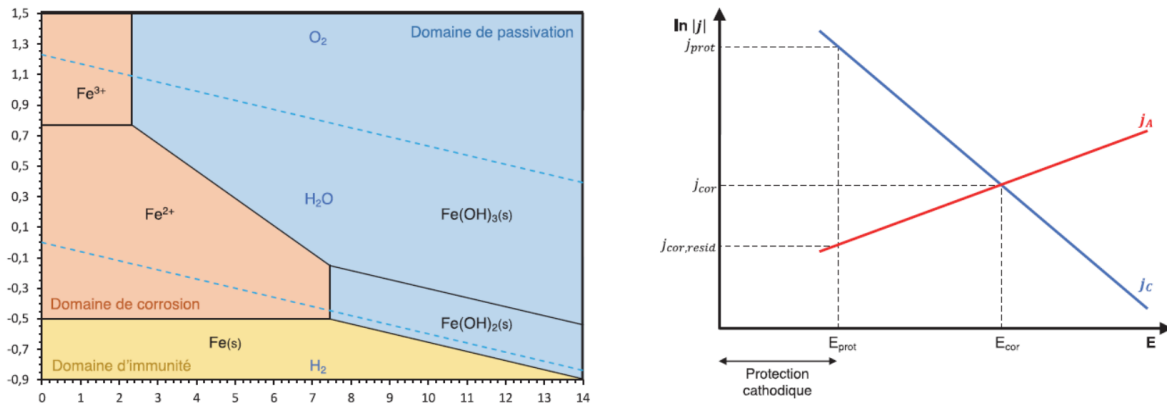


Figure 15. A gauche : Diagramme de Pourbaix du système Fe-H₂O – A droite : Diagramme d'Evans schématisant le principe de la protection cathodique : j_A et j_c représentent les densités de courant anodique et cathodique du métal dans le milieu considéré [30]

1.3.3 Types de protection cathodique

Sur la base de la polarisation utilisée pour protéger la structure, les systèmes de protection cathodique CP peuvent se diviser en systèmes à anode sacrificielle et à courant imposé (ICS) [29].

1.3.3.1 Protection par anodes sacrificielles

Dans ce système, la protection contre la corrosion est réalisée en couplant un métal moins noble dans un milieu électrolytique conducteur (sol ou eau) comme il est illustré dans la figure 16 [31].

Le métal à protéger c'est le métal le plus noble dans ce couple galvanique. Il est polarisé cathodiquement, tandis que l'anode sacrificielle est le métal le moins noble est dissous de manière anodique. La structure se polarise négativement jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau de potentiel suffisant et uniforme qui assure l'immunité de la surface contre l'activité de corrosion. Les anodes sacrificielles servent de source d'énergie électrique.

L'anode progressivement consommée selon un principe électrochimique défini par la loi de Faraday qui énonce que la masse consommée d'une matière impliquée dans la réaction d'oxydoréduction est directement proportionnelle à la quantité de courant délivré. Ainsi, le taux de consommation de l'anode dépend de la quantité du courant émis par l'anode, de la taille de l'anode, de sa composition chimique ainsi que de la structure à protéger et de l'environnement [31]. La loi de Faraday est exprimée par la formule suivante :

$$P = \left(\frac{M}{nF}\right) \times (I_{corr} \times t) \quad (Eq. 1)$$

Où :

P : masse de métal dissous ;

M : masse molaire du matériau anodique ;

n : nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction anodique ;

F : le nombre de Faraday ;

I_{corr} : intensité du courant de corrosion de l'anode ;

t : temps de consommation de l'anode.

Des anodes de haute pureté (zinc, aluminium ou magnésium) sont nécessaires pour éviter une polarisation significative de l'anode et l'accumulation de produits de réaction isolants.

Les anodes sacrificielles ne nécessitent pas de sources d'alimentation extérieures ; au contraire, ils fournissent leur propre alimentation et nécessitent un entretien minimum.

Les revêtements sacrificiels sont recommandés avec des structures bien enduites avec un minimum de chances d'être endommagé pendant la vie utile du métal.

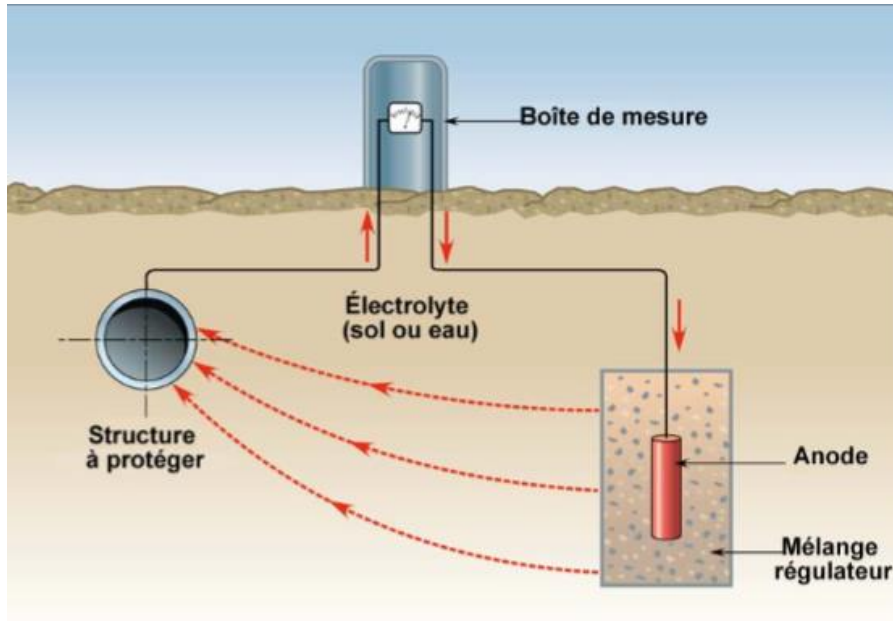


Figure 16. Protection d'une canalisation souterraine avec une anode [19].

a) EXIGENCES POUR UNE BONNE ANODE SACRIFICIELLE

Afin d'avoir une protection cathodique fiable, certaines exigences doivent être respectées :

- Le potentiel entre l'anode et la structure corrosive doit surmonter la formation de cellules anode-cathode.
- Lors de la consommation de courant, l'anode ne doit pas être polarisée dans une large mesure.
- L'anode doit avoir un rendement anodique élevé, c'est-à-dire que le courant produit par la dissolution du métal doit être facilement disponible.

Le magnésium et le zinc sont les anodes galvaniques les plus utilisées pour la protection cathodique des pipelines [32]. La différence de potentiel de corrosion du magnésium par rapport à l'acier est de 1V, ce qui limite la longueur de la canalisation pouvant être protégée par une anode.

Des considérations économiques ont conduit à utiliser l'aluminium et ses alliages comme anodes. Cependant, l'aluminium se passive facilement, ce qui diminue le courant de sortie. Pour éviter la passivation, l'aluminium est allié à de l'étain, de l'indium, du mercure ou du gallium. Les propriétés électrochimiques de ces alliages, telles que la production théorique et réelle, le taux de consommation, l'efficacité et le potentiel de circuit ouvert (corrosion), sont indiquées dans le tableau 2.

Tableau 2
Caractéristiques de l'anode galvanique [1]

Matériau	Energie Massique théorique (Ah/kg)	Energie massique pratique (Ah/kg)	Efficacité	Consommation	
				Taux (kg/An)	Potentiel de CSE*
Zinc type I	860	781	90%	11	1.06
Zinc type II	816	73	90%	12	1.10
Alliage Magnésium H-1	2205	551-1279	25-58%	6.8-16	1.40-1.60
Magnésium à haut potentiel	2205	992-1191	45-54%	7.3-8.6	1.70-1.80
Al/Zn/Hg	2977	2822	95	3.1	1.06
Al/Zn/In	2977	2591	87%	3.3	1.11

*Cu/CuSO₄ électrode de référence.

b) AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES ANODES SACRIFICIELLES

Le tableau 3 nous donne les avantages et les inconvénients de la méthode de protection cathodique par anodes sacrificielles.

Tableau 3

Avantages et inconvénients des anodes sacrificielles

Avantages	Inconvénients
Ne nécessite pas de grandes dépenses techniques	Le changement périodique d'anode est essentiel en raison de leur durée de vie limitée.
Une fois le système de protection installé, il fonctionne presque sans entretien et ne nécessite qu'une vérification occasionnelle du potentiel ou du courant de protection.	L'utilisation d'un grand nombre d'anodes sacrificielles dans des installations plus grandes.
Les systèmes de protection galvanique n'ont pas besoin d'alimentation électrique en courant alternatif et ne provoquent aucune interférence dommageable sur les objets voisins en raison de la faible tension d'entraînement.	Dans les milieux ou sols peu conducteurs, la faible tension d'alimentation peut limiter l'utilisation d'anodes galvaniques. L'augmentation du courant délivré, qui devient nécessaire en service, n'est pratiquement possible qu'à l'aide d'une tension externe supplémentaire.

1.3.3.2 Protection par courant imposé

Dans certaines situations de protection, notamment pour les structures plus grandes et ayant un problème d'isolation, ou aussi en présence de certaines conditions environnementales, les anodes sacrificielles ne peuvent pas économiquement délivrer suffisamment de courant pour fournir une protection complète. Les systèmes de la protection par courant imposé (ICCP) utilisent des anodes connectées à une source d'alimentation (CC), souvent un redresseur d'un système local de courant alternatif (CA).

Le courant appliqué est dans une direction opposée à celle des courants électrolytiques naturels sortants et peut être régulé comme on le souhaite, d'où ce nom de courant imposé (figure 17).

En l'absence d'une source d'alimentation (AC), d'autres types d'alimentation peuvent être utilisés, tels que des panneaux solaires, l'énergie éolienne ou des générateurs thermoélectriques alimentés au gaz.

Les anodes pour les systèmes ICCP sont disponibles dans une variété de formes et de tailles. Les anodes courantes sont en forme de tige tubulaire et solide ou sont des rubans continus de divers matériaux. Ceux-ci comprennent des fils à haute teneur en silicium, en fonte, en graphite, en oxyde métallique mixte, en platine et en niobium, et d'autres matériaux.

Les redresseurs sont souvent fabriqués sur mesure et équipés d'une variété de fonctionnalités, y compris le refroidissement de l'huile, le réglage automatique de la sortie, divers types de boîtiers électriques, la surveillance à distance, le réglage de la sortie à distance, une prise électrique CA, un réglage d'entrée CA sélectionnable et un courant alternatif triphasé. La borne négative de la sortie du redresseur est connectée à la structure à protéger par le système CP. Le câble positif CC de sortie du redresseur est connecté aux anodes auxiliaires. Les câbles d'alimentation CA sont connectés aux bornes du câble CA d'entrée du redresseur.

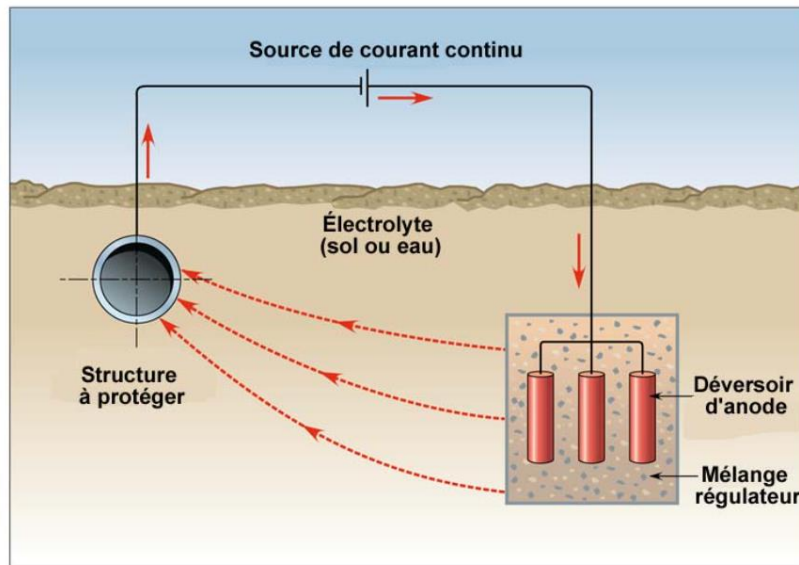


Figure 17. Système de protection par courant imposé[19]

a) AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA PROTECTION PAR COURANT IMPOSÉ

Le tableau 4 nous donne les avantages et les inconvénients de la méthode de protection cathodique par courant imposé.

Tableau 4

Avantages et inconvénients de la protection cathodique

Avantages	Inconvénients
Non destructive pour le système de protection	Peut fragiliser et dégrader la peinture de la structure à protéger par phénomène de délamination cathodique.
Pas changement ou modification durant sa vie opérative, sauf en cas de grave détérioration.	Relativement compliqué : cher à mettre en œuvre ; dans certains cas, le matériel implique un poids non négligeable.
Commande adaptative en raison qu'en boucle fermée avec une consigne de potentiel pour la structure à protéger c'est-à-dire au potentiel d'immunité ainsi que le courant délivré est dépendu du taux de dommages de la structure à protéger.	Délivre de fortes densités de courant, capables de décoller le revêtement proche de l'anode. Il est donc nécessaire de rajouter des écrans diélectriques.

b) FACTEURS AFFECTANT LA PROTECTION CATHODIQUE

Les différents facteurs de types mécaniques, physiques et environnementaux qui peuvent affecter l'efficacité d'un système de protection cathodique appliquée sur une conduite donnée sont [33] :

- Insuffisance de continuité électrique ;
- Perte d'adhérence des revêtements sur la conduite à protéger ;
- Influence des structures adjacentes ;
- Influence des courants vagabonds (courant continu et courant alternatif).

CHAPITRE 2

REACTIONS ELECTROCHIMIQUES ET CORROSION

EN MILIEU MARIN

2.1 INTRODUCTION

Les plates-formes marines, y compris les navires, les structures offshore et les ponts en acier exposés à l'environnement de l'eau de mer sont plus à risque de corrosion, en particulier après de nombreuses années de service (au-delà de 15 à 20 ans) [2]. Étant donné que la corrosion peut entraîner une dégradation des matériaux de structure, faciliter les fissures de fatigue, les ruptures fragiles et les ruptures instables.

En raison des préoccupations croissantes au sujet de la sécurité en mer, les organismes de réglementation participent de plus en plus directement à la conception, à l'exploitation et à l'entretien des structures maritimes [34]. Les sociétés de classification, qui agissent en tant que tierces parties privées et sont dirigées par l'Association internationale des sociétés de classification (IACS), établissent des règles de classification et effectuent des inspections périodiques pour garantir qu'un navire est bien entretenu. En outre, l'Organisation maritime internationale (OMI) joue un rôle important dans le but d'améliorer l'efficacité de l'amélioration de la sécurité au niveau international.

Ce chapitre met l'accent sur la corrosion dans le milieu marin, en présentant les caractéristiques de ce milieu, les exigences et les réglementations imposées par les associations internationales ainsi que les méthodes conventionnelles de contrôle contre ce phénomène.

2.2 CARACTERISTIQUES ET COMPOSITION DE L'EAU DE MER

L'eau de mer un environnement riche en ressources, propice au développement biologique, ainsi que favorable aux phénomènes de corrosion en raison de la présence de l'oxygène dissous et de sels minéraux. L'eau de mer représentant plus de 70 % de la surface du globe [35], il est constitué de 96,5% d'eau pure H₂O et de 3,5% d'autres substances telles que sels, gaz dissous, substances organiques et particules solides [36].

Le tableau 5 résume la concentration des principales substances dissoutes présentes dans l'eau de mer de salinité égale à 35 ‰ [8] . Ces substances représentent 99,85 % des sels dissous [7].

Tableau 5

Concentration des principaux constituants de l'eau de mer [7]

Ion	Concentration (g/kg)
<i>Cl</i> ⁻	19.354
<i>Na</i> ⁺	10.77
<i>SO</i> ₄ ²⁻	2.712
<i>Mg</i> ²⁺	1.290
<i>Ca</i> ²⁺	0.412
<i>K</i> ⁺	0.399
<i>HCO</i> ₃ ⁻	0.140
<i>Br</i> ⁻	0.067
<i>Sr</i> ²⁺	0.008
<i>B(OH)</i> ₃	0.0257
<i>F</i> ⁻	0.0013

2.2.1 Propriétés physico-chimiques

2.2.1.1 La salinité

La salinité est la concentration d'une eau en sels dissous au travers de sa conductivité électrique. La salinité moyenne de l'océan est de 35 ppt (Figure 18).

La résistivité de l'eau de mer est environ $20 \Omega \text{ cm}$. Les couplages galvaniques vont donc être particulièrement actifs, et sur des distances plus grandes [7].

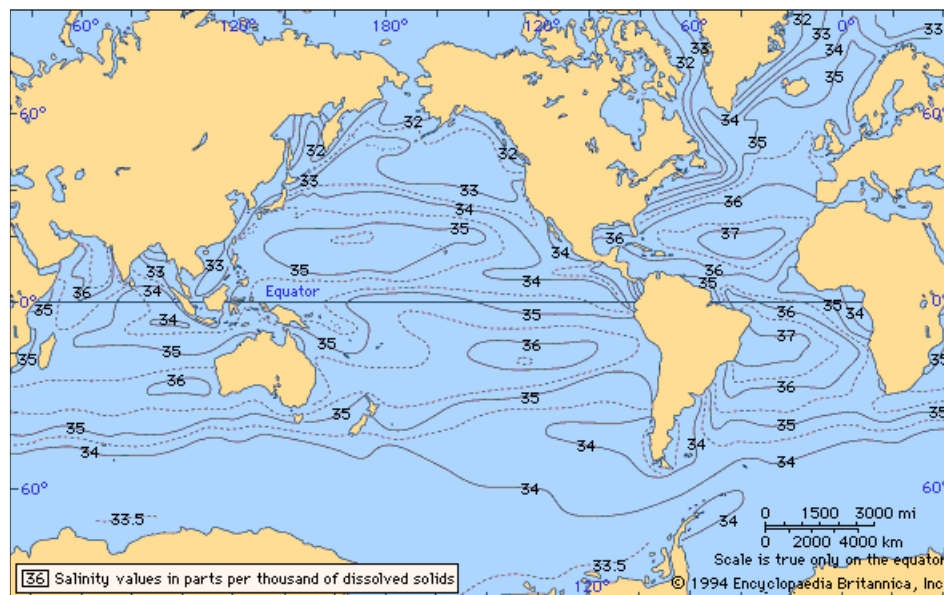


Figure 18. Répartition géographique de la salinité des océans [37]

2.2.1.2 pH

Le pH est l'un des paramètres les plus importants dans les processus de corrosion. La valeur de pH de l'eau de mer est généralement comprise entre 7,5 et 8,5 et varie en fonction de la température [30] et la concentration en oxygène dissous [38]. Par exemple, dans une zone cathodique, l'élévation locale du pH à proximité de l'acier peuvent entrainer la formation des carbonates de calcium à la surface de l'acier et le développement de cette substance pourrait alors modifier l'environnement de surface du métal et affecter sur certains processus électrochimiques.

La variation de la concentration d'oxygène dissous est un paramètre fondamental dans les processus de corrosion en milieu marin. Il dépend principalement de l'échange entre l'eau de mer et l'atmosphère : plus on s'éloigne de la surface de la mer, plus la concentration d'oxygène sera faible (figure 19).

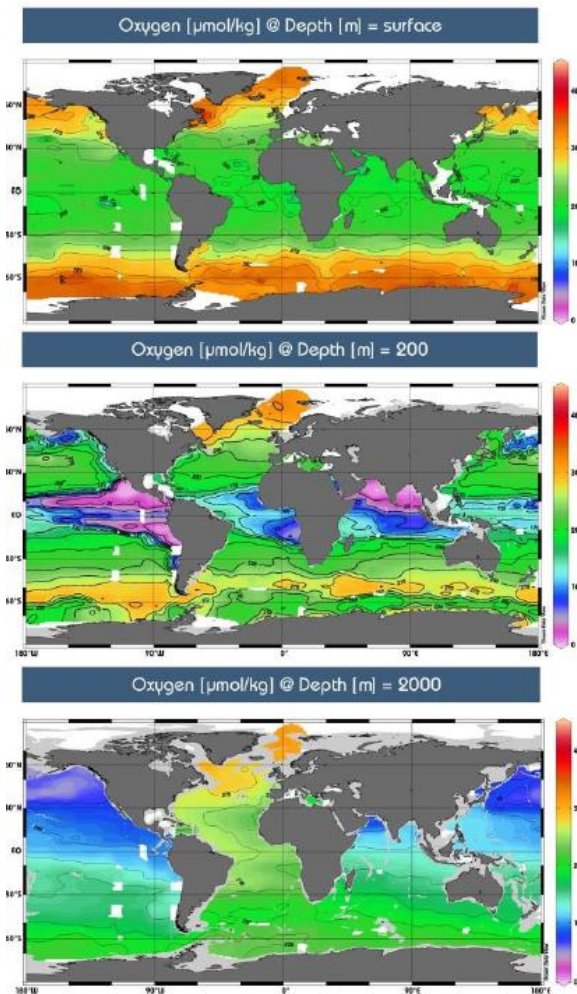


Figure 19. Évolution de la concentration en dioxygène dissous en $\mu\text{mol/kg}$ en surface, à 200 m de profondeur et à 2000 m de profondeur. Les zones en rouge montrent la présence de forte teneur en oxygène et en bleu les faibles teneurs (données eWOCE) [39].

2.2.1.3 Température

La température de l'eau de mer est un paramètre qui influe sur ses propriétés et sa composition [4]. Par exemple, la concentration en dioxygène dissous diminue avec l'augmentation de la température. Elle est de 3.17×10^{-9} mol/L à 5°C et diminue à 2.11×10^{-9} mol/L à 25°C [39].

La température des eaux de surface des océans varie avec la latitude, allant d'approximativement -2°C dans les pôles à 35°C directement à l'équateur [40]. De plus, la température de l'eau de mer est bien entendu liée aux échanges thermiques avec l'atmosphère. La température des eaux de surface subit, au cours des saisons. Les changements de température ont un effet sur presque tous les autres paramètres, qu'il s'agisse de la concentration de gaz dissous, de l'activité biologique ou de l'équilibre chimique. Dans la figure 20, la solubilité de CO₂ varie avec la variation de température dans l'eau pure [39, 41]. Le CO₂ est essentiel dans la formation du CaCO₃ alors le dépôt calcomagnésien favorise la composition de brucite lorsque la température augmente [39].

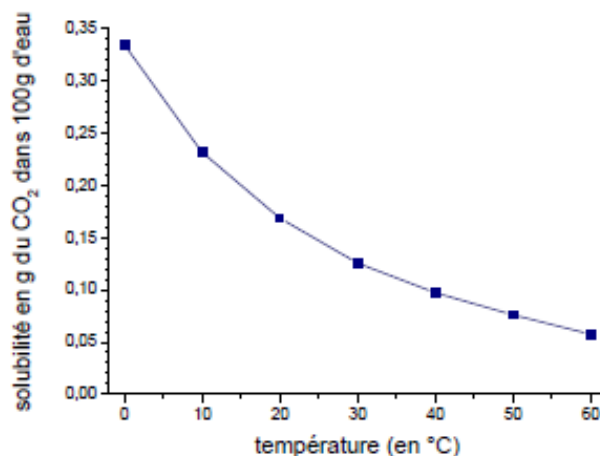


Figure 20. Solubilité du CO₂ dans l'eau pure en fonction de la température [41].

2.2.1.4 Pression hydrostatique

La pression hydrostatique est l'un des paramètres qui affecte sur la corrosion des structures métalliques placées en profondeur.

L'augmentation de la pression statique influe essentiellement la concentration en dioxygène dissous et la température [42]. Les équilibres chimiques sont ainsi changés : le pH baisse aux grandes profondeurs et la solubilité de la calcite CaCO_3 augmente. L'augmentation de la pression modifie aussi les cinétiques électrochimiques, en entraînant une modification des films passifs, des coefficients de diffusion et du degré d'hydratation des ions.

2.2.2 Les zones de corrosion

L'exposition à l'environnement marin hostile est un défi majeur pour les métaux [39]. Les milieux marins englobent plusieurs zones d'exposition d'une agressivité différente. Le comportement de corrosion des structures marines dans ces zones nécessite des considérations distinctes. Comme il est montré dans la figure 21 le profil de corrosion varie d'une zone à une autre.

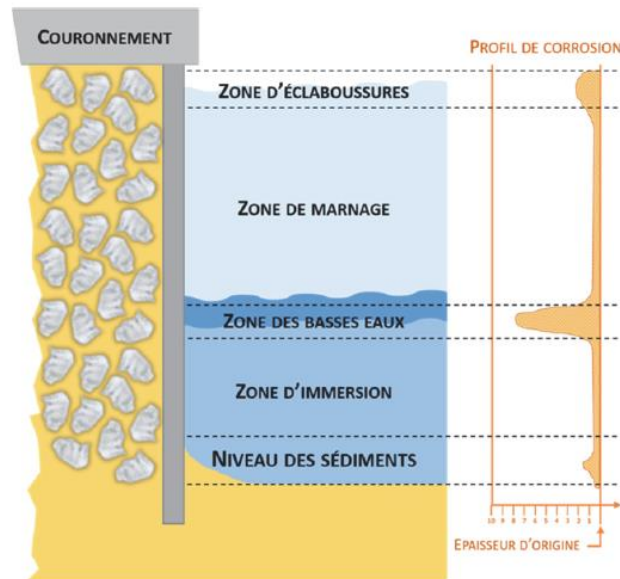


Figure 21. Profil de vitesse de corrosion en fonction des différentes zones d'exposition en milieu marin [30]

Le taux de corrosion moyen de l'acier dans l'eau de mer est de l'ordre de 0,1 mm/an[43]. Durant les premiers mois d'immersion, le profil de corrosion évolue rapidement avant de ralentir progressivement (figure 22). Ce phénomène peut s'expliquer par la formation d'un film de rouille accroché au contact du métal, ce qui ralentit la migration de l'oxygène vers l'acier en s'épaississant et ainsi ralentissant ainsi la vitesse de corrosion.

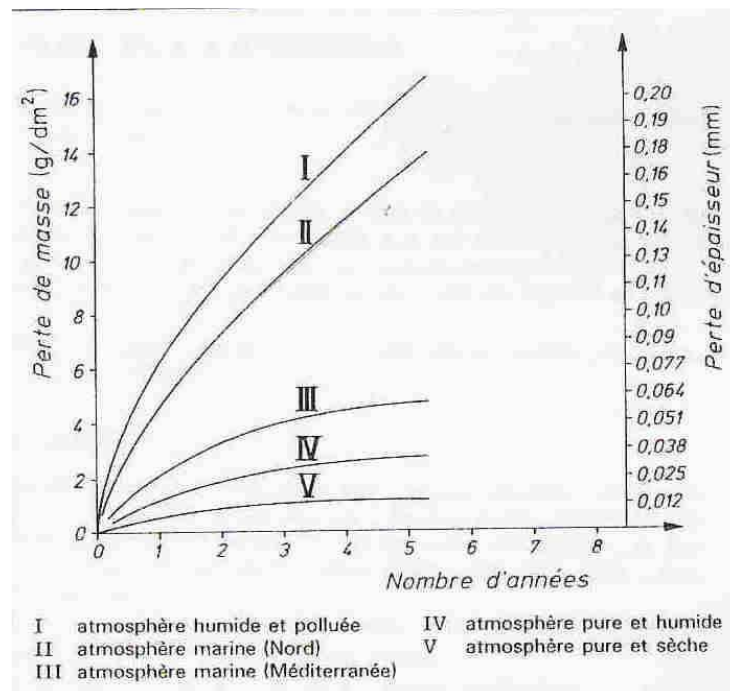


Figure 22. Profil de vitesse de corrosion d'acier selon type d'atmosphères [43]

Selon les zones d'exposition, l'environnement et les conditions de contact, le mécanisme de la corrosion peut être de différents types et présenter des aspects de dégradations.

2.2.2.1 Zone atmosphérique : Corrosion généralisée

Cette zone est connue pour la manifestation de la corrosion généralisée, une couche d'oxyde se produit sur toute la surface de métal due à l'existence simultanée de la zone anodique (le métal) et la zone cathodique (l'hydrogène H₂).

