

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement
/...../...../...../.....

Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'automatique et électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Licence professionnelle

Domaine : Sciences et technologies,

Filière : Energies renouvelables

Spécialité : Energies renouvelables et environnement

Thème

ETUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UNE SOURCE
PHOTOVOLTAIQUE POUR ALIMENTER LE SYSTEME DE LA
PROTECTION CATHODIQUE

Présenté par :

Benbouzid Mohammed Noureddine
Araba Charaf eddine

Soutenue publiquement le 21/05/2025

Membres du jury	Grade	Institut	
BOUSNAN Toufik	MCB	Univ Ghardaia	Président
MOSBAH MUSTAFA	Dr	Univ Ghardaia	Encadreur
BAHRI Ahmed	MCB	Univ Ghardaia	Examineur
MESSAOUDI Nasreddine	ING	SONELGAZ (DD Djelfa)	Invité

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements et notre reconnaissance à notre directeur de Mémoire, le Dr MOSBAH Mustafa, pour le soutien académique et pédagogique qu'il nous a apporté, ainsi que pour ses précieux conseils et ses commentaires constructifs, qui ont joué un rôle fondamental dans l'achèvement de ce mémoire. Tous les mots de remerciement ne suffisent pas à exprimer sa gratitude pour l'effort qu'il a déployé pour nous suivre tout au long des étapes de recherche.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui nous ont aidés sur le terrain ou scientifiquement, en particulier : Mr KOBBI Mokhtar, Mr OULEDABDALLAH Issa, Mr BOUHAMIDA Taha Yassin, Mr ZERBANI Salim et M. BOUREKINA Tayeb, pour leurs généreuse coopération et les informations pratiques et soutiens qui nous ont grandement aidés dans ce travail.

Nous sommes heureux d'exprimer nos sincères remerciements et notre gratitude à Mr MESSAOUDI Nasreddine ingénieur exploitation GAZ à la SONELGAZ-Distribution de Djelfa pour son intérêt sincère et son assistance efficace tout au long de la préparation de ce travail. Son soutien continu et ses commentaires utiles ont été un grand encouragement pour nous et nous avons la plus grande appréciation et le plus grand respect pour lui.

Nous adressons en particulier nos sincères remerciements et notre gratitude à mon père bien-aimé, Mr BEN BOUZID Ahmed, au père de ma collègue bien-aimée, Mr ARABA Kouider, à ma mère bien-aimée et à la mère de mon collègue, pour l'immense soutien moral, l'amour inconditionnel et les prières sincères qu'ils nous ont apportés, et qui ont eu un impact profond sur nos âmes. Après Dieu, ce sont eux qui nous ont aidés à atteindre cette étape de notre cheminement.

Nous nous pouvons que remercier tout particulièrement ma deuxième mère : Mme BEN BOUZID.M, et Mr. BOURAKNA Ben Djerma, qui a été pour nous comme un deuxième père et l'un de nos principaux soutiens. Ils nous ont offert des cadeaux et un soutien inoubliable, et leur gentillesse, leur sollicitude et leurs positions nobles ont eu un impact profond sur nous.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements et notre plus profonde reconnaissance à tous les membres de notre famille et à nos amis pour leur soutien et leurs encouragements continus, qui ont eu un impact significatif sur le dépassement de tous les défis.

Résumé

L'objectif de ce mémoire est faire l'étude et le dimensionnement d'une source d'énergie photovoltaïque autonome destiné à alimentation d'un système de protection cathodique d'une conduite gaz existante dans le réseau de distribution de Ghardaïa. Cette démarche s'inscrit dans la recherche de solution alternative et efficace garantissant une alimentation électrique continue, tout temps s'appuyant sur la source d'énergie renouvelable comme choix durable sur les plans écologiques et économique. Les résultats ont démontré que le système photovoltaïque proposé est capable de répondre efficacement au besoin du système de protection cathodique, tout en assurant un fonctionnement autonome réduisant ainsi la dépendance aux réseaux électrique classique ou aux générateurs. De plus, il garantit la continuité de la protection électrochimique contre la corrosion des conduites métalliques.

MOTS-CLES : Protection cathodique ; corrosion ; source d'énergie photovoltaïque

ملخص :

يهدف هذا البحث إلى دراسة وتحديد أبعاد مصدر طاقة كهروضوئية مستقل يهدف إلى توفير نظام حماية كاثوديك لخط أنابيب الغاز الموجود في شبكة توزيع غرداية. ويأتي هذا النهج في إطار البحث عن حل بديل وفعال يضمن إمداداً مستمراً بالكهرباء طوال الوقت، بالاعتماد على مصدر الطاقة المتجددة كخيار مستدام من الناحية البيئية والاقتصادية. وأظهرت النتائج أن النظام الكهروضوئي المقترح قادر على تلبية احتياجات نظام الحماية الكاثودية بشكل فعال، مع ضمان التشغيل الذاتي، وبالتالي تقليل الاعتماد على الشبكات الكهربائية التقليدية أو المولدات. بالإضافة إلى ذلك، فهو يضمن استمرارية الحماية الكهروكيميائية ضد تآكل الأنابيب المعدنية.

كلمات مفتاحية : الحماية الكاثودية؛ تآكل؛ مصدر الطاقة الكهروضوئية

Abstract

The objective of this thesis is to study and design a stand-alone photovoltaic energy source intended to power a cathodic protection system for an existing gas pipeline in the Ghardaïa distribution network. This approach is part of the search for an alternative and efficient solution guaranteeing a continuous, all-weather power supply, relying on renewable energy sources as a sustainable choice from both ecological and economic perspectives. The results demonstrated that the proposed photovoltaic system is capable of effectively meeting the needs of the cathodic protection system, while ensuring autonomous operation, thus reducing dependence on conventional electrical networks or generators. In addition, it guarantees the continuity of electrochemical protection against corrosion of metal pipelines.

KEY-WORDS: Cathodic protection; corrosion; photovoltaic energy source

Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Abstract.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux.....	ix
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralité sur la corrosion	3
1.1 Introduction	3
1.2 Définition du phénomène de corrosion	4
1.3 Différents processus de la corrosion	4
1.3.1 Corrosion chimique (sèche)	5
1.3.2 Corrosion biochimique.....	5
1.3.3 Corrosion avec érosion, avec frottement et par cavitation	6
1.3.4 Corrosion électrochimique	6
1.3.4.1 Corrosion uniforme	7
1.3.4.2 Corrosion localisée.....	7
1.3.4.2.1 Corrosion par piqûre	8
1.3.4.2.2 Corrosion sélective.....	9
1.3.4.2.3 Corrosion intergranulaire.....	9
1.3.4.2.4 Corrosion sous contrainte.....	10
1.3.4.2.5 Corrosion par érosion.....	10
1.3.4.2.6 Fatigue-corrosion.....	11

1.3.4.2.7	Corrosion caverneuse ou par crevasses	11
1.4	Lutte contre la corrosion.....	12
1.4.1	La protection par revêtement métallique ou organique.....	12
1.4.1.1	Protection par revêtement Métallique	12
1.4.1.2	Protection par revêtement Organique (non métallique)	13
1.4.2	La protection cathodique.....	13
1.4.2.1	La protection par anode sacrificielle	14
1.4.2.2	Protection cathodique par courant imposé	14
1.4.3	Protection anodique.....	15
1.4.4	Protection avec inhibiteurs de corrosion	16
1.4.5	Conclusion	16
Chapitre 02 : Protection Cathodique.....		18
2.1	Introduction	18
2.2	Protection par anode sacrificielle	18
2.2.1	Anodes à base de zinc	18
2.2.2	Anodes en magnésium	19
2.2.3	Mélange régulateur de l'anode.....	19
2.3	Installation des anodes	20
2.4	Protection par courant imposé (soutirage de courant).....	21
2.4.1	Constitution d'un soutirage.....	21
2.4.1.1	Déversoir	23
2.4.2	Installation du déversoir.....	24
2.4.2.1	Anodes déversoirs	24
2.4.2.2	Milieu entourant le déversoir : (régulateur de corrosion).....	25
2.4.2.3	Matériaux utilisés	26
2.4.2.4	Résistance de terre des déversoirs.....	27

2.4.3	Choix de l'implantation d'un poste de soutirage	27
2.5	Conclusion.....	37
Chapitre 03 : Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque		38
3.1	Introduction	38
3.2	L'énergie solaire.....	39
3.3	Cellule photovoltaïque.....	41
	• La cellule PV.....	41
	• La structure.....	41
	• Principe de fonctionnement	42
3.4	Caractéristiques de photovoltaïque	43
3.4.1	Les cellules mono- cristallines	43
3.4.2	Les cellules poly-cristallines	43
3.4.3	Les cellules amorphes	44
3.5	Circuit équivalent et modèle mathématique	44
3.6	Modèle mathématique d'une cellule PV idéale.....	45
3.7	Conclusion.....	45
Chapitre 04 : Dimensionnement de la source photovoltaïque		46
4.1	Introduction	46
4.2	Dimensionnement du système de protection cathodique	46
4.3	Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter un dispositif de protection cathodique	49
4.3.1	Données de base.....	49
4.3.2	Energie quotidienne requise.....	49
4.3.3	Puissance requise des panneaux solaires	49
4.3.4	Capacité de la batterie	49
4.3.5	Composants du système.....	49

4.3.6	Recommandations	50
4.3.7	PVsys et le rapport pour l'application de la protection cathodique au secteur 06 - Daya	50
4.4	Conclusion :.....	58
	Conclusion générale.....	59
	Bibliographies	60

Liste des figures

Figure 1-1 : corrosion uniforme et corrosion localisée d'un métal	8
Figure 1-2 : Corrosion par piqûres.....	8
Figure 1-3: Corrosion inter granulaire d'un acier inoxydable	9
Figure 1-4 : Représentation schématique de fissures de CSC Observées au microscope	10
Figure 1-5 : Représentation schématique du phénomène de corrosion érosion	10
Figure 1-6 : Photos de la fatigue-corrosion	11
Figure 1-7 : Mécanisme de corrosion caverneuse de l'aluminium dans un milieu chlorure	12
Figure 1-8 : Principes de la protection par anode sacrificielle.....	14
Figure 1-9 : Principe de protection anodique.....	15
Figure 2-1 : schéma d'implantation des anodes	15
Figure 2-3 : Constitution d'un déversoir à partir de rail	22
Figure 2-4 : Disposition des anodes en ferrosilicim	25
Figure 2-5 : Schéma de pose de système d'arrosage	26
Figure 2-6 : Schéma d'implantation d'un soutirage	28
Figure 3-1: Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	40
Figure 3-2 : L'effet photovoltaïque.....	40
Figure 3-3 : La structure de cellule PV	41
Figure 3-4 : Principe de fonctionnement d'un cellule photovoltaïque.....	42
Figure 3-5 : Cellule Mono-cristallines.....	43
Figure 3-6 : Cellule poly-cristallines	43
Figure 3-7 : Cellules amorphes.....	44
Figure 4-1 : Photo de réseau acier DP Daya (Secteur protection cathodique).....	47
Figure 4-2 : Principe du système de protection cathodique	48
Figure 4-3 : Valeurs du potentiel cathodique mesurées comparées au seuil	48
Figure 4-4: Schéma de principe d'un système de protection cathodique solaire.....	50
Figure 4-5: Interface du logiciel PVsyst de simulation photovoltaïque	52
Figure 4-6: Paramètre généraux et caractéristiques de l'installation photovoltaïque	53
Figure 4-7: résumé du projet et des résultat de la simulation par PVsyst.....	54
Figure 4-8 : Bilan énergétique mensuel et résultat de performance du système solaire.....	55
Figure 4-9 : Digramme des pertes d'énergie dans le système photovoltaïque.....	56

Figure 4-10 : Corrélation journalière entre les radiation globale et l'énergie utile du système 57

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Densité de courant selon le type de conduite	31
Tableau 2-2 : Caractéristiques géométriques des conduites	35
Tableau 2-3 : Caractéristiques électriques des conduites	35
Tableau 4-1 : Données générales du système de protection cathodique secteur 06 Daya.....	49
Tableau 4-2 : Caractéristiques techniques des composants du système photovoltaïque	49

Introduction générale

La corrosion est la détérioration progressive des conduites en acier en raison de leur interaction avec l'environnement, et est l'un des problèmes les plus graves dans les réseaux de transport et de distribution de gaz.

Cela entraîne des fuites et des risques importants pour la sécurité et l'environnement. Par conséquent, les systèmes de protection cathodique sont utilisés comme une solution efficace pour remédier à ce problème et assurer la sécurité du réseau [1].

Pour éviter le problème de la corrosion, notamment dans les réseaux de transport et de distribution du gaz, plusieurs solutions efficaces sont utilisées à savoir la protection par anode sacrificielle, la protection par courant imposé et la protection par revêtement. La protection la plus utilisée est la protection par courant imposé, qui empêche l'oxydation des conduites en contrôlant le courant électrique. La surveillance régulière et l'entretien préventif sont essentiels pour détecter toute dégradation à un stade précoce et intervenir à temps [2].

Ce mémoire a pour objectif d'étudier et de concevoir un système de protection cathodique efficace, alimenté par une source d'énergie photovoltaïque autonome, afin de prévenir la corrosion dans les réseaux de distribution de gaz, notamment dans les zones isolées comme le secteur Daya, Wilaya de Ghardaïa. L'accent est mis sur la méthode de protection par courant imposé, qui nécessite une alimentation électrique continue. Ainsi, le recours à l'énergie solaire constitue une solution durable et performante, garantissant un fonctionnement autonome du système sans dépendance au réseau électrique classique ni aux générateurs, tout en assurant une protection électrochimique constante des conduites métalliques contre la corrosion.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux à savoir :

Le chapitre 01 traite des notions générales sur la corrosion, ses types et ses effets sur les structures métalliques.

Le chapitre 02 est consacré aux techniques de protection cathodique, en mettant l'accent sur la méthode par courant imposé.

Le chapitre 03 présente des généralités sur l'énergie solaire et la technologie photovoltaïque.

Le chapitre 04 est dédié à l'étude et le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome destiné à l'alimentation de la protection cathodique, avec une application pratique à l'aide du logiciel PVsyst.

Chapitre 1 : Généralité sur la corrosion

1.1 Introduction

La corrosion, du latin <<corrodère>>, signifie ronger, attaquer. C'est une destruction non voulue des métaux sous l'action de milieux corrosifs (agents atmosphériques ou réactifs chimiques). Après attaque, les métaux ont tendance à retourner à leur état primitif d'oxyde, sulfure, carbonate etc., plus stable par rapport au milieu considéré et ainsi à subir une détérioration de leurs propriétés.

En service les matériaux métalliques sont souvent en contact avec un milieu agressif liquide ou gazeux, donc le phénomène de corrosion est un problème de surface ou plus précisément d'interface entre un métal et un milieu agressif liquide ou gazeux.

Ce phénomène a pris de nos jours une importance considérable, étant donné l'utilisation de plus en plus grande des métaux et alliages dans la vie moderne.

Les métaux se distinguent des autres matériaux par un ensemble de propriétés avantageuses tels que bonne ductilité, résistance élevée à la traction, résistance aux hautes températures, bonne conductibilité électrique et thermique, grande facilité de mise en œuvre etc. Leurs inconvénients sont leur instabilité au contact de l'air et de l'eau ce qui diminue leur résistance à la corrosion et à l'usure, c'est à dire leur durabilité.

Au point de vue économique la corrosion est d'une importance primordiale. On estime par exemple que chaque année le quart de la production d'acier est détruit par la corrosion, ce qui correspond environ à 150 millions de tonnes/an ou encore 5 tonnes/seconde. Ces pertes pouvaient être supérieures s'il n'y avait pas la protection contre la corrosion [3].

Le remplacement des équipements et matériel corrodés constitue pour l'industrie une charge financière très élevée à laquelle il faut ajouter le manque à gagner correspondant à l'arrêt des installations nécessaires pour effectuer les réparations.

Les coûts annuels imputables à la corrosion et à ses conséquences s'élèvent à plusieurs milliards de dollars par an dans la plupart des pays industrialisés. Aux Etats-Unis, les pertes occasionnées par la corrosion sont évaluées à plus de 7 milliards de dollars [3].

1.2 Définition du phénomène de corrosion

La corrosion est souvent définie comme l'altération d'un matériau ou d'une structure par une réaction chimique ou électrochimique avec le milieu environnant. En ce qui concerne les matériaux métalliques, la norme internationale ISO 8044 définit la corrosion comme l'interaction physico-chimique entre un métal et son environnement entraînant des changements dans les propriétés du métal, ce qui peut entraîner une dégradation importante des propriétés fonctionnelles du métal, du milieu environnant ou du système technique auquel ils appartiennent. Cette définition reconnaît que la corrosion est un phénomène nocif, elle détruit le matériau ou en réduit les propriétés, le rendant inutilisable pour une utilisation prévue. Après l'attaque, les métaux tendent à revenir à leur état primitif d'oxyde, de sulfure, de carbonate ou de tout autre sel plus stable par rapport au milieu considéré. Par exemple, le fer retourne sous forme d'oxyde de fer (minerais de fer), tandis que le cuivre réagit avec des molécules contenant du soufre pour revenir sous forme sulfurée. En service, les matériaux métalliques sont souvent en contact avec un fluide ou un gaz agressif, donc le phénomène de corrosion est un problème de surface ou plus précisément une interface entre un métal et un milieu agressif liquide ou gazeux. La corrosion d'un métal ou d'un alliage peut avoir différentes formes : généralisée ou uniforme, localisée, piqûres, etc... elle peut se développer selon différents procédés, qui caractérisent chacun un type de corrosion. Trois types de corrosion peuvent être distingués : la corrosion chimique, électrochimique ou bactérienne [4].

