

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar – Annaba



جامعة باجي مختار –
عنابنة

Faculté de Technologie
Département d'Electromécanique

كلية التكنولوجيا
قسم الكتروميكانيك

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat LMD

Département : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Filière : Sécurité Industrielle

Par :

KHATTAB Karim

Thème :

Diagnostic des courants vagabonds dans un site industriel sous la protection cathodique.

Thèse soutenue le 22/05/2024 devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
HADJADJ AOUL Elias	Prof	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
AZZAG El Bahi	Prof	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
ALLALI Khairedine	MCB.	Université Frères Mentouri-Constantine 01	Co-rapporteur
KABOUCHE Abdallah	Prof	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
LADJIMI Abdelaziz	Prof	Université 08 Mai 1945 - Guelma	Examineur
ZEROUALI Bilal	MCA	Université 20 Aout 1955 -Skikda	Examineur

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude envers Dieu, Allah, qui m'a donné la force de mener à bien ce modeste travail.

Je souhaite également exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, le Professeur AZZAG El Bahi, pour avoir accepté de superviser ma thèse. Votre expertise dans le domaine a été une source d'inspiration et d'apprentissage inestimable pour moi. Votre disponibilité et votre volonté de partager vos connaissances ont grandement contribué à mon développement académique et professionnel. Je vous remercie également pour la confiance que vous m'avez accordée en me laissant une grande autonomie dans mes recherches. Travailler à vos côtés a été une source constante d'inspiration jour après jour.

Mes pensées se tournent ensuite vers mon Co-encadrant, le Dr. ALLALI Khairredine, qui m'a accompagné et conseillé tout au long de cette thèse.

Je tiens à adresser un mot particulier de remerciement au Professeur HAMAIDI Brahim, le responsable de la formation, qui m'a ouvert les portes de ce domaine captivant, aussi riche qu'inexploré. Avoir votre nom sur la première page de mon manuscrit de thèse est une source de grande fierté.

Je suis profondément reconnaissant envers les membres du jury qui ont accepté de participer à ma soutenance de thèse. Présenter cette thèse devant vous a été un plaisir et un honneur. J'ai ressenti le privilège de partager des idées avec vous.

Je tiens également à remercier les cadres de la société GRTG, BELKHIR Toufik, chef du département de la protection cathodique au sein, ainsi que tous les ingénieurs, BENMATI Abdelbaki et SID Omar, sans oublier les ingénieurs KHERBACHE Hakim et BERAHALL Mahdi au sein de la direction de Sonelgaz distribution de la wilaya de Constantine.

Un grand merci s'adresse également aux professeurs, chercheurs et membres du personnel du département d'Électromécanique de l'université Badji Mokhtar Annaba, dont les enseignements, les discussions et le soutien logistique ont joué un rôle essentiel dans ma formation et ma croissance en tant que chercheur.

Je n'oublie pas de remercier chaleureusement Madame KHALFALLAH Nada, ingénieure chargée d'études au sein du laboratoire de travaux publics de l'Est, direction régionale de Constantine, pour avoir facilité la collecte des données expérimentales du sol. De même, je tiens à remercier l'architecte Mlle KHARBEGA Souhila pour son aide dans la conception de plans et d'illustrations liés à cette thèse.

Je tiens à adresser un remerciement particulier à mon collègue AZZEDINE Abdelhakim pour son soutien moral et sa collaboration précieuse dans la simulation des données.

À ma femme, mon amie et ma complice, Radia, qui ne cesse de m'encourager dans ma vie, je veux dire merci pour notre fille Mina que tu m'as donnée. Tu seras toujours la raison de mes moments les plus resplendissants. Je te remercie pour ton soutien précieux, tes encouragements et ton dévouement.

KHATTAB Karim

Dédicace

Je dédie cet humble et modeste travail, avec grande amour, sincérité et fierté.

A mes parents, source de tendance, de noblesse et d'affection. Puisse cette étape constituer pour vous un motif de satisfaction.

À ma chère Radia, ma compagne de vie, mon pilier. Ton soutien inestimable, ta patience et ta compréhension face aux moments exigeants de ma thèse ont été une source de force et d'inspiration.

À ma fille Mina et mon fils Karam, qui illuminent chaque jour de ma vie. Vous êtes ma motivation ultime, et je vous dédie ce travail pour vous montrer que rien n'est impossible lorsque l'on poursuit ses rêves.

À ma merveilleuse famille, mes frères et sœurs, et tous ceux qui ont partagé ce voyage avec moi. Votre soutien inébranlable, votre amour et vos encouragements m'ont guidé tout au long de cette aventure académique.

À mes amis Hocine et Rafik, qui ont été présents à chaque étape de ce parcours, vos conseils, votre amitié et vos rires ont rendu ce voyage plus mémorable.

Cette thèse est le fruit de nos efforts collectifs, de nos sacrifices et de notre amour partagé. Je vous en suis infiniment reconnaissant.

Un hommage sincère et empreint de gratitude à ma chère mère, que Dieu bénisse. Ton amour inconditionnel, ta sagesse et ta force ont été ma lumière tout au long de ma vie. Tu m'as inspiré à poursuivre mes rêves, à persévérer face aux défis et à devenir la personne que je suis aujourd'hui. Ton dévouement et ton soutien indéfectible ont été le fondement de mon succès. Cette réalisation est le reflet de l'amour et de la détermination que tu as insufflés en moi. Merci, du fond du cœur.

KHATTAB Karim

ملخص

النقل يحمل أهمية حاسمة في تطوير الأمم، والجزائر ليست استثناءً. ومع ذلك، توجد علاقة ذات دلالة بين النقل الحضري الكهربائي والأنابيب المدفونة للغاز. عندما تقترب خطوط الجر الكهربائي من هذه الأنابيب، تُحدث تيارات شاردة تتحرف عن مسارها المُخطَّط له. بالتالي، يصبح أي هيكل معدني تحت الأرض ذو مقاومة منخفضة مسار لهذه التيارات، معرضاً بذلك لتأثيرات التيارات الشاردة الضارة.

يتم استخدام أساليب متعددة لتحليل توزيع هذه التيارات الشاردة، حيث هناك دراسات من طرف باحثين مختصين في المجال بتقييم معدلات التآكل الناتجة عنها. يمكن أن يتسبب التآكل في أضرار كبيرة إذا لم يتم السيطرة عليه. تؤثر التيارات الشاردة المُحفَّزة بواسطة النقل الكهربائي بشكل كبير على فعالية أنابيب الغاز، حيث تسرع من ظاهرة التآكل وتزيد من مخاطر حدوث عيوب في هذه الأنابيب. فهم هذا التأثير أمر ضروري لضمان استقرار الأنابيب المعدنية المخصصة لتوصيل الغاز.

هذه الرسالة تهدف إلى تقديم تحليل للخطر الذي تتعرض له الشبكات المعدنية تحت الأرض بفعل تأثير التيارات الشاردة، مع تحديد الأساليب والأدوات لمراقبة تأثيراتها الضارة. يتميز نظام الذكاء الاصطناعي (ANN) باستخدامه لحل المشكلات غير الخطية والمعقدة المتعلقة بهذا النوع من التيارات.

يكمُن التميز في هذه الرسالة من خلال استخدام تقنيات التعلم الآلي المتقدمة، بما في ذلك شبكات العصبية الذكية (ANN)، وأسلوب أقاليم المربعات الصغرى، وأسلوب الانحدار Lasso مع التفاعل المرشح. يتم استخدام هذه الأساليب لدراسة تأثيرات التيارات الشاردة المطبقة لأول مرة في الجزائر. يتم أيضاً إجراء تحليل حساسية بناءً على خوارزمية محاكاة مونتّي كارلو ANN-MTC للتحقق من الأسلوب، باستخدام البيانات التي تم جمعها بالقرب من ترامواي مدينة قسنطينة شرق الجزائر.

في الختام، يتم تقديم تحليل المخاطر استناداً إلى أساليب احتمالية، والذي يتميز بأسلوب متقدم، ويُستخدم لأول مرة في سياق تقييم مخاطر التيارات الشاردة، باستناد إلى نظرية الاحتمالات. يمكن من خلال هذا التحليل فهم وإدارة المخاطر المرتبطة بالتأثير بين النقل الكهربائي الحضري وشبكة الغاز، مما يسهم في ضمان استقرار واستدامة الأنابيب المعدنية الأساسية لتوصيل الغاز في الجزائر ومكان آخر.

الكلمات المفتاحية: التيارات الشاردة، الجر الكهربائي، الحماية المهبطية، الذكاء الاصطناعي، خطر التآكل

Abstract

Transport holds a crucial importance in the development of nations, and Algeria is no exception. However, a significant correlation exists between urban electric transport and underground gas pipelines. When electric traction lines approach these pipelines, they induce stray currents that deviate from their intended path. Any metallic structure buried in the ground becomes a path of least resistance for these currents, exposing them to the detrimental effects of stray currents.

Various methods are employed to analyze the distribution of these stray currents, while peer-reviewed surveys assess the resulting corrosion rates. Corrosion can cause significant damage if left unchecked. Stray currents induced by electric transportation greatly affect the reliability of gas pipelines, accelerating corrosion and increasing the risk of pipeline failure. Understanding this interaction is essential to ensure the stability of metal pipelines used for gas supply.

This thesis aims to provide an analysis of the vulnerability of underground networks to stray currents while defining the methods and tools to monitor their adverse effects. Urban electric tramway transportation systems, being developed in Algeria, are often located in proximity to gas pipelines. Corrosion defects resulting from stray currents then become a significant threat to these infrastructures. The Artificial Neural Networks (ANN) method is employed to solve non-linear problems related to leakage currents.

This thesis's originality lies in the use of advanced machine learning techniques, including Artificial Neural Networks (ANN), the Least Squares method, and the Stepwise Regression with Lasso Filtered Interaction method, to study the effects of continuous stray currents for the first time in Algeria. A sensitivity analysis, based on a Monte Carlo simulation algorithm, is performed to validate the method, using data collected near the tramway in the city of Constantine, in eastern Algeria.

In conclusion, a risk analysis based on probabilistic methods is presented and illustrated through an advanced approach, employed for the first time in the context of assessing the risks associated with stray currents, drawing upon probability theory. This analysis enhances our understanding and management of the risks linked to the interaction between urban electric transportation and gas infrastructure, thereby contributing to ensuring the stability and sustainability of crucial metal pipelines essential for gas supply in Algeria and beyond.

Keywords: Stray Currents, Electrical Traction, Cathodic Protection, Artificial Intelligence, Corrosion Risk.

Résumé

Le transport revêt une importance cruciale dans le développement des nations, et l'Algérie ne fait pas exception. Cependant, une corrélation significative existe entre le transport urbain électrique et les canalisations de gaz enterrées. Lorsque les lignes de traction électrique s'approchent de ces canalisations, elles induisent des courants vagabonds qui s'écartent de leur trajectoire prévue. Toute structure métallique enfouie dans le sol devient alors un chemin de moindre résistance pour ces courants, les exposant aux effets nuisibles des courants vagabonds.

Diverses méthodes sont employées pour analyser la distribution de ces courants vagabonds, tandis que des enquêtes soumises à un examen par des pairs évaluent les taux de corrosion résultants. La corrosion peut causer d'importants dommages si elle n'est pas maîtrisée. Les courants vagabonds induits par le transport électrique affectent grandement la fiabilité des canalisations de gaz, accélérant la corrosion et augmentant les risques de défaillance des canalisations. La compréhension de cette interaction est essentielle pour garantir la stabilité des canalisations métalliques destinées à l'approvisionnement en gaz.

Cette thèse se propose de présenter une analyse de la vulnérabilité des réseaux enterrés face aux courants vagabonds, tout en définissant les méthodes et les outils pour surveiller leurs effets préjudiciables. Les systèmes de transport urbain par tramway électrique, en développement en Algérie, sont fréquemment situés à proximité des canalisations de gaz. Les défauts de corrosion résultant des courants vagabonds deviennent alors une menace significative pour ces infrastructures. La méthode des réseaux neuronaux artificiels (ANN) est employée pour résoudre les problèmes non linéaires liés aux courants de fuite.

L'originalité de cette thèse réside dans l'utilisation de techniques d'apprentissage automatique avancées, notamment les réseaux neuronaux artificiels (ANN), la méthode des moindres carrés, et la méthode pas à pas avec interaction filtrée par régression Lasso, pour étudier les effets des courants vagabonds continus pour la première fois en Algérie. Une analyse de sensibilité, basée sur un algorithme de simulation de Monte Carlo, est réalisée pour valider la méthode, en utilisant des données collectées à proximité du tramway dans la ville de Constantine, à l'est de l'Algérie.

En conclusion, une analyse de risque basée sur des méthodes probabilistes est présentée et illustrée par une approche avancée, utilisée pour la première fois dans le contexte de l'évaluation des risques engendrés par les courants vagabonds, en se basant sur la théorie des probabilités. Cette analyse permet de mieux comprendre et de gérer les risques liés à l'interaction entre le transport électrique urbain et les infrastructures de gaz, contribuant ainsi à garantir la stabilité et la durabilité des canalisations métalliques essentielles à l'approvisionnement en gaz en Algérie et ailleurs.

Mots clés : Courants Vagabonds, Traction Electrique, Protection Cathodique, Intelligence Artificielle, Risque de la Corrosion.

Table des matières

Résumé	i
Table des matières	iv
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xv
Liste des abréviations	xvii
Liste des symboles	xviii
Introduction générale	01
Chapitre I : Maitrise des stratégies de prévention et de protection contre la corrosion	
I.1. Introduction	03
I.2. Généralité sur le phénomène de corrosion	03
I.3. Notions concernant métaux et électrolytique.....	04
I.3.1. L'électrolyte.....	04
I.3.2. La conduction	05
I.3.3. L'électrode métallique.....	05
I.3.4. Potentiel du métal dans l'électrolyte	05
I.3.5. L'échelle de Nernst	06
I.3.6. L'électrode de référence	06
I.4. Processus de la corrosion : principe et différentes formes	07
I.4.1. Corrosion uniforme	08
I.4.2. Corrosion Localisée	08
I.4.2.1. Corrosion galvanique (polymétallique)	09
I.4.2.2. Corrosion par piqûres	09
I.4.2.3. Corrosion sélective	10
I.4.2.4. Corrosion inter granulaire.....	10
I.4.2.5. Corrosion caverneuse	10
I.4.2.6. Corrosion par aération différentielle	11
I.5. Corrosions en combinaison avec d'autres effets (complexes).....	11
I.5.1. Effets mécaniques	11
I.5.2. Effets biologiques	12
I.5.2.1. Corrosion filiforme.....	12

I.5.2.2. Corrosion bactérienne.....	12
I.5.2.3. Corrosion microbiologique.....	12
I.5.3. Effets électriques.....	13
I.5.3.1. Courants telluriques.....	13
I.5.3.2. Courants alternatifs.....	13
I.5.3.3. Courants continus.....	13
I.6. Facteurs déterminants dans la corrosion des matériaux.....	14
I.6.1. Résistivité du sol.....	15
I.6.2. Potentiel redox.....	16
I.6.3. Le pH du Sol (potentiel d'hydrogène).....	16
I.6.4. Sulfate dans le sol.....	16
I.6.5. Présence d'humidité dans le sol.....	17
I.6.6. Effet de la température.....	17
I.6.7. Présence des chlorures.....	17
I.7. Protection contre la corrosion : stratégies et solutions innovantes.....	18
I.8. La protection passive.....	19
I.8.1. Protection par revêtements organiques.....	19
I.8.1.1. Revêtement de type C.....	19
I.8.1.2. Revêtement par bande adhésive.....	20
I.8.1.3. Revêtement en PE extrudé.....	20
I.8.2. Protection par revêtements métalliques.....	21
I.8.2.1. Le revêtement anodique.....	21
I.8.2.2. Le revêtement cathodique.....	21
I.9. La protection active (électrochimique).....	21
I.9.1. Protection par inhibiteurs.....	21
I.9.2. Protection anodique.....	22
I.10. Protection cathodique.....	22
I.10.1. Critères de la protection cathodique.....	24
I.10.1.1. Densité du courant.....	25
I.10.1.2. Vérification du critère de polarisation de 100 mV.....	26
I.10.2. Protection par anodes sacrificielles (galvaniques).....	27
I.10.3. Protection par courant imposé.....	29
I.10.3.1. Générateur du courant continu.....	30
I.10.3.2. Le déversoir.....	31

I.10.3.3. Câbles de connexion.....	32
I.10.3.4. Critères et normes pour le dimensionnement de la protection cathodique	32
I.10.4. Drainage (présence des courants vagabonds)	32
I.10.4.1. Drainage polarisé.....	33
I.10.4.2. Drainage électrique forcé.....	34
I.10.5. Méthodologie de sélection d'une méthode de protection cathodique	35
I.11. Conclusion	36

Chapitre II : Effet des courants vagabonds sur les structures métalliques à proximité de la traction électrifiée

II.1. Introduction.....	37
II.2. Définition du terme courant vagabond.....	37
II.3. Origine des courants vagabonds à courant continu	38
II.3.1. Installation électrique défectueuse.....	38
II.3.2. Neutre Secondaire.....	38
II.3.3. Voisinage de réseau électrique a basse tension	39
II.3.4. Proximité d'un réseau électrique à haute tension HT	39
II.4. Les courants vagabonds et la traction électrifiée.....	40
II.4.1. L'action corrosif des courants vagabonds	40
II.4.2. Critères d'évaluation des courants vagabonds.....	41
II.4.3. Formation des courants vagabonds	41
II.5. La source polluante (tramway Constantine)	44
II.5.1. Cartographie du tramway	44
II.5.2. Electrification ferroviaires en courant continu	44
II.5.3. Différentes structures du tramway.....	46
II.5.3.1. La sous station électrique	46
II.5.3.2. Convertisseur de puissance.....	46
II.5.3.3. Lignes aériennes de contact (LAC).....	47
II.5.3.4. Dispositif de prise en courant (Pantographe).....	47
II.5.4. Problématique des tensions rail/sol.....	48
II.5.5. Impact des courants vagabonds sur les structures.....	48
II.6. Source influencée (les canalisations métalliques du gaz de Constantine)	49
II.6.1. Description de l'ouvrage de gaz	49
II.6.2. Analyse du réseau à proximité du tramway	50

II.7. Estimation des courants vagabonds dans les structures métalliques.....	51
II.7.1. Résistivité du sol dans le site d'étude	51
II.7.2. Résistance du sol d'une conduite.....	52
II.7.3. Résistance longitudinale ohmique de la conduite.....	52
II.7.4. Résistance du revêtement de la conduite (transversale).....	52
II.7.5. Résistance spécifique d'isolement de la conduite.....	53
II.7.6. Résistance d'isolement Rail/Sol	53
II.7.7. Résistance totale du circuit (Rail /Sol/ Conduite).....	53
II.7.8. Besoin en courant de la conduite	53
II.8. Résultats obtenus.....	53
II.9. État du potentiel de la canalisation après le démarrage du tramway	56
II.10. Conclusion	61

Chapitre III : Optimisation du comportement des courants vagabonds grâce à l'intelligence artificielle

III.1. Introduction	62
III.2. Paramètres électriques	62
III.2.1. Matériels de mesures	64
III.2.2. Potentiel en présence des courants vagabonds	67
III.3. Paramètres physico-chimiques du sol.....	68
III.4. L'intelligence artificielle pour la modélisation des courants vagabonds	71
III.4.1. Brève description des réseaux de neurones artificiels (ANN).....	71
III.4.2. Analyse de sensibilité par simulation de Monte-Carlo	72
III.4.3. Applications sur les défauts de corrosion par courants vagabonds.....	72
III.4.4. Différents algorithmes numériques.....	75
III.4.5. Décision par la technique de la régression du LASSO	76
III.4.6. Modèle linéaire à l'aide de la méthode des moindres carrés (least square Method)	76
III.4.7. Modèle quadratique avec interaction par la méthode progressive (Stepwise)	76
III.4.8. Technique ANN	77
III.4.9. Technique ANN-MTC.....	77
III.4.10. Discussion des résultats	79
III.5. Prédiction du potentiel par un modèle inverse basé sur les techniques du Machine Learning	80
III.5.1. Processus du modèle.....	80

III.5.2. Discussion des résultats du modèle	84
III.6. Conclusion.....	84

Chapitre IV : Approches prédictives pour la prévention des risques de corrosion par courants vagabonds

IV.1. Introduction.....	85
IV.2. Barrière de sécurité du potentiel dans les conduites métalliques.....	85
IV.3. Description des points d'étude.....	86
IV.4. Introduction à la méthode du contrôle statistique des processus	87
IV.5. Analyse du risque par la méthode de la statistique univariée	88
IV.5.1. Résultats du point N°01	92
IV.5.2. Résultats du point N°05	94
IV.5.3. Résultats du point N°19	95
IV.5.4. Résultats du point N°23	97
IV.5.5. Discussion.....	98
IV.6. Analyse des risques par la méthode de la statistique multivariée	98
IV.6.1. Technique T2 de Hotelling	99
IV.6.2. Technique MEWMA multivariée.....	100
IV.6.3. Résultats du point N°01	101
IV.6.4. Résultats du point N°05	102
IV.6.5. Résultats du point N°19	103
IV.6.6. Résultats du point N°23	104
IV.6.7. Discussion.....	105
IV.7. Analyse des risques par la méthode de la théorie de probabilité	105
IV.7.1. Résultats du point N°01	107
IV.7.2. Résultats du point N°05	110
IV.7.3. Résultats du point N°19	112
IV.7.4. Résultats du point N°23	114
IV.7.5. Discussion.....	117
IV.8. Conclusion.....	117
Conclusion et perspectives	118
Références	120
Annexes.....	I

Liste des figures

Chapitre I : Maitrise des stratégies de prévention et de protection contre la corrosion

I.1. Electrode Cu/CuSO ₄ le plus utilisé dans les zones offshores.....	07
I.2. Description simplifiée de l'équation de l'équilibre d'une espèce	08
I.3. Effet de la corrosion généralisée	08
I.4. Corrosion localisée	09
I.5. Corrosion galvanique entre laiton et cuivre	09
I.6. Corrosion par piqûres dans un tube de cuivre	09
I.7. La corrosion sélective	10
I.8. Corrosion inter granulaire	10
I.9. Corrosion par aération différentielle.....	11
I.10. Corrosion microbienne.....	12
I.11. Corrosion microbiologique.....	12
I.12. Influence des courants telluriques sur un pipeline.....	13
I.13. Effets des courants alternatifs.....	13
I.14. Processus de la corrosion par courant continu	14
I.15. La maitrise de la corrosion (solutions possibles).....	18
I.16. Méthodes de base pour maitriser la corrosion.....	18
I.17. Moyens de lutte contre la corrosion.....	19
I.18. Revêtement type C à chaud (Photo réelle à Skikda).....	20
I.19. Revêtements par bande adhésive	20
I.20. Revêtements PE tri-couches	20
I.21. Diagramme de Pourbaix pour le fer.....	23
I.22. Circuit électrique équivalent d'une cellule de corrosion.....	24
I.23. Processus pour limiter la corrosion.....	23
I.24. Critère de polarisation.....	26
I.25. Protection par anode sacrificielle.....	27
I.26. Principe de pose d'une anode sacrificielle (Skikda 2017)	28
I.27. Le principe de la protection par courant imposé	30
I.28. Générateur redresseur avec module de télésurveillance	30
I.29. Différents types des déversoirs.....	31
I.30. Processus du drainage polarisé	32

I.31. Appareil du drainage à proximité de la voie ferrée (Constantine 2021).....	33
I.32. Schéma équivalent du drainage polarisé	34
I.33. Processus de l'appareil du drainage forcé	34
I.34. Schéma équivalent du drainage forcé	35
I.35. Choix du système de la protection cathodique	35

Chapitre II : Effet des courants vagabonds sur les structures métalliques à proximité de la traction électrifiée

II.1. Schéma de l'alimentation d'une ville	38
II.2. Influence des lignes HT sur une conduite métallique.....	39
II.3. Effet corrosif du courant vagabond (Photos réelles)	40
II.4. Diamètre de percement des conduites à différentes épaisseurs	43
II.5. Volume perdu du métal pour un courant de 1 A sortant.....	43
II.6. Principe d'alimentation avec électrification en continue.....	45
II.7. Bilan énergétique des puissances	45
II.8. a) Transformateur Δ/Y , b) Transformateur à deux secondaires $\Delta/\Delta Y$	46
II.9. Photo réelle du transformateur Tramway Constantine	46
II.10. Schéma type d'un poste de redressement mono groupe	47
II.11. Différents composants de LAC	47
II.12. Pantographe du tramway.....	48
II.13. a) Résistivité du sol le long du tramway .b) Principe de la méthode de Winner	51
II.14. Section d'une conduite dans un sol infini homogène	52
II.15. Vérification du chemin de courant sortant de la canalisation	54
II.16. Valeurs du courant et de la résistance R_T	55
II.17. Description d'un point de mesure PP1	56
II.18. Potentiel et courant relevés sur 24 points de mesure.....	59
II.19. Organigramme du guide de bonne pratique	60

Chapitre III : Optimisation du comportement des courants vagabonds grâce à l'intelligence artificielle

III.1. Variation du potentiel le long de la conduite	64
III.2. Localisation des positions de mesures en voisinage du tramway	64
III.3. Les dispositifs de mesures des paramètres électriques.....	65
III.4. Mesures et enregistrements des paramètres électriques	65
III.5. Mesure à courant établi (Mesure en ON).	66

III.6. Mesure à courant coupé (Mesure en OFF).	66
III.7. Valeurs du potentiel avant et après le passage du tramway	67
III.8. Variation du potentiels ON/OFF pendant 24 heures.....	67
III.9. Échantillons du sol par carottage du projet tramway Constantine.....	68
III.10. Estimation du pH dans la ville de Constantine	69
III.11. Enregistrement des paramètres électriques.....	70
III.12. Architecture de la technique ANN.....	72
III.13. Structure du modèle du processus des CV	73
III.14. Matrice de corrélation (histogramme).....	74
III.15. Modèle des Entrées et des Sorties Expérimentales	74
III.16. Validation croisée de l'ajustement Lasso (MSE)	76
III.17. Prédiction du courant continu et des erreurs par la technique ANN.....	77
III.18. Prédiction du courant continu et des erreurs par la technique ANN-MTC	77
III.19. Processus du modèle inverse	80
III.20. Architecture du modèle inverse basé sur ANN.....	81
III.21. Matrice de corrélation de la méthode inverse	81
III.22. Matrice de corrélation du modèle inverse (histogramme).....	82
III.23 Les paramètre de régularisation du réseau des neurones.....	82
III.24. Résultats du modèle inverse en utilisant la méthode de réseau de neurones.....	83
III.25. L'erreur du modèle inverse.....	83
III.26. Statistique des résultats du modèle.....	84

Chapitre IV : Approches prédictives pour la prévention des risques de corrosion par courants vagabonds

IV.1. Cartographie tramway Constantine (04 points de contrôles).	86
IV.2. Interférence entre la ligne du tramway et le réseau du gaz (cas d'étude)	87
IV.3. Illustration du point d'étude N°3 (Passage sur pont).....	87
IV.4. Analyse de la corrosion par CV par l'arbre de défaillance	89
IV.5. Analyse de la corrosion par CV par le diagramme d'Ishikawa en 6 causes	90
IV.6. Les différents types des cartes de contrôles	90
IV.7. Présentation de la carte X-bar et la carte R	92
IV.8. Résultats du point 1 : Potentiels avec protection cathodique E_{ON}	92
IV.9. Résultats du point 1 : Potentiels sans protection cathodique E_{OFF}	93
IV.10. Résultats du point 1 : Courant transitant le témoin métallique I_{CC}	93

IV.11. Résultats du point 5 : Potentiel avec protection cathodique E_{ON}	94
IV.12. Résultats du point 5 : Potentiel sans protection cathodique E_{OFF}	94
IV.13. Résultats du point 5 : Courant transitant le témoin métallique I_{CC}	95
IV.14. Résultats du point 19 : Potentiel avec protection cathodique E_{ON}	95
IV.15. Résultats du point 19 : Potentiel sans protection cathodique E_{OFF}	96
IV.16. Résultats du point 19 : Courant transitant le témoin métallique I_{CC}	96
IV.17. Résultats du point 23 : Potentiel avec protection cathodique E_{ON}	97
IV.18. Résultats du point 23 : Potentiel sans protection cathodique E_{OFF}	97
IV.19. Résultats du point 23 : Courant transitant le témoin métallique I_{CC}	98
IV.20. Résultats du point 01 par la carte T^2 de Hotelling	101
IV.21. Résultats du point 01 par la carte MEWMA	101
IV.22. Résultats du point 05 par la carte T^2 de Hotelling	102
IV.23. Résultats du point 05 par la carte MEWMA	102
IV.24. Résultats du point 19 par la carte T^2 de Hotelling	103
IV.25. Résultats du point 19 par la carte MEWMA	103
IV.26. Résultats du point 23 par la carte T^2 de Hotelling	104
IV.27. Résultats du point 23 par la carte MEWMA	104
IV.28. Limite de contrôle UCL pour le courant I_{CC} (point N°01)	107
IV.29. Limites de contrôles UCL/LCL pour le courant E_{ON} (point N°01).....	108
IV.30. Limites de contrôles UCL/LCL pour le courant E_{OFF} (point N°01)	108
IV.31. Risque pour la limite UCL pour le courant I_{CC} (point N°01)	108
IV.32. Risque pour la limite UCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°01)	109
IV.33. Risque pour la limite LCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°01)	109
IV.34. Risque global pour tous les paramètres (point N°01)	109
IV.35. Limite de contrôle UCL pour le courant I_{CC} (point N°05)	110
IV.36. Limites de contrôles UCL/LCL pour le courant E_{ON} (point N°05).....	110
IV.37. Limites de contrôles UCL/LCL pour le courant E_{OFF} (point N°05)	110
IV.38. Risque pour la limite UCL pour le courant I_{CC} (point N°05)	111
IV.39. Risque pour la limite UCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°05)	111
IV.40. Risque pour la limite LCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°05)	111
IV.41. Risque global pour tous les paramètres (point N°05)	112
IV.42. Limite de contrôle UCL pour le courant I_{CC} (point N°19)	112
IV.43. Limites de contrôles UCL/LCL pour le courant E_{ON} (point N°19).....	112

IV.44. Limites de contrôles UCL/LCL pour le courant E_{OFF} (point N°19)	113
IV.45. Risque pour la limite UCL pour le courant I_{CC} (point N°19)	113
IV.46. Risque pour la limite UCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°19)	113
IV.47. Risque pour la limite LCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°19)	114
IV.48. Risque global pour tous les paramètres (point N°19)	114
IV.49. Limite de contrôle UCL pour le courant I_{CC} (point N°23)	114
IV.50. Limites de contrôles UCL/LCL pour le courant E_{ON} (point N°23).....	115
IV.51. Limites de contrôles UCL/LCL pour le courant E_{OFF} (point N°23)	115
IV.52. Risque pour la limite UCL pour le courant I_{CC} (point N°23)	115
IV.53. Risque pour la limite UCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°23)	116
IV.54. Risque pour la limite LCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°23)	116
IV.55. Risque global pour tous les paramètres (point N°23)	116

Liste des tableaux

Chapitre I : Maitrise des stratégies de prévention et de protection contre la corrosion

I.1. Les différentes particules ionisées	04
I.2. Classification des métaux selon Nernst	06
I.3. Différentes équations de réaction selon la nature du milieu	07
I.4. Classement de la corrosion localisée en point de vue d'hétérogénéité	08
I.5. Différents types de la corrosion complexe par effets mécaniques	11
I.6. Comportement du métal en fonction du taux de corrosion	15
I.7. Degré d'agressivité du sol en fonction de la résistivité	15
I.8. Relation entre le pH et les caractéristiques du sol	16
I.9. Effets du chlorure sur la corrosivité du sol	17
I.10. Classification des inhibiteurs.....	22
I.11. Valeurs de la densité du courant dans les différents sols	26
I.12. Description de processus du critère de 100mV	27
I.13. Comparaison entre les différents types d'anodes galvaniques.....	29
I.14. Matériaux constituant le déversoir anodique.....	31
I.15. Approche de choix pour une méthode de protection cathodique	36

Chapitre II : Effet des courants vagabonds sur les structures métalliques à Proximité de la traction électrifiée

II.1. Différentes formes d'influence des lignes haute tension.....	39
II.2. Comportement du métal en fonction du taux de corrosion.....	41
II.3. Perte de masse des métaux due à la corrosion par un courant vagabond	43
II.4. Temps de percement en fonction des courants vagabonds	43
II.5. Caractéristiques du tramway Constantine.....	44
II.6. Caractéristiques du réseau de distribution gaz de Constantine	50
II.7. Analyse du réseau du gaz en voisinage du tramway	50
II.8. Distance entre le réseau du gaz et le chemin du tramway	50
II.9. Données pour les calculs.....	53
II.10. Résultats finaux	53
II.11. Résultats de la condition : $r+R_{\text{cable}} < R_{\text{rev}}$	54
II.12. Caractéristiques électriques d'un câble en cuivre	55
II.13. Interprétation des signaux de la figure (II.18).....	59

Chapitre III : Optimisation du comportement des courants vagabonds grâce à l'intelligence artificielle

III.1. Valeurs numériques du potentiel.....	63
III.2. Critère de décalage positif acceptable du potentiel ΔU	66
III.3. Paramètres à étudier	69
III.4. Données collectées	70
III.5. Nomenclature des entrées et des sorties	73
III.6. Matrice de corrélation	74
III.7. Description statistiques des échantillons collectés.....	75
III.8. Résultats de la décision du technique lasso	76
III.9. Indicateurs de performance statistique des différentes méthodes	78
III.10. Nomenclature des entrées et des sorties du modèle inverse	81

Chapitre IV : Approches prédictives pour la prévention des risques de corrosion par courants vagabonds

IV.1. Localisation des points d'étude	86
IV.2. Matrice de $m \times n$ mesures $X_{i,j}$	88
IV.3. Les événements à la base du phénomène de corrosion par CV	89

Liste des abréviations

CV	Courant vagabond
DC	Courant continu
AC	Courant alternatif
PC	Protection cathodique
PP	Prise potentiel
E_{ON}	Potentiel à courant établi
E_{OFF}	Potentiel à courant coupé
BT	Basse tension
HT	Haute tension
SST	Sous-station électrique
CPS	Système de protection cathodique
ISO	Organisation internationale de normalisation
LAC	Ligne aérienne du contact
ANN	Réseaux neurones artificielles
MTC	Méthode de Monte Carlo
SPC	Contrôle statistique de processus
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
SLT	Système de liaison à la terre
LASSO	Least Absolute Shrinkage and Selection Operator
EWMA	Exponentially Weighted Moving Average
UCL	Limite de contrôle supérieure
LCL	Limite de contrôle inférieure
CAI	Courants alternatifs induits

Liste des symboles

E	Potentiel du métal	V
U_{RE}	Tension rail/sol	V
E_n	Potentiel naturel (spontané)	V
E_{ON}	Potentiel a courant établi	V
E_{OFF}	Potentiel à courant coupé	V
E_{pro}	Potentiel de protection	V
E_{rep}	Potentiel en repos	V
I_{cc}	Courant continu transitant	A
I_s	Courant vagabond	A
I_d	Courant de drainage	A
I_{AC}	Courant alternatif	A
I'_s	Courant vagabond dans les rails	A
I_{pro}	Courant de protection	A
I_{corr}	Courant de corrosion	A
I_a	Courant anodique	A
I_{pc}	Courant de protection cathodique	A
I_c	Courant cathodique	A
R	Résistance électrique	Ω
R_s	Résistance de la structure	Ω
R_c	Résistance caractéristique des rails de roulement	Ω
R_s	Résistance de la structure	Ω
R_{tot}	Résistance totale des différentes résistances	Ω
R	Résistance de la conduite	Ω
R_a	Résistance anodique	Ω
R_c	Résistance cathodique	Ω
G	Conductance électrique	Ω^{-1} ou (S)
L	Longueur de la canalisation	M
L_c	Longueur caractéristique des rails de roulement	M
E	Epaisseur de la canalisation	mm ²
R_{sol}	Résistance du sol	Ω
R_{rev}	Résistance de revêtement	Ω
ρ	Résistivité du sol	$\Omega.m$
J	Densité du courant	mA/m ²
S	Surface de la conduite	m ²
A	Coefficient d'atténuation	Ω^{-1}
A	Distance entre piquets dans la méthode de Winner (pas)	M
γ	Résistance caractéristique de la conduite	Ω

R_T	Résistance transitoire	Ω
d_{ext}	Diamètre extérieur de la conduite	mm^2
D	Distance rail/ conduite	M
R_{cable}	Résistance du câble de connexion	M
L_{cable}	Longueur du câble de connexion	M
L_c	Longueur de la conduite	M
W	Humidité	%
I_P	Indice de plasticité	%
S_r	Saturation du sol	%
D_s	Densité du sol	gcm^{-3}
M	Masse perdu du métal	Kg
F	Constance de Faraday	C mol^{-1}
S	Surface de la conduite	m^2
M	Masse molaire de la substance	
Z	Valence de la substance	
β	Coefficient de vieillissement	

Introduction générale

Introduction générale

Les hydrocarbures sont une source majeure de revenus pour de nombreux pays, y compris l'Algérie. Les pipelines en acier fournissent un moyen fiable et rentable de transporter ces ressources vers les marchés locaux et internationaux. La stabilité de ces flux de revenus est cruciale pour le budget national et la croissance économique. Ces canalisations métalliques enfouillées sont souvent le moyen le plus économique pour transporter des hydrocarbures sur de longues distances. Comparés aux transports roulants par camion ou par train, ils réduisent considérablement les coûts de transport, ce qui permet aux pays de maximiser leurs bénéfices. Ces matériaux sont conçus pour résister à des conditions environnementales difficiles et offrir une sécurité maximale. Cela réduit les risques de fuites et d'accidents, ce qui est essentiel pour protéger l'environnement, les populations locales et l'industrie elle-même. En outre, la construction et la maintenance des pipelines créent des emplois locaux et stimulent le développement de l'industrie métallurgique. En Algérie, cela soutient le développement des entreprises locales en tirant parti de travailleurs qualifiés.

Avec le développement du transport urbain par traction électrique en Algérie, notamment les tramways, la mise en service de la technologie du transport ferroviaire électrique a connu un développement significatif dans le domaine du transport urbain. Cependant, la présence de canalisations métalliques souterraines, en particulier pour le transport et la distribution du gaz, à proximité des voies de traction électrique, peut engendrer des effets néfastes sur ces structures enterrées. En conséquence, leur déclassement nécessite un budget important, surtout dans le cas de la distribution à moyenne pression (4 bar) dans les zones d'agglomération, qui est soumise à une surveillance constante contre la corrosion électrolytique grâce à un système de protection cathodique.

Un autre phénomène de corrosion vient s'ajouter, induit par le passage des tramways et il est encore plus nocif que le premier. Il s'agit de la corrosion provoquée par les courants vagabonds à courants continus. Cette corrosion résulte de l'interaction entre les courants électriques produits par les systèmes de traction électrique des tramways et les canalisations métalliques environnantes.

La thèse se structure en quatre chapitres, chacun contribuant à approfondir notre compréhension de l'impact de ces courants sur les structures métalliques du gaz, sous l'effet de la traction électrique des tramways. Voici un aperçu des principaux chapitres :

Le premier chapitre aborde un phénomène préjudiciable pour les métaux. Il commence par une explication des différentes formes de corrosion, notamment la corrosion chimique et la corrosion complexe avec d'autres effets. Ensuite, il explore les méthodes de maîtrise de la corrosion en détaillant les différentes formes de protection passive et active, notamment la sélection de matériaux résistants à la corrosion, la conception adéquate des structures, le contrôle des conditions environnementales et l'utilisation de revêtements protecteurs. Le chapitre se conclut par une discussion des diverses méthodes de protection, telles que la protection cathodique par courant imposé ou par anodes sacrificielles, ainsi que la protection par drainage

en présence de courants vagabonds, mettant en évidence l'importance de choisir la méthode appropriée en fonction des conditions spécifiques pour prévenir efficacement la corrosion.

Le deuxième chapitre se penche sur une étude de cas approfondie portant sur la corrosion due aux courants vagabonds et leur impact sur un réseau de gaz en acier, notamment dans le contexte de la ville de Constantine, en Algérie. Cette étude met en évidence les défis liés à la corrosion causée par les courants vagabonds, émis par le tramway, sur le système de protection cathodique du réseau de distribution de gaz. L'analyse détaille les méthodes de diagnostic de ces courants vagabonds ainsi que leur influence sur les infrastructures métalliques. Il souligne l'importance cruciale de comprendre et de gérer activement ce phénomène pour garantir la sécurité et la fiabilité du réseau de distribution de gaz.

Le troisième chapitre se distingue par sa singularité, étant la première étude en Algérie à se pencher sur l'impact des courants vagabonds sur un réseau de gaz en acier, en se basant sur des données recueillies sur le terrain. Ces données combinent des paramètres électriques enregistrés en temps réel sur une période de 24 heures avec des paramètres liés au sol sur place. Notons que ces mesures ont été effectuées sur le terrain plutôt qu'en laboratoire. L'analyse de ces données repose sur des techniques d'intelligence artificielle, impliquant des approches linéaires et non linéaires. De plus, une analyse de sensibilité, validée par un algorithme de simulation de Monte Carlo, a été réalisée pour confirmer la méthodologie employée. En outre, ce chapitre innove en développant un modèle inverse basé sur l'apprentissage automatique. Cette approche vise à approfondir notre compréhension des courants vagabonds en utilisant des données d'entrée différentes de celles du modèle précédent, explorant ainsi de nouveaux paramètres pour mieux appréhender les mécanismes complexes de la corrosion due aux courants vagabonds.

Le dernier chapitre de cette thèse se focalise sur une analyse de risque spécifique concernant les interactions entre la ligne de tramway et les conduites en acier en quatre points d'intérêt particuliers. Pour cela, une méthodologie statistique à la fois univariée et multivariée a été appliquée, utilisant des outils tels que les cartes de contrôle X-bar et R-chart pour l'approche univariée, et les statistiques T^2 de Hotelling et la méthode MEWMA pour l'approche multivariée. Bien que ces méthodes soient conventionnelles, leur adaptation à notre étude présente une innovation significative.

En conclusion de ce chapitre, une analyse de risque concernant les courants vagabonds a été entreprise en utilisant la théorie de la probabilité, assistée par des techniques d'apprentissage automatique (machine learning) pour mieux comprendre les risques et leur impact préjudiciable sur l'état des conduites métalliques. Cette approche propose une perspective novatrice pour évaluer et anticiper les conséquences des courants vagabonds dans le contexte de notre recherche.

Il met en lumière l'apport de cette étude à la compréhension des interactions complexes entre les courants vagabonds et les réseaux de gaz en acier, ainsi que son importance pour la planification et la gestion des infrastructures urbaines. À travers ces différents chapitres, la thèse vise à fournir des connaissances scientifiques de haute qualité et des recommandations pratiques pour mieux préserver l'intégrité des canalisations de gaz en acier dans un contexte de transport urbain par traction électrique.

Chapitre I
Maitrise des stratégies de prévention et de
protection contre la corrosion

Chapitre I

Maitrise des stratégies de prévention et de protection contre la corrosion

I.1. Introduction

La corrosion est un processus naturel qui se produit lorsque des métaux sont exposés à des conditions environnementales néfastes, telles que l'humidité, le sel, et d'autres produits chimiques corrosifs, ce qu'entraîne une dégradation progressive des métaux avec le temps [1]. La corrosion entraîne des coûts considérables pour le renouvellement, des répercussions techniques désagréables et des risques pour l'être humain, à la fois pour les individus et pour les entreprises industrielles et les gouvernements.

La corrosion se présente dans toutes les branches d'activité [2], mais elle peut être le plus nocive dans les industries d'hydrocarbures. En règle générale, les installations gazières sont enterrées et inaccessibles à l'inspection, exerçant leur fonction de production, de transport et de distribution sans être remarquées, car leur environnement se caractérise par une agressivité notable due à sa diversité et à la présence élevée d'impuretés [3]. La modélisation et les études scientifiques en laboratoire ou sur site sont difficiles dans ce milieu très diversifié. Les scientifiques sont encore en train de comprendre les causes de la corrosion, tandis que les ingénieurs travaillent à améliorer les méthodes pour prévenir les dommages causés par la corrosion [4]. La corrosion entraîne des coûts considérables pour le renouvellement, des répercussions techniques désagréables et des risques pour l'être humain, tant pour les individus que pour les entreprises et les gouvernements [4].

I.2. Généralités sur le phénomène de la corrosion

La corrosion se produit lorsque le métal et le milieu corrosif se trouvent en interaction simultanée. Les métaux et les alliages sont toujours en tendance pour revenir à leur état naturel d'oxydes ou de minerais dans le milieu naturel [5]. La corrosion entraîne des coûts importants pour le renouvellement, des effets techniques désagréables et des risques humains pour les individus, les entreprises industrielles et les États. La corrosion affecte toutes les industries, mais elle peut affecter le plus les industries gazière et pétrolière [6]. En raison de leur exposition à un milieu agressif en raison de son hétérogénéité et de son nombre d'impuretés, les installations gazières sont généralement enterrées, inaccessibles à l'inspection, et remplissent leur fonction de production, de transport et de distribution sans être remarquées [7]. Dans ce milieu très diversifié, il est difficile de mener des études scientifiques et des modélisations en laboratoire ou sur site. Les scientifiques cherchent toujours à comprendre ce qui provoque la corrosion, tandis que les ingénieurs cherchent à développer des moyens de prévenir les dommages causés par la corrosion. [8].