2.2.2.2 Zone d'éclaboussures : Corrosion localisée & Corrosion généralisée

Cette zone est influencée par les vagues, la lumière du soleil, les salissures biologiques et les objets flottants, par exemple, la glace de mer dans la mer Baltique. Ce dernier possède un taux de corrosion très élevé: les taux calculés de corrosion uniforme de l'acier se situent entre 0,08 et 0,14 mm a⁻¹ et 0,07 à 0,21 mm a⁻¹ [44], ainsi que la manifestation de la corrosion localisée qui s'explique par un ensemble de facteurs défavorables [45, 46]:

- La présence d'un film d'électrolyte où l'humidité toujours supérieure à 95 %;
- Changements élevés de concentration de chlorure, de l'humidité, de température, et des changements de pH pendant les cycles humide et sec, ce qui affectera l'expansion de la rouille;
- Création de pile entre l'oxyde (cathode) et l'acier (anode).

2.2.2.3 Zone des plus basses eaux : Corrosion par aération différentielle

C'est la zone qui est située juste en dessous du niveau correspondant à la moyenne du niveau d'eau le plus bas. La zone de marnage constitue la cathode puisqu'elle est riche d'oxygène, tandis que la structure métallique immergée constitue l'anode. La concentration de l'oxygène dans l'eau dans la couche supérieure est plus importante que dans la couche profonde, ce qui forme une pile d'aération différentielle [45].

2.2.2.4 Zone sédimentaire : Corrosion bactérienne

En règle générale, la zone sédimentaire est la partie en contact avec le remblai où les faces internes des pieux. La zone sédimentaire est très peu aérée, elle est favorable au développement de nombreuses bactéries aérobies, et notamment les bactéries sulfurogènes, qui jouent un rôle important dans les processus de dégradation du métal [30].

2.3 CORROSION EN MILIEU MARIN

La corrosion de l'acier dans l'eau de mer, dont les propriétés ont été décrites ci-dessus, peut être adéquatement représentée par l'équation (5), bien que le processus se déroule normalement à la précipitation de l'hydroxyde ferrique.



Sur l'acier propre dans l'eau de mer, la réaction anodique se produit plus facilement que la réaction cathodique.

Par conséquent, la réaction de corrosion est généralement contrôlée par le taux d'oxygène atteignant la surface du métal. Ce dernier est contrôlé par le débit d'eau linéaire et la concentration d'oxygène dissous dans l'eau de mer. Cela peut être représenté sur un diagramme de polarisation figure 23.

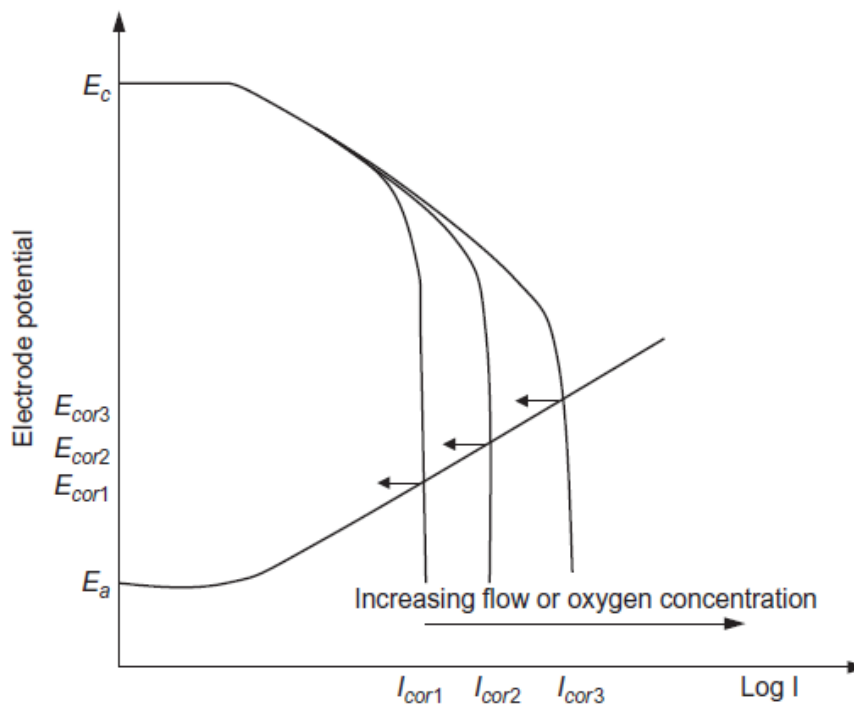


Figure 23. Diagramme de polarisation avec une concentration en oxygène croissante [47]

Le taux de corrosion de l'acier entièrement immergé est assez rapide au cours des premières années d'exposition, mais diminue progressivement avec le temps. Une valeur de 0,13 mm/an peut être considérée comme raisonnablement représentative dans n'importe quelle partie du monde. Toutefois, on observe que les puits peuvent croître de 3 à 10 fois ce taux [48].

Pour les navires, dont la coque est en acier/alliage recouvert de peinture, le phénomène est différent. Avec le temps les propriétés de cette peinture peuvent diminuer ou dégrader mécaniquement. Par conséquent, la coque de navire peut avoir des parties en acier exposées, mal ou non protégées et susceptibles d'être naturellement corrodées par l'eau de mer.

De plus, les parties immergées d'une coque de navire ne sont pas toutes en acier. Il existe aussi en matériaux plus nobles comme les hélices de propulsion et des propulseurs d'étraves qui sont en alliage NAB (Nickel Aluminium Bronze), Cupro Alu (Cuivre et Aluminium) ou Cupro Nickel (Cuivre et nickel) [42]. Une pile de corrosion s'active et des courants de corrosion se produisent entre les parties en acier (anodes) vers les parties en matériaux plus nobles (cathodes) comme il est montré dans la figure 24.

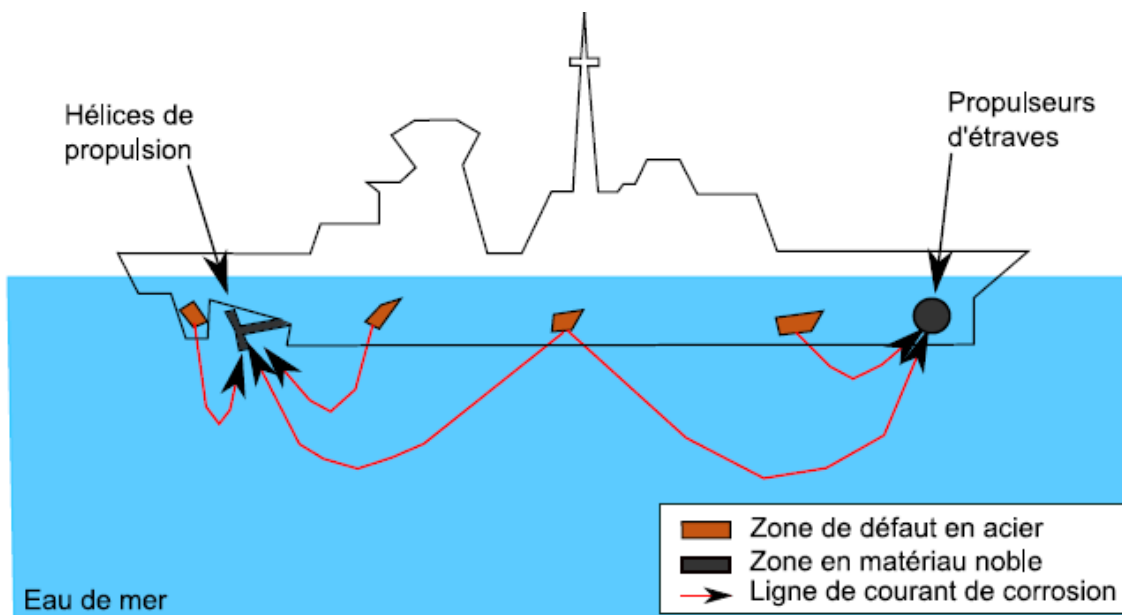


Figure 24. Lignes de courant issues de la corrosion naturelle [42]

2.4 LES EXIGENCES DANS LES INDUSTRIES MARINES

2.4.1 L'Association Internationale des Sociétés de Classification (IACS)

Des sociétés de classification ont été créées pour agir à titre de tierces parties neutres et mener des enquêtes sur les navires à l'appui des assureurs [49]. Les sociétés de classification établissent des normes, habituellement appelées règles de classification, réglementant la conception et l'entretien des navires et effectuent des relevés périodiques pour mettre en œuvre ces normes.

En plus des règles de classification, les administrations gouvernementales codifient les normes de sécurité des navires sur la base de conventions internationales ou de lois adoptées de leur propre autorité.

L'International Society of Classification Societies (IACS) a été créée par 10 grandes sociétés le 11 septembre 1968. Avec 90% du tonnage de fret mondial couvert par les règles des membres de l'IACS, l'IACS joue un rôle vital dans l'amélioration des normes de l'industrie maritime. La valeur de leurs niveaux combinés et uniques de connaissances et d'expérience a été largement reconnue. En 1969, l'IACS a obtenu le statut consultatif auprès de l'OMI [50] et le premier représentant permanent a été nommé en 1976.

Le but principal de l'IACS est d'effectuer des inspections et des levés des navires pour vérifier qu'ils sont maintenus conformément aux règles et aux normes des sociétés de classification. Ces inspections et ces inspections sont effectuées à intervalles périodiques pour assurer le respect des règles respectives.

2.4.2 Organisation Maritime Internationale (OMI)

L'Organisation maritime internationale a été créée par les Nations Unies en 1948 en tant que premier organisme international consacré exclusivement aux questions maritimes [50]. L'organisation a les objectifs ci-dessous :

- Fournir un mécanisme de coopération entre les gouvernements dans le domaine de la réglementation et des pratiques gouvernementales relatives aux questions techniques de toutes sortes touchant la navigation maritime engagée dans le commerce international;
- Encourager et faciliter l'adoption générale des normes les plus strictes en matière de sécurité maritime, d'efficacité de la navigation et de prévention et de contrôle de la pollution marine par les navires.

L'OMI est l'organisme spécialisé des Nations Unies chargé d'améliorer la sécurité maritime et de prévenir la pollution par les navires. L'OMI est une organisation technique et la plupart de ses travaux sont exécutés par un certain nombre de comités et de sous-comités. L'OMI a encouragé l'adoption d'une quarantaine de conventions et de protocoles, en plus d'adopter plus de 800 codes et recommandations concernant la sécurité maritime, la prévention de la pollution et les questions connexes. Les règlements les plus importants de l'OMI sont la Convention internationale sur les lignes de charge (1966); les amendements de 1971, 1975, 1979, 1983, 1995 et 2003; la Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (1973) telle que modifiée par le Protocole de 1978 (souvent appelé MARPOL 73/78); la Convention internationale pour la sauvegarde de la vie humaine en mer (1974) (souvent appelée SOLAS).

2.5 CONTROLE DE LA CORROSION

Les plates-formes marines, y compris les navires, les structures d'offshores et les ponts en acier exposés à l'environnement marin sont plus à risque de corrosion, en particulier après de nombreuses années de service (au-delà de 15 à 20 ans). Des incidents tels que l'Erika en 1999 [51] et le Castor en 2000 [52] ont mis en évidence le problème de la corrosion des navires.

Comme la corrosion résulte d'une réaction entre un métal et son environnement [8], le contrôle de la corrosion est essentielle afin de prolonger la durée de vie utile et d'assurer l'intégrité de la structure [6].

Le milieu marin est très agressif donc il ne s'agit pas seulement de choisir des matériaux résistants ou des revêtements très durables, il s'agit d'assembler tous les éléments pour réduire la corrosion à un niveau acceptable et économique.

En outre, il existe plusieurs façons de protéger les structures marines contre les dommages causés par la corrosion :

- Choix des matériaux;
- Prise en compte de la corrosion dans la conception et la maintenance;
- Utilisation de revêtements;
- Protection cathodique;
- Contrôle ou traitement de l'environnement.

L'Organisation maritime internationale (OMI) a pris diverses mesures pour lutter contre la détérioration liée à l'âge, comme il est indiqué ci-dessous [6]:

- Les règles de conception des navires ont été grandement modernisées et rationalisées;
- La corrosion et la fatigue ont été directement prises en compte dans les conceptions;
- Le revêtement doit maintenant être appliqué, inspecté et entretenu.

2.5.1 Choix des matériaux

Chaque métal et alliage a un comportement de corrosion unique et inhérent qui peut aller de la résistance élevée des métaux nobles, par exemple, l'or et le platine, à la faible résistance à la corrosion des métaux actifs, par exemple, le sodium et le magnésium (Figure 25). De plus, la résistance à la corrosion d'un métal dépend fortement des conditions de l'environnement, tels que la composition chimique, la température, la vitesse, etc. [47, 53].

La relation générale entre le taux de corrosion, la corrosivité de l'environnement est la suivante [54]:

$$\frac{\textit{Corrosivité de l'environnement}}{\textit{Résistance à la corrosion d'un matériau}} \approx \textit{taux d'attaque corrosive}$$

Afin d'obtenir un taux de corrosion acceptable et fixe, la résistance à la corrosion du matériel et la corrosivité de l'environnement doivent être égales ou inférieure au taux de corrosion spécifié. Il existe plusieurs matériaux concurrents qui peuvent répondre aux exigences de corrosion. Le processus de sélection des matériaux devient l'un des processus permettant de déterminer quels des matériaux candidats fournit la solution la plus économique pour un service particulier. Dans le processus de sélection, la prise en compte de la résistance à la corrosion est généralement aussi importante que les propriétés mécaniques de l'alliage.

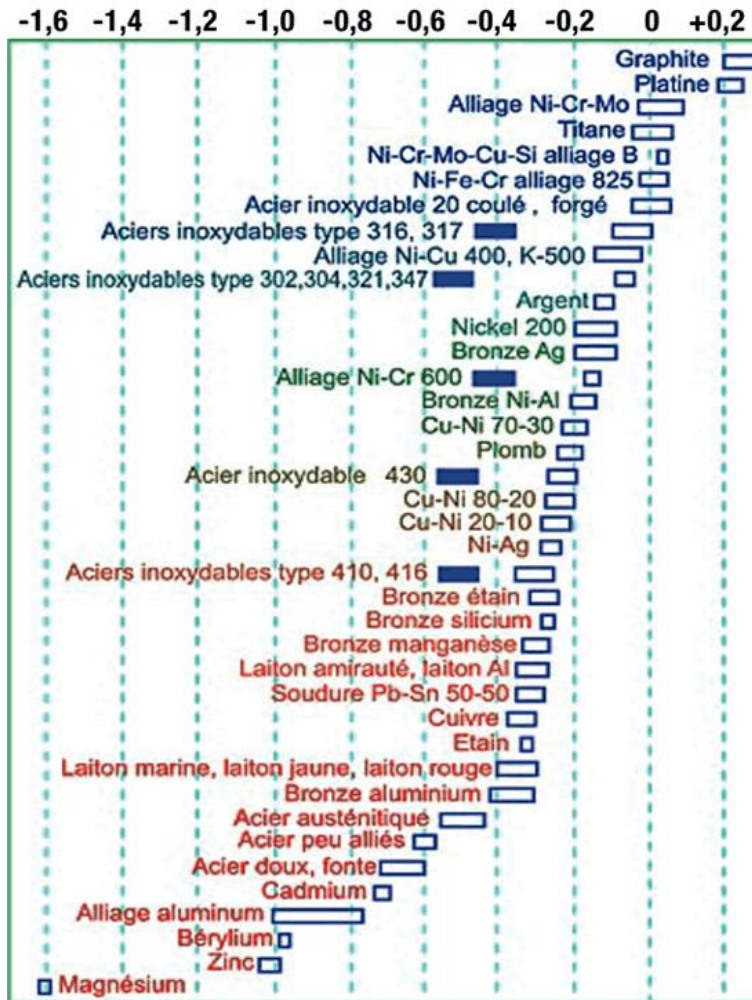


Figure 25. Série galvanique du graphite et de divers métaux et alliages dans l'eau de mer (vitesse de l'eau 2.4 à 4 m/s, durée d'immersion : 5 à 15 jours, température : 5 à 30 °). © ASTM G82

2.5.2 Prise en compte de la corrosion dans la conception et la maintenance

La corrosion se produit généralement dans des espaces morts et des crevasses où le milieu corrosif devient de plus en plus corrosif. Ces zones peuvent être éliminées ou minimisées dans le processus de conception [54].

Ainsi, il est nécessaire de prendre en compte les normes de sécurité qui exigent que les structures maritimes soient conçues en prenant en considération le gaspillage causé par la corrosion. Cette tolérance de conception est appelée « Ajout de corrosion » (figures 26, 27 et 28). En général, une épaisseur supplémentaire est ajoutée à l'épaisseur nominale de la tôle qui est déterminée en fonction des charges prévues et des contraintes résultantes admissibles. Les additifs anticorrosion offrent une marge de sécurité pour éviter une augmentation excessive des contraintes de travail et permettent d'éviter les renouvellements fréquents inutiles de l'acier.

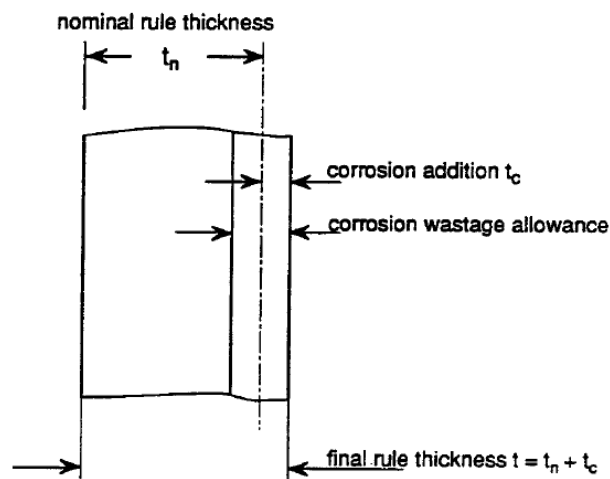


Figure 26. Schéma de l'ajout de corrosion et de la tolérance de perte de corrosion [55]

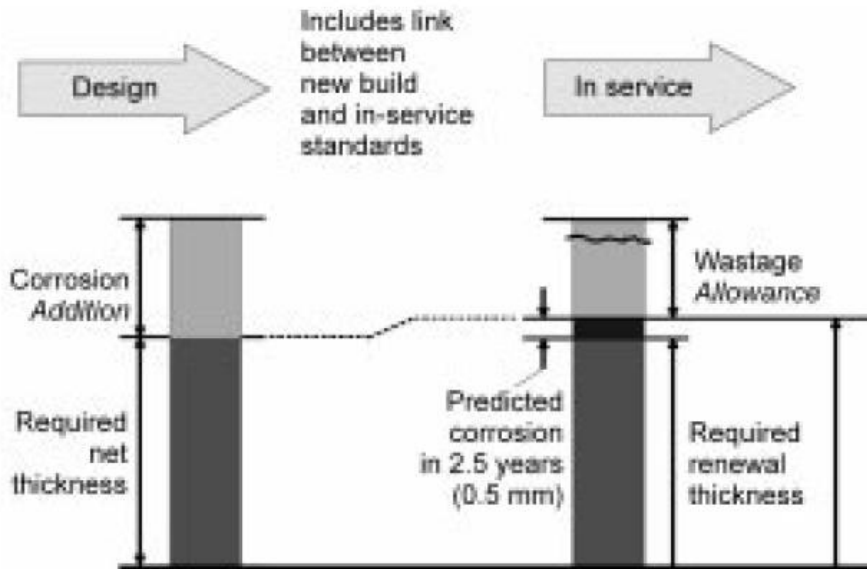


Figure 27. IACS CSR concept net d'échantillonnage pour les éléments de structure locaux [34]

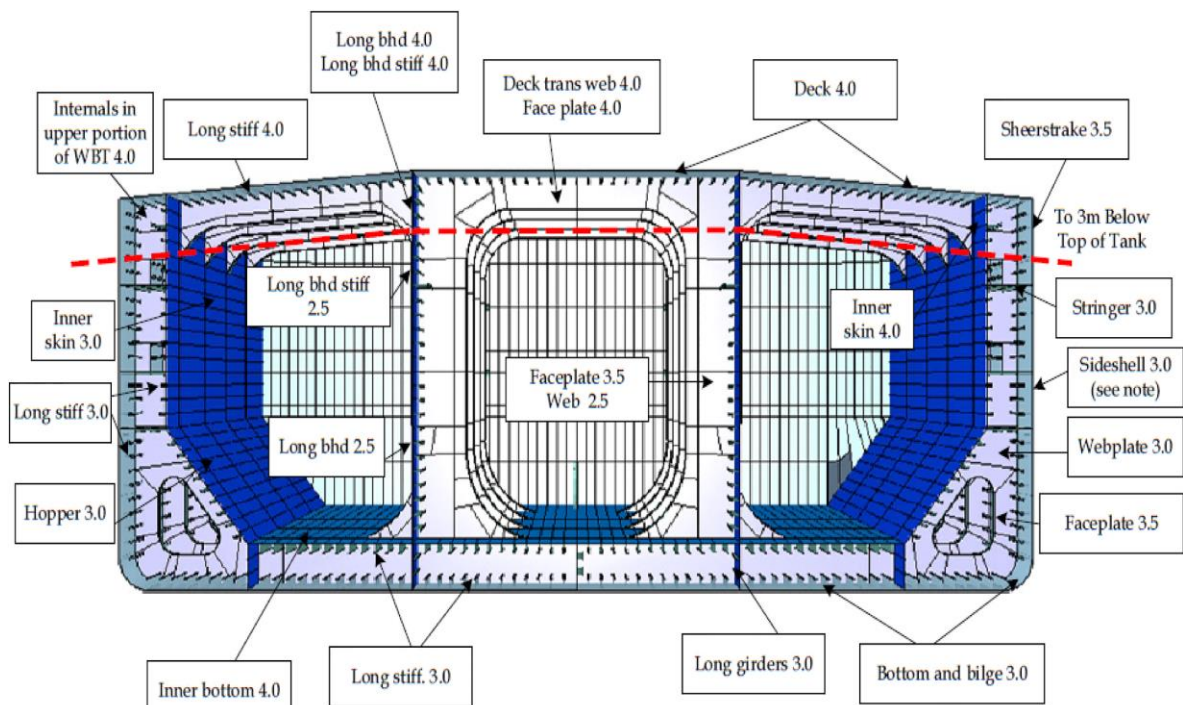


Figure 28. Surépaisseur de corrosion pour les composants structurels typiques des citernes à cargaison chauffées [3]

2.5.3 Utilisation de revêtement

La méthode de Revêtement est la plus utilisée pour combattre la corrosion afin de protéger des structures maritimes, que ce soient les conditions tels que à haute altitude, à la ligne d'éclaboussure, ou dans les zones immergées. Il fonctionne sur le principe d'isoler le métal à protéger des éléments réactifs structuraux provenant des matières corrosives environnementales [16].

La sélection des matériaux de revêtement et les processus d'application, y compris le traitement de surface et l'application et l'inspection du revêtement, doivent être bien affecter afin d'obtenir une meilleure durée de vie utile prévue du revêtement et réduire au minimum l'entretien et les réparations en service [56-59].

L'Organisation Maritime Internationale (OMI) joue un rôle important dans l'amélioration de l'efficacité et de la sécurité au niveau international [2]. L'OMI a établi les normes de revêtement (résolution MSC 215(82) de l'OMI et résolution MSC 288(87) de l'OMI), connue sous le nom de « Performance Standards for Protective Coatings » (IMO PSPC) de l'OMI [6], précisent les exigences relatives à la certification des matériaux de revêtement, à la traitement de surface, à l'application des revêtements, à l'inspection et le mesures ainsi que la création d'un dossier technique de revêtement pour documenter chaque étape du processus. Du point de vue de la corrosion, le revêtement est évalué en fonction de la résistance qu'il offre contre la corrosion dans un environnement spécifique, et parce qu'il existe de nombreuses variations dans la corrosivité de l'environnement, il existe également une grande variété de revêtements anticorrosion. Ceux-ci peuvent être largement divisés en revêtements inorganiques (métalliques) et organiques.

2.5.3.1 Protection par revêtement métallique

Les revêtements métalliques fournissent une couche d'un autre métal de potentiel électrochimique inférieur au métal qu'il doit protéger. Les revêtements fournissent une couche durable et résistante à la corrosion.

Le dépôt de revêtements métalliques, tels que le chrome, le nickel, le cuivre et le cadmium [16] est généralement obtenu par des procédés chimiques humides qui présentent des problèmes inhérents de contrôle de la pollution. D'autres méthodes de dépôt des métaux ont remplacé certains procédés humides et pourraient jouer un rôle plus important dans le revêtement des métaux à l'avenir.

Ce dépôt peut être réalisé :

- **Par Électrolyse** : C'est une applications galvanoplastie qui consiste à fournir un dépôt électrolytique d'une solution aqueuse de différents sels, par exemple le nickelage électrolytique ou le zingage électrolytique.
- **Par Immersion** : Dépôt basée sur l'immersion d'un substrat dans la solution de revêtement puis le laisser pendant un certain temps à l'intérieur de la solution (galvanisation dans le cas du zinc : la galvanisation est l'opération qui consiste à recouvrir le fer d'une couche de zinc en le plongeant dans un bain du métal fondu à 450° C. Il se forme un alliage Zn-Fe en surface [60]) (figure29).

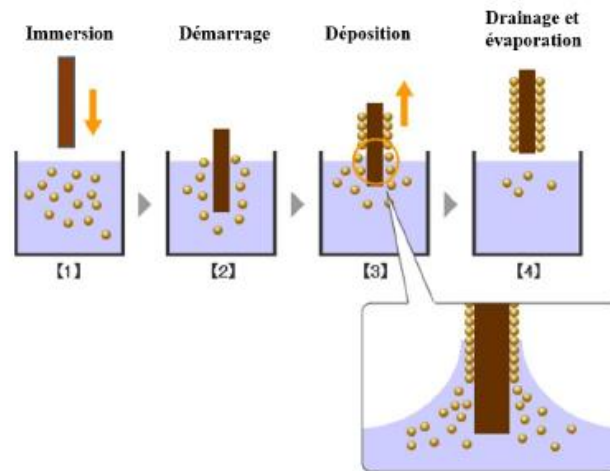


Figure 29. Différentes étapes du mécanisme de revêtement par immersion (dip-coating) [61]

- **Par pulvérisation** : Consiste à pulvériser du métal chaud sur une surface pour créer un revêtement (figure 30). Les techniques de pulvérisation thermique sont des procédés de revêtement dans lesquels des matériaux fondus (ou chauffés) sont pulvérisés sur une surface : comme les revêtements d'aluminium pulvérisés fournissent un film adhérent et un peu absorbant d'environ 100 à 150 μm d'épaisseur. Ils offrent une très bonne protection à l'acier et ils peuvent être scellés avec des laques ou des peintures organiques pour fournir une protection supplémentaire et retarder la formation de rouille de surface visible [16].

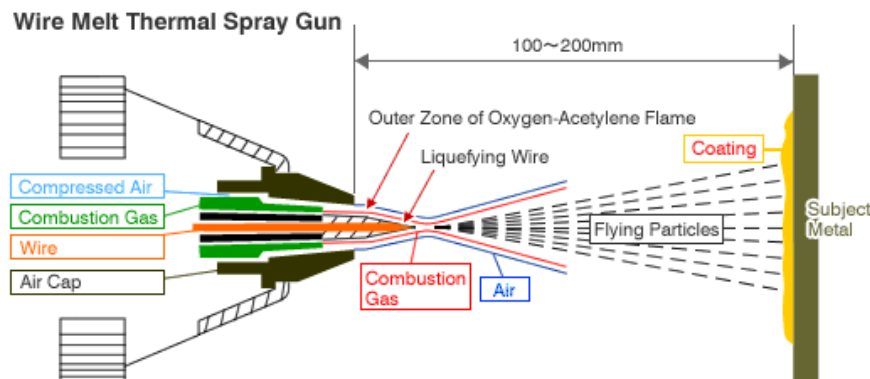


Figure 30. Pulvérisation thermique de métal [62]

2.5.3.2 Protection par revêtement organique

Les revêtements organiques sont des barrières de corrosion entre le métal sous-jacent et l'environnement corrosif. Ils maintiennent la durabilité des structures et offrent une résistance aux intempéries, à l'humidité, à l'abrasion, à la résistance chimique, à la ténacité et à l'aspect esthétique.

L'efficacité du revêtement organique dépend des propriétés mécaniques du système de revêtement, du type et de la concentration des inhibiteurs en suspension [63, 64], du prétraitement de la surface métallique [65], de l'adhérence du revêtement à la base métallique sous-jacente et d'autres additifs qui inhibent la corrosion du substrat.

Les revêtements organiques sont des mélanges complexes de substances chimiques qui peuvent être regroupés en quatre grandes catégories [66]: les liants, les composants volatiles, les pigments et les additifs.