La corrosion n'est pas seulement une source de gaspillage de matières premières et d'énergie, elle peut également provoquer des accidents ayant des conséquences dramatiques. D'où l'importance de disposer des connaissances nécessaires pour reconnaître les formes et les facteurs de corrosion dans le but de développer des méthodes pour lutter contre ce phénomène [4]

1.3 Différents processus de la corrosion

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il est exposé à la corrosion et de même il n'y a pas de métal résistant, d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées [5].

En général on peut résumer les différents processus de la corrosion comme ci-dessous :

- Corrosion chimique (sèche).
- Corrosion biochimique.
- Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique).
- Corrosion électrochimique (humide) [5].

1.3.1 Corrosion chimique (sèche)

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse, le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le milieu ambiant sans présence d'électrolyte. Donc la corrosion purement chimique ne fait donc pas intervenir le passage d'un courant électrique, un flux électronique cesse, car l'échange d'électrons entre les différents partenaires de réactions s'effectue directement. L'air renferme l'oxygène, de la vapeur d'eau et des vapeurs acides (anhydride carbonique CO_2 et sulfureux SO_2 , hydrogène sulfureux H_2S etc.) ce sont les agents corrosifs mais le plus souvent c'est le CO_2 . On admet que la formation de la rouille est alors la résultante de l'action de tous ces corps, mais il faut qu'un acide soit présent, même en protection faible pour que l'attaque puisse se produire [3].

L'attaque du métal par une réaction chimique avec le milieu ambiant sans intervention du courant électrique nécessite généralement des températures élevées, la réaction qui se produit est de la forme :



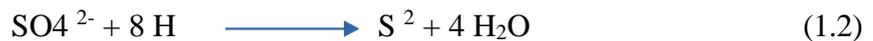
Il est très difficile de donner des exemples de corrosion purement chimique, puisque le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique. On peut considérer comme corrosion chimique l'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un sel fondu ou par une solution aqueuse [3].

1.3.2 Corrosion biochimique

C'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées. Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être de plusieurs types.

a) Chimique par production de substances corrosives telles que CO_2 , H_2S , H_2SO_4 , NH_3 ou d'un acide organique, le cas le plus répandu est celui rencontré dans les canalisations enterrées et déterminé par la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal.

b) Certaines bactéries peuvent réduire les sulfates par l'intermédiaire d'hydrogène.



L'hydrogène provient par exemple des régions cathodiques, il y a donc dépolarisation des cathodes et formation accélérée de Fe^{2+} aux anodes.



c) Dans certains cas, on peut observer sur les canalisations des dépôts adhérents résultant de l'attaque, non pas du métal lui-même, mais celle de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries. Il en résulte la formation de piqûres sur le métal, à l'endroit où s'est produit le dépôt, suivant un processus de corrosion par différence de concentration en oxygène [6].

1.3.3 Corrosion avec érosion, avec frottement et par cavitation

Dans ce cas les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface de métal. Ils ralentissent en général la vitesse de la corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même ou bien à celui des particules solides qu'il contient, il y a accélération de la corrosion. Il en est de même lorsque deux pièces se déplacent l'une par rapport à l'autre (frottement) [6].

La corrosion par cavitation est due à la présence de bulles de vapeurs qui se forment dans une canalisation, ou au voisinage d'une pièce tournante lorsque par suite de l'augmentation locale de la vitesse du liquide où la pression statique devient inférieure à la tension de vapeur du liquide, il en résulte un violent martèlement de la surface métallique et une destruction locale du film de corrosion protecteur, la corrosion peut donc se développer à nouveau [6].

1.3.4 Corrosion électrochimique

C'est le phénomène de corrosion le plus important et elle se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif, présentant une dissymétrie de composition.

L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre anodes et cathodes dans le réactif et les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées). Pour une corrosion électrochimique on a :



En général il n'existe pas un métal idéalement pur, il contient toujours des hétérogénéités physiques ou chimiques dont le potentiel de corrosion est en général différent de celui de la matrice. C'est à dire les métaux ne sont pas monophasés lorsqu'ils sont plongés dans le réactif.

Même pour un alliage, si ces éléments d'addition sont en solution solide, on ne peut pas les considérer comme parfaitement monophasés, car ils présentent toujours des inclusions. Oxydes, sulfures etc. ou bien des régions écrouis.

Donc les légères différences de propriétés chimiques ou physiques entre les différentes parties du métal déterminent une électrode composite (cellule électrochimique) qui contient des microcathodes et des microanodes en court-circuit, c'est à dire formant des couples électriques (piles ou micro pile).

Lorsqu'une électrode composite est plongée dans un électrolyte, ce qui est toujours réalisé, elle est donc le siège d'un phénomène de corrosion électrochimique et les anodes sont attaquées avec une vitesse qui dépend de l'intensité du courant débité par les piles locales [7].

1.3.4.1 Corrosion uniforme

La corrosion peut être soit généralisée sur toute la surface du matériau qui joue le rôle à la fois d'anode et de cathode et on l'appelle corrosion uniforme, soit corrosion localisée dans le cas où la réaction de corrosion se déroule à un lieu spécifiquement anodique d'un matériau. En pratique, ce type de corrosion provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement [8].

1.3.4.2 Corrosion localisée

C'est une corrosion qui se déroule en un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Elle diffère de la corrosion uniforme car on distingue clairement les endroits anodiques et cathodiques. En pratique, la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement. La corrosion localisée survient sur une partie du métal à un taux bien supérieur au reste de la surface ; elle peut avoir plusieurs formes. Ce phénomène est très important. Beaucoup de problèmes de corrosion surviennent bien qu'on ait choisi un métal qui convienne pour milieu donné dans lequel d'habitude il ne se corrode pas mais où il peut quand même être sujet à la corrosion localisée [9].

Les deux formes de corrosion les plus couramment rangées sont la corrosion par piqures et la corrosion inter granulaire. La corrosion localisée se produit parfois sur des matériaux en situation de corrosion active mais en général, elle constitue plutôt une maladie des matériaux passivables suite à des dégradations locales de la passivité [9] (voir Figure 1-1).

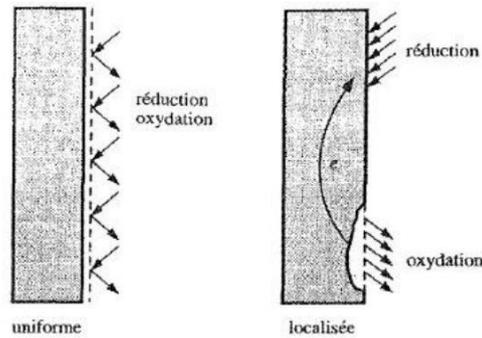


Figure 1-1 : corrosion uniforme et corrosion localisée d'un métal

1.3.4.2.1 Corrosion par piqûre :

Est une forme de corrosion localisée dans laquelle les pertes en métal se présentent sous forme de trous de section faible par rapport à la surface globale exposé. L'attaque se limite à des piqûres très localisées et pouvant progresser très rapidement en profondeur. Les solutions les plus agressives contiennent des chlorures, bromures, hypochlorites. la présence de sulfures et d'H₂S exacerbe les problèmes de corrosion par piqûre en abaissant systématiquement les critères de résistance, la présence d'un cation oxydant (Fe⁺³, Cu⁺², Hg⁺²...). Permet la formation des piqûres même en absence d'oxygène. Les aciers inoxydables sont particulièrement sensibles à la corrosion par piqûres, ainsi d'autres métaux comme le fer passif. La corrosion par piqûres produite par certains anions, notamment le chlorure, sur les métaux qui sont protégés par un film d'oxyde mince. Elle introduit des cavités de quelques dizaines de micro- mètre de diamètre à l'intérieur du matériau à partir d'une ouverture de faible surface [10].

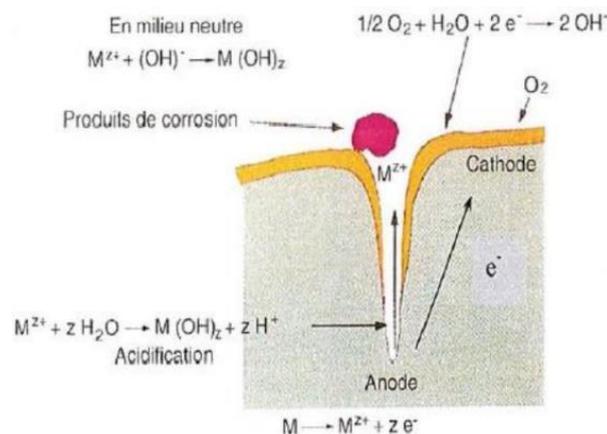


Figure 1-2 : Corrosion par piqûres.

1.3.4.2.2 Corrosion sélective

C'est l'oxydation d'un composant de l'alliage conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse. Les différents cas de corrosion sélective sont classés suivant la nature des alliages considérés ; les deux plus fréquents sont les suivants :

- Délignification des laitons : corrosion sélective du zinc (ou corrosion de l'alliage puis re-déposition du cuivre., le laiton prend la teinte rouge du cuivre.
- Graphitisation des fontes : corrosion de fer, le graphite n'étant pas attaqué. Avec les fontes à graphite lamellaire, l'attaque progresse en profondeur sans dégradation visible à l'œil nu [9].

1.3.4.2.3 Corrosion intergranulaire

C'est également une attaque localisée, par contre plus sélective, causée généralement par les traitements thermiques subits par le métal, qui se développe aux points de jonctions des grains de métal. Elle est invisible à l'œil nu, par contre, affecte considérablement la résistance mécaniques du métal [3].

En effet, les points de jonctions constituent, des zones désordonnées par rapport au réseau cristallographique plus régulier des grains. Ils admettent de ce fait de nombreux défauts de structures (lacunes, dislocation), favorables à la précipitation de phases intermétallique ou de composés métalliques tels que les carbures, ainsi qu'à la ségrégation d'impureté en solution solide. Sous prétexte, qu'ils sont chimiquement plus actifs, ils constituent une cible vulnérable lorsqu'ils sont exposés dans un milieu corrosif. A titre d'exemple ; on rencontre cette forme de corrosion dans les aciers inoxydables [3].

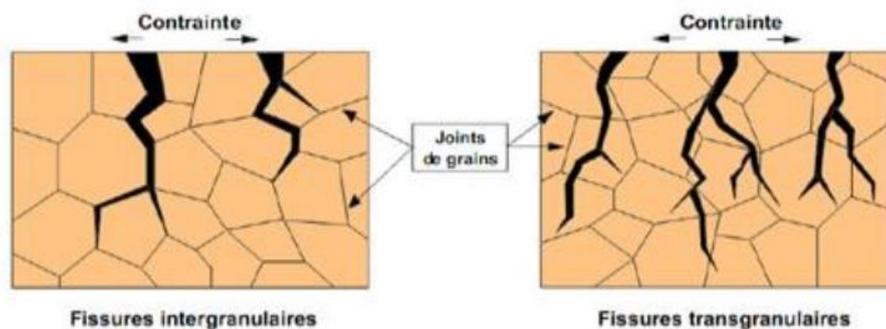


Figure 1-3: Corrosion inter granulaire d'un acier inoxydable

1.3.4.2.4 Corrosion sous contrainte

Comme son nom l'indique, la corrosion sous contrainte (CSC) résulte de l'action conjuguée d'une contrainte mécanique (résiduelle ou appliquée), et d'un milieu agressif vis à vis du matériau. Ce type de corrosion, particulièrement sournois et dangereux pour les installations, se caractérise par l'apparition de fissures inter ou transgranulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte [10].

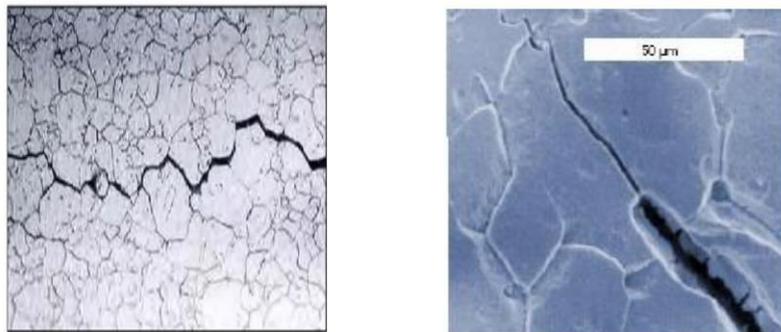


Figure 1-4 : Représentation schématique de fissures de CSC Observées au microscope

1.3.4.2.5 Corrosion par érosion

Elle est à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de la matière, elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide d'un fluide [7].

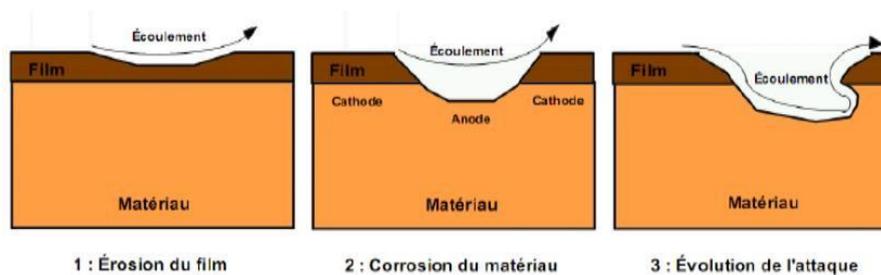


Figure 1-5 : Représentation schématique du phénomène de corrosion érosion

1.3.4.2.6 Fatigue-corrosion

La fatigue-corrosion peut être définie comme l'action combinée d'un environnement agressif et d'une contrainte cyclique entraînant une rupture prématurée du métal par fissuration. Le mécanisme de rupture par fatigue comporte habituellement trois étapes :

- L'amorçage d'une fissure de fatigue à partir d'un défaut géométrique ou métallurgique entraînant une concentration locale de déformation ou de contrainte ;
- La propagation de cette fissure dans la pièce ;
- La rupture de celle-ci [9].



Figure 1-6 : Photos de la fatigue-corrosion

1.3.4.2.7 Corrosion caverneuse ou par crevasses

La corrosion des crevasses, également appelée corrosion caverneuse, est causée par une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure métallique. Il s'agit ensuite d'une attaque sur les pièces métalliques moins accessibles à l'oxygène. La corrosion caverneuse a lieu dans les crevasses. Avec les robinets, la corrosion caverneuse commence généralement entre les écrous et les rondelles. L'oxygène peut difficilement se diffuser dans ces fissures. Elle résulte de la différence d'accès d'oxygène aux différentes parties du métal. L'oxygène dissous se renouvelle plus facilement à la surface et se disperse plus rapidement dans le métal. Il en résulte un gradient de concentration de O_2 dissous entre les zones oxygénées et non oxygénées, créant une pile de concentration. La zone de la pièce proche de la surface, donc plus oxygénée, devient une zone cathodique avec réduction de O_2 et libération de OH^- . Cette zone est à l'abri de la corrosion. D'autre part, la partie de la pièce moins oxygénée fonctionne à l'anode avec dissolution de fer. Une zone d'hydroxydes ferreux et ferriques sépare les zones anodiques et cathodiques et contribue à aggraver l'hétérogénéité du milieu en O_2 dissous et en pH [4].

Les piles de concentration se produisent lorsqu'une pièce métallique homogène est immergée dans une solution dont la concentration en dioxygènes dissous n'est pas uniforme. C'est le cas, par exemple, avec les piliers en métal dans un ponton. Mais cela peut aussi être dû à une différence d'accessibilité au dioxygène entre deux parties d'une structure (tôles pliées, raccords, joints, rayures sur une peinture de voiture). Cette corrosion est causée par la formation d'une petite masse d'eau stagnante dans un vide d'oxygène et par la concentration d'anions corrosifs comme les chlorures. La corrosion cavernreuse survient aux soudures qui ne sont pas parfaitement pénétrantes, aux joints de recouvrement ou autres joints mécaniques sous lesquels l'eau peut stagner [4].

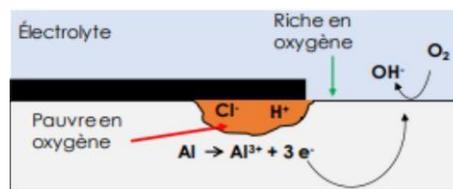


Figure 1-7 : Mécanisme de corrosion cavernreuse de l'aluminium dans un milieu chlorure

1.4 Lutte contre la corrosion

1.4.1 Protection par revêtement métallique ou organique

Il s'agit de la protection passive. En effet elle est constituée par le revêtement extérieur dont le rôle est de créer un effet de barrière électrique entre le métal des canalisations et le milieu environnant. Ce revêtement ne constitue cependant pas une protection absolue et définitive en raison des imperfections ou blessures susceptibles de se produire lors de la pose ou au cours de la vie de l'ouvrage. C'est pourquoi on maîtrise ces risques potentiels par l'installation d'une protection active complémentaire [10].