La corrosion est parfois un phénomène bénéfique car elle détruit et élimine un grand nombre d'objets abandonnés dans notre planète, et certains procédés industriels comme l'anodisation de

l'aluminium, qui est une technique à la fois protectrice et décorative, font même appel à la corrosion. Le polissage électrochimique, qui consiste à dissoudre le métal pour produire une surface lisse et brillante, est également mentionné [9].

La Norme ISO 8044 « *Corrosion des métaux et alliages – termes principaux et définitions* » La Corrosion est une réaction physicochimique interne entre métal (ou alliage) et son milieu, conduisant à une dégradation du système fonctionnel représenté par le métal (perte de matière, perforation) ou l'environnement (contamination). C'est un processus naturel de retour des métaux extraits des minerais par les procédés de métallurgie vers des espèces oxydées (oxydes, carbonates) [10].

I.3. Notions concernant métaux et électrolytique

Les métaux sont des éléments chimiques qui ont des propriétés de résistance mécanique, de ductilité, de malléabilité et de conductivité électrique. Ils sont utilisés dans un large éventail de secteurs, notamment la construction et l'industrie [11]. Lorsqu'elles sont dissoutes dans un solvant, généralement de l'eau, les électrolytes se dissocient en ions. Ces ions peuvent être des cations ou des anions, qui sont des charges positives ou négatives. En présence d'un électrolyte, les métaux peuvent subir une corrosion dans le cadre de ce phénomène. Lorsque le métal interagit avec les ions d'un électrolyte, cela entraîne la détérioration de sa surface, que l'on appelle communément corrosion [12].

I.3.1. L'électrolyte

Un électrolyte est une substance qui, une fois dissoute dans un solvant, généralement de l'eau, se dissocie en ions. De nombreux processus chimiques et biologiques requièrent la présence d'électrolytes. Par exemple, ils sont essentiels pour la conductivité électrique des solutions, les réactions électrochimiques, la régulation de l'équilibre acide-base dans le corps, la transmission des signaux nerveux, etc. Le tableau (I.1) illustre les différentes particules ionisées [13].

Les métaux peuvent se corroder lorsqu'ils entrent en contact avec un électrolyte, car ils peuvent interagir avec les ions présents. La corrosion implique souvent l'oxydation du métal (perte d'électrons) et la réduction des ions dans l'électrolyte. Il est essentiel de comprendre comment les électrolytes interagissent avec les métaux afin de comprendre et de prévenir la corrosion.

Tableau I.1. Les différentes particules ionisées [14].

Particules Ionisées	Exemples
Ions Positifs (Cations)	- Cations univalents (H^+ , Na^+ , K^+)
	- Cations divalents (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cu^{+2})
	- Cations trivalents (Al^{+3} , Fe^{+3})
Ions Négatifs (Anions)	- Anions univalents (Cl^- , Br^-)
	- Anions divalent (S^{-2})
	- Cations trivalents (PO^{-3} , N^{-3})
Ions Complexes	- Ion sulfate (SO_4^{-2})
	- Ion ferrite (FeO^{+2} , $Fe(OH)^{+2}$, NH_4^+)

I.3.2. La conduction

Le processus de conduction implique le transfert de charges électriques à travers un liquide ou une solution contenant des ions [15]. Lorsqu'un courant électrique traverse un électrolyte, un flux de charges se produit, avec les ions positifs et négatifs se déplaçant en directions opposées. Le mécanisme de conduction de l'électrolyte dépend de la nature de l'électrolyte lui-même. Dans le cas des électrolytes aqueux, tels que les solutions d'acides, de bases, ou de sels dissous dans l'eau, la conduction se produit principalement grâce au mouvement des ions. Les ions positifs et négatifs peuvent se déplacer librement dans le liquide, contribuant ainsi à la conduction électrique lorsque les molécules d'eau se dissocient en ions [16]. En résumé, la procédure de conduction du courant électrique se déroule comme suit :

Le courant est transmis par les électrons du métal. Un conducteur ohmique, soumis à la loi d'Ohm, est un conducteur dans lequel la tension appliquée aux bornes du métal est proportionnelle au courant le traversant [17].

$$U = RI \quad \text{Eq (I.1)}$$

Une conduction ionique se produit lorsque l'électrolyte conduit le courant par ses particules ionisées. Pour assurer la circulation d'un courant dans l'électrolyte, une tension minimale est indispensable. S'il y a un retard du courant par l'effet d'une force électromotrice relative à l'électrolyte, dans ce cas la loi généralisée d'ohm est appliquée par l'équation (I.2).

$$U = E + RI \quad \text{Eq (I.2)}$$

I.3.3. L'électrode métallique

Une électrode métallique est un élément utilisé dans une cellule électrochimique, telle qu'une batterie, pour conduire les électrons dans une réaction électrochimique. Elle est constituée d'un matériau conducteur, généralement du métal, qui peut participer à une réaction d'oxydation ou de réduction [18].

I.3.4. Potentiel du métal dans l'électrolyte

Les métaux sont généralement présents sous la forme d'oxydes, de sulfates et de carbonates. Ils ont tendance à revenir à leur état initial, c'est-à-dire à la forme oxydée qui est stable, une fois qu'ils sont réduits à leur état métallique (corrosion) [19]. Le potentiel d'un métal dans un électrolyte peut être déterminé expérimentalement en utilisant une électrode de travail en métal et en mesurant la différence de potentiel entre cette électrode et une électrode de référence [20].

Le potentiel en électrotechnique, couramment désigné sous le nom de "tension" ou "potentiel électrique", trouve principalement son utilisation dans le domaine de l'électricité et de l'électronique. En revanche, en électrochimie, le potentiel électrochimique est également exprimé en volts, mais il est spécifiquement lié aux réactions chimiques et électrochimiques.

Il sert à caractériser la propension d'une réaction chimique à se produire de manière spontanée ou non lorsque des réactifs sont immergés dans une solution électrolytique. Ce potentiel électrochimique est fréquemment associé aux électrodes au sein d'une cellule électrochimique, où des réactions d'oxydoréduction se déroulent. Ce potentiel est symbolisé par

la lettre E représente la différence de potentiel entre le métal et l'électrolyte. Sa valeur dépend de la loi de Nernst, comme décrit par l'équation (I.3).

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_{ox}}{C_{red}} \right) \quad Eq (I.3)$$

Avec C_{OX} et C_{red} : concentrations du métal dans les deux réactions.

I.3.5. L'échelle de Nernst

Le potentiel du métal dans un électrolyte peut être calculé en appliquant les lois de la thermodynamique. Ce potentiel est spécifique à chaque métal et permet de classer les métaux en fonction de leur capacité à s'ioniser [21]. L'équation de Nernst est employée pour calculer le potentiel d'une demi-réaction électrochimique à une température donnée. L'échelle de Nernst est une série de valeurs qui indique le potentiel standard d'une électrode pour différentes demi-réactions.

De cette manière, L'échelle de Nernst est utilisée pour classer les métaux en fonction de leur noblesse. Un métal ayant un potentiel plus élevé est considéré comme plus noble, tandis qu'un métal avec un potentiel plus faible est considéré comme moins noble. Par exemple, l'or, en raison de son potentiel élevé, est peu sujet à la corrosion [22]. Les métaux sont classés sur l'échelle de Nernst dans le tableau (I.2).

Tableau I.2 : Classification des métaux selon Nernst [23].

Elément	Potentiel E_0 (mV), à pH=0 et T= 25°C	
Or	+1420	
Argent	+810	Métaux Noble
Bronze	+700	(corrode le Fer)
Cuivre	+330	
Hydrogène	+00	Origine des Potentiels
Plomb	-130	
Fonte	-390	
Fer	-440	Potentiel du Fer
Zinc	-760	Métaux Corrodables
Aluminium	-1660	(protège le Fer)
Magnésium	-2370	

I.3.6. Électrode de référence

Un électrolyte contenant une électrode métallique peut être assimilé à une demi-pile. Par conséquent, le potentiel électrochimique n'est plus mesuré que par rapport à une électrode de référence. L'électrode standard à hydrogène, conventionnellement fixée à un potentiel de zéro volt, est la plus couramment utilisée dans les zones terrestres [24].

Dans une cellule électrochimique, l'électrode de travail est habituellement combinée à l'électrode de référence pour mesurer le potentiel d'une demi-réaction électrochimique. Par la

suite, un voltmètre est employé pour quantifier la différence de potentiel entre les électrodes de travail et de référence [25].

Les électrodes de référence les plus simples et généralement utilisées dans les mesures réelles, telles que l'électrode Cu/CuSO₄, l'électrode Ag/AgCl, et comme l'électrode standard à hydrogène soit choisie conventionnellement comme zéro de l'échelle des potentiels. Les potentiels respectifs de ces électrodes sont connues (voir figure I.1).

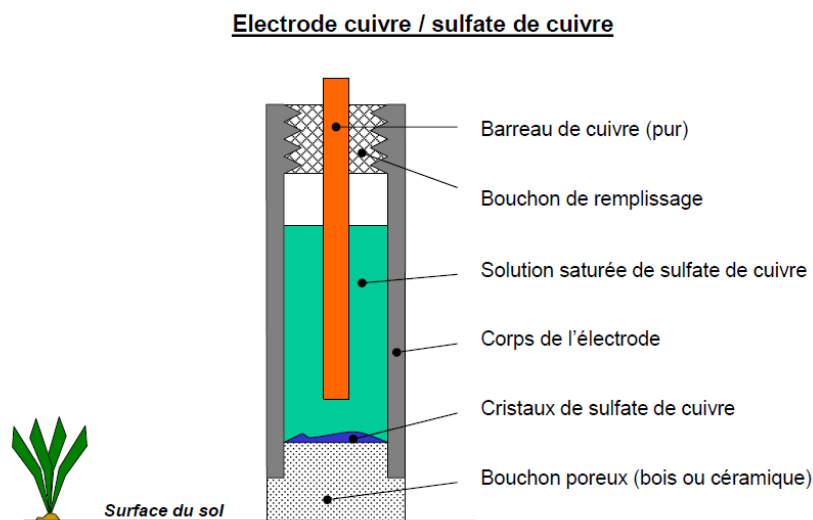


Figure I.1. Electrode Cu/CuSO₄ le plus utilisé dans les zones offshore [25].

I.4. Processus de la corrosion : principes et différentes formes

Conformément à la norme ISO-8044 concernant la dégradation des métaux et des alliages, la corrosion est définie comme une relation de corrélation entre une structure métallique et son électrolyte, telle que le sol, impliquant une interaction physico-chimique entre le métal et son environnement. Cette interaction entraîne la dégradation des systèmes fonctionnels du métal, telle que la perte de matière et la fissuration, ainsi que celle de l'environnement. Il s'agit d'un processus naturel par lequel les métaux extraits des minerais retournent à leur état initial dans le sol sous forme d'espèces oxydées, telles que les oxydes, les carbonates et les sulfures [26].

Le métal subira une oxydation en présence de tout système chimique contenu dans l'électrolyte capable de capter les électrons du métal lorsqu'il entre en contact avec l'électrode, tels que les oxydants de la solution. Les oxydants dans la solution subissent une réduction, c'est-à-dire un gain d'électrons, tandis que le métal, appelé réducteur, subit une oxydation, correspondant à une perte d'électrons.

Le tableau (I.3) présente les diverses réactions chimiques d'un métal, tandis que la figure (I.2) offre une représentation simplifiée de ces réactions lorsque le métal est exposé à la corrosion ou à des mesures de protection.

Tableau I.3 : Différentes équations de réaction selon la nature du milieu [27].

Nature de milieu	Equation de la réaction
Présence d'hydrogène (pH < 7)	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
Présence d'oxygène (pH < 7)	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
Présence d'oxygène (pH > 7)	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4H^-$

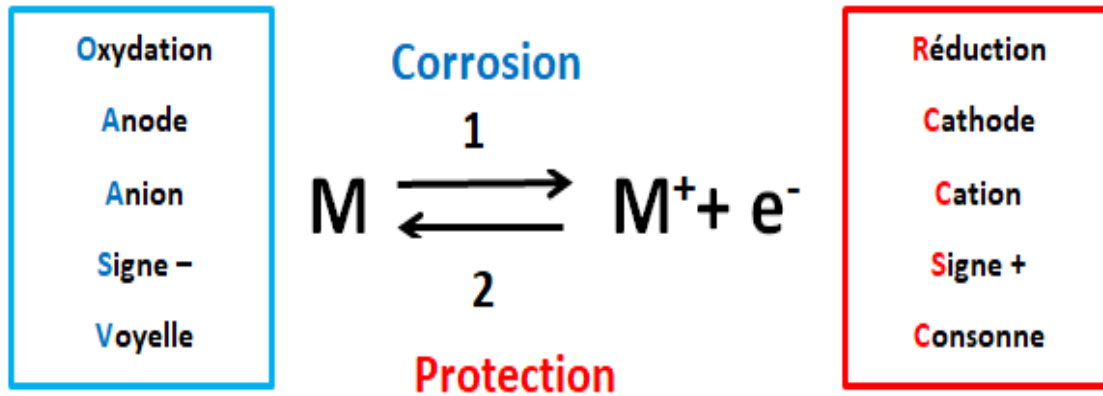


Figure I.2. Description simplifiée de l'équation de l'équilibre d'une espèce.

I.4.1. Corrosion uniforme

La corrosion uniforme, également appelée corrosion généralisée, est le type de corrosion le plus répandu et le plus simple à traiter. Elle se produit de manière uniforme sur toute la surface d'un matériau exposé à un environnement corrosif. Cette forme de corrosion se caractérise par une perte de matière uniforme sur l'ensemble de la surface, entraînant ainsi une diminution de l'épaisseur du matériau [28]. La corrosion généralisée peut se manifester dans divers environnements corrosifs, tels que l'eau, l'air humide, les acides et les bases. Elle est généralement provoquée par des réactions électrochimiques entre le matériau et l'environnement corrosif (voir Figure I.3).



Figure I.3. Effet de la corrosion généralisée. [29]

I.4.2. Corrosion localisée

Ce type est un peu plus trompeur. Elle se produit de manière localisée sur une petite partie de la surface d'un métal exposé dans un milieu anodique. Contrairement à la corrosion généralisée, la perte de matière est concentrée dans des zones spécifiques. (Figure I.4). Selon l'hétérogénéité du milieu, il existe deux catégories de corrosion localisée (Tableau I.4) [30].

Tableau I.4 : Classement de la corrosion localisée en point de vue d'hétérogénéité.

Hétérogénéités dans la phase métallique	Hétérogénéités dans la phase aqueuse
Corrosion galvanique	Corrosion par aération différentielle
Corrosion par piqure	Corrosion caverneuse
Corrosion sélective	
Corrosion inter-granulaire	



Figure I.4. Corrosion localisée [30].

I.4.2.1. Corrosion galvanique (polymétallique)

La corrosion galvanique est un phénomène qui se produit lorsque deux métaux différents entrent en contact dans un milieu conducteur, en raison de la différence de potentiel électrochimique entre les deux métaux. Lorsque ces métaux entrent en contact, un courant électrique se forme, avec des électrons se déplaçant du métal ayant un potentiel plus négatif (anode) vers le métal ayant un potentiel plus positif (cathode) [31]. Ce courant provoque la dissolution de l'anode, ce qui entraîne la formation d'ions métalliques et la libération d'électrons (Figure I.5).



Figure I.5. Corrosion galvanique entre laiton et cuivre [31].

I.4.2.2. Corrosion par piqûres

C'est une forme très subtile et destructrice. La dégradation du métal se limite à des petites piqûres qui peuvent s'étendre vers la profondeur d'une manière significative, sans toucher les autres surfaces qui restent homogène et intact. La perforation de l'installation peut être effectuée en quelques jours sans qu'il n'y ait pas de perte de poids significative de l'ensemble, (voir figure I.6) [32].



Figure I.6. Corrosion par piqure dans un tube de cuivre [32].

I.4.2.3. Corrosion sélective

Lorsqu'un milieu corrosif attaque un alliage métallique de manière inégale, cela entraîne une corrosion sélective, également connue sous le nom de corrosion préférentielle. La composition chimique de l'alliage, les variations locales du pH, la présence d'impuretés ou de contaminants dans le milieu agressif ou les contraintes mécaniques exercées sur l'alliage sont quelques-uns des nombreux facteurs qui peuvent entraîner la corrosion sélective. Les illustrations ci-après (Figure I.7) représentent deux formes de la corrosion sélective qui se manifeste dans la graphitisation des fontes (a) et le dézincification des laitons (b) [33].

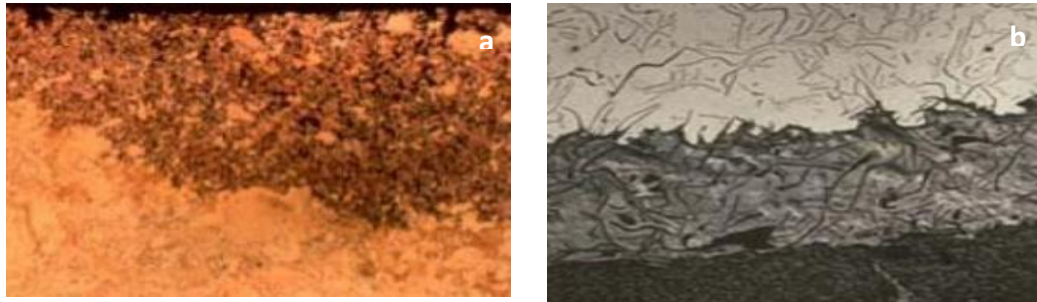


Figure I.7. La corrosion sélective

a) Dézincification d'un laiton. b) Graphitisation d'une fonte lamellaire.

I.4.2.4. Corrosion inter granulaire

C'est un type qui se produit le long des limites de grains d'un matériau métallique, il est particulièrement à des effets dommageables surtout sur les matériaux de structure granulaire tel que l'acier inoxydable, car il est affecté généralement au niveau des joints des grains. La sensibilisation du matériau, qui se produit lorsqu'il est exposé à des conditions spécifiques telles que des températures élevées, une exposition prolongée à des milieux corrosifs ou un refroidissement rapide après un traitement thermique, (Figure I.8) [34].



Figure I.8. Corrosion inter granulaire [34].

I.4.2.5. Corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse, également appelée corrosion par crevaion, est un type qui se produit dans la surface du matériau sous forme de petites cavités ou de puits. La corrosion caverneuse peut poser des problèmes importants car elle peut affaiblir considérablement la structure du matériau et provoquer des défaillances catastrophiques. L'exposition du matériau à un environnement agressif contenant des ions corrosifs, ce que favorise la formation de cavités par des réactions électrochimiques locales, où certaines zones de la surface du matériau deviennent plus anodiques et se corrodent plus rapidement que d'autres [35].

I.4.2.6. Corrosion par aération différentielle

La variété de la concentration d'oxygène entraîne une variété de potentiel électrochimique, ce qui entraîne des anodes plus petites mais stables en présence de larges zones cathodiques, ce qui provoque la dissolution rapide du métal sur ces petites zones, (Figure I.9) [36].

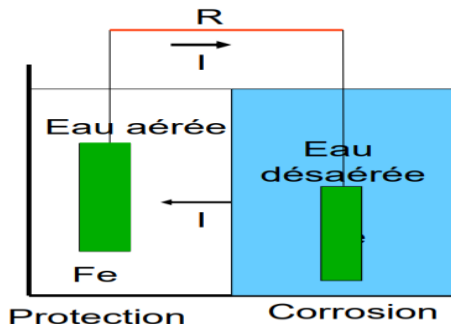


Figure I.9. Corrosion par aération différentielle [36].

I.5. Corrosions en combinaison avec d’autres effets (complexes)

Comme évoqué dans les deux sections précédentes, le regroupement des différents types et formes de corrosion dans une même catégorie engendre les mêmes causes de corrosion. Dans cette section, l'auteur a choisi de rassembler les autres formes complexes qui se manifestent en combinaison avec d'autres effets.

I.5.1. Effets mécaniques

On distingue deux types de corrosion par effet mécanique selon la phase du milieu métallique ou aqueuse. Le tableau (I.5) définit brièvement ces différents types.

Tableau I.5 : Différents types de la corrosion complexe par effet mécaniques [37].

Corrosion par effets mécaniques dans la phase métallique	
Corrosion sous contrainte	Une fissuration dans le métal causée par une contrainte mécanique et une réaction électrochimique.
Corrosion par fragilisations d’hydrogène	fissuration de certains métaux par la pénétration des atomes d’hydrogène.
Corrosion par fatigue	Fissure par fatigue ou vieillissement contenant des produit de corrosion, très dangereux car pas de limite de fatigue, il se manifeste beaucoup dans les structures marines
Corrosion de contact (frottement)	Se produit par un contact des surfaces de deux métaux et qu’elle se déplace l’une par apport à l’autre
Corrosion par effets mécaniques dans la phase aqueuse	
Corrosion par érosion	Elimination de métal par action mécanique de liquides ou du solide.
Corrosion par abrasion	Élimination de produits de corrosion par action mécanique de liquides (ou solides).
Corrosion par cavitation	Une attaque de fatigue par impact se produit lorsque des bulles de vapeur se forment dans le film d'huile.

I.5.2. Effets biologiques

I.5.2.1. Corrosion filiforme

Ce type de corrosion se produit lorsque un revêtement de bonne qualité avec une grande résistance d'isolement, ce que rendre imperméable au milieu environnant (l'oxygène ou l'eau). Si la corrosion filiforme se produit, il est nécessaire de retirer complètement le revêtement affecté et de traiter la surface métallique avant d'appliquer un nouveau revêtement de protection. . L'attaque se manifeste par des filaments émis dans tous points de la structure à partir des défauts du revêtement [38].

I.5.2.2. Corrosion bactérienne

C'est une forme causée par certaines bactéries sur les métaux. Ils ont la capacité de métaboliser les composés sulfurés de l'environnement. Les canalisations, les systèmes de refroidissement et les réservoirs sont des exemples d'environnements où la corrosion bactérienne peut se produire.

Il est crucial de maintenir une bonne hygiène de l'eau et de contrôler les conditions favorables à la croissance des bactéries à base de sulfure, en désinfectant les canalisations et en filtrant l'eau, afin de prévenir la corrosion bactérienne, (Figure I.10) [39].



Figure I.10. Corrosion microbienne.

I.5.2.3. Corrosion microbiologique

Cette forme de corrosion est souvent causée par l'activité de micro-organismes, tels que des bactéries ou des champignons, qui forment un biofilm sur la surface métallique, ce qui peut accélérer la corrosion. Dans la quel, les microorganismes subissent une réaction chimique qui détruit la surface du métal. Ce processus crée un environnement idéal pour divers micro-organismes, tel que les champignons et les bactéries [39, 40], (Figure I.11).



Figure I.11. Corrosion microbiologique.

I.5.3. Effets électriques

I.5.3.1. Courants telluriques

Il s'agit de courants électriques variables engendrés par le géomagnétisme et la conductivité du sol. Ils se manifestent dans certaines régions et peuvent entraîner des sur-polarisations de potentiel le long des pipelines enterrés en parallèle. Pour atténuer ces effets, il est possible de recourir à l'installation de joints isolants et d'optimiser la réduction de leurs impacts en positionnant stratégiquement des anodes galvaniques [41], (Figure I.12).

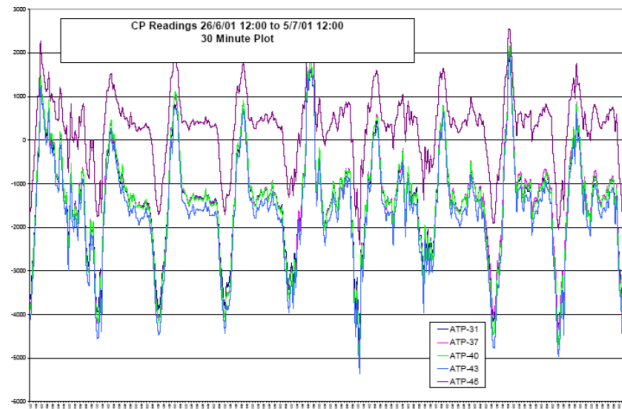


Figure I.12. Influence des courants telluriques sur un pipeline.

I.5.3.2. Courants alternatifs

Les problèmes générés lorsque sont dus à la proximité de lignes de haute ou de moyenne tension, elles peuvent engendrer des sur-potentiel de la canalisation ce que engendres des effets néfastes pour La sécurité du personnel et les biens industriels tel que le perçement des aciers et le décollement du revêtement. La figure (I13) illustre l'effet du courant AC [42].

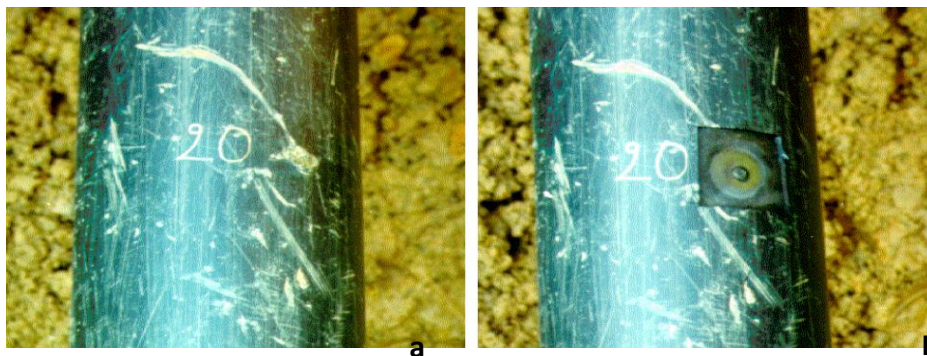


Figure I.13. Effets des courants alternatifs : a) avant nettoyage, b) après nettoyage.

I.5.3.3. Courants continus

Les flux instables de courants continus menacent les structures métalliques enterrées dans le domaine d'influence du système de traction électrifiée. Les courants de retour entre l'automotrice et le redresseur d'alimentation provoquent une chute de tension longitudinale dans les rails [43]. Une partie du courant de retour circule de la terre au redresseur d'alimentation en tant que courant vagabond lorsque le sol est placé en parallèle avec les rails. Si le courant vagabond croise des structures métalliques enterrées sur son parcours, il a la capacité de les traverser et de ressortir à proximité du redresseur d'alimentation. La réaction partielle cathodique à lieu à

l'endroit où le courant vagabond pénètre, tandis que la réaction partielle anodique se produit à la sortie, conduisant ainsi à la corrosion par dissolution du métal. [44].

Ce type de corrosion, connu sous le nom de corrosion par courants vagabonds, est le sujet de notre étude actuelle. La figure (I.14) schématise le processus de ce phénomène.

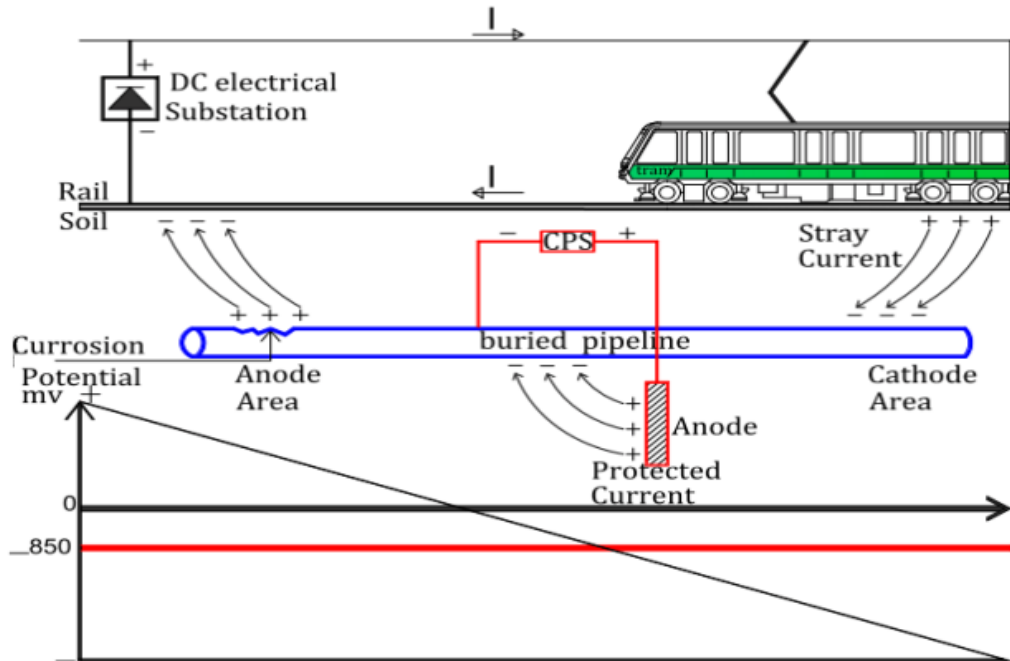


Figure I.14. Processus de la corrosion par courant continu.

I.6. Facteurs déterminants dans la corrosion des matériaux

Généralement, le taux de corrosion est influencé par une combinaison complexe de facteurs liés à la nature du matériau, à son environnement et aux interactions électrochimiques qui se produisent, tel que la température, la résistivité, l'acidité et le pH.

La vitesse de corrosion, également appelée taux de corrosion, désigne la mesure de la rapidité à laquelle un matériau métallique subit un processus de corrosion. Elle peut être exprimée sous diverses formes, qui dépendent principalement des conditions dans lesquelles la corrosion se produit et de la nature du système à étudier [45].

Généralement, on distingue les trois principales formes suivantes

1. Perte du métal ou Vitesse de corrosion linéaire : elle est exprimée en mm/an ou en mg/dm²/jour qui correspond à la masse de métal perdue par unité de temps. Cette expression est souvent utilisée pour les structures immergées dans la mer (OFFSHORE).
2. Densité du courant ou taux de corrosion électrochimique : il est exprimé en mA/cm² ou en μA/cm², Ce terme est utilisé pour décrire les métaux qui sont soumis à des réactions électrochimiques en présence d'un électrolyte [45].
3. Coefficient de corrosion, qui signifie la Perte d'épaisseur, il est exprimé en mm/an ou en g/m²/an et représente la quantité de métal corrodé dans un intervalle du temps et sur une superficie bien déterminée. Cette expression est fréquemment utilisée pour décrire les métaux qui sont exposés à l'air libre ou à l'atmosphère [46].

L'amplitude de la vitesse de corrosion est détaillée dans le tableau suivant.

Tableau I.6 : Comportement du métal en fonction du taux de corrosion [47].

Vitesse de corrosion en mm/an	Comportement du métal	Exemple du métal
< 0	Très résistant	Acier, Titane
[0.05- 0.1]	Résistant	Aluminium, Laiton
[0.1- 1.0]	Modérément résistant	Cuivre
>1.0	Moins résistant	Fer, Zinc
>10	Non résistant	Plomb, Magnésium

La diversité des expressions de la vitesse de corrosion contribue à une compréhension plus approfondie des mécanismes de corrosion et facilite l'évaluation des coûts liés à ce phénomène. Cette évaluation préalable permet de planifier les réparations ou le remplacement des matériaux endommagés.

Dans de nombreux secteurs, tels que la construction, l'industrie pétrolière et gazière, la corrosion des métaux enterrés pose un problème majeur. La vitesse à laquelle les métaux enfouis se corrodent est principalement influencée par divers facteurs tels que la composition chimique du sol, le taux d'humidité, le pH, l'activité microbologique, la conductivité électrique, le drainage du sol et la température. Pour réduire les risques de corrosion et prolonger la durée de vie des infrastructures, il est essentiel de comprendre et de prendre en compte ces facteurs lors de la conception et de l'installation de structures enterrées [48].

I.6.1. Résistivité du sol

C'est un facteur important qui peut affecter la corrosion des métaux enterrés. La résistivité est une mesure de la capacité du sol à résister au passage du courant électrique. Une faible résistivité du sol, généralement inférieure à 100 Ω .m, peut indiquer la présence d'humidité, de sels dissous ou d'autres contaminants conducteurs dans le sol, ce qui peut augmenter la vitesse à laquelle les métaux enterrés se corrodent. Une résistivité élevée, qui est généralement supérieure à 10 000 Ω .m, indique généralement un sol sec ou résistant à l'humidité, ce qui peut réduire la corrosion [49].

Une relation entre le taux d'agressivité du sol et sa résistivité est présentée dans le tableau (I.7).

Tableau I.7 : Degré d'agressivité du sol en fonction de la résistivité [50].

Résistivité du sol en Ω .m	Agressivité
$\rho > 100$	Très faible
$50 < \rho < 100$	Faible
$20 < \rho < 50$	Moyenne
$5 < \rho < 20$	Elevée
$\rho < 5$	Très élevée

I.6.2. Potentiel redox

Le potentiel redox, également appelé potentiel d'oxydo-réduction, mesure la tendance d'une espèce chimique à gagner ou à perdre des électrons. Les volts servent d'unité de mesure pour représenter la force électromotrice observée lors d'une réaction d'oxydoréduction entre deux espèces. Ce potentiel reflète les différences entre les potentiels d'oxydation et de réduction des deux espèces impliquées dans la réaction. Plus cette différence est importante, plus la probabilité que la réaction se produise spontanément diminue [51].

I.6.3. Le pH du Sol (potentiel d'hydrogène)

Le pH du sol mesure son degré d'acidité ou d'alcalinité, et il est évalué sur une échelle de 0 à 14, où 7 est considéré comme neutre. Un pH inférieur à 7 indique un sol acide, tandis qu'un pH supérieur à 7 indique un sol basique (ou alcalin). Le pH du sol peut également avoir un impact sur la corrosion des métaux enfouis. Un sol acide peut accélérer la corrosion des métaux, car il favorise la formation d'ions qui amplifient les réactions chimiques de corrosion. À l'inverse, un sol basique peut réduire la vitesse de corrosion des métaux en aidant à neutraliser les ions corrosifs [52].

Le pH du sol peut être ajusté en utilisant des amendements tels que la chaux (pour augmenter le pH) ou le soufre (pour le réduire). Maintenir un pH adéquat dans le sol est essentiel pour minimiser la corrosion des métaux enfouis. Il est possible de mesurer le pH du sol pour évaluer son degré d'acidité ou d'alcalinité, puis prendre les mesures appropriées pour protéger les métaux enfouis. Le tableau (I.8) définit la relation entre le taux de corrosion et les caractéristiques du sol, y compris les valeurs du pH [53,54].

Tableau I.8 : Relation entre le pH et les caractéristiques du sol [55].

Caractéristique du sol	Valeur du pH	Taux de la corrosion
Excrément acide	pH < 4.5	Très forte corrosion
Acide très fort	4.5 < pH < 5.0	
Acide fort	5.1 < pH < 5.5	
Acide moyen	5.6 < pH < 6.0	
Acide faible	6.1 < pH < 6.4	
Considéré neutre	6.5 < pH < 7.2	
Alcalinité moyenne	7.3 < pH < 7.7	Corrosion faible
Modérément alcalin	7.8 < pH < 8.3	
Forte alcalinité	8.4 < pH < 9.0	
Très forte alcalinité	pH > 9.0	Corrosion très élevée

I.6.4. Sulfate dans le sol

Les sulfates du sol proviennent de processus naturels tels que la décomposition des matières organiques et l'érosion des roches riches en soufre. Ils jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement des plantes en nutriments tels que le soufre et le calcium. Cependant, un excès de sulfates peut avoir des effets négatifs. Ils peuvent contribuer à l'acidification du sol, à la perturbation de la salinité et à la dégradation du sol, notamment la formation de croûtes

superficielles. De plus, les sulfates peuvent interagir avec les métaux lourds du sol, car les sulfates peuvent accélérer la corrosion des métaux, en particulier ceux à base de fer et d'acier, en favorisant la formation de produits de corrosion tels que la rouille [56].

I.6.5. Présence d'humidité dans le sol

La quantité d'eau retenue par le sol a un impact significatif sur sa corrosivité, et les variations du taux d'humidité au fil du temps peuvent également influencer la corrosion. Par exemple, dans une région aride, un sol principalement composé de sable peut avoir une corrosivité limitée. L'humidité du sol compte parmi les facteurs les plus cruciaux affectant la corrosion, car elle sert de milieu à la réaction électrochimique à l'origine de la corrosion. L'eau et le métal réagissent avec l'oxygène pour former des ions métalliques et des ions hydroxyde, entraînant ainsi la corrosion [57].

I.6.6. Effet de la température

La température peut avoir un effet significatif sur les processus de corrosion, qui est la détérioration d'un matériau par réaction avec son environnement. La vitesse de la corrosion se manifeste positivement avec la température. Cela est dû à des températures élevées qui accélèrent les réactions chimiques impliquées dans la corrosion. La température peut influencer la vitesse de réaction et la stabilité de la couche de passivation, qui a généralement pour rôle de protéger le métal contre la corrosion [58,59].

I.6.7. Présence des chlorures

La corrosivité du sol peut être affectée par la présence de chlorures dans le sol, en particulier dans les sols utilisés dans des applications de construction, de génie civil ou d'infrastructures. Lorsque les chlorures sont présents dans le sol, ils peuvent accélérer la corrosion des métaux, en particulier de l'acier, car ils proviennent fréquemment de sels tels que le chlorure de sodium. La présence de chlorures intensifie la corrosion des métaux en facilitant la génération d'ions conducteurs et en initiant des réactions de corrosion galvanique [60].

Le tableau (I.9) présente une proposition de classification de la corrosivité basée sur la concentration de chlorures, établie à partir de l'expérience sur le terrain. Cette classification vise à évaluer les niveaux de corrosivité potentiels en fonction de la teneur en chlorure dans un environnement donné [61,62]. Il est noté que l'effet du chlorure sur la corrosivité du sol est significatif car les chlorures sont parmi les agents corrosifs les plus courants dans les environnements souterrains.

Tableau I.9 : Effets du chlorure sur la corrosivité du sol.

Concentration en chlorure (ppm)	Corrosivité de sol
> 10000	Sévère
De 1500 à 10000	Importante
De 150 à 1500	Moyenne
<150	Négligeable

I.7. Protection contre la corrosion : stratégies et solutions innovantes

La maîtrise de la corrosion vise à prévenir la dégradation des métaux, préservant ainsi la durabilité des infrastructures et la sécurité. Des stratégies telles que les revêtements protecteurs, les alliages résistants à la corrosion et la maintenance préventive sont utilisées pour lutter contre ce phénomène et prolonger la vie utile des équipements et des structures. Les figures (I.15) et (I.16) résument les méthodes de base pour maîtriser la corrosion.

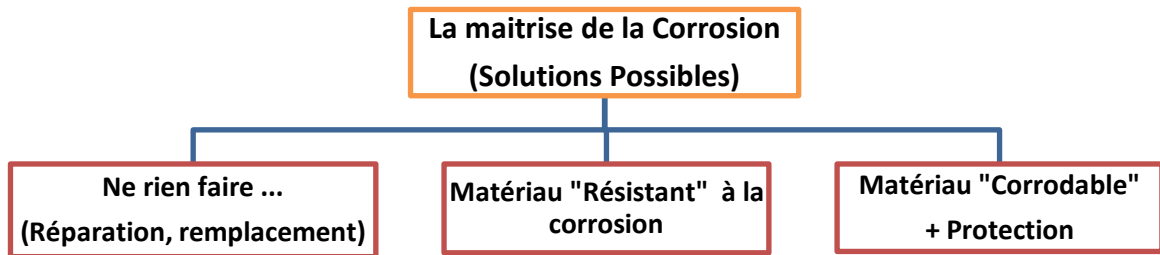


Figure I.15. La maîtrise de la corrosion (solutions possibles).

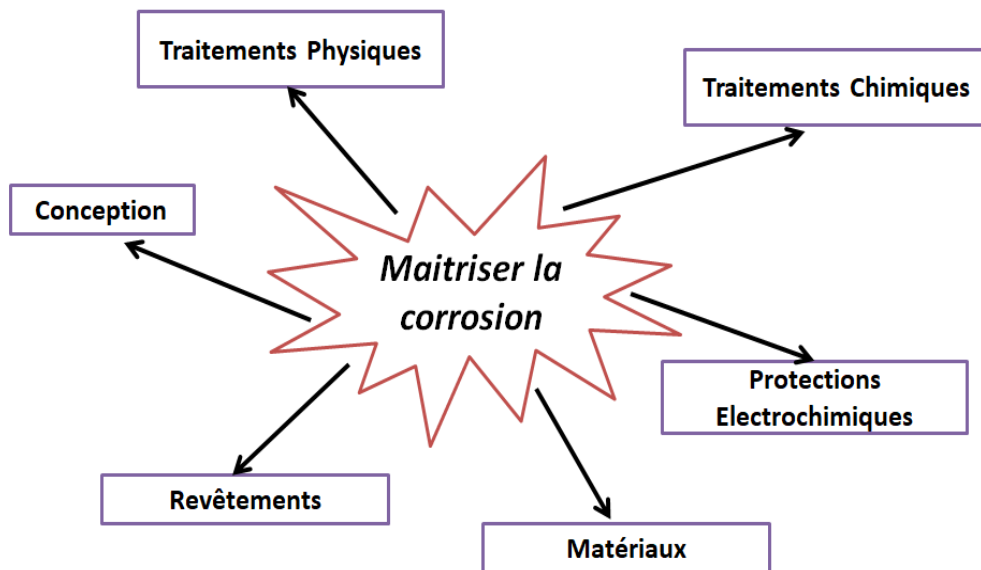


Figure I.16. Méthodes de base pour maîtriser la corrosion.

Il existe une variété de méthodes pour éviter la corrosion, lors de la phase de conception d'un projet, on cherche les meilleures solutions technologiques et économiques, ainsi que la conception technologique et le choix du matériau. Il existe diverses méthodes de protection, mais généralement, la combinaison de plusieurs méthodes est primordiale choisie en prenant en considération la nature du matériau, les facteurs environnementaux et économiques [63].

Il existe plusieurs méthodes pour lutter contre le phénomène de la corrosion. Dans cette section, la protection contre la corrosion est présentée à travers diverses techniques, regroupées en deux catégories principales : la protection passive et la protection active. La figure (I.17) propose un organigramme détaillé des différentes formes de lutte contre la corrosion [64].

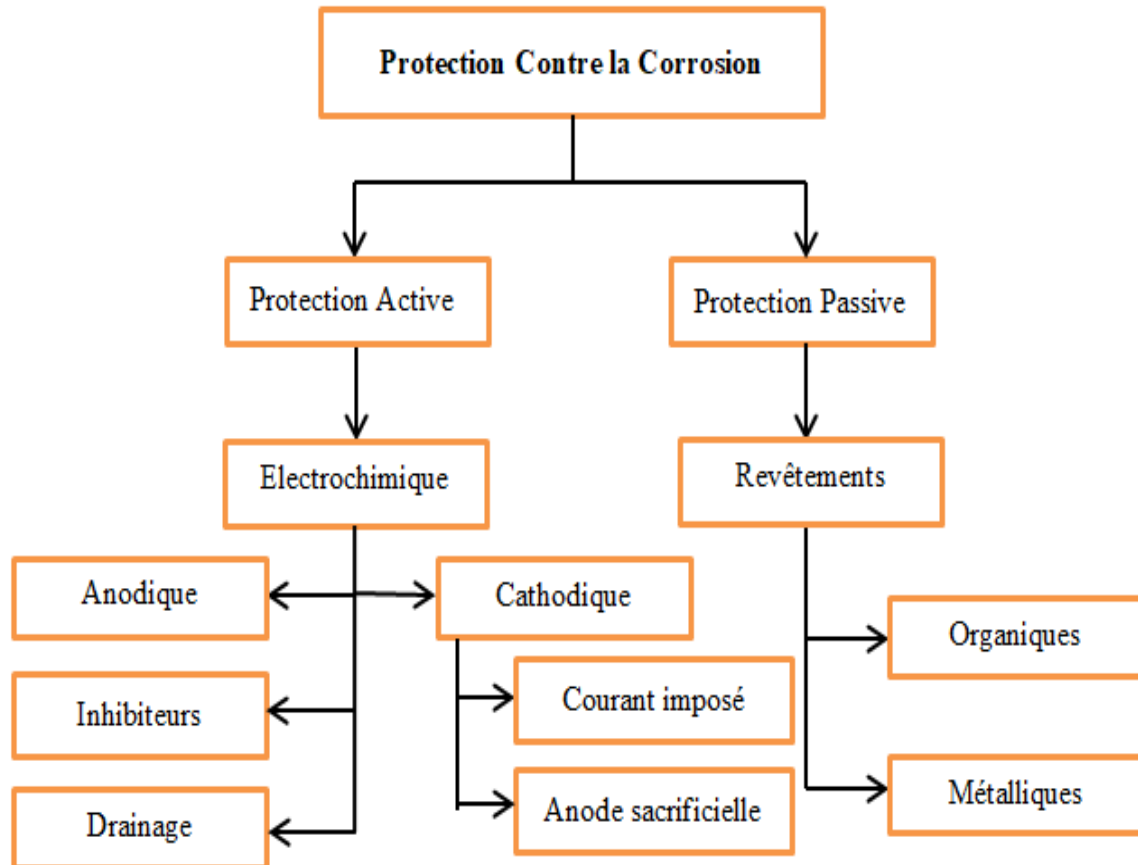


Figure I.17. Moyens de lutte contre la corrosion.