Figure 31. Application de peinture par pulvérisation sans air sur le dessus des navires [58]

2.5.4 Contrôle ou traitement de l'environnement

La corrosion résulte d'une réaction entre un métal et son environnement. Dans les situations marines, la corrosion est généralement contrôlée par une forme d'isolation de l'alliage de l'environnement.

Cependant, l'environnement lui-même peut être contrôlé : les méthodes adoptées dépendront de la nature de l'environnement, en particulier selon la distinction atmosphérique ou aqueux. Le tableau 6 présente les facteurs qui favorisent la corrosion tout en situant les méthodes utilisées pour contrôler l'environnement, quel que soit l'environnement atmosphérique ou aqueuse afin de minimiser la corrosion.

Tableau 6
méthodes de contrôle de l'environnement [8]

	Environnement atmosphérique	Environnement aqueuse
Facteurs favorisent la corrosion	L'humidité Les contaminants comme la poussière, le dioxyde de soufre et les chlorures	L'oxygène
Critères de contrôle de l'environnement	L'humidité relative inférieur à 50 %	Elimination l'oxygène en rendant les solutions alcalines
Méthode (des exemples)	Chauffage les entrepôts Installation des appareils de climatisation Utilisation des inhibiteurs	Utilisation de carbonate de sodium Utilisation des inhibiteurs

Les inhibitions de la corrosion, selon ISO 8044 , sont des substances chimiques qui diminuent le taux de corrosion lorsqu'ils sont présents dans le système de corrosion en concentration suffisante, sans modifier de façon significative la concentration de tout agent corrosif [17].

Les inhibiteurs peuvent agir sur les réactions partielles cathodiques et anodiques et sont appelés en conséquence inhibiteurs cathodiques ou anodiques. Un inhibiteur cathodique déplace le potentiel de corrosion dans une direction négative, tandis que l'inhibiteur anodique provoque un changement positif ; dans les deux cas, le taux de corrosion diminue (figure 32).

Dans la pratique, l'efficacité de l'inhibition dépend de nombreux facteurs [8]:

- Concentration des inhibiteurs ;
- pH de la solution ;
- Oxygène dissous en solution ;
- État de la surface métallique ;
- Température ;
- Nature de la solution.

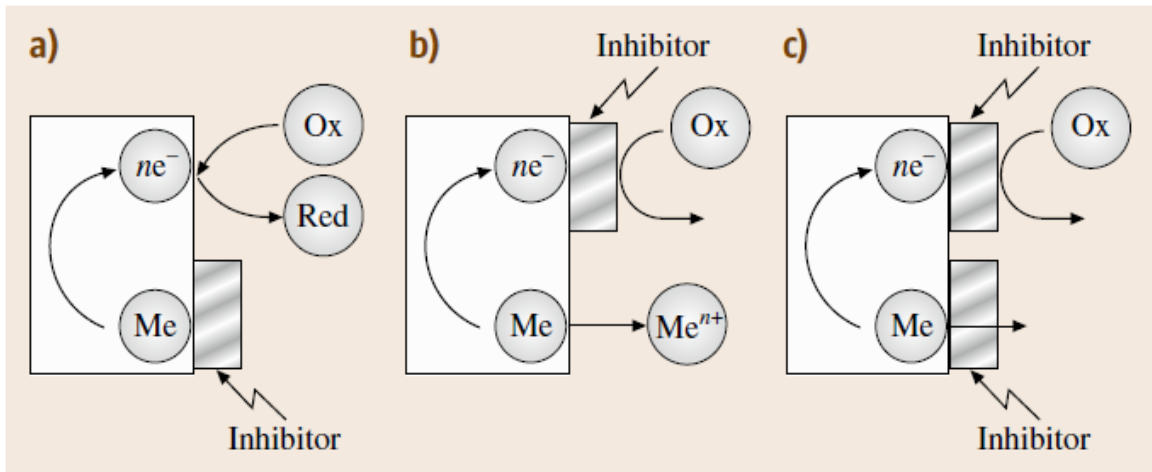


Figure 32. Représentation schématique de l'action de l'inhibiteur sur la surface du métal nu : (a) inhibition anodique, (b) inhibition cathodique, (c) inhibition anodique-cathodique [17]

2.5.5 Protection cathodique

Les structures en acier en milieu marin peuvent être protégées efficacement à l'aide de revêtements protecteurs. Cependant, les revêtements, même les nouveaux, ne sont pas parfaits et seront inévitablement endommagés ou détériorés pendant le fonctionnement. Pour préserver la résistance de la structure contre la corrosion, il est essentiel d'entretenir et de réparer les systèmes de revêtement protecteur, et la protection cathodique (PC) est une pratique courante pour protéger les parties immergées des surfaces en tant que méthode supplémentaire à la protection anticorrosion du revêtement. Le critère accepté pour la protection de l'acier dans l'eau de mer aérée est un potentiel de protection plus négatif que $-0,800$ V mesuré par rapport à l'électrode de référence (SSC) Ag/AgCl/eau de mer. Dans le cas de l'acier contenant des bactéries réductrices de sulfate actives (généralement en conditions anaérobies), le potentiel de protection devrait être de $-0,900$ V (SSC) au lieu de $-0,800$ V pour l'acier doux [58]. La protection cathodique est l'une des méthodes les plus fiables actuellement utilisées en milieu marin [42].

CP fonctionne en fournissant suffisamment de courant direct à la surface immergée de la structure pour abaisser le potentiel de l'acier dans l'électrolyte afin de supprimer les activités de corrosion de sorte que le taux de corrosion devient insignifiant (figure 33).

Le potentiel réversible peut être fourni en utilisant une anode sacrificielle telle que le zinc ou le magnésium, un système CP à courant imposé, ou les deux.

Dans les navires, les systèmes CP sont entretenus pour empêcher la corrosion des réservoirs internes, de la coque du navire, du coffre de mer, du gouvernail, de l'arbre et d'autres zones exposées du navire. Les anodes sacrificielles ne doivent pas être utilisées plus que nécessaire pour empêcher de manière adéquate la corrosion de la coque du navire pendant la durée de vie de la conception ou entre les amarrages. Les exploitants de navires doivent nettoyer et/ou remplacer ces anodes de manière appropriée pendant les périodes d'entretien (telles que la mise en cale sèche)[6].

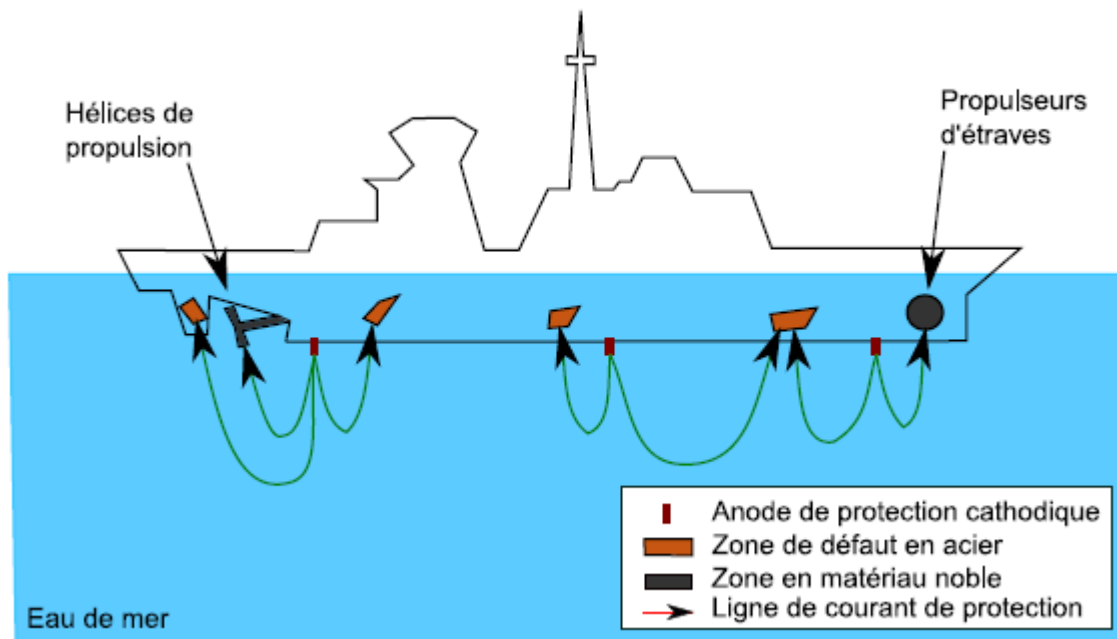


Figure 33. Lignes de courant résultant de la protection cathodique [42]

2.5.5.1 Anodes sacrificielles

Les surfaces métalliques de la coque du navire sont protégées cathodiquement en reliant la coque du navire à des anodes sacrificielles afin de rendre la surface métallique de la coque du navire inférieure à $-0,800\text{ V}$ (SSC) [58] comme il est illustré dans la figure 34.

Les choix de matériaux courants pour les anodes sacrificielles sont le zinc, l'aluminium et leurs alliages. Le zinc et l'aluminium produisent des potentiels plus négatifs que -1.000 V (SSC) [58].

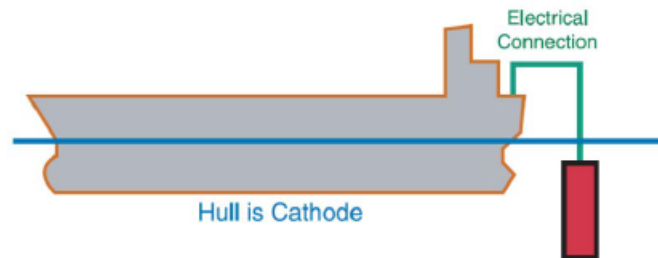


Figure 34. Schéma de protection cathodique sacrificielle [58]

2.5.5.2 Protection par courant imposé

Pour les coques extérieures des navires, il est efficace d'utiliser des systèmes de protection cathodique à courant imposé (ICCP) pour prévenir la perte de métal, comme montre la figure 35.

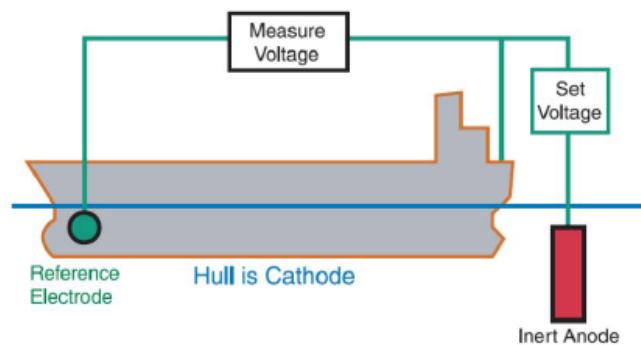


Figure 35. Schéma de principe d'un système à courant imposé [58]

Dans le système ICCP, une anode auxiliaire fabriquée à partir d'un matériau non consommable (inerte), comme le titane platinisé ou des oxydes mixtes de métaux, est utilisée à la place des anodes de zinc ou d'aluminium utilisées dans le système sacrificiel. Une électrode de référence est également nécessaire pour surveiller la tension de polarisation sur la coque. Cela permet de contrôler la rétroaction dans le redresseur de tension qui est utilisé pour produire le courant pour l'ICCP systèmes.

2.6 CONCLUSION

Ce chapitre porte sur l'importance des études de corrosion marine, vue ses impacts environnementales et économiques vitales. Pour cela, il est nécessaire de comprendre les caractéristiques de milieu marin notamment la composition de l'eau de mer vue son impact sur la gravité de corrosion.

De plus, certaines organisations comme l'Organisation maritime internationale (OMI) et l'Association internationale des sociétés de classification (IACS) établissent des règles de classification et des exigences pour garantir qu'un navire est bien entretenu et améliorer l'efficacité de l'amélioration de la sécurité au niveau international. Dans ce contexte, il existe plusieurs façons de protéger les structures marines et contrôler la propagation des endommagements causés par la corrosion tel que le choix des matériaux, la prise en compte de la corrosion dans la conception et la maintenance, l'utilisation de revêtements, Protection cathodique et Contrôle ou traitement de l'environnement.

CHAPITRE 3

LES SYSTÈMES À COURANT IMPOSÉ

3.1 INTRODUCTION

La protection cathodique à courant imposé (ICCP) sert à protéger les coques et accessoires des navires tels que le gouvernail de direction et l'hélice. En général, le ICCP est préférable pour les grands navires marins, car les systèmes ICCP peuvent décharger une grande quantité de courant, ont une longue durée de vie, contrôlent le potentiel de coque automatique selon la variation des conditions, produisent peu de force de traînée avec seulement quelques anodes encastrées sur la coque [30].

3.2 DEFINITION

La protection cathodique à courant imposé (ICCP) est un système de protection des coques et les accessoires des navires contre la corrosion [5].

Dans le système ICCP, Le circuit d'un système de protection cathodique par courant imposé pour navire maritime est constitué principalement des éléments suivants et comme il est illustré dans la figure 36 :

- Une source d'alimentation externe ;
- Un redresseur de transformateur CA/CC qui est utilisée pour fournir la tension d'entraînement entre l'anode et la structure à protéger. Le courant continu doit être réglable de manière que des variations du courant de protection cathodique et de la tension soient disponibles. La borne négative de la source CC est connectée à la structure à protégé, et la borne positive est également connectée à l'anodes [67] ;
- Des anodes auxiliaires qui sont faites de matériaux durables qui résistent à l'usure ou à la dissolution [68] ;
- L'électrolyte ;
- Des électrodes de référence ;

- Des dispositifs de connexion.

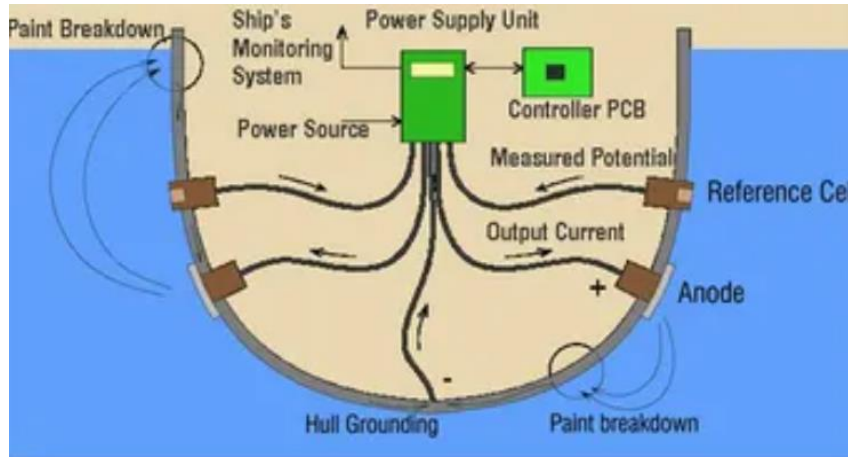


Figure 36. Conception du système de protection cathodique à courant imposé pour un navire [69]

3.3 ANALOGIE ELECTRIQUE DU SYSTEME DE PROTECTION CATHODIQUE

Comme il est montré sur la figure 37, la cellule de corrosion peut se présenter sous forme d'un circuit électrique (circuit (a)). Ce circuit est principalement constitué d'une anode et une cathode, conducteur du courant électrique, des résistances implantées en série et une source de courant externe.

Il existe une différence de potentiel entre l'anode et la cathode :

$$\Delta E = E_a - E_c \quad (\text{Eq. 2})$$

D'après la loi d'Ohm ($I = \frac{E}{R}$), le courant de corrosion est déterminé par la formule (eq.3) [70]

$$I_{corr} = \frac{E_a - E_c}{R_a + R_c} \quad (\text{Eq. 3})$$

Où :

I_{corr} : Courant de la corrosion (A);

E_a : Potentiel de polarisation de l'anode (V);

E_c : Potentiel de polarisation de la cathode (V);

R_a : Résistance d'anode dans l'électrolyte (Ω);

R_c : Résistance de cathode dans l'électrolyte (Ω);

Pour limiter la corrosion, I_c doit être égale à zéro. Pour que le courant de la corrosion rendu nul, $(R_a + R_c)$ doit tendre vers l'infini ou rendre $(E_a - E_c)$ égal à zéro.

D'après la loi des mailles (figure 37 (a)) :

$$E_A - E_C = I_1 R_A + R_C (I_1 + I_2) \quad (Eq. 4)$$

$$I_1 = \frac{E_A - (E_C + R_C I_2)}{R_A + R_C} \quad (Eq. 5)$$

E_A : Potentiel d'anode en circuit ouvert;

E_C : Potentiel de cathode en circuit ouvert;

R_A : Résistance d'anode effective;

R_C : Résistance de cathode effective;

I_1 : courant de la zone anodique;

I_2 : courant de l'anode externe.

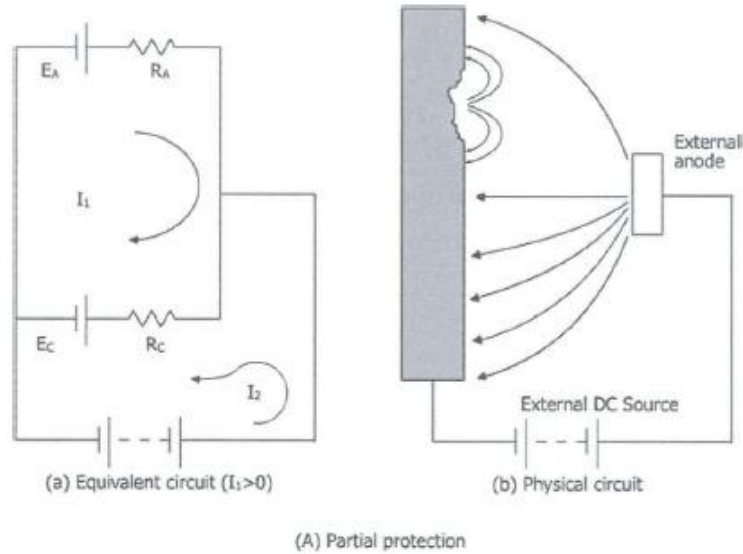


Figure 37. Circuit équivalent de métaux protégés cathodiquement[71]

3.4 COMPOSANTS CONVENTIONNELLE DES SYSTEME A COURANT IMPOSEE

3.4.1 Redresseur

Le type d'alimentation le plus courant utilisé pour la protection cathodique à courant imposé est les redresseurs. Les unités de redresseur se composent d'un transformateur, de piles de redresseurs, d'un compteur, d'un interrupteur et des connexions de prise du transformateur. L'entrée du redresseur est une tension CA provenant du réseau électrique commercial. Un transformateur avec des réglages de prise dans le côté secondaire fournit une méthode pour réduire et régler le niveau de tension de sortie et pour isoler le circuit CC du système d'alimentation d'entrée. Un circuit de rectification convertit ensuite la tension CA ajustée pour produire une sortie de tension CC. Les redresseurs de transformateur utilisés pour la protection cathodique ont généralement une puissance nominale comprise entre 10 et 400 A et entre 10 et 100 V [67].

3.4.1.1 Transformateur/Redresseur Standard

Les redresseurs standard sont disponibles pour la puissance d'entrée monophasée ou triphasée [70].

- Les redresseurs monophasés en demi-onde (càd 1 diode), en centre taraudé (2diodes) et en pleine onde (4 diodes), le pont pleine onde est la norme la plus utilisée (figure 38).
- Les redresseurs triphasés sont disponibles dans les ponts en étoile (3 diodes) ou en onde pleine (6 diodes) avec ponts en onde pleine (figure 39) qui sont les plus couramment utilisés.

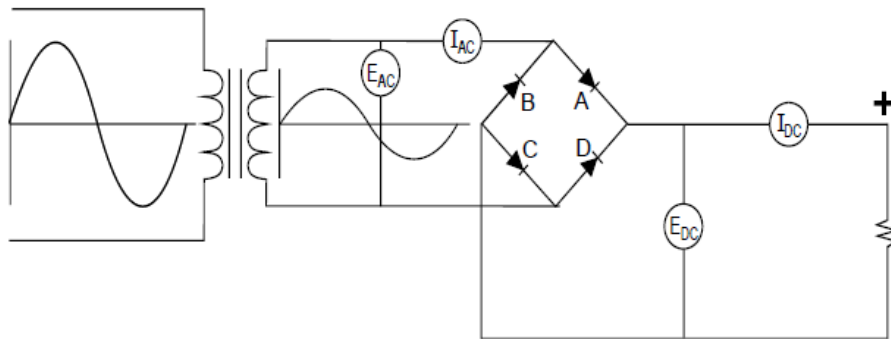


Figure 38. Circuit redresseur de pont monophasé [72]

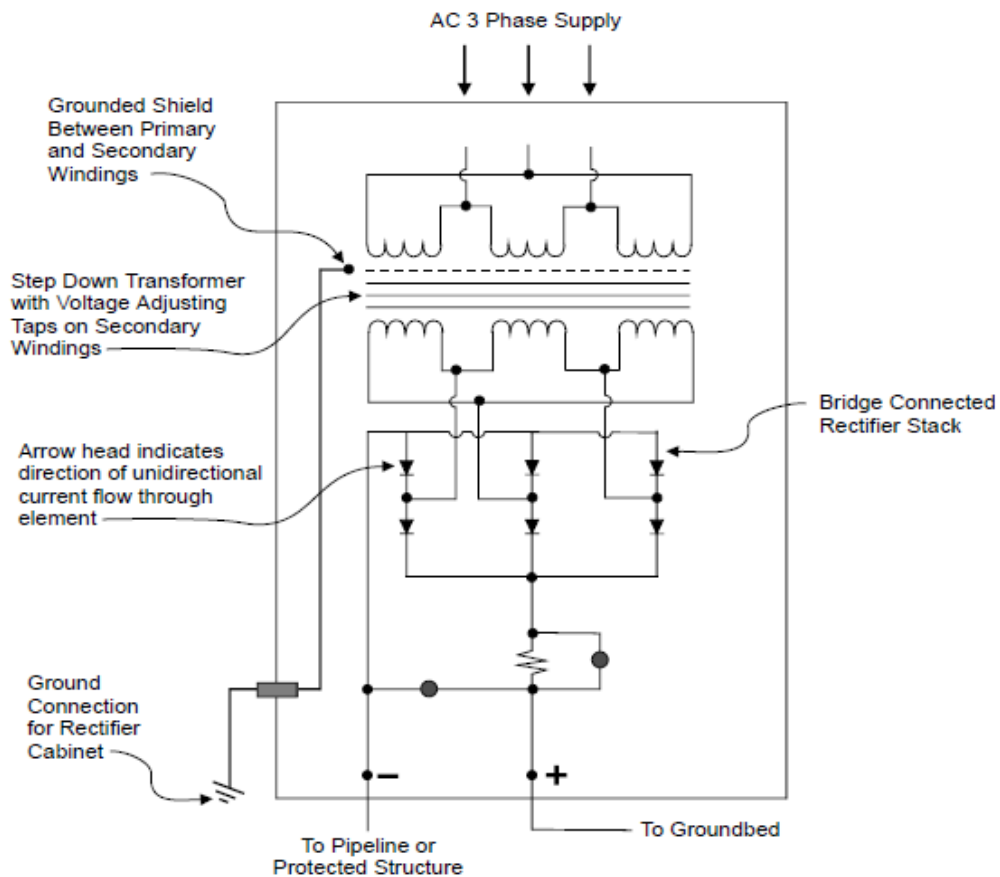


Figure 39. Circuit redresseur de pont triphasé [72]

3.4.1.2 Redresseurs contrôlés au silicium (SCR)

Les redresseurs contrôlés au silicium (SCR) sont des dispositifs de rectification qui conduit le courant dans une seule direction. L'application de la bonne polarité de tension entre l'anode et la cathode n'entraînera pas la conduction du SCR (incendie). Afin de polariser la tension, un potentiel positif doit être appliqué entre l'anode (côté P) et la cathode (côté N), et une impulsion de tension positive doit également être appliquée entre la porte et la cathode comme indiqué au centre de la figure 40. Au moment où l'impulsion de la porte est appliquée, le SCR se déclenche et commence à faire circuler le courant de l'anode vers la cathode. Quel

que soit le courant de la vanne, le SCR continue de fonctionner jusqu'à ce que la tension appliquée passe à zéro et que le courant devienne nul.

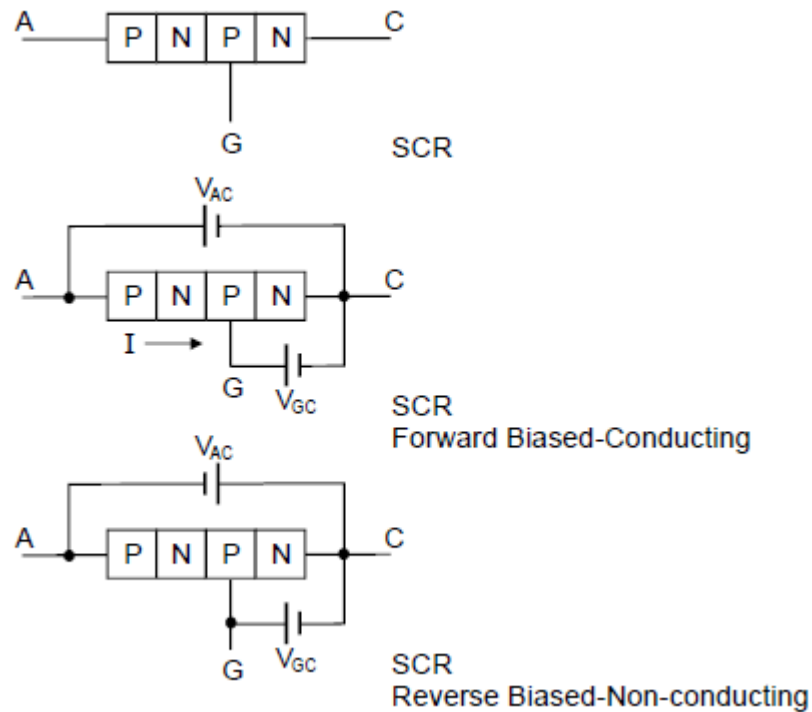


Figure 40. Redresseur contrôlé au silicium (SCR) [70]

3.4.1.3 Redresseurs en mode de commutation

Ce type de redresseur a commencé à apparaître à fin des années 1970 [70]. L'ajustement de tension de sortie se fait à l'aide d'un grand transformateur à noyau laminé, les redresseurs en mode de commutation contrôlent le niveau de tension de sortie CC en produisant une série de haute fréquence (généralement de 50 à 500k Hz). Bien que les redresseurs de mode de commutation utilisent des transformateurs pour le stockage de l'énergie et pour l'isolation du circuit de sortie, le transformateur est un transformateur ferrite-noyau à haute fréquence beaucoup plus petit. Le schéma fonctionnel d'un redresseur type en mode de commutation est illustré dans la moitié inférieure de la figure 41.

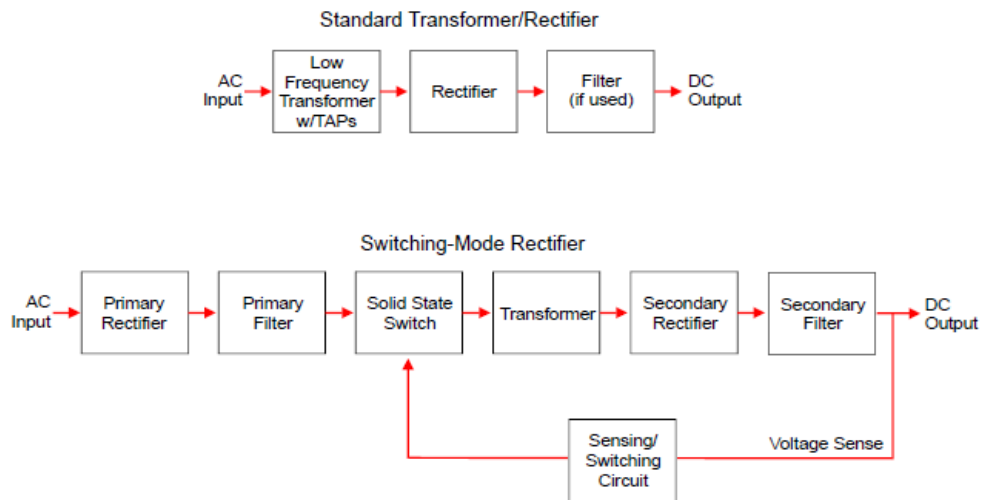


Figure 41. Schémas fonctionnels pour le mode de commutation et redresseurs standard

3.4.1.4 Efficacité du redresseur

Les redresseurs sont présentés dans le circuit de protection à courant imposé comme la source de courant continu. L'efficacité du redresseur est le rapport entre la puissance de sortie CC et la puissance d'entrée CA :

$$L'efficacité\ global\ d'un\ redresseur = \frac{\text{la puissance de sortie CC}}{\text{la puissance d'entrée CA}} \times 100\%$$

3.4.2 Les anodes auxiliaires

La sélection de l'anode dans un système CP à courant imprimé est principalement basée sur le taux de dissipation de l'anode. Les exigences imposées dans le choix des matériaux d'un anode sont :

- Faible taux de consommation;
- Robustesse physique, stabilité élevée et longue durée de vie;

- Bonnes propriétés électrochimiques telles que faible résistance au flux de courant;
- Facilité de fabrication et d'installation et un cout minimal

Le poids et le nombre d'anodes à utiliser sont dépendants à la durée de vie souhaitée du système c'est pour cela, il est essentiel de prolonger la durée de vie d'anode afin de minimiser le cout de maintenance du système [73].