1.4.1.1 Protection par revêtement métallique

Dans l'industrie du transport des hydrocarbures par canalisation ce type de protection passive n'est pas très souvent utilisé. On distingue deux types de revêtement métallique qui sont le revêtement métallique anodique et le revêtement métallique cathodique, suivant la place relative qu'occupe dans la classification électrochimique le métal qui constitue le revêtement et le métal à protéger. Ainsi dans le cas de l'acier (fer) les revêtements à base de zinc, d'aluminium sont des revêtements métalliques anodiques et ceux à base de plomb, de cuivre, d'étain, de nickel, d'or constituent des revêtements métalliques cathodiques. Pour la réalisation de cette protection il existe plusieurs procédés dont :

- Immersion dans un bain fondu : le métal à protéger est immergé dans un bain chaud du métal protecteur.

- Métallisation au pistolet : le métal fondu est projeté en .ne gouttelette sur la structure à protéger.

Avant de passer à la partie suivant, il est important de noter que la protection métallique cathodique doit être effectuée avec beaucoup de précision, et prudence, car il suffit une seule faille pour que le métal qui était censé être protéger se dégrade au profit du métal protecteur[4].

1.4.1.2 Protection Par Revêtement Organique (non métallique)

C'est le mode de protection passive appliqué sur les canalisations de transport de produits pétrolier et gazier. Il est important de savoir que l'efficacité de ce type de revêtement repose sur l'absence de défaut, mais en pratique cela quasi impossible. L'on exige d'un revêtement les caractéristiques suivantes :

- Une résistance d'isolement élevée pour présenter sous l'épaisseur d'application une résistance électrique convenable.

- Une excellente adhérence avec le métal, pour éviter toute propagation d'un défaut de continuité accidentel.

- Une étanchéité, continuité et homogénéité satisfaisante, pour ne pas être envahir par le milieu environnant.

- Présenter une résistance assez élevée aux agents biologiques et aux produits transportés [4].

1.4.2 La protection cathodique

La protection cathodique se définit comme une méthode de protection où les surfaces anodiques sont rendues cathodiques et le métal est rendu dans sa zone d'immunité (diagramme de pourbaix). Dans cette zone, à un potentiel fixé, le métal ne peut se corroder d'une façon thermodynamique [9].

Il s'agit alors de fournir des électrons au métal pour qu'il cesse de s'ioniser dans ce milieu et qu'il atteigne le potentiel défini. Le potentiel de l'acier dans les sols ou dans l'eau est de l'ordre de -400mV par rapport à l'électrode d'hydrogène pour des PH neutres. Le principe de la protection cathodique trouve son application dans la pile élémentaire ou l'une des électrodes (anode) est toujours corrodée alors que l'autre ne l'est pas. On peut protéger un métal contre la

corrosion en lui imposant un potentiel E_{prot} qui définit par l'équation suivante :

$$E_{prot} = E^0 + \frac{R T}{n F} \ln 10^{-6} \text{ (mol/l)} \quad (1.5)$$

Deux méthodes de protection sont couramment employées en pratique [9].

1.4.2.1 La protection par anode sacrificielle

La protection cathodique par anode sacrificielle est une application du phénomène de corrosion galvanique, C'est-à-dire le métal à protéger est couplé à un métal moins noble. Le potentiel de corrosion de l'ensemble doit être inférieur au potentiel de dissolution du métal à protéger ; ce dernier devient alors cathodique par rapport à l'anode, qui se corrode. On utilise cette méthode pour protéger les structures et les équipements en acier.

Les anodes sacrificielles sont faites en zinc, en magnésium ou aluminium, métaux nettement moins nobles que l'acier [10].

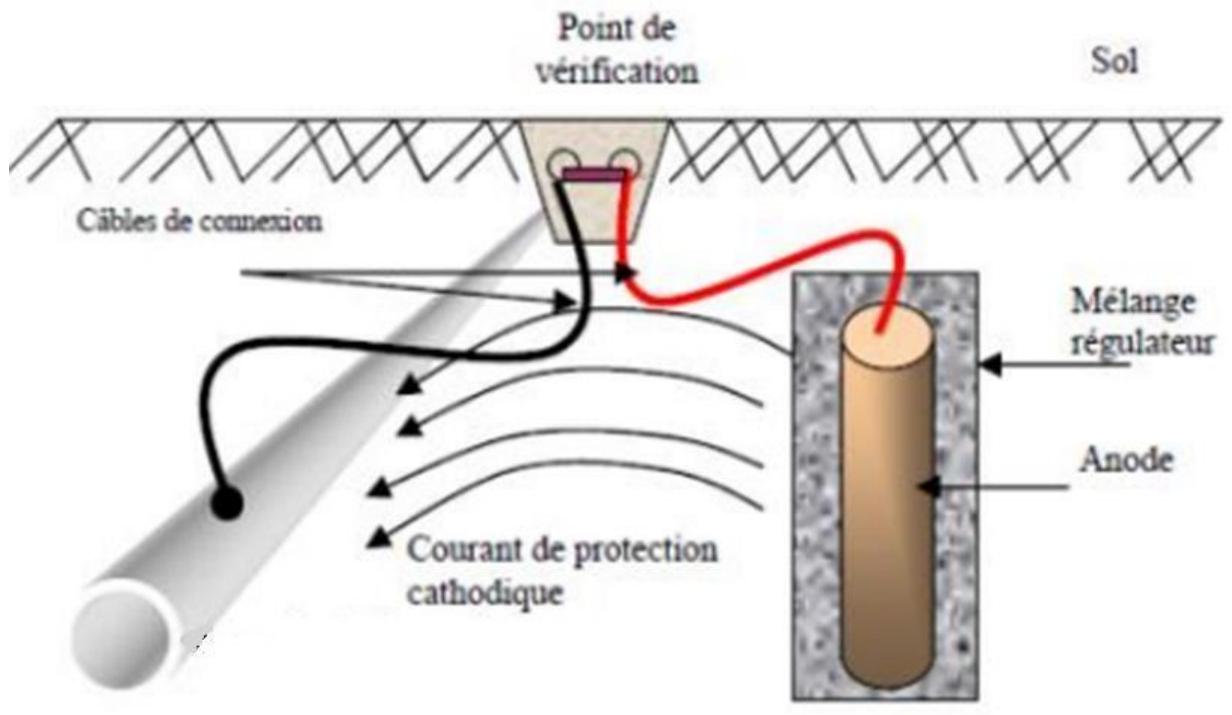


Figure 1-8 : Principes de la protection par anode sacrificielle.

1.4.2.2 Protection cathodique par courant imposé

Dans certaines situations de protection, les anodes sacrificielles ne fournissent pas assez de courant pour une protection optimale. Cette situation est souvent rencontrée dans le cas de

longues conduites de grand diamètre et de tuyaux présentant des problèmes d'isolation. De plus, certaines conditions de l'environnement peuvent parfois causer ce genre de problèmes. Dans de telles circonstances, les ingénieurs de design favorisent l'application de la protection par courant imposé. Cette méthode est aussi appelée protection cathodique par courant extérieur imposé ; ce qui est le sujet dont lequel on va détailler dans le chapitre qui suit [11].

1.4.3 Protection anodique

Le principe de la protection anodique diffère de celui de la protection cathodique en ce sens qu'on fait augmenter le potentiel de corrosion de façon qu'il se situe dans la zone de passivation. En conséquence, cette méthode n'est applicable qu'aux métaux passivés. Le film d'oxyde qui se forme spontanément (de manière naturelle) sur la surface métallique est mince et protecteur. Son épaisseur peut être augmentée par anodisation, comme anodisation de l'aluminium ou du titane. Le principe est un procédé d'électrolyse (imposition d'un courant de passivation anodique) en solution d'acide sulfurique diluée à 15 %. Le film qui en résulte est dur, résistant à l'usure et à la corrosion. La protection anodique, d'origine plus récente, dépend de la passivation du matériau dans l'environnement concerné. Elle est basée sur la propriété de certains matériaux à passiver en environnement corrosif lorsque leur potentiel est maintenu à une valeur correcte. Le film passif est un conducteur électronique dont l'épaisseur est d'environ 10 nm. Sa formation ne nécessite pas plus de 10^{-2} C.cm² d'électricité ; elle doit être relativement insoluble en acides [12].

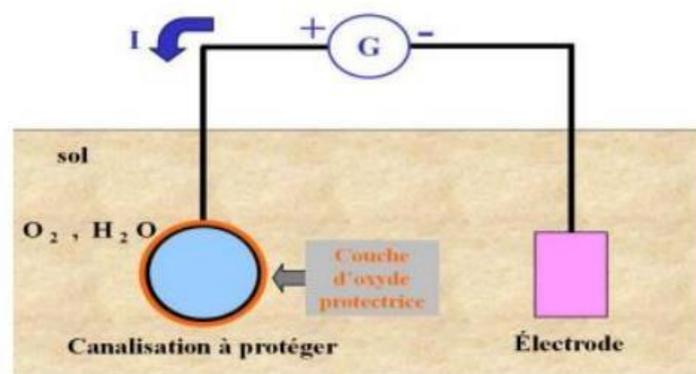


Figure 1-9 : Principe de protection anodique

On peut envisager des techniques de protection anodique dans des environnements comme les acides oxygénés (nitrique, sulfurique ou phosphorique), les nitrates alcalins, pour les métaux comme l'acier ordinaire ou inoxydable, le titane, la zircone ou le niobium. Les alliages de cuivre ne peuvent faire l'objet d'une passivation. Parmi les exemples industriels d'utilisation,

on peut citer la protection d'une canalisation en acier inoxydable pour le transport de mélange acide. Avant d'utiliser cette méthode, on doit procéder à des essais préliminaires pour déterminer la densité de courant correspondant à la détermination de la passivité ainsi que le domaine de potentiel pour lequel le matériau reste passif, c'est à dire l'étendue du palier de passivité [12].

1.4.4 Protection avec inhibiteurs de corrosion

Un inhibiteur de corrosion est un produit chimique qui, lorsqu'il est ajouté en faibles concentrations au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion du métal en contact avec le milieu corrosif. L'action spéciale d'un inhibiteur de corrosion peut être complexe en raison du couple corrosif-métal et est fonction de la température et des concentrations utilisées pour qu'un inhibiteur soit efficace il doit satisfaire un certain nombre de critères :

- 1) Réduire la vitesse de corrosion du métal sans nuire aux propriétés physicochimiques du milieu ou du métal.
- 2) Être stable aux températures d'utilisation et en présence d'autres constituants du milieu, en particulier avec les oxydants.
- 3) Être efficaces à faible concentration.
- 4) Respecter les normes de non toxicité.
- 5) Être peu onéreux

Il est possible de classer les inhibiteurs de différentes façons :

- * Par domaines d'application (la formulation des produits : inhibiteurs organiques ou minéraux).
- * Par réaction partielle (les mécanismes d'action électrochimique : inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes).
- * Par mécanisme réactionnel (les mécanismes d'interface et principes d'action (adsorption et / ou formation d'un film) [5].

1.4.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les fondements du phénomène de corrosion, en abordant ses différentes définitions, mécanismes, formes et conséquences. Il a été clairement établi que la corrosion constitue un enjeu majeur, tant sur le plan technique qu'économique, en raison des pertes de matériaux et des risques qu'elle engendre.

Les différents types de corrosion, qu'ils soient chimiques, électrochimiques, biologiques ou mécaniques, ont été détaillés afin de mieux comprendre les interactions complexes entre les métaux et leur environnement. Une attention particulière a été portée sur la corrosion électrochimique, la plus répandue, et sur ses manifestations les plus courantes telles que la corrosion par piqûres, intergranulaire ou sous contrainte.

Enfin, ce chapitre a mis en lumière les méthodes de lutte contre la corrosion, avec un accent particulier sur la protection cathodique, qui fera l'objet d'une étude approfondie dans les chapitres suivants, notamment dans le contexte de son alimentation par une source photovoltaïque.

Chapitre 02 : Protection cathodique

2.1 Introduction :

Dans ce deuxième chapitre, nous avons abordé en détail les deux principales méthodes de mise en œuvre de la protection cathodique : la protection par anodes sacrificielles et celle par courant imposé. Ces deux techniques constituent des solutions efficaces pour lutter contre la corrosion des structures métalliques, notamment les canalisations enterrées ou immergées, en leur assurant un potentiel électrochimique négatif suffisant pour prévenir leur oxydation. Chaque méthode a ses domaines d'application, ses avantages et ses limites, qui dépendent des caractéristiques du sol, de la nature du métal à protéger, de la longueur des structures et de leur isolement électrique. Une attention particulière a été accordée aux paramètres de conception, aux matériaux utilisés (zinc, magnésium, ferrosilicium, graphite, etc.) ainsi qu'aux conditions d'installation pour garantir une efficacité maximale du système.

2.2 Protection par anode sacrificielle

La protection cathodique d'une canalisation en acier peut être obtenue par liaison électrique à une masse métallique appelée anode sacrificielle ou anode soluble, faite d'un métal moins noble que l'acier, de façon à abaisser le potentiel de la conduite en dessous du critère de protection (- 850 mV avec l'électrode Cu/CuSO₄) [14].

2.2.1 Anodes à base de zinc

Le zinc utilisé dans la fabrication des anodes est un zinc de haute pureté (Zn = 99,987 %) additionné en faible quantité d'éléments comme l'aluminium, et dont le pourcentage de fer ne dépasse pas 0,0014 % afin d'éviter la passivation du matériau de base.

La consommation massique pratique est d'environ 11,9 Kg /A.an.

Leur potentiel dans le sol est – 1100 mV (Electrode de Cu / CuSO₄).

Les anodes en Zinc présentent une très grande fiabilité de fonctionnement et ont de ce fait, une durée de vie importante, avec consommation presque totale du matériau. La masse d'une anode en Zn est de 20 Kg.

Leur domaine d'utilisation est très varié car elles peuvent être employées aussi bien en terrains acides qu'alcalins, en eau douce ou en eau de mer.

Cependant, on ne les emploie que dans les électrolytes très peu résistants et pour de faibles débits de courant à cause du faible écart de potentiel [14].

2.2.2 Anodes en magnésium

Le type d'anodes utilisé correspond à un alliage à 90 % de magnésium contenant 6 % d'aluminium, et environ 3 % de zinc.

La consommation massique pratique est d'environ 7.9 Kg/A.an.

Le potentiel dans le sol est -1550 mV par rapport à l'électrode Cu/CuSO₄.

L'écart de potentiel par rapport au critère de protection est de 750 mV.

L'anode de magnésium présente sur celle en Zinc l'avantage d'offrir une tension plus importante, et donc de permettre son utilisation sur des ouvrages de plus grandes dimensions dans des terrains de plus forte résistivité.

Cet avantage peut, dans certains cas, être un inconvénient, car il se traduit par des débits de courant plus importants donc une durée de vie plus faible [14].

2.2.3 Mélange régulateur de l'anode

C'est un milieu qui assure une corrosion uniforme de l'anode, et maintien autour d'elle une humidité constante réduisant ainsi la résistance de contact anode-sol. Les anodes sont livrées dans un sac de jute contenant le régulateur (backfill) qui est composé d'un mélange de bentonite, de gypse et d'eau avec une longueur de câble suffisante pour le raccordement.

Une anode de 20 Kg livrée sans backfill nécessite [15]:

- 50 Kg de bentonite
- 12.5 Kg de gypse (sulfate de calcium)
- Une grande quantité d'eau .

2.3 Installation des anodes

La protection par anode réactive ne s'applique qu'aux réseaux de petite longueur (2 à 3 Km) et bien isolés, dont la résistance d'isolement des conduites par rapport au sol est bonne (au moins $5000 \Omega.m^2$).

L'efficacité d'une anode sacrificielle dépend de sa position par rapport à l'ouvrage et son environnement. Son rendement sera meilleur si elle est posée dans des conditions suivantes :

- Au milieu de l'ouvrage à protéger, de manière à ce que sa portée englobe l'ensemble de l'ouvrage.
- A une distance supérieure à 3 mètres de la conduite à protéger et de tout autre ouvrage métallique enterré, elles sont posées verticalement ou horizontalement dans la tranchée.
- Dans des terrains les plus humides possibles et de faible résistivité électrique de valeur inférieure à $30 \Omega.m$ pour l'anode en zinc et $50 \Omega.m$ pour l'anode en magnésium (la pose ne se fait qu'en terrain agressif).
- La partie supérieure de l'anode doit être située sous le niveau de la génératrice inférieure de la canalisation.

Avant de remblayer la fouille l'ensemble anode-régulateur doit être imbibé d'eau pour que le milieu entourant l'anode devienne une boue épaisse. La liaison anode-conduite se fait par l'intermédiaire d'une borne de contrôle [16].