I.8. La protection passive

La protection passive implique l'isolation des structures métalliques par rapport au sol (l'électrolyte) en utilisant des revêtements appropriés. Cette méthode vise à interrompre la circulation des électrons en interposant un film protecteur capable d'isoler efficacement la structure du milieu environnant. Le revêtement doit être parfaitement étanche à l'humidité et aux courants électriques [64].

Il existe divers types de revêtements, et leur sélection dépendra de considérations économiques, industrielles, de la durée d'utilisation de la structure et du budget disponible. Les choix de revêtements peuvent également être guidés par des critères tels que la résistance à la corrosion, l'adhérence, la densité, la flexibilité, la résistance au feu, l'apparence et la durabilité.

I.8.1. Protection par revêtements organiques

I.8.1.1. Revêtement de type C

Aussi connu sous le nom de revêtement à base de liant hydrocarboné, il est principalement constitué de bitume, une substance visqueuse et collante dérivée du pétrole brut. Pour obtenir un revêtement durable et imperméable, le principe consiste à chauffer le bitume et à le mélanger avec d'autres matériaux. Ces revêtements sont largement utilisés dans les applications de revêtement extérieur en raison de leur excellente résistance aux intempéries, à l'abrasion et aux produits chimiques. La figure (I.18) illustre la réparation d'une canalisation de gaz endommagée par des tiers à Skikda [65].



Figure I.18. Revêtement type C à chaud (Photo réelle à Skikda).

I.8.1.2. Revêtement par bande adhésive

Le procédé d'installation de revêtements à l'aide de bandes adhésives est généralement utilisé sur les matériaux nobles tels que le cuivre pour protéger contre le milieu environnant. (Figure I.19).



Figure I.19. Revêtements par bande adhésive).

I.8.1.3. Revêtement en PE extrudé

L'utilisation de revêtements en polyéthylène (PE) extrudé sur les pipelines est une pratique courante dans l'industrie pétrolière et gazière, ainsi que dans d'autres secteurs où des canalisations métalliques sont employées pour le transport d'hydrocarbures. Ce type de revêtement offre des avantages importants pour la protection pipelines, car il offre une grande résistance chimique et mécanique, (Figure I.20) [65].

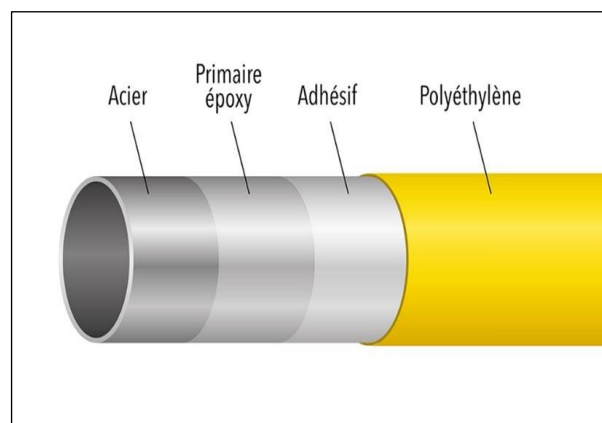


Figure I.20. Revêtements PE tri couches.

I.8.2. Protection par revêtements métalliques

Le revêtement métallique consiste à appliquer une couche de métal sur une surface à l'aide de diverses techniques, telle que la galvanoplastie. Ce revêtement peut être utilisé pour améliorer l'apparence, protéger la surface contre la corrosion, renforcer l'objet et augmenter sa résistance thermique [65].

L'utilisation de revêtements métalliques comme méthode de protection est également utilisée dans divers domaines industriels, y compris l'industrie pétrolière et gazière, la construction, la fabrication et plus encore. Ce type de protection agit comme une barrière physique entre le matériau du substrat et l'environnement extérieur, protégeant ainsi contre la corrosion.

On peut distinguer deux types de revêtements sous le revêtement métallique ;

I.8.2.1. Le revêtement anodique

Également connu sous le nom d'anodisation, ce processus électrochimique produit une couche d'oxyde à la surface d'un métal, généralement de l'aluminium. Pour ce faire, la pièce métallique est immergée dans une solution électrolytique, à laquelle est appliqué un courant électrique. Ce type de traitement permet la formation d'une couche d'oxyde protectrice qui améliore la résistance à la corrosion. En général, ce revêtement est réalisé en utilisant un matériau moins noble que le métal qu'il protège [66].

I.8.2.2. Le revêtement cathodique

C'est une méthode de revêtement électrochimique dans lequel un courant électrique est utilisé pour déposer un matériau métallique sur la surface d'une pièce à protéger. En général, ce processus nécessite l'utilisation d'une électrode (la cathode) et d'une solution électrolytique contenant des ions métalliques. Ces derniers se déplacent vers la pièce lorsque le courant électrique traverse la solution et se déposent sur sa surface, formant un revêtement protecteur ou décoratif. Ce procédé trouve fréquemment son application dans l'industrie automobile, le secteur de l'ameublement, ainsi que d'autres domaines nécessitant à la fois une protection contre la corrosion et une amélioration sur le plan esthétique. Il est employé pour déposer des revêtements métalliques comme le chrome et le nickel [67].

I.9. La Protection active (électrochimique)

La protection cathodique a vu le jour au début du 19^e siècle. Elle constitue une méthode employée pour préserver les métaux de la corrosion grâce à des réactions électrochimiques. Cette approche implique la création d'une différence de potentiel électrique entre le métal à protéger et un matériau de protection (généralement appelé "déversoir") qui est généralement plus actif sur le plan électrochimique. Cette différence de potentiel a pour effet de diriger l'activité corrosive vers le matériau de protection plutôt que vers le métal à protéger [68].

La protection cathodique repose sur l'inversion du principe de l'électrochimie en favorisant la polarisation d'une structure de manière à atteindre un potentiel électrique d'environ -850 mV, tout en acceptant la dégradation d'une autre structure (le déversoir anodique, tel qu'un rail ou une anode). En résumé, la protection cathodique consiste à faire du métal à protéger la "cathode" d'un circuit électrochimique dans le but de prévenir la corrosion.

I.9.1. Protection par inhibiteurs

Les inhibiteurs sont des substances qui ralentissent l'activité corrosive ou bloquent une réaction chimique ou biologique. Ils sont largement utilisés pour contrôler ou réguler des processus spécifiques dans divers domaines, tels que le secteur médical, la recherche scientifique et l'industrie [69]. Le tableau (I.10) représente la classification des inhibiteurs en plusieurs façons.

Tableau I.10 : Classification des inhibiteurs.

Classification des inhibiteurs		
Environnement	Réaction chimique	Mécanisme
Acidité	Anodique	Adsorption
Neutre	Cathodique	Passivation
Peinture	Mixte	Précipitation

I.9.2. Protection anodique

La protection anodique représente une méthode destinée à prévenir la corrosion des métaux, en particulier des métaux tels que l'aluminium et le magnésium. Cette technique est fréquemment employée dans diverses applications industrielles, notamment dans les secteurs des pipelines, des réservoirs de stockage et d'autres environnements où la corrosion pose un problème majeur.

Un exemple concret de protection anodique est l'anodisation de l'aluminium, qui consiste à former une couche d'oxyde d'aluminium robuste et protectrice à la surface de ce métal. Cette couche d'oxyde non seulement offre une résistance à la corrosion, mais elle peut également être teinte à des fins esthétiques [69].

I.10. Protection cathodique

Comme le concept de "protection cathodique" occupe une place centrale au sein du thème abordé par cette thèse, l'auteur a choisi d'analyser spécifiquement le domaine de la protection cathodique dans une section distincte. Il a été observé que la protection contre la corrosion des structures enterrées peut être assurée grâce à la méthode de protection cathodique, une approche active qui cible directement le processus de corrosion [70]. Toutefois, il est important de noter que, quelle que soit la méthode de protection utilisée, elle ne peut pas être parfaitement efficace en raison de contraintes techniques ou de modifications structurelles au fil du temps. Pour que la protection cathodique soit efficace, il est nécessaire de maintenir le potentiel de la structure en dessous d'un seuil défini dans toutes ses parties. Cependant, cette exigence est difficile à remplir, en particulier pour les ouvrages de gaz, en raison de la difficulté d'accès pour effectuer des mesures électriques [71].

Ainsi, une approche pragmatique pour prévenir la corrosion au sein de structures enterrées implique l'adoption simultanée des deux méthodes de protection précédemment exposées. Dans ce contexte, les infrastructures en question seront isolées du sol grâce à des revêtements de protection, visant à minimiser autant que possible les zones de métal nu exposées au sol. La stratégie de protection cathodique s'ajoutera en complément à cette mesure passive, apportant

une efficacité accrue étant donné son intervention désormais limitée à des surfaces réduites de contact métallique avec le sol [72].

L'idée de cette protection est inspirée par le diagramme de Pourbaix. Il est aussi appelé diagramme potentiel/pH. C'est un outil graphique utilisé pour visualiser les conditions de stabilité de diverses espèces chimiques en fonction du potentiel électrochimique (tension) et du pH d'une solution. Le diagramme de Pourbaix permet de distinguer trois phases clés : la corrosion, la passivation et l'immunité (figure I.21).

- La phase de corrosion : le métal est instable et tend à se dissoudre sous forme d'ions métalliques dans l'électrolyte. Cette zone correspond généralement à des conditions où le potentiel et le pH favorisent la dissolution du métal. La corrosion peut être sous forme de corrosion uniforme ou de corrosion localisée, comme la corrosion par piqûres.
- La phase de passivation : représente les conditions où une couche protectrice stable d'oxydes ou d'hydroxydes se forme à la surface du métal. Cette couche agit comme une barrière contre la corrosion en empêchant la dissolution du métal. La passivation est observée lorsque le potentiel et le pH favorisent la formation de cette couche protectrice, ce qui conduit à une réduction significative de la vitesse de corrosion [73].
- La phase d'immunité : le matériau est stable et résiste à la corrosion. Cette zone correspond aux conditions où le potentiel et le pH empêchent la corrosion et la formation de produits de corrosion indésirables. Les matériaux dans cette région sont généralement considérés comme résistants à la corrosion dans des conditions environnementales spécifiques.

En résumé, le diagramme de Pourbaix offre une représentation visuelle des conditions dans lesquelles le métal est sujet à la corrosion, où il peut former une couche protectrice et où il est immunisé contre la corrosion. Cela permet de prendre des décisions éclairées concernant les méthodes de protection et de prévention de la corrosion à appliquer [74].

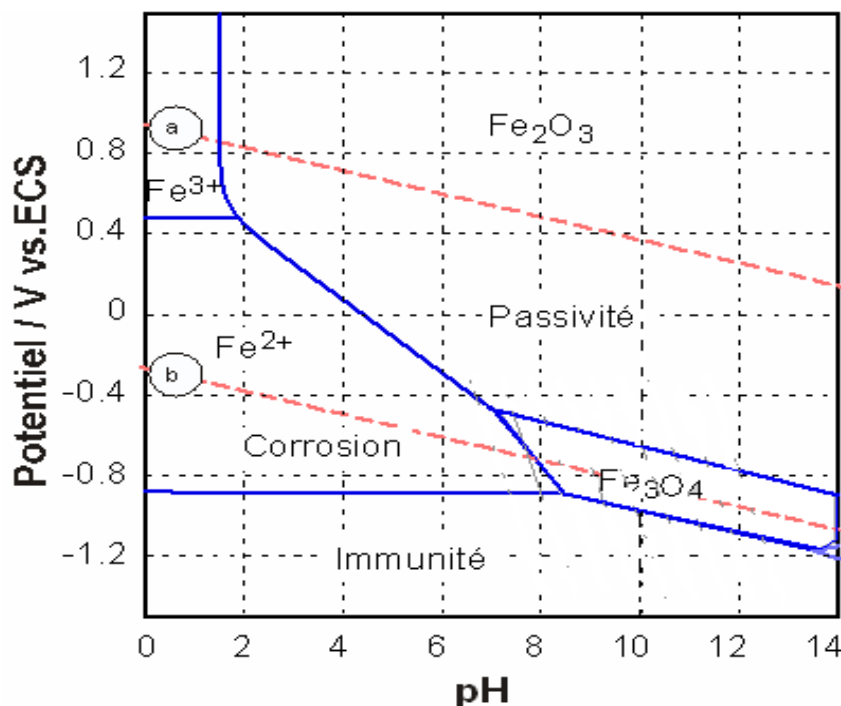


Figure I.21. Diagramme de Pourbaix pour le fer.

Donc, le principe est de mettre le potentiel au-dessous de -850 mV par rapport l'électrode de référence Cu/CuSO₄.

La figure (I.22) décrit un schéma électrique équivalent simplifié d'une cellule de corrosion et un système de protection cathodique [75].

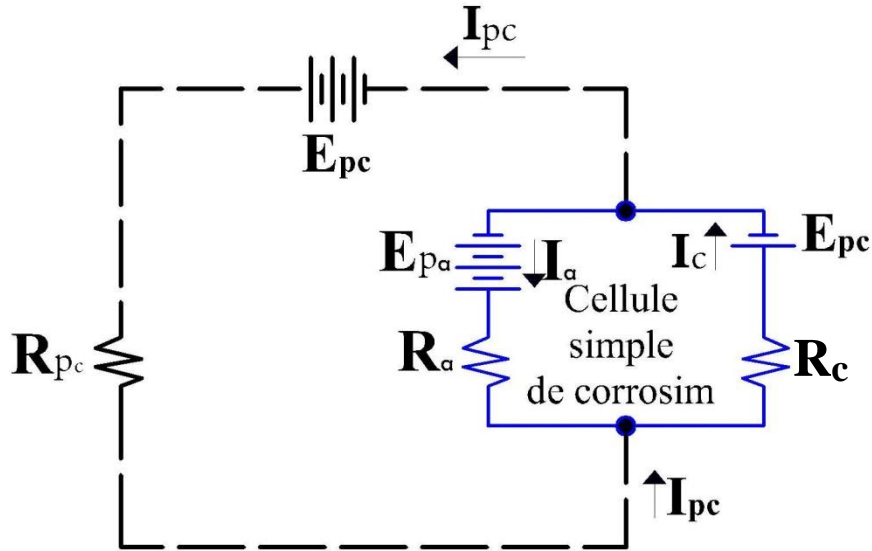


Figure I.22. Circuit électrique équivalent d'une cellule de corrosion.

Le courant de corrosion I_{cor} qui traverse le circuit équivalent (cellule simple de corrosion) est présenté par l'équation (I.4) :

$$I_{corr} = (E_{pa} - E_{pc}) / (R_a + R_c) \tag{Eq (I.4)}$$

Avec

$$I_a = I_{corr} \tag{Eq (I.5)}$$

Quand le courant du système de la protection cathodique rejoint le circuit, les courants I_a et I_c ne sont plus valable (équation I.5). D'après la loi de nœuds, le courant cathodique I_c est presque équivalent de la somme ($I_{ca} + I_{pc}$) injecté par le système de protection cathodique, comme mentionné dans l'équation (I.6).

$$I_c = I_a + I_{pc} \tag{Eq (I.6)}$$

D'après l'équation (I.6), un abaissement de la vitesse de corrosion observé après l'injection du courant I_{pc} dans le sol ce que réduit le courant de corrosion I_{corr} , jusqu'à son élimination totale. En d'autre façon, lorsque le courant I_{pc} augmente, la différence de potentiel ($E_{pa} - E_{pc}$) tend vers zéro.

I.10.1. Critères de la protection cathodique

Selon les normes appliquées en vigueur pour les canalisations en acier enterrées ou immergées, les critères de la PC doit respecter les règles suivantes :

- Pour garantir la protection adéquate de la structure, il est impératif que le potentiel de protection ne soit pas inférieur à 850 mV en termes absolus, mesuré lors de l'évaluation de la protection cathodique sur la structure en acier. De plus, il est nécessaire que ce potentiel atteigne une valeur de -850 mV par rapport à l'électrode Cu/CuSO₄. Cette valeur représente généralement le critère fondamental pour valider le niveau de protection cathodique requis.
- Il est essentiel que l'électrode de référence et le témoin métallique soient positionnés à proximité de la structure afin de minimiser la perte ohmique lors de la mesure du potentiel.

Une variation de polarisation de 100 mV lors des essais ON/OFF, peut aussi être considérée comme un indicateur de protection adéquate pour une structure métallique sous la protection cathodique, ou avec une défaillance du revêtement, lorsque l'atteinte du seuil de -850 mV n'est pas possible [76].

I.10.1.1. Densité du courant

Pour atteindre la valeur du potentiel relative à la limite de la protection, il est nécessaire que l'intégralité de la surface du métal soit traversée par un flux électrique, désigné sous le nom de densité de courant, exprimée en (mA/m²) [77]. Ce scénario est illustré dans la figure (I.23). En conditions de corrosion non contrôlée, la structure est exposée à un potentiel de corrosion mixte, noté E, et subit une détérioration à une vitesse proportionnelle à I_{corr} . Lorsqu'un système de protection cathodique entre en jeu, le potentiel décroît jusqu'à atteindre E_1 sous l'effet du courant I_1 appliqué de manière externe. À ce stade, la structure bénéficie d'une protection partielle, entraînant une réduction de la vitesse de corrosion qui devient I'_{corr} . Si l'on augmente le courant externe à I_2 , provoquant ainsi l'abaissement du potentiel jusqu'à la valeur E_2 qui correspond au potentiel de la réaction anodique, la corrosion est alors interrompue. La densité du courant est exprimée par l'équation suivante (I.7) [48].

$$J = I/S \quad \text{Eq (I.7)}$$

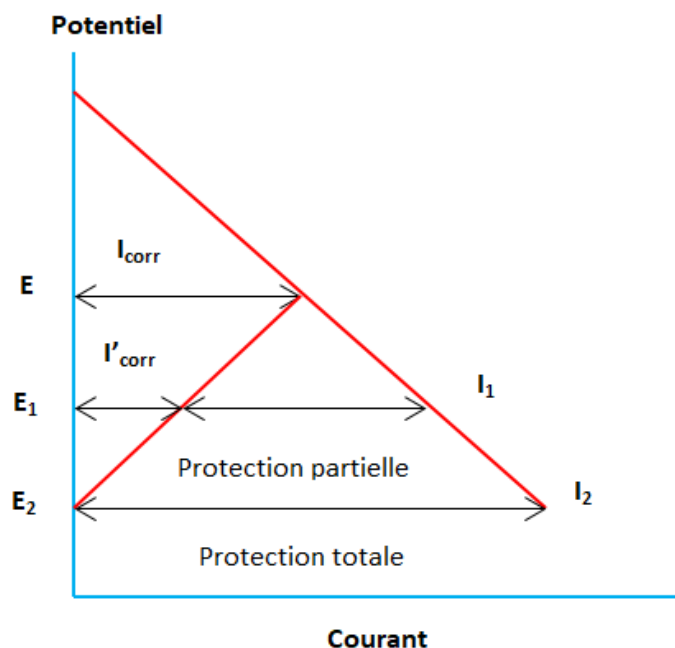


Figure I.23. Processus pour limiter la corrosion.

Le tableau (I.11) présente les valeurs de densité de courant dans différents types de sols pour le dimensionnement d'un système de protection cathodique.

Tableau I.11 : Valeurs de la densité du courant dans les différents sols [48].

Densité (mA / m ²)	Acier/électrolyte
0,7	Acier nu dans le ciment,
05	Acier nu dans un sol anaérobie sans bactérie,
35	Acier nu dans un sol aéré,
60	Acier nu dans l'eau douce agitée,
100	Acier nu dans l'eau de mer calme,
400	Acier nu au milieu anaérobie avec bactéries réductrices.

1.10.1.2. Vérification du critère de polarisation de 100 mV

La qualité de la protection dépend du niveau de potentiel atteint à la surface du métal soumis à la protection. Le paramètre de polarisation est influencé par la magnitude du potentiel résultant, qui est utilisé pour évaluer l'efficacité de la protection. La valeur du potentiel de -850 mV est le critère d'efficacité du système de la PC.

D'autres critères peuvent parfois être pris en considération, mais le plus couramment utilisé stipule que la protection est jugée suffisamment efficace lorsque le potentiel de la structure protégée est inférieur de plus de 100 mV par rapport au potentiel de corrosion. Cette condition est vérifiée au moyen de mesures en mode ON/OFF, où l'élévation du potentiel doit être supérieure à 100 mV. Ce paramètre est l'un de ceux recommandés par les normes telles que l'ISO 15589-1 ou le NACE SP01-69. La méthode est expliquée à l'aide d'une représentation visuelle dans la figure (I.24). Cette réduction du potentiel de plus de 100 mV à partir du potentiel OFF initial est effectuée pendant une durée maximale de 24 heures [78].

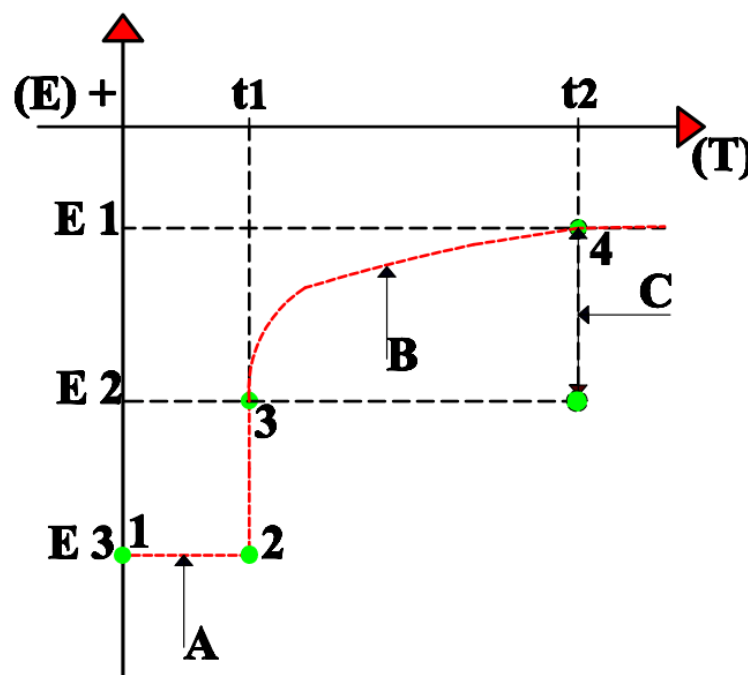


Figure I.24. Critère de polarisation.

Le processus de dépolarisation est décrit dans le tableau (I.12)

Tableau I.12 : Description de processus du critère de 100 mV.

E_N	Potentiel de corrosion naturelle
E_{OFF}	PC coupée (coupon métallique déconnecté)
E_{ON}	PC établi (coupon métallique connecté)
t_1	Coupure de la PC
T_2	Temps limite de mesurer la variation du potentiel
A	Application de la PC
C	Seuil de dépolarisation
2-3	Chute ohmique

I.10.2. Protection par anodes sacrificielles (galvaniques)

Le concept repose sur la modification du potentiel de la structure à préserver en utilisant des anodes placées dans le même électrolyte. L'idée est d'utiliser une anode constituée d'un métal moins noble que celui de la structure à protéger, conformément à l'échelle de Nernst ou à une méthode similaire. Lorsque ce métal (moins noble) est relié à la structure à protéger par un câble électrique, son potentiel a tendance à augmenter (réaction anodique), tandis que le potentiel du métal à protéger a tendance à diminuer (réaction cathodique). Par conséquent, la vitesse de corrosion diminue en raison de la création d'une pile électrochimique. Cette démarche est expliquée de manière visuelle dans la figure (I.25) [79].

Les anodes sacrificielles sont fabriquées à partir de matériaux dont les potentiels sont plus élevés que ceux du métal à protéger (en valeur absolue), tels que le magnésium, le zinc ou l'aluminium. Elles sont parfois appelées anodes galvaniques ou consommables. Il est essentiel que les anodes utilisées dans la protection cathodique soient constituées d'alliages spécifiques qui ont fait l'objet d'une qualification à long terme, dans le but de vérifier et d'analyser leurs propriétés électrochimiques [79].

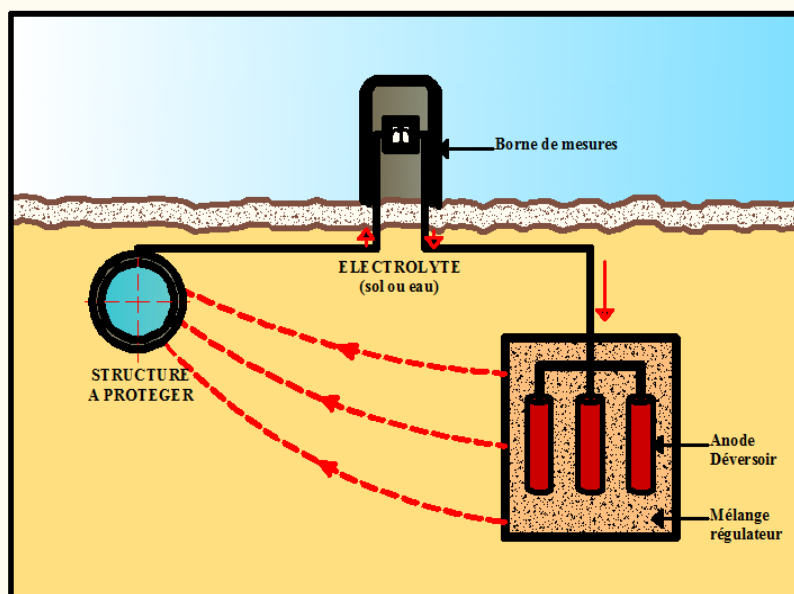


Figure I.25. Protection par anode sacrificielle.

Un exemple concret illustrant le principe de l'installation d'une anode, réalisée en 2017 pour protéger un tronçon d'un réseau de distribution de gaz en acier dans la wilaya de Skikda (Algérie), est présenté à travers les photographies de la figure (I.26).



Figure I.26. Principe de pose d'une anode sacrificielle (Skikda 2017).

La conformité à la norme NF EN 12496, qui définit les critères de qualité, les compositions et les propriétés électrochimiques, est une exigence essentielle pour les anodes galvaniques. Le flux des systèmes utilisant des anodes galvaniques est intrinsèquement affecté par la résistance du circuit. En cas de surpolarisation du circuit, une option envisageable consiste à réguler le flux en introduisant une résistance électrique, ajustable selon les besoins.

Il existe une variété de types d'anodes, chacune ayant ses caractéristiques distinctes et des applications spécifiques. En ce qui concerne la protection de l'acier, des anodes composées de zinc, d'aluminium ou de magnésium sont couramment utilisées. Des recherches approfondies et l'expérience pratique ont permis d'établir des critères stricts concernant les niveaux tolérables d'impuretés pour chacun de ces métaux, ainsi que les éléments d'alliage supplémentaires nécessaires pour optimiser leur performance. Actuellement, le marché propose une gamme étendue d'alliages spécialement conçus pour la protection cathodique, offrant ainsi des solutions adaptées aux besoins variés de cette technologie [80]. Pour un résumé synthétique des principales caractéristiques des anodes les plus couramment utilisées, le tableau (I.13) récapitule ces informations.

Tableau I.13 : Comparaison entre les différents types d'anodes galvaniques [80].

Nature d'anode	Zinc	Aluminium	Magnésium
Potentiel (V)	-1.10	-1.05	-1.55
Capacité (Ah/Kg)	740	2600	1100
Consommation (Kg/A.an)	11.9	3.4	7.9
Rendement (%)	90	87	55
Application	- canalisations de petites longueur - pipeline - Réservoirs	- Plates-formes offshore - Conduites offshore chaudes	- Conduites enterrées de faible longueur - Conduites offshore sur plusieurs Km - silos de stockage
Avantages	- Adapter en eau et mer - Rendement parfait	- Coût plus faible - Grande capacité - Potentiel adapté pour structures en eau - possible d'utiliser dans les citernes - Reste active aux températures élevées	Potentiel élevé Forte polarisation Faible poids
Inconvénients	- Faible potentiel -Température limitée à 60 °C - Poids élevé	- Moins adaptée dans les milieux faiblement renouvelés - Vulnérable aux salissures marines	- excès de consommation - Faible temps d'exploitation - Rendement faible

Il est important de noter que ce mode de protection est principalement adapté aux réseaux de courte distance ou très isolés, généralement de l'ordre de 2 à 3 kilomètres, pour lesquels l'intensité de la protection cathodique ne dépasse que quelques milliampères.

I.10.3. Protection par courant imposé

Le concept fondamental de la protection cathodique repose sur la modification des principes de l'électrochimie en faveur d'une polarisation cathodique pour le métal nécessitant une préservation, tout en acceptant la dégradation d'une autre structure. Le principe sous-jacent à cette méthode consiste à connecter la structure à protéger à la borne négative d'une source de courant continu, généralement un redresseur, tandis que la borne positive est reliée à un dispositif anodique enfoui à une certaine distance, connu sous le nom de déversoir anodique [81]. Le courant provenant de ce déversoir anodique traverse le sol, est intercepté par la structure nécessitant une protection, puis retourne au générateur en circulant à travers le métal de la conduite. En conséquence, la structure est rendue électriquement négative par rapport au sol. Cette approche vise à atteindre un niveau de potentiel spécifié dans l'ensemble de la structure. Cette méthode s'inspire du diagramme de Pourbaix et implique de réduire le potentiel naturel du métal à un niveau d'environ -850 mV, afin de le placer dans une plage où il est résistant à la corrosion. Les mécanismes de ce processus sont détaillés de manière illustrative dans la figure (I.27).

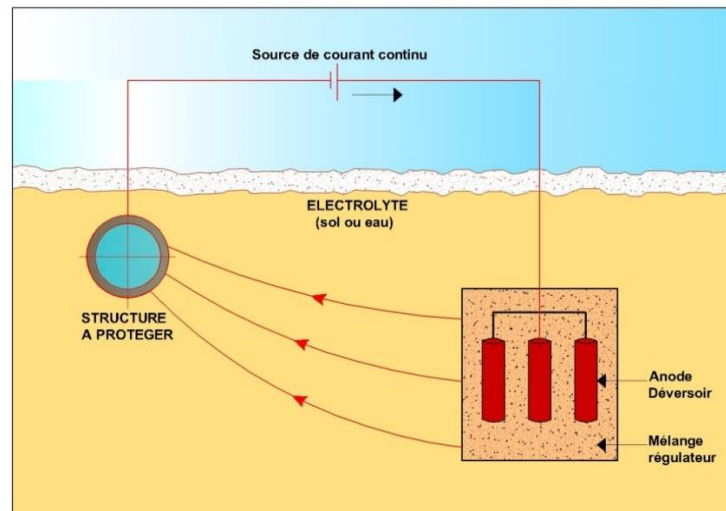


Figure I.27. Le principe de la protection par courant imposé.

I.10.3.1. Générateur du courant continu

Il s'agit d'un dispositif conçu pour fournir un courant continu stable en utilisant un redresseur de courant, dans le but de l'injecter de manière à favoriser le processus électrochimique. L'alimentation électrique peut provenir soit d'une source externe, telle qu'un réseau électrique à basse tension, soit de panneaux solaires, notamment dans des zones isolées. La figure (I.28) illustre un exemple de poste de soutirage de manière schématique [81].

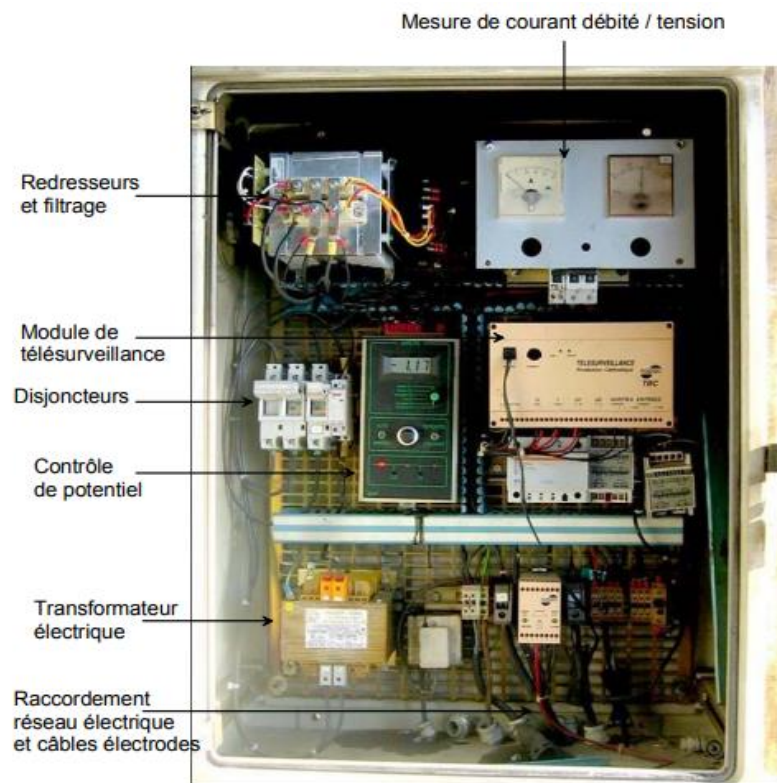


Figure I.28. Générateur redresseur avec module de télésurveillance.

I.10.3.2. Le déversoir

Le déversoir désigne la structure sacrificielle, fabriquée à partir de divers matériaux, dont le but est d'introduire le courant fourni par la source continue dans le sol. Par conséquent, il doit être fabriqué à partir de matériaux électriquement conducteurs. Son fonctionnement est similaire à celui d'une anode, subissant une réaction d'oxydation. Il est essentiel que la résistance de mise à la terre d'un déversoir soit minimale (généralement autour de quelques ohms), ajustée en fonction des besoins en courant, et déterminée lors de l'étude. La masse du déversoir doit également être soigneusement déterminée pour garantir la durée d'exploitation souhaitée. Par conséquent, sa résistance est généralement faible [79].

Le tableau (I.14) et la figure (I.29) représentent respectivement les caractéristiques des différents matériaux constituant le déversoir et des photos illustratives de celui-ci.

Tableau I.14 : Matériaux constituant le déversoir anodique.

	Graphite	Acier	Ferro-silicium	Magnétite
Forme	Rondins	Rail	Rondins	Cylindre creux
Taille/poids	7 cm de diamètre 1.5 M de longueur	50 kg/mètre	7 cm de diamètre 1.5 M de longueur	0.8 M de longueur
Consommation	1 kg/A.an	10 kg/A.an	0.5 kg/A.an	1.5 kg/A.an



Acier (Rail)



Graphite



Ferro-silicium



Magnétite

Figure I.29. Différents types des déversoirs.

I.10.3.3. Câbles de connexion

Les câbles de liaison des déversoirs anodiques sont des éléments essentiels pour assurer la connexion électrique entre les déversoirs et les sources d'alimentation. Ils sont fabriqués en matériaux conducteurs tels que le cuivre ou l'aluminium, ce qui permet un transfert efficace du courant. Souvent, ces câbles sont isolés avec du PVC pour éviter le court-circuit et la corrosion. La section transversale du câble détermine sa capacité de transport de courant et doit être correctement dimensionnée pour éviter les surchauffes dues à l'effet Joule, tandis que des techniques de raccordement appropriées garantissent des connexions solides. Pour lutter contre la corrosion, des revêtements spécifiques peuvent être appliqués. La planification précise de la longueur et de l'emplacement des câbles est essentielle pour minimiser les pertes de courant et assurer l'efficacité du système de protection cathodique, qui prévient la corrosion et protège les structures métalliques enterrées ou immergées [70,81].

I.10.3.4. Critères et normes pour le dimensionnement de la protection cathodique

Les critères et normes standards qui ont été utilisés pour déterminer la localisation et la taille du système de protection cathodique incluent :

- Les directives de la NACE (National Association of Corrosion Engineers).
- Les normes « *EN 12954* », qui englobent la protection cathodique des structures métalliques enterrées ou immergées.
- Les normes « *EN 13509* », qui définissent les méthodes de mesure applicables en protection cathodique.
- Les normes « *EN 12068* », qui abordent les revêtements organiques extérieurs destinés à la protection contre la corrosion des tubes en acier enterrés ou immergés, en conjonction avec la protection cathodique.
- Les recommandations de la norme « *NF A05-615* », relatives aux traitements des effets du courant continu sur les structures métalliques enterrées.

I.10.4. Drainage (présence des courants vagabonds)

Comme mentionné dans la section (I.4.3), la corrosion causée par un effet électrique se produit sur la conduite lorsqu'elle est exposée à des courants de fuite (ou courants parasites). Ces courants sont associés à l'activité ferroviaire et varient en intensité et en direction. Chaque point où le courant entre dans la structure correspond à des points où le courant sort dans le sol, provoquant ainsi des effets préjudiciables sur la structure par électrolyse. L'ampleur de ces effets peut varier en fonction du niveau de protection cathodique de la structure. Par conséquent, le risque de corrosion est lié au degré de polarisation de la structure [82].

La corrosion provoquée par les courants parasites est gérée grâce à la mise en place d'un dispositif de drainage (liaison polarisée). Cette liaison a pour rôle de guider les sorties de courant non contrôlées et de leur offrir un chemin privilégié vers la sous-station électrique (SST) ou vers le rail. Il est à noter que les courants drainés peuvent soit s'ajouter aux courants injectés lors du soutirage, soit être additionnés algébriquement au courant de protection. Le processus de drainage est illustré dans la figure (I.30).

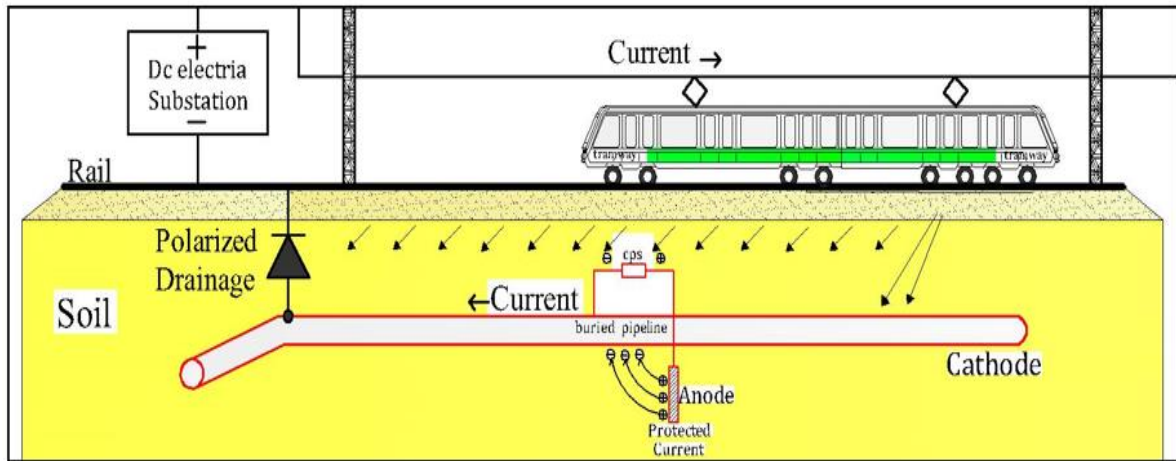


Figure I.30. Processus du drainage polarisé.

Cette méthode de protection requiert la connexion de la canalisation au bornage négatif de l'alimentation de traction via un câble de liaison. Cette connexion vise à contraindre les courants parasites à suivre un chemin électrique défini, empêchant ainsi leur circulation à travers le sol. Cette mesure de précaution empêche la formation d'un circuit électrochimique, et par conséquent, elle prévient la corrosion [83]. Cependant, pour l'installation efficace d'un dispositif de drainage, il est impératif que la conduite soit située à proximité de la sous-station. Cela évite que la liaison par câble ne devienne trop résistante en raison de sa longueur, tout en garantissant que les courants parasites ne prennent pas le chemin de moindre résistance. Cette situation est particulièrement mise en évidence dans le cas du tramway de la ville de Constantine, comme le montre la Figure I.31, une photo prise en 2021.



Figure I.31. Appareil du drainage à proximité de la voie ferrée (Constantine 2021).

On distingue plusieurs formes de drainage :

I.10.4.1. Drainage polarisé

C'est un circuit électrique à base de diode qui établit une voie unidirectionnelle (de la conduite vers le rail) via une liaison câblée. Le schéma équivalent de ce processus de drainage est illustré dans la figure (I.32). Le drainage polarisé joue un rôle essentiel dans de nombreux systèmes électriques et électroniques, en permettant la dissipation de courants indésirables ou de surtensions tout en maintenant la circulation de courant dans une direction spécifique [84].

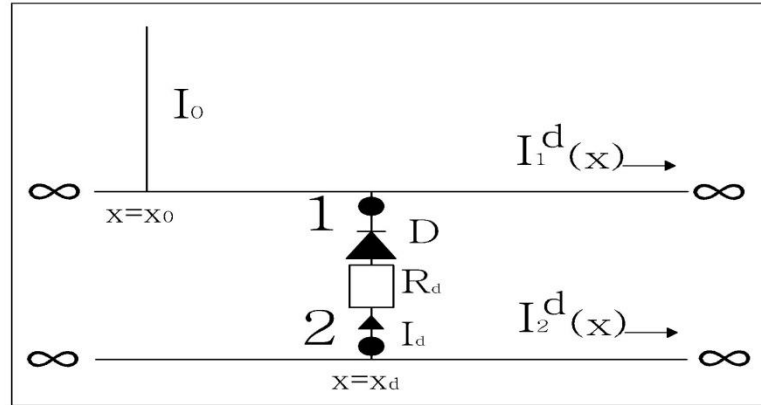


Figure I.32. Schéma équivalent du drainage polarisé.

A l'aide du théorème de Thévenin, on peut calculer le courant I_d par l'équation (I.8).

$$I_d = \frac{U_{21}}{R_d + R_{21}} \tag{Eq (I.8)}$$

La tension en circuit ouvert est définie par l'équation (I.9).

$$C = V_2(x_d) - V_1(x_d) \tag{Eq (I.9)}$$

Ainsi, la résistance R_{21} peut être déterminée par l'équation (I.10).

$$R_{21} = \frac{V_2(x_d) - V_1(x_d)}{I_s(x_d)} \tag{Eq(I.10)}$$

I.10.4.2. Drainage électrique forcé

Lorsque le drainage polarisé ne parvient pas à éliminer tous les courants de fuite, une source externe est ajoutée pour générer le courant nécessaire. En revanche, dans le drainage forcé, qui est différent du drainage polarisé contrôlé par des diodes, le contrôle est effectué à l'aide d'un pont de thyristor (voir la figure I.33), [86].

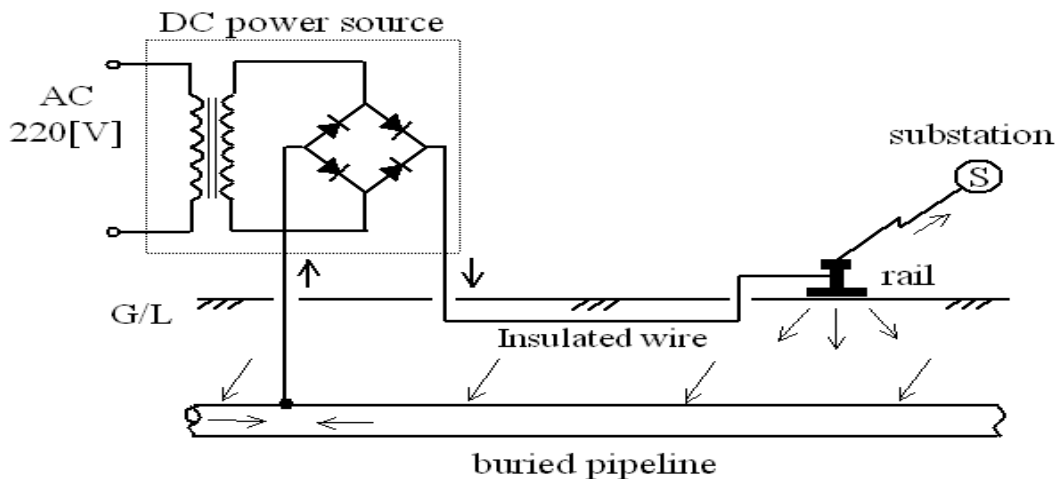


Figure I.33. Processus de l'appareil du drainage forcé [86].

Cependant, dans d'autres pays [86,87], le drainage forcé est mis en œuvre lorsque le potentiel électrique dépasse le seuil de sécurité (excès de potentiel), ce qui peut entraîner une surprotection de la canalisation et potentiellement causer des fluctuations ou des décollements de revêtement. Par conséquent, en cas de perturbation lors du contrôle du potentiel, le système de drainage absorbe les courants de fuite ainsi que le courant injecté par le système de protection cathodique. Dans ce scénario, le rôle du circuit électronique est de libérer le courant et de le réinjecter dans la conduite à protéger. Une représentation schématique de ce circuit électrique de drainage forcé est illustrée dans la figure (I.34), [87].

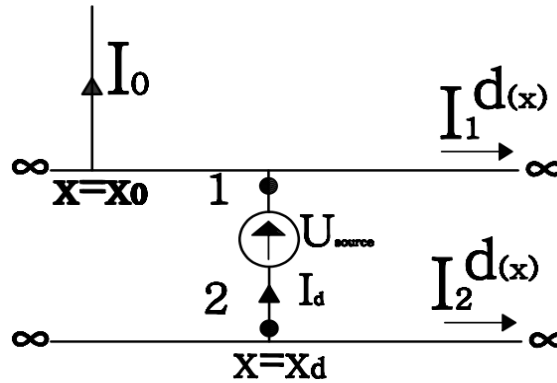


Figure II.34. Schéma équivalent du drainage forcé.