3.4.3 Les électrodes de références

Dans le système de protection à courant imposé, l'électrode de référence joue un rôle vital dans l'évacuation du courant protecteur du redresseur vers la coque du navire à travers l'eau. Ce dernier est utilisé pour mesurer le potentiel de la coque et fournir un signal d'entrée pour le redresseur de commande automatique. L'électrode Ag/AgCl/eau de mer (figure 42) présente un potentiel de stabilité élevé de 5 mV et une fiabilité bien documentée des performances [74]. Les alliages Zn purs peuvent également être utilisés comme électrode de référence dans l'eau de mer en raison de leur robustesse, mais avec une stabilité et une précision inférieure à celles de l'électrode Ag/AgCl/eau de mer [75].

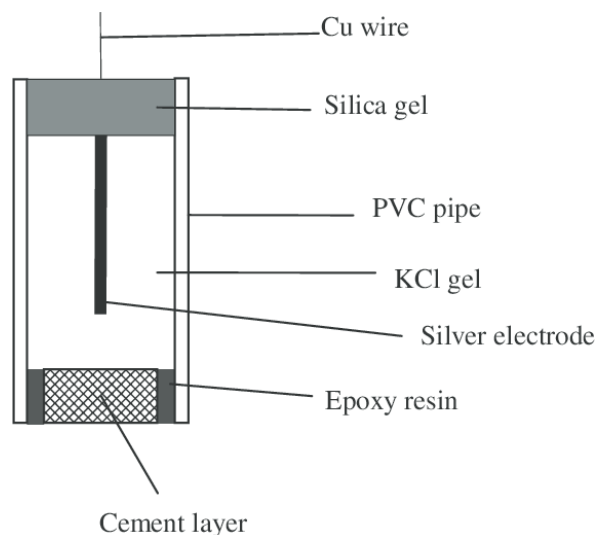


Figure 42. La structure d'électrode de référence Ag/AgCl [74]

3.4.4 Les câbles de liaison

Les conducteurs câbles de liaison des anodes sont en cuivre ou en aluminium et recouvert d'une gaine d'isolation. Le polyéthylène haute densité a de bonnes propriétés contre l'abrasion et des températures élevées tout en conservant d'excellentes propriétés diélectriques. Les soudures à l'extrémités du câbles doivent être recouverte d'une mélange scellant afin de protéger contre l'humidité [76].

3.4.5 Sources d'alimentation externe pour la protection cathodique

La sources d'alimentation externe dans le système de protection cathodique à courant imposées d'un navire peut prendre plusieurs formes comme énumérées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7

Les formes de sources d'alimentation possibles un système de protection cathodique à courant imposé d'un navire

Energie Non Durable	Energie Durable
Ensemble diesel-alternateur redresseur	Générateur solaire avec batterie de stockage
Turbine à vapeur en circuit fermé (fonctionnant au gaz ou au kérosène)	Éoliennes avec stockage sur batterie
Groupes électrogènes	Générateur thermoélectrique
Ensemble moteur à gaz-alternateur-redresseur	Des batteries de stockage
	Nano-générateur turboélectrique

3.5 LES SOURCES D'ÉNERGIE DURABLE

La corrosion des surfaces métalliques dans le milieu marin en particulier le navire coûte des milliards de dollars chaque année dans le monde entier [77, 78]. Pour la protection des surfaces métalliques, les sources d'énergie fossile a été largement utilisée comme source primaire pour la protection cathodique à courant imposé. Cependant, ces sources entraînent des coûts énergétiques élevés et des pollutions environnementales nefastes. Par conséquent, plusieurs chercheurs sont intéressés des systèmes intelligent utilisant de l'énergie naturelle provenant de l'environnement extérieur est une stratégie nouvelle et efficace pour alimenter un système de PC [79].

3.5.1 Énergie électrostatique: Nano-générateur triboélectrique

3.5.1.1 Définition

La triboélectricité est l'un des phénomènes physiques sont abondantes dans notre vie quotidienne. Avec la forte demande de nouvelles énergies vertes, le nano-générateur triboélectrique est une stratégie qui respecte l'environnement et qui a des impacts importants sur l'avenir des dispositifs auto-alimentés, l'énergie renouvelables, les technologies des capteurs, surveillance sanitaire, biomédecine et protection cathodique [80, 81].

Le nanogénérateur triboélectrique (TENG) a été inventé pour la première fois par Wang et ses collègues en 2012, ce qui permettait divers types d'énergie mécanique disponibles dans l'environnement ambiant, telle que les vagues, le vent et gouttes de pluie, en électricité en fonction de différents principes physiques comme le principe de la triboélectrification et de l'induction électrostatique[82-86]. Par conséquent, en cas d'application anticorrosion lourde dans le milieu marin, les métaux pourraient être efficacement protégés contre la corrosion lorsqu'ils sont connectés au système de protection cathodique auto-alimenté piloté par le TENG.

TENG utilise l'effet de couplage de l'électrification par contact (CE) et de l'induction électrostatique. Donc, l'effet triboélectrique est désigné par un contact physique entre deux matériaux différents qui seraient chargés électriquement après avoir été séparés [87] comme il est illustré dans la figure 43.

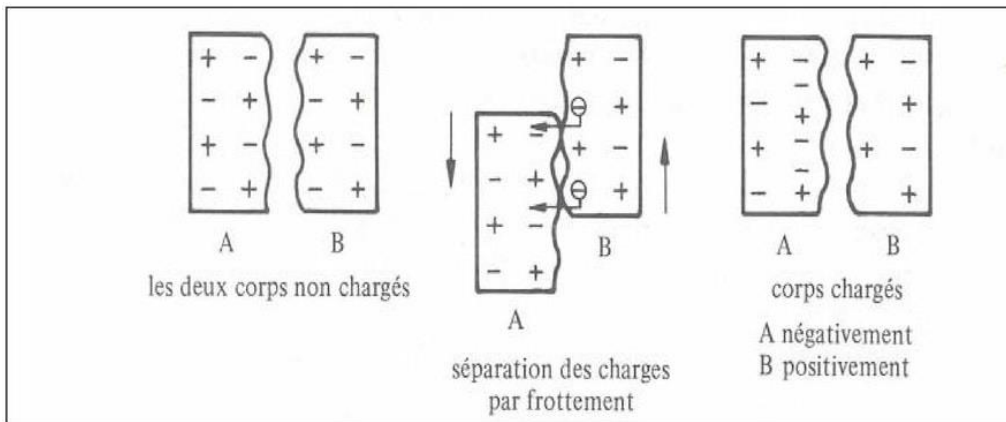


Figure 43. le fonctionnement de l'effet triboélectrique [88]

Dans notre jour, la technologie de générateur triboélectrique est fortement donnée. Selon une étude documentaire, fin 2019, il y avait plus de 42 pays et régions, 400 unités et plus de 4000 scientifiques engagés dans la recherche TENG (Figure 44), et le nombre d'articles publiés dans le monde entier augmente de façon exponentielle [87].

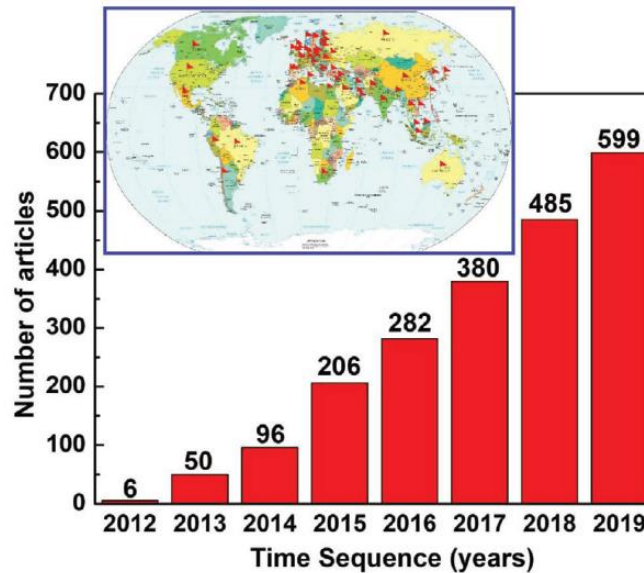


Figure 44. Une étude bibliographique de la base de données SCI sur les articles publiés chaque année dans le domaine du TENG au 31 décembre 2019 et la répartition géographique des auteurs.[87]

3.5.1.2 Principe de fonctionnement

L'effet triboélectrique qui se fait par le transfert de charge entre les surfaces de deux matériaux distinctement différents est un phénomène bien connu [89-91] qui a diverses applications comme la peinture par pulvérisation, électrophotographie, séparation électrostatique et la récolte d'énergie.

TENG convertie efficacement l'énergie mécanique en énergie/signal électrique toutes en utilisant le courant de déplacement de Maxwell comme force motrice.

La force motrice du TENG est causé par une variation temporelle du champ électrique plus un terme de polarisation des médias. Cependant, pour la production d'électricité, la polarisation devrait inclure un terme qui est contribué par le champ de déformation comme l'effet piézoélectrique et l'effet CE. Dans le cas des TENGs, les charges triboélectriques sont produites sur des surfaces simplement en raison de CE entre deux matériaux différents. Pour

tenir compte de la contribution apportée par les charges électrostatiques induites par l'électrification de contact dans les équations de Maxwell, un terme supplémentaire P_s a été ajouté dans le vecteur de déplacement D par Wang en 2017[9], c'est-à-dire

$$D = \varepsilon_0 E + P + P_s \quad (\text{Eq. 6})$$

Ici, le vecteur de polarisation de premier terme P est dû à l'existence d'un champ électrique externe, et le terme ajouté P_s est principalement dû à l'existence de charges de surface indépendantes de la présence de champ électrique. Substituer l'équation (6) dans les équations de Maxwell, et définir

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (\text{Eq. 7})$$

3.5.1.3 Résumé des principaux travaux traitant les nanogénérateur triboélectrique

Tableau 8
Tableau récapitulatif des travaux traitant les nanogénérateur triboélectrique

Travail	Type	Description	Travaux similaires
[92] :Nano-générateur triboélectrique flexible à base de cellulose/collagène/ oxyde de graphène pour une protection cathodique auto-alimentée	Frottement Solide/solide	Gai et al. ont synthétisé un film flexible d'oxyde de cellulose/collagène/graphène pour un nano-générateur triboélectrique. Le travail présente aussi les effets de la teneur de Graphène d'oxyde, de la fréquence de mouvement de l'énergie mécanique externe et de la résistance de charge sur les performances de nano-générateur triboélectrique, c'est-à-dire sur la fiabilité de protection cathodique	[82-84, 93]
[79] :Nano-générateur triboélectrique résistant à l'humidité et ses applications dans la récupération d'énergie éolienne et la protection cathodique auto-alimentée	Frottement Solide/Solide entraîné par le vent	Dans ce travail, un film flexible hydrophobe en polytétrafluoroéthylène (PTFE) a été introduit pour établir un TENG entraîné par le vent comme source d'alimentation pour un système de protection cathodique (CP) auto-alimenté. Le film flexible en PTFE a été utilisé comme couche de friction avec un film d'alcool polyvinylique (PVA) pour générer des charges. Les charges triboélectriques développées ont été transférées au système de protection cathodique.	[94-98]
[99] : Réseau de nano-générateurs triboélectriques liquide-solide et ses applications pour la récupération de l'énergie des vagues et la protection cathodique auto-alimentée	Frottement Solide/liquide	Sun et al. ont utilisé une membrane d'ultrafiltration en polytétrafluoroéthylène comme couche de friction avec de l'eau pour collecter l'énergie des vagues afin d'auto-alimenter le système de protection cathodique en milieu marin.	[94]

3.5.2 Energie Thermique : Les appareils thermoélectriques

3.5.2.1 Définition

Une source de courant électrique CC provenant d'un thermoélectrique sera utilisée. Le pôle positif de la source de courant continu est connecté à l'anode tandis que le pôle négatif de la source de courant continu est connecté au matériau de la plaque du navire, de sorte que les électrons se déplaceront de l'anode vers le matériau de la plaque du navire, ce qui constitue une mesure de protection contre les effets de corrosion.

Le thermoélectrique est un appareil qui peut produire un courant électrique continu qui est généré par une différence de température entre deux côtés différents, ce phénomène est appelé le phénomène d'effet Seebeck comme il est montré dans la figure 45 [100]. En 1821, un physicien allemand « Thomas Johann Seebeck » découvrit le phénomène thermoélectrique. Thomas Johann Seebeck a observé que si deux matériaux différents étaient connectés aux extrémités et chauffés à une extrémité, un courant électrique circulerait [101].

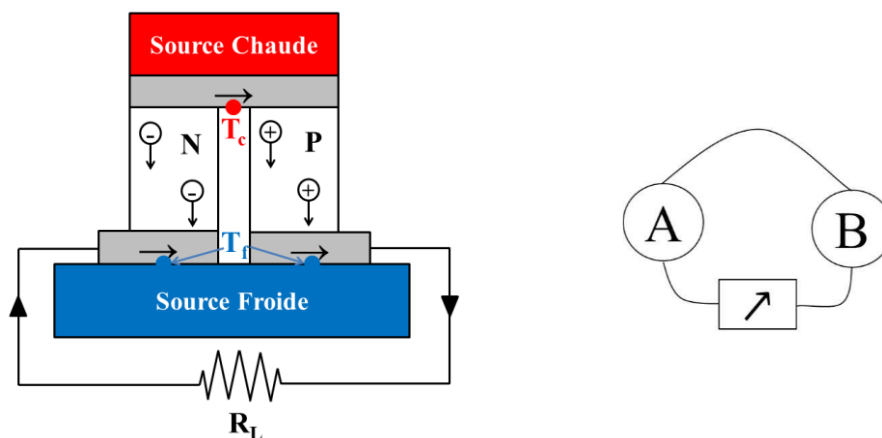


Figure 45. L'expérience de Seebeck [102]

La découverte de Seebeck a inspiré Jean Charles Peltier à voir le contraire du phénomène. Lorsqu'un courant électrique est appliqué, la chaleur est absorbée à la jonction des deux

métaux et la chaleur est libérée à l'autre connexion. La libération et l'absorption de chaleur s'inversent une fois le sens du courant inversé, phénomène appelé effet Peltier. Les effets Seebeck et Peltier sont à la base du développement de la technologie thermoélectrique.

Le thermoélectrique est divisé en deux en fonction de son principe de fonctionnement, le refroidissement thermoélectrique (TEC) et le générateur thermoélectrique (TEG). Le refroidissement thermoélectrique (TEC) est l'application de l'effet Peltier qui convertit le courant continu CC en un dissipateur de chaleur ou un refroidisseur (figure 46), tandis que le générateur thermoélectrique (TEG) est l'application de l'effet Seebeck qui modifie la différence de température des deux côtés en une source de courant électrique (figure 47).

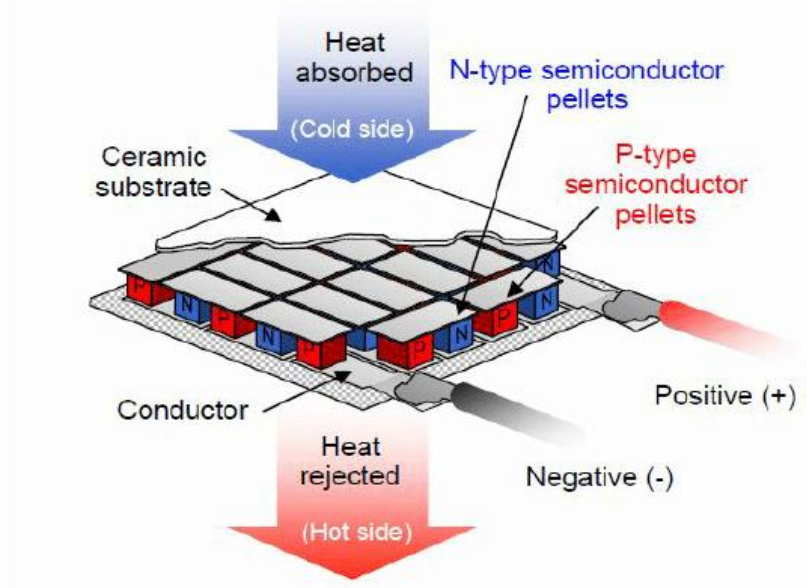


Figure 46. Le refroidisseur thermoélectrique à semi-conducteur de type ancien avec des côtés chauds et froids [103]

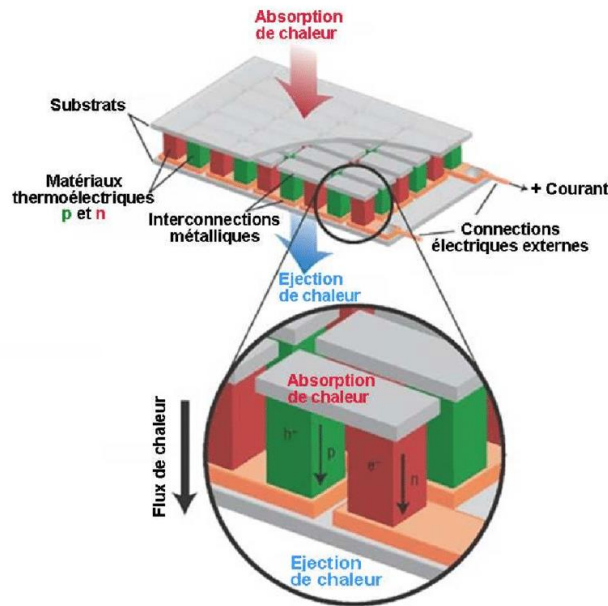


Figure 47. Schéma d'un module thermoélectrique (générateur) [104]

3.5.2.2 Technologies de récupération d'énergie à l'échappement

Les gaz d'échappement du moteur diesel marin emportent environ 25% de l'énergie du carburant sous forme de chaleur [105]. Cette énergie disponible dans le flux de sortie est gaspillée si elle n'est pas utilisée correctement. L'OMI a encouragé d'utilisation de gaz d'échappement dans le but de minimiser l'émission de sulfures et d'oxydes d'azotes (SO_x et NO_x), De nombreux chercheurs visent à récupérer la chaleur perdue en utilisant un appareil tel qu'un thermoélectrique.

Pandiyarajan [106] a testé le performance du moteur à combustion interne avec et sans l'intégration d'un échangeur de chaleur à calandre et tube à ailettes et un réservoir de stockage d'énergie thermique (figure 48). Près de 10 à 15 % de la chaleur totale est récupérée avec ce système. La chaleur maximale extraite à l'aide de l'échangeur de chaleur à pleine charge est d'environ 3,6 kW.

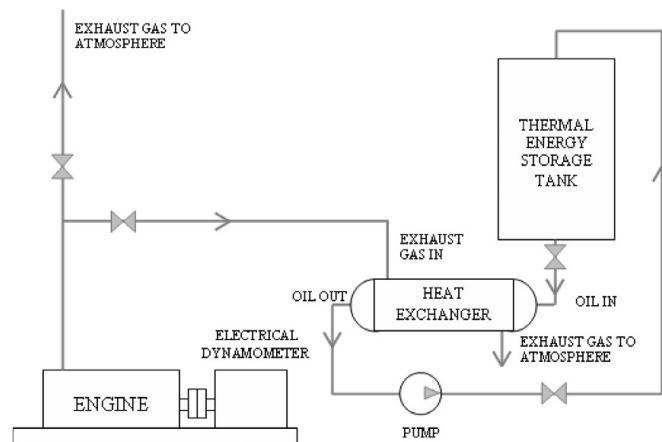


Figure 48. Système de récupération d'énergie à l'échappement [106]

Rahman [107] a utilisé un prototype thermoélectrique avec l'utilisation des gaz d'échappement dans le moteur auxiliaire du navire dans la protection cathodique à courant imposé ICCP .

La tension de sortie moyenne du prototype thermoélectrique était de 0,36 volt et 0,20 ampère, tandis que le courant et la tension nécessaires afin de protéger une conception de revêtement de 3 ans sont égales 2,66 ampères et 17,29 volts. Donc Rahman [107] a constaté que pour répondre à ces besoins 10 unités doivent être disposées dans le circuit (6 séries et 4 parallèles) de manière à produire une capacité totale de courant et de tension de 2,88 ampères et 23,80 volts.

3.5.3 Énergie Solaire : Les panneaux solaires

L'énergie solaire est une source alternative qui devient de plus en plus populaire. Cette source peut être fournie une source d'alimentation fiable pour un système de protection cathodique à courant imposé lorsque le courant alternatif n'est pas facilement disponible.

Son principe consiste à l'extraction de l'électricité de l'énergie solaire abondante en utilisant le mécanisme photoélectrique. Des cellules solaires se présentent par un matériau semi-conducteur qui convertit la lumière visible en courant continu. En utilisant des

panneaux solaires, une série de cellules solaires connectées électriquement, une tension CC est générée qui peut être physiquement utilisée sur une charge [108].

Le système photovoltaïque comporte : un champ de modules photovoltaïques, un système de stockage électrochimique et un système de régulation et de conditionnement de puissance comme il est illustré dans la figure 49.

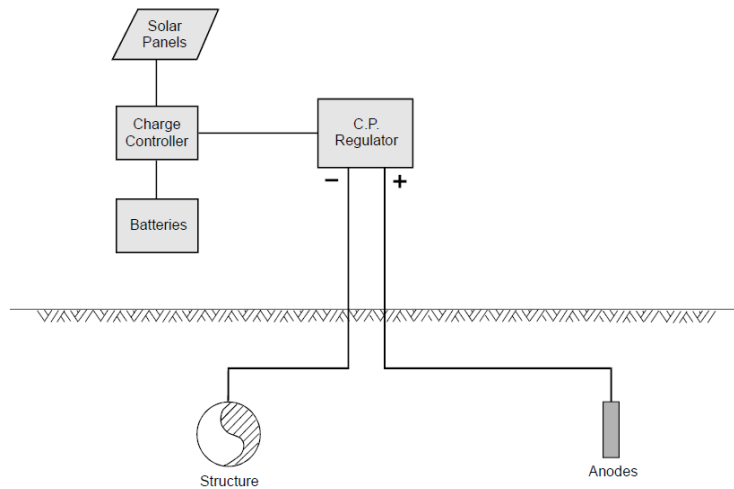


Figure 49. Système d'alimentation solaire pour CP [72]

Une seule cellule photovoltaïque produit une tension et un courant très faibles. Les fabricants produisent des panneaux solaires standard composés d'un certain nombre de cellules photovoltaïques connectées en série/parallèle (voir figure 50) pour produire une tension et un courant de sortie spécifiques. Les panneaux solaires sont disponibles en tensions de sortie de 6, 12 et 24 V avec des sorties de puissance allant de 5 à 160 W. Ainsi que, un champs des panneaux solaires en série ou en parallèle peuvent produire un courant ou une tension de sortie encore plus élevée [72].

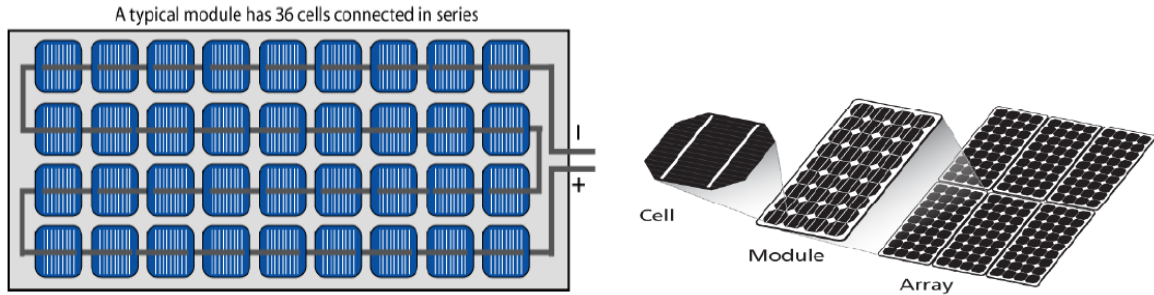


Figure 50. Présentations des panneaux solaires [109]

Un système de stockage est nécessaire avec une alimentation solaire pour fournir le courant requis lorsque l'énergie solaire est indisponible (nuit et jours nuageux). Le système photovoltaïque doit être dimensionné pour produire la sortie de courant requise plus le courant supplémentaire pour charger le système de batterie lorsque l'énergie solaire est disponible. Lorsque l'énergie solaire disponible est insuffisante, le système de batterie fournit le courant nécessaire à la protection cathodique. Un contrôleur de charge est un moniteur électronique pour déterminer l'état de charge de la batterie permettant de charger le courant aux batteries lorsque nécessaire et d'éviter la surcharge des batteries.

3.5.4 Énergie éolienne : Les génératrices éoliennes

Les génératrices éoliennes présentent une autre source possible pour l'alimentation des systèmes de protection cathodique. Ces générateurs CC commencent généralement à produire des sorties de courant utilisables à des vitesses de vent d'environ 16 km/h (10 mph) avec une puissance maximale atteinte à des vitesses de 40 à 55 km/h (25 à 35 mph). Étant donné que la puissance varie en fonction de la vitesse du vent, un système de batterie est nécessaire non seulement comme système de secours lorsque le vent est plat, mais doit également fournir une alimentation continue pour le système de protection cathodique. La sortie du générateur charge un système de batterie, et le système de batterie fournit le courant de protection cathodique de sortie (figure 51) [72].

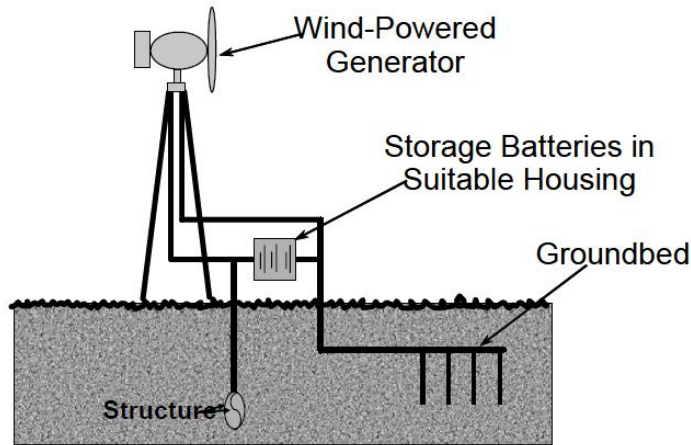


Figure 51. Génératrices éoliennes pour CP [72]

3.5.5 Système Hybrides

Plusieurs chercheurs trouvent qu'il est nécessaire de combiner différentes nouvelles sources d'énergie pour augmenter la puissance de sortie totale et ainsi obtenir une meilleure protection contre la corrosion.

Les travaux [110-112] ont construit des systèmes composés par des panneaux solaires, des éoliennes et des systèmes de stockages (figure 52) pour fournir le système de protection cathodiques à courant imposé pour des pipelines localisées dans des zones éloignées où le courant alternatif n'est pas disponible.

En plus, les travaux [10, 113] ont également combinés l'énergie fossile : le réseau électrique et/ou un moteur diesel avec les énergies renouvelables : l'énergie éoliennes et l'énergie solaire (figure 53).