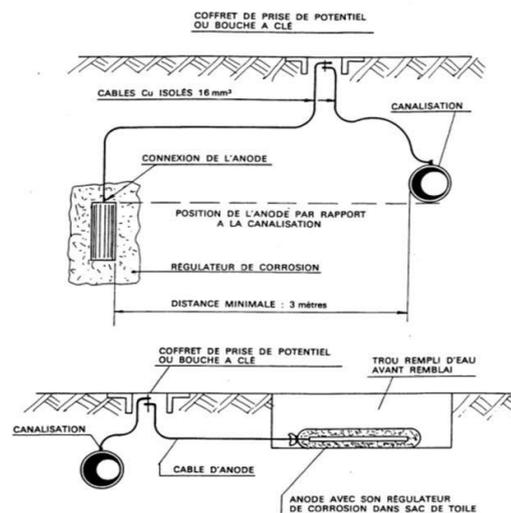


Figure 2-1 : Schéma d'implantation des anodes

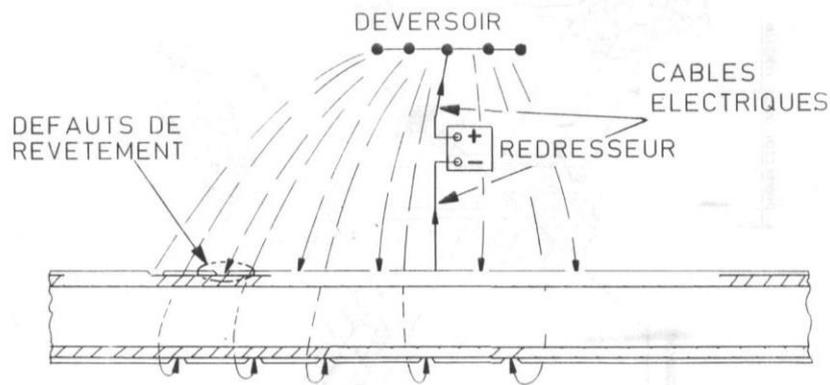


Figure 2-2 : schématisation du principe de protection par courant imposé

2.4 Protection par courant imposé (soutirage de courant)

Dans ce mode de protection, l'abaissement de potentiel est obtenu en reliant la structure à protéger au pôle négatif d'un générateur de courant continu dont le pôle positif est connecté à un déversoir enterré à une certaine distance et servant de pièce de consommation.

Le courant sort de l'anode dans le sol et rentre dans la structure à protéger qui est ainsi portée à un potentiel électro-négatif par rapport au milieu dans lequel elle se trouve.

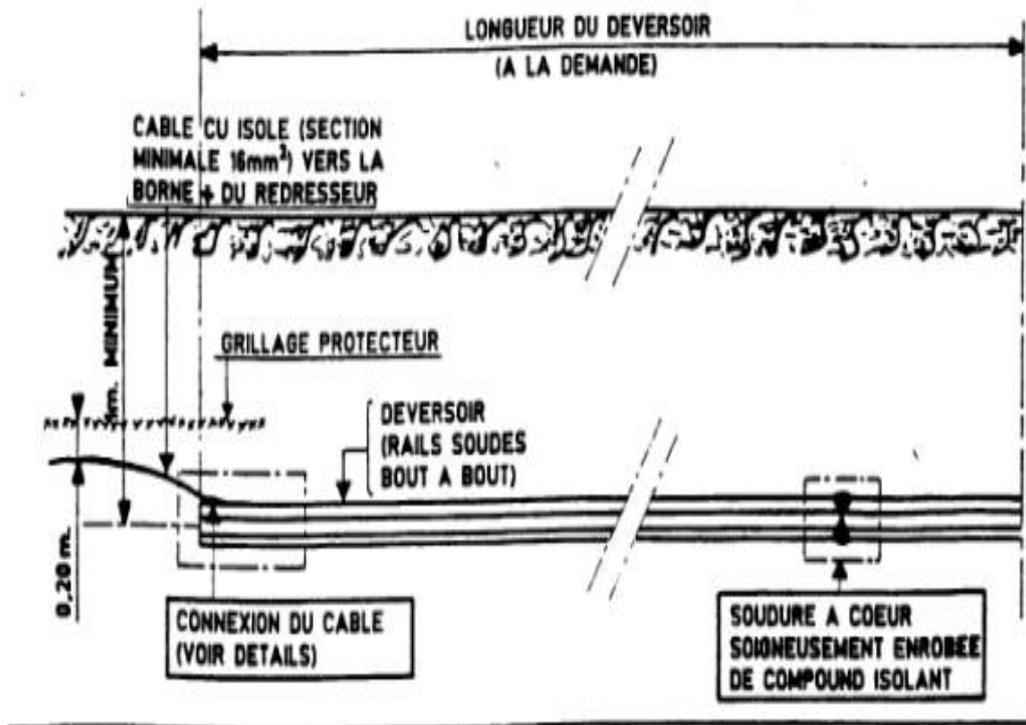
Les rentrées de courant diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du poste de protection. Il faut donc qu'aux points extrêmes (par rapport au soutirage) on obtienne le potentiel minimal de protection du métal considéré.

Pour obtenir un rayonnement maximum, il faut que la masse sacrificielle soit disposée perpendiculairement à la conduite à une distance de 50 à 100 mètres et parfois plus. Avec ce système de protection, on peut protéger des tronçons très importants (50 à 150km) [17].

2.4.1 Constitution d'un soutirage

Une installation de soutirage comprend :

- une source d'énergie BT. (Basse tension)
- Un coffret comprenant le compteur, le disjoncteur et le générateur de courant continu qui est le transfo-redresseur.
- Un déversoir



DETAILS

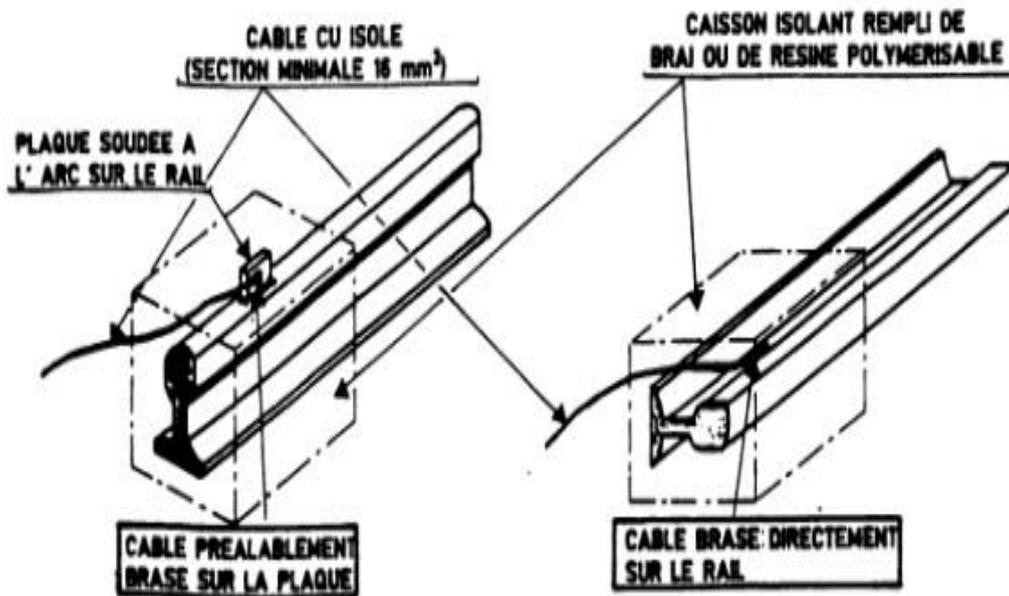


Figure 2-3 : Constitution d'un déversoir à partir de rail

Des câbles de liaisons électriques du pôle négatif du redresseur au réseau à protéger, du pôle positif du transfo-redresseur au déversoir et le transfo-redresseur avec la prise de terre[14]

2.4.1.1 Déversoir

Le déversoir est un matériau conducteur d'électricité, il est soumis à la corrosion du système électrochimique conduite-sol-déversoir. Son rôle est d'injecter le courant de protection dans l'électrolyte. Il est relié à la borne positive de la source électrique, et la valeur mesurée de son potentiel dans le sol, est souvent positive. Il est important de noter que dans le cas des anodes sacrificielles, la « pièce anodique » du système électrochimique est l'anode galvanique, dont le potentiel est négatif par rapport au sol.

Par contre, dans les deux cas (déversoir ou anode sacrificielle), l'électrode dont le potentiel est rendu plus positif (car libération d'électrons), soit à la mise en service du générateur, soit lorsque la liaison électrique des deux métaux est réalisée (dans le cas d'une protection par anode sacrificielle), doit être considérée comme l'anode du système.

Ces considérations montrent qu'il faut éviter de désigner l'anode d'un système à partir du signe de son potentiel. On utilise très souvent des rails comme déversoir, ou des alliages de fer silicium.

La masse du matériau constituant le déversoir devra être déterminée pour que l'installation ait une durée de vie de l'ordre de 15 à 20 ans.

Elles doivent être conçues de manière :

- À ne présenter qu'une faible résistance de contact dans le sol de façon à ne nécessiter qu'une force électromotrice aussi faible que possible pour limiter la puissance du générateur de courant et la consommation d'énergie électrique.

Cette qualité est obtenue en choisissant les emplacements humides et agressifs (cours d'eau, terrain argileux etc.), et en utilisant des formes de déversoirs présentant de grande surface de contact avec l'électrolyte où ils se trouvent.

- À n'être consommée qu'après plusieurs années. Pratiquement c'est des rails types SNTF soudés bout à bout qui sont utilisés comme anodes déversoirs, leur consommation est de 9.15 Kg / A.an. La connexion électrique de ces déversoirs se fera par procédé aluminothermique en plusieurs points le long du rail. [18]

2.4.2 Installation du déversoir

Le déversoir doit être implanté à une distance de 50 mètres environ de la conduite à protéger et perpendiculaire à celle-ci, de façon à favoriser son rayonnement et augmenter ainsi la portée du poste de protection. En règle générale, Il faudra veiller impérativement à s'écarter d'au moins 50 mètres des ouvrages métalliques des autres occupants du sous-sol (susceptible de capter les courants déversés) afin d'éviter toute influence sur ces structures, ceci est dans le cas où le courant de protection est élevé [19].

Par contre si le courant de protection est de l'ordre de 2 ou 3 ampères, la distance entre le déversoir et les autres canalisations est ramenée à 10 mètres, en plus les précautions d'isolement doivent être prises aux points de croisement [20].

2.4.2.1 Anodes déversoirs

Elles servent à injecter le courant de protection cathodique dans le sol.

La masse du matériau constituant le déversoir devra être déterminée pour que l'installation ait une durée de vie de l'ordre de 15 à 20 ans.

Elles doivent être conçues de manière :

- À ne présenter qu'une faible résistance de contact dans le sol de façon à ne nécessiter qu'une force électromotrice aussi faible que possible pour limiter la puissance du générateur de courant et la consommation d'énergie électrique.

Cette qualité est obtenue en choisissant les emplacements humides et agressifs (cours d'eau, terrain argileux etc..), et en utilisant des formes de déversoirs présentant de grande surface de contact avec l'électrolyte où ils se trouvent.

- À n'être consommée qu'après plusieurs années. Pratiquement c'est des rails types SNTF soudés bout à bout qui sont utilisés comme anodes déversoirs, leur consommation est de 9.15 Kg / A.an. La connexion électrique de ces déversoirs se fera par procédé aluminothermique en plusieurs points le long du rail.

On peut utiliser les déversoirs verticaux qui permettent de rétrécir le champ de rayonnement du courant de protection au point de soutirage, on utilise des anodes en graphite ou en ferrosilicium sous forme de rondins disposés en ligne et espacés d'au moins 5 à 6 mètres l'un de l'autre [21].

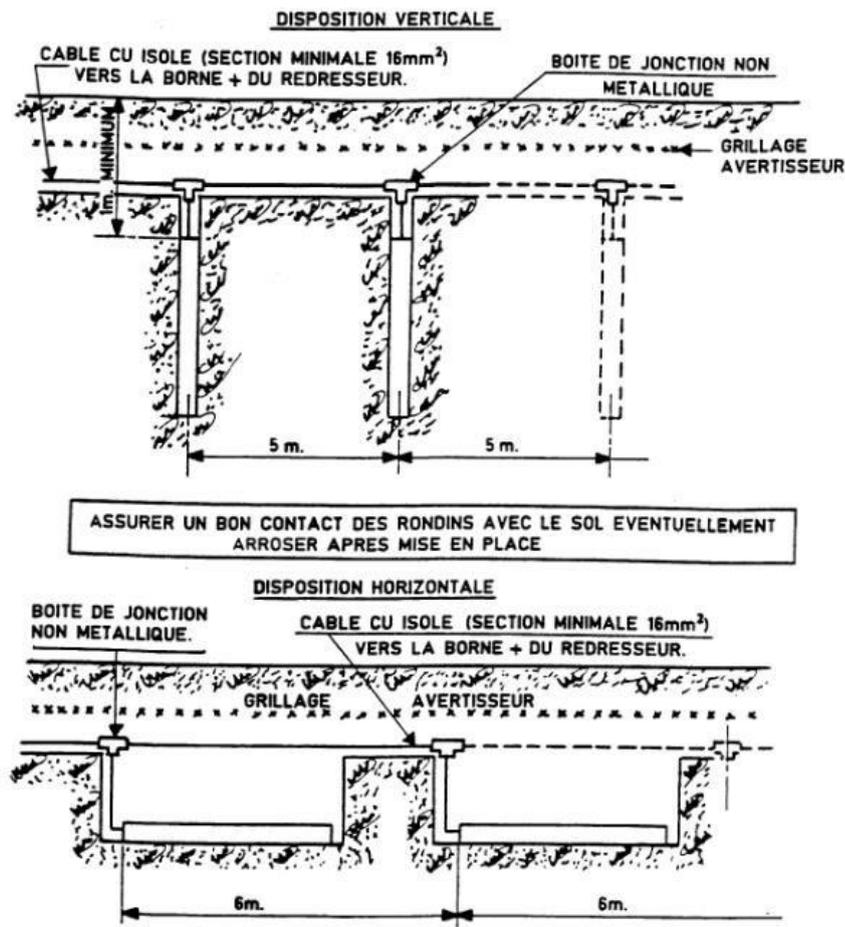


Figure 2-4 : Disposition des anodes en ferrosilicim

2.4.2.2 Milieu entourant le déversoir : (régulateur de corrosion)

Dans le cas du rail ; Si la résistivité est supérieure à $90 \Omega.m$ la résistance électrique sol-déversoir peut s'améliorer en ajoutant une boue liquide à base de bentonite, qui est constituée pour 1 mètre de rail :

- 35Kg de bentonite,
- 2 Kg de sel,
- 150 litres d'eau.

Si la résistivité du sol reste élevée on ajoute 10 Kg de gypse en poudre ou plâtre gâché. Par contre dans des régions très sèches un système d'arrosage permanent peut être installé sur chaque déversoir pour humidifier en période d'été le régulateur de corrosion par un apport d'eau extérieur [22].

Ce système est constitué de longueur de tubes en P.V.C de diamètre 80 mm, raccordés les uns aux autres et perforés dans la partie inférieure.

Il doit être posé au-dessus du rail, parallèlement à celui et sur un lit de gravier (10 cm), ce dernier permet lors de l'arrosage une infiltration lente et homogène de l'eau vers le backfill [22].

Le gravier mis entre la plaque en P.V.C (perforée) et la tête de la tige sert à éviter la perforation des corps étrangers qui pourront boucher le passage de l'eau lors de l'arrosage et facilite le nettoyage de la plaque [22].

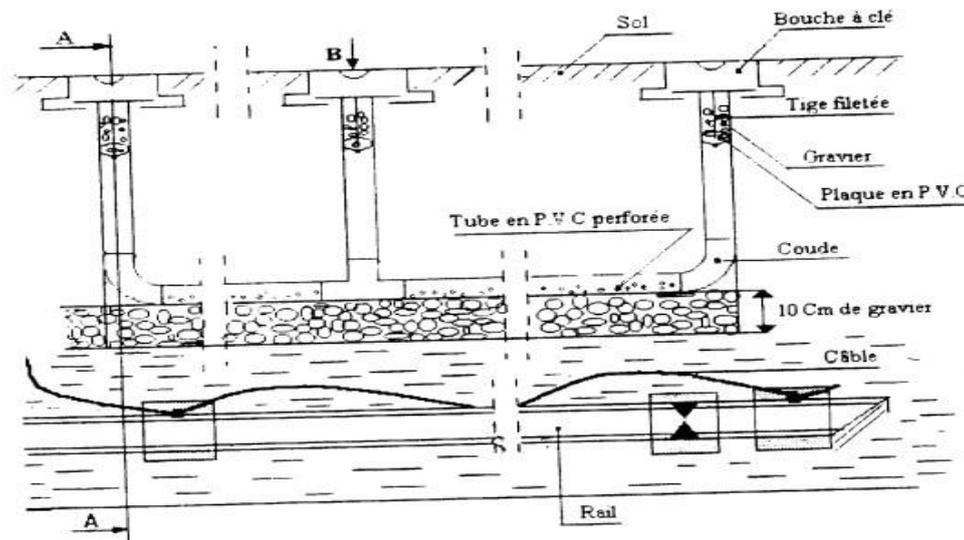


Figure 2-5 : Schéma de pose de système d'arrosage

Dans des terrains compacts et très résistants on peut augmenter la surface de contact du déversoir avec le sol au moyen d'un autre matériau à base de graphite qui est très conducteur. On utilise alors pour un mètre de rail un régulateur de corrosion de composition suivante ;

- 30 Kg de poussier de coke
- 10 Kg de chaux

Le poussier de coke peut être remplacé par du charbon de bois pilé ou d'autres produits à base de graphite [22].

2.4.2.3 Matériaux utilisés :

- L'acier sous forme de rails de rebut (50 Kg au mètre). Il peut être utilisé dans tout milieu quelle que soit sa résistivité.
- Le graphite se présente sous forme de rondins, de poudre agglomérée par un liant constitué de poudre de graphite. Sa consommation est de l'ordre de 1 Kg/ A.an. Il peut être utilisé dans tout milieu sauf l'eau de mer.