Le courant drainé I_d est calculé par la relation (I.11) :

$$I_d = \frac{U_{source} - U_{21}}{R_{21}} \tag{II.11}$$

I.10.5. Méthodologie de sélection d'une méthode de protection cathodique

Le choix entre différentes méthodes pour établir un système de protection cathodique dépend de critères spécifiques, tels que les besoins en courant, les caractéristiques du sol comme sa résistivité, et la longueur du réseau à protéger. Ainsi, la décision d'opter pour une approche de protection plutôt qu'une autre doit être basée sur une analyse comparative de divers éléments, y compris les coûts associés à l'installation et à la maintenance. La figure (I.35) et le tableau (I.15) fournissent une évaluation comparative des deux méthodes couramment utilisées dans le secteur industriel [88].

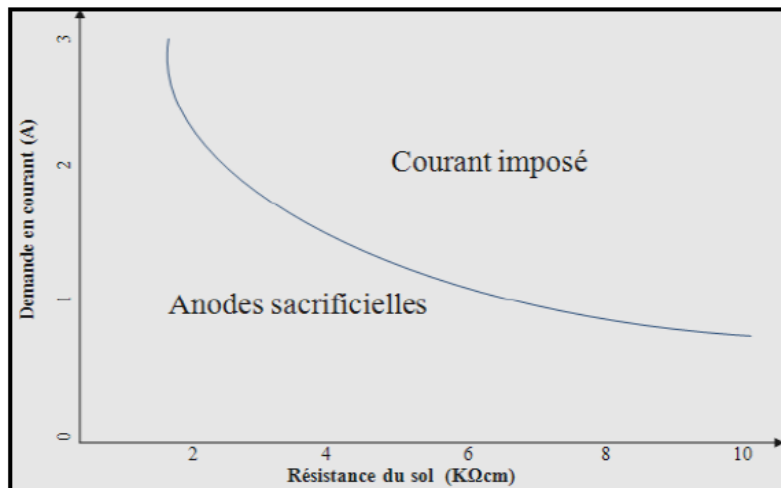


Figure II.35. Choix du système de la protection cathodique [88].

Tableau I.15 : Approche de choix pour une méthode de protection cathodique [89].

Critères	Protection par Anode galvanique	Protection par courant imposé
Environnement	Applicable ou le milieu non agressif.	Applicable dans les différents milieux
Risque humain	Nul	Possible, source électrique
Installation	Simple et facile	Complexe, étude et dimensionnement
Source d'énergie	Pas de source d'énergie électrique.	Source extérieure indispensable.
Demande en courant	courant s'ajusté par lui-même (Pile)	Réglable, ajustement automatique
Nombre d'anodes	Important	Faible
Débit par anode	Faible	Important
Entretien	Pas nécessaire.	Maintenance par des agents qualifiés
Courant de protection	Auto réglé par l'anode lui-même	Surveillance régulière
Résistivité de sol	Inférieur à 50 Ω .m	Supérieur à 50 Ω .m
Longueur protégée	Entre 2 et 3 kilomètre	Supérieure à 3 kilomètre
Cout fourniture/ pose	Cout faible	Cout important
Encombrement	Réduit (fouille)	Assez important (tranchée)
Risque de surprotection	Presque nul	Possible
Interférence	Nul	Possible

I.11. Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons exploré le phénomène complexe de la corrosion dans toutes ses diverses manifestations. Nous avons plongé dans les différentes formes que ce processus invisible peut prendre, ainsi que dans les approches variées pour lutter contre ses effets néfastes. Il est indéniable que la corrosion peut causer d'importants dommages aux infrastructures industrielles exposées à des environnements corrosifs, en particulier aux ouvrages métalliques enterrés.

Cependant, tout espoir n'est pas perdu. Grâce aux stratégies de protection, qu'elles soient passives ou actives, il est possible d'augmenter considérablement la durée de vie des ouvrages métalliques. Parmi ces stratégies, la protection cathodique se présente comme une solution séduisante, bien que son application requière une grande finesse et une vigilance extrême pour maîtriser ses paramètres et ses règles. Elle s'impose comme une méthode hautement appropriée pour lutter contre la corrosion.

Néanmoins, il est important de rappeler que la mise en place de cette méthode nécessite le strict respect de règles d'installation spécifiques. Cela souligne l'importance de faire appel à des experts et à des professionnels qualifiés pour garantir son efficacité. Les critères fondamentaux et les normes standardisées pour les ouvrages métalliques enterrés ont été abordés en détail dans ce chapitre, offrant ainsi un guide solide pour ceux qui cherchent à protéger leurs infrastructures des ravages de la corrosion.

Chapitre II

Effet des courants vagabonds sur les structures métalliques à proximité de la traction électrifiée

Chapitre II

Effet des courants vagabonds sur les structures métalliques à proximité de la traction électrifiée

II.1. Introduction

Dans tous les systèmes de traction électrique à courant continu, le rail joue un double rôle d'une part le guidage mécanique de la motrice et d'autre part assure le retour de courant négatif au sous station électrique. En outre, le système d'alimentation pose toujours des problèmes et des perturbations qui provoque l'instabilité du système de traction ou ce dernier gêne les infrastructures qui situés en proximité de la voie ferrée tel que les gazoducs enterrés.

II.2. Définition du terme courant vagabond

Les courants électriques qui circulent dans le sol sont générés par un système de traction électrique à courant continu, tel que celui utilisé par les tramways, et sont couramment désignés sous le nom de "courants vagabonds". En règle générale, ces courants présentent une variabilité en termes d'intensité, de direction et de trajectoire qu'ils empruntent, ce qui explique leur appellation de courants vagabonds.

Les courants aléatoires qui se manifestent dans les sols conducteurs entourant les lignes de transport ferroviaire à courant continu sont qualifiés de courants de fuite. Cela s'explique par le fait qu'en retour des courants de traction via les rails vers la sous-station électrique, environ 5 % de ces courants se dissipent dans le sol en raison de l'isolation imparfaite entre les rails et le sol. Par ailleurs, des facteurs naturels tels que les courants telluriques peuvent également contribuer à expliquer l'apparition de certains courants vagabonds. La direction, l'intensité et la dispersion de ces courants entre deux points sont sujettes à des variations aléatoires [90].

Les courants vagabonds, comme leur nom l'indique, sont des courants qui se sont écartés de leur trajectoire prévue. Ils peuvent être de nature continue (DC) ou alternative (AC), selon leur source. La principale raison de leur déviation par rapport au chemin prévu réside généralement dans le fait que la résistance du chemin involontaire est inférieure à celle du chemin prévu. Parfois, une partie du courant peut également emprunter le chemin involontaire en raison d'une combinaison en parallèle des deux chemins [91].

Les rails sont généralement utilisés comme conducteurs d'énergie de traction sur les chemins électrifiés en courant continu. Ces courants de retour de traction sont censés circuler à travers les rails. Cependant, la qualité d'isolation des rails peut varier avec le temps et des liens électriques peuvent s'établir entre les rails et le sol, principalement en raison de la pollution le long de la ligne (par exemple : huile, poussières, déchets, etc.) et de l'humidité ambiante.

En pratique, en présence d'une variation de potentiel entre les rails et le sol, une infime partie du courant de traction trouve son chemin travers le sol et se propage dans des enveloppes métalliques telles que les canalisations métalliques et des structures en béton armé. Les facteurs impactent sur l'intensité du courant sont :

- La répartition des locomotives le long de la ligne,
- La distance entre les sous-stations le long du parcours du tramway,
- La résistivité des rails de roulement,
- La charge et la vitesse de locomotive.

En effet, comme évoqué dans le chapitre précédent, les structures métalliques enterrées sont soumises au phénomène de la corrosion électrochimique. C'est pourquoi elles sont toujours protégées le système CP contre ce phénomène. De plus, un autre phénomène entre en jeu, à savoir la corrosion provoquée par les courants vagabonds, qui est le plus dangereux parmi eux.

II.3. Origine des courants vagabonds à courant continu

II.3.1. Installation électrique défectueuse

Les courants vagabonds peuvent être provoqués par une installation électrique en mauvais état. Cela peut résulter de la mauvaise fermeture des interrupteurs entre l'alimentation (la source) et le récepteur, ou encore en raison de différences de normes ou de constructeurs dans les composants en amont et en aval. De telles disparités peuvent engendrer l'apparition de courants de fuite qualifiés de "vagabonds" [92].

II.3.2. Neutre Secondaire

Le courant dans un circuit électrique doit être égal au courant qui en sort. Ainsi, un circuit électrique opère en boucle. Pour que le circuit fonctionne correctement, tout ce qui est fourni par la source d'énergie doit retourner à cette source, sinon le dispositif alimenté, comme une lampe, cesse de fonctionner. Lorsque le conducteur est fixé au pylône, le courant retourne à la centrale électrique à travers les résistances, ce qui peut parfois entraîner des concentrations anormalement élevées de courants à proximité des centrales électriques, (voir figure II.1) [92].

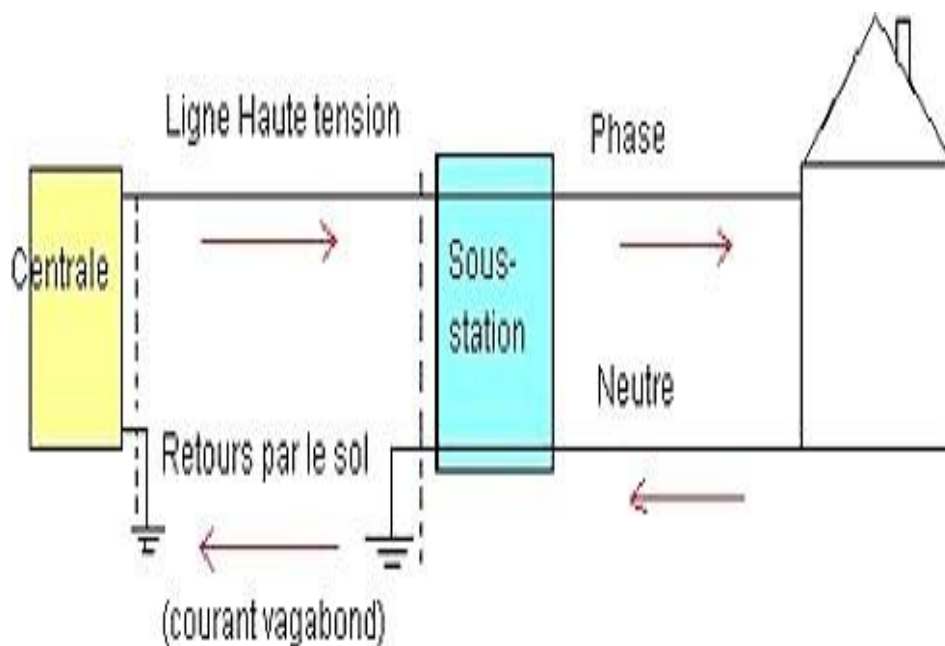


Figure II.1. Schéma de l'alimentation d'une ville.

II.3.3. Voisinage du réseau électrique à basse tension

En régime nominal, les réseaux électriques à basse tension subissent des pertes non négligeables lors de leur utilisation par les abonnés. Ces pertes ont pour origine par ;

- Mauvaise isolation des câbles, ce qui permet au courant de suivre un chemin moins résistant que l'équipement électrique, en particulier pendant la saison hivernale.
- Mauvais raccordement du neutre à la masse ou mauvais choix de schéma de liaison à la terre (SLT).
- Drainage de courant dû au contact avec une conduite métallique d'eau.

II.3.4. Proximité d'un réseau électrique à haute tension HT

Les réseaux électriques à haute tension peuvent, en plus de leur chute de tension dans l'une des trois phases, générer un champ magnétique dans le sol où se trouvent les canalisations de transport d'hydrocarbures. Cela peut avoir des effets néfastes sur ces structures environnantes. Ces effets se manifestent sous trois formes : capacitive, résistive et inductive, comme illustré dans la Figure (II.2), [93].

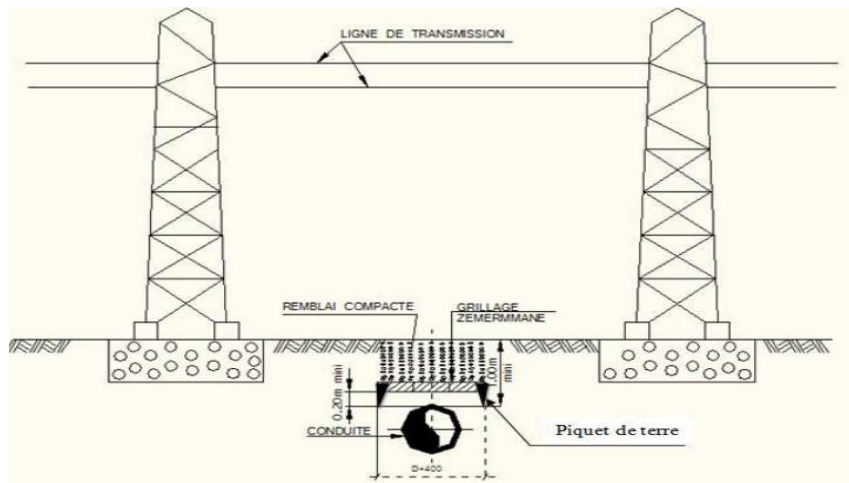


Figure II.2. Influence des lignes HT sur une conduite métallique.

Les structures métalliques enterrées présentent généralement une résistance transversale élevée et une faible résistance linéaire. L'impact de ces facteurs dépend de plusieurs variables, notamment la tension de la ligne électrique, le courant de fuite vers la terre ou en cas de court-circuit, la distance entre la ligne électrique et la conduite, ainsi que la qualité de l'isolation de cette dernière. Vous pouvez trouver un résumé de ces différentes influences dans le tableau suivant (II.1).

Tableau II.1 : Différentes formes d'influences des lignes hautes tension.

Types	Description
Influence capacitive	Se produit généralement dans les cas de pose d'une conduite mal revêtue et posée.
Influence résistive	Se produit généralement lorsque les canalisations traversent de cône de tension de la mise à la terre des pylônes
Influence inductive	Se produit lorsque les lignes HT sont en position parallèle avec les canalisations (ou ayant un angle très aiguë).

I.4. Les courants vagabonds et la traction électrifiée

Dans un système de traction électrifiée à courant continu, les rails servent de retour pour le courant de traction vers la sous-station électrique. Toutefois, une partie de ce courant, environ 5 %, prend un chemin à travers le sol, suivant une trajectoire incontrôlée, ce qui a un impact négatif sur les structures métalliques situées à proximité du système de traction électrifiée. C'est la raison pour laquelle on les appelle courants vagabonds [94].

Cependant, si ces structures sont soumises à une protection cathodique, les courants vagabonds s'ajoutent aux courants injectés par le poste redresseur de protection. Par conséquent, dans le contrôle des courants vagabonds, il est essentiel de prendre en compte les courants qui assurent la protection de ces structures.

II.4.1. L'action corrosif des courants vagabonds

Le sol sert involontairement de chemin de retour pour ces courants, car les rails de roulement ne sont pas complètement isolés du sol. Leur impact est significatif en ce qui concerne la corrosion des structures métalliques enterrées à proximité des voies ferrées et de leurs sources d'alimentation, ce qui les rend particulièrement préjudiciables à la durabilité des infrastructures [95]. Le phénomène des courants vagabonds est illustré dans la figure (II.3).

L'état électrique d'une structure enterrée est influencé par l'action d'un courant vagabond. Le potentiel d'une structure métallique dans un environnement donné est affecté par la direction des courants. Cette influence peut être favorable ou défavorable. En d'autres termes, cette influence devient favorable lorsqu'il s'agit d'un gain d'électrons, et la valeur du potentiel reste dans la plage d'immunité.

Les courants vagabonds varient en intensité et en direction en raison de leur lien avec l'activité ferroviaire. D'une part, ces courants pénètrent dans la structure près de la sous-station, et d'autre part, ils entraînent une sortie des courants de la structure vers une zone éloignée de la sous-station, ce qui peut provoquer des dommages sur la paroi métallique.

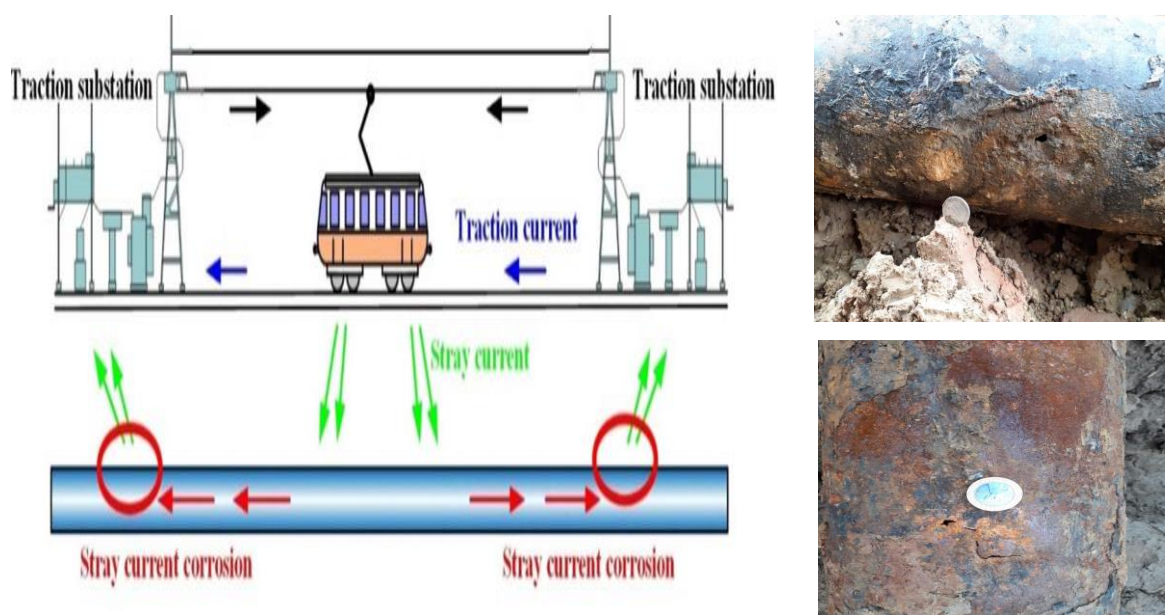


Figure II.3. Effet corrosif du courant vagabond (Photos réelles).

I.4.2. Critères d'évaluation des courants vagabonds

L'effet corrosif du courant vagabond dépend de la qualité du système d'alimentation de traction lors de la conception, car lorsque ces courants quittant la sous station d'alimentation peuvent affecter le circuit de retour lui-même et les installations voisines. Les paramètres les plus importants relatifs aux courants vagabonds sont:

- La conductance linéique des voies et la conception du circuit de retour.
- L'implantation des sous-stations d'alimentation en termes de distance entre elles.
- La résistance longitudinale des rails de roulement.
- L'espacement des liaisons transversales.

Le facteur qui influence l'évaluation des courants vagabonds lorsqu'ils quittent les rails est la conductance linéique rails/sol, telle qu'exprimée par l'équation (II.1).

$$G'_{RE} = \frac{I'}{U'_{RE}} \quad Eq(II.1)$$

Il est essentiel de noter que le taux de corrosion est le facteur principal dans l'évaluation des risques pour les métaux, et il peut être exprimé de différentes manières, telles que la perte de masse, la perte d'épaisseur et la densité du courant. Le tableau (II.2) présente l'état du métal en fonction de sa vitesse de corrosion.

Tableau II.2 : Comportement du métal en fonction du taux de corrosion.

Vitesse de la corrosion (mm/an)	Comportement du métal
< 0.05	Grande résistance
< 0. 5	Modérément résistant
[0.5 - 1.0]	Résistance limitée
> 1.0	Risque de corrosion

Le potentiel rail/sol est le facteur qui principalement contient des informations principales concernant les paramètres pertinents qui représentent les courants vagabonds, tel que les courants de traction, la résistance longitudinale des rails, la résistance à la terre et la longueur des secteurs d'alimentation.

La recherche et les essais expérimentaux montrent qu'il n'y a pas d'effets dommageables des courants vagabonds sur l'ensemble du système de traction et sur les structures avoisinantes pendant une période prolongée, soit environ 25 ans, si la valeur linéique moyenne des courants vagabonds ne dépasse pas la valeur maximale ($I'_{\max} = 2.5\text{mA/m}$), (Valeur linéique moyenne des courants vagabonds d'une ligne à voie unique). Pour une ligne de double voie, la valeur moyenne maximale des courants vagabonds soit multipliée par deux.

I.4.3. Formation des courants vagabonds

Les courants émis par des installations électriques insuffisamment isolées par rapport au sol peuvent entraîner une corrosion électrochimique très rapide et sévère. Ces courants sont fréquemment observés autour des lignes de traction électrique, telles que le métro, le tramway, le train électrifié, etc. Les points faibles où les courants passent de la conduite au rail sont particulièrement sujets à une corrosion intense.

Le taux de corrosion est accéléré par plusieurs facteurs, en fonction des caractéristiques physiques de la structure, tels que l'épaisseur du tube et la qualité du revêtement, de l'intensité des courants, de l'agressivité du sol, de l'efficacité du système de protection cathodique, ainsi que des paramètres physicochimiques de l'électrolyte. Ce phénomène de corrosion due aux courants vagabonds peut se produire très rapidement, parfois en quelques mois seulement.

L'état de la structure est affecté par le sens du courant vagabond, qui peut être cathodique ou anodique. Par exemple, à chaque entrée de courant, la structure (zone cathodique ou de réduction) gagne des électrons, ce qui entraîne une augmentation de son potentiel de manière négative. Par exemple, le potentiel peut passer de -500 mV à -900 mV par rapport à l'électrode de référence du cuivre sulfate de cuivre [96].

En revanche, à chaque sortie de courant de la structure, il y a une perte d'électrons et le potentiel devient positif. Ses conduites métalliques enterrées sont déjà sous protection cathodique qui représente une protection électrochimique réalisée par une polarisation cathodique appropriée [97] selon la norme (CEE 60050-111-15-4) et d'après le diagramme de Pourbaix, elles restent en état d'immunité lorsque le potentiel prend la valeur au-dessous de -850 mV par rapport à l'électrode de référence appliqué dans les zones sèches.

Si un courant électrique continu peut protéger une structure lorsqu'il circule dans le bon sens, alors il peut la corroder lorsqu'il circule dans le mauvais sens. Mais généralement, les courants vagabonds se propagent dans le sol sur un chemin différent de celui prévu, ce qui leur permet d'entrer dans une structure enterrée puis de s'en sortir plus loin, ce qui entraîne une corrosion par dissolution anodique [98]. Ces courants sont appelés courants vagabonds en raison de leur variété de direction et d'intensité.

On rappelle que, la première loi de Faraday stipule que le temps et le courant électrique sont proportionnels à la quantité de substance libérée à une électrode lors de l'électrolyse. La seconde loi stipule que les poids de différents corps, qui sont séparés aux électrodes par la même quantité d'électricité, sont considérés comme leurs équivalents chimiques [98].

La deuxième loi de Faraday a établi une formule reliant la perte du métal dans une cellule de corrosion avec le temps et la valeur du courant sortant de la structure. L'équation (II.2) détermine la loi du Faraday.

$$m = \frac{M}{n F} It \tag{Eq(II.2)}$$

Prenant le cas d'une canalisation en Acier. D'après la loi de Faraday un courant de 1A sort de cette canalisation, une perte de la masse estimée de ;

$$m = \frac{1}{96500} \frac{65(10^{-3})}{2} (1)(31536000) \approx 9.15 \text{ kg/A} \cdot \text{an} \tag{Eq(II.3)}$$

La densité de l'Acier $d = 7.9$, donc le volume perdu ou corrodé par 1 A par un jour :

$$V = \frac{m}{d} = \frac{9.15(10^3)}{(7.9)(365)} = 3.17 \text{ cm}^3/\text{jour} \tag{Eq(II.4)}$$

Le tableau (II.3) présente la perte de poids pour différents métaux lorsque qu'un courant de 1 A circule à travers la canalisation pendant une année.

Tableau II.3: Perte de masse des métaux due à la corrosion par un courant vagabond.

Métal	Masse Atomique	Valence du Métal (n)	La masse perdue pour 1A/an (Kg)
<i>Aluminium</i>	26.98	3	02.95
<i>Cuivre</i>	63.57	2	10.34
<i>Fer</i>	55.85	2	09.15
<i>Magnésium</i>	24.32	2	03.95
<i>Zinc</i>	65.38	2	10.70

L'observation du temps nécessaire à la perforation est clairement évidente dans l'expérience illustrée dans la figure (II.4). Cette expérience implique deux canalisations de dimensions différentes en termes d'épaisseur et de diamètre, soumises respectivement à des courants de sortie de 1 A et de 200 A.

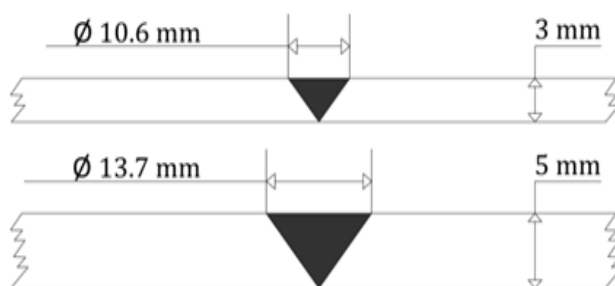


Figure II.4. Diamètre de perçement des conduites à différentes épaisseurs.

Le tableau (II.4) montre la relation entre les valeurs des courants vagabonds et le temps nécessaire à la perforation, illustrant ainsi l'impact corrosif de ces courants sur une canalisation dans la figure (II.5).

Tableau II.4: Temps de perçement en fonction des courants vagabonds.

Diamètre de perforation (mm)	10.6	13.7
Épaisseur de la canalisation (mm)	03	05
Temps de perçement pour 1 A (min)	40.88	113.55
Temps de perçement pour 200 A (min)	0.2	0.56

La figure (II.5) illustre la variation proportionnelle du poids perdu du métal quand le courant de retour quitte la structure métallique.

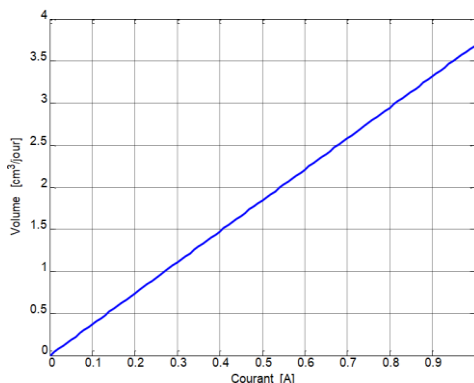


Figure II.5. Volume perdu du métal pour un courant de 1 A sortant.

II.5. La source polluante (tramway Constantine)

Le tramway de Constantine est un système de transport en commun qui relie la ville de Constantine, située dans le Nord-Est de l'Algérie. La première section de ce réseau a été officiellement ouverte le 4 juillet 2013. Cette portion initiale mesure 8,1 km et s'étend du stade Ben Abdelmalek Ramdane à la cité Zouaghi, comprenant un total de dix stations de service. En mai 2019, une extension vers la nouvelle ville d'Ali Mendjeli a été mise en service. Cette extension s'étend sur 6,9 km et relie la station de la cité Zouaghi à l'entrée de la nouvelle ville. Il est à noter que la deuxième extension n'a pas d'impact sur les canalisations métalliques de distribution de gaz, à l'exception d'une portion près d'une ligne de transport de gaz. Par conséquent, notre étude se concentre sur la première tranche [99].

II.5.1. Cartographie du tramway

La fiche technique du tramway de Constantine est détaillée dans le tableau (II.5).

Tableau II.5 : Caractéristiques du tramway Constantine.

Caractéristiques et fiche technique	
Situation	Constantine
Type	Tramway
Propriétaire	Entreprise Métro d'Alger (EMA)
Exploitant	SETRAM
Entrée en service	04 Juillet 2013
Longueur du réseau	18.3 Km
Nombre de ligne	01
Stations	21
Rames	27 Alstom CITADIS
Ecartement des rails	1435 mm
Vitesse moyenne	20 km/h
Résistivité d'isolement rail/sol	200 Ω m
Longueur	45m
Largeur	2.65m
Espacement entre les rails	1.5m
Espacement de l'isolement rail/sol	0.5m
Tension d'alimentation	750 V
Tension limite dans les rails	120 V
Masse à vide	54.92 tonne
Masse en charge normale	75.92 tonne

II.5.2. Electrification ferroviaires en courant continu

Les systèmes de traction électrifiés tels que le tramway et le trolleybus sont alimentés par un réseau de haute tension de 60 kV / 50 Hz en courant alternatif triphasé, fourni par la société SONELGAZ distribution. Par mesure de sécurité, un générateur de courant de grande puissance est connecté en parallèle à l'alimentation en cas de perte de charge ou de coupure survenue dans le réseau électrique.

Le choix d'un réseau électrique d'alimentation en termes de la tension et puissance est défini en fonction du besoin énergétique de la ligne comme illustré dans les figures (II.6) et (II.7). Les systèmes en courant alternatif peuvent être biphasés ou monophasés. Les valeurs de tension maximale et minimale pour chacun des systèmes d'électrification sont définies dans la norme EN 50163.

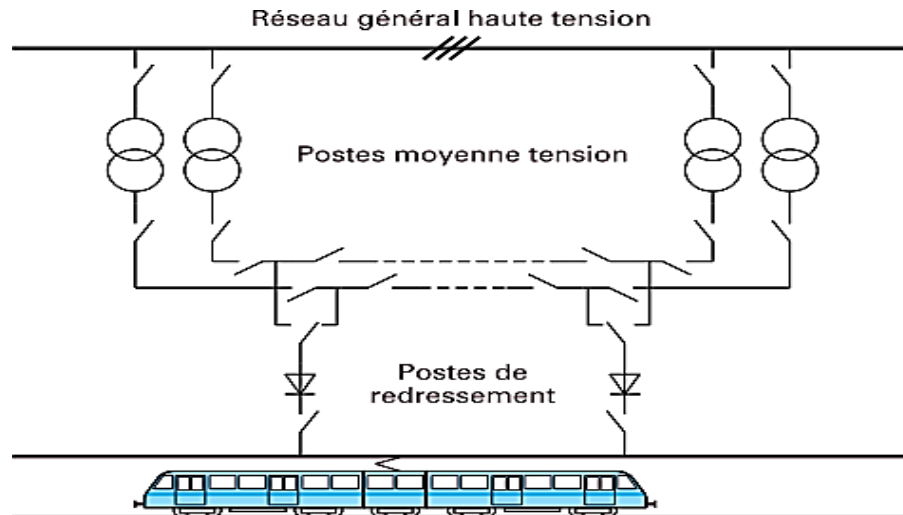


Figure II.6. Principe d'alimentation avec électrification en continu.

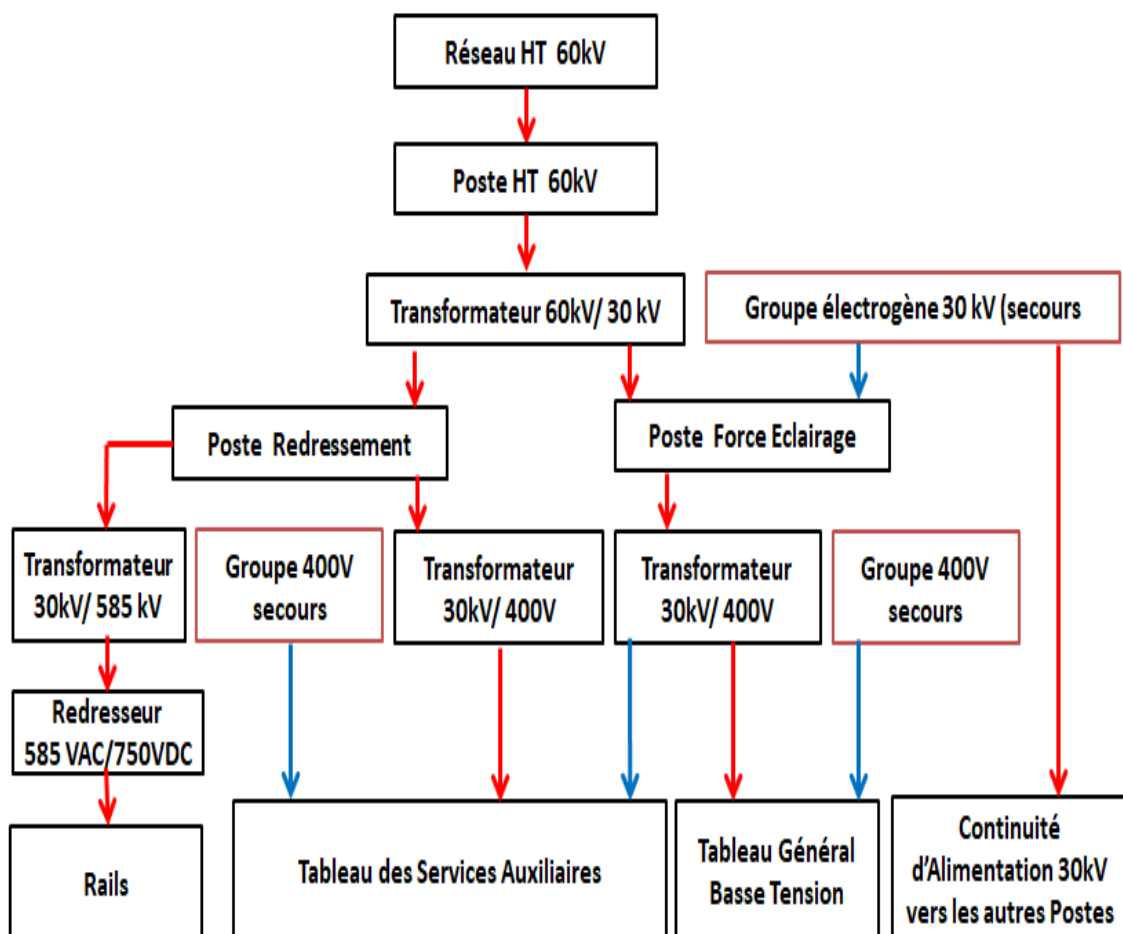


Figure II.7. Bilan énergétique des puissances.

II.5.3. Différentes structures du tramway

II.5.3.1. La Sous station électrique

Le plus souvent, les tramways nécessitent du courant continu sous une tension de 600 à 750 volts pour alimenter les différentes sections des lignes aériennes du réseau. L'alimentation et la transformation de l'énergie électrique sont assurées par une sous-station afin de fournir de l'énergie aux différentes parties des lignes aériennes du réseau. Le rôle de la sous-station est de convertir le courant alternatif industriel à tension relativement élevée (moyenne tension) en courant continu adapté à l'alimentation des véhicules électriques [100].

L'abaissement de la tension entre les niveaux haute tension (HTA) et basse tension (BTB) est assuré par les transformateurs présents sur les réseaux d'alimentation électrique des tramways. Les transformateurs triphasés en configuration triangle/étoile ou équipés de deux secondaires sont parmi les plus couramment utilisés, comme illustré dans les figures (II.8) et (II.9) [101].

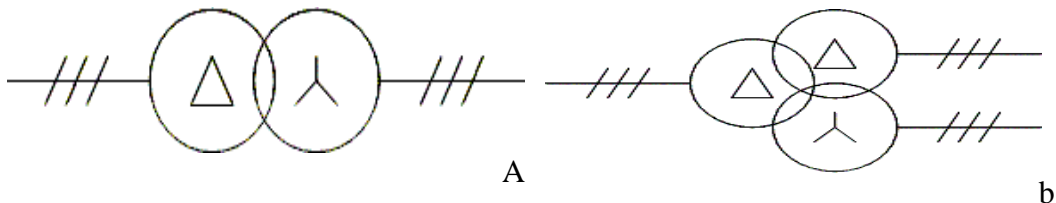


Figure II.8. a) Transformateur Δ/Y , b) Transformateur à deux secondaires $\Delta/\Delta Y$.



Figure II.9. Photo réelle du transformateur Tramway Constantine.

II.5.3.2. Convertisseur de puissance

C'est un dispositif statique qui sert à convertir la puissance électrique alternative en courant continu. Il comprend six diodes de grande puissance qui permettent de créer un passage de courant continu dans un seul sens. De nouvelles réglementations en vigueur imposent dans certains cas l'utilisation de redresseurs à 12 pulsations, comme illustré dans la Figure (II.10).

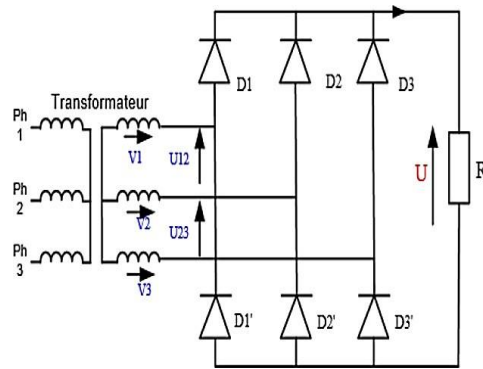


Figure II.10. Schéma type d'un poste de redressement mono groupe [101].

II.5.3.3. Lignes aériennes de contact (LAC)

Les dispositifs les plus couramment utilisés pour transporter les courants continus entre les sous-stations et les rames d'un réseau de tramway sont les lignes aériennes de contact (LAC). Elles sont divisées en sections, d'une part, pour permettre des services d'exploitation provisoire, et d'autre part, pour isoler une partie du réseau en cas de défaut.

La Figure (II.11) représente un type de support pour la ligne de contact aérienne. La suspension caténaire a pour objectif de maintenir le fil de contact aussi parallèle à la voie que possible dans des conditions de fonctionnement dynamiques. Il est également essentiel que la pression entre la ligne de contact et le pantographe soit suffisante et constante afin d'éviter la formation d'arcs électriques entre ces conducteurs [102].

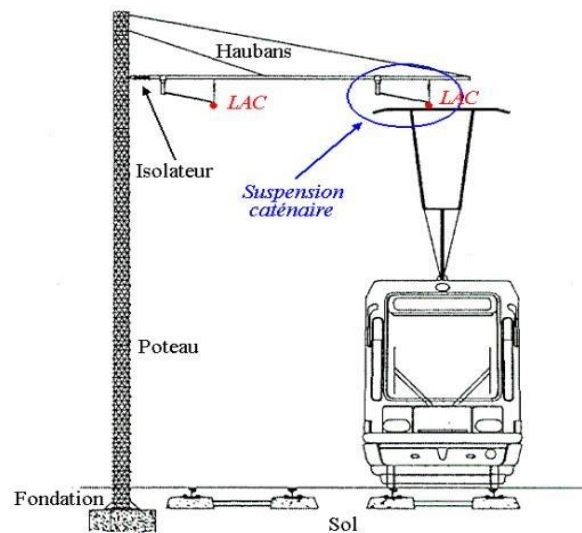


Figure II.11. Différents composants de LAC.

II.5.3.4. Dispositif de prise en courant (Pantographe)

Le pantographe est un assemblage de tubes, articulés, fixés au toit d'une caténaire par un dispositif isolant. Il garantit un contact permanent quel que soit la hauteur du fil de contact grâce à son déploiement variable.

Les différents éléments du pantographe sont représentés à la figure (II.12), qui comprend un grand cadre et deux bras articulés supérieur et inférieur.

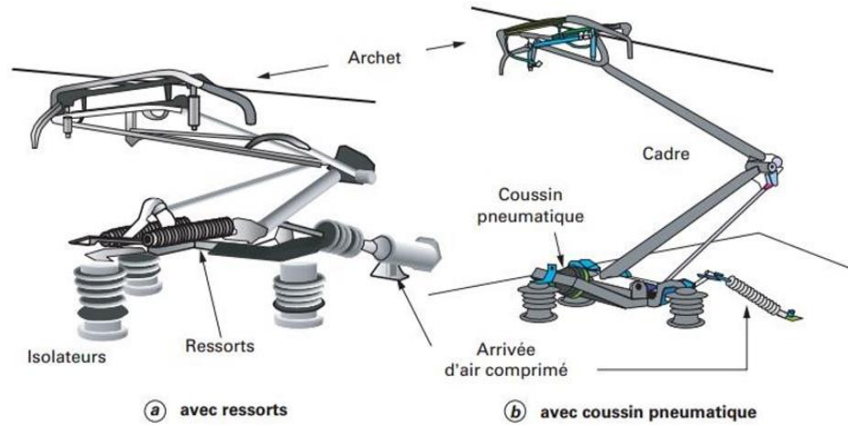


Figure II.12. Pantographe du tramway [102].

II.5.4. Problématique des tensions rail/sol

L’isolation imparfaite dans les circuits de retour est un aspect important de la chute de tension. Ces chutes de tension modifient le potentiel électrique rail/sol. Dans les zones proches des postes de redressement, il est généralement négatif, tandis que dans les zones éloignées, il est positif. En raison de l’isolation inadéquate des rails par rapport au sol, des courants de fuite apparaissent sous l’effet de cette différence de potentiel.

Les courants qui quittent les rails dans les zones positives doivent inévitablement retourner aux rails dans les zones négatives, créant ainsi un équilibre relatif aux potentiels par rapport à celui du sol, considéré comme étant à la terre. Le déplacement de ces courants de fuite, connus sous le nom de courants vagabonds, peut entraîner la corrosion électrolytique des structures métalliques enterrées qu’ils empruntent.

II.5.5. Impact des courants vagabonds sur les structures

Le courant circulant dans les lignes de roulement ferroviaire provoque des variations de la tension entre le rail et le sol, entraînant ainsi un flux de courant vagabond vers la terre à travers l’isolement de la voie. La quantité de courant vagabond par unité de longueur est cruciale pour évaluer la perte de matière et le risque de corrosion. Le cas le plus critique se présente à l’extrémité d’une ligne ou lors de l’extension d’une ligne connectée à un réseau ferroviaire existant. Les hypothèses suivantes sont utilisées dans la méthode de calcul :

- Le chemin de fer existant est modélisé comme un circuit de Norton équivalent.
- L’admittance de la source est estimée avec la valeur inverse de la résistance caractéristique du système,
- Le courant de traction est injecté dans le circuit de retour à la fin de cette section ;

Les équations (II.5), (II.6) et (II.7) décrivent la variation du potentiel rail /sol.

$$U_{RE} = \frac{I}{2} R_c \left[1 - e^{-\left(\frac{L}{L_c}\right)} \right] \tag{Eq(II.5)}$$

$$R_c = \sqrt{\frac{R'_R}{G'_{RE}}} \tag{Eq(II.6)}$$

$$L_c = \frac{1}{\sqrt{R'_R G'_{RE}}} \quad Eq(II.7)$$

Le courant vagabond par unité de longueur est calculé à partir de l'équation (II.8) en fonction de la tension rail/sol et la conductance des rails de roulement par rapport à la terre:

$$I'_s = U_{RE} G'_{RE} \quad Eq(II.8)$$

A partir des équations (II.7) et (II.8), en déduire l'équation (II.9) :

$$I'_s = \frac{I}{2L_c} \left[1 - e^{-\left(\frac{L}{L_c}\right)} \right] \quad Eq(II.9)$$

Les conditions de la barrière de la sécurité sont satisfaites si le courant vagabond par unité de longueur, divisé par le nombre de voies parallèles est inférieur à 2,5 mA/m.

II.6. Source influencée (les canalisations métalliques du gaz de Constantine)

Les réseaux de distribution sont conçus pour fournir du gaz combustible aux utilisateurs à une pression d'utilisation spécifique définie dans une plage précise. Ces réseaux de distribution sont alimentés avec une pression moyenne de quatre (4) bars relatifs et desservent directement les clients par l'intermédiaire de régulateurs de pression, qui ajustent cette dernière à la valeur définie pour les utilisations domestiques ou industrielles conformément aux normes internationales en vigueur dans le monde [103].

II.6.1. Description de l'ouvrage de gaz

Les conduites en acier sont couramment utilisées dans les réseaux de distribution de gaz en zones urbaines, souvent héritées des anciens réseaux de distribution de gaz manufacturé. Cependant, ces conduites peuvent également être fabriquées en acier ou en polyéthylène. Depuis les années 1990, la société de distribution algérienne (SONELGAZ Distribution) a interdit l'utilisation de l'acier pour les ouvrages enterrés, sauf dans certaines zones spécifiques, telles que les passages sur des ouvrages d'art. Ces réseaux permettent des raccordements individuels ou collectifs, ainsi que des conduites montantes desservant les immeubles collectifs pour l'alimentation de leurs installations intérieures [103].

Dans le cadre de cette thèse, l'étude se concentre sur les conduites de gaz en acier protégées contre la corrosion par un système de protection cathodique à courant imposé ou par des anodes sacrificielles, comme mentionné dans le chapitre précédent. Malgré l'introduction de matériaux non métalliques pour la distribution de gaz, ces réseaux en acier persistent, et leur remplacement entraînerait des coûts considérables. C'est pourquoi les responsables des infrastructures gazières préfèrent plutôt restaurer ces conduites, tout en assurant un suivi périodique de la protection cathodique.