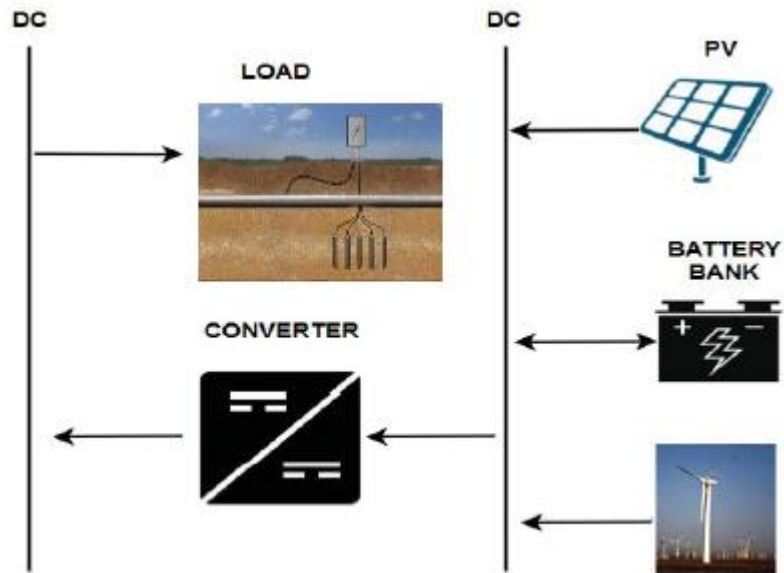


Figure 52. Conception d'un système hybride (WT-PV) avec CPU [110]

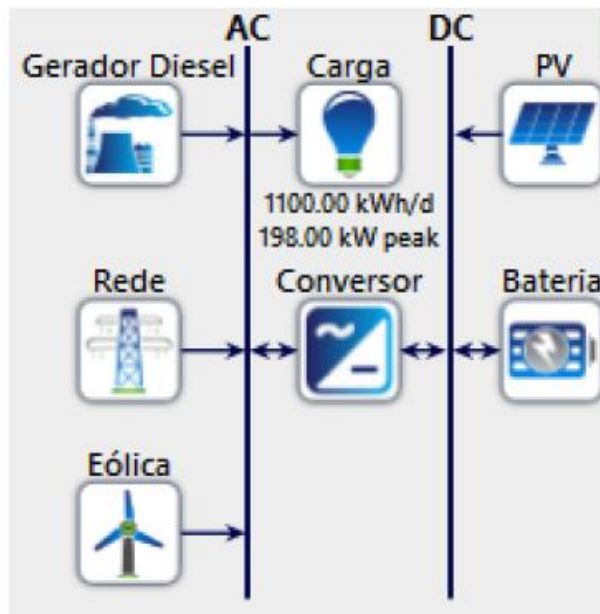


Figure 53. Configuration générale du système de production d'énergie hybride [113]

3.5.6 Récapitulatif des avantages et inconvénients

Tableau 9

Les avantages et les inconvénients des systèmes d'alimentation solaire pour CP

Technologie	Avantages	Inconvénients	Références
Nano-générateur triboélectrique	<ul style="list-style-type: none"> * Energie renouvelable et durable * Respectueux à l'environnement * valable pour toutes les conditions d'environnement * Auto-alimentation du système * Flexibilité * Faible cout * Collecte efficacement les basses fréquences externes d'énergie mécanique et la convertir en énergie électrique. 	<ul style="list-style-type: none"> *Instabilité du courant de sortie vu que la performance du système dépend à la fréquence du l'énergie naturel (vent, vagues, la fréquence du pluies) 	<ul style="list-style-type: none"> [80, 81] [92] [99]
Systèmes de récupération d'énergie à l'échappement	<ul style="list-style-type: none"> *Exploitation d'une source d'énergie perdue *Augmentation l'efficacité du moteur *Diminution l'émission de SO_x et NO_x 	<ul style="list-style-type: none"> *Système complexe *Nécessite un entretien supplémentaire *Coût élevé *Risque d'endommagement du système avec le dépassement de la température maximale *Manque du courant avec la diminution de la température 	<ul style="list-style-type: none"> [106, 107, 114]
Des systèmes d'alimentation solaire	<ul style="list-style-type: none"> * Energie renouvelable et durable * Respectueux à l'environnement * Alimentation fiable * Auto-alimentation du système * Langue durée de vie peut dépasser 25 ans. 	<ul style="list-style-type: none"> * Ne produisent pas d'électricité la nuit et les journées nuageux * Besoin de système de stockage qui ont une durée de vie nettement plus courte que les panneaux solaires et nécessitent un entretien. * Cout élevé * Dépendance des conditions climatiques du milieu. 	<ul style="list-style-type: none"> [72] [108]

Tableau 9

Les avantages et les inconvénients des systèmes d'alimentation solaire pour CP

Technologie	Avantages	Inconvénients	Références
Les génératrices éoliennes	<ul style="list-style-type: none"> * Energie renouvelable et durable * Respectueux à l'environnement * Alimentation fiable * Auto-alimentation du système 	<ul style="list-style-type: none"> *Variation de la vitesse du vent * Besoin de système de stockage qui ont une durée de vie nettement plus courte que les génératrices éoliennes et nécessitent un entretien. * Cout élevé * Dépendance des conditions climatiques du milieu. * Risque de givrage 	[72]
Système Hybrides	<ul style="list-style-type: none"> *Meilleur protection de la structure *Stabilité du courant *Optimisation d'énergie *Variation des sources d'entrée 	<ul style="list-style-type: none"> *Système complexe *Cout élevé 	[10, 110-113]

CHAPITRE 4

MODÉLISATION DU SYSTÈME HYBRIDE FLETTNER-SOLAIRE-DIESEL AVEC STOCKAGE D'ÉNERGIE

4.1 INTRODUCTION

Les navires exposés à l'eau de mer sont plus à risque de corrosion, en particulier après de nombreuses années de service (au-delà de 15 à 20 ans) [2]. La protection cathodique est un moyen très efficace pour arrêter le processus de corrosion par abaisser le potentiel électrique de la structure du navire. Dans la plupart de temps, une alimentation courant continu est prend lieu à l'intérieur de la structure à l'aide d'un groupe électrogène diesel.

Les navires océaniques sont responsables d'une grande partie des émissions mondiales de l'effet de serre (GES) par plus de 3 % des émissions mondiales [115].

Le Comité de protection du milieu marin (CPMM) de l'Organisation maritime internationale (OMI) s'est fixé comme objectif en avril 2018 de réduire les émissions de GES d'au moins 50 % d'ici 2050 par rapport à 2008 et d'accroître l'efficacité énergétique de 30 % d'ici 2025 [116].

Dans ce but, plusieurs approches novatrices ont été adoptées, l'intégration des énergies renouvelables dans les navires océaniques. Par conséquent, les systèmes d'énergies hybrides offrent une meilleure option pour accroître la fiabilité de l'approvisionnement en électricité puisqu'ils présentent une variété des ressources énergétiques.

Dans la présente étude, un système hybride de type Flettner-Solaire-Diesel avec stockage d'énergie pour un transporteur de cargaison est présenté. L'objectif terminal, est d'introduire un système novateur pour assurer l'alimentation électrique du système de protection cathodique et de réduire la charge (écrêtement des pointes lorsque le navire est au port) sans se requiert à 100% à des énergies fossiles (cas des génératrices diesel actuel). Ceci permettra à l'opérateur de diminuer sa consommation du carburant, d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre, et participer à l'atteinte des objectifs établis par l'OMI afin d'éliminer

progressivement les émissions de GES provenant des transports maritimes internationaux aussitôt que possible au cours du siècle.

4.2 ÉTUDE DE CAS

4.2.1 Présentation du navire

Dans le but de présenter la solution proposée, un navire de type transporteur de cargaison générale du classe RORO (Roll-On/Roll-Off) effectuant un lien commercial entre la Tunisie et la Turquie est pris en considération (Figure 54). Les caractéristiques techniques du navire sont illustrées dans le Tableau 10.

Tableau 10
Les caractéristiques du navire à étudier

Type	Transporteur de cargaisons générales classes RO-RO
Classe	DNV 1A1 1CA/1A
Type de Génératrices	CAT 2 x 431kW – C15
Vitesse maximale	13.5 Knots (Nœud)
Capacité de charge	2858 tonnes
Longueur et Largeur du navire	129m X 21m
Vitesse de croisière maximale	12 nœuds
Vitesse de croisière nominale	10 nœuds



Figure 54. Transporteur de cargaisons générales classes RO-RO

4.2.2 Trajet et demande énergétique du navire

Dans le but de mieux refléter la demande énergétique du navire avant et après l'intégration des énergies renouvelables à bord, un trajet maritime reliant le port de Radès en Tunisie (36° 40' de latitude et 10° 10' de longitude) avec le port de HaydarPaşa à Istanbul en Turquie (41° 00' de latitude et 29° 00' de longitude) est pris en considération. La figure 55 illustre le circuit du trajet que le navire amorce durant son voyage. En se basant sur la vitesse nominale de croisière du navire, nous avons calculé dans un premier temps à l'aide du logiciel Shiptraffic (disponible en ligne sur shiptraffic.net) la distance à parcourir entre les deux ports ainsi que la durée de navigation que le navire aura besoin pour atteindre sa destination. D'après le calculateur (Figure 56), et avec une vitesse de croisière de 10 nœuds à l'heure, le navire prend cinq jours et douze heures pour arriver à sa destination (de Radès à Istanbul et/ou vice-versa).



Figure 55. Illustration de la route maritime reliant le port de Radès en Tunisie au port de HaydarPaşa à Istanbul en Turquie.

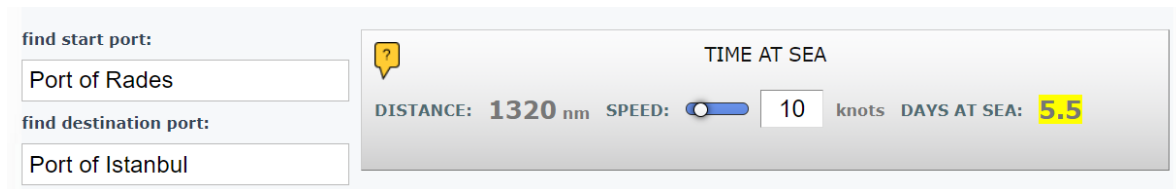


Figure 56. Résultats du calcul distance et de durée de navigation d’après le logiciel Shiptraffic

Or, dans les travaux mentionnés dans [117-119], un navire marchand qui n’est pas équipé d’un système de récupération de la chaleur perdue (*en anglais : Waste heat recovery system*) et/ou d’un générateur d’arbre (*Shaft generator*) utilise une génératrice diesel sous faible charge ($\leq 45\%$) pour répondre à ses besoins lorsqu’il est en mode de navigation (mode voyage), alors que la charge appliquée pourra atteindre 75%-100% lorsque le navire effectue des manœuvres en port (charge et décharge de la cargaison).

Comme le navire considéré s’appuie sur les deux génératrices diesel pour répondre à ses besoins énergétiques, nous avons évalué dans un premier temps la consommation globale du navire (en litre) pour un trajet aller-retour avec un séjour de 24h dans le port. Par la suite, nous comparons cette consommation pour le même trajet une fois que le modèle hybride est développé. Pour faire, les caractéristiques de consommation des deux génératrices ont été étudiés. Le tableau 11 illustre la consommation d’une génératrice sous différente charge [128].

Tableau 11

Caractéristiques de la génératrice C15 utilisé à bord du navire [120]

Performance	Standby	
Fréquence	60 Hz	
Puissance nominale du groupe électrogène	562.5 kVA	
Puissance nominale du groupe électrogène avec ventilateur à facteur de puissance de 0,8	450 ekW	
Émissions	EPA TIER 3	
Consommation de carburant		
100% de charge	131.7 L/hr	34.8 gal/hr
75% de charge	106.1 L/hr	28.0 gal/hr
50% de charge	79.1 L/hr	20.9 gal/hr
25% de charge	45.1 L/hr	11.9 gal/hr

Comme la charge peut varier entre 35% et 45% lorsque le navire est en mer, nous avons considéré qu'une seule génératrice est utilisée et que la consommation est de 60 L/hr en moyenne (étant donné que la demande énergétique est faible).

Pour un trajet d'aller-retour, la consommation totale du navire est estimée à 15840 litres du diesel, tandis qu'elle est de 2760 litres durant 24h au port en considérant une charge moyenne de 85% -90% avec une consommation de 115L/hr (voir Figure 58).

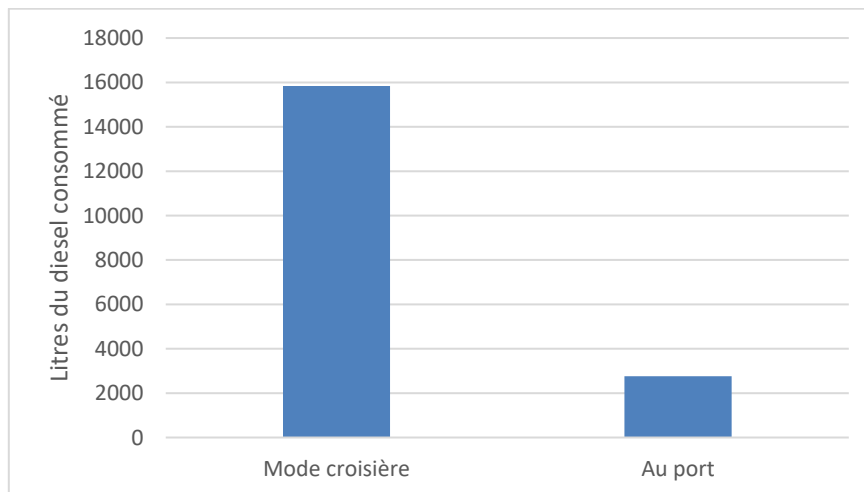


Figure 57. Illustration de la consommation du carburant du navire en utilisant une génératrice diesel pour assurer la demande énergétique (l'électrification).

4.2.3 Système de protection cathodique

Le système de protection cathodique devrait fournir des courants suffisants et bien répartis sur les surfaces en acier de la coque du navire afin que les surfaces puissent être polarisées en fonction du potentiel dans les limites fixées par les critères de protection pendant la durée de vie nominale.

D'après le tableau dans la figure 58, le critère accepté pour la protection des aciers au carbone ou des aciers faiblement alliés dans l'eau de mer aérée est un potentiel de protection de -0.80 V ou plus négatif mesuré par rapport à l'électrode de référence Ag/AgCl/eau de mer. Avec une telle polarisation, la vitesse de corrosion de l'acier dans l'eau de mer est réduite à un niveau acceptable.

<i>Material</i>	<i>Minimum Negative Potential volts</i>	<i>Maximum Negative Potential volts</i>
Iron and steel	-0.80 for aerobic environment	-1.10
	-0.90 for anaerobic environment (with active sulfate reducing bacteria)	-1.10
High-strength steels (yield strength > 690 MPa or hardness > 350 HV)	-0.80	-0.83 to -0.95 ⁽¹⁾
Austenitic stainless steel for aerobic and anaerobic conditions $N_{PRE} = \% Cr + 3.3\% (Mo + 0.5W) + 16\% N$	-0.30 for $N_{PRE} \geq 40$ ⁽²⁾	-1.10
	-0.60 $N_{PRE} < 40$ ⁽²⁾	-1.10
Duplex stainless steel for aerobic and anaerobic conditions	-0.60 ⁽²⁾	See Note 3
Martensitic stainless steel (13%Cr) for aerobic and anaerobic conditions	-0.50	See Note 5
Nickel-based alloys	-0.20	See Note 4
Copper alloys	-0.45 to -0.60 for alloys with aluminum	-1.10
	-0.45 to -0.60 for alloys without aluminum	No limit

Figure 58. Résumé des potentiels par rapport aux électrodes de référence Ag/AgCl/eau de mer recommandées pour la protection cathodique de divers métaux dans l'eau de mer [121]

La densité du courant de protection dépend de la cinétique des réactions électrochimiques à la surface. Il varie selon le matériau, le potentiel, l'état de surface, la teneur en oxygène dissous dans l'eau de mer, le débit, la vitesse de navigation et la température. Pour chaque condition environnementale et de service, la densité du courant de protection devrait être évaluée.

À titre indicatif, la densité de courant de conception typiques pour la protection de l'acier est entre 220 mA/m²-350 mA/m² pour les zones nues et 11 mA/m²-28 mA/m² pour les zones enduites d'après le tableau de la figure 59.

<i>Situation m/s (knots)</i>	<i>Design Current Densities for Bare Steel mA/m² (mA/ft²)</i>	<i>Design Current Densities for Coated Steel mA/m² (mA/ft²)</i>
$V \leq 1$ (2 knots)	100-200 (9.3-18.6) without tidal influence 150-250 (13.9-23.2) with tidal influence	5-15 (0.5-1.4) 7-20 (0.7-1.9)
$1 < V < 10$ (20 knots)	220-350 (20.4-32.5)	11-28 (1.0-2.6)
$V \geq 10$ (20 knots)	350-500 (32.5-46.5)	18-40 (1.7-3.7)
Vessels in ice	500-750 (46.5-69.7)	35-90 (3.3-8.4)
Propeller surface	≥ 500 (46.5)	

Figure 59. Densités de courant de conception typiques [121]

4.2.3.1 Calcul du besoin en courant de protection

En se référant au Tableau 10, les besoins en courant de protection cathodique sont déterminés comme suit :

- Surface totale à protéger :

$$S = \text{Longueur} \times \text{Largeur du navire} = 129\text{m} \times 21\text{m} = 2709\text{m}^2 \quad (\text{Eq. 8})$$

- Besoin en courant de protection cathodique :

$$I = S * J \quad (\text{Eq. 9})$$

Avec :

I : Courant nécessaire pour le dimensionnement de la protection cathodique ;

J : Densité de courant de protection : 11-28mA/m² ; nous avons considéré 20 mA/m² pour le calcul.

S : Surface totale à protéger

À partir des informations mentionnées ci-haut, nous avons pu déterminer le besoin en courant en appliquant la formule $I = S * J = 2709 \times 20 = 54.18 \text{ mA}$.

Cependant, pour éviter le fonctionnement des transformateurs à pleine charge, un coefficient de sécurité de l'ordre 1,5 est pris en considération.

$$I_{totale} = I * 1,5 = 54,18 * 1,5 = 81,27A \quad (Eq. 10)$$

4.2.3.2 Sélection du redresseur

La sélection du redresseur doit prendre en considération le courant totale à débiter (81,27A). Pour cela, nous avons choisi le modèle « CAPAC® Impressed Current Cathodic Protection Systems » de marque « EVOQUA WATER TECHNOLOGIES ». Le système se compose d'anodes, d'électrodes de référence, de mises à la terre de l'arbre et d'alimentation/contrôleurs. Il fournit une quantité contrôlée de courant CC aux surfaces immergées pour empêcher l'action électrochimique de la corrosion galvanique. Le tableau de la figure 60 présente les caractéristiques du redresseur sélectionnés.

Input Power	400-480 volts AC, 3 phase, 50/60 Hz, 8.8 FLA@440VAC or 110-230 volts AC, 1 phase, 50/60Hz, 28 FLA @440VAC
Output Power	28 Volts DC nominal, up to 200 Amps DC (3 phase units), up to 100 Amps DC (1 phase units)
Approximate Dimensions	24"H x 20"W x 12"D
Approximate Weight	100 lbs. (3 phase units), 86 lbs. (1 phase units)

Figure 60. Les caractéristiques de redresseur utilisé dans le navire (Annexe 2)

Comme le voltage fourni à la sortie du redresseur est de 28V et que le courant à prévoir est de 81,27A, nous avons pu calculer la puissance nécessaire qui est recommandée pour le poste de protection cathodique et qui est défini par la formule suivante :

$$P = U * I = 28V * 81,27A = 2\,275,5W \approx 2,3KW \quad (Eq. 11)$$

4.3 CONFIGURATION DU SYSTEME HYBRIDE

La figure 61 montre le Système hybride qui est composé de deux génératrices diesel, de panneaux solaires photovoltaïques, d'une turbine du type Flettner, du banc de stockage, de contrôleurs, de convertisseurs CA/CC, et de convertisseurs CC/CA. Ce système a l'objectif de réduire l'utilisation totale des deux génératrices lorsque c'est possible (dépendamment de la disponibilité de la source renouvelable) et couvrir les besoins énergétiques nécessaires du système de protection cathodique (estimé par 81,27 A/ hr) et du navire en générale. La capacité énergétique renouvelable est d'environ 125 KW tel qu'il est illustré au tableau 12.

Tableau 12

Caractéristiques système hybride proposé

Description	Puissance (kW)	Courant débité (A)
2 x Génératrices auxiliaires, 440V	2 x 431	1959
Panneaux Solaire, 48V	5	104
Turbine Flettner, 440V	120	272
Banc de Batterie, 48V	200	4150

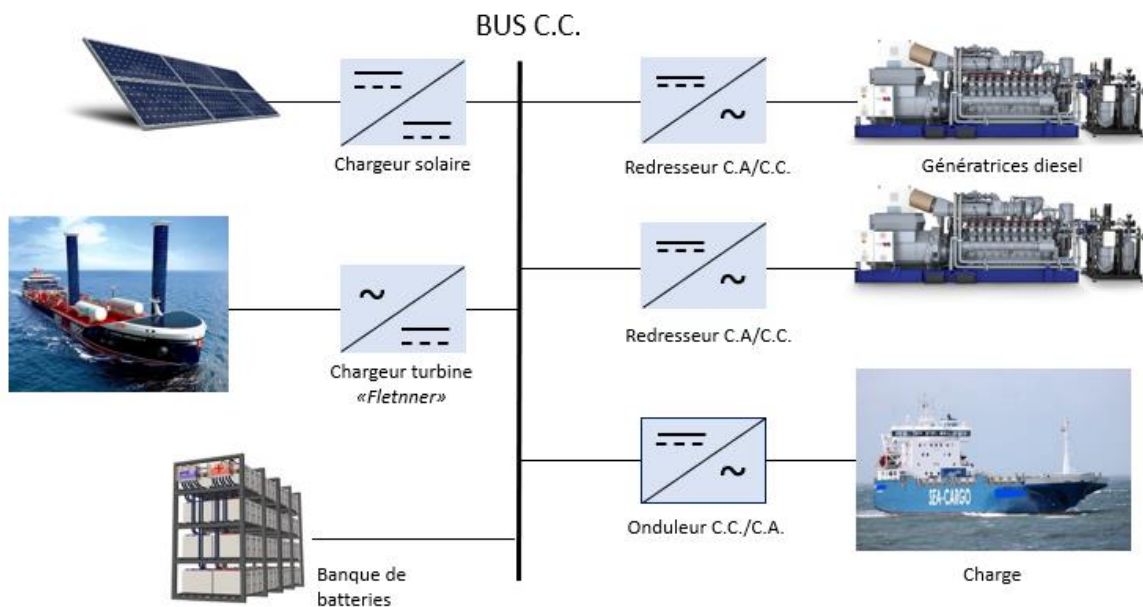


Figure 61. Schéma du système hybride proposé

4.4 MODELISATION DU SYSTEME

4.4.1 Modélisation génératrice

4.4.1.1 Modèle Mathématique

Le courant produit par un moteur diesel à un instant t est le produit du courant diesel nominal maximal possible $I_{dieselmax}$ et de la variable de décision de sortie diesel χ_{diesel} [122] :

$$I_{diesel}(t) = I_{dieselmax} \times \chi_{diesel}(t) \quad (Eq. 12)$$

Pour un nombre k de générateurs, le courant total fournit à un instant t est :

$$I_{diesel}(t) = \sum_{i=1}^k \chi_{diesel i}(t) \times I_{dieselmax} \times \varepsilon_i(t) \quad (Eq. 13)$$

Où $\varepsilon_i(t)$ est l'état du moteur à l'instant t , s'il est en marche $\varepsilon_i(t) = 1$ et s'il est en arrêt $\varepsilon_i(t) = 0$.

Un moteur diesel est caractérisé par sa consommation de carburant. La consommation horaire d'un générateur diesel est donnée par la formule suivante [123]:

$$q_{diesel}(t) = a \times P_{diesel}(t) + b \times P_{diesel,nom} \quad (Eq. 14)$$

Où :

a et b ($\frac{1}{kWh}$) sont des constantes ;

$P_{diesel}(t)$ et $P_{diesel,nom}$ sont la puissance délivrée à un instant t et la puissance nominale du générateur diesel, respectivement.

$$P_{diesel}(t) = \sqrt{3} \times I_{diesel}(t) \times U_{diesel,nom AC} \times \cos(\varphi) \quad (Eq. 15)$$

$$P_{diesel,nom} = \sqrt{3} \times I_{diesel,max} \times U_{diesel,nom AC} \times \cos(\varphi) \quad (Eq. 16)$$

$U_{diesel,nom AC}$ et $\cos(\varphi)$ sont tension nominale du générateur diesel et le facteur de puissance, respectivement.

Pour un nombre k de générateurs :

$$P_{diesel}(t) = \sum_{i=1}^k \sqrt{3} \times I_{diesel i}(t) \times U_{diesel i,nom AC} \times \cos(\varphi) \times \varepsilon_i(t) \quad (Eq. 17)$$

$$P_{diesel,nom} = \sum_{i=1}^k \sqrt{3} \times I_{diesel i,max}(t) \times U_{diesel i,nom AC} \times \cos(\varphi) \times \varepsilon_i(t) \quad (Eq. 18)$$

4.4.1.2 Modèle Matlab-Simulink de Générateur

Le modèle de la génératrice sur le logiciel Matlab-Simulink est illustré sur la figure 62.

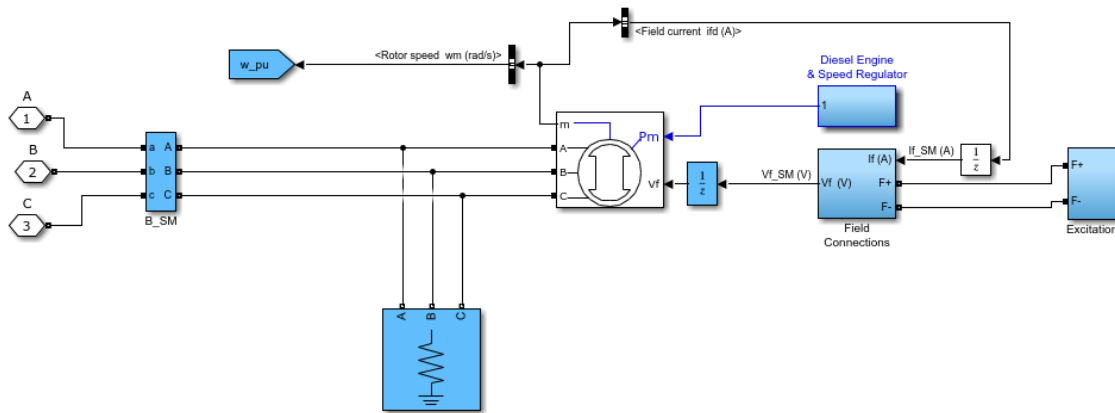


Figure 62. Modélisation de la génératrice sur Matlab-Simulink

4.4.2 Modélisation énergie solaire PV

4.4.2.1 Modèle Mathématique

Le générateur PV est un dispositif qui produit de l'électricité à partir de la lumière [124, 125]. La puissance générée par les panneaux photovoltaïques est fonction du rayonnement solaire et de la température, elle est donnée par (Eq.15) [125].

$$P_{pv} = N_{pv} \cdot P_{r-pv} \cdot \frac{G}{G_{ref}} \cdot [1 + K_t \cdot (T_c - T_{ref})] \quad (Eq. 19)$$

Où est N_{pv} le nombre de réseaux photovoltaïques, P_{r-pv} est la puissance nominale dans les conditions d'essai standard (kW), G est le rayonnement solaire (W/m^2), G_{ref} est de $1000 W/m^2$, K_t est de $-3,7 \cdot 10^{-3}$, T_{ref} est de $25 ^\circ C$ et est la température de la cellule ($^\circ C$). Ce dernier est fonction de la température ambiante (T_a), du rayonnement solaire (G) et de la température nominale de fonctionnement de la cellule (NOCT). Sa valeur peut être calculée par (Eq.16).

$$T_c = T_a + G \cdot \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \quad (Eq. 20)$$

La figure 62 et 64 présentent les spécificités solaires du port de Radés ($36.804752^\circ, 010.288036^\circ$) et du port Istanbul ($41.026535^\circ, 028.998413^\circ$) qui sont identifiés par le site « Atlas Solar Mondial » ainsi que les profils de radiation solaire annuel de chaque port (figures 63 et 65).