- Le ferrosilicium se présente sous la forme de rondins en fonte avec 16 % environ de silicium et 4 % de molybdène ou de chrome. Sa consommation est de l'ordre de 0.5 Kg/A.an. Il ne peut être utilisé que dans des terrains de résistivité inférieure à 20 Ω .m.
- La magnétite se présente sous forme d'un cylindre creux, en oxyde de fer Fe_3O_4 fondu. Sa composition est de l'ordre de 10 g/ A.an. Elle ne peut être utilisée que dans les terrains de résistivité inférieure à 20 Ω .m.
- En eau de mer, le titane platiné est très souvent utilisé. La consommation du platine est de 10 mg/A.an.

Pour ces déversoirs en graphite, il est conseillé d'utiliser comme régulateur de corrosion un mélange à base de graphite, le régulateur à base de bentonite est utilisé juste pour les anodes en ferrosilicium seulement[23].

2.4.2.4 Résistance de terre des déversoirs

La résistance de terre d'un déversoir doit être estimée lors des études, pour être compatible avec les possibilités du générateur de courant continu, et fournir le courant nécessaire, ou à prévoir, pour la protection du réseau compte tenu des extensions prévisibles.

- Cette résistance dépend de la forme du déversoir, de ses dimensions, de la résistivité du sol et peut être calculée à partir de formules empiriques [14].

2.4.3 Choix de l'implantation d'un poste de soutirage

Le meilleur emplacement pour un poste de soutirage est celui qui permet d'assurer une protection la plus efficace sur la plus grande portée avec une puissance minimale.

Ce mode de protection est appliqué en fonction des paramètres suivants [14] :

- Dimension et géométrie des structures à protéger,
- Le point le plus favorable pour l'installation de déversoir (terrain de faible résistivité).
- L'encombrement du sous-sol en structures métalliques diverses,
- Proximité d'une source électrique BT

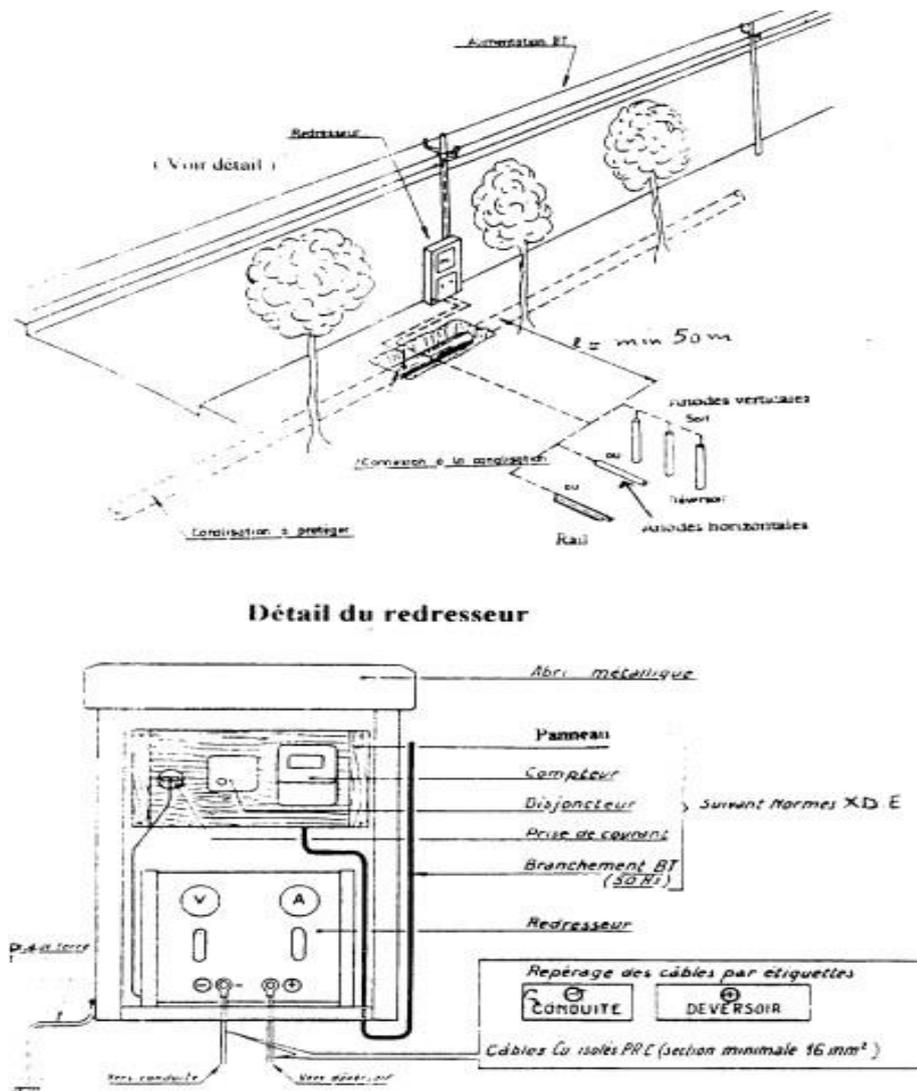


Figure 2-6 : Schéma d'implantation d'un soutirage

De plus cet emplacement devra être choisi au centre du réseau afin d'obtenir une bonne répartition des potentiels et en un point du réseau où le diamètre des conduites est important pour avoir la conductibilité longitudinale la plus favorable, afin de diminuer autant que possible le nombre de redresseur à poser [14].

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

- Conduites enterrées revêtues, dont la longueur dépasse quelques kilomètres,

L'étude permettra de définir :

- le type et la puissance des installations de protection,
- leur implantation géographique, en particulier celles des masses anodiques,

- le nombre et le positionnement des dispositifs de contrôle (prises de potentiels).

Dans tous les cas, il sera tenu compte du vieillissement possible de l'isolement de la canalisation, pour déterminer la puissance de l'installation [14].

Avant de déterminer les formules de calcul on doit expliquer les principales notions, et de donner certains paramètres qui entrent dans les calculs à savoir :

a) Potentiel d'injection

Le potentiel d'injection est défini comme étant l'abaissement du potentiel qu'on doit assurer au point de soutirage afin d'avoir aux extrémités de la conduite des valeurs inférieures aux seuils de protection ($< -850 \text{ mV} / \text{Cu/CuSO}_4$) [14].

b) Courant de protection

Il est défini comme étant l'intensité de courant nécessaire à injecter dans la structure afin d'assurer un abaissement du potentiel par rapport au critère de protection [14].

c) Résistance longitudinale de la conduite :

Les ouvrages métalliques traversés par le courant de protection sont considérés comme des conducteurs, ces conducteurs présentent une résistance au passage d'un courant électrique.

Cette résistance est appelée résistance longitudinale et dépend de la nature du matériau et de ses dimensions [14].

Elle est donnée par la formule suivante : $r = \frac{\rho}{S}$

$$\rho_a \qquad \rho_a$$

$$r = \frac{\rho_a}{\pi \times e (D_{\text{ext}} - e)} = \frac{\rho_a}{\pi \times e D_{\text{ext}}} \quad [\Omega \cdot \text{m}^{-1}] \qquad (2.1)$$

r : résistance longitudinale de la conduite en $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$

ρ_a : résistivité de l'acier qui varie entre $17 \cdot 10^{-8}$ et $24 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$

e : l'épaisseur du tube en m (il est fonction du diamètre)

D_{ext} : diamètre extérieur de la conduite en mètre.

d) Résistance transversale de la conduite

La résistance transversale R est exprimée en $\Omega \cdot \text{m}$, est la résistance électrique par rapport au sol d'un mètre de canalisation revêtue [14].

$$R = \frac{R_{is}}{\pi \cdot D_{ext}} \text{ ou } R = (Ln \frac{\rho_a}{2\pi} - 1) \frac{8L}{D_{ext}} \quad [\Omega \cdot m] \quad (2.2)$$

R : résistance transversale de la conduite en $\Omega \cdot m$

R_{is} : résistance d'isolement en $\Omega \cdot m^2$ calculée ou estimée

D_{ext} : diamètre extérieur de la conduite en mètre.

$\pi \cdot D_{ext}$: Périmètre (P).

e) Coefficient d'atténuation :

$$\alpha = \sqrt{r / R} \quad [m^{-1}] \quad (2.3)$$

r : résistance longitudinale de la conduite en $\Omega \cdot m^{-1}$

R : résistance transversale de la conduite en $\Omega \cdot m$

Ce coefficient varie de 1 à $20 \times 10^{-5} m^{-1}$, il est inversement proportionnel à la valeur d'isolement, plus la valeur d'isolement est importante plus le α est faible et plus la portée de soutirage est importante [14].

f) Résistance caractéristique :

$R_c = \sqrt{r R} \quad [\Omega]$ La résistance caractéristique d'un tronçon représente la résistance de terre d'une conduite de longueur infinie[14].

g) Calcul du courant de protection (structures compactes ou des surfaces réduites): [14]

Dans ce cas on peut utiliser la notion de la densité de courant de protection pour calculer le courant de protection

*** Cas ou R_{is} connue :**

$$I = i \cdot S_T = i \cdot \pi \sum_{i=1}^n D_{ext i} \cdot L_i \quad (2.4)$$

I : courant de protection du réseau en ampère

i: densité de courant en mA/m²

calculer par la formule $i = \frac{[E_{rep} - E_{prot}]}{R_{is}}$ (2.5)

Ou déterminer à partir de l'essai.

E_{rep} : potentiel de la conduite au repos (sans protection) = - 0,75 ou

0,4 V (Cu/CuSO₄)

E_{prot} : potentiel seuil de la conduite sous protection = - 1 V (Cu/CuSO₄)

R_{is} : une valeur estimée par le tableau du Chap.II en fonction de la nature du revêtement

D_{ext} : diamètre extérieur du tube.

L : longueur du tube.

* Cas R_{is} non connue

Si on ne connaît pas la valeur de la résistance d'isolement (R_{is}), on peut prendre la surface nue de la conduite (c-à-d la seule surface à protéger), suivant le type de revêtement et les difficultés de pose X la densité de courant donnée par divers auteurs dans les différents milieux.

Remarque : Compte tenu de nombreuse hétérogénéité de la structure et du sol, la densité de courant nécessaire est difficile à appréhender, mais des expériences ont permis d'évaluer la densité de courant de protection pour des métaux de différents milieux. Elle est définie par une valeur moyenne égale à la totalité du courant de protection divisée par la surface totale de l'ouvrage à protéger [14].

Les densités de courant données par divers auteurs dans les différents milieux sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2-1: Densité de courant selon le type de conduite

TYPE DE CONDUITE	Densité du courant MA/ M ²
Réseau de canalisations immergées avec revêtement type C	0,5 à 1
Réseau de canalisations enterrées avec revêtement type C dégradé	0,3 à 0,6
Conduite d'acier enterrée avec revêtement type C en bon état	0,01 à 0,15
Conduite d'acier enterrée revêtue de PE ou d'époxy	0,001 à 0,1

Ce tableau reflète l'expérience acquise. Il est donné à titre indicatif et ne saurait justifier à lui seul un calcul de protection cathodique :

h) Détermination du poids du rail :

D'après la loi de Faraday on sait que la consommation du fer est de 9,15 Kg/Amp.an

$$\Rightarrow P = 9,15 \times I \times t \quad [\text{Kg}] \quad (2.6)$$

P : le poids du rail qu'il faut pour un débit de courant I

t : la durée de vie du rail voulue (20 à 30 ans) [14].

i) Détermination de la longueur du rail:

Sachant que 1 mètre linéaire du rail = 46 kg \Rightarrow

$$L = P / 46 \quad [m] \quad (2.7)$$

L : longueur du rail en mètre

P : poids du rail en Kg [14].

j) Calcul de la résistance de terre d'un déversoir :

La résistance de terre d'un déversoir doit être calculée pour être compatible avec les possibilités du générateur de courant continu, qui fournit le courant nécessaire pour la protection du réseau, compte tenu des extensions prévisibles. Cette résistance dépend de la forme du déversoir, de ses dimensions et de la résistivité du sol [14].

◆ Pour le rail posé horizontalement :

$$R = \frac{0.366 \rho_s}{L} \times \left[\text{Log} \frac{3L}{2d} + \text{Log} \frac{3L}{8h} \right] \quad (2.8)$$

R : résistance de terre d'un déversoir en Ω .

ρ_s : résistivité du sol en $\Omega.m$

L : longueur du rail en m

d : diamètre du rail en m = 0.10m

h : profondeur de pose du rail en m

Log : logarithme décimal.

- ◆ Pour le rail posé verticalement :

$$R = \frac{0.366 \rho_s}{L} \times \left[\text{Log} \frac{3L}{d} \right] = R_1 \quad (2.9)$$

- ◆ Pour les anodes posées verticalement :

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right) = R_1 \quad (2.10)$$

R_v : Résistance de terre en (Ω),

ρ_s : résistivité du sol en (Ω m),

L : longueur de l'anode en (m),

d : diamètre de l'anode en (m).

- ◆ Pour les anodes posées horizontalement :

$$R_h = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{L + \sqrt{(4t-d)^2 + L^2}}{-L + \sqrt{(4t-d)^2 + L^2}} + \ln \frac{L + \sqrt{d^2 + L^2}}{-L + \sqrt{d^2 + L^2}} \right) = R_1 \quad (2.11)$$

R_h : Résistance du déversoir horizontal Ω ,

L : Longueur de l'anode (m),

t : profondeur de pose de l'anode,

d : diamètre de l'anode et de son backfill (m).

Cette résistance peut être déterminée pour chaque type de déversoir à l'aide des données expérimentales :

$$R / \rho_s = f(\text{longueur du déversoir}) \quad (2.12)$$

$$R / \rho_s = f(\text{nombre des anodes}) \quad (2.13)$$

Pour une longueur donnée du rail ou un nombre déterminé d'anodes on détermine

R / ρ_s en %, et pour avoir la résistance on multiplie ce rapport par ρ_s .

Exemples :

- Pour un rail de longueur 50 mètres $R / \rho_s = 3 \%$

Dans un terrain de 60 Ω .m, le déversoir aurait pour résistance $R = 0,03 \times 60 = 1,8 \Omega = R_1$

- Pour 4 anodes en FeSi, $R / \rho_s = 8\%$,

Dans un terrain de $60 \Omega.m$, le déversoir aurait pour résistance

$$R = 0,08 \times 60 = 5,2 \Omega = R_1$$

Remarques :

* Généralement la pose des déversoirs se fait horizontalement, car cette technique est simple, et demande moins de moyens.

* Estimation de la longueur du déversoir : l'hypothèse de calcul est basée sur la détermination de la résistance du déversoir à la plus faible valeur possible pour éviter une tension trop élevée aux bornes du générateur de courant, la valeur de 1Ω est considérée comme très bonne et les valeurs de 2 à 3 Ω très acceptables. Pour assurer cette faible résistance du déversoir, il faut choisir l'emplacement à des zones de faible résistivité [14].

k) Détermination de la puissance de soutirage :

$$P = \frac{U I_s}{\eta} = \frac{R I_s^2}{\eta} \quad [\text{Watt}] \quad (2.14)$$

η : le rendement du redresseur en générale il est de 60 à 75 %

R : la résistance du circuit = $\sum R_i = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$

R_1 : résistance du déversoir/sol

R_2 : résistance de la conduite /sol

R_3 : résistance de la conduite

R_4 : résistance des câbles

*** calcul de R_3**

$$R_3 = \frac{\rho_a \cdot L_T}{S_T} = \frac{\rho_a \cdot L_T}{\pi \cdot D_{ext} \cdot e} \quad (2.15)$$

* R_4 négligeable devant toutes ces résistances varie entre 0,279 et 0,07 Ω

Donc le dimensionnement du redresseur est donné par la tension, l'intensité et la puissance

*** Exemple de calcul pour une protection par soutirage**

Supposons qu'on a un réseau acier revêtu en revêtement type C, et constitué de :

2 Km d'acier diamètre 300 mm

3,5 Km d'acier diamètre 80 mm

Résistivité moyenne du sol $\rho_s = 30 \Omega.m$

Résistivité de l'acier $\rho_a = 17 \cdot 10^{-8} \Omega.m$

♦ Caractéristiques physiques $S = \pi D_{ext} L$

Tableau 2-2 : Caractéristiques géométriques des conduites

Diamètre Nom (mm)	Diamètre ext (mm)	Epaisseur (mm)	Longueur (m)	Surface (m ²)
300	323,9	4	2000	2035,12
80	88,9	3,2	3500	977,51

$$S_t = 3012,6 \text{ m}^2$$

♦ Calcul des paramètres r, R, α et R_c

Ris a été estimée selon le tableau de 2.1, la valeur prise est celle où le revêtement type C est dégradé **Ris = 1000 Ωm^2**

Tableau 2-3 : Caractéristiques électriques des conduites

Diamètre Nom. (mm)	Diamètre ext. (mm)	Epaisseur (mm)	Résistance r en (Ωm^{-1})	Résistance R en (Ωm)	Coefficient α (m^{-1})	Résistance R_c (Ω)
300	323,9	4	$4,18 \cdot 10^{-5}$	$0,98 \cdot 10^3$	$2,06 \cdot 10^{-4}$	0,20
80	88,9	3,2	$19,02 \cdot 10^{-5}$	$3,58 \cdot 10^3$	$2,30 \cdot 10^{-4}$	0,83