De nombreux matériaux ont été utilisés pour fournir de l'énergie gazière à la ville depuis son lancement initial. Cependant, de nos jours, la plupart des nouveaux réseaux utilisent

principalement du polyéthylène, sauf dans certaines situations particulières où l'acier est encore utilisé, comme indiqué dans le tableau (II.6).

Tableau II.6 : Caractéristiques du réseau de distribution gaz de Constantine.

Longueur du réseau de gaz par nature en %			
Polyéthylène	Acier	Cuivre	Fonte
57.87	26.15	17.74	0.23

II.6.2. Analyse du réseau à proximité du tramway

L'impact du tramway en termes de courants vagabonds sur le réseau de distribution de gaz est limité aux neuf premiers kilomètres où des canalisations en acier sont présentes. Le tableau (II.7) détaille les différents diamètres des canalisations métalliques en fonction de leur nature, tandis que le tableau (II.8) décrit les distances entre la conduite/rail et la conduite/sous-station. Il est à noter que dans le tronçon avant-dernier (5.04-6.26), la conduite est en polyéthylène, un matériau non corrodable et isolant.

Tableau II.7 : Analyse du réseau du gaz en voisinage du tramway.

Parcours du tramway (Km)	Longueur de la conduite pour chaque nature en mètre				
	AC 200	AC150	AC100	AC50	Cu22
0.00 - 0.80	-	2010	1137	462	250
0.80 - 1.33	-	1035	-	95	277
1.33 - 1.74	-	610	-	230	-
1.74 - 2.20	-	770	-	350	-
2.20 - 3.20	-	1278	540	530	792
3.20 - 4.24	490	-	-	-	-
4.24 - 5.04	-	1187	-	-	-
5.04 - 6.26	-	-	-	-	-
6.26 - 8.10	-	1187	-	-	-

Tableau II.8 : Distance entre le réseau du gaz et le chemin du tramway.

Parcours du tramway (Km)	Distance conduite/rail (m)	Distance conduite/ sous station (m)
0.00	25	130
0.80	58	137
1.20	20	40
2.00	1.2	60
2.40	13	27
2.90	1.2	55
3.20	1.2	38
4.56	15	15
7.00	08	15
8.10	58	58

II.7. Estimation des courants vagabonds dans les structures métalliques

Pour prévenir la sortie indésirable du courant des structures métalliques enterrées, une solution consiste à installer une liaison unidirectionnelle. Cette liaison permet de canaliser les courants vagabonds vers la voie ferrée négative. Cette installation requiert un dispositif de drainage polarisé, établi au moyen d'une connexion par câble [84,104].

L'objectif est de guider les courants sortants de la conduite à emprunter un chemin électrique (de la conduite vers la sous-station via un câble de liaison), plutôt que de suivre le circuit électrochimique (conduite/sol). Ce dernier itinéraire pourrait entraîner la dissolution du métal en provoquant la corrosion.

Dans cette section, une étude est proposée pour estimer la valeur maximale du courant drainé à partir des données et des mesures relevées sur le site. L'hypothèse du calcul repose sur la détermination de la valeur du courant à l'aide de la loi d'Ohm, en calculant les différentes résistances qui composent le circuit électrique et électrochimique équivalent.

II.7.1. Résistivité du sol.

Elle est déterminée par la méthode des quatre piquets le long de la structure avec un intervalle de 500 m, la résistivité du sol peut être estimée à une valeur moyenne, qui est donnée par l'équation de Winner ci-dessous (II.10), (Figure II.3.b) :

$$\rho = \frac{2 \pi a U}{I} = 2 \pi a R \tag{Eq(II.10)}$$

D'où la résistivité moyenne est calculée par l'équation (II.11)

$$\rho_{moy} = \sum_{i=1}^{i=n} \rho_i \tag{Eq(II.11)}$$

La figure (II.13.a) illustre la résistivité du sol le long du trajet du tramway en voisinage des canalisations de gaz enfouillées dans le site d'étude.

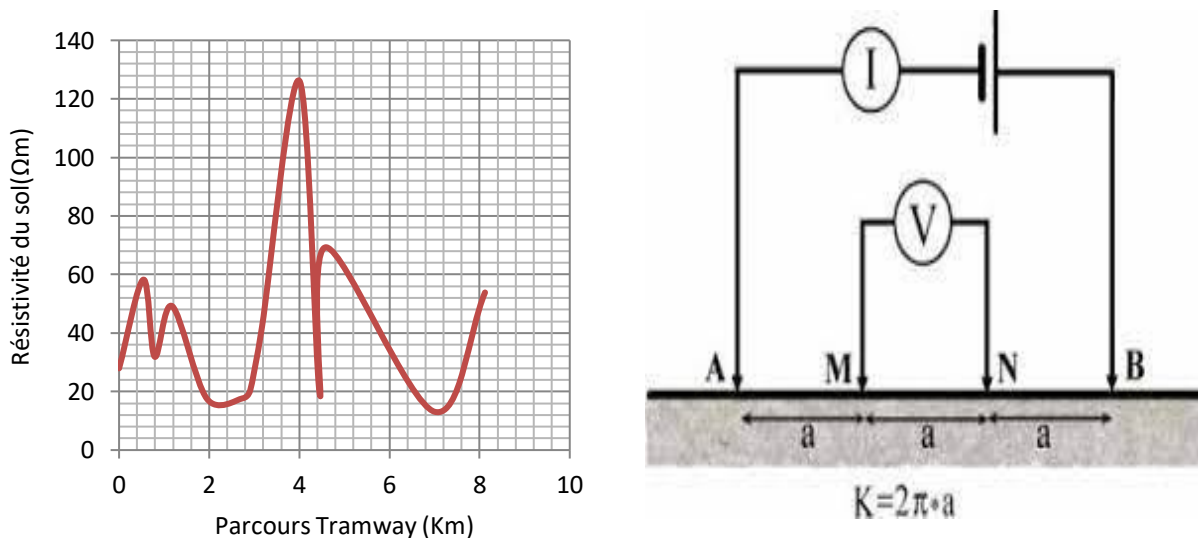


Figure II.13. a) Résistivité du sol le long du tramway. b) Principe de la méthode de Winner

II.7.2. Résistance du sol d'une conduite

Supposons qu'une conduite en acier de diamètre extérieur D soit enterrée dans un sol de résistivité uniforme ρ_{sol} . La résistance peut être calculée à une certaine distance entre un point et la section de la conduite (voir figure II.14).

La résistance d'une petite coquille cylindrique entourant la section de la conduite sera

$$R_{(résistance\ d'une\ petite\ coquille)} = \frac{\rho_{moy}}{2\pi L} \frac{\delta r}{r} \tag{Eq(II.12)}$$

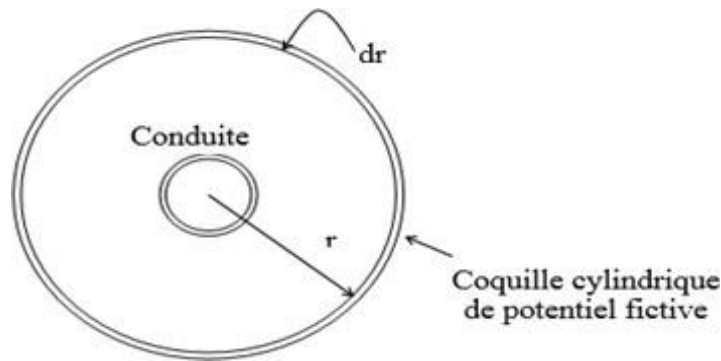


Figure II.14. Section d'une conduite dans un sol infini homogène.

La résistance entre la conduite et une surface cylindrique qui l'entoure à une distance de D sera :

$$R_{sol} = \frac{\rho_{moy}}{2\pi L} \int_{d_{ex}}^D \frac{dr}{r} = \frac{\rho_{moy}}{2\pi L} \ln \frac{D}{d_{ex}/2} \tag{Eq(II.13)}$$

II.7.3. Résistance longitudinale ohmique de la conduite

Elle s'exprime en [Ω/m] et elle est donnée par l'équation (II.14) :

$$r = \frac{\rho_{m\acute{e}tal} L}{\pi (d_{ex} - e)e} \tag{Eq(II.14)}$$

Pour un réseau comprenant des conduites de différents diamètres, la résistance équivalente (r_{eq}) est calculée à l'aide de l'équation (II.15) :

$$r_{eq} = \sum \frac{1}{r_i} \tag{Eq(II.15)}$$

II.7.4. Résistance du revêtement de la conduite (Transversale)

Cette résistance, exprimée en [$\Omega \cdot m^2$], peut être évaluée, pour des pipelines en cours d'un projet ou en exploitation par l'équation (II.16) :

$$R_{rev} = \frac{R_{is}}{\pi d_{ex}} \tag{Eq(II.16)}$$

II.7.5. Résistance spécifique d'isolement de la conduite

La résistance d'isolement diminue en fonction du temps de service et le besoin en courant de protection. Cette variation se dépend à la durée d'exploitation (équation II.17) :

$$R_{is}(t) = R_{is} \frac{1 - e^{-\beta t}}{\beta t} \quad Eq(II.17)$$

II.7.6. Résistance d'isolement Rail/Sol

Elle est exprimée par l'équation (II.18) :

$$R_{b\acute{e}ton} = \frac{\rho_{b\acute{e}ton} e'}{S} \quad Eq(II.18)$$

II.7.7. Résistance totale du circuit (Rail /Sol/ Conduite)

Elle est exprimée dans l'équation (II.19) :

$$R_{tot} = R_{rev} + R_{sol} + R_{b\acute{e}ton} + r \quad Eq(II.19)$$

II.7.8. Besoin en courant de la conduite

En appliquant la loi d'Ohm, la valeur du courant qui traverse la conduite de gaz est exprimée par l'équation (II.20) :

$$I = \frac{\Delta U}{R_{tot}} = \frac{E_{prot} - E_{rep}}{R_{tot}} \quad Eq(II.20)$$

Notant que, le potentiel initial de la conduite sans protection cathodique E_{rep} dans le sol est estimé à -650mV, ainsi le potentiel de protection E_{prot} est estimé à - 1000 mV par mesure de sécurité.

II.8. Résultats obtenus

Les résultats présentés dans le tableau (II.10) sont basés sur les données du tableau (II.9).

Tableau II.9 : Données pour les calculs.

Résistivité de l'acier ρ_{acier}	21 x10 ⁻⁸ Ω.m
Résistivité du cuivre ρ_{cuivre}	1.7 x10 ⁻⁸ Ω.m
Résistivité de l'acier $\rho_{b\acute{e}ton}$	200 Ω.m
Résistivité du sol ρ_{sol}	10 Ω.m
Résistance transversale d'isolement R_{rev}	1000 Ω.m ²

Tableau II.10 : Résultats finaux.

Parcours du Tramway (Km)	R _T (Ω)	I (A)
0.00 - 0.80	2,157	56,101
0.80 - 1.33	3,274	36,953
1.33 - 1.74	4,255	28,440
1.74 - 2.20	3,646	33,188
2.20 - 3.20	2,550	47,454
3.20 - 4.24	2,611	46,349
4.24 - 5.04	3,065	39,477
6.26 - 8.10	3,189	37,947

Cependant, ces résultats ne sont plus valables si la condition mentionnée dans l'équation (II.21) n'est pas remplie. Autrement dit, si le courant de fuite suit et emprunte les structures métalliques à faible résistance, Il est essentiel que la somme des résistances ($r + R_{c\grave{a}ble}$) soit inférieure à la valeur de la résistance R_{rev} .

$$r + R_{cable} < R_{rev} \tag{Eq(II.21)}$$

Avec ;

$$U_{cable} = R_{(cable)50^{\circ}C} I_{cable} \tag{Eq(II.22)}$$

L'importance de vérifier cette condition réside dans le fait d'assurer que le courant sortant de la conduite suive un circuit électrique (conduite/rail) grâce à une liaison assurée par le câble de drainage, tout en évitant toute sortie du courant vers le sol (circuit électrochimique) et, par conséquent, la naissance de la corrosion due aux courants vagabonds..

Le résultat de calcul pour la vérification de la condition (équation II.21) est représenté dans le tableau (II.11).

Tableau II.11 : Résultats de la condition : $r + R_{cable} < R_{rev}$.

Parcours du Tramway (Km)	$L_{cable}(m)$	$R_{cable} (\Omega)$	$r (\Omega)$	$R_{rev} (\Omega)$
0.00 - 0.80	130	0,055	0,032	0,642
0.80 - 1.33	137	0,058	0,020	1,769
1.33 - 1.74	40	0,017	0,035	2,732
1.74 - 2.20	60	0,025	0,047	2,112
2.20 - 3.20	27	0,011	0,034	1,031
3.20 - 4.24	55	0,023	0,181	0,946
4.24 - 5.04	38	0,016	0,017	1,555
6.26 - 8.10	15	0,006	0,108	1,953

La figure (II.15) illustre la trajectoire du courant lorsqu'il sort de la conduite à travers la liaison par câble, démontrant ainsi le bon fonctionnement du poste de drainage polarisé.

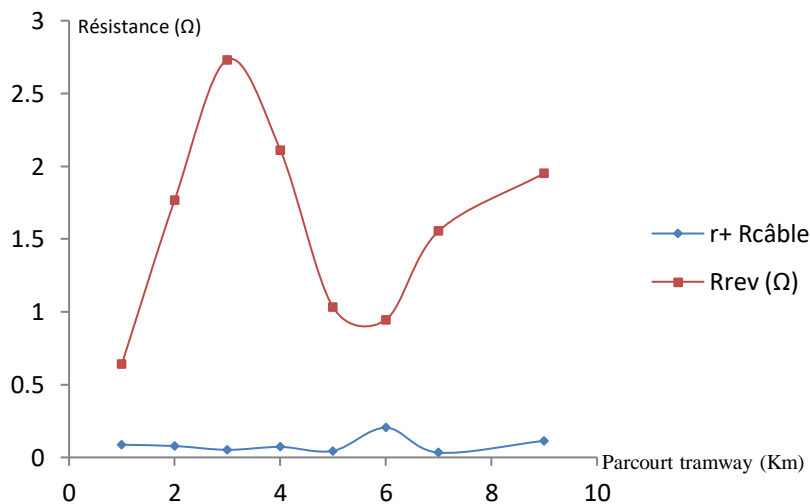


Figure II.15. Vérification du chemin de courant sortant de la canalisation.

Dans la figure (II.16), le courant atteint une valeur de 60 A en raison du fait que la première section du trajet du tramway est située en plein cœur de la ville. À cet endroit, il y a plusieurs conduites de différents diamètres et longueurs, ainsi qu'une densité de population élevée, ce qui entraîne une charge importante pour le tramway. Par conséquent, la sous-station doit fournir davantage de courant de traction, ce qui augmente la valeur du courant de fuite.

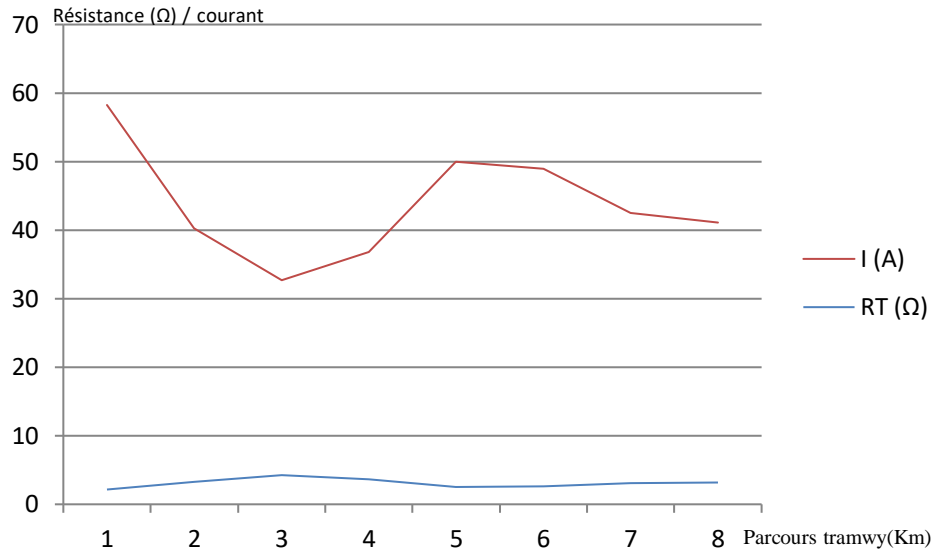


Figure II.16. Valeurs du courant et de la résistance R_T .

Le câble de liaison entre la conduite, le rail ou la sous-station électrique est généralement fabriqué avec un conducteur électrique qui a une âme en cuivre, le choix le plus courant, ou en aluminium pour des raisons économiques. Ce câble est isolé avec du polyéthylène pour résister aux effets néfastes de la teneur en chlorure présente dans le sol. De plus, il est logé dans un fourreau en PVC équipé d'un grillage avertisseur pour le protéger contre d'éventuels travaux réalisés par des tiers. Le choix du câble dépend de sa résistance à une température de 50 °C et de la valeur du courant qu'il doit supporter. Le tableau (II.12) présente les caractéristiques d'un câble en cuivre, aidant ainsi à faire un choix éclairé pour le câble de liaison.

Tableau II.12 : Caractéristiques électriques d'un câble en cuivre.

Section(mm ²)	$R_{50\text{ °C}}(\Omega)$	$I_{\text{limite}}(A)$
30	0,701	109
50	0,424	180
70	0,300	210
95	0,217	250
120	0,176	300
146	0,141	340
185	0,111	400

II.9. État du potentiel de la canalisation après le démarrage du tramway

L'étude de l'état de l'ouvrage influencé, en l'occurrence le réseau de gaz, joue un rôle essentiel lors du lancement opérationnel du tramway. Avant l'implantation du système de transport électrifié, cet ouvrage est protégé contre les effets de la corrosion électrochimique par un système de protection cathodique à courant imposé. Dans cette section, nous analysons comment le fonctionnement du tramway à proximité d'une canalisation métallique de gaz perturbe la valeur du potentiel entre la conduite et le sol le long du trajet de la traction électrifiée.

L'investigation de l'état du potentiel de la conduite se réalise à l'aide de points de contrôle appelés prises de potentiel (PP). Ces points sont implantés à des endroits spécifiques, notamment aux croisements ou parallélismes entre les rails du tramway et les conduites métalliques enterrées, ainsi qu'à proximité des zones où ces deux infrastructures sont étroitement espacées.

La figure (II.17) ci-dessous offre une description détaillée des divers signaux enregistrés pendant une période de 24 heures en un point de mesure (en prenant par défaut le point de mesure PP1 comme exemple).

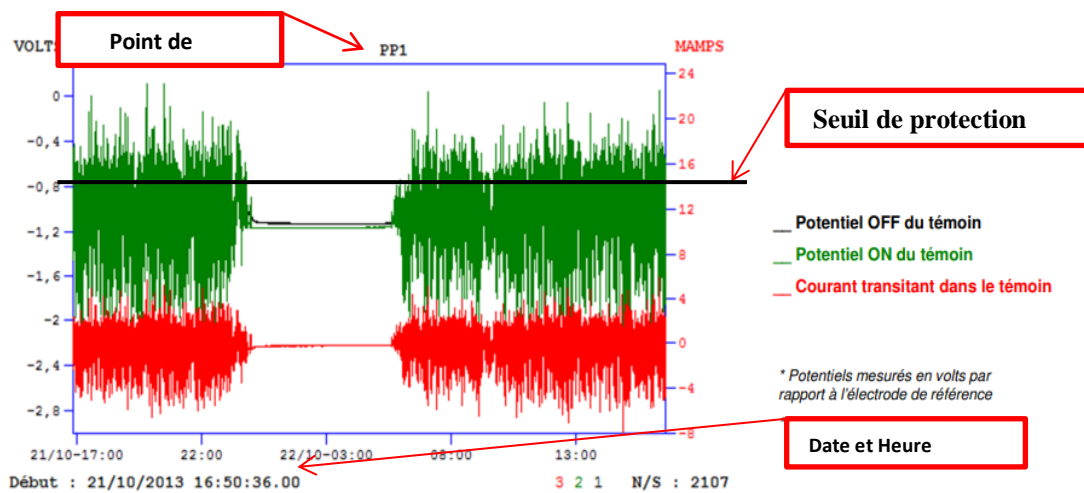
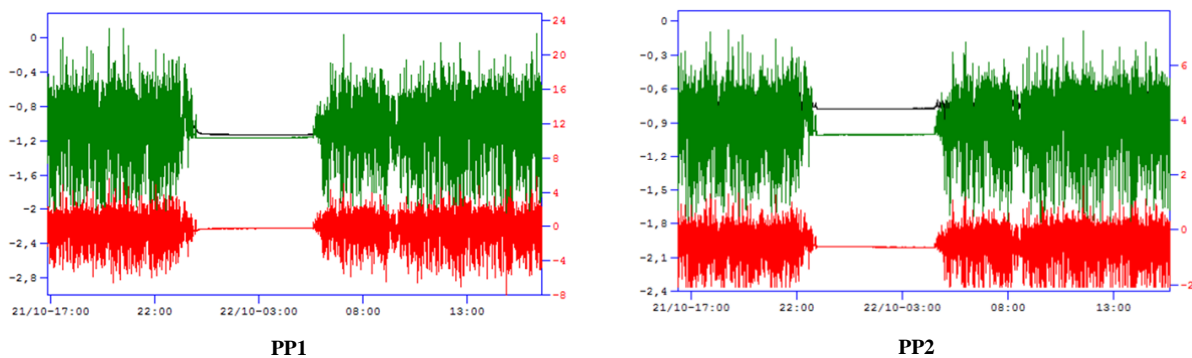
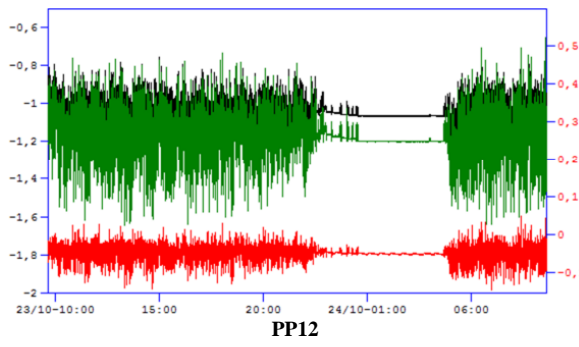
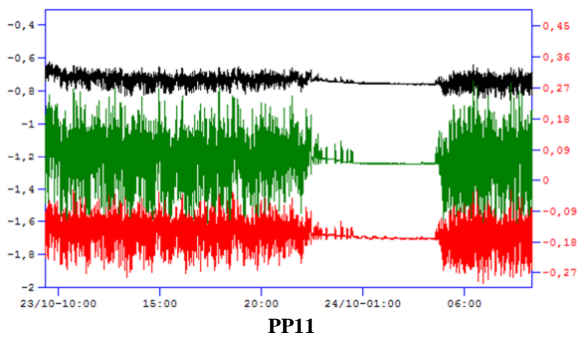
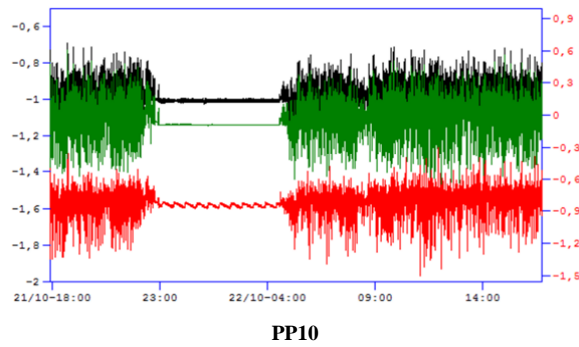
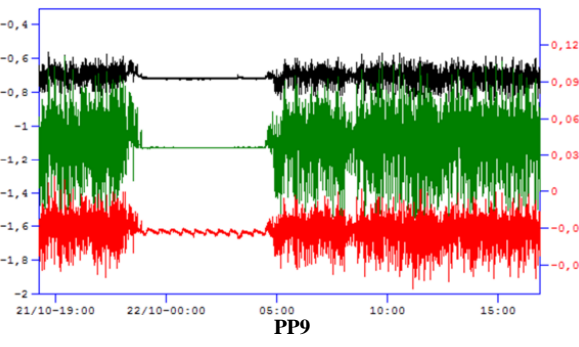
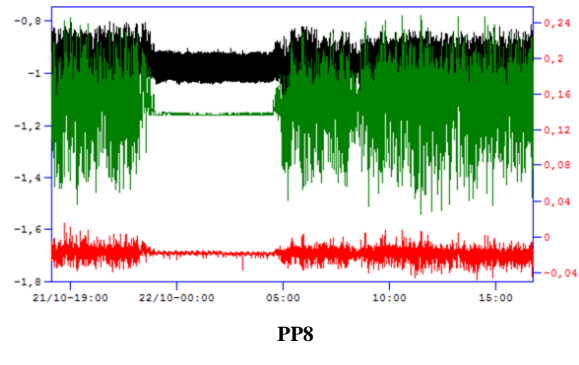
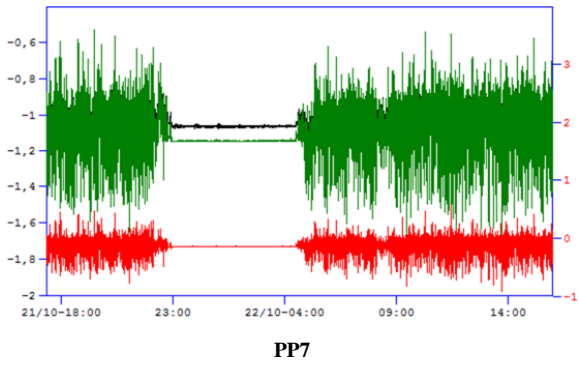
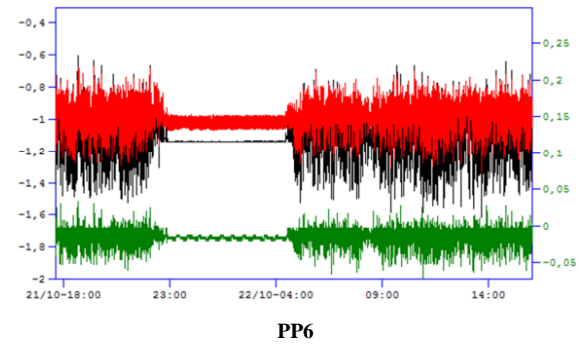
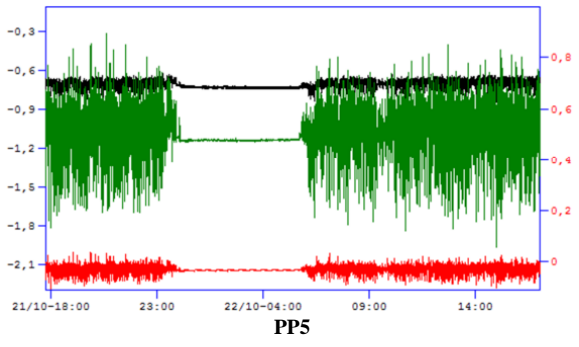
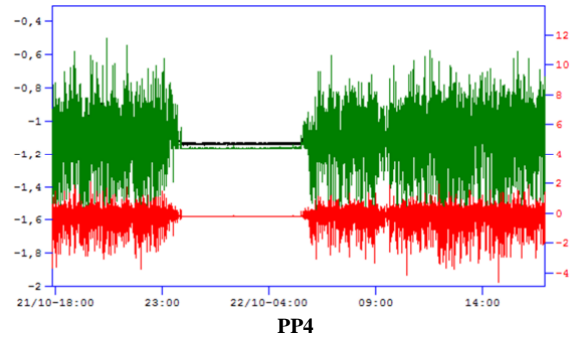
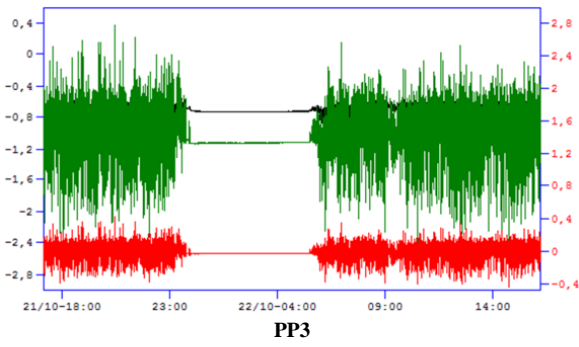
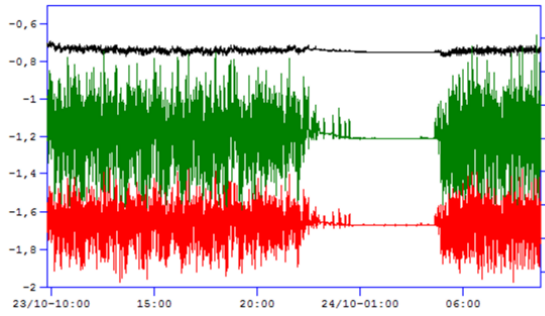


Figure II.17. Description d'un point de mesure PP1

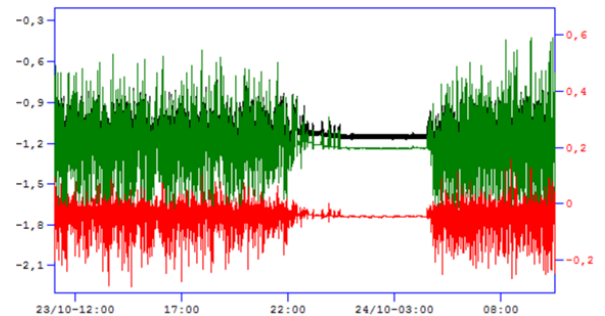
La figure (II.18) illustre l'état du potentiel et du courant dans chaque point de mesure le long du trajet du tramway. Il convient de noter que ces points de contrôle ont été installés à la demande du propriétaire de l'infrastructure concernée, à savoir la Direction de Distribution de Constantine, en collaboration avec le maître d'ouvrage, la société du métro d'Alger, et l'entreprise chargée de la réalisation.



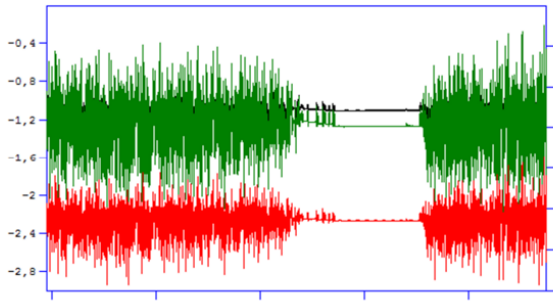




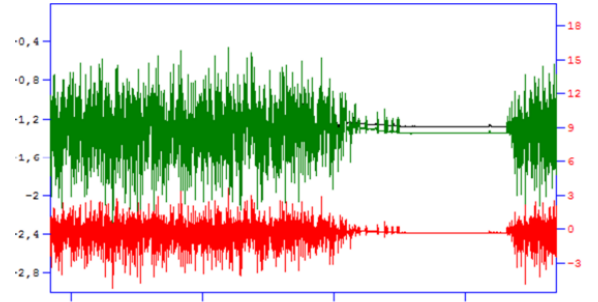
PP13



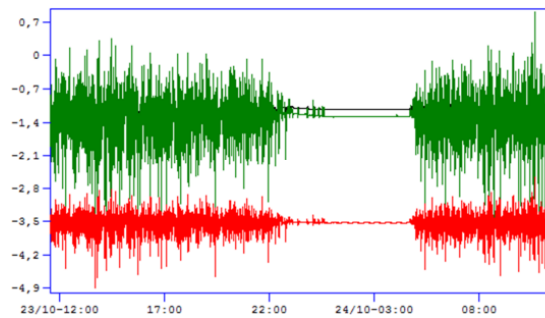
PP14



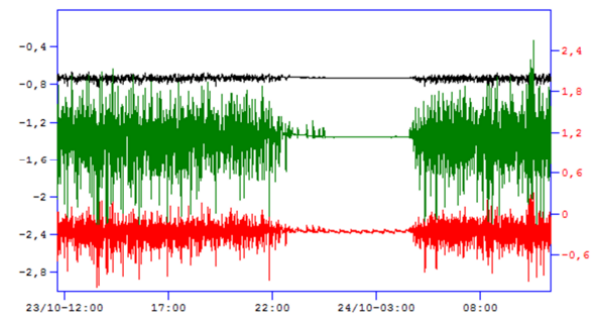
PP15



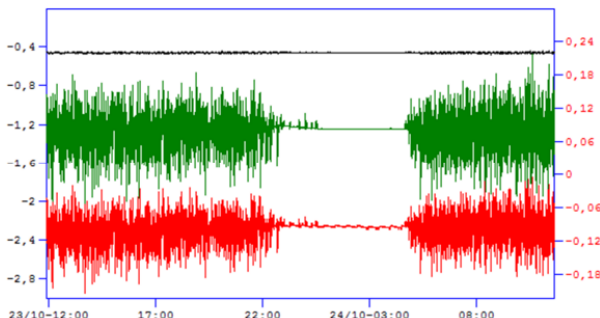
PP16



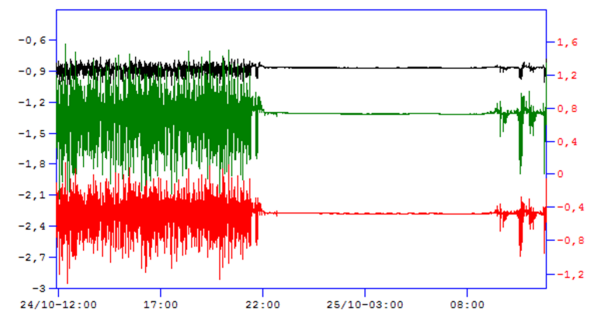
PP17



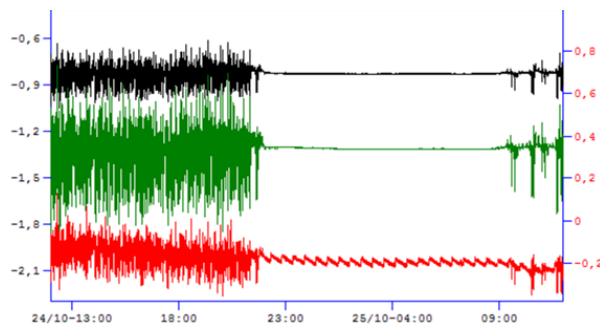
PP18



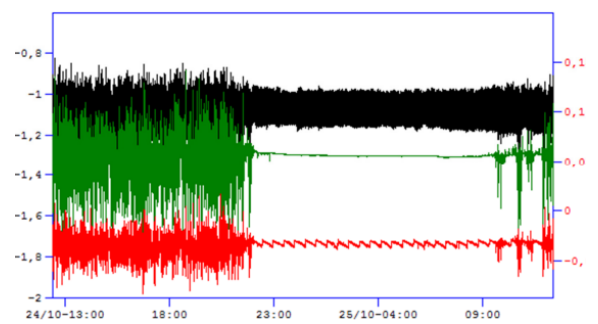
PP19



PP20



PP21



PP22

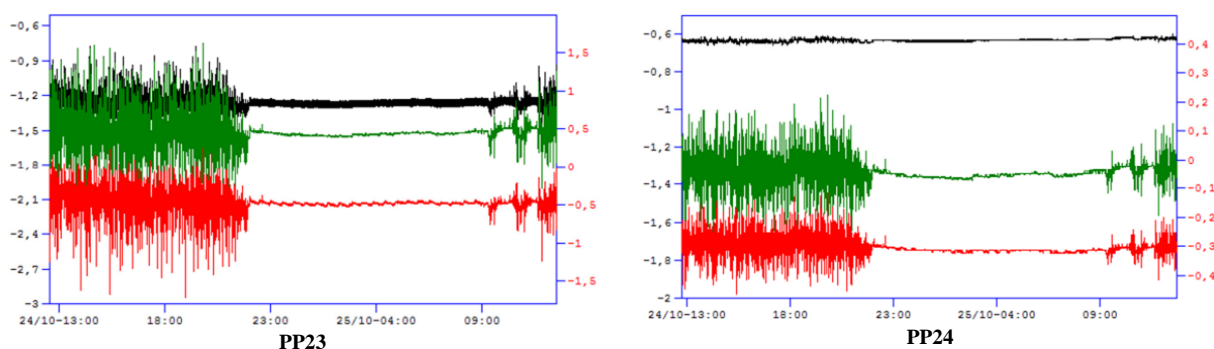


Figure II.18. Potentiel et courant relevés sur 24 points de mesure.

Une analyse des paramètres électriques de la conduite, à savoir le potentiel et l'intensité du courant, est présentée dans le tableau (II.13), accompagnée de commentaires appropriés.

Tableau II.13 : Interprétation des signaux de la figure (II.18).

PP N°	$E_{OFF} / \text{Cu/CuSO}_4$	Interprétation/Décision
PP1	-1012 mV	Sortie de courant Réseau sous PC, influence dommageable du tramway Installation d'un appareil de drainage à réaliser
PP2	-668 mV	Sortie de courant Réseau sous PC, influence dommageable du tramway Installation d'un dispositif de drainage à réaliser
PP3	-720 mV	Sortie de courant Réseau sous PC, influence dommageable du tramway Drainage à partir des PP1 et PP3
PP4	-698 mV	Sortie de courant ponctuelles Légère influence dommageable du tramway Installation d'un drainage à envisager
PP5	-1076 mV	Sortie de courant Réseau sous PC, influence dommageable du tramway Installation d'un drainage à envisager
PP6	-1010 mV	Sorties de courant ponctuelles Légère influence dommageable du tramway Installation d'un drainage à envisager
PP7	-978 mV	Sorties de courant ponctuelles Légère influence dommageable du tramway Installation d'un drainage à envisager
PP8	-976 mV	Aucune sortie de courant Réseau sous protection cathodique
PP9	-959 mV	Sorties de courant ponctuelles Réseau sous PC, très légère influence dommageable du tramway Installation d'un drainage à envisager
PP10	-702 mV	Aucune sortie de courant. Réseau sous protection cathodique
PP11	-732 mV	Aucune sortie de courant, réseau sous protection cathodique
PP12	-1038 mV	Sorties de courant ponctuelles Réseau sous PC, très légère influence dommageable du tramway Mise en place d'un drainage à envisager
PP13	-740 mV	Sorties de courant ponctuelles Réseau sous PC, très légère influence dommageable du tramway Mise en place d'un drainage à envisager

PP14	-878 mV	Sorties de courant ponctuelles Réseau sous PC, très légère influence dommageable du tramway
PP15	-1106 mV	Sortie de courant Réseau sous PC, influence dommageable du tramway Mise en place d'un drainage à envisager
PP16	-1074 mV	Sortie de courant Réseau sous PC, influence dommageable du tramway Mise en place d'un drainage à envisager
PP17	-1241 mV	Sortie de courant Réseau sous PC, influence dommageable du tramway Mise en place d'un drainage à envisager
PP18	-1113 mV	Sortie de courant Influence dommageable du tramway Drainage à partir des PP18 et PP21
PP19	-727 mV	Sorties de courant ponctuelles Réseau sous PC, très légère influence dommageable du tramway Drainage à partir des PP18 et PP21
PP20	-455 mV	Aucune sortie de courant Mauvaise polarisation du témoin métallique Drainage à partir des PP19 et PP20
PP21	-868 mV	Sorties de courant ponctuelles Réseau sous PC, très légère influence dommageable du tramway Mise en place d'un drainage à envisager
PP22	-822 mV	Sorties de courant ponctuelles Réseau sous PC, très légère influence dommageable du tramway Drainage au PP22 et PP24
PP23	-1086 mV	Aucune sortie de courant Réseau sous protection cathodique
PP24	-632 mV	Aucune sortie de courant Mauvaise polarisation du témoin métallique

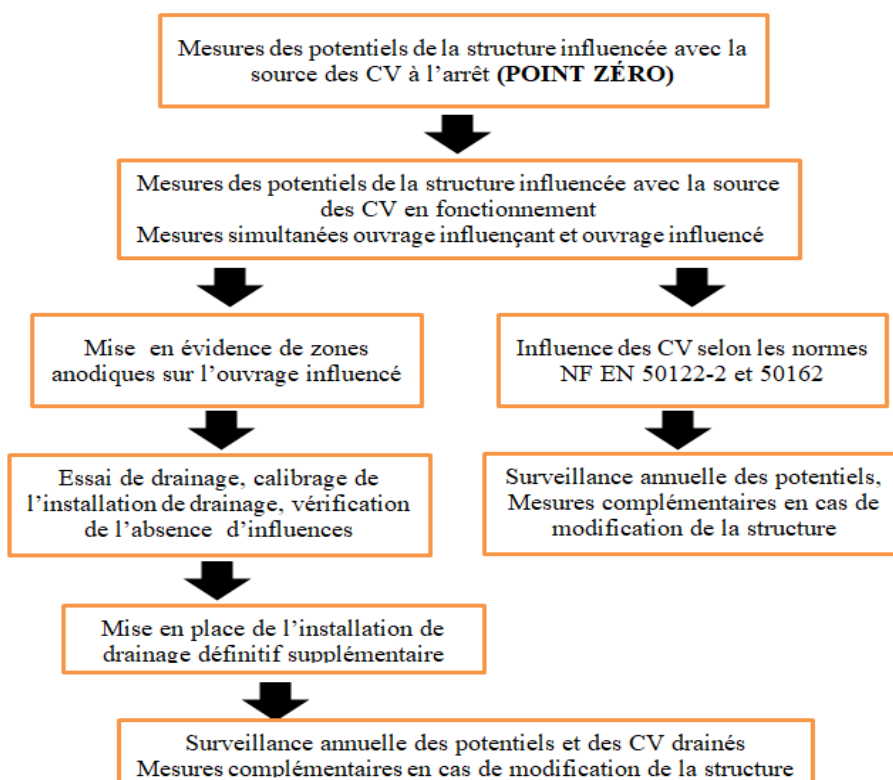


Figure II.19. Organigramme du guide de bonne pratique.

L'organigramme illustré dans la figure II.19 revêt une importance cruciale dans le domaine de la protection cathodique des structures exposées aux courants vagabonds générés par des sources de courant continu. Son rôle essentiel est de servir de guide exhaustif des bonnes pratiques, fournissant ainsi une feuille de route claire pour les professionnels responsables de la surveillance et de la mesure de l'état de ces structures, conformément aux normes actuellement en vigueur.

L'illustration en question agit donc comme un outil précieux, aidant les professionnels à mettre en place des mesures préventives efficaces. En suivant étape par étape les procédures recommandées, les opérateurs peuvent garantir que la protection cathodique reste optimale et que les structures demeurent à l'abri de la corrosion, même dans des conditions environnementales exigeantes. En fin de compte, cela contribue à prolonger significativement la durée de vie utile des infrastructures et à assurer leur fonctionnalité et leur sécurité à long terme, tout en minimisant les coûts de maintenance.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude est menée sur l'influence du système de traction électrifiée sur une infrastructure métallique enterrée à proximité. Cette infrastructure est protégée par une protection cathodique contre les effets néfastes de la corrosion électrolytique, mais elle peut être menacée par un autre type de corrosion complexe liée à l'effet électrique des courants continus. Le premier point aborde brièvement le phénomène de corrosion par courants vagabonds. Le deuxième point décrit la source de pollution liée au tramway de la ville de Constantine. Le troisième point présente la structure affectée, à savoir le réseau de gaz en acier de la même ville.

En conclusion, une analyse basée sur les données collectées sur site est réalisée pour estimer le courant drainé. Cette analyse examine également l'état du potentiel de la conduite en termes de sécurité et de risque de corrosion. Ce contrôle a été effectué sur 24 points lors des premiers essais en vue de la mise en service du tramway. Finalement, une analyse basée sur les données relevées sur site est réalisée pour estimer le courant drainé, avec une investigation sur l'état du potentiel de la conduite en termes de sécurité et de risque de corrosion.

Cette étude est d'une importance cruciale en tant que guide technique essentiel pour les exploitants du réseau de gaz, en particulier en ce qui concerne le problème de corrosion induite par les courants vagabonds, pour lequel les principes de maîtrise ne sont pas encore clairement établis. Cette étude explore les moyens de prévention de ce phénomène, qui entraîne des dommages significatifs aux conduites métalliques enfouies à proximité.

Chapitre III

Optimisation du comportement des courants vagabonds grâce à l'intelligence artificielle

Chapitre III

Optimisation du comportement des courants vagabonds grâce à l'intelligence artificielle

III.1. Introduction

L'utilisation de méthodes de recherche basées sur l'intelligence artificielle pour prédire des scénarios ou des systèmes d'aide à la décision est largement reconnue ces dernières années. Les données utilisées dans ce travail sont purement expérimentales, combinant les paramètres électriques d'une structure de gaz enterrée sous protection cathodique et les paramètres des sols obtenus par des essais in-situ le long du trajet du tramway. Autrement dit, ces paramètres de sols couvrent la superficie où se trouvent les conduites métalliques enterrées ainsi que le parcours du tramway.

Dans ce chapitre, l'analyse des données recueillies dans 23 points de contrôle, effectuée à l'aide de techniques avancées d'apprentissage automatique, notamment les réseaux de neurones artificiels (ANN), la Méthode des moindres carrés, et la régression pas à pas (stepwise) avec interaction filtrée par la méthode Lasso, vise à examiner les répercussions des courants vagabonds en courant continu, une problématique inédite en Algérie. De plus, une analyse de sensibilité est entreprise grâce à l'algorithme de simulation de Monte Carlo, permettant ainsi de valider la méthode employée. Enfin, une analyse des données par la méthode inverse, consistant à inverser le paramètre d'entrée par l'un des paramètres de sortie, est réalisée. Cette étude repose sur l'utilisation de données authentiques collectées dans les environs du réseau de tramway de la ville de Constantine en Algérie.