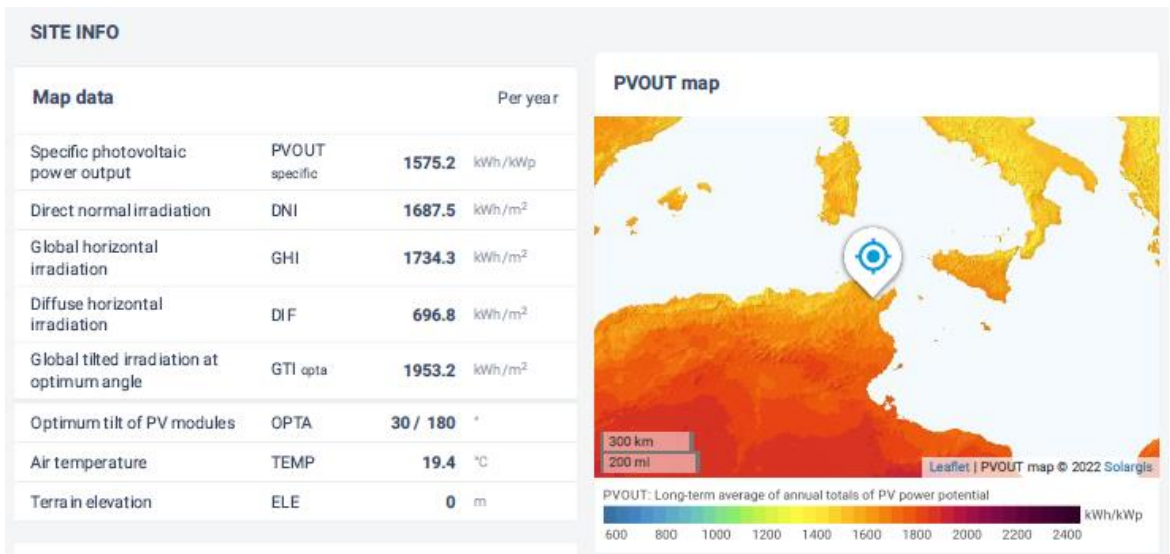


Figure 63. Résultats présentés par le site « Atlas Solar Mondial » pour le port Radés Tunis

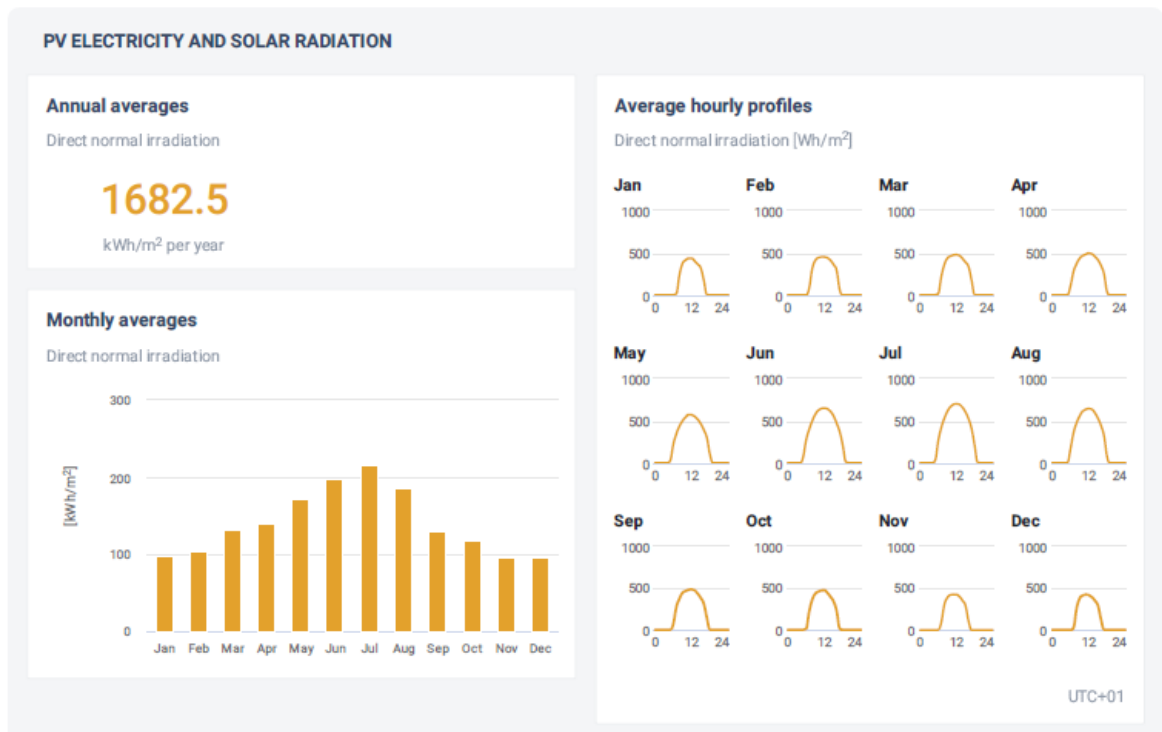


Figure 64. Profil de rayonnement solaire au port de Radés Tunis

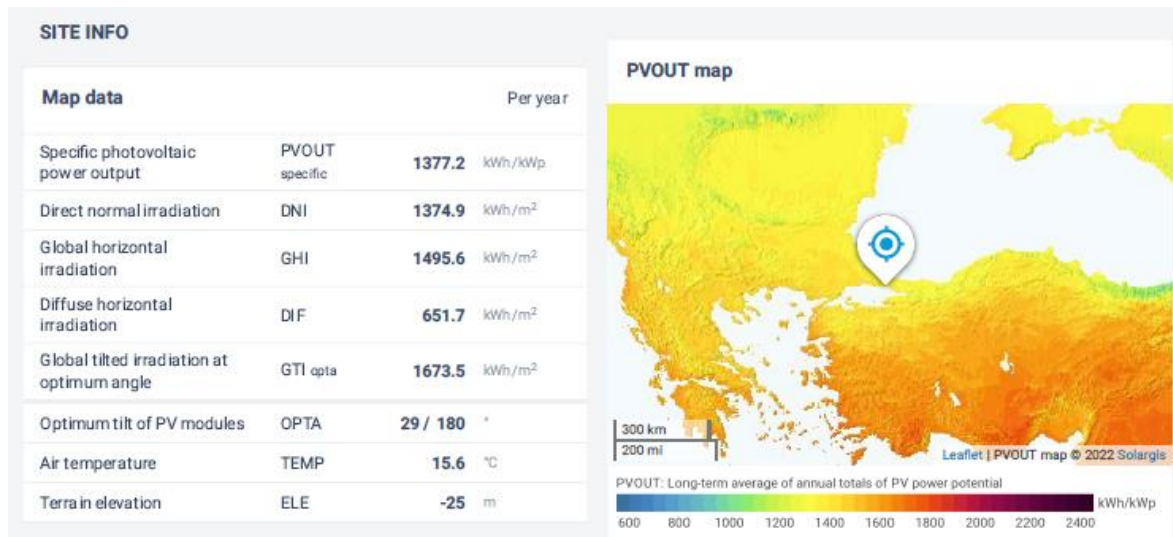


Figure 65. Résultats présentés par le site « Atlas Solar Mondial » pour le port Istanbul

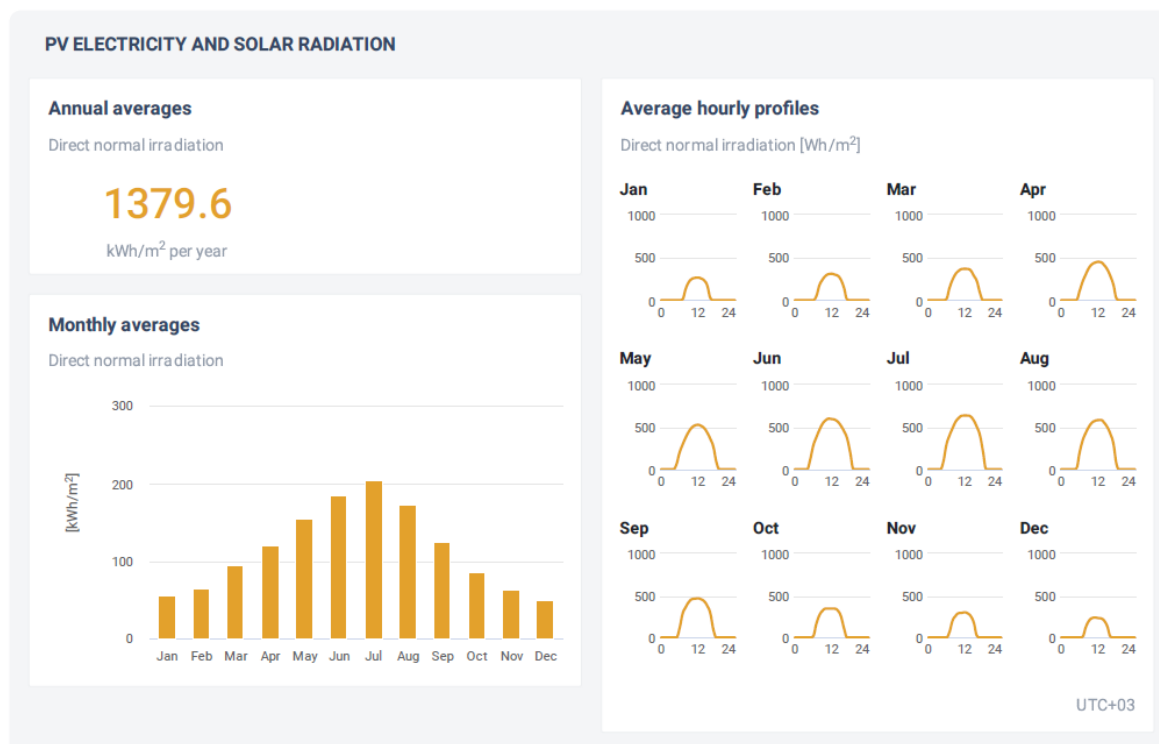


Figure 66. Profil de rayonnement solaire au port d'Istanbul

4.4.2.2 Algorithme de contrôle

L'un des plus grands défis de la production d'énergie solaire est le changement de la puissance produite lorsque l'irradiance et les températures continuent de changer. Cela cause une efficacité très faible de la production d'énergie solaire qui varie de 9 % à 20 % [126]. Cependant, si la puissance de sortie du réseau PV est maintenue au point de puissance maximum (MPP), l'efficacité donnée peut également être maintenue. L'algorithme P&O « Perturb & Observe » a été implémenté dans ce modèle. La figure 66 montre l'organigramme de l'algorithme pour $n > 0$, où n est le terme auquel les données sont demandées.

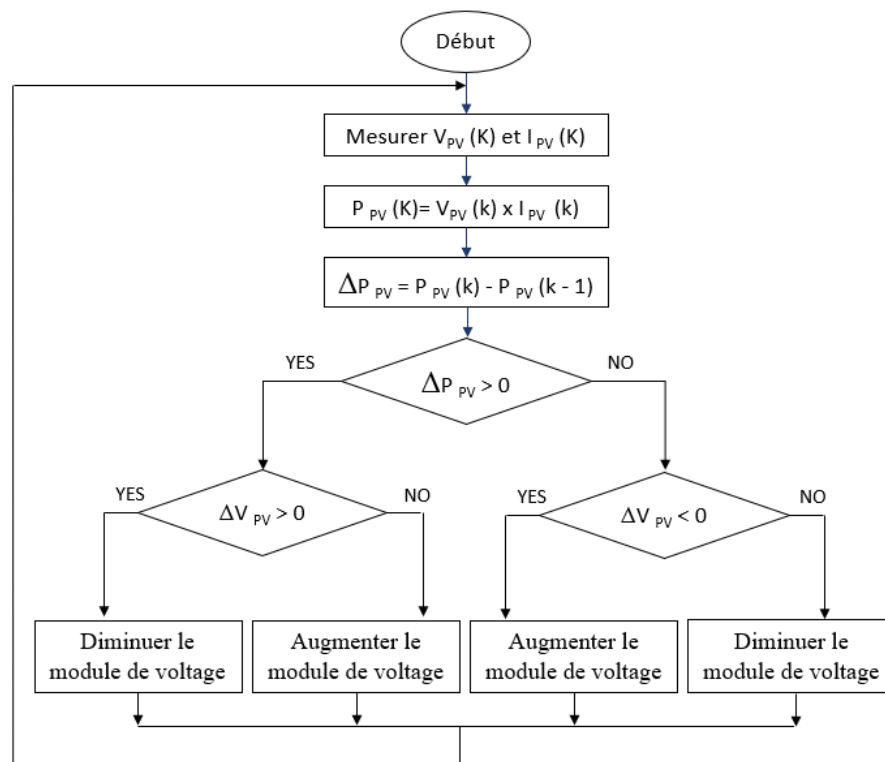


Figure 67. Organigramme de l'algorithme P&O

4.4.2.3 Modèle Matlab-Simulink PV

Figure 67 présente le modèle Matlab-Simulink des panneaux solaires. Le réseau des panneaux solaire est d'abord modélisés et simulés pour analyser les caractéristiques I-V et P-V. Les caractéristiques de sortie I-V et P-V basées sur la variation du rayonnement solaire et de la température des cellules sont montrées et analysées selon différents scénarios. La performance du réseau est également évaluée en simulant la puissance de sortie pour quatre niveaux d'irradiance différents (250W/m^2 , 500W/m^2 , 750W/m^2 et 1000W/m^2) à une température constante de 25°C .

La figure 68 montre les caractéristiques de sortie du panneau solaire P-V à température fixe de 25°C et l'irradiance variable du soleil de 1000 W/m^2 à 250 W/m^2 . Nous observons à partir de cette figure que lorsque l'irradiance du soleil diminue, la puissance de sortie solaire diminue en conséquence. De plus, on peut voir que la sortie P-V est une courbe non linéaire avec un point maximum. En fait, ce point correspond au Maximum Power Point (MPP) du panneau solaire. Pour que le panneau solaire continue de fonctionner à ce moment-là, il est essentiel de mettre en place un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking).

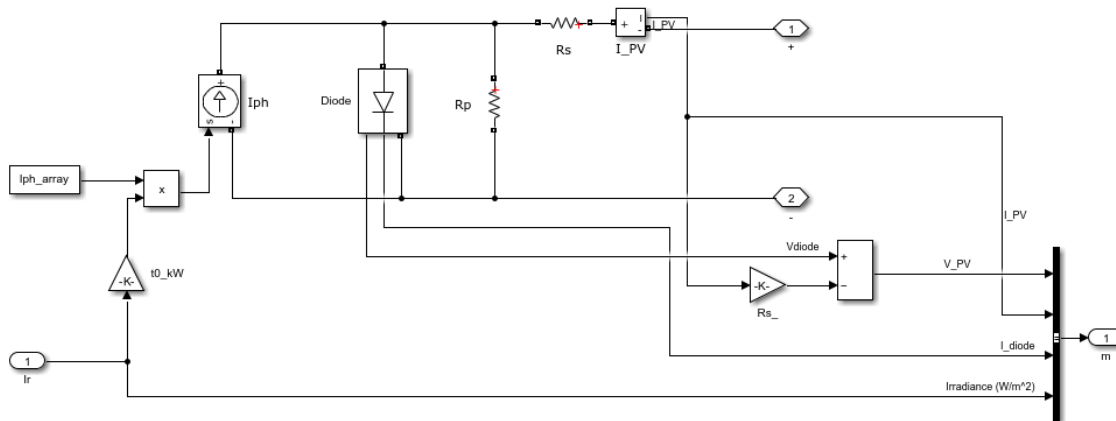


Figure 68. Modèle des panneaux solaires sur Matlab-Simulink

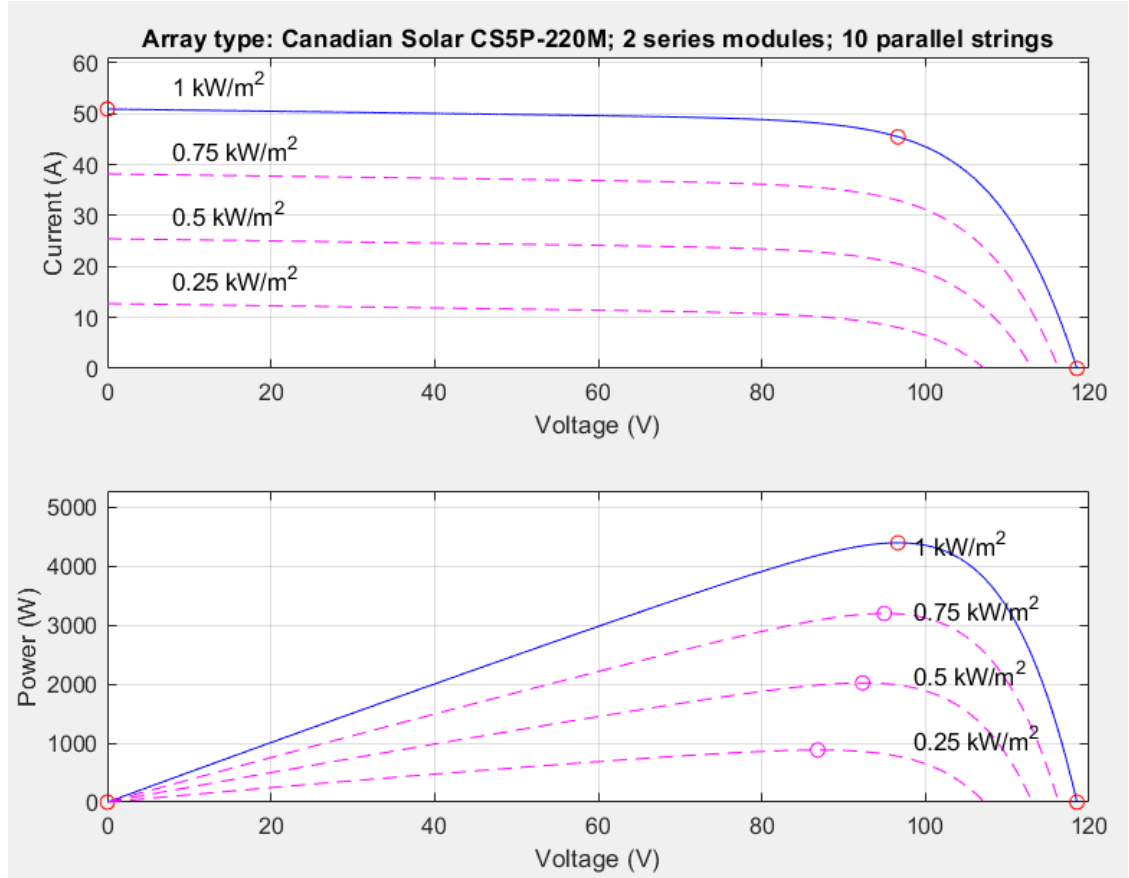


Figure 69. Les courbes V-I et V-P du réseau PV

4.4.3 Modélisation du rotor Flettner

Il faut prendre en considération que la modélisation technique du rotor Flettner est complexe et dépend de plusieurs facteurs. À titre d'exemple, Pour un navire en mouvement dont la vitesse est (V_s), la vitesse et la direction réelles du vent (V_t, γ) affecteront les performances du rotor Flettner. En effet, les changements de direction du vent réel sur un navire en mouvement entraînent un changement de la vitesse du vent apparente (V_a). Par conséquent, la vitesse du vent apparent affectera le rotor Flettner pour générer la poussée dans la direction du navire. La figure 70 illustre les angles entre les vitesses du navire et du vent ainsi que les deux systèmes de coordonnées. Le système de coordonnées (X_h, Y_h, Z_h)

est utilisé pour la coque du navire, tandis que le système de coordonnées (X_f, Y_f, Z_f) est introduit pour le parcours dans l'océan.

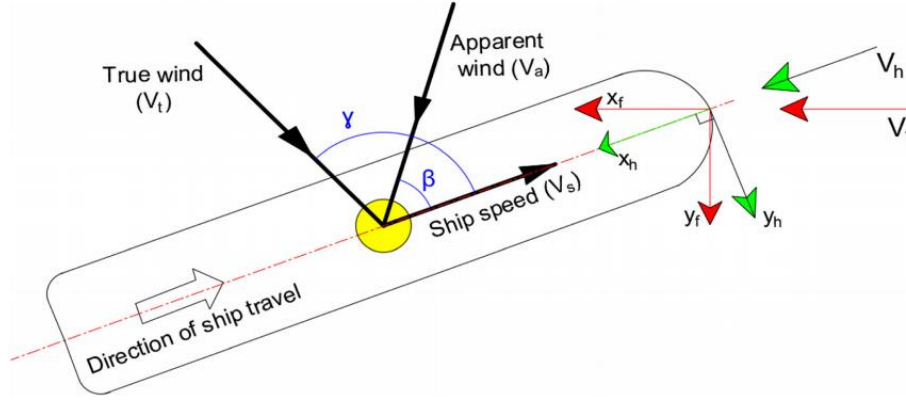


Figure 70. Angles de vitesse du navire et du vent

La vitesse du vent apparente (V_a) peut être calculée en fonction de la vitesse du navire (V_s) et de la vitesse du vent réel (V_t), comme l'exprime l'équation suivante en supposant un faible angle de dérive :

$$V_a = \sqrt{V_t^2 + V_s^2 - 2V_t \cos \gamma} \quad (\text{Eq. 21})$$

En outre, sa direction peut être déterminée à l'aide de l'équation (2) :

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{V_t^2 - V_a^2 - V_s^2}{-2V_a V_s} \right) \sqrt{V_t^2 + V_s^2 - 2V_t \cos \gamma} \quad (\text{Eq. 22})$$

La vitesse de rotation du rotor Flettner a une grande influence sur la puissance produite. Les rotors sont supposés être structurellement reliés à la coque du navire. Le coefficient de rotation (C_{rot}) est le rapport entre la vitesse de rotation du rotor (U_{rot}) et la vitesse du vent apparente, exprimée par le coefficient de rotation : $U_{rot} = C_{rot} * V_a$.

La figure 71 illustre les résultats de simulation de la puissance développée par un rotor Flettner à bord du navire sous six différentes vitesses de vent.

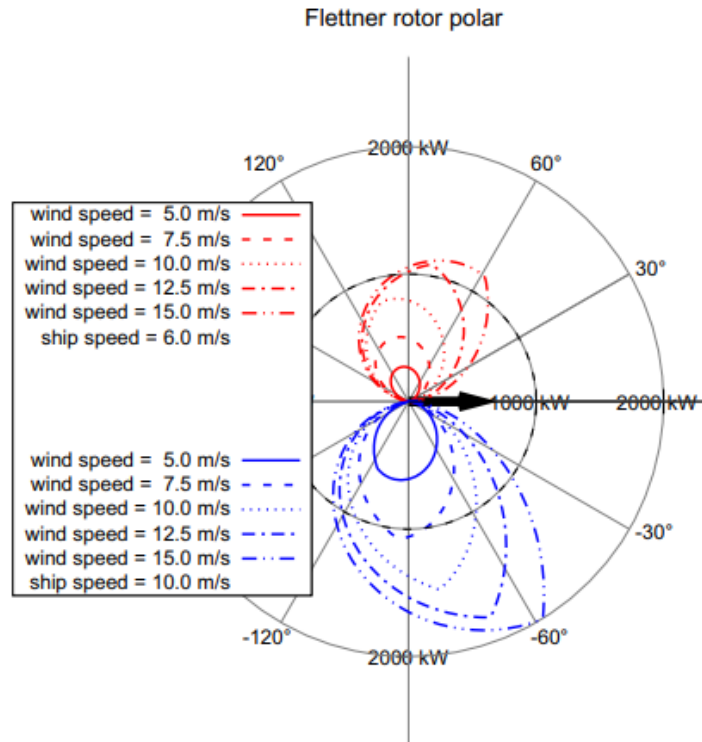


Figure 71. Puissance délivrée par le rotor Flettner en fonction de l'angle du vent réel pour un cap du navire de 0 comme indiqué par la flèche et pour une vitesse du navire de 6 m/s (moitié supérieure) et 10 m/s (moitié inférieure).

4.4.4 Modélisation du banc de batteries

4.4.4.1 Modèle Mathématique

Lorsque l'énergie produite par les systèmes renouvelables n'est pas suffisante pour répondre à la demande d'électricité, la batterie est sélectionnée pour combler le manque à gagner. L'énergie stockée dans la batterie E_{bat} peut être calculée par (Eq.18) et (Eq.19) [127].

- Pendant le chargement de la batterie :

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t - 1)(1 - \sigma) + \left[E_g(t) - \frac{E_L(t)}{\eta_{inv}} \right] \cdot \eta_b^{ch} \quad (Eq. 23)$$

- Pendant la décharge de la batterie :

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t - 1)(1 - \sigma) - \left[E_g(t) - \frac{E_L(t)}{\eta_{inv}} \right] / \eta_b^{dch} \quad (Eq. 24)$$

Où σ est le taux horaire d'autodécharge de la batterie, E_L est l'énergie requise par la charge, η_{inv} est l'efficacité de l'onduleur, η_b^{ch} et η_b^{dch} sont l'efficacité de chargement de la batterie et l'efficacité de décharge de la batterie. L'efficacité de charge et de décharge sont généralement comprise entre 0,65 et 0,85 [128]. Dans cette étude, η_b^{ch} et η_b^{dch} sont égales 0,85. E_g est l'énergie produite par les énergies renouvelables, elle est donnée par (Eq.20).

$$E_g(t) = E_{pv}(t) + E_{wt}(t) \quad (Eq. 25)$$

4.4.4.2 Algorithme de contrôle

L'énergie excédentaire du système PV et du WT peut être stockée dans la batterie. L'énergie stockée est utilisée pour compléter la demande de charge non satisfaite lorsque la puissance nette générée par le système WT et PV est insuffisante pour répondre à la demande de charge [20].

Pour un fonctionnement sûr de la batterie, la limite de stockage est limitée selon les limites spécifiées. La capacité totale des batteries est de 200kWh, avec seulement 160kWh utiles en raison des 30% DOD « Depth Of Discharge of the battery » sélectionnés (figure 72). L'organigramme de l'algorithme de contrôle de la batterie est présenté à la figure 73.

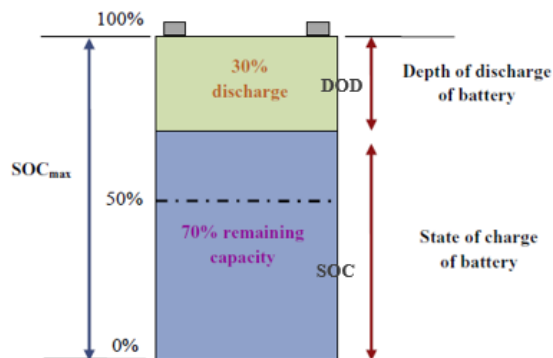


Figure 72. Schéma de l'état de charge de la batterie [127].

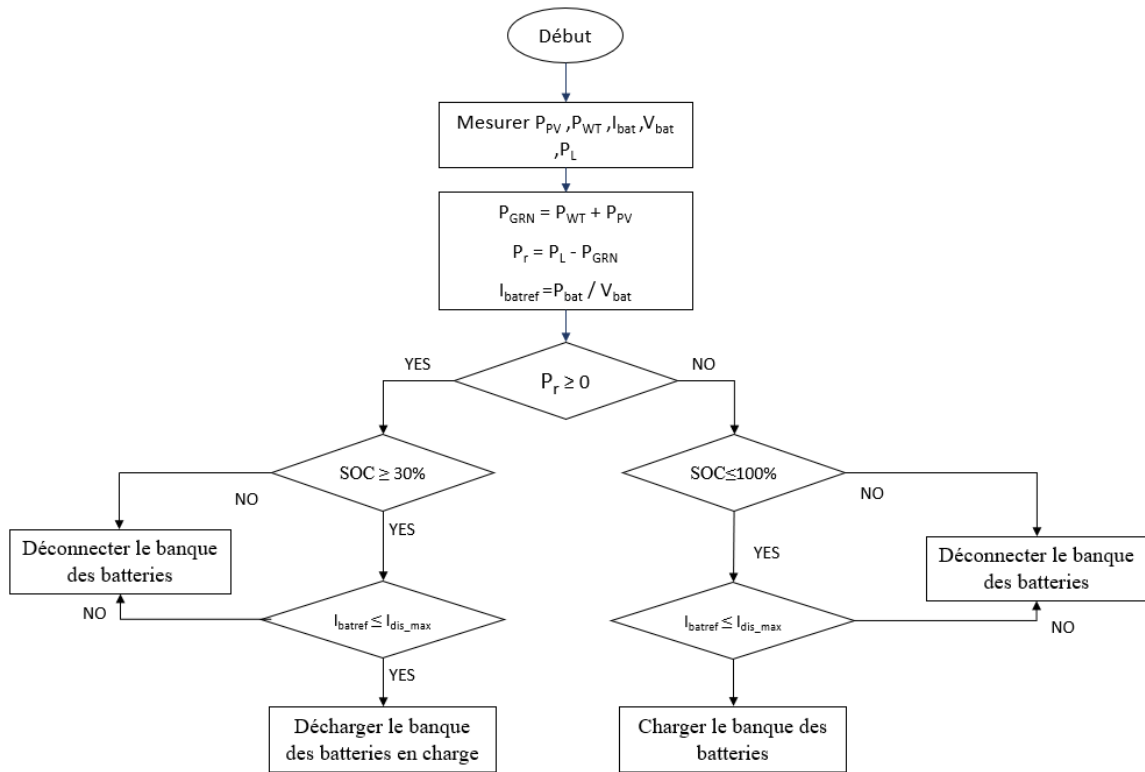


Figure 73. Organigramme de l'algorithme de contrôle de la batterie.