♦ Calcul du courant de protection

I. Cas où Ris est connue = 1000 Ωm^2

Calcul de la densité de courant :

$$i = (E_{rep} - E_{prot}) / R_{is} \quad (2.16)$$

$$E_{rep} = -0,58 \text{ V}$$

$$E_{prot} = -1 \text{ V} \quad \Rightarrow i = 0,42 \text{ mA/m}^2$$

$$I = i S_t = 0,42 \times 3012,6 = 1,3 \text{ A}$$

Pour cette valeur nous ajoutant 1 A de part et d'autre de l'emplacement du soutirage et ceci pour les futures extensions [14], Ce qui donne un courant de

$$I_s = 3,3 \text{ A}$$

II. Cas ou R_s non connue :

Selon le tableau du parag. g, la densité de courant estimée pour un réseau enterrée avec revêtement type C dégradé, est de moyenne de $0,45 \text{ mA/m}^2$

$$I = 0,45 \times 3012,6 = 1,36 \text{ A} \Rightarrow I_s = 3,36 \text{ A.}$$

- Calcul des caractéristiques du rail

* Calcul du poids

$$P = 9,15 \text{ I t pour } t = 20 \text{ ans} \Rightarrow P = 9,15 \times 20 \times 3,36 = 615 \text{ Kg}$$

$$P = 615 \text{ Kg}$$

* Calcul de la longueur

$$L = P/46 = 13,5 \text{ m}$$

$$L = 13,5 \text{ m}$$

* Calcul de la résistance

$$\text{Pour } L = 13,5 \text{ m} \Rightarrow R = 2,31 \Omega > 1 \Omega$$

Donc il faut rechercher la longueur pour une résistance égale à 1 Ohm

$$- L = 20 \quad R = 1,74 \Omega$$

$$- L = 30 \quad R = 1,29 \Omega$$

$$- L = 40 \quad R = 1,04 \Omega$$

$$- L = 42 \quad R = 0,998 \Omega$$

La longueur du rail doit être égale à 42 mètres \Rightarrow

$$L = 42 \text{ m} , P = 1932 \text{ Kg}$$

Calcul de I_s et E_s selon les lois des Telegraphistes

Pour des structures longilignes les formules générales sont les suivantes :

$$E_x = E_0 \text{ ch } \alpha x + R_c I_0 \text{ sh } \alpha x \quad (2.17)$$

$$I_x = I_0 \text{ ch } \alpha x + E_0 / R_c \text{ sh } (\alpha x) \quad (2.18)$$

- Cas d'une structure homogène et finie

$$E_x = E_0 = E_s = E_L \text{ Ch } \alpha L \quad (2.19)$$

$$I_x = I_0 = I_s \Rightarrow \frac{E_L}{R_c} Sh\alpha L \quad (2.20)$$

* Pour ce cas le calcul se fera pour la conduite de diamètre 300 (conduite homogène)

E_L l'abaissement à l'extrémité de la conduite = - 0,5V,

E_s le potentiel de soutirage est estimé à = -2,5V - 0,5V

$L = 2l$ qui est la portée de protection

$$\Rightarrow l = (1/2,06 \cdot 10^{-4}) \text{ Arch } 2/0,5 = 10016 \text{ metres}$$

$$l = 10016 \text{ m}$$

$$I_s = \frac{1}{0,20} Sh 2,0610^{-4} 10016 = 19 \text{ A}$$

$$E_s = 2,5 \text{ V}$$

$$I_s = 19 \text{ A}$$

- Cas d'une structure demie infinie

$$E_x = E_0 e^{-\alpha x}$$

$$I_x = I_0 e^{-\alpha x}$$

$$\text{Pour } x \rightarrow \infty \Rightarrow E_0 = I_0 R_c \Rightarrow I_0 = E_0 / R_c = 2 / 0,2 = 10 \text{ A}$$

$$I_s = 10 \text{ A}$$

2.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux comprendre les principes fondamentaux et les modalités techniques de la mise en œuvre de la protection cathodique, aussi bien par anodes sacrificielles que par courant imposé. Il a mis en évidence l'importance de bien dimensionner les composants du système (anodes, déversoirs, générateurs, câblage) et d'adapter l'installation aux spécificités du terrain et des structures à protéger. La méthode par courant imposé, bien qu'exigeante sur le plan technique, se révèle particulièrement efficace pour les grandes structures ou celles soumises à des environnements complexes. Elle permet de contrôler précisément le potentiel de protection, assurant ainsi une durabilité accrue des installations métalliques.

Chapitre 03 : Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

3.1 Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties :

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro volta [24].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [24].

Dans ce chapitre, nous commencerons par un aperçu sur les énergies renouvelables, la définition de l'énergie solaire et l'historique du PV. Puis la constitution des cellules photovoltaïques, leur caractéristique ainsi que le principe de fonctionnement et enfin nous présenterons les différents types des cellules photovoltaïques ainsi que les avantages et inconvénients de l'énergie PV [24].

3.2 L'énergie solaire

Le soleil est une étoile parmi les autres. Son diamètre est d'environ cinquante fois celui de la Terre. Sa lumière, à la vitesse fantastique de 300 000 Kilomètres par seconde, met un peu plus de 8 minutes pour nous parvenir. La masse du soleil est telle qu'il peut encore rayonner pendant des milliards d'années. On évalue à environ 100 milliards de milliards de Kilowatts-heure l'énergie rayonnée à chaque seconde dans toutes les directions par le soleil, et la Terre avec son atmosphère n'en reçoit qu'environ 30 milliards par seconde [25].

Pour exprimer en unités thermiques l'énergie solaire parvenant en une année à l'entrée de l'atmosphère terrestre, si l'on adopte l'unité Q employée dans les études énergétiques globales ($Q=10^{18}BTU$ « British Thermal Unit ») et correspondant à 40 milliards de tonnes de charbon normal, on trouve que cette énergie solaire annuelle représente 5 000 unités Q. On constate combien cette énergie est fantastique, si on la compare d'une part à l'énergie utilisée par l'humanité, égale en 1972 à 0.2 Q, d'autre part à l'énergie solaire utilisée par la photosynthèse sur notre globe en un an égale aussi à 0.2 Q [26].

Le rayonnement solaire est réparti en un spectre s'étendant de la longueur d'onde 0.3 micron (ultraviolet) à la longueur d'onde 5 microns (infrarouge), avec un maximum pour 0.47 micron dans le spectre visible. Ce dernier s'étend des longueurs d'onde de 0.35 micron (violet) à 0.7 micron (rouge) et c'est au-dessus de 0.7 micron que commence le proche infra-rouge [11].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.

Comme pour le cas d'une diode classique, une cellule PV peut donc être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée positivement et l'autre dopée négativement. Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une barrière de potentiel [27].

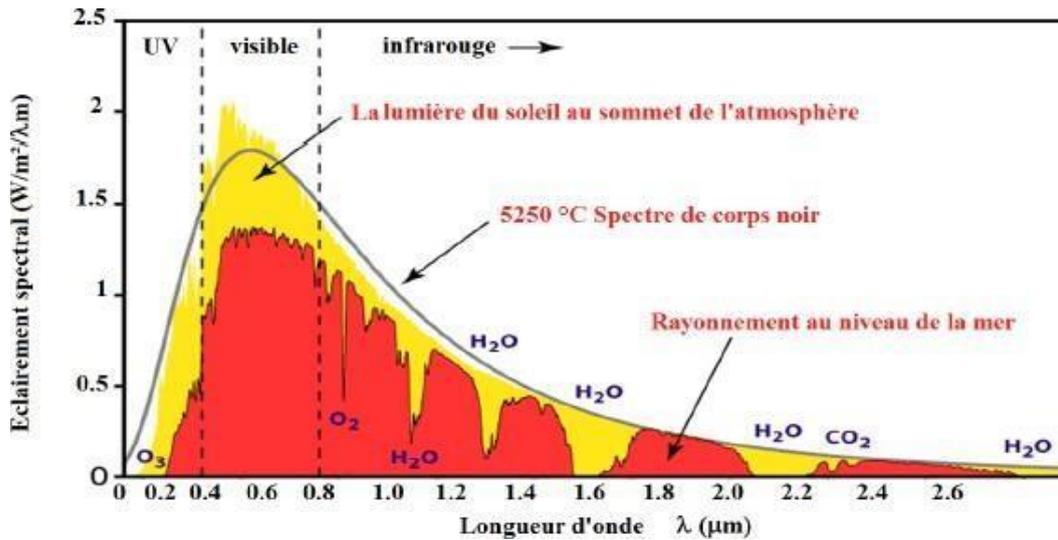


Figure 3-1: Analyse spectrale du rayonnement solaire

Le mot photovoltaïque est composé de deux parties : le préfixe « photo », qui est un dérivé du mot grec désignant « lumière » ou « clarté », et le suffixe « volt », relatif au pionnier de l'électricité Alessandro VOLTA.

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie [28].

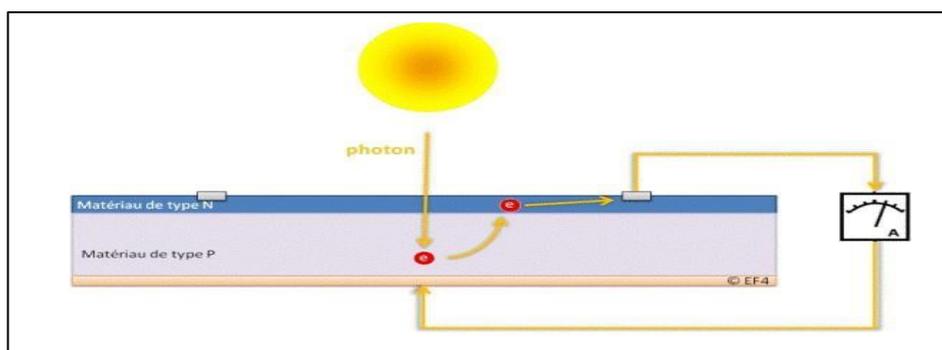


Figure 3-2 : L'effet photovoltaïque

3.3 Cellule photovoltaïque :

- **La cellule PV :**

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance électrique obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et elle dépend du rendement de la cellule.

Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique) [29].

- **La structure :**

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques [30].

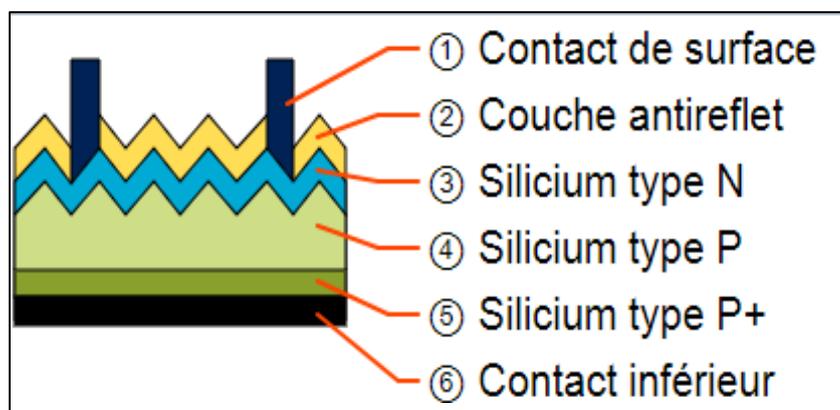


Figure 3-3 : La structure de cellule PV

- **Principe de fonctionnement :**

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons . Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium , ils arrachent des électrons à ses atomes . Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se créé. Une couche antireflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface [31].

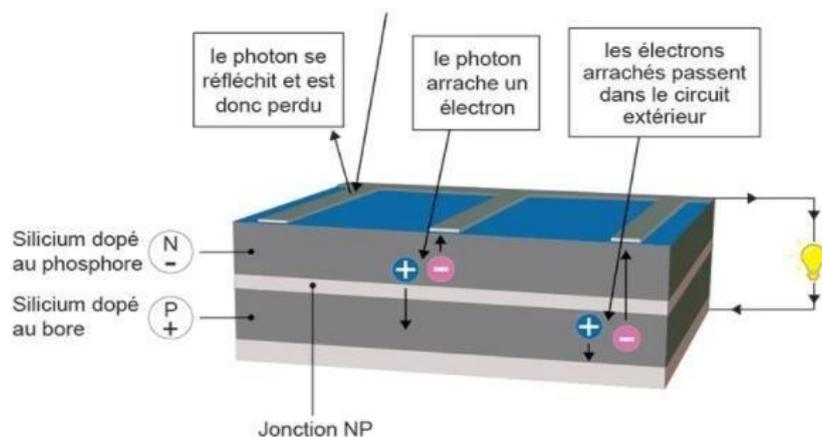


Figure 3-4 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [15].

3.4 Caractéristiques de photovoltaïque :

Les différents types des cellules solaires : Il existe trois types principaux de cellules :

3.4.1 Les cellules mono- cristallines :

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %. Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans) [32].



Figure 3-5 : Cellule Mono-cristallines

3.4.2 Les cellules poly-cristallines :

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors Hétérogènes. Les cellules poly- cristallines sont caractérisées par [33] :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13% et jusqu'à 20% en labo.



Figure 3-6 : Cellule poly-cristallines

3.4.3 Les cellules amorphes :

Le silicium amorphe, est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible)

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement [34] .



Figure 3-7 : Cellules amorphes

3.5 Circuit équivalent et modèle mathématique :

Une cellule photovoltaïque peut être représentée par un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode et deux résistances parasites qui sont également introduites. Ces résistances ont une influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule, à savoir :

- La résistance série R_s qui est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt R_{sh} qui est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [35].

3.6 Modèle mathématique d'une cellule PV idéale.

Selon la loi de Kirchhoff, le modèle mathématique d'une cellule PV idéale est donné par l'expression suivante [36] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (3.1)$$

Où

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i (T_{mod} - T_r)] (G / G_0) \quad (3.2)$$

$$I_d = I_s (e^{(V_d / V_{th})} - 1) \quad (3.3)$$

$$I_{sh} = V_d / R_{sh} \quad (3.4)$$

Avec

$$T_{mod} = T_c + T_{ref} + G ((NOCT - 20) / 800) \quad (3.5)$$

$$I_s = I_{or} (T_{mod} / T_r)^3 e^{(q.Eg) / (A.K) (1 / T_r - 1 / T_{mod})} \quad (3.6)$$

$$V_d = V_{pv} + R_s \cdot I_{pv} \quad (3.7)$$

$$V_{th} = (A.K \cdot T_{mod}) / q \quad (3.8)$$

Nous avons ainsi l'expression de I_{pv} qui sera égale à :

$$I_{pv} = [I_{cc} + K_i (T_{mod} - T_r)] (G / G_0) - I_s \cdot e^{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}) / V_{th}} - ((V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}) / R_{sh}) \quad (3.9)$$

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les fondements de l'énergie solaire photovoltaïque, en commençant par une vue d'ensemble des énergies renouvelables, avant de nous concentrer sur les principes, le fonctionnement et la structure des cellules photovoltaïques. L'effet photovoltaïque, phénomène clé à la base de cette technologie, a été expliqué en détail, ainsi que les différentes technologies de cellules (monocristallines, polycristallines et amorphes), chacune ayant ses caractéristiques, rendements et domaines d'application. Nous avons également mis en lumière les composants essentiels d'une cellule photovoltaïque, ses caractéristiques électriques ainsi que son modèle équivalent, éléments indispensables pour son intégration et son dimensionnement dans un système de production électrique autonome.

Chapitre 04 : Dimensionnement de la source photovoltaïque

4.1 Introduction :

Ce chapitre vise à déterminer les propriétés et la configuration du générateur photoélectrique qui garantit que le système énergétique est efficacement alimenté pour la protection cathodique. Cela comprend la détermination du nombre de plaques, de leur qualité et de leur composition en série ou parallèle en fonction de la puissance requise et des conditions de fonctionnement.

La conception est basée sur les données de consommation électrique du système, en plus des caractéristiques climatiques du site telles que le rayonnement solaire et la température.

Ces données sont utilisées pour calculer l'énergie quotidienne nécessaire, puis déterminer la capacité nominale du générateur solaire. Toujours dans ce chapitre, les paramètres techniques du type de plaques utilisées sont utilisés, et nous comparons différents types pour obtenir la meilleure performance au coût plus bas.

4.2 Dimensionnement du système de protection cathodique

Dans le cadre de la supervision du système de protection cathodique du poste de soutirage situé dans le secteur 06 – Daya, Wilaya de Ghardaïa, un dimensionnement théorique a été réalisé à partir des données techniques relevées sur le terrain. La canalisation concernée est en acier type Acier 200, mise en service en 1998, et alimente 8200 consommateurs. La longueur totale du réseau protégé est de 5380 ml, avec une tension de sortie du redresseur de 1,5 V et une intensité de 0,5 A.