III.2. Paramètres électriques

L'ouvrage influencé, désigné comme le réseau de distribution du gaz en acier, est protégé par un système de protection à courant imposé. Après la mise en service du tramway, le concessionnaire a installé des points de mesure et de contrôle le long du parcours de la traction électrifiée. Ils ont été placés dans des endroits spécifiques où il y a une intersection ou une proximité avec la source de pollution, ainsi que d'autres ouvrages métalliques sous protection, tels que le réseau de transport du gaz ou des hydrocarbures.

L'idée pour maintenir la protection du métal est de limiter l'intervalle d'immunité entre une valeur maximale du potentiel (E_{\max}) et une valeur minimale (E_{\min}). On choisit E_{\max} en fonction de la durée de vie du film protecteur (revêtements), car certains revêtements à haute résistance d'isolement ne peuvent pas être utilisés sur certaines conduites, car elles ne tolèrent pas l'effet de sur-polarisation (E_{\max} très négatif). C'est le cas des conduites revêtues d'hydrocarbures ou du type C [105], ce qui affecte leur durée de vie lorsqu'elles atteignent la période de vieillissement. À partir du diagramme (potentiel/pH), on fixe la valeur du potentiel $E_{p_{\min}}$. Par exemple, le fer est protégé lorsque la valeur du potentiel est inférieure à -850 mV par rapport à l'électrode (Cu/CUSO₄), comme illustré dans la figure (III.1).

Les équations (III.1) et (III.2) sont utilisées pour distinguer les valeurs extrêmes du gain de potentiel que la canalisation subit par rapport au potentiel spontané E_n , qui est une caractéristique naturelle du sol, dans des conditions de protection cathodique. Ces valeurs sont désignées respectivement par $E_{a_{max}}$ et $E_{a_{min}}$. Les différentes valeurs numériques des potentiels sont exposées dans le tableau (III.1) [105].

$$E_{a_{max}} = E_{p_{max}} - E_n \quad Eq(III.1)$$

$$E_{a_{min}} = E_{p_{min}} - E_n \quad Eq(III.2)$$

Tableau III.1 : Valeurs numériques du potentiel.

Potentiel	mV/ Electrode (Cu/CuSO ₄)
Potentiel naturel E_n	-450
Potentiel de protection $E_{p_{max}}$	-1250
Potentiel de protection $E_{p_{min}}$	-950
Gain de potentiel $E_{a_{max}}$	-800
Gain de potentiel $E_{a_{min}}$	-500

Pour une conduite finie de longueur L le potentiel et le courant à l'origine sont [105] :

Au point $x = 0$

$$E_0 = E_L \cosh \alpha L \quad Eq(III.3)$$

$$I_0 = \frac{E_L}{\gamma} \sinh \alpha L \quad Eq(III.4)$$

Au point $x = L$

$$E_x = \frac{E_0 \cosh \alpha(L - x)}{\cosh \alpha L} \quad Eq(III.5)$$

$$I_x = \frac{E_0 \sinh \alpha(L - x)}{\gamma \cosh \alpha L} \quad Eq(III.6)$$

Avec α et γ sont le coefficient d'atténuation et la résistance caractéristique de la conduite.

Les équations précédentes (III.3), (III.4), (III.5) et (III.6) montrent que le potentiel d'une conduite évolue en fonction de la distance entre la conduite et la source d'injection de courant (entrant/sortant). Cette variation est également influencée par le facteur d'atténuation α , qui reflète la constante de répartition du potentiel le long de la conduite et traduit la décroissance du potentiel le long des bras potentiels [105]. La représentation de la variation du potentiel le long de la conduite est fournie dans la figure (III.1).

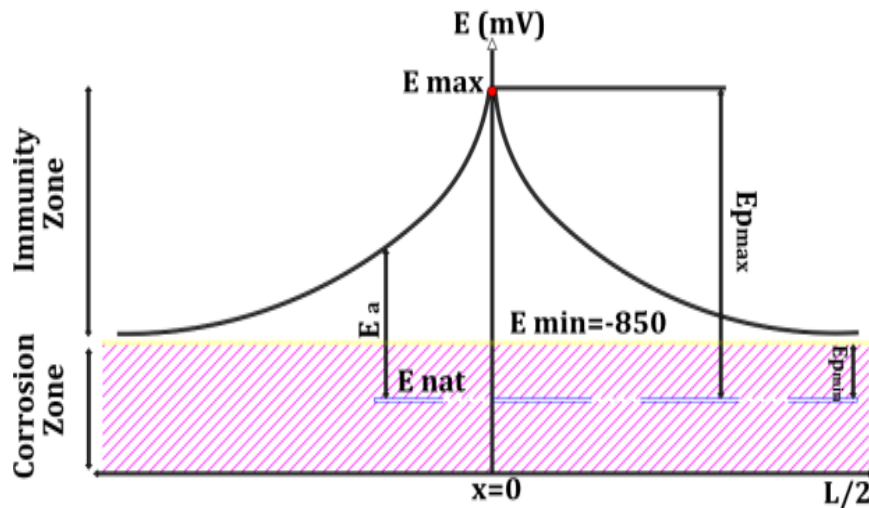


Figure III.1. Variation du potentiel le long de la conduite.

Dans cette expérience, les mesures sont effectuées sur 23 points de contrôle le long du trajet du tramway, sur une longueur d'environ 8,9 km où la ligne du tramway est installée. Ces points de contrôle sont implantés dans des endroits critiques entre les rails de roulement et la conduite de gaz en acier, en tenant compte des points de croisement, des points parallèles, des rails sur un pont métallique et de la distance entre la conduite et le rail. La figure (III.2) illustre le schéma des points de contrôle le long du chemin du tramway.

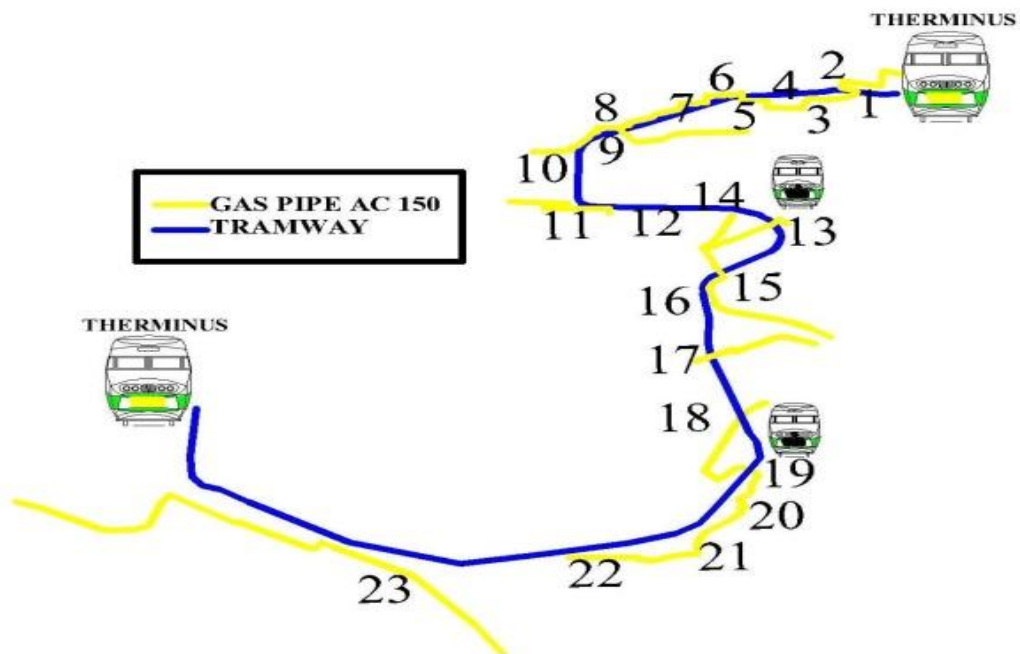


Figure III.2. Localisation des positions de mesures en voisinage du tramway.

III.2.1. Matériels de mesures

La mesure du potentiel et du courant est assurée par un dispositif plus performant, en l'occurrence le MINILOG 2. Grâce à ce dispositif, les chercheurs ont pu élaborer un outil d'enregistrement portable et performant capable de stocker les données dans une mémoire suffisamment grande [106]. Il est simple à manipuler et permet d'enregistrer automatiquement grâce à la fonction Auto-Range, ce qui le rend compatible pour les mesures de sol relatives à la corrosion. Cet appareil assure l'enregistrement des potentiels et des courants pendant 24 heures

sans interruption, ainsi qu'un enregistrement du potentiel en mode OFF et en mode ON. Le logiciel WINLOG 2.0 accompagne cet appareil [106,107].

La figure (III.3) illustre les deux dispositifs de l'enregistrement.



Figure III.3. Les dispositifs de mesures des paramètres électriques [106].

Les paramètres électriques sont enregistrés à l'aide d'un témoin métallique enfoui dans le sol à proximité de la canalisation à protéger. Ce témoin est relié à la canalisation par une liaison câblée, et sa bague est fabriquée dans le même matériau que celui de la canalisation. Le témoin simule ainsi une surface de la canalisation qui pourrait présenter un défaut d'isolement. Il permet de mesurer le potentiel sur cette surface, dont les dimensions sont maîtrisées, car la surface du témoin est connue.

L'intérêt du témoin est également de permettre, à l'aide d'un enregistreur de coupure Minilog [108], d'effectuer des mesures (potentiel / courant) en ON (témoin raccordé à la canalisation donc protégé cathodiquement) et en OFF (témoin isolé de la canalisation par ouverture de shunt donc non protégé cathodiquement). Cette configuration permet en outre une mesure du courant (entrant ou sortant) de la conduite, permettant ainsi de déterminer le caractère dommageable ou non de l'influence de la conduite. Le principe est schématisé dans la figure (III.4).

Les mesures sont effectuées sur une période de 24 heures afin de prendre en compte l'ensemble des influences possibles sur la canalisation. L'enregistreur est équipé d'un dispositif de coupure permettant de sectionner la liaison entre la canalisation et le témoin métallique. Il est important de noter que le temps d'interruption de la liaison ne dépasse pas quelques millisecondes, tandis que le cycle total ne dépasse pas une seconde.

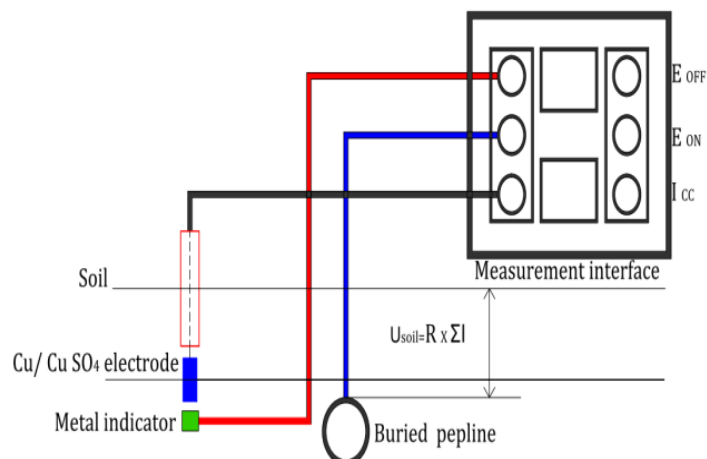


Figure III.4. Mesures et enregistrements des paramètres électriques.

Les mesures sont effectuées conformément à la norme NF EN 12954 pour les structures métalliques enterrées ou immergées sous la protection cathodique. En présence de courants vagabonds, la norme applicable est NF EN 50162 pour la protection des structures contre la corrosion par courants vagabonds provenant du système de la traction par courant continu [109]. Le tableau (III.2) détaille le décalage positif acceptable de la chute de potentiel ΔU pour les structures métalliques sans protection cathodique.

Tableau III.2 : Critère de décalage positif acceptable du potentiel ΔU .

Métal de la structure	Résistivité du sol ρ (Ωm)	Décalage positif maximum du potentiel ΔU (mV) y compris la chute ohmique RI	Décalage positif maximum du potentiel ΔU (mV) non compris la chute ohmique RI
Acier, Fonte	≥ 200	300	20
	15 à 200	$1.5 \times \rho$	20
	< 15	20	20

Les figures (III.5) et (III.6) illustrent la mesure du potentiel en présence et en absence du système de protection cathodique, autrement dit en présence de la chute ohmique ou en son absence.

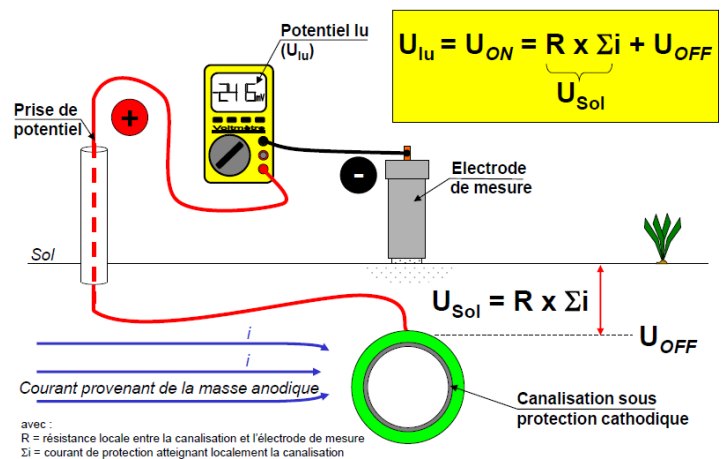
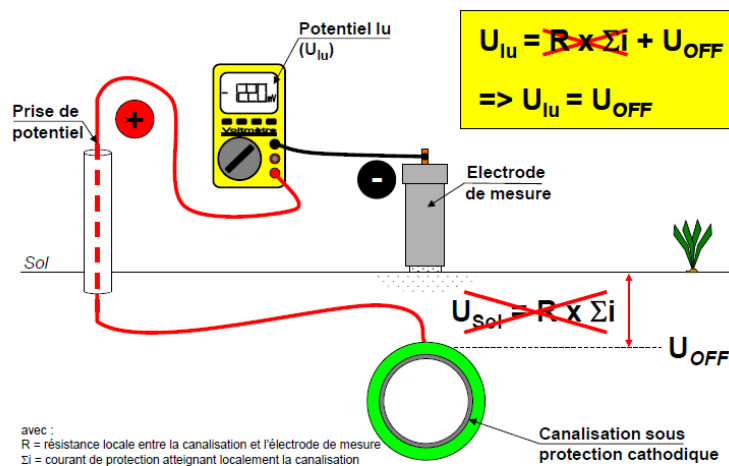


Figure III.5. Mesure à courant établi (mesure en ON).



Mesures à réaliser en absence de courants vagabonds

Figure III.6. Mesure à courant coupé (mesure en OFF).

III.2.2. Potentiel en présence des courants vagabonds

En présence des courants vagabonds, la valeur du potentiel varie à chaque passage du tramway, passant de -909 mV à -2400 mV (voir figure III.7).



Figure III.7. Valeurs du potentiel avant et après le passage du tramway.

Cette variation rend le potentiel (conduite/sol) plus négatif, créant ainsi une sur-polarisation autour de la conduite. Cela peut entraîner un risque de décollement du revêtement sur la paroi de la structure métallique, en particulier lorsque le revêtement atteint la phase de vieillissement. La figure ci-après montre ce changement de potentiel.

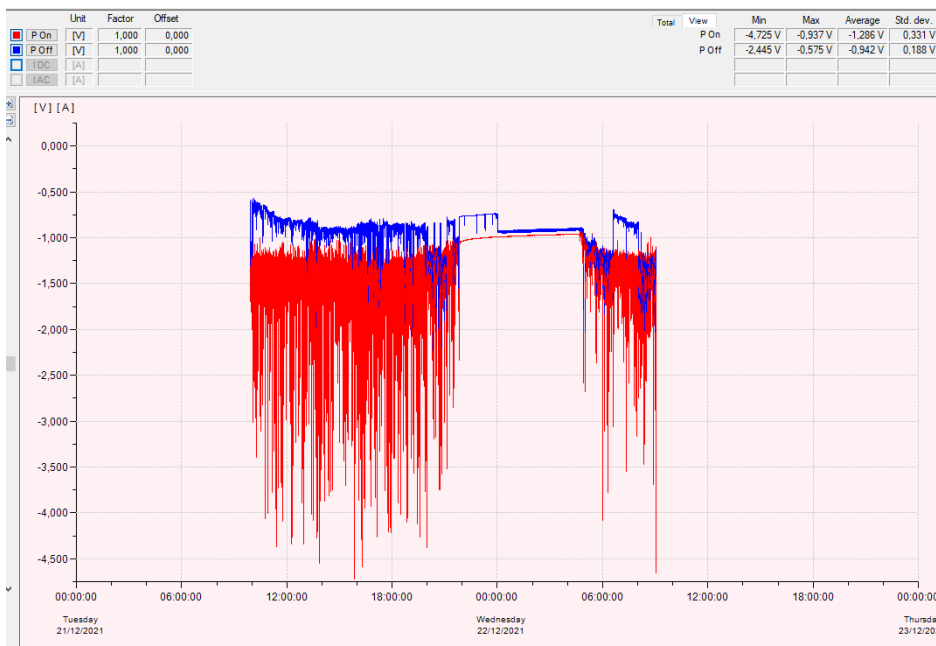


Figure III.8. Variation du potentiel ON/OFF pendant 24 heures.

Dans la figure (III.8), nous pouvons observer la variation du potentiel enregistré sur une période de 24 heures au point de mesure N° 18, relevé le 23/12/2021. Quelques pics de courant sortant de la canalisation sont observés, mais ils n'ont aucune influence dommageable sur la conduite. Cependant, l'entrée du courant avec des valeurs atteignant -2500 mV a un impact sur la protection passive et provoque le décollement du film protecteur. Une période de stabilité du potentiel est observée entre 00h00 et 06h00 du matin, ce qui correspond à la période où le tramway est hors service. Pendant cette période d'arrêt, la valeur du potentiel reflète la valeur réelle du courant injecté par la source du courant continu (CPS), car l'effet du courant vagabond est presque nul.

III.3. Paramètres physico-chimiques du sol

Dans cette section, les paramètres du sol où se trouve la ligne du tramway à proximité des conduites de gaz sont mesurés in situ, c'est-à-dire qu'ils sont mesurés sur le site même, sans être déplacés vers un laboratoire où leur composition pourrait être altérée, ou où leur comportement physique et chimique, tels que la densité, la porosité, la résistance et la perméabilité, pourrait être modifié. Ces paramètres du sol in situ sont généralement mesurés à l'aide de techniques de forage ou de carottage [110].

La Figure (III.9) illustre les résultats obtenus par Sandage grâce au carottage des différentes couches de sol aux emplacements traversés par les lignes de chemin de fer électrifiées. Les échantillons sont prélevés à plusieurs profondeurs. Cependant, les paramètres du sol utilisés dans cette étude sont relevés à une profondeur de 1 à 3 mètres, car les réseaux de gaz sont enfouis dans cette profondeur (voir annexe III et IV), [111].



Figure III.9. Échantillons du sol par carottage du projet tramway Constantine [111].

De nombreuses recherches sur le contrôle du potentiel et l'estimation de la valeur du courant vagabond sont basées sur la résistivité du sol. Cependant, la valeur de cette dernière dépend d'autres paramètres physiques du sol, tels que l'humidité volumétrique (teneur en eau), l'indice d'Atterberg (plasticité), le potentiel d'hydrogène et la densité du sol.

Dans cette étude, l'objectif est de rechercher une corrélation entre ces différents paramètres afin de prédire l'un des paramètres associés à la conduite sous surveillance. Il est à noter que le courant circulant autour de la conduite prend la même valeur que celle du témoin métallique connecté à la conduite en cours de surveillance.

Le tableau (III.3) résume les différents paramètres à étudier et à choisir en fonction de la disponibilité des données collectées

Tableau III.3 : Paramètres à étudier.

Désignation du donnée	Symbole	Unité
Potentiel moyen de la conduite en ON	E_{ON}	mV
Courant continu circulant dans le sol	I_{cc}	μA
Distance entre conduite et rail	D	M
Résistivité du sol	ρ	$\Omega.m$
Humidité	W	%
Indice de Plasticité	I_p	%
Saturation du sol	S_r	%
Densité du sol	D_s	gcm^{-3}

Il est à noter que le choix des paramètres du sol dépend de la disponibilité de l'ensemble des paramètres pour chaque point de contrôle. Autrement dit, si l'un des paramètres n'a pas de valeur pour un point donné, le programme ne pourra pas être exécuté.

Le paramètre du potentiel d'hydrogène, noté pH, est un facteur crucial dans l'étude des sols. En général, la plupart des sols ont un pH compris entre 4 et 8, ce qui est considéré comme un niveau de corrosivité faible [108]. Dans notre cas, la valeur du pH varie entre 6,7 et 7,3 sur le site où se trouvent les deux sources (polluante et influencée). Par conséquent, on peut considérer que le sol est homogène, ce qui signifie qu'il présente un environnement neutre et une faible corrosivité, comme le montre la figure III.10

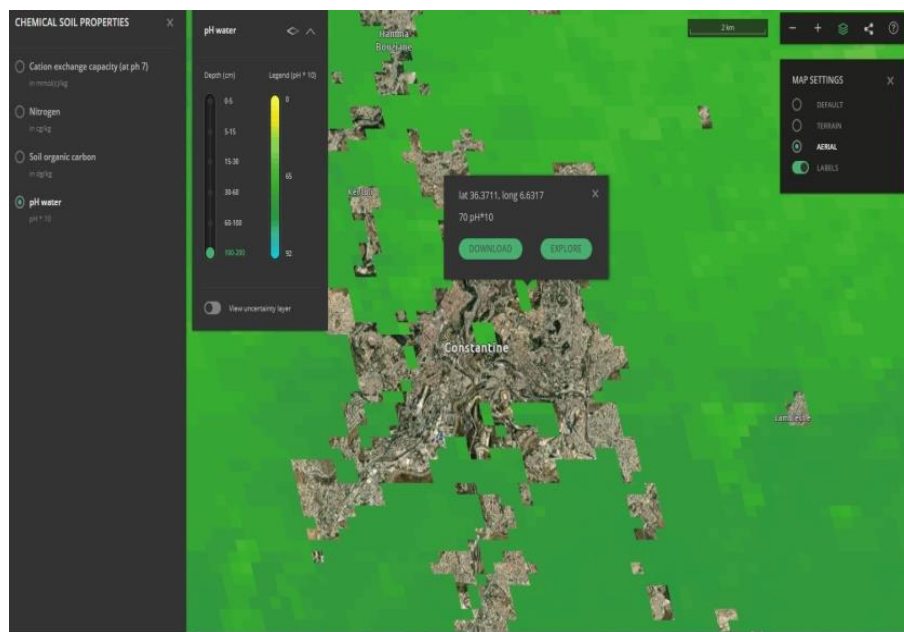


Figure III.10. Estimation du pH dans la ville de Constantine.

Toutes les données collectées pour cette étude expérimentale, y compris les paramètres électriques, les caractéristiques physico-chimiques du sol et les distances entre les tuyaux et les rails, sont résumées dans le tableau (III.4). La figure (III.11) illustre la surveillance régulière des installations gazières et la mise en place de l'appareillage d'enregistrement pour la collecte de mesures sur une période de 24 heures.



Figure III.11. Enregistrement des paramètres électriques.

Tableau III.4 : Données collectées.

N° PP	E _{ON} V	I _{CC} μA	D M	P Ω.m	W %	I _p %	Sr %	D _s g/cm ³
1	-1.402	656	6	27,92	18,90	22,10	99,17	1,76
2	-1.390	117	8	28,4	17,20	19,30	87,01	1,74
3	-1.257	494	21	31,05	23,90	23,40	94,10	1,62
4	-1.397	53	14	46,6	13,70	20,74	88,16	1,88
5	-1.329	1291	5	58,25	16,34	23,30	97,16	1,85
6	-1.285	1782	9	58,25	19,05	20,40	98,80	1,76
7	-1.348	244	17	31,89	19,05	20,40	98,80	1,76
8	-1.289	4	18	31,65	21,01	25,50	94,10	1,77
9	-1.313	19	14	49,17	22,31	32,45	91,25	1,75
10	-1.142	4258	28	40,2	18,47	20,70	87,21	1,80
11	-1.244	12	11	30,25	15,03	17,52	81,56	1,78
12	-1.244	70	9,5	22,98	18,97	32,33	64,95	1,49
13	-1.236	19	25,7	18,57	17,70	25,30	94,10	1,77
14	-1.277	103	16,7	16,75	20,20	29,80	97,60	1,72
15	-1.286	36	15,5	17,23	15,00	26,30	75,70	1,74
16	-1.259	7	17	17,68	17,40	25,30	100,00	1,83
17	-1.293	394	26,8	20,45	15,30	30,40	89,70	1,83
18	-1.364	267	32	41,95	23,30	23,50	99,90	1,64
19	-1.295	484	37,2	41,95	19,90	32,80	85,60	1,65
20	-1.347	44	39,1	109,65	21,10	28,10	91,10	1,64
21	-1.352	16	15,9	126,19	14,44	17,28	85,82	1,83
22	-1.238	18	54	13,1	18,02	27,48	90,92	1,74
23	-1.223	62	60	13,1	13,70	20,74	88,16	1,88

III.4. L'intelligence artificielle pour la modélisation des courants vagabonds

Dans cette étude, afin d'assurer la fiabilité des analyses, plusieurs méthodes basées sur l'apprentissage automatique ont été employées, notamment le réseau de neurones artificiels et la méthode Lasso. Cette dernière est une technique de réduction des coefficients de régression introduite par Tibshirani (1996). En général, cette méthode est utilisée lorsque les coefficients de régression manquent de stabilité et en présence de colinéarité, cette instabilité se manifestant notamment lorsque l'équation de régression comporte un grand nombre de variables. Pour plus de détails [112]. Le paramètre lambda de l'algorithme de la méthode Lasso utilisé dans cette étude consiste en une série de valeurs. Les résultats ont été obtenus en utilisant le logiciel MATLAB.

Les réseaux de neurones artificiels (ANN) sont des outils efficaces pour prédire et contrôler les courants vagabonds dans les systèmes de traction électrifiée. En utilisant des données en temps réel, les ANN identifient les facteurs à l'origine de ces courants et proposent des stratégies d'atténuation. Leur utilisation permet d'optimiser la stabilité et la fiabilité des infrastructures électriques, offrant ainsi une solution innovante à ce problème complexe.

III.4.1. Brève description des réseaux de neurones artificiels (ANN)

Lorsqu'ils traitent des échantillons ayant chacun une "entrée" et une "sortie" connues, les réseaux neuronaux sont applicables (ou sont formés) [113] en créant des associations pondérées par des probabilités entre les deux, qui sont ensuite stockées dans la structure de données du réseau. Pour former un réseau neuronal à partir d'un exemple donné, on compare souvent la sortie traitée du réseau (souvent une prédiction) à la sortie souhaitée.

L'erreur réside dans cette différence. Le réseau modifie ses associations pondérées en utilisant cette valeur d'erreur et une stratégie d'apprentissage. Le réseau neuronal créera une sortie de plus en plus comparable à la sortie cible au fur et à mesure des ajustements effectués au fil du temps. La formation peut être interrompue lorsqu'elle a subi un nombre suffisant de ces modifications et qu'elle répond à des exigences spécifiques. C'est ce que nous appelons l'apprentissage guidé. L'équation (III.7) décrit le modèle mathématique d'un neurone.

$$u = \sum_i^N w_i x_i + b \tag{Eq(III.7)}$$

L'estimation de la sortie du modèle est exprimée par l'équation (III.8) :

$$\hat{y} = \phi(u) \tag{Eq(III.8)}$$

Où y est la sortie du modèle, \hat{y} est une estimation de y , W est le poids associant l'entrée i au neurone caché j , et x_i représente la valeur de l'entrée. La fonction d'activation non linéaire est la fonction ϕ . Il est possible d'appliquer une variété de fonctions d'activation, dont certaines comprennent la sigmoïde, la tangente hyperbolique et la gaussienne. La fonction de coût est décrite comme suit dans l'équation (III.9):

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (e_n)^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y - \hat{y})^2 \tag{Eq(III.9)}$$

Où N est le nombre de termes d'erreur. En raison de sa courbe d'apprentissage rapide et de sa précision, l'algorithme de Levenberg-Marquardt est l'algorithme d'optimisation le plus répondu. Il est représenté comme suit dans l'équation (III.10):

$$W_{k+1} = W_k - (J_K^T J_K - \mu I)^{-1} J_K^T E \tag{Eq(III.10)}$$

Où W représente le poids de l'ANN et J la matrice jacobéenne. En ce qui concerne les paramètres d'apprentissage, I désigne la matrice d'identité, E l'erreur totale pour tous les modèles, et μ est le paramètre d'apprentissage.

L'architecture de la technique ANN est schématisé dans la figure (III.12)

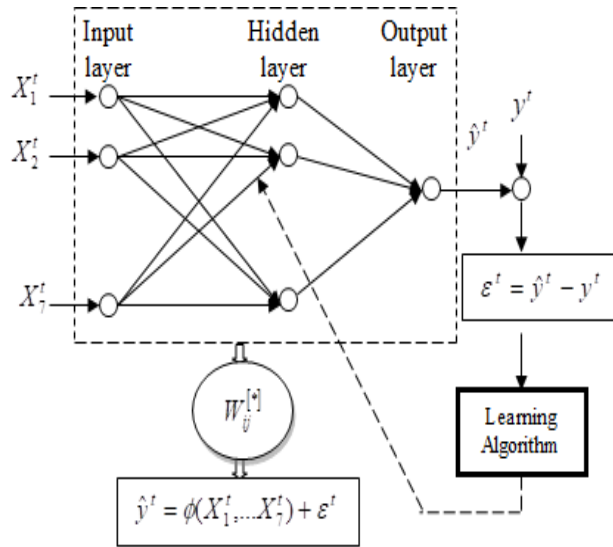


Figure III.12. Architecture de la technique ANN.

III.4.2. Analyse de sensibilité par simulation de Monte-Carlo

Une série d'approches algorithmiques connues sous le nom de méthode Monte Carlo est appliquée afin de calculer des approximations de valeurs numériques à l'aide de processus aléatoires ou de méthodes probabilistes. Ces techniques ont été créées par Nicholas Metropolis en 1947, et leur nom, qui fait référence à une inspiration tirée des jeux de hasard au casino de Monte Carlo, a été publié pour la première fois en 1949 [114]. De plus, sur la base de l'analyse de sensibilité de la fonction du modèle, le guide de l'incertitude de mesure (GUM) est utilisé pour estimer l'incertitude de type B. En spécifiant la relation entre les entrées ($x_1, x_2... x_n$) et la sortie y, le modèle est créé dans l'équation (III.11).

$$y = (x_1 + x_2 \dots \dots + x_n) + \varepsilon \tag{Eq(III.11)}$$

Où $\varepsilon \in N(0, \sigma)$ est une erreur résiduelle de la prévision qui a un écart type de un et est normalement distribuée avec une valeur moyenne de σ . La variation de y est obtenue par la forme dérivée de l'équation (III.12)

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial^2 y}{\partial x_1^2} \Delta x_1^2 + \frac{\partial^2 y}{\partial x_2^2} \Delta x_2^2 + \dots + \frac{\partial^2 y}{\partial x_n^2} \Delta x_n^2 + \dots + \frac{\partial^m y}{\partial x_1^m} \Delta x_1^m + \frac{\partial^m y}{\partial x_2^m} \Delta x_2^m + \dots + \frac{\partial^m y}{\partial x_n^m} \Delta x_n^m + \mathbf{0}(\Delta x_1, \Delta x_1, \dots, \Delta x_n) \tag{Eq(III.12)}$$

III.4.3. Applications sur les défauts de corrosion par courants vagabonds

Dans cette section, nous exposons la structure du modèle du processus de courant vagabond, illustrée dans la Figure (III.13). Le modèle des entrées et sorties expérimentales est détaillé dans le Tableau (III.5), ainsi que dans les Figures (III.14) et (III.15). Les prédictions du courant continu en fonction des données d'entrée (voir Tableau III.4) sont présentées dans la Figure (III.17), suivies des résultats d'une analyse de sensibilité combinée obtenue à l'aide de la technique MTC-ANN dans la Figure (III.18).

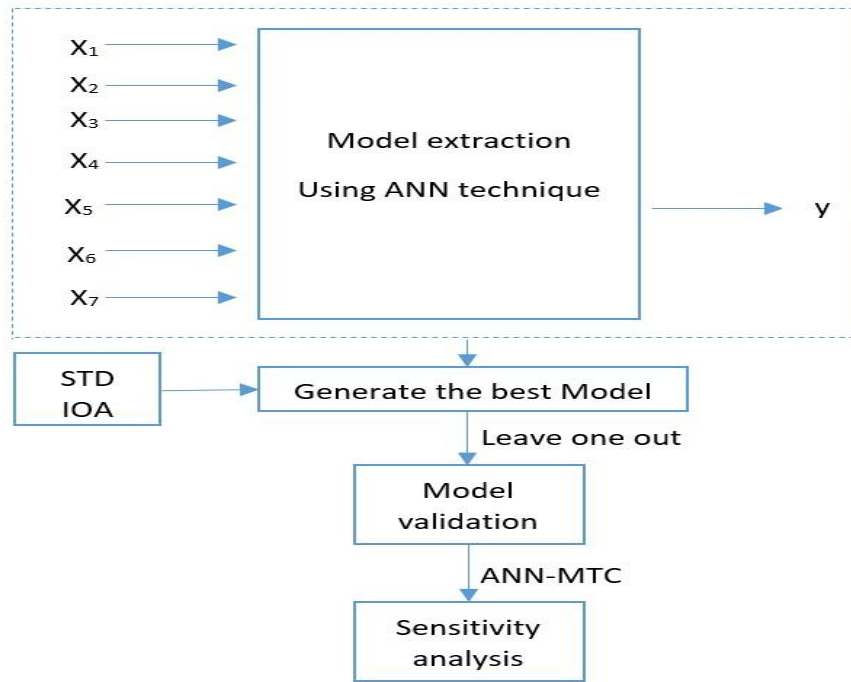


Figure III.13. Structure du modèle du processus des CV.

Tableau III.5 : Nomenclature des entrées et des sorties.

Variable	Désignation	Unit	
Entrées	X ₁	Potentiel E_{ON}	V
	X ₂	Distance conduit/rail D	m
	X ₃	résistivité ρ	$\Omega.m$
	X ₄	Humidité W	%
	X ₅	Indice de Plasticité I_p	%
	X ₆	Degré de Saturation S_r	%
	X ₇	Densité du Sol D_s	gcm^{-3}
Sortie	Y	Courant continu I_{CC}	μA

Notre objectif est de construire un modèle mathématique $Y=f(X_1 \dots X_n)$, nous avons donc utilisé l'approche ANN et les données de mesure pour obtenir le modèle suivant :

$I_{cc}=f(E_{ON}, D, \rho, W, I_p, S_r, D_s)$. Les coefficients de corrélation pour les différentes variables (entrées et sorties) Figurent dans le tableau (III.6) ainsi que dans les figures (III.14) et (III.15).

Tableau III.6 : Matrice de corrélation.

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	Y
X ₁	1	0.3716	-0.3776	-0.0227	0.1540	-0.2596	-0.0386	0.4148
X ₂	0.3716	1	-0.0967	0.0038	0.1888	0.0161	0.0081	-0.0588
X ₃	-0.3776	-0.0967	1	0.0324	-0.2151	0.0358	0.0111	0.0763
X ₄	-0.0227	0.0038	0.0324	1	0.3959	0.3442	-0.6657	0.0620
X ₅	0.1540	0.1888	-0.2151	0.3959	1	-0.2008	-0.4943	-0.2289
X ₆	-0.2596	0.0161	0.0358	0.3442	-0.2008	1	0.3437	0.0961
X ₇	-0.0386	0.0081	0.0111	-0.6657	-0.4943	0.3437	1	0.1347
Y	0.4148	-0.0588	0.0763	0.0620	-0.2289	0.0961	0.1347	1

Autre forme de présentation de la matrice de corrélation.

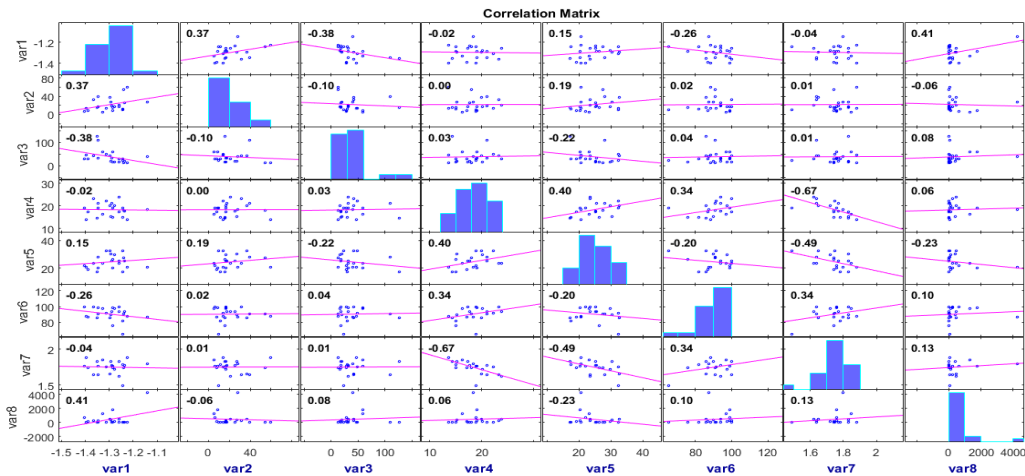


Figure III.14. Matrice de Corrélation (histogramme).

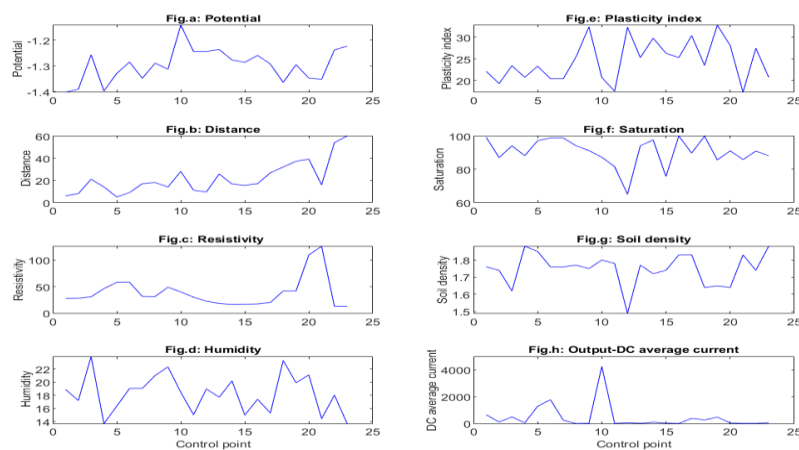


Figure III.15. Modèle des Entrées et des Sorties Expérimentales.

Le tableau (III.7) présente les statistiques descriptives des échantillons collectés, déterminées à l'aide de MATLAB, telles que la moyenne, la médiane, le mode, l'écart-type, l'asymétrie, et la variance. Cette analyse statistique permet d'évaluer et de comprendre les paramètres d'un processus, tout en résumant les mesures des données ou des échantillons. Cette

étape est essentielle dans le domaine de l'apprentissage automatique pour organiser et synthétiser les données collectées.

Tableau III.7 : Description statistiques des échantillons collectés.

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	Y
Mean	-1.2961	21.7565	38.8361	18.2604	24.5713	90.4726	1.7491	454.34
Min	-1.4020	10.0000	13.1	11	17.28	64.95	1.49	4
Max	-1.1420	60.0000	126.19	23.9	32.8	100	1.88	4258
Median	-1.2890	17.0000	31.05	18.47	23.5	91.1	1.76	70
Mode	-1.2440	14.0000	13.1	13.7	20.4	94.1	1.74	19
Std	0.0638	14.5424	28.426	2.9374	4.7538	8.4169	0.0923	940.50
Var	0.0041	211.4826	808.0369	10	22.599	70.8436	0.0085	884550.78
Skewness	0.1823	1.2347	1.9238	0.1502	0.3068	-1.2903	-0.9386	3.18
Kurtosis	2.8305	3.8583	6.2296	2.2102	2.0075	4.8875	3.9266	12.957
Rang	0.2600	55.0000	113.09	10.2	15.52	35.05	0.39	4254

III.4.4. Différents algorithmes numériques

Les algorithmes numériques utilisés et les résultats produits par les méthodes discutées dans les parties précédentes sont présentés dans cette section.

a. Algorithme des réseaux neurones artificiels ANN

The model identification is summed by the following procedure:

Étape 1. Initialiser les poids du réseau comme suit:

La boucle de calcul est caractérisée pour $k = 1: L_k$,

Étape 2. Calculer la sortie du modèle en utilisant respectivement l'équation [III.7] et l'équation [III.8],

Étape 3. Calculer l'erreur de modélisation $\varepsilon(k) = y(k) - \hat{y}(k)$

a) Si $\varepsilon(k) \approx 0$, $W_{ij}^k = W_{ij}^{k-1} \rightarrow$ Arrêter: $W_{ij}^k = W_{ij}^*$

b) Sinon, ajuster les poids de réseau (ANN) en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

Fin.

b. Algorithme Combinés ANN-MTC

La procédure de calcul est résumée comme suit :

Étape 1. Acquisition d'un nouvel ensemble d'entrées et de sorties,

Pour $I = 1: M$ (où M est le nombre maximal d'essais de la boucle MTC, $M \approx 100$),

(a) Perturbation en ajoutant une distribution normale aléatoire aux entrées, qui deviennent,

(b) Calculer la sortie du modèle en utilisant l'approche (ANN) décrite dans la sections (III.3.1),

(c) Calculer l'erreur de modélisation.

(d) À chaque itération, affecter l'erreur de modélisation dans une matrice aléatoire $\varepsilon_k \rightarrow E_i^k$,
fin

Étape 2. Évaluation statistique de la matrice aléatoire E_i^k par l'analyse de la distribution aléatoire, P_i

Étape 3. Calculer l'incertitude totale basée sur la valeur de P_i en utilisant l'écart type de la distribution des erreurs (STD).

III.4.5. Décision par la technique de la régression du LASSO

L'équation (III.13) et le tableau (III.8) décrivent les résultats de la technique.

$$y = 2466,67x_1 - 834,18x_2 + 867,27x_3 + 1122,29x_4 - 724,59x_5 + 1076,63x_7 \quad Eq(III.13)$$

Tableau III.8 : Résultats de la décision du technique lasso.

Inputs	Decision
Potentiel E_{ON}	Sélectionné
Distance conduit /rail D	Sélectionné
Résistivité ρ	Sélectionné
Humidité W	Sélectionné
Indice de plasticité I_P	Sélectionné
Degré du Saturation S_r	Négligé
Densité du sol D_S	Sélectionné

Lambda est un paramètre qui minimise l'erreur. Dans la présente étude, lambda atteint une valeur de 20 séries (Figure III.16).

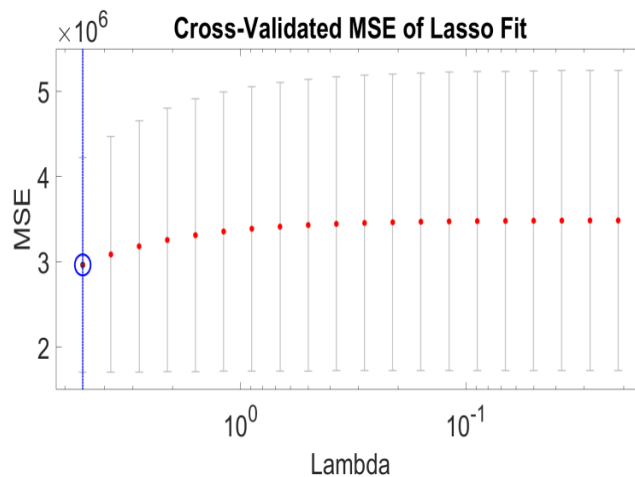


Figure III.16. Validation croisée de l'ajustement Lasso (MSE).

III.4.6. Modèle linéaire à l'aide de la méthode des moindres carrés (least square Method)

L'équation (III.14) décrit le résultat de la méthode

$$y = 7073.06 + 9487.36x_1 - 15.17x_2 + 7.67x_3 + 110.46x_4 - 46.72x_5 - 0.107x_6 + 2773.24x_7 \quad Eq(III.14)$$

III.4.7. Modèle quadratique avec interaction par la méthode progressive (Stepwise)

L'équation (III.15) décrit le résultat de la méthode.

$$y = -435450 + 162830x_1 - 110,39x_2 - 54,72x_3 + 30760x_4 - 2766,6x_5 - 940,77x_6 + 372130x_7 + 86.832x_1x_4 - 0.070868x_2x_5 + 44.196x_3x_7 + 32.621x_4x_5 + 69.473x_4x_6 - 13293x_4x_7 - 21.324x_5x_6 + 2151.9x_5x_7 + 59483x_1^2 + 1.3303x_2^2 - 0.077149x_3^2 - 373.79x_4^2 + 6.8601x_5^2 - 45652x_7^2 \quad Eq(III.15)$$

III.4.8. Technique ANN

Le résultat est représenté dans la figure (III.17).