4.4.4.3 Modèle Matlab-Simulink BAT

Le modèle des batteries sur le logiciel Matlab-Simulink illustré sur la figure 74.

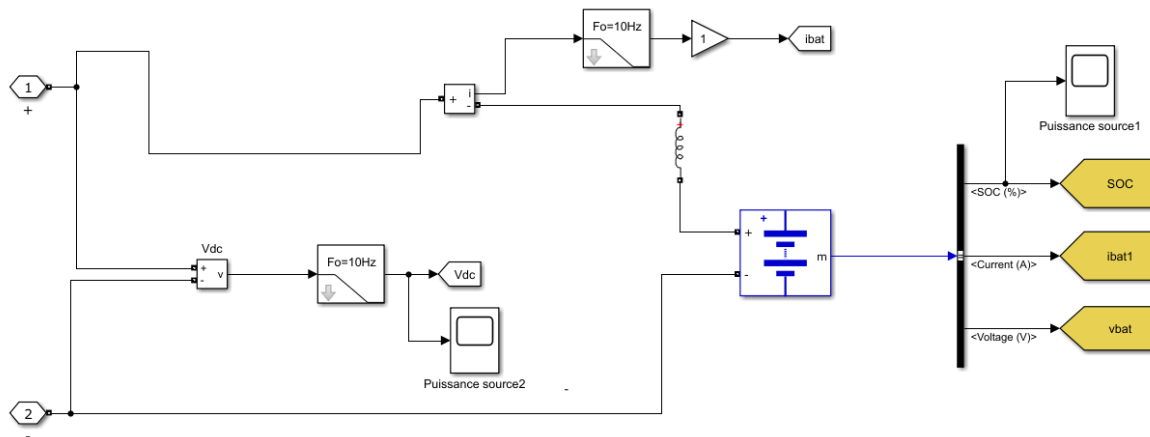


Figure 74. Modèle des batteries sur Matlab-Simulink

4.4.5 Modèle Simulink du Système Global

Le modèle Simulink d'un système éolien solaire PV-WT hybride fournissant un modèle d'unité CP est construit en connectant différents blocs de MATLAB/Simulink. L'éolienne (Flettner), le système PV, les batteries, les MPPT et les modèles d'unités CPU sont tous configurés séparément, puis convertis en blocs sous-systèmes pour simplifier le diagramme global. Le modèle global du système est présenté à la figure 75. La puissance de sortie du système, qui provient à la fois de l'énergie PV et de l'éolienne (WT), ainsi que d'une batterie, selon les conditions météorologiques, est utilisée pour alimenter le système de PC. Les entrées du système global sont la vitesse du vent, l'irradiance solaire, la température ambiante et l'angle de pas de la turbine.

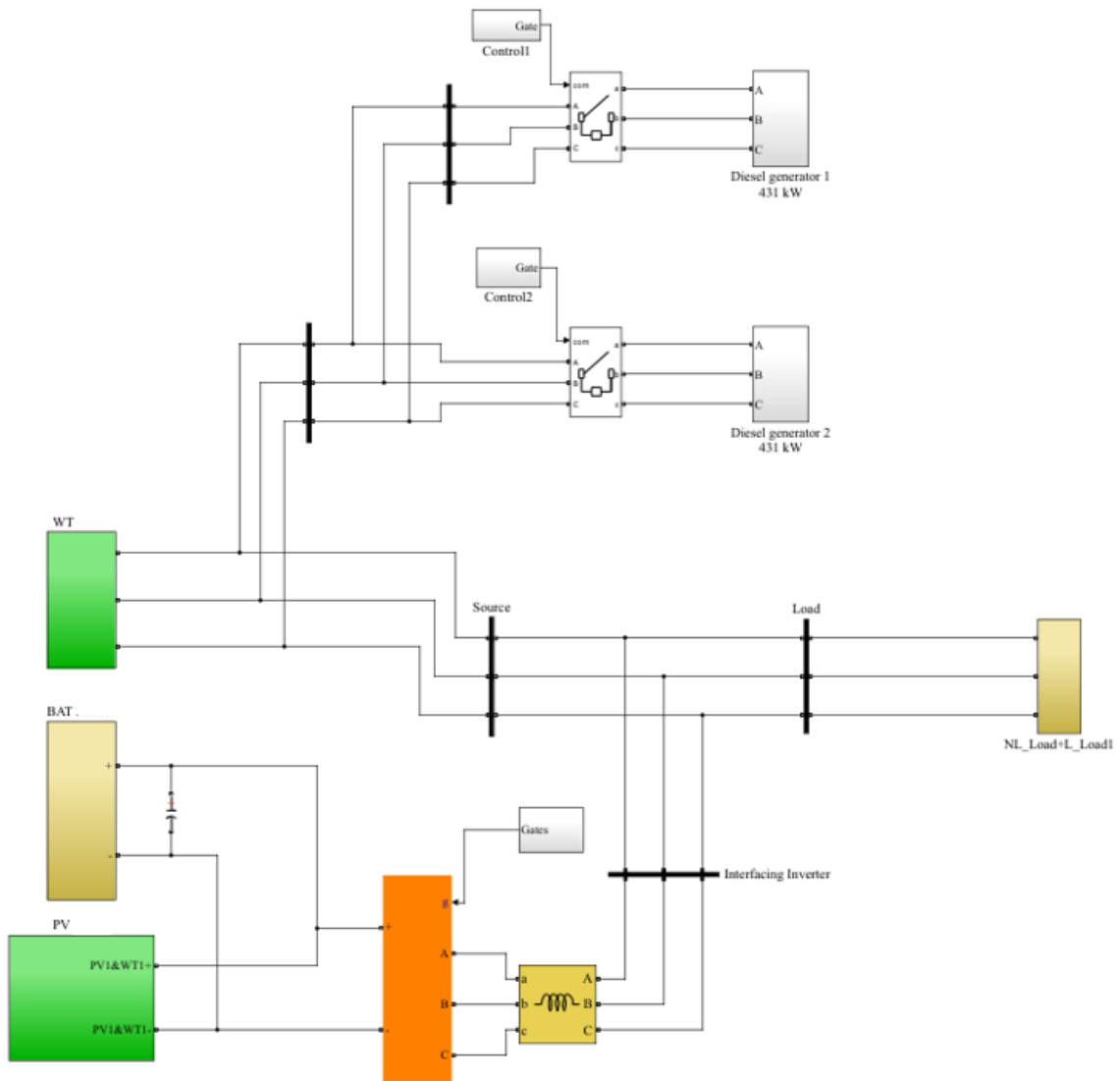


Figure 75. Modèle Simulink d'un système hybride WT-PV avec Batteries de stockage

4.5 ÉTUDE FINANCIERE

4.5.1 Coût actuel net (NPC)

4.5.1.1 Calcul Coût actuel net (NPC)

Le coût actuel net (ou coût du cycle de vie) d'une composante est la valeur actualisée de tous les coûts d'installation et d'exploitation de cette composante pendant la durée de vie du projet, moins la valeur actualisée de tous les revenus qu'elle génère pendant la durée de vie du projet. L'objectif du CNP peut être représenté comme suit [129]:

$$NPC = \sum_{j=1}^L P_j (CC_j + RC_j \cdot K_j + MC_j \cdot PWA(i_r, R)) \quad (Eq. 26)$$

Où L est le nombre de composants dans le système hybride ($L=5$), P_j est la puissance nominale de chaque composant, CC_j est le coût de capital de chaque composant, RC_j est le coût de remplacement de chaque composant, MC_j est le coût de Opération & Maintenance de chaque composant, K_j est calculé à partir l'équation (Eq.22), pour les sources ayant une durée de vie égale à la durée de vie du projet, K_j est égal à zéro et $PWA(i_r, R)$ est utilisé pour estimer la valeur actuelle des coûts annuels d'entretien et d'exploitation sur la durée de vie du projet, il est donné par (Eq.23) ;

$$K_j = \sum_{n=1}^{l_1} \frac{1}{(1 + i_r)^{n \cdot l_2}} \quad (Eq. 27)$$

$$PWA(i_r, R) = \frac{(1 + i_r)^R - 1}{i_r(1 + i_r)^R} \quad (Eq. 28)$$

Où l_1 est la fréquence de remplacement d'une source renouvelable, l_2 est la durée de vie du composant, i_r est le taux d'intérêt ($i_r=0,06$) et R est la durée de vie du projet est égale 20 ans.

Le coût de capital CC, le coût de remplacement RC, le coût d'Opération & Maintenance et la durée de vie de chaque composant sont identifiés dans le tableau 13 ;

Tableau 13

Caractéristiques financière des composantes du système hybride proposé [116, 130]

	PV	WT	BAT	FG
Capacité Nominale (kW)	5	120	200	431
Coût de capital CC (USD/kW)	2000	5000	343	3000
Coût de remplacement RC (USD/kW)	2000	5000	343	2000
Coût de Opération & Maintenance O&M (USD/kW)	10	150	0	87
Durée de vie (an)	20	20	5	25

La figure 76 présente le coût du cycle de vie des générateurs, du réseaux solaires, de la turbine éolienne, du banc de batteries et du système global.

La figure 77 présente la contribution de NCP de chaque composant par rapport le coût du cycle de vie totale du projet.

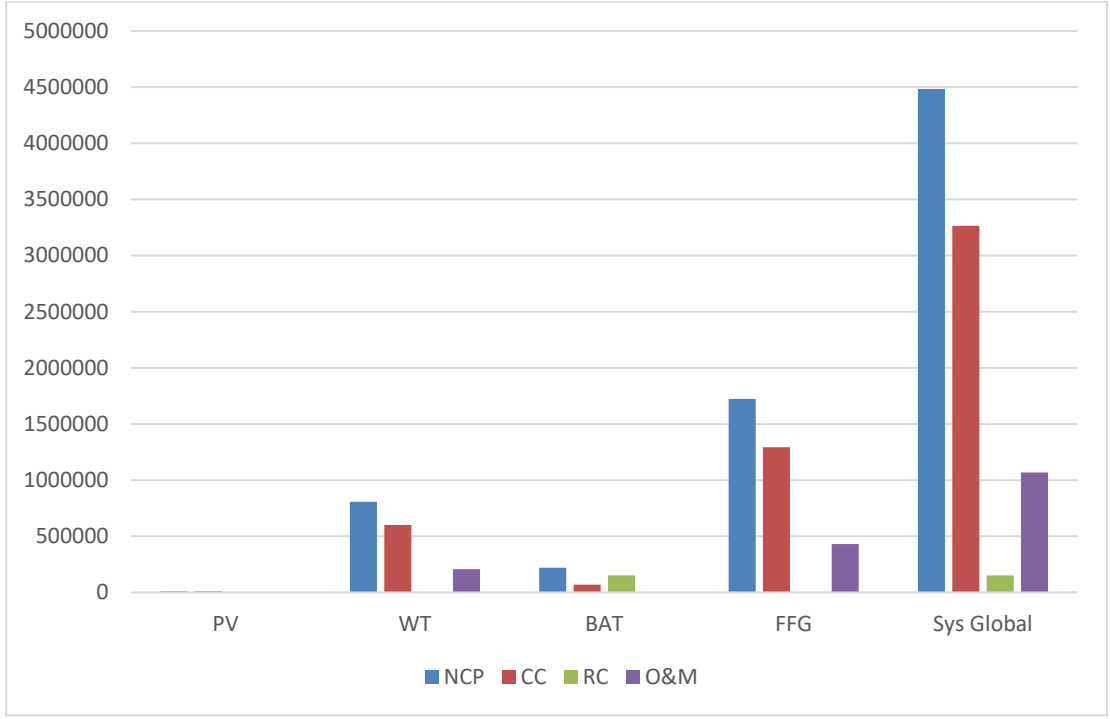


Figure 76 Coût du cycle de vie NCP des composantes du système hybride

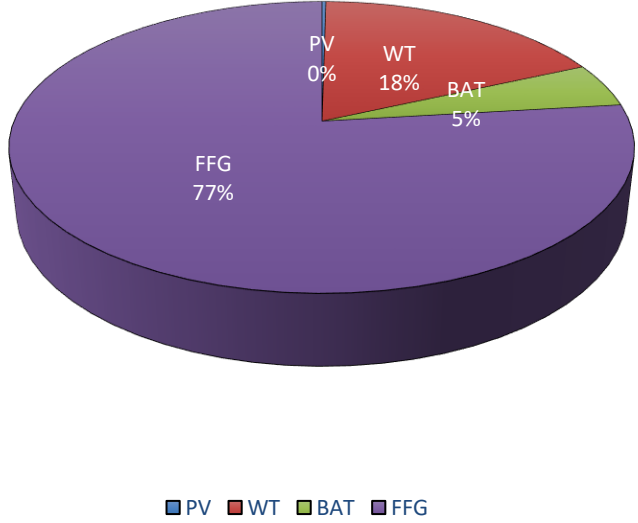


Figure 77 Contribution de chaque composante au NCP

4.5.1.2 Interprétation des résultats

Le coût du cycle de vie des générateurs, du réseaux solaires, de la turbine éolienne, du banc de batteries et du système global sont égales 10573 USD, 806459 USD, 219828 USD, 1723088 USD et 4483036 USD, respectivement (figure 76).

Dans ce travail, l'intégration des systèmes d'énergie renouvelable couvre 15% de la demande énergétique totale du navire et son coût de cycle de vie est égal 1036860 USD qui présente 23% du NPC totale du projet (figure 77), par conséquent, le coût actuel net des systèmes énergétiques renouvelables est plus important que celle d'énergie fossiles.

4.5.2 Coût de la consommation du carburant en intégrant l'énergie renouvelables

4.5.2.1 Calcul du coût de la consommation du carburant

Dans cette partie, nous allons recalculer la consommation du carburant de la partie 4.4.2 sachant nous avons considéré qu'une seule génératrice. En prenant en considération les cas suivantes :

- Cas 1 : 10% de la charge demandée pendant la navigation et 10% de la charge demandée aux ports fournirent par les systèmes de ER.
- Cas 2 : 10% de la charge demandée pendant la navigation et 20% de la charge demandée aux ports fournirent par les systèmes de ER
- Cas 3 : 20% de la charge demandée pendant la navigation et 20% de la charge demandée aux ports fournirent par les systèmes de ER.
- Cas 4 : 20% de la charge demandée pendant la navigation et 30% de la charge demandée aux ports fournirent par les systèmes de ER.

Le tableau 14 résume les résultats de calcul trouvés pour les quatre cas précédentes sachant la durée totale du voyage 6.5 jours : 5.5 jours de navigation et un jour de

charge/décharge des cargaisons aux ports. Le prix du diesel est considéré comme 1.352 UDS/litre [131].

Tableau 14
Évaluation du coût de la consommation de carburant.

	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	Navig	Ports	Navig	Ports	Navig	Ports	Navig	Ports
Percentage de consommation du carburant %	30	75	30	65	20	65	20	55
Puissance demandé (kW)	130	324	130	281	82	281	82	237
Consommation de carburant (L/hr)	54.4	106.1	54.4	91	34.3	91	34.3	87
Coût du carburant (UDS/hr)	73.5	143.5	73.5	124.4	46.4	124.4	46.4	117.6
Coût du carburant/ Voyage (USD)	13146		12688		9111		8948	
Coût gagné/ Voyage (USD)	2694		3152		6729		6892	

4.5.2.2 Interprétation des résultats

Le coût du carburant du cas1, 2, 3 et 4 sont 13146 USD, 12688 USD, 9111 USD et 8948 USD, respectivement pour un voyage complet (charge- navigation- décharge).

À la suite de l'intégration de l'énergie renouvelable, on gagne en termes de taux de consommation de carburant 2694 USD, 3152 USD, 6729 USD, 6892 USD pour les cas 1,2,3 et 4, respectivement.

Donc la récupération du coût de cycle de vie des systèmes renouvelables (le réseau PV, l'éolienne et le banc des batteries) se fait après 385, 329, 154, 150 voyages pour les cas 1, 2, 3 et 4, respectivement (figure 74).

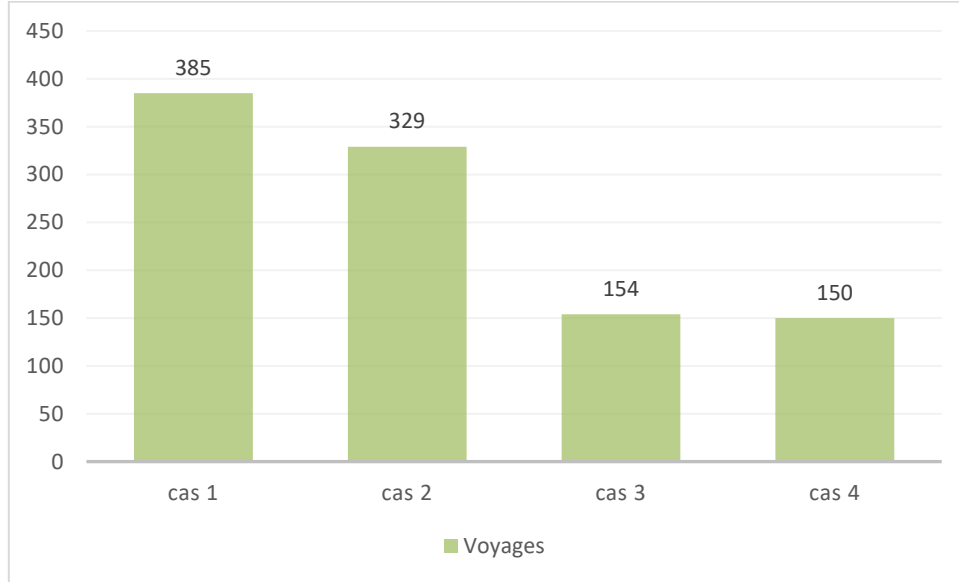


Figure 78 Période de récupération du coût de chaque cas

4.6 CONCLUSION

Un système d'alimentation hybride est une source d'électricité plus fiable, plus économique et plus appropriée. Dans cette étude, nous avons proposés un Grid hybride basé sur énergie RE-NRE composés par des panneaux solaires-éolien-batteries- génératrices pour fournir l'électricité d'un navire et essentiellement assurer l'alimentation du système de protection cathodique. Pour cela, une modélisation mathématique a été effectuée pour les composants du système. Des algorithmes de contrôle ont été proposés l'un dans l'objectif de maintenir le point de puissance maximum (MPP) donc l'amélioration de l'efficacité du système et l'autre pour gérer le chargement et déchargement de batterie. Le système global a été modélisé à l'aide de logiciel de simulation Matlab-Simulink.

L'étude financière du système, nous a permis constater que malgré que le coût de cycle de vie des systèmes renouvelables est plus élevé que celui d'énergie fossile, ce dernier peut être récupéré après un certain nombre de voyages en fonction de la cadence d'utilisation des énergies renouvelables par exemple pour l'utilisation de 10% de la charge demandée pendant la navigation et 10% de la charge demandée par les systèmes de ER, nous pouvons récupérer

le coût de cycle de vie des systèmes ER après 385 voyages tandis que pour l'utilisation de 20% de la charge demandée pendant la navigation et 30% de la charge demandée par les systèmes de ER, nous pouvons récupérer le coût de cycle de vie des systèmes ER après 150 voyages.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La corrosion est une cause majeure de détérioration structurale des structures marines. Elle affecte la durée de vie des équipements et le coque du navire et aussi peut entraîner une défaillance structurale, des fuites, des pertes de produits, de la pollution de l'environnement et des pertes de vie.

La protection cathodique (PC) est la technique la plus largement adoptée au monde pour garantir l'intégrité des structures enfouies ou immergées contre la corrosion. Pour les grands navires, la méthode de protection cathodique établie est la protection par courant imposé (ICCP) où ils utilisent des anodes connectées à une source d'alimentation dans le but de créer l'équilibre électrochimique. Généralement, la source d'alimentation est identifiée les génératrices du navire.

Avec le développement rapide de l'industrie du transport maritime et d'après les restrictions imposées par l'Organisation Maritime Internationale de réduire les impacts environnementaux négatifs résultant de ces émissions, l'intégration des énergies renouvelables dans les navires sont de plus en plus appliqués.

Ce travail a pris l'approche d'intégration des sources d'alimentation basé sur l'énergie durable et des dispositifs de stockages avec les sources d'énergies conventionnelles dans le but de diminuer la demande sur l'énergie fossile.

Un système hybride basé sur l'énergie renouvelable offre une meilleure option qu'un système à source unique en termes de coût, de fiabilité et d'efficacité. Une ou plusieurs sources d'énergie peuvent être utilisées dans des systèmes hybrides à base d'énergie renouvelable qui peuvent fonctionner en mode autonome ou en mode connecté au réseau. Différents types de combinaisons de systèmes hybrides sont possibles en fonction des besoins et de la disponibilité des ressources à un endroit particulier. La présente étude, est concentrés sur les systèmes hybrides photovoltaïques-éoliens, car le solaire et l'éolien sont les sources d'énergie les plus prometteuses en raison de leur avantage naturel complémentaire. Les

vitesses du vent sont souvent faibles dans les périodes où la ressource solaire est à son meilleur. D'autre part, le vent est souvent plus fort dans les saisons où il y a moins de ressources solaires. Mais ces sources dépendent de conditions climatiques imprévisibles, ce qui rend la conception d'un système hybride complexe. Afin d'améliorer la fiabilité du système hybride PV-WT, les générateurs diesel et un banc des batteries sont également être intégré. Ce système hybride peut répondre aux exigences de base en matière de puissance dans une télécommande non électrifiée.

ANNEXES

Annexe 1 : Caractéristique du moteur C15 diesel

Cat® D450 GC DIESEL GENERATOR SETS



Standby: 60 Hz, 480V & 600V



Image shown might not reflect actual configuration

Engine Model	Cat® C15 In-line 6, 4-cycle diesel
Bore x Stroke	137mm x 171mm (5.4in x 6.8in)
Displacement	15.2 L (928 in³)
Compression Ratio	16.1:1
Aspiration	Turbocharged Air-to-Air Aftercooled
Fuel Injection System	MEUI
Governor	Electronic ADEM™ A4

Standby	Performance Strategy
450 ekW, 562.5 kVA	EPA Certified for Stationary Emergency Application

PACKAGE PERFORMANCE

Performance	Standby	
Frequency	60 Hz	
Gen set Power Rating	562.5 kVA	
Gen set power rating with fan @ 0.8 power factor	450 ekW	
Emissions	EPA TIER 3	
Performance Number	DM8153	
Fuel Consumption		
100% load with fan	131.7 L/hr	34.8 gal/hr
75% load with fan	106.1 L/hr	28.0 gal/hr
50% load with fan	79.1 L/hr	20.9 gal/hr
25% load with fan	45.1 L/hr	11.9 gal/hr
Cooling System ¹		
Radiator air flow restriction (system)	0.12 kPa	0.48 in. Water
Radiator air flow	720 m³/min	25426 cfm
Engine coolant capacity	20.8 L	5.5 gal
Radiator coolant capacity	54 L	14 gal
Total coolant capacity	75 L	20 gal
Inlet Air		
Combustion air inlet flow rate	41.9 m³/min	1479.3 cfm
Max. Allowable Combustion Air Inlet Temp	48 °C	118 °F
Exhaust System		
Exhaust stack gas temperature	491.3 °C	916.3 °F
Exhaust gas flow rate	111.3 m³/min	3929.1 cfm
Exhaust system backpressure (maximum allowable)	10.0 kPa	40.0 in. water
Heat Rejection		
Heat rejection to jacket water	177 kW	10047 Btu/min
Heat rejection to exhaust (total)	505 kW	28699 Btu/min
Heat rejection to aftercooler	133 kW	7546 Btu/min
Heat rejection to atmosphere from engine	70 kW	4000 Btu/min
Heat rejection from alternator	26 kW	1462 Btu/min

LEH201004

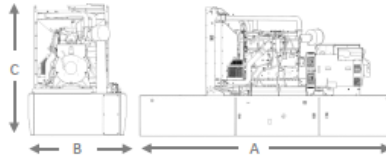
1/2

Cat® D450 GC DIESEL GENERATOR SETS



Emissions (Nominal) ¹	Standby	
NOx	2105.4 mg/nm ³	4.54 g/bhp-hr
CO	303.9 mg/nm ³	0.63 g/bhp-hr
HC	8.9 mg/nm ³	0.02 g/bhp-hr
PM	9.5 mg/nm ³	0.03 g/bhp-hr
Alternator ²		
Voltages	480V	600V
Motor Starting Capability @ 30% Voltage Dip	871	1103
Current	676.6	541.3
Frame Size	M3136L4	M3136L4
Excitation	S.E.	AREP
Temperature Rise	105°C	105°C

WEIGHTS & DIMENSIONS – OPEN SET



Base	Dim "A" mm (in)	Dim "B" mm (in)	Dim "C" mm (in)	Generator Set Weight kg (lb)
Skid (Wide Base)	4815 (189.6)	1630 (64.2)	2034 (80.1)	3707 (8172.5)
Integral Tank base	4815 (189.6)	1630 (64.2)	2584 (101.7)	4644 (10238.3)

DEFINITIONS AND CONDITIONS

¹For ambient and altitude capabilities consult your Cat dealer. Air flow restriction (system) is added to existing restriction from factory.

²Emissions data measurement procedures are consistent with those described in EPA CFR 40 Part 89, Subpart D & E and ISO6179-1 for measuring HC, CO, PM, NOx. Data shown is based on steady state operating conditions of 77° F, 26.42 in Hg and number 2 diesel fuel with 35° API and LHV of 19,200 BTU/lb. The nominal emissions data shown is subject to instrumentation, measurement, facility and engine to engine variations. Emissions data is based on 100% load and thus cannot be used to compare to EPA regulations which use values based on a weighted cycle.

³UL 2200 Listed packages may have oversized generators with a different temperature rise and motor starting characteristics. Generator temperature rise is based on a 40° C ambient per NEMA MG1-32.

FUEL TANK CAPACITY

Tank Design	Total Capacity		Useable Capacity	
	Litre	Gallon	Litre	Gallon
Integral	3671	969.7	3323	877.8

APPLICABLE CODES AND STANDARDS:

AS1269, CSA C22.2 No100-04, UL142, UL489, UL868, UL2200, NFPA70, NFPA70, NFPA99, NFPA110, IEC, IEC60034-1, ISO3046, ISO6628, NEMA MG1-22, NEMA MG1-31, 2006/95/EC, 2006/42/EC, 2004/109/EC.

Note: Codes may not be available in all model configurations. Please consult your local Cat Dealer representative for availability.

STANDBY: Output available with varying load for the duration of the interruption of the normal source power. Average power output is 70% of the standby power rating. Typical operation is 200 hours per year, with maximum expected usage of 500 hours per year.

RATINGS: Ratings are based on SAE J1349 standard conditions. These ratings also apply at ISO3046 standard conditions.

Fuel Rates are based on fuel oil of 35° API (16° C (60° F)) gravity having an LHV of 42 700 kJ/kg (18 200 Btu/lb) when used at 25° C (85° F) and weighing 688.9 g/litre (7.001 lbs/U.S. gal.). Additional ratings may be available for specific customer requirements, contact your Caterpillar representative for details. For information regarding Low Sulfur fuel and Biodiesel capability, please consult your Cat dealer.

LEHE2010-04 (05-20)

www.Caterpillar.com

©2020 Caterpillar. All rights reserved. Models and specifications are subject to change without notice. The International System of Units (SI) is used in this publication. CAT, CATERPILLAR, their respective logos, Caterpillar Corporate Yellow, the Power Edge and the Mountain logo, trade dress as well as corporate and product identity used herein, are trademarks of Caterpillar and may not be used without permission.



2/2

Annexe 2 : Caractéristique du redresseur CAPAC®



CAPAC® Impressed Current Cathodic Protection Systems



THE BEST CHOICE FOR SHIP CORROSION PROTECTION

With thousands of world-wide installations, CAPAC® Impressed current cathodic protection (ICCP) systems are the long-term solution for preventing electrolysis and galvanic corrosion from attacking submerged surfaces. The system consists of anodes, reference electrodes, shaft grounds and power supply/controllers. It delivers a controlled amount of DC current to submerged surfaces to prevent the electrochemical action of galvanic corrosion.