Pour calculer le courant nécessaire à la protection de cette canalisation, on commence par déterminer la surface externe à l'aide de la formule :

$$A = \pi \times D_{\text{ext}} \times L \quad (4.1)$$

Où :

- D_{ext} : diamètre extérieur supposé = 0,2 m (en l'absence de valeur précise)

- L : longueur = 5380 m

$$A = 3,14 \times 0,2 \times 5380 \approx 3379,4 \text{ m}^2$$

En supposant un sol humide, la densité de courant recommandée est :

$$D = 15 \text{ mA/m}^2$$

Le courant total requis est donc :

$$I = A \times D = 3379,4 \times 15 = 50,7 \text{ A}$$

Avec une marge de sécurité de 25 % :

$$I_{final} = 50,7 \times 1,25 = 63,4 \text{ A}$$

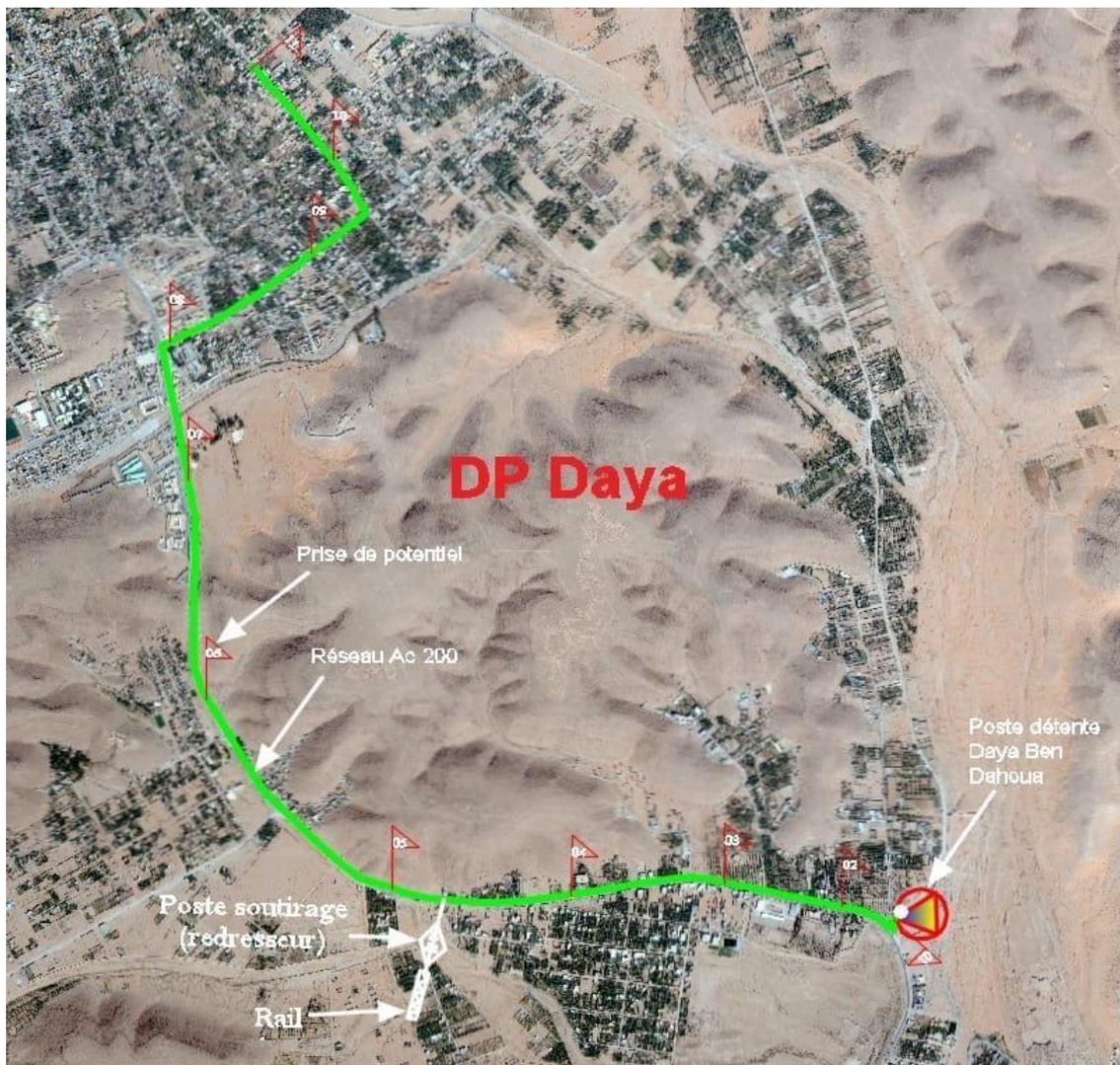


Figure 4-1 : Photo de réseau acier DP Daya (Secteur protection cathodique)

En comparaison, le courant délivré réellement par le redresseur est de seulement 0,5 A, ce qui suggère que :

- Soit seule une partie du réseau est effectivement protégée,
- Soit les hypothèses de départ (diamètre/nature du sol) doivent être réajustées.

Cependant, les mesures de potentiel enregistrées en 11 points le long de la canalisation varient entre : 1020 mV et 1480 mV

Toutes ces valeurs sont bien supérieures au seuil de protection efficace fixé à -850 mV, ce qui confirme l'efficacité du système sur la section mesurée.

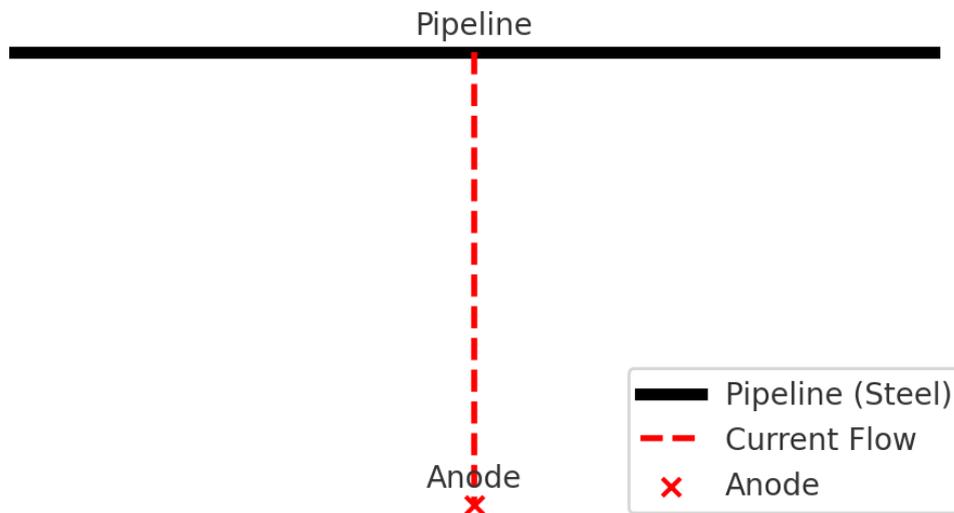


Figure 4-2 : Principe du système de protection cathodique

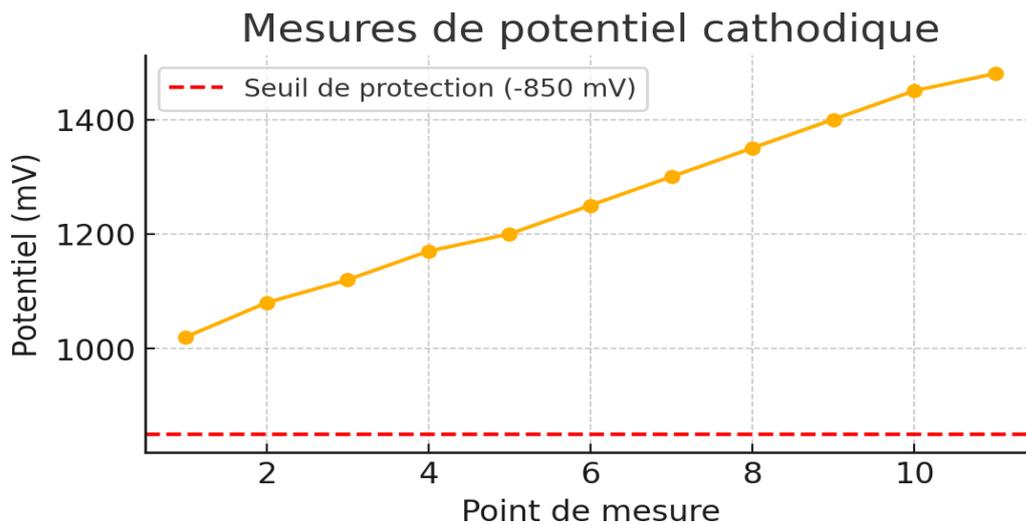


Figure 4-3 : Valeurs du potentiel cathodique mesurées comparées au seuil.

4.3 Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter un dispositif de protection cathodique

4.3.1 Données de base

Tableau 4-1 : Données générales du système de protection cathodique secteur 06 Daya

Élément	Valeur
Secteur	Secteur 06 - Daya
Longueur de la canalisation protégée	5380 m
Tension (V)	1.5 V
Courant (I)	0.5 A
Consommation mensuelle	5 kWh = 5000 Wh
Durée de fonctionnement	24 h/jour

4.3.2 Energie quotidienne requise

Puisque la consommation mensuelle est de 5 kWh, la consommation journalière est :
 $E_{\text{jour}} = 5000 \text{ Wh} / 30 \approx 166.67 \text{ Wh/jour}$

4.3.3 Puissance requise des panneaux solaires

$$P = E_{\text{jour}} / (H \times \eta) = 166.67 / (5 \times 0.75) \approx 44.44 \text{ W} \quad (4.2)$$

— **E** : énergie par jour

— **N** : nombre de jours sans soleil (ex. 3 jours)

— **V_b** : tension de la batterie — **DOD** : profondeur de décharge (généralement 0.5 à 0.8)

Un panneau solaire de 50 W est suffisant pour couvrir les besoins journaliers.

4.3.4 Capacité de la batterie

$$C = (E_{\text{jour}} \times N) / (V_b \times \text{DOD}) = (166.67 \times 3) / (12 \times 0.5) \approx 83.33 \text{ Ah} \quad (4.3)$$

Une batterie de 85 Ah / 12 V est suffisante pour assurer une autonomie de 3 jours sans soleil.

4.3.5 Composants du système

Tableau 4-2 : Caractéristiques techniques des composants du système photovoltaïque

Composant	Spécifications
Panneau solaire	1 × 50 W
Régulateur de charge	MPPT – 12V, ≥5A
Batterie	85Ah / 12V
Câbles	Résistants à la corrosion
Protection électrique	Fusibles, disjoncteurs

4.3.6 Recommandations

- Pour assurer l'efficacité de la protection cathodique par le courant imposé, il est nécessaire d'assurer une tension inférieure à -850 mV.
- Nettoyer les panneaux solaires et éviter l'ombrage.
- Vérifier périodiquement l'état de la batterie et des connexions.
- Utiliser des boîtiers étanches pour protéger les composants électriques.

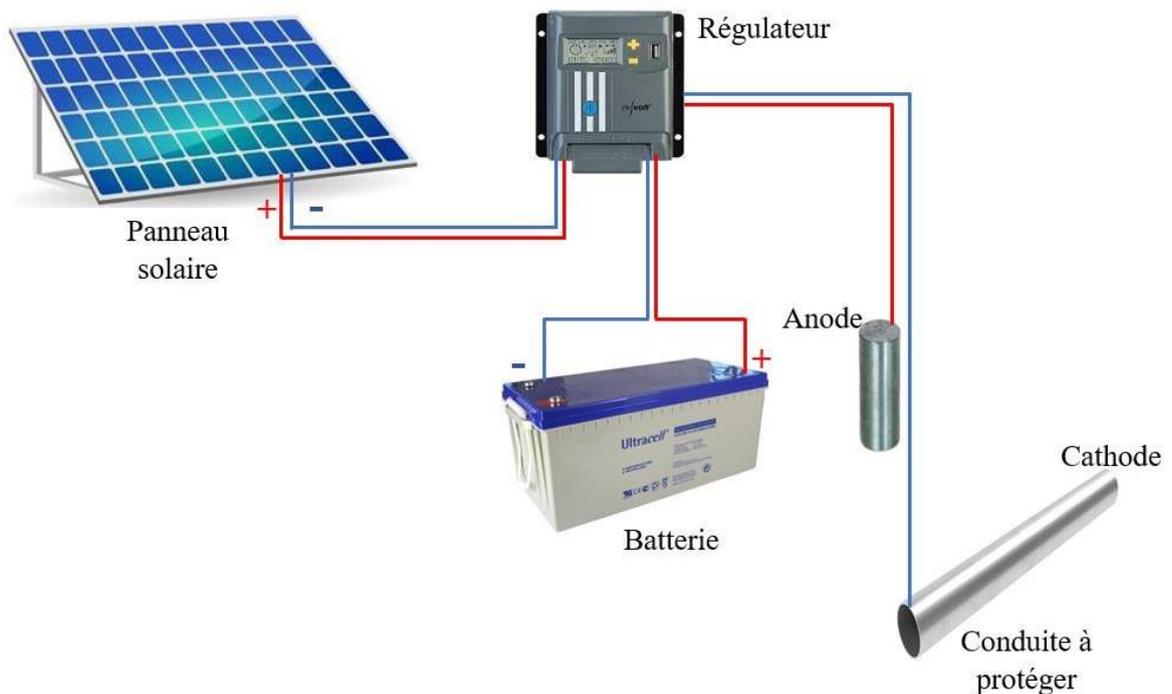


Figure 4-4: Schéma de principe d'un système de protection cathodique solaire.

4.3.7 PVsyst et Le Rapport pour l'application de la protection cathodique au secteur 06 - Daya :

- PVsyst :

PVsyst est un logiciel professionnel de simulation et de conception des systèmes photovoltaïques. Il est utilisé pour évaluer la faisabilité technique et économique des projets solaires, qu'ils soient connectés au réseau (On-grid), autonomes (Off-grid) ou hybrides.

- Principales fonctionnalités de PVsyst :

- Analyse du rayonnement solaire à l'aide de bases de données climatiques mondiales.

- Conception de différents types de systèmes solaires (sur toitures, au sol, connectés au réseau ou autonomes).
- Calcul de la production annuelle d'énergie.
- Analyse des pertes au niveau du système, telles que les pertes dues à l'ombrage, à la température, au rendement, etc.
- Dimensionnement des onduleurs et caractérisation des batteries.
- Simulation des performances quotidiennes, mensuelles et annuelles du système.
- Rapport détaillé sur la performance attendue du système, utilisable dans les présentations et les rapports techniques.
 - Rapport PVSyst pour l'application de la protection cathodique au secteur 06 - Daya :



PVsyst V8.0.11

PVsyst - Simulation report

Standalone system

Project: protection cathodique daia

Variante: Nouvelle variante de simulation

Standalone system with batteries

System power: 50 Wp

TOUZOUZ Ghardaia - Algeria

| Author

Figure 4-5: Interface du logiciel PVsyst de simulation photovoltaïque



Project: protection cathodique daia

Variant: Nouvelle variante de simulation

PVsyst V8.0.11

VC0, Simulation date:
12/05/25 06:51
with V8.0.11

Project summary			
Geographical Site TOUZOUZ Ghardaïa Algeria	Situation	Latitude	32.52 °(N)
		Longitude	3.61 °(E)
Weather data TOUZOUZ Ghardaïa Meteonorm 8.2 (1996-2015), Sat=100 % - Synthétique		Altitude	531 m
		Time zone	UTC+1
		Project settings	Albedo 0.20

System summary			
Standalone system	Standalone system with batteries		
Orientation #1	User's needs		
Fixed plane	Fixed constant load		
Tilt/Azimuth	20 / 0 °	7 W	
		Global	
		60 kWh/Year	
System information	Battery pack		
PV Array		Technology	Lead-acid, vented, plates
Nb. of modules	1 unit	Nb. of units	1 unit
Pnom total	50 Wp	Voltage	12 V
		Capacity	100 Ah

Results summary					
Useful energy from solar	60.00 kWh/year	Specific production	1200 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	52.70 %
Missing Energy	0.00 kWh/year	Available solar energy	88.76 kWh/year	Solar Fraction SF	100.00 %
Excess (unused)	24.81 kWh/year				

Table of contents	
Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Predef. graphs	6

Figure 4-6: Paramètre généraux et caractéristiques de l'installation photovoltaïque



Project: protection cathodique daia

Variant: Nouvelle variante de simulation

PVsyst V8.0.11

VC0, Simulation date:
12/05/25 06:51
with V8.0.11

General parameters		
Standalone system	Standalone system with batteries	
Orientation #1	Models used	User's needs
Fixed plane	Transposition Perez	Fixed constant load
Tilt/Azimuth	Diffuse Perez, Meteonorm	7 W
20 / 0 °	Circumsolar separate	Global
		60 kWh/Year

PV Array Characteristics		
PV module	Controller	
Manufacturer Generic	Universal controller	
Model Mono 50 Wp 36 cells (Original PVsyst database)	Technology MPPT converter	
Unit Nom. Power 50 Wp	Temp coeff. -5.0 mV/°C/Elem.	
Number of PV modules 1 unit	Converter	
Nominal (STC) 50 Wp	Maxi and EURO efficiencies 97.0 / 95.0 %	
Modules 1 strings x 1 In series	Battery Management control	
At operating cond. (50°C)	Threshold commands as SOC calculation	
Pmpp 45 Wp	Charging SOC = 0.92 / 0.75	
U mpp 16 V	approx. 13.4 / 12.5 V	
I mpp 2.8 A	Discharging SOC = 0.20 / 0.45	
	approx. 11.8 / 12.2 V	
Battery		
Manufacturer Generic		
Model Open 12V / 100 Ah		
Technology Lead-acid, vented, plates		
Nb. of units 1 Unit		
Discharging min. SOC 20.0 %		
Stored energy 1.0 kWh		
Battery Pack Characteristics		
Voltage 12 V		
Nominal Capacity 100 Ah (C10)		
Temperature Fixed 20 °C		
Total PV power		
Nominal (STC) 0.050 kWp		
Total 1 modules		
Module area 0.4 m²		

Array losses								
Thermal Loss factor	DC wiring losses	Serie Diode Loss						
Module temperature according to irradiance	Global array res. 98 mΩ	Voltage drop	0.7 V					
Uc (const) 20.0 W/m²K	Loss Fraction 1.5 % at STC	Loss Fraction	3.9 % at STC					
Uv (wind) 0.0 W/m²K/m/s								
Module Quality Loss	Module mismatch losses							
Loss Fraction -0.8 %	Loss Fraction 0.0 % at MPP							
IAM loss factor								
Incidence effect (IAM): Fresnel smooth glass, n = 1.526								
0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.998	0.981	0.948	0.862	0.776	0.636	0.402	0.000

Figure 4-7: résumé du projet et des résultat de la simulation par PVsyst



Project: protection cathodique daia

Variant: Nouvelle variante de simulation

PVsyst V8.0.11

VC0, Simulation date:
12/05/25 06:51
with V8.0.11

Main results

System Production

Useful energy from solar 60.00 kWh/year
Available solar energy 88.76 kWh/year
Excess (unused) 24.81 kWh/year

Perf. Ratio PR 52.70 %
Solar Fraction SF 100.00 %

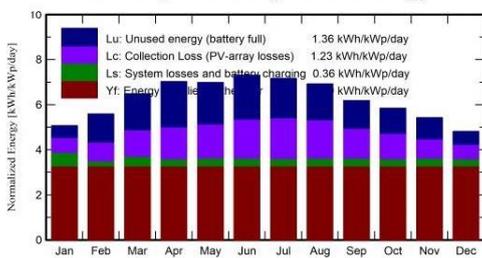
Loss of Load

Time Fraction 0.0 %
Missing Energy 0.00 kWh/year

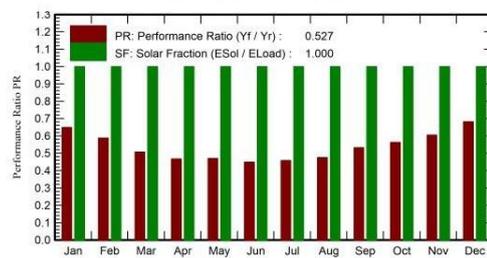
Battery aging (State of Wear)

Cycles SOW 98.3 %
Static SOW 90.0 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor	GlobEff	E_Avail	EUnused	E_Miss	E_User	E_Load	SolFrac
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	ratio
January	110.1	152.6	6.59	0.79	0.000	5.10	5.10	1.000
February	121.0	152.5	6.46	1.74	0.000	4.60	4.60	1.000
March	172.6	196.7	8.02	2.48	0.000	5.10	5.10	1.000
April	198.0	205.5	8.20	3.00	0.000	4.93	4.93	1.000
May	217.9	210.7	8.26	2.84	0.000	5.10	5.10	1.000
June	226.2	213.8	8.16	2.92	0.000	4.93	4.93	1.000
July	225.9	216.6	8.08	2.71	0.000	5.10	5.10	1.000
August	207.3	209.6	7.88	2.47	0.000	5.10	5.10	1.000
September	166.4	180.8	7.08	1.84	0.000	4.93	4.93	1.000
October	146.4	176.8	7.08	1.71	0.000	5.10	5.10	1.000
November	117.4	159.1	6.66	1.40	0.000	4.93	4.93	1.000
December	101.5	145.1	6.28	0.89	0.000	5.10	5.10	1.000
Year	2010.6	2219.8	88.76	24.81	0.000	60.00	60.00	1.000

Legends

GlobHor Global horizontal irradiation
GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
E_Avail Available Solar Energy
EUnused Unused energy (battery full)
E_Miss Missing energy
E_User Energy supplied to the user
E_Load Energy need of the user (Load)
SolFrac Solar fraction (EUsed / ELoad)

Figure 4-8 : Bilan énergétique mensuel et résultat de performance du système solaire



Project: protection cathodique daia
 Variant: Nouvelle variante de simulation

PVsyst V8.0.11

VC0, Simulation date:
 12/05/25 06:51
 with V8.0.11

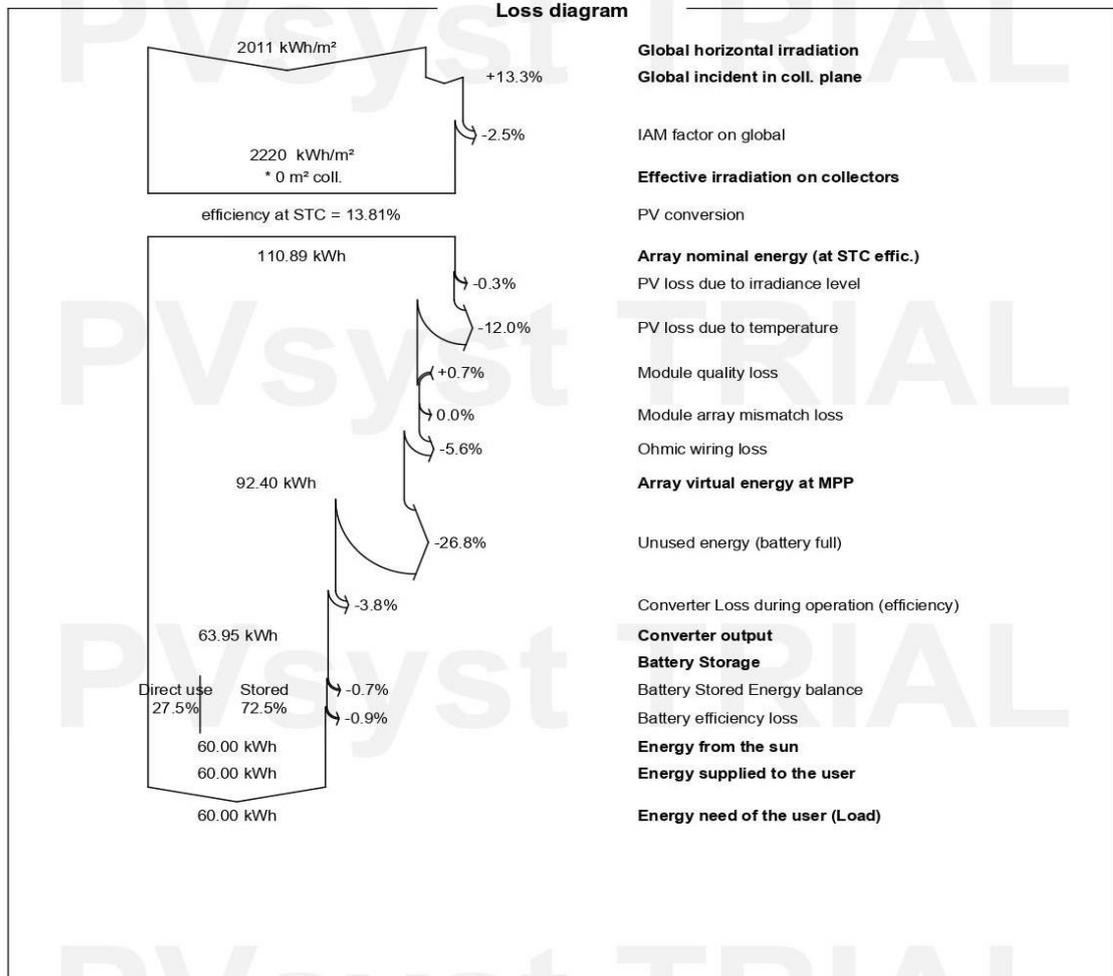


Figure 4-9 : Digramme des pertes d'énergie dans le système photovoltaïque



PVsyst V8.0.11

VC0, Simulation date:
12/05/25 06:51
with V8.0.11

Project: protection cathodique daia

Variant: Nouvelle variante de simulation

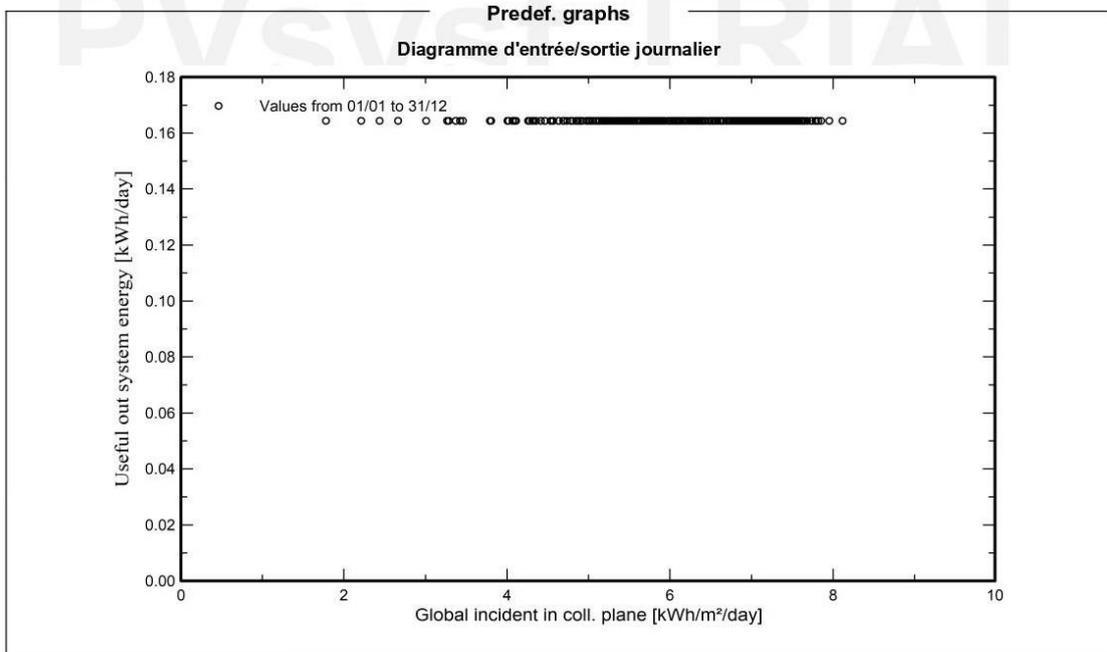


Figure 4-10 : Corrélation journalière entre les radiation globale et l'énergie utile du système

4.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de concevoir un système photovoltaïque adapté pour alimenter la protection cathodique d'une canalisation à Daya. Le dimensionnement s'est basé sur les besoins énergétiques réels et les conditions climatiques locales. Les mesures de potentiel confirment l'efficacité de la protection. L'utilisation de PVsyst garantit une conception fiable et optimisée du système.

Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous avons pu étudier et dimensionner un système photovoltaïque destiné à alimenter un dispositif de protection cathodique dans le secteur 06 – Daya, situé dans la wilaya de Ghardaïa. Cette étude nous a permis d’analyser les aspects techniques, environnementaux et économiques liés à l’exploitation de l’énergie solaire comme solution énergétique alternative, particulièrement adaptée aux zones isolées du Sud algérien, caractérisées par un fort ensoleillement et l’absence de raccordement au réseau électrique national.

Nous avons identifié avec précision les besoins énergétiques du système de protection cathodique, puis sélectionné les composants adéquats (panneaux photovoltaïques, régulateur de charge, batteries...) en tenant compte des conditions climatiques et d’exploitation locales, afin d’assurer un fonctionnement continu et une protection efficace contre la corrosion.

Les résultats obtenus ont démontré que le système photovoltaïque représente une solution fiable, durable et respectueuse de l’environnement, tout en étant économiquement avantageux sur le long terme par rapport aux solutions classiques basées sur les combustibles fossiles.

En conclusion, ce projet constitue une avancée vers la généralisation de l’usage des énergies renouvelables dans les applications industrielles de protection. Il est recommandé d’étendre ce type d’initiative à d’autres secteurs, tout en assurant un suivi régulier et une maintenance appropriée pour garantir les performances optimales du système.

Bibliographies

- [1] R. BIANCHI, Protection cathodique et prévention de la corrosion dans les réseaux de transport de gaz, Éditions Technip, (2010).
- [2] A. MOKRANI, Techniques de protection contre la corrosion des canalisations enterrées, Éditions Universitaires Européennes, (2018).
- [3] D. LANDOLT, Corrosion et chimie de surfaces des métaux, Presses polytechnique,(2003)
- [4] ISO 8044, « Corrosion des métaux et alliages. Termes principaux et définitions », Norme internationale, numéro de référence ISO 8044, Genève, Suisse, (2000).
- [5] G. BERANGER, D. DABOSI, Corrosion et protection des métaux, Édition cours Toulouse, (1982).
- [6] H. BENSABRA, Corrosion et protection des métaux, polycopie, (2016).
- [7] G. L. CROLET, G. BERANGER, Corrosion en milieu aqueux des métaux et alliages, Techniques de l'Ingénieur, Référence M150, (1998).
- [8] J. P. BIRKETT, Principes et mécanismes de la corrosion des métaux, Éditions Hermès, (2005).
- [9] G. BERANGER, H. MAZILE, Corrosion et anti-corrosion, Édition Lavoisier, (2002).
- [10] B. NORMAND, N. PBERE, C. RICHARD, M. WERY, Prévention et lutte contre la corrosion des métaux, Presses polytechnique, (2004).
- [11] Matériaux et Corrosion, Édition Masson, Paris, (1989).
- [12] Jean-Paul BAÏLON, Des matériaux, 3^e édition, (2000).
- [13] M. G. FONTANA, Corrosion Engineering, 3^e édition, McGraw-Hill, (1987).
- [14] Document officiel, Protection des ouvrages contre la corrosion, IFEG, École Technique de Blida, Groupe Sonelgaz, (2010).

- [15] A. MOKRANI, Cours de protection cathodique, IFEG, Groupe Sonelgaz, (2015).
- [16] A. MOKRANI, Techniques de mise en œuvre des protections cathodiques, IFEG, Groupe Sonelgaz, (2016).
- [17] INERIS, Protection cathodique – courant imposé, GIL V1.1, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, (2008).
- [18] J. BOURDON, Protection cathodique, Techniques de l'Ingénieur, Réf. BM6405, (2002).
- [19] Commission Protection Cathodique et Revêtements Associés, Essais de polarisation pour la détermination de la résistance de terre d'un tronçon de canalisation, CEFRACOR, Réf. PCRA 011, (2016).
- [20] CEFRACOR, PCRA 011 – Recommandation pour la mesure du potentiel de protection cathodique, Commission Protection Cathodique et Revêtements Associés, (2016).
- [21] INERIS, GIL Protection cathodique V1.1, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, (2008).
- [22] Commission Protection Cathodique et Revêtements Associés, Essais de polarisation pour la détermination de la résistance de terre d'un tronçon de canalisation, CEFRACOR, Réf. PCRA 011, (2016).
- [23] A. MOKRANI, Matériaux et techniques des anodes sacrificielles pour la protection cathodique, IFEG, Groupe Sonelgaz, (2017).
- [24] EDF, Qu'est-ce qu'une cellule photovoltaïque et comment fonctionne-t-elle ? EDF Solutions Solaires, (2025).
- [25] AIE, L'énergie solaire : principes de base et potentiel mondial, Agence Internationale de l'Énergie, (2023).
- [26] J. Dupont, Introduction aux énergies renouvelables, Éditions Techniques, Paris, (2022).
- [27] M. Lefebvre, Les énergies renouvelables : principes et applications, Dunod, Paris, (2023).
- [28] ADEME, Le solaire photovoltaïque, Presses de l'ADEME, (2023).

- [29] J.-P. MEYNENC, Énergie solaire photovoltaïque : technologie et applications, Presses polytechniques, (2021).
- [30] B. GAUTIER, Le silicium et la fabrication des cellules photovoltaïques, Presses polytechniques, (2022).
- [31] M. LEMOINE, Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, Presses polytechniques, (2023).
- [32] P. BERNARD, Introduction aux matériaux semi-conducteurs pour le photovoltaïque, Presses scientifiques, (2021).
- [33] M. DUPONT, Caractéristiques et avantages des cellules photovoltaïques polycristallines, Presses polytechniques, (2023).
- [34] C. LEROY, Photovoltaïque : le silicium amorphe et ses performances, Presses scientifiques, (2023).
- [35] A. GOUJON, Modélisation et simulation des cellules photovoltaïques, Éditions Techniques Ingénieur, (2022).
- [36] N. KHELIFI, Modélisation mathématique et simulation des cellules photovoltaïques, Presses universitaires, (2023).

Annexe

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم: Automatique et électromécanique

غرداية في : 19/06/2025

شعبة: Energies renouvelables

تخصص: Energies renouvelables et environnement

شهادة ترخيص بالتصحيح والاياداع:

انا الأستاذ: مصباح مصطفى

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج ليسانس المعنونة ب:

ETUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UNE SOURCE PHOTOVOLTAIQUE POUR ALIMENTER LE SYSTEME DE LA PROTECTION CATHODIQUE

من انجاز الطالب (الطالبة):

Benbouzid Mohammed Noureddine

Araba Charaf eddine

التي نوقشت/قوبمت بتاريخ: 21/05/2025

اشهد ان الطالب/الطالبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

مصباح مصطفى رئيس القسم
قسم الآلية والكهروميكانيكا

عزواي محمد



امضاء المسؤول عن التصحيح