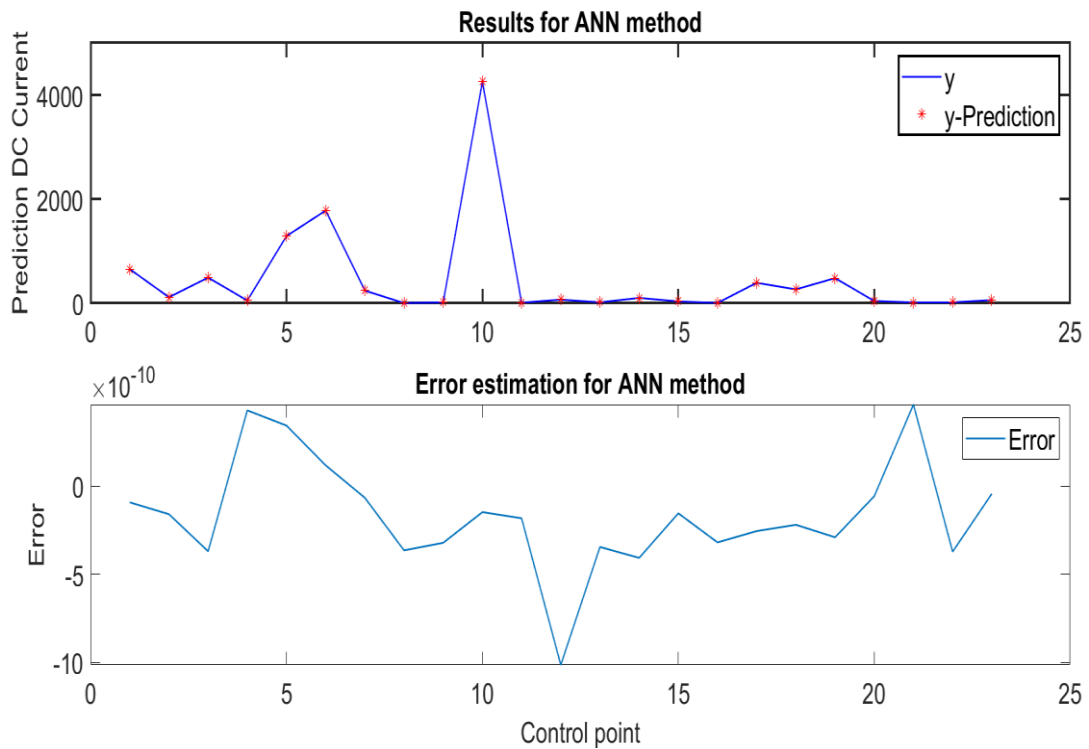


Figure III.17. Prédiction du courant continu et des erreurs par la technique ANN.

III.4.9. Technique ANN-MTC

Le résultat est représenté par le graphique de la figure (III.18).

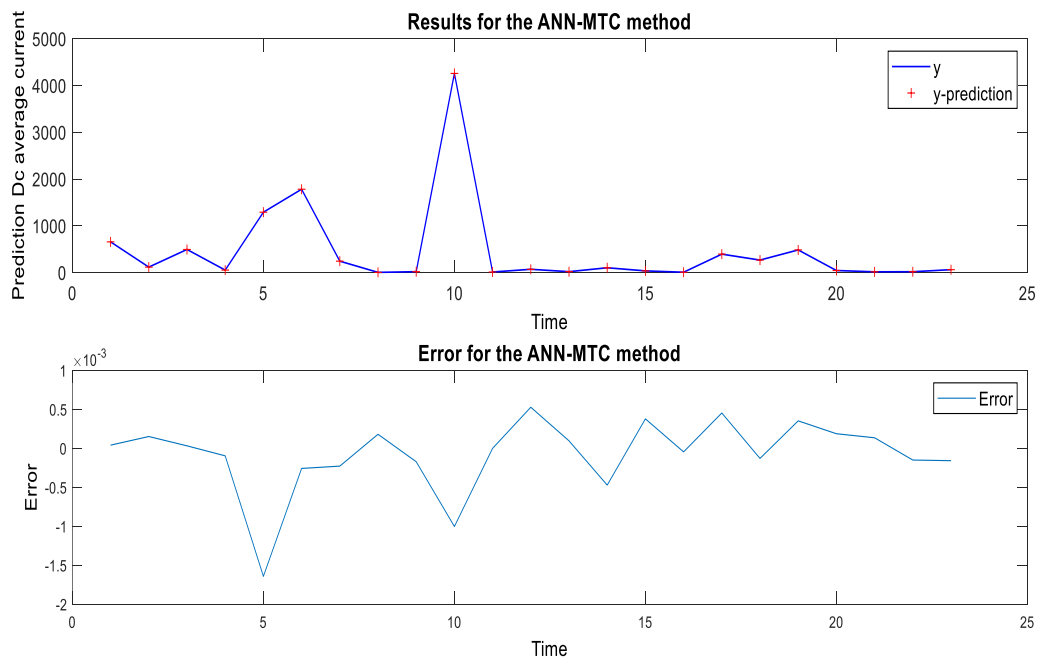


Figure III.18. Prédiction du courant continu et des erreurs par la technique ANN-MTC.

Les Indicateurs de performances statistiques des différentes techniques sont représentés dans le tableau (III.9).

Tableau III.9 : Indicateurs de performance statistique des différentes méthodes.

	Lasso regression technique	Least square technique	Stepwise technique	ANN Technique	ANN-MTC Technique
STD uncertainty	722	722.0208	0.191	0.000018	0.000115
Index of agreement (IOA)	0.734	0.736	1	1	1
Accuracy percentage	41.023	41.06	100	100	100
CPU Time (second)	0.557115	0.0705	1.4025	2.89	63.61

Les indicateurs statistiques sont l'écart-type (STD), ils sont exprimés dans les équations (III.16) et (III.17):

a. **Écart type** (Standard deviation)

$$\mathbf{STD} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad Eq(III.16)$$

Où N est le nombre d'échantillon, y_i est la valeur réelle et \hat{y}_i est la valeur prédite.

b. **Index de l'accord** (Index of agreement) (IOA)

$$\mathbf{IOA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N \left(\sum_{i=1}^N |y_i - \bar{y}_i| + \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i| \right)^2}, (0 < \mathbf{IOA} < 1) \quad Eq(III.17)$$

c. **Pourcentage de précision** (Accuracy percentage)

$$\mathbf{Accuracy} = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \mathbf{mean}(y_i))^2} \right] \times 100 \quad Eq(III.18)$$

d. **Temps de traitement** (CPU Time)

Également appelé temps de calcul, c'est le temps nécessaire pour réaliser un processus de calcul : Le tic/toc est comme un chronomètre pour mesurer le temps.

tic;

algorithme;

toc

III.4.10. Discussion des résultats

Les techniques présentées ci-dessus ont pour but de prédire la variation du courant continu émis par le tramway en cas de corrosion par courant vagabond. C'est pourquoi nous avons brièvement présenté le mécanisme de la corrosion par courant vagabond dans les conduites en acier au début. En particulier, nous avons utilisé la technique du réseau de neurones artificiels pour modéliser cette variation. Pour ce faire, sept paramètres ont été utilisés en tant qu'entrées du modèle : le potentiel moyen, la distance entre la conduite et le rail, la résistivité, l'humidité, l'indice de plasticité, la saturation et la densité du sol.

Le tableau (III.6) met en évidence que le paramètre le plus influent sur le courant continu est le potentiel moyen, suivi de près par la densité du sol et la saturation. La résistivité et l'humidité n'ont pratiquement aucun effet sur le courant continu. Enfin, la distance entre le tramway et la canalisation ainsi que l'indice de plasticité ont un impact négligeable et opposé. Les techniques ANN (réseau de neurones artificiels) et ANN-MTC (réseau de neurones artificiels avec l'analyse de sensibilité MTC) se sont révélées utiles et efficaces pour développer des modèles précis et robustes à partir de données complexes. Une brève explication de ces deux méthodes est présentée dans les sections (III.3.1) et (III.3.2).

D'après le tableau (III.8), il est évident que le paramètre X_6 (degré de saturation) est négligé par la méthode LASSO, et qu'aucune influence notable n'est observée, que ce soit en l'incluant ou non dans le modèle. Cependant, les auteurs ont décidé de le maintenir inclus dans l'étude malgré cette exclusion, en raison de la corrélation existante avec d'autres paramètres dans différentes techniques.

Pour l'approche ANN, le type de réseau était un réseau de rétro-propagation en cascade, la fonction d'activation était LOGSIG, la taille de la couche cachée utilisée dans le réseau neuronal artificiel était de 25, c'est-à-dire une seule couche cachée du réseau neuronal, l'algorithme était Levenberg Marquardt. Cependant, dans le cas de l'ANN-MTC, un maximum de 100 essais a été utilisé pour la boucle MTC.

Il est clairement évident à partir des figures (III.17) et (III.18), ainsi que du tableau (III.9), que la méthode (ANN) présente des avantages significatifs par rapport aux méthodes des moindres carrés (Least Square) et à la méthode progressive (stepwise). En termes d'adaptabilité, de précision et de vitesse d'apprentissage, l'approche basée sur les réseaux de neurones artificiels se distingue nettement.

Plus spécifiquement, ces résultats suggèrent que l'approche ANN est la plus adaptée pour résoudre le problème en question. Elle parvient à capturer les nuances complexes des données et à modéliser les relations entre les entrées et les sorties de manière efficace. De plus, elle démontre une grande précision dans la prédiction des résultats, ce qui en fait un outil puissant pour cette tâche. En outre, la rapidité d'apprentissage de la technique ANN permet de gagner du temps lors du processus de modélisation.

En revanche, les méthodes des moindres carrés et la méthode progressive ne se comportent pas aussi bien dans ce contexte particulier. Les moindres carrés présentent des limites en termes de prévision précise, en particulier lorsque de nombreuses variables d'entrée sont impliquées. Par conséquent, leur utilisation n'est pas recommandée dans ce cas précis. De même, la méthode progressive montre des lacunes en termes d'efficacité et de capacité à modéliser des relations complexes entre les variables.

III.5. Prédiction du potentiel par un modèle inverse basé sur les techniques du Machine Learning

Le principe du modèle inverse est de sélectionner l'une des entrées du modèle original en tant que cible (ou "Target" en anglais). Dans notre situation, nous avons choisi le potentiel comme cette cible. Ce processus suit une approche itérative au cours de laquelle les paramètres du modèle sont ajustés de manière répétée jusqu'à ce que la sortie prédite se rapproche de la sortie réelle [115]. La formation d'un modèle en utilisant des données d'entrée et de sortie connues est fondamentalement le principe sous-jacent des techniques de DATA MINING et d'apprentissage automatique (machine Learning).

Il est hautement souhaitable d'adopter cette approche pour anticiper la sortie pour de nouvelles entrées une fois que le modèle a été entraîné. Dans le contexte d'un modèle inverse, l'objectif consiste à entraîner le modèle à anticiper les entrées en se basant sur les sorties, car les relations entre les entrées et les sorties sont inversées.

Dans notre cas, un modèle inverse est proposé basé sur l'intelligence artificielle pour prédire la valeur du potentiel d'une conduite de gaz enfouillée en voisinage du trajet d'un tramway de la ville de Constantine.

Pourquoi contrôler la valeur du potentiel d'une conduite métallique ?

Selon le diagramme Potentiel-pH de Pourbaix, on établit une classification de l'état de corrosion des métaux, distinguant entre corrosion, passivation et protection. Ainsi, d'une part, il est possible de déterminer le potentiel de n'importe quel métal, et d'autre part, de connaître son état en fonction de sa position dans ce classement. Par exemple, dans le cas du fer, le potentiel de protection est établi à -850 mV par rapport à l'électrode (Cu/CuSO₄). Cette section explore l'utilisation d'un modèle inverse basé sur l'apprentissage automatique pour combiner les paramètres de la section III.3.

III.5.1. Processus du Modèle

La figure (III.19) illustre le processus du modèle inverse.

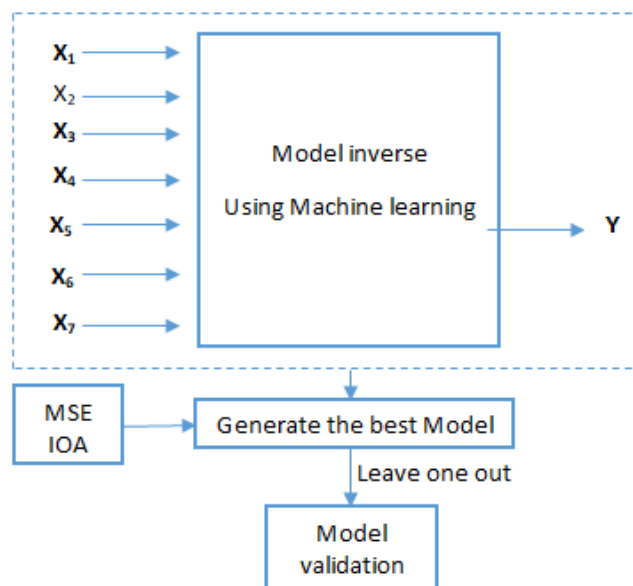


Figure III.19. Processus du modèle inverse.

Le Tableau (III.10) représente les entrées et les sorties du modèle inverse, c'est-à-dire que les paramètres électriques de la structure à protéger ont été inversés.

Tableau III.10 : Nomenclature des entrées et des sorties du modèle inverse.

Variable	Désignation	Unit
X_1	Courant continu I_{CC}	μA
X_2	Distance conduit/rail D	m
X_3	résistivité ρ	$\Omega.m$
X_4	Humidité W	%
X_5	Indice de Plasticité I_P	%
X_6	Degré de Saturation S_r	%
X_7	Densité du Sol D_S	gcm^{-3}
Sortie	Y	Potentiel E_{ON}
		V

La structure du réseau neuronal utilisé est représentée dans la Figure (III.20).

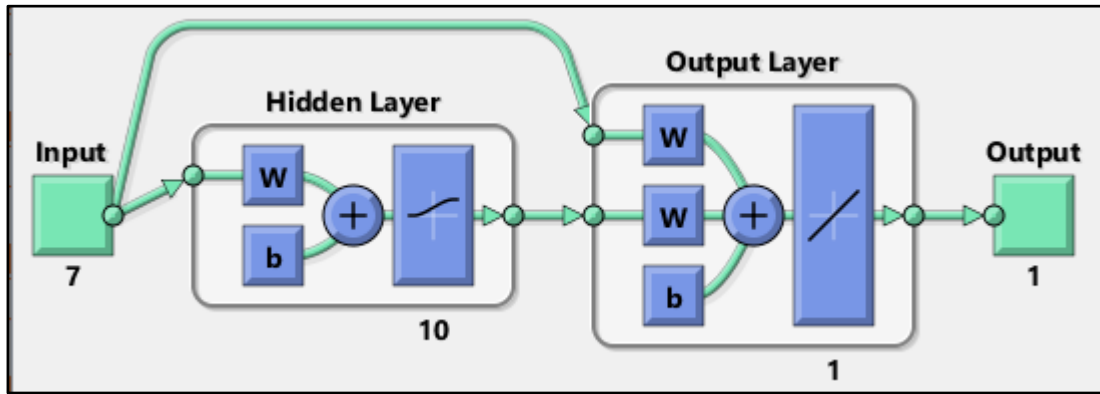


Figure III.20. Architecture du modèle inverse basé sur ANN.

Conformément à la section (III.3), les deux approches pour représenter la matrice de corrélation en utilisant le modèle inverse sont illustrées dans les Figures (III.21) et (III.22).

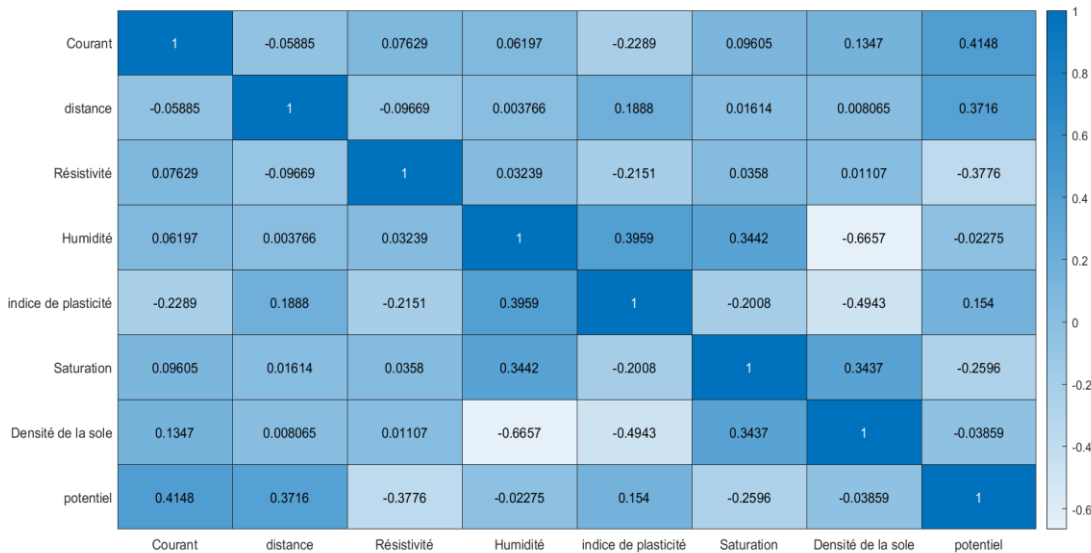


Figure III.21. Matrice de corrélation de la méthode inverse.

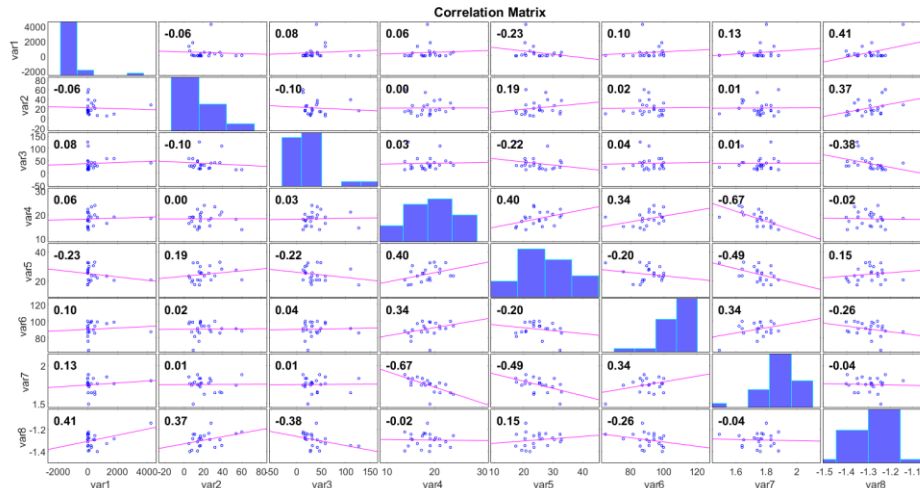


Figure III.22. Matrice de corrélation de la méthode inverse (histogramme).

L'idée de diviser les données en trois groupes différents est très importante pour l'entraînement d'un réseau neuronal. Les groupes des données sont répartis comme suit :

- Groupe d'entraînement (training) : comprend 17 données. Il est indispensable que ce groupe soit de grande taille pour un apprentissage performant et optimal, afin de réduire l'erreur en ajustant les poids du réseau.
- Groupe de validation : comprend trois données. Leur rôle est d'éviter le sur-ajustement (overfitting) et de permettre de vérifier le modèle étudié, ainsi que d'améliorer ses performances.
- Groupe de test : comprend trois données. Leur rôle est de valider les résultats du modèle étudié, ainsi que d'améliorer ses performances. Les figures (III.23) et (III.24) présentent les résultats du modèle inverse appliqué.

Il est important de noter que les équations d'exécution sont identiques à celles utilisées dans la section (III.3)

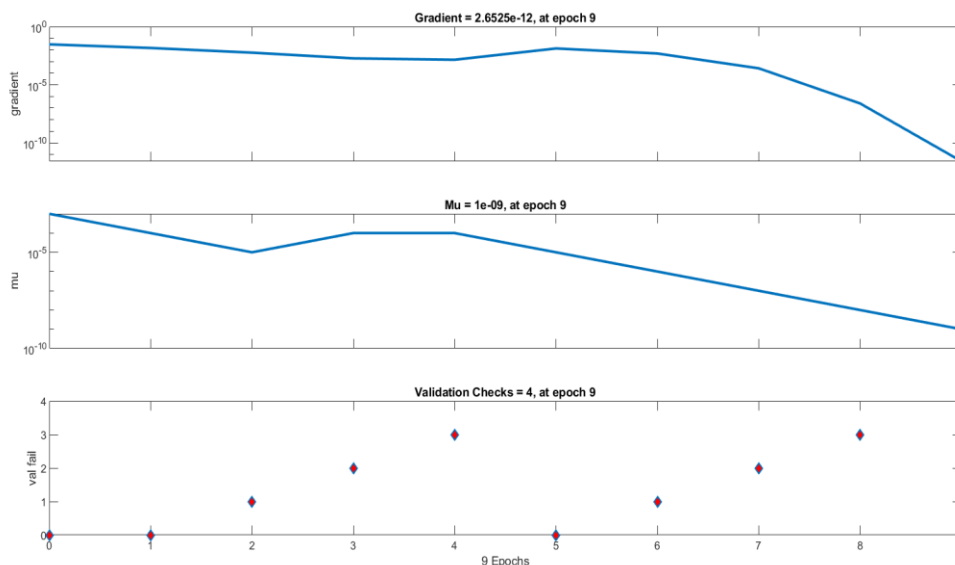


Figure III.23. Les paramètres de régularisation du réseau de neurone.

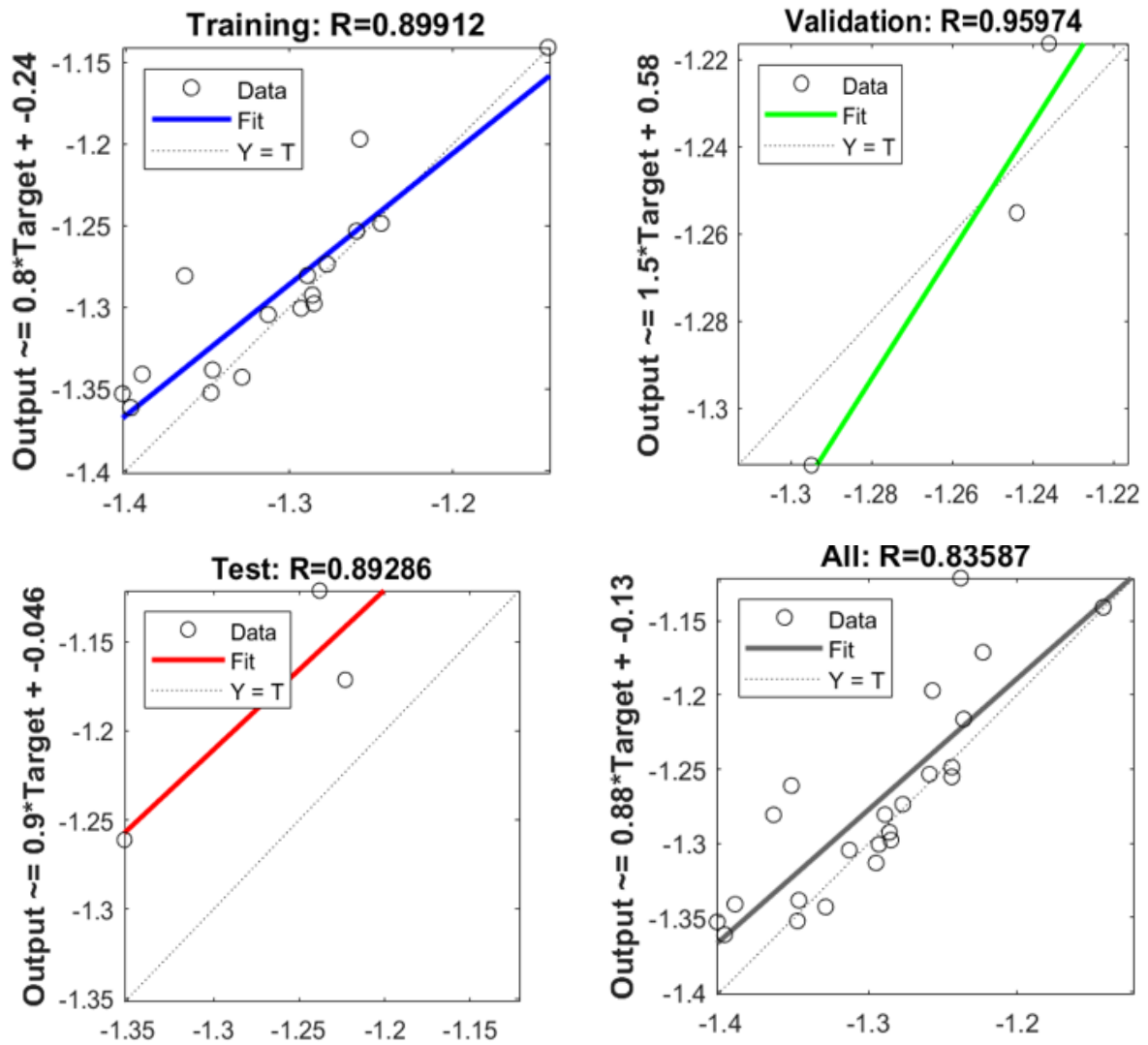


Figure III.24. Résultats du modèle inverse en utilisant la méthode de réseau de neurone.

L'erreur du modèle inverse est illustrée dans la figure (III.25).

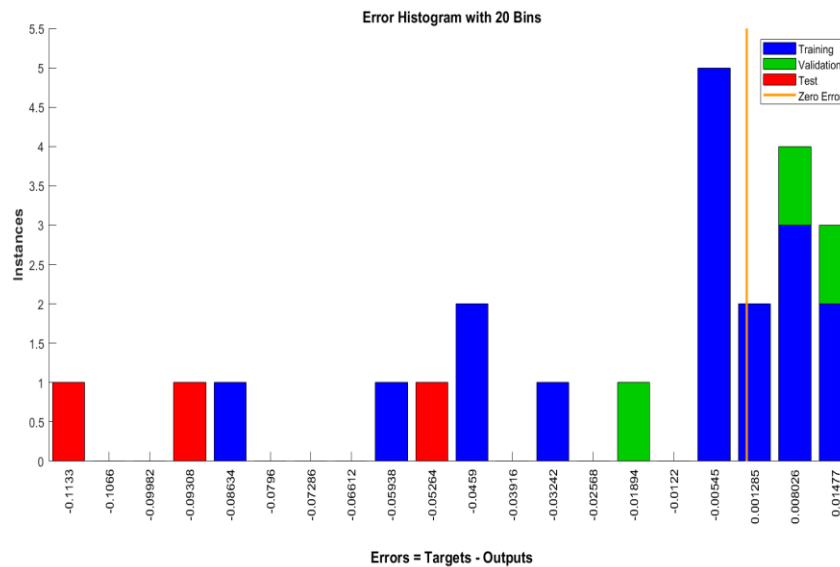


Figure III.25. L'erreur du modèle inverse.

La figure (III.26) récapitule les résultats du modèle par simulation.







Results			
	 Samples	 MSE	 R
 Training:	17	1.02157e-3	8.99123e-1
 Validation:	3	2.80241e-4	9.59736e-1
 Testing:	3	8.18540e-3	8.92863e-1

Figure III.26. Statistique des Résultats du modèle.

III.5.2. Discussion des Résultats du Modèle

Les Figures (III.23) et (III.26) affichent les résultats de la prédiction du potentiel en fonction des entrées (courant continu, distance conduite/rail, résistivité, humidité, indice de plasticité, degré de saturation et densité du sol).

Les résultats montrent qu'il y a une forte relation entre la variable ciblée et les variables d'entrée, ce qui assure une bonne prédiction pour le futur. Par exemple, l'indicateur de performance MSE est très faible, et le coefficient de détermination R carré est proche de 1 lors des étapes d'entraînement, de test et de validation. En ce qui concerne l'architecture du réseau de neurones artificiels, un réseau simple contenant une seule couche cachée de 10 neurones a été utilisé, avec l'algorithme Levenberg-Marquardt.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude basée sur une expérience réelle est menée en utilisant des mesures et des enregistrements effectués en temps réel, ainsi que des paramètres de sols in-situ. De nouvelles approches sont appliquées à l'étude du phénomène de corrosion par courants vagabonds pour la première fois sur un réseau de distribution de gaz à proximité d'une ligne de tramway électrifiée. L'objectif principal de cette étude est de déterminer l'impact du courant vagabond. La modélisation et la procédure d'estimation sont réalisées en utilisant des techniques avancées sur des données réelles. De plus, une étude comparative entre cinq techniques d'apprentissage automatique améliorées est menée. Les principales conclusions sont les suivantes :

- L'approche ANN (Réseau de Neurones Artificiels) offre une bonne modélisation pour prédire la variation moyenne du courant continu, tandis que la méthode des moindres carrés produit le modèle le moins performant.
- L'approche ANN-MTC est utilisée pour combiner les modèles avec une analyse de sensibilité.
- Il convient de souligner que la méthode de drainage polarisé ne parvient pas à garantir la sécurité des conduites enterrées en raison de la fluctuation du courant, ce qui entraîne une variation du potentiel.

Chapitre IV

Approches prédictives pour la prévention des risques de corrosion par courants vagabonds

Chapitre IV

Approches prédictives pour la prévention des risques de corrosion par courants vagabonds

IV.1. Introduction

La corrosion due aux courants vagabonds émis par la traction électrique représente un problème majeur dans les installations industrielles qui dépendent principalement de conduites métalliques, telles que celles utilisées pour le transport du gaz et du pétrole. Ce phénomène a le potentiel d'accélérer la dégradation des matériaux constituant ces canalisations, ce qui peut entraîner des défaillances structurelles et des fuites de produits en raison de la perforation du métal. Ces fuites peuvent provoquer des accidents graves, tant pour les individus que pour les biens matériels. Par conséquent, il est impératif de développer des plans de surveillance prédictive afin de réduire les risques associés à ce phénomène.

L'analyse des défaillances qui conduisent à un risque consiste à identifier et à évaluer les différents dangers potentiels liés à la corrosion par courant vagabond, tels que les variations des potentiels et les interférences avec la ligne du tramway (croisement, parallélisme, traversée d'ouvrage d'art). Cependant, pour rendre l'analyse fiable et pertinente, il est indispensable de mettre en place quelques conditions ou des limites nommées barrières de sécurité. Une fois les risques identifiés, des méthodes avancées sont utilisées pour les maîtriser et les prévenir [116].

Dans ce chapitre, l'analyse du risque dans les canalisations de la distribution du gaz, soumises à l'interférence du champ du courant de fuite émis par la traction électrifiée, est effectuée à l'aide de méthodes avancées, qui sont des outils puissants pour visualiser et surveiller le risque de la corrosion par courants vagabonds. Ainsi, ces méthodes permettent de présenter clairement la barrière de sécurité ainsi que les limites du risque dans les conduites métalliques de distribution du gaz de la ville de Constantine, et de prendre des décisions pour lutter contre ce phénomène.

IV.2. Barrière de sécurité du potentiel dans les conduites métalliques

Selon le diagramme de Pourbaix, un métal est protégé contre les effets néfastes de la corrosion si son potentiel atteint la valeur de -850 mV par rapport à l'électrode de référence Cu/CuSO₄. Cependant, cette valeur ne doit pas être trop abaissée afin d'éviter la formation d'hydrogène, ce qui peut conduire au risque de fragilisation du métal et à l'endommagement du film protecteur de revêtement en raison de l'alcalinisation du pH. Ce scénario peut entraîner un risque de sur-polarisation [117].

Dans ce chapitre, une valeur de -1200 mV par rapport à une électrode (Cu/CuSO₄) est retenue comme une limite à ne pas dépasser pour éviter les effets dangereux du dégagement d'hydrogène par fragilisation, et du décollement des revêtements utilisés. Ainsi, les deux seuils adoptés dans ce travail sont (-1200 mV) comme limite inférieure, tandis que (-850 mV) comme limite supérieure (semblable à les limites indiqués dans le diagramme de Pourbaix).

IV.3. Description des points d'étude

Comme évoqué dans le chapitre précédent, la source de pollution provient toujours de la ligne électrifiée du tramway de la ville de Constantine, qui influence le réseau de distribution du gaz. Dans le cadre de cette étude, une analyse a été réalisée en quatre points de mesure différents le long du trajet du tramway, avec un contrôle continu des paramètres électriques du réseau en acier pendant 24 heures. Ces paramètres comprennent le potentiel sous protection cathodique E_{ON} (témoin établi), le potentiel spontané de la conduite sans protection cathodique E_{OFF} (témoin coupé) et le courant continu transitant le témoin métallique I_{CC} . Le site d'étude est décrit dans le tableau (IV.1) et illustré dans la figure (IV.1).

Tableau IV.1 : Localisation des points d'étude.

N°PP	Localisation	Position de la conduite par rapport à la ligne du tramway
01	Ben Abdmalek Ramdane	Parallélisme avec une distance courte
05	Cité belle vue	Croisement (intersection)
19	La zone industrielle Palma	Passage sur pont métallique (annexe V)
23	Université Mentouri	Parallélisme avec une distance longue

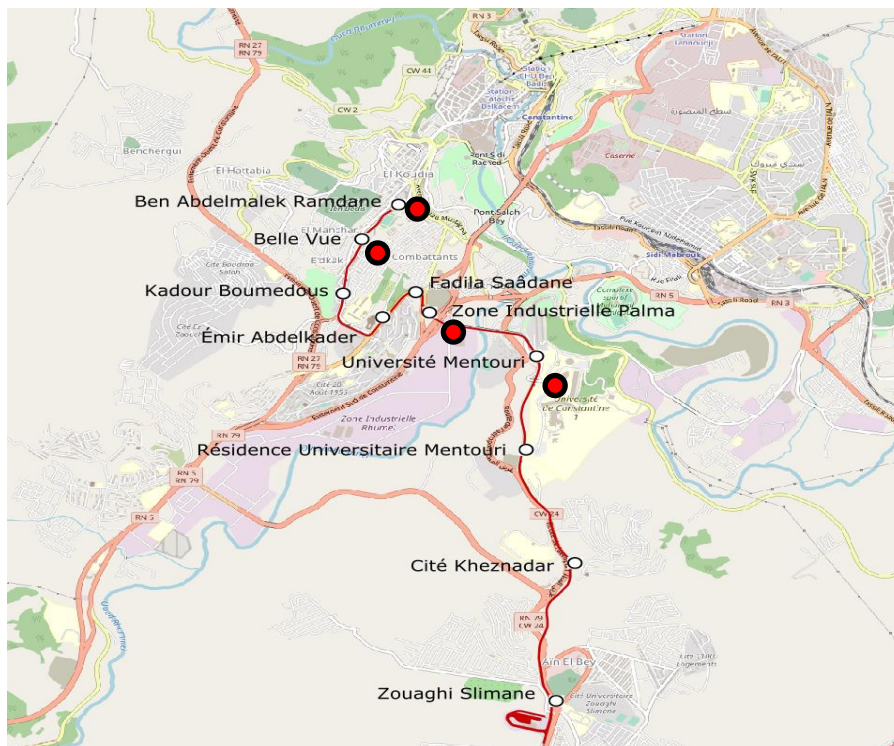


Figure IV.1. Cartographie du tramway Constantine (04 points de contrôles).

Ainsi, la figure (IV.2) représente la position des quatre points de contrôle par rapport à la ligne du tramway et au réseau de distribution de gaz en acier sous protection cathodique. De plus, la figure (IV.3) décrit le schéma du point 19 de l'ouvrage d'art.

Il convient de noter que le pont entre la zone industrielle Palma et l'Oued Rhumel s'étend sur une distance d'environ 180 mètres, atteignant une hauteur de 26 mètres, comme le montre l'annexe V.

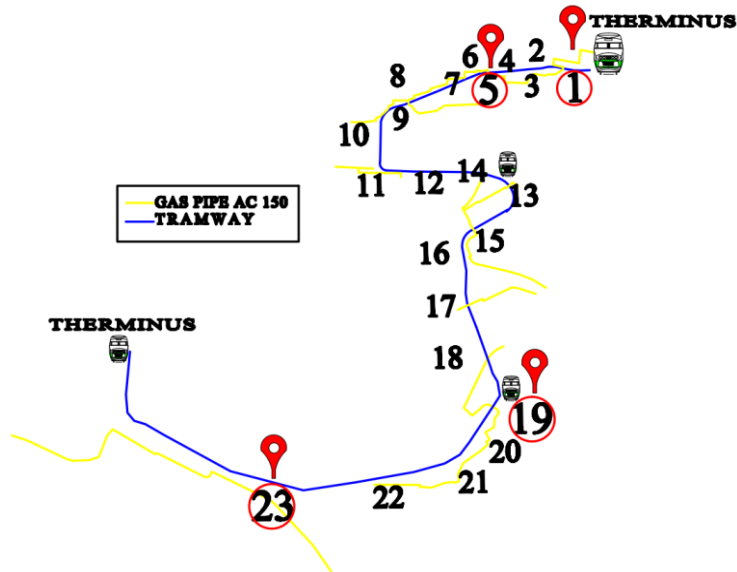


Figure IV.2. Interférence entre la ligne du tramway et le réseau du gaz (cas d'étude).



Figure IV.3. Illustration du point d'étude N°3 (Passage sur pont).

Le contrôle de ces quatre points est effectué en utilisant un équipement d'enregistrement performant sur une période de 24 heures, avec une fréquence d'une mesure par seconde. Cela permet d'obtenir une analyse basée sur plus de 84 000 points d'échantillonnage.

IV.4. Introduction à la méthode du contrôle statistique des processus

Le contrôle statistique est devenu un élément essentiel pour garantir la qualité des processus industriels. L'introduction en particulier des cartes de contrôle, le SPC (Statistical Process Control) [118], englobe toutes les méthodes statistiques visant à visualiser, surveiller et détecter les anomalies dans un processus industriel.

L'objectif de cette approche est de collecter des données (échantillons) dans un intervalle de temps bien déterminé (tel que notre cas d'étude). Ces échantillons sont composés de n individus (taille de l'échantillon) pour effectuer m mesures [118]. Dans cette condition, on peut les présenter sous forme d'une matrice ou d'un tableau de m lignes et n colonnes, où X_{ij} est le résultat

d'une observation qui correspond au $j^{\text{ème}}$ individu et à l' $i^{\text{ème}}$ échantillon. Le tableau (IV.1) présente la méthode SPC de l'observation X_{ij} .

Tableau IV.2 : Matrice de $m \times n$ mesures X_{ij}

Echantillons	Mesures			
1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1n}
2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2n}
.
M	X_{m1}	X_{m2}	...	X_{mn}

Généralement, les cartes de contrôles se réalisent en deux phases;

Phase 1

- Déterminer et fixer la taille d'échantillon n pour un intervalle h .
- Collectez les échantillons qui correspondent aux mesures X_{ij} afin de réaliser un tableau du modèle précédent (tableau IV.2).
- Pour choisir une approche statistique à surveiller, il faut déterminer ses paramètres tels que la moyenne et l'écart type.
- Calculer les limites de la carte sélectionnée.
- Contrôlez que tous les points sur le graphique se situent à l'intérieur des limites de contrôle. Si ce n'est pas le cas, recalculez les limites de contrôle et excluez les points en question.

Phase 2

- Après avoir calculé les limites de contrôle, on applique la surveillance à un échantillon n situé dans un intervalle h pour déterminé sa valeur statistique T , qui correspond à cet échantillon.
- Si $LCL < T < UCL$, le processus est en bon qualité, les caractéristiques du procédé reste stable et la production peut continuer sans aucun risque.
- Si $T \leq LCL$ ou $T \geq UCL$, Plusieurs causes des risques sont apparues, un changement remarquable sur les caractéristiques du procédé [119].

IV.5. Analyse du risque par la méthode du statistique univariée

Le contrôle statistique des processus (SPC) est un outil puissant et utile dans la résolution de problèmes visant à assurer la stabilité du processus et à améliorer sa capacité en réduisant la variabilité. L'objectif de cette technique est de créer un graphique en utilisant des logiciels performants tels que SPSS ou MINITAB, afin de décrire la plage de variation des données en utilisant des limites de contrôle bien connues ou calculées à l'aide de formules spécifiques à la carte de contrôle.

Après avoir tracé le graphique, tout point se situant en dehors de la zone de contrôle est considéré comme un risque (événement particulier) nécessitant une enquête ou une vérification du processus [121].

Avant d'aborder l'analyse du risque par les approches de probabilité statistiques, il convient de faire un bref rappel des méthodes traditionnelles d'analyse déductive et qualitative, qui

demeurent néanmoins efficaces pour l'analyse des défaillances opérationnelles. À cet égard, le tableau (IV.3) ainsi que les figures (IV.4) et (IV.5) prennent tout leur sens. Le tableau expose le processus de corrosion causée par les courants vagabonds au moyen d'un diagramme d'arbre de défaillance, tandis que la figure (IV.4) met en avant l'analyse 6M d'Ishikawa.

Tableau IV.3 : Les événements à la base du phénomène de corrosion par CV.

Symbol	Description	Symbol	Description
X1	Valeur du pH	X10	Atteinte de tiers
X2	Résistivité	X11	Défaillance du câble de connexion
X3	Humidité du sol	X12	Interférence avec une autre canalisation
X4	Potentiel redox	X13	Fréquence d'inspection insuffisante
X5	Salinité du sol	X14	Durée de vie de la canalisation
X6	Potentiel de corrosion libre	X15	Défaillance de la source d'alimentation
X7	Teneur en chlorure	X16	Temps de service de l'anode
X8	Isolation rail/sol	X17	Impact du champ magnétique
X9	Distance Rail/pipeline	X18	Impact des courants alternatifs

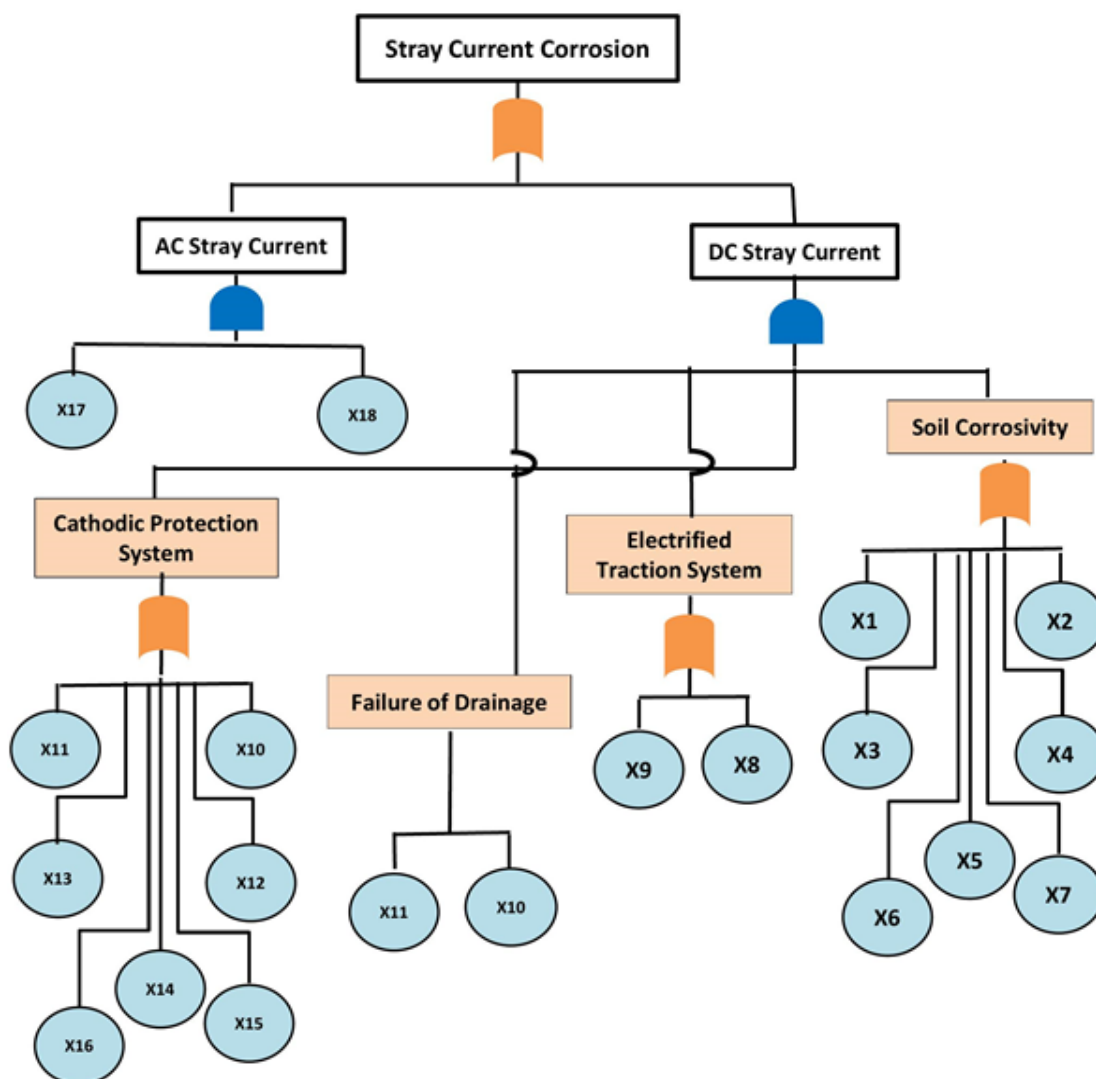


Figure IV.4. Analyse de la corrosion par CV à l'aide de l'arbre des défaillances.

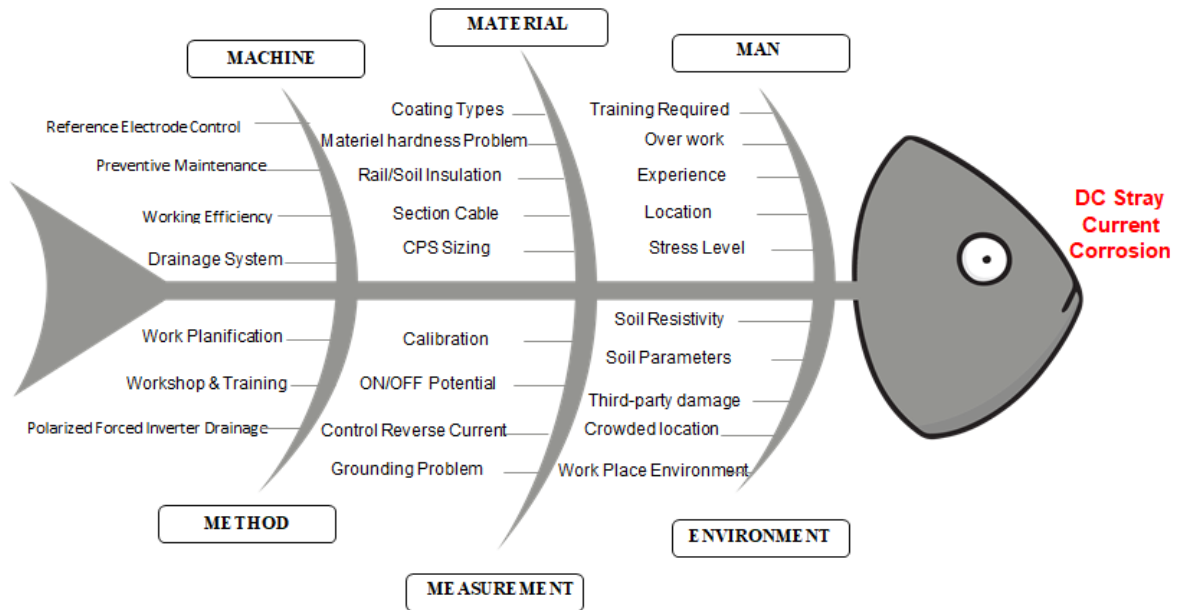


Figure IV.5. Analyse de la corrosion par CV par le diagramme d'Ishikawa en 6 causes.

Il existe plusieurs types ou techniques pour analyser un risque, parmi les plus connus figurent : les cartes de contrôle (control charts), le diagramme de Pareto, l'arbre de défaillance et le diagramme de cause à effet d'Ishikawa. Dans notre cas d'étude, les cartes de contrôle sont les plus utilisées, et elles se divisent en deux modes en fonction de la nature des données (variables ou attributs), comme illustré dans l'organigramme (IV.6).

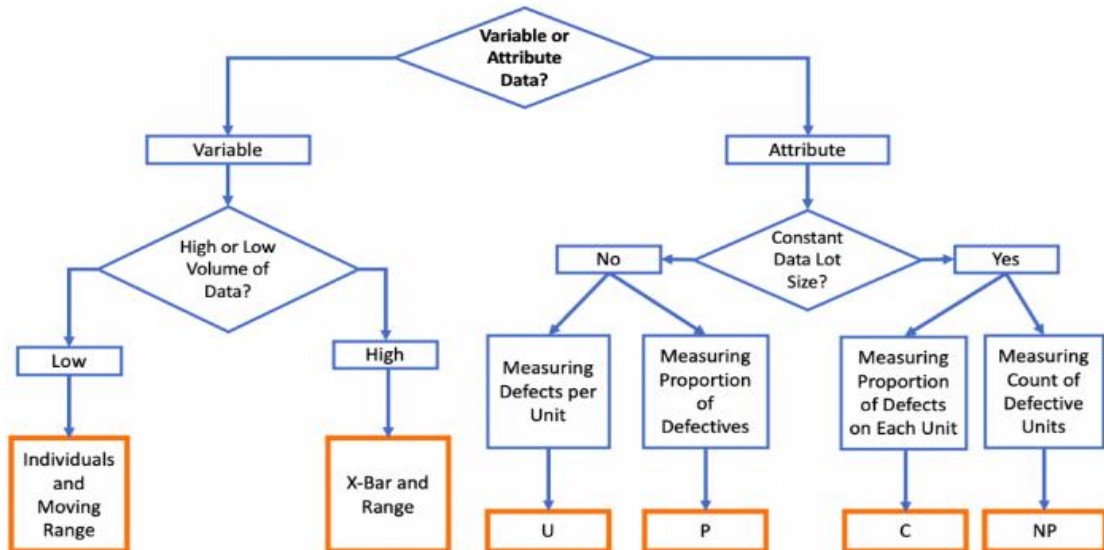


Figure IV.6. Les différents types des cartes de contrôles.

Dans notre analyse, nous projetons la lumière sur la carte de contrôle X-Bar (\bar{X}) et la carte R (Range), qui sont des outils performants pour comprendre la répartition des variables ou des valeurs dans l'analyse statistique univariée. Ils offrent la possibilité de configurer des résultats et de formuler des conclusions en fonction de la répartition des données.

L'objectif de l'utilisation conjointe des cartes \bar{X} et R est de surveiller simultanément la moyenne, l'écart type et la variabilité des données. En d'autres termes, la carte \bar{X} contrôle la

variabilité entre les échantillons (μ), tandis que la carte R surveille la variabilité à l'intérieur des échantillons (σ).

Considérons que les caractéristiques de qualité que nous prenons en compte suivent une distribution normale, caractérisée par une moyenne μ et un écart type σ .

Si x_1, x_2, \dots, x_n est échantillon de taille n , alors la moyenne de cet échantillon est \bar{x} qui décrit par l'équation (IV.1).

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad Eq(IV.1)$$

\bar{X} est normalement distribué avec la moyenne μ et l'écart type σ , avec $\sigma_{\bar{x}}$ exprimé par l'équation (IV.2).

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n} \quad Eq(IV.2)$$

Si la probabilité est $1-\alpha$, la moyenne de l'échantillon se trouve entre les deux limites de contrôle. Ainsi, la référence de ces limites est la ligne du centre (Center line CL). Les équations (IV.3) et (IV.4) décrivent ces deux limites.

$$UCL = \mu + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad Eq(IV.3)$$

$$LCL = \mu - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad Eq(IV.4)$$

Les valeurs mentionnées ci-dessus peuvent servir de limites de contrôle supérieur et inférieur sur une carte de contrôle pour les moyennes d'échantillons, à condition que les paramètres du processus μ et σ soient connus. Dans ce contexte, les cartes de contrôle X-barre et R sont définies par les relations suivantes.

Pour la carte X-bar,

$$UCL = \mu + A\sigma \quad Eq(IV.5)$$

$$CL = \mu \quad Eq(IV.6)$$

$$LCL = \mu - A\sigma \quad Eq(IV.7)$$

Pour la carte R,

$$LCL = D_2\sigma \quad Eq(IV.8)$$

$$LCL = d_2\sigma \quad Eq(IV.9)$$

$$LCL = D_1\sigma \quad Eq(IV.10)$$

Avec A_1, D_1, D_2 et d_2 étant des facteurs constants relevés dans les tableaux des facteurs pour construire les variables des cartes de contrôles. Si les paramètres μ et σ ne sont pas connus, dans ce cas, ils peuvent être estimés à l'aide d'autres variables en construisant des sous-groupes pour obtenir une nouvelle moyenne μ' et un écart type σ' (voir annexe VI).

Généralement, les graphiques des deux cartes de contrôle combinées prennent les formes comme illustré dans la figure (IV.7) en mettant la carte X bar au-dessus et la carte R en dessous.

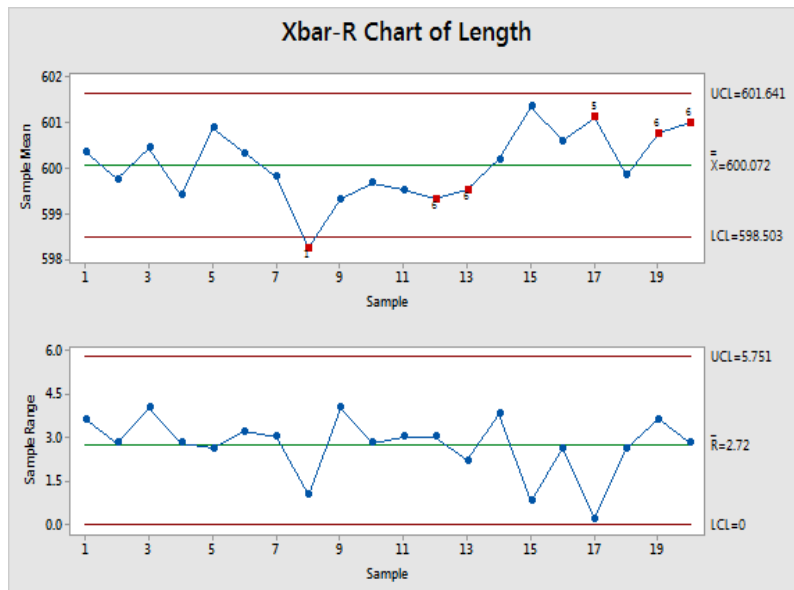


Figure IV.7. Présentation de la carte X-bar et la carte R.

IV.5.1. Résultats du point N°1

Les résultats du point 01 pour les paramètres électriques (E_{ON} , E_{OFF} et I_{CC}) de la conduite du gaz situé près de la ligne du tramway en position parallèle sont présentés respectivement dans les figures (IV.8), (IV.9) et (IV.10).

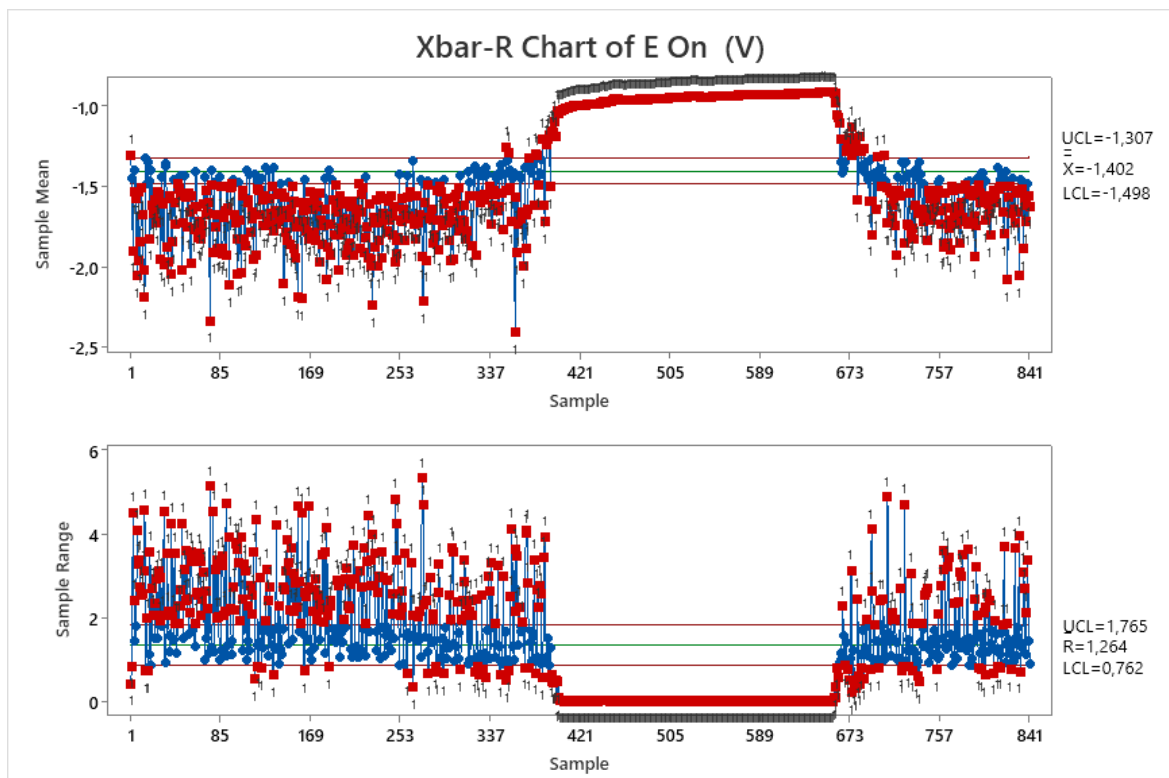


Figure IV.8. Résultats du point 01 : Potentiel avec protection cathodique E_{ON} .

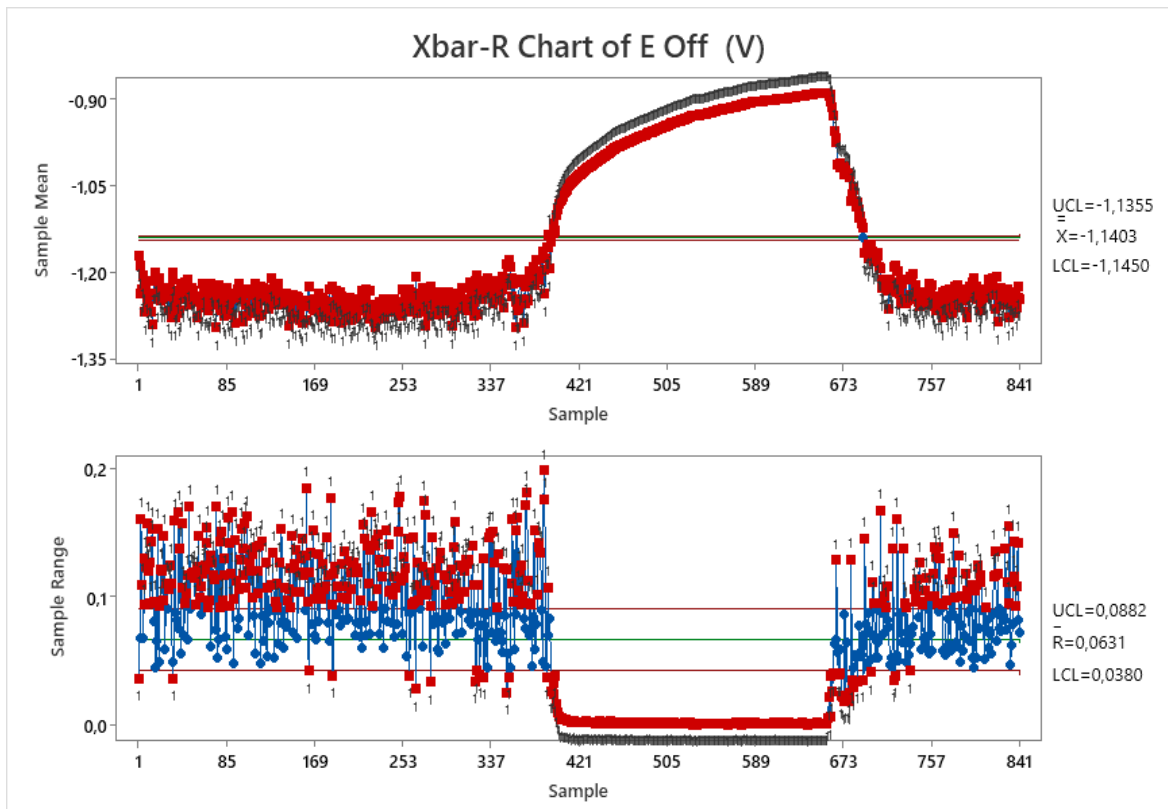


Figure IV.9. Résultats du point 01 : Potentiel sans protection cathodique E_{OFF} .

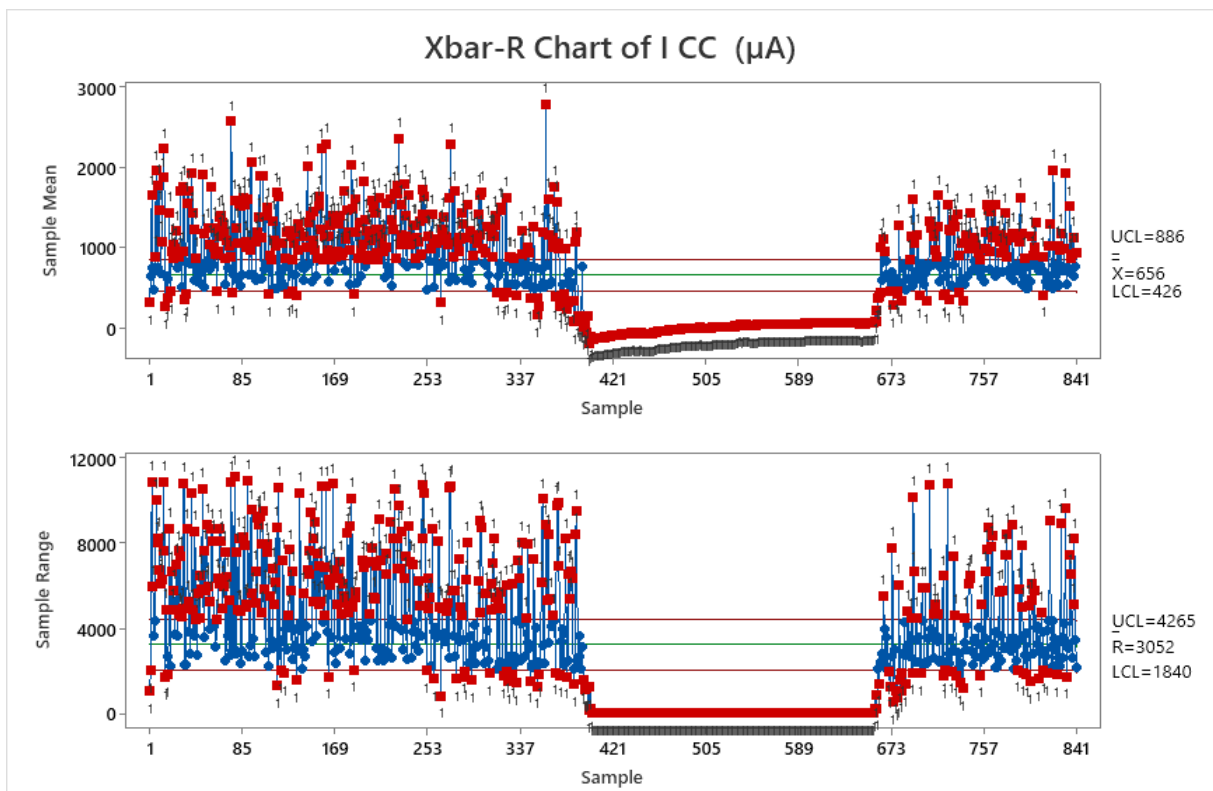


Figure IV.10. Résulta

ts du point 01 : Courant transitant le témoin métallique I_{CC} .

IV.5.2. Résultats du point N°05

Les figures (IV.11), (IV.12) et (IV.13), représentent respectivement les résultats du point N° 05 d'une ligne du tramway traversant un réseau du gaz en position de croisement.

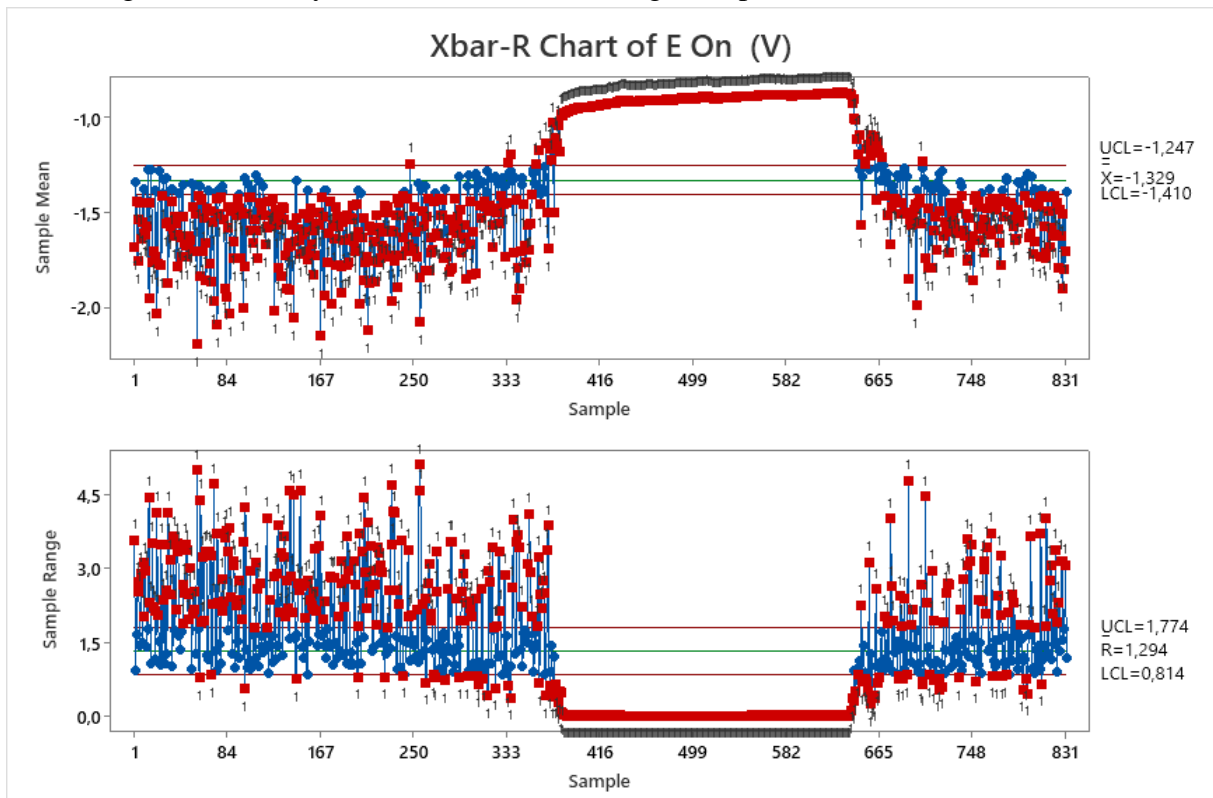


Figure IV.11. Résultats du point 05 : Potentiel avec protection cathodique E_{ON} .

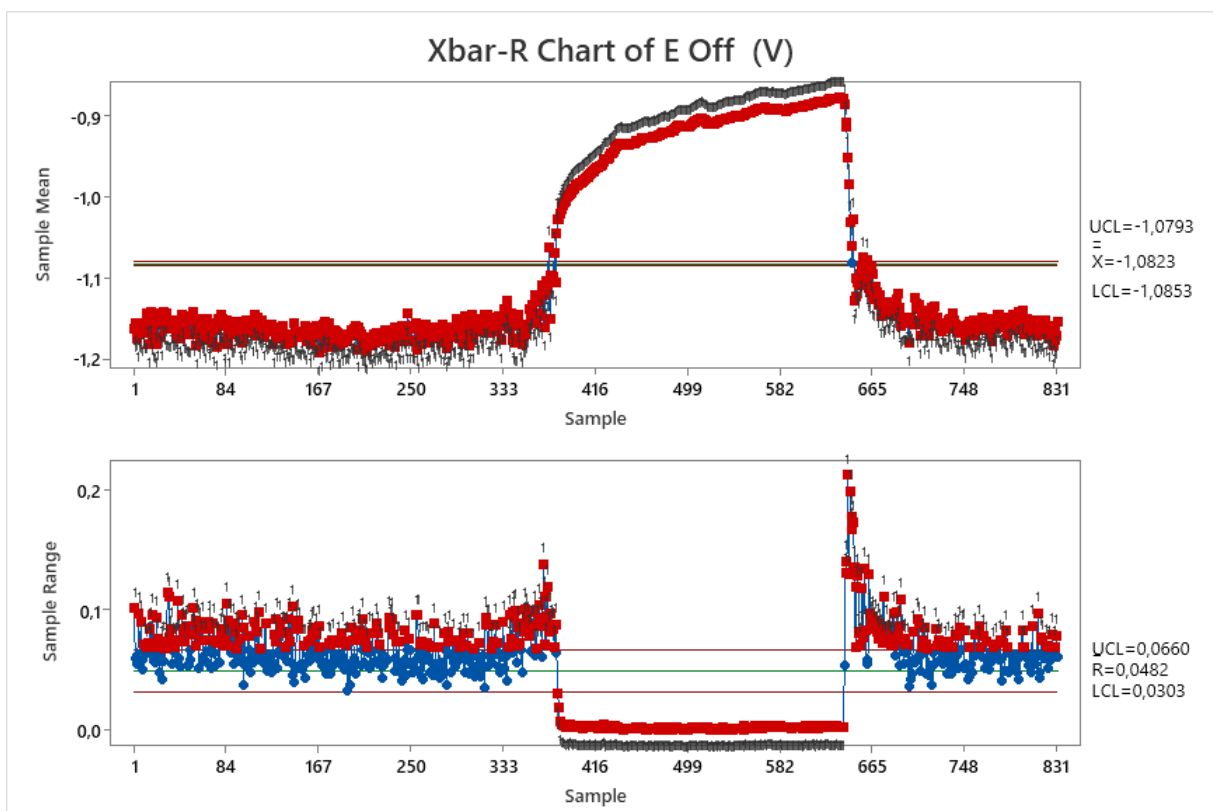


Figure IV.12. Résultats du point 05 : Potentiel sans protection cathodique E_{OFF} .

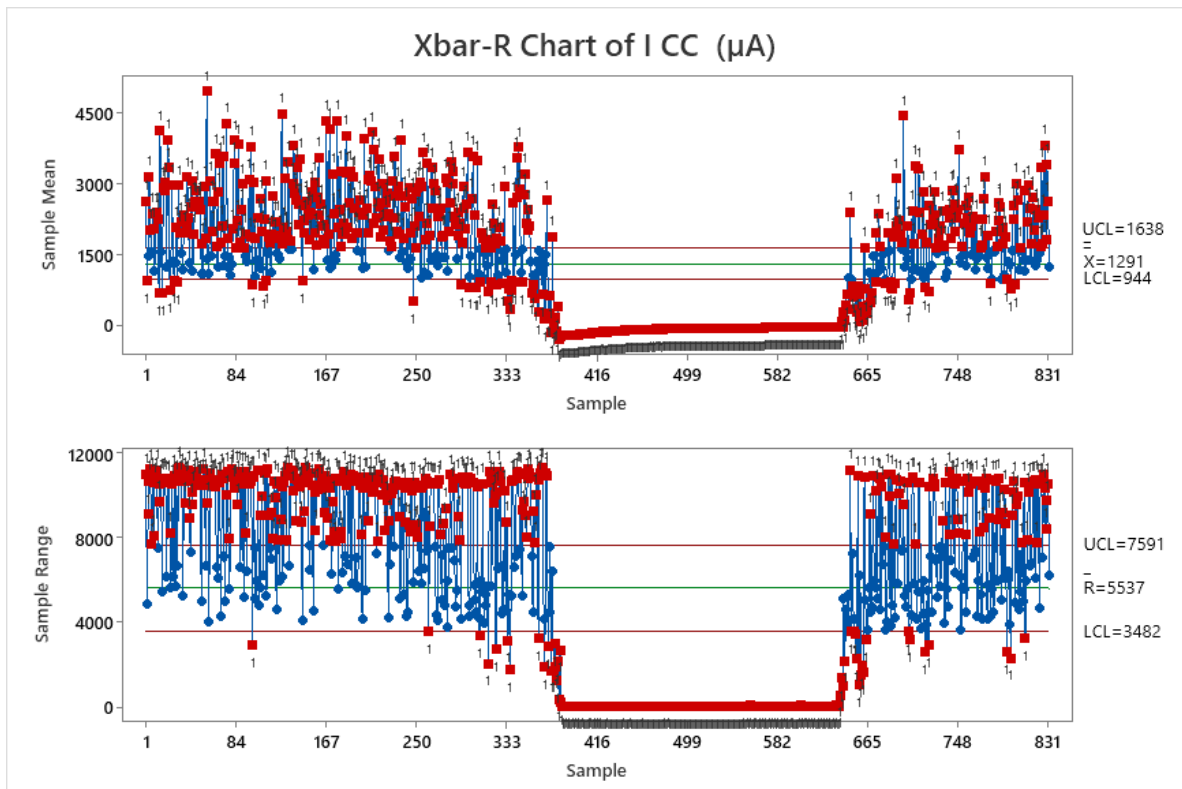


Figure IV.13. Résultats du point 05 : Courant transitant le témoin métallique ICC.

IV.5.3. Résultats du point N°19

Les résultats du point N° 19 pour les paramètres électriques (E_{ON} , E_{OFF} et I_{CC}) de la conduite de gaz sont présentés respectivement dans les figures (IV.14), (IV.15) et (IV.16).

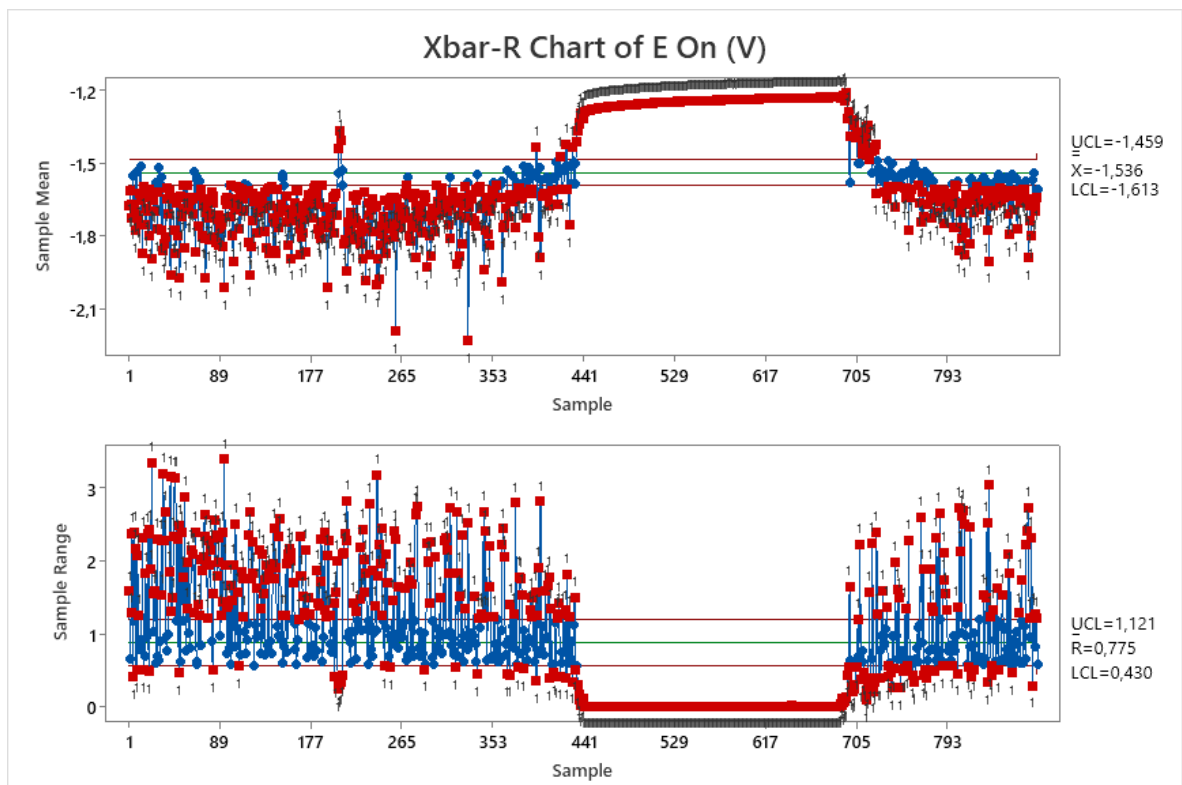


Figure IV.14. Résultat du point 19 : Potentiel avec protection cathodique E_{ON} .

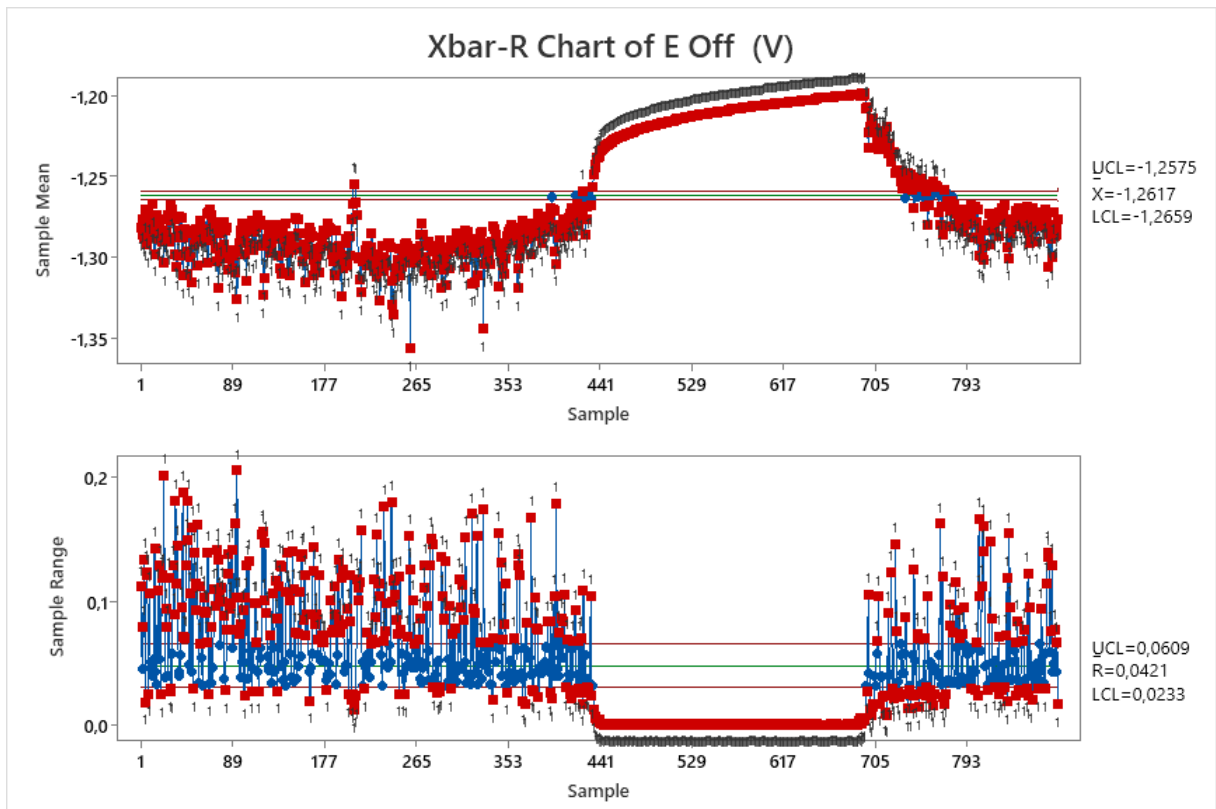


Figure IV.15. Résultats du point 19 : Potentiel sans protection cathodique E_{OFF} .

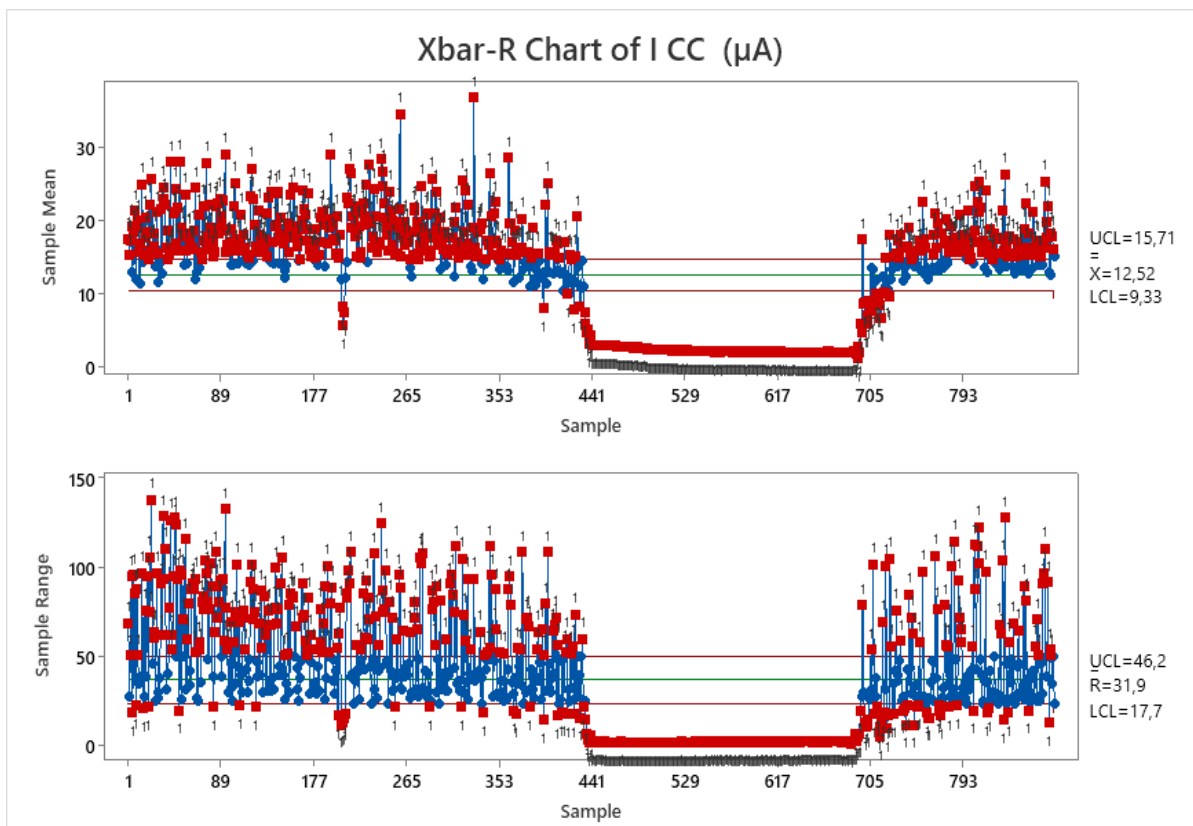


Figure IV.16. Résultats du point 19 : Courant transiant le témoin métallique I_{CC} .

IV.5.4. Résultats du point N°23

Les résultats des paramètres électriques (E_{ON} , E_{OFF} et I_{CC}) de la conduite de gaz, qui est en parallèle avec la ligne de tramway, sont présentés dans les figures (IV.17), (IV.18) et (IV.19).

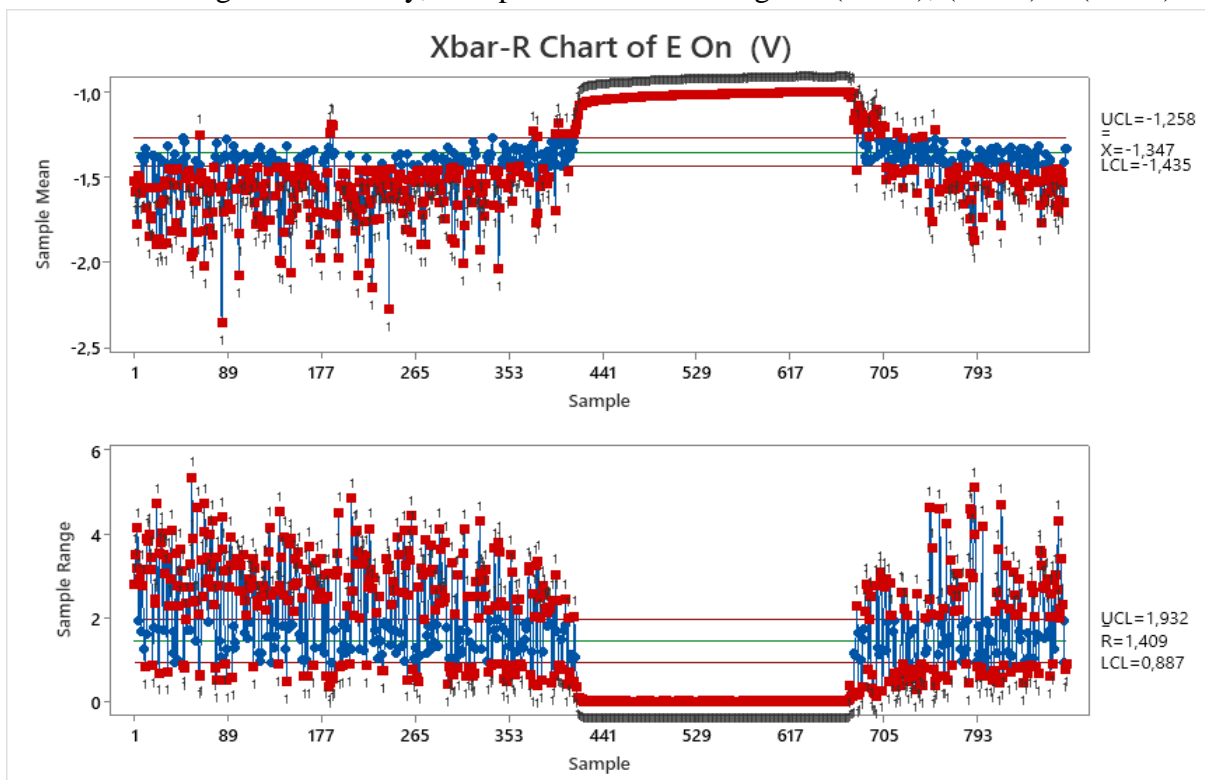


Figure IV.17. Résultats du point 23 : Potentiel avec protection cathodique E_{ON} .

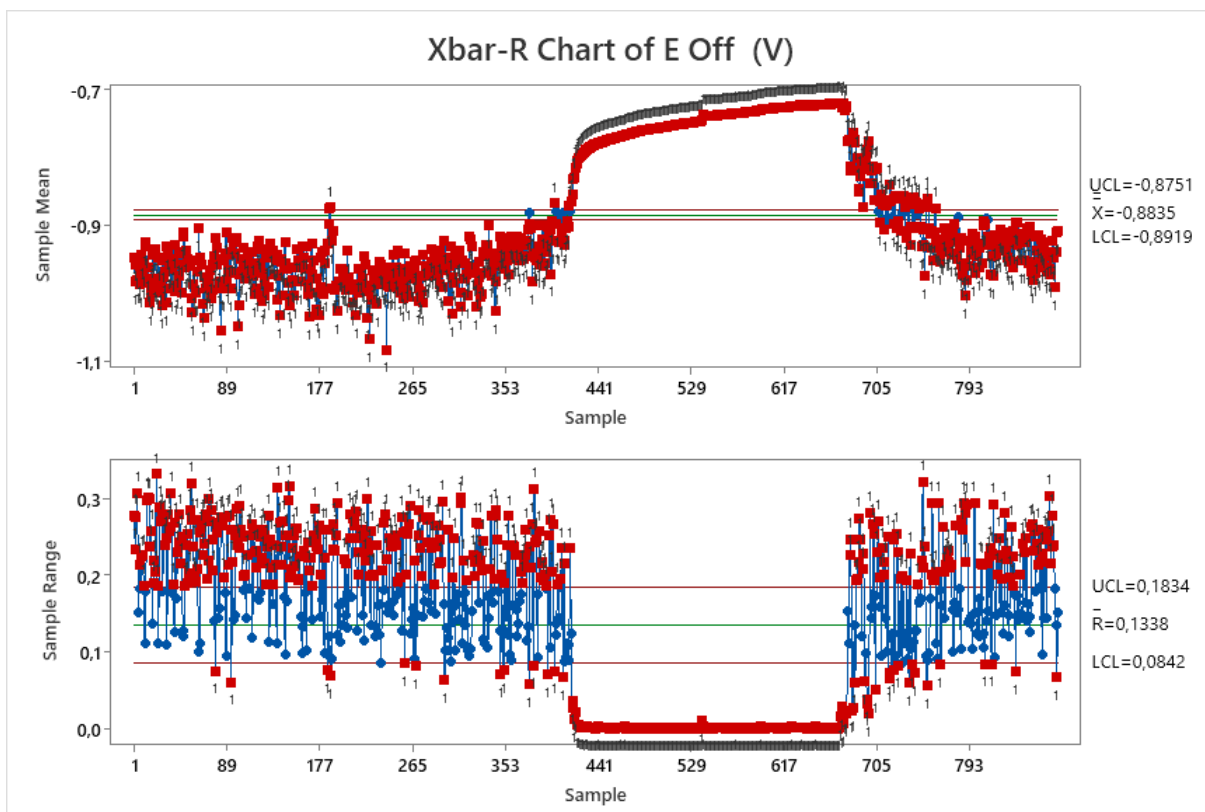


Figure IV.18. Résultats du point 23 : Potentiel sans protection cathodique E_{OFF} .