CAPAC systems have long been recognized as the superior alternative to other cathodic protection systems, which require frequent replacement and experience increased fuel and maintenance costs. They are approved by all classification societies for all types of vessels. CAPAC systems are the ultimate solution for protecting the hulls of naval and commercial ships, ferries and workboats, as well as small boats and luxury yachts.

Evoqua has been a trusted supplier of CAPAC systems to naval forces around the world for over 70 years.



CAPAC system power supply controller (PSC)

CAPAC SYSTEM FEATURES

- Simple operation through automatically controlled equipment ensures reliable operation
- Anodes, reference cells and control systems maintain just the right amount of protection for underwater hulls

CAPAC SYSTEM BENEFITS

- Only one installation required for the life of the vessel
- Increases life of rudders, shafts, struts and propellers
- Decreases drydock maintenance
- Reduces operational costs
- Reduces fuel consumption

APPLICATIONS

- Naval vessels
- Commercial vessels
- Cruise ships
- Ferries
- Work boats
- Yachts and small crafts
- Structures

POWER SUPPLY CONTROLLER

The CAPAC® system power supply controller (PSC) is an automatic controller with a high frequency switch mode DC power supply with up to four (4) output circuits to power the anodes. A painted carbon steel, IP54 wall-mounted enclosure contains filtered fan cooling and a touch screen for intuitive, state-of-the-art user operation.

The touch screen displays operating parameters, including total anode current and hull potential, system set point, data trending, system self-diagnostics and system condition assessment for reporting "Normal," "Over" and "Under" hull protection conditions. A dry contact for alarm annunciation to a remote alarm indicator is also included. The PSC also provides a manual override capability and 0% leakage current.

Zone-to-zone communication control is available via ethernet connection. Communication to the ship's systems is available via a RS485 connection. System parameter history is accessible through data logs stored in an easily retrievable USB thumb drive.



CAPAC system power supply controller (PSC)

PSC PARAMETERS

Input Power	400-480 volts AC, 3 phase, 50/60 Hz, 8.8 FLA@44OVAC or 110-230 volts AC, 1 phase, 50/60Hz, 28 FLA @44OVAC
Output Power	28 Volts DC nominal, up to 200 Amps DC (3 phase units), up to 100 Amps DC (1 phase units)
Approximate Dimensions	24"H x 20"W x 12"D
Approximate Weight	100 lbs. (3 phase units), 86 lbs. (1 phase units)

PSC FEATURES

- Compact design
- Easy to read, intuitive color HMI display
- Configurable up to three zones
- Data logging for record of system operation
- Trending screens for system monitoring
- Remote alarm annunciation
- Automatic or manual operation



725 Wootan Road, Colorado Springs, CO 80915 USA

+1-800-466-7873 evoqua.com



Assembled in the USA

CAPAC is a trademark of Evoqua Water Technologies LLC, its subsidiaries or affiliates in some countries.

All information presented herein is believed reliable and in accordance with accepted engineering practices. Evoqua makes no warranties as to the completeness of this information. Users are responsible for evaluating individual product suitability for specific applications. Evoqua assumes no liability whatsoever for any special, indirect or consequential damages arising from the sale, resale or misuse of its products.

© 2020 Evoqua Water Technologies LLC Subject to change without notice MA-CAPAC-DS-1220

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. G. Fontana, Ed. *Corrosion Engineering*. New York, 1986.
- [2] Y. Wang, J. A. Wharton, and R. A. Sheno, "Ultimate strength analysis of aged steel-plated structures exposed to marine corrosion damage: A review," *Corrosion Science*, vol. 86, pp. 42-60, 2014.
- [3] Y. Garbatov, "Risk-based corrosion allowance of oil tankers," *Ocean Engineering*, vol. 213, p. 107753, 2020.
- [4] J. Bhandari, F. Khan, R. Abbassi, V. Garaniya, and R. Ojeda, "Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures—A technical review," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 37, pp. 39-62, 2015.
- [5] L. Xu, Y. Xin, L. Ma, H. Zhang, Z. Lin, and X. Li, "Challenges and solutions of cathodic protection for marine ships," *Corrosion Communications*, vol. 2, pp. 33-40, 2021.
- [6] C. Wei, G. Wang, M. Cridland, D. L. Olson, and S. Liu, "Corrosion protection of ships," in *Handbook of Environmental Degradation of Materials*: Elsevier, 2018, pp. 533-557.
- [7] J. CREUS, R. SABOT, and P. REFAIT, "Corrosion et protection des métaux en milieu marin," *Techniques d'ingénieur*, 2019.
- [8] K. A. Chandler, *Marine and offshore corrosion*. Elsevier, 1985.
- [9] I. Fasoulis and R. E. Kurt, "Reframing corporate social responsibility and sustainability in the aftermath of United Nations 2030 agenda: an empirical study into the tanker and dry bulk maritime sector," *Journal of Marine and Island Cultures*, vol. 8, no. 1, pp. 61-82, 2019.
- [10] M. Baneshi and F. Hadianfard, "Techno-economic feasibility of hybrid diesel/PV/wind/battery electricity generation systems for non-residential large electricity consumers under southern Iran climate conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 127, pp. 233-244, 2016.
- [11] B. N. POPOV, *Corrosion Engineering Principles and Solved Problems*. Elsevier, 2015.
- [12] G. I. Allen J. Bard, Allen J. Bard, György Inzelt, Fritz Scholz *Electrochemical Dictionary*, 2nd ed. 2012.
- [13] J. KRUGER, "Cost of metallic corrosion," in *Uhlig's Corrosion Handbook*, 3rd ed., 2011, ch. 2.
- [14] B. Hou *et al.*, "The cost of corrosion in China," *npj Materials Degradation*, vol. 1, 2017, doi: 10.1038/s41529-017-0005-2.

- [15] G. A. Farotade, P. A. I. Popoola, and O. M. Popoola, "Computational Analysis of System and Design Parameters of Electrodeposition for Marine Applications," in *Applied Studies of Coastal and Marine Environments*, 2016, ch. Chapter 6.
- [16] P. Roberge, McGraw-Hill, Ed. *Handbook of corrosion engineering*. 2000.
- [17] H. C. Horst Czichos, Tetsuya Saito, Leslie Smith, Ed. *Springer Handbook of Metrology and Testing* (corrosion. 2011, pp. 667-741.
- [18] A. K. N. R. John OM. Bockris, Maria Gamboa-Aldeco, Ed. *Modern Electrochemistry*. 2000.
- [19] Total. "LES UTILITÉS PROTECTION CATHODIQUE " <https://docplayer.fr/50198778-Les-utilites-protection-cathodique.html> (accessed.
- [20] C. P. Dillon, Ed. *Forms of Corrosion: Recognition and Prevention*. Texas: National Association of Corrosion Engineers, 1982.
- [21] C. Vargel, "Atmospheric corrosion," in *Corrosion of Aluminium*, 2020, pp. 541-544.
- [22] J. Weissenrieder, C. Kleber, M. Schreiner, and C. Leygraf, "In Situ Studies of Sulfate Nest Formation on Iron," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 151, no. 9, 2004, doi: 10.1149/1.1775911.
- [23] T. E. Graedel and R. P. Frankenthal, "Corrosion Mechanisms for Iron and Low Alloy Steels Exposed to the Atmosphere," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 137, no. 8, pp. 2385-2394, 2019, doi: 10.1149/1.2086948.
- [24] D. T. Hai, "Current status of existing railway bridges in Vietnam: An overview of steel deficiencies," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 62, no. 10, pp. 987-994, 2006, doi: 10.1016/j.jcsr.2006.01.009.
- [25] B. S. Jr. Covino, Jr. Covino, Bernard S., Stephen D. Cramer, Ed. *ASM Handbook Corrosion Fundamentals, Testing, and Protection*. ASM International, 2003.
- [26] G. Y. Lai, "High-Temperature Corrosion and Materials Applications ": ASM International, 2007.
- [27] T. Dudziak, K. Jura, P. Dudek, L. Boroń, and J. Rutkowska, "Sulphidation of Low-Alloyed Steels Used in Power Industry," *Oxidation of Metals*, vol. 92, no. 5-6, pp. 379-399, 2019, doi: 10.1007/s11085-019-09929-7.
- [28] H. Davy, "On the corrosion of copper sheeting by sea water, and on the methods of preventing this effect; and on their application to ships of war and other ships," vol. 151-158: The Royal Society, 1824.
- [29] W. S. Walter von Baeckmann, Werner Prinz, Ed. *Handbook of cathodic corrosion protection theory and practice of electrochemical protection processes*. Hoston, TX: Elsevier Science, 1997.
- [30] J. Duboscq, "Corrosion des aciers en milieu marin : processus se déroulant dans les zones cathodiques," Université de la Rochelle, 2020.
- [31] S. LAMECHE, "Etude électrochimique des matériaux métalliques utilisés en protection cathodique d'ouvrage en milieu marin," Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 02/2014-D / CH, 2014.
- [32] J. J. N. P.F. George, J.L. Nichols, "A high-potential magnesium anode," *Corrosion*, vol. 12, pp. 627t-633t, 1956.
- [33] D. BOUZIDI, "Corrosion et Protection Cathodique des Conduites Souterraines," ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2011.

- [34] J. K. Paik and R. E. Melchers, *Condition assessment of aged structures*. Elsevier, 2014.
- [35] NOAA. "How much water is in the ocean?" National Ocean Service. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/oceanwater.html> (accessed).
- [36] C. n. p. l. e. d. o. (France), C. Brest, Ed. *Manuel des analyses chimiques en milieu marin*. 1983, p. 395.
- [37] H. U. Sverdrup, M. W. Johnson, and R. H. Fleming, *The Oceans: Their physics, chemistry, and general biology*. Prentice-Hall New York, 1942.
- [38] M. Langumier, "Biodétérioration des structures portuaires en acier: synergie entre la physico-chimie du fer en milieu marin et les micro-organismes sulfurogènes," Université de La Rochelle, 2011.
- [39] C. Carre, "Utilisation du dépôt calcomagnésien comme outil de décontamination de l'eau de mer," Université de la Nouvelle-Calédonie, 2017.
- [40] "Marine environments," in *Marine and Offshore Corrosion*, vol. 38-50, K. A. Chandler Ed.: Butterworth, 1985.
- [41] R. Perry and D. Green, "Perry's Chemical Engineers' Handbook" 7th ed., Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1997.
- [42] A. Guibert, "Diagnostic de corrosion et prédiction de signature électromagnétique de structures sous-marines sous protection cathodique," Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2009.
- [43] S. Franck, A. Mathieu, B. Julien, F. Cédric, and A. Hugues, "Techniques de prévention des pathologies de corrosion des structures métalliques; Report n 1-1. Steel in marine environment," *MEDACHS-Interreg IIIB Atlantic Space-Project*, no. 197.
- [44] T. Kirchgeorg, I. Weinberg, M. Hörnig, R. Baier, M. Schmid, and B. Brockmeyer, "Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment," *Marine pollution bulletin*, vol. 136, pp. 257-268, 2018.
- [45] B. Benaïssa, "La corrosion des structures métalliques en mer: types et zones de dégradations," *VIIIèmes Journées National Génie Civil-Génie Côtier, Compiègne, 7-9 septembre 2004*, 2004.
- [46] A. Momber and T. Marquardt, "Protective coatings for offshore wind energy devices (OWEAs): A review," *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 15, no. 1, pp. 13-40, 2018.
- [47] M. A. El-Reedy, "Corrosion Protection," in *Offshore Structures*, 2012, pp. 383-443.
- [48] J. Rowlands, "Sea Water," in *Corrosion*: Elsevier, 1994, pp. 2: 60-2: 72.
- [49] I. A. o. C. S. (IACS), 2021. [Online]. Available: <https://www.iacs.org.uk/>.
- [50] I. M. O. (IMO), 2021. [Online]. Available: <https://www.imo.org/>.
- [51] H. Ringbom, "The Erika accident and its effects on EU maritime regulation," in *Current marine environmental issues and the International Tribunal for the Law of the Sea*: Brill Nijhoff, 2001, pp. 265-290.
- [52] C. Canfield. "'Super-rust' in Castor leads to calls for more stringent inspections." Professional Mariner Journal of the Maritime Industry.

- <https://www.professionalmariner.com/super-rust-in-castor-leads-to-calls-for-more-stringent-inspections/> (accessed).
- [53] Y. Garbatov and C. Guedes Soares, "Corrosion wastage modeling of deteriorated bulk carrier decks," *International Shipbuilding Progress*, vol. 55, no. 1-2, pp. 109-125, 2008.
- [54] J. Davis, "Chapter 1: The Effects and Economic Impact of Corrosion," *Corrosion: Understanding the Basics*, 163, vol. 164, pp. 62-66, 2000.
- [55] L. D. IVANOV and G. WANG, "Condition evaluation and maintenance of tanker structures Condition evaluation and maintenance of tanker structures, 1992," *Journal of marine science and technology*, vol. 13, no. 4, pp. 455-464, 2008.
- [56] W. A. Wood, Jr., "Choosing the best buy protective coatings," *Mater. Perform*, vol. 17, no. 10, p. 26, 1978.
- [57] C. Smith, *Coatings for Corrosion Protection: Offshore Oil and Gas Operation Facilities, Marine Pipeline and Ship Structures, April 14-16, 2004, Biloxi, Mississippi*. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of ..., 2005.
- [58] *ABS Guidance Notes of The Application and Inspection of arine Coating Systems*, A. B. o. Shipping, Houston TX, 2017.
- [59] *ABS Performance Standards For Corrosion Protection*, A. B. o. Shipping, 2019.
- [60] S. RANDU, *Protection des ouvrages métalliques*. Syndicat National Des Entrepreneurs Spécialistes de Travaux de Préparation et Renforcement de Structures (Strres), 2020.
- [61] C. Karam, "ÉLABORATION ET CARACTÉRISATION DES STRUCTURES COEUR-COQUILLE À BASE DE NANOFILS DE ZNO POUR DES APPLICATIONS PHOTOVOLTAIQUES," Univ. Montpellier, 2017.
- [62] "Corrosion Protection Measures - Metal Coating " Misumi Technical Tutorial. <https://www.misumi-techcentral.com/tt/en/surface/2011/04/075-corrosion-protection---metal-coating---3.html> (accessed).
- [63] L. Yang, F. Liu, and E. Han, "Effects of P/B on the properties of anticorrosive coatings with different particle size," *Progress in Organic Coatings*, vol. 53, no. 2, pp. 91-98, 2005.
- [64] M. Popa *et al.*, "The pigment influence on the anticorrosive performance of some alkyd films," *Materials chemistry and physics*, vol. 100, no. 2-3, pp. 296-303, 2006.
- [65] G. Grundmeier, B. Rossenbeck, K. Roschmann, P. Ebbinghaus, and M. Stratmann, "Corrosion protection of Zn-phosphate containing water borne dispersion coatings: part 2: investigations of the corrosive de-adhesion of model latex coatings on iron," *Corrosion science*, vol. 48, no. 11, pp. 3716-3730, 2006.
- [66] F. N. Jones, M. E. Nichols, and S. P. Pappas, *Organic coatings: science and technology*. John Wiley & Sons, 2017.
- [67] A. Bahadori, "2 - Application of Cathodic Protection," in *Cathodic Corrosion Protection Systems*, A. Bahadori Ed. Boston: Gulf Professional Publishing, 2014, pp. 35-89.
- [68] B. N. Popov and S. P. Kumaraguru, "Cathodic protection of pipelines," in *Handbook of Environmental Degradation of Materials*: Elsevier, 2005, pp. 503-521.

- [69] "Design of cathodic protection systems for ships." Bright Hub Engineering. <https://www.brighthubengineering.com/naval-architecture/29485-cathodic-protection-system-ship-corossion-part-two/#impressed-current-cathodic-protectioniccpc-system> (accessed).
- [70] C. NACE, "Cathodic Protection Technologist Course Manual," *NACE Standards, Houston*, vol. 525, 2008.
- [71] Z. Ahmad, "CHAPTER 5 - CATHODIC PROTECTION," in *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, Z. Ahmad Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006, pp. 271-351.
- [72] N. CP, "Cathodic Protection Technician Course Manual," *NACE International*, 2000.
- [73] B. N. Popov and S. P. Kumaraguru, "Chapter 24 - Cathodic protection of pipelines," in *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, M. Kutz Ed. Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2005, pp. 503-521.
- [74] M. Jin *et al.*, "Electrochemical Characterization of a Solid Embeddable Ag/AgCl Reference Electrode for Corrosion Monitoring in Reinforced Concrete," *Electrochemistry*, vol. 82, pp. 1040-1046, 12/05 2014, doi: 10.5796/electrochemistry.82.1040.
- [75] B. ISO, "12473. General principles of cathodic protection in seawater," *London. GB*, 2014.
- [76] "Clauses techniques générales : Protection cathodique par anodes à courant imposé (CTG-10)," 2021.
- [77] L. Gianni, G. E. Gigante, M. Cavallini, and A. Adriaens, "Corrosion of Bronzes by Extended Wetting with Single versus Mixed Acidic Pollutants," *Materials*, vol. 7, no. 5, pp. 3353-3370, 2014. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/7/5/3353>.
- [78] M. Quaranta, E. Catelli, S. Prati, G. Sciutto, and R. Mazzeo, "Chinese archaeological artefacts: Microstructure and corrosion behaviour of high-leaded bronzes," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 15, no. 3, pp. 283-291, 2014/05/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.07.007>.
- [79] W. Sun *et al.*, "Humidity-resistant triboelectric nanogenerator and its applications in wind energy harvesting and self-powered cathodic protection," *Electrochimica Acta*, vol. 391, p. 138994, 2021.
- [80] J.-H. Lee *et al.*, "A hydrogen gas sensor using single-walled carbon nanotube Langmuir–Blodgett films decorated with palladium nanoparticles," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 188, pp. 169-175, 2013/11/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.06.066>.
- [81] J. Song, J. Zhou, and Z. L. Wang, "Piezoelectric and Semiconducting Coupled Power Generating Process of a Single ZnO Belt/Wire. A Technology for Harvesting Electricity from the Environment," *Nano Letters*, vol. 6, no. 8, pp. 1656-1662, 2006/08/01 2006, doi: 10.1021/nl060820v.
- [82] J. Zhong *et al.*, "Finger typing driven triboelectric nanogenerator and its use for instantaneously lighting up LEDs," *Nano Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 491-497, 2013/07/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.11.015>.

- [83] F.-R. Fan, Z.-Q. Tian, and Z. Lin Wang, "Flexible triboelectric generator," *Nano Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 328-334, 2012/03/01/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.01.004>.
- [84] G. Zhu *et al.*, "Linear-Grating Triboelectric Generator Based on Sliding Electrification," *Nano Letters*, vol. 13, no. 5, pp. 2282-2289, 2013/05/08 2013, doi: 10.1021/nl4008985.
- [85] Y. S. Zhou *et al.*, "In Situ Quantitative Study of Nanoscale Triboelectrification and Patterning," *Nano Letters*, vol. 13, no. 6, pp. 2771-2776, 2013/06/12 2013, doi: 10.1021/nl401006x.
- [86] Y. Higashiyama and K. Asano, "RECENT PROGRESS IN ELECTROSTATIC SEPARATION TECHNOLOGY," *Particulate Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 77-90, 1998/01/01 1998, doi: 10.1080/02726359808906786.
- [87] Z. L. Wang, "Triboelectric nanogenerator (TENG)—sparking an energy and sensor revolution," *Advanced Energy Materials*, vol. 10, no. 17, p. 2000137, 2020.
- [88] T. Boisson. "Un nouveau générateur permet de produire de l'électricité grâce aux chutes de neige." Trust my Science. <https://trustmyscience.com/nouveai-dispositif-genere-electricite-grace-chutes-neige/> (accessed).
- [89] R. G. Horn and D. T. Smith, "Contact electrification and adhesion between dissimilar materials," (in eng), *Science*, vol. 256, no. 5055, pp. 362-4, Apr 17 1992, doi: 10.1126/science.256.5055.362.
- [90] A. Grabbe, "Double layer interactions between silylated silica surfaces," *Langmuir*, vol. 9, no. 3, pp. 797-801, 1993/03/01 1993, doi: 10.1021/la00027a032.
- [91] J. SIKORSKI, "HARPER, WR-CONTACT AND FRICTIONAL ELECTRIFICATION," ed: TEXTILE INST INTL HEADQUARTERS 10 BLACKFRIARS ST, MANCHESTER M3 5DR, ENGLAND, 1967.
- [92] T. Cai *et al.*, "Flexible cellulose/collagen/graphene oxide based triboelectric nanogenerator for self-powered cathodic protection," *Materials Letters*, vol. 306, p. 130904, 2022.
- [93] S. Cui, Y. Zheng, J. Liang, and D. Wang, "Conducting polymer PPy nanowire-based triboelectric nanogenerator and its application for self-powered electrochemical cathodic protection," *Chemical science*, vol. 7, no. 10, pp. 6477-6483, 2016.
- [94] H. R. Zhu *et al.*, "Self-powered metal surface anti-corrosion protection using energy harvested from rain drops and wind," *Nano Energy*, vol. 14, pp. 193-200, 2015.
- [95] S. Cui, Y. Zheng, J. Liang, and D. Wang, "Triboelectrification based on double-layered polyaniline nanofibers for self-powered cathodic protection driven by wind," *Nano Research*, vol. 11, no. 4, pp. 1873-1882, 2018.
- [96] J. Zhong and L. Lin, "Flexible Electret Generator for Self-Powered Metal Cathodic Protection," in *2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII)*, 2019: IEEE, pp. 2480-2483.
- [97] H. Zhang *et al.*, "Simultaneously harvesting thermal and mechanical energies based on flexible hybrid nanogenerator for self-powered cathodic protection," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 7, no. 51, pp. 28142-28147, 2015.

- [98] S. Cui *et al.*, "A new synergetic system based on triboelectric nanogenerator and corrosion inhibitor for enhanced anticorrosion performance," *Nano Energy*, vol. 91, p. 106696, 2022.
- [99] W. Sun *et al.*, "Liquid-solid triboelectric nanogenerators array and its applications for wave energy harvesting and self-powered cathodic protection," *Energy*, vol. 217, p. 119388, 2021.
- [100] P. T. Dawson, *Experimental Methods in Catalytic Research*. Academic Press, 1968.
- [101] M. Verma, S. Khattri, and K. Milankant, "Thermoelectric effect and its some aspects in Solids."
- [102] A. Nour Eddine, "Modeling and optimization of waste heat recovery system using the thermoelectricity (Seebeck effect) for marine application

Modélisation et optimisation d'un système de récupération d'énergie à l'échappement des moteurs de navires en utilisant la thermoélectricité (effet Seebeck)," École centrale de Nantes, 2017ECDN0029, 2017. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01887981>

- [103] G. Y. Karapetyan and V. Dneprovski, "Research of opportunity to use MISM structures for cooling of light-emitting diodes," *Physics and Mechanics of New Materials and their Applications*, p. 405, 2013.
- [104] D. Kenfaui, "Étude des propriétés mécaniques et thermoélectriques des matériaux Ca₃Co₄O₉ texturés pour la conversion d'énergie," Université de Caen, 2010.
- [105] M. Diesel and S. Turbo, "Waste Heat Recovery System (WHRS) for reduction of fuel consumption, emissions and EEDI," ed: Germany, 2012.
- [106] V. Pandiyarajan, M. Chinna Pandian, E. Malan, R. Velraj, and R. V. Seeniraj, "Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system," *Applied Energy*, vol. 88, no. 1, pp. 77-87, 2011/01/01/ 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.023>.
- [107] M. F. Rahman, "Analisa Penggunaan Thermoelectric Sebagai Sumber Arus Listrik Pada Impressed Current Cathodic Protection (Iccp) Di Pelat Lambung Kapal," Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2016.
- [108] J. Rizk and Y. Chaiko, "Solar tracking system: more efficient use of solar panels," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 41, no. 2008, pp. 313-315, 2008.
- [109] A. J. K. Samoudi, "Design and Simulation of Solar Photovoltaic Powered Cathodic Protection Systems," 2015.
- [110] C. A. Sibiya, B. P. Numbi, and K. Kusakana, "Design of a cost optimized hybrid renewable energy system for impressed current cathodic protection," in *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2020: IEEE, pp. 1003-1008.
- [111] A. I. EL-Alem, A. M. Azmy, and A. Hosam-Eldin, "Design of a cathodic protection system to prevent corrosion of metallic structures using hybrid renewable energy sources," *ERJ. Engineering Research Journal*, vol. 36, no. 2, pp. 109-117, 2013.

- [112] C. A. Sibiya, B. P. Numbi, and K. Kusakana, "Modelling and Simulation of a Hybrid Renewable/Battery System Powering a Cathodic Protection Unit [J]," *environment*, vol. 4, p. 6, 2021.
- [113] A. Vale, B. Borba, M. Fortes, and R. Maciel, "Techno-economic evaluation of hybrid diesel/PV/wind/battery electricity generation systems for a timber industry in north of Brazil," in *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 2018: IEEE, pp. 1-6.
- [114] A. N. Eddine, "Modélisation et optimisation d'un système de récupération d'énergie à l'échappement des moteurs de navires en utilisant la thermoélectricité (effet Seebeck)," *École centrale de Nantes*, 2017.
- [115] O. p. t. w. s. ocean. "Shipping Pollution." <https://europe.oceana.org/en/shipping-pollution-1> (accessed 17 Oct 2020).
- [116] H. A. Gabbar, M. I. Adham, and M. R. Abdussami, "Analysis of nuclear-renewable hybrid energy system for marine ships," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 2398-2417, 2021/11/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.030>.
- [117] M. Issa, "Optimisation opérationnelle, écologique et énergétique des groupes électrogènes diesel," *Université du Québec à Rimouski*, 2020.
- [118] M. Issa, H. Ibrahim, A. Ilinca, and M. Y. Hayyani, "A review and economic analysis of different emission reduction techniques for marine diesel engines," *Open Journal of Marine Science*, vol. 9, no. 03, p. 148, 2019.
- [119] M. Issa, H. Ibrahim, R. Lepage, and A. Ilinca, "A review and comparison on recent optimization methodologies for diesel engines and diesel power generators," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 7, no. 06, p. 31, 2019.
- [120] *Cat® D450 GC DIESEL GENERATOR SETS*, 2020. [Online]. Available: www.Cat.com/electricpower.
- [121] *ABS Guidance Notes On Cathodic Protection Of ships*, A. B. o. Shipping, Texas, 2017.
- [122] G. C. Seeling-Hochmuth, "A combined optimisation concet for the design and operation strategy of hybrid-PV energy systems," *Solar Energy*, vol. 61, no. 2, pp. 77-87, 1997/08/01/ 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00028-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00028-5).
- [123] Ø. Skarstein and K. Uhlen, "Design considerations with respect to long-term diesel saving in wind/diesel plants," *Wind engineering*, pp. 72-87, 1989.
- [124] M. Kharrich, M. Akherraz, and Y. Sayouti, "Optimal sizing and cost of a Microgrid based in PV, WIND and BESS for a School of Engineering," in *2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, 2017: IEEE, pp. 1-5.
- [125] A. M. Abdelshafy, H. Hassan, and J. Jurasz, "Optimal design of a grid-connected desalination plant powered by renewable energy resources using a hybrid PSO–GWO approach," *Energy conversion and management*, vol. 173, pp. 331-347, 2018.
- [126] B. Lahfaoui, S. Zouggar, B. Mohammed, and M. L. Elhafyani, "Real time study of P&O MPPT control for small wind PMSG turbine systems using Arduino microcontroller," *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 1000-1009, 2017.
- [127] A. Khiareddine, C. Ben Salah, D. Rekioua, and M. F. Mimouni, "Sizing methodology for hybrid photovoltaic /wind/ hydrogen/battery integrated to energy management

- strategy for pumping system," *Energy*, vol. 153, pp. 743-762, 2018/06/15/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.073>.
- [128] H. Belmili, M. Haddadi, S. Bacha, M. F. Almi, and B. Bendib, "Sizing stand-alone photovoltaic–wind hybrid system: Techno-economic analysis and optimization," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 821-832, 2014/02/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.011>.
- [129] M. Bashir and J. Sadeh, "Size optimization of new hybrid stand-alone renewable energy system considering a reliability index," in *2012 11th International conference on environment and electrical engineering*, 2012: IEEE, pp. 989-994.
- [130] N. Lazaar, E. Fakhri, M. Barakat, H. Gualous, and J. Sabor, "Optimal sizing of marine current energy based hybrid Microgrid," in *Conference on renewable energies and power quality*, 2020, vol. 8.
- [131] GlobalPetrolPrices.com. "Prix du diesel aux États-Unis, 14 mars 2022." https://www.globalpetrolprices.com/USA/diesel_prices/ (accessed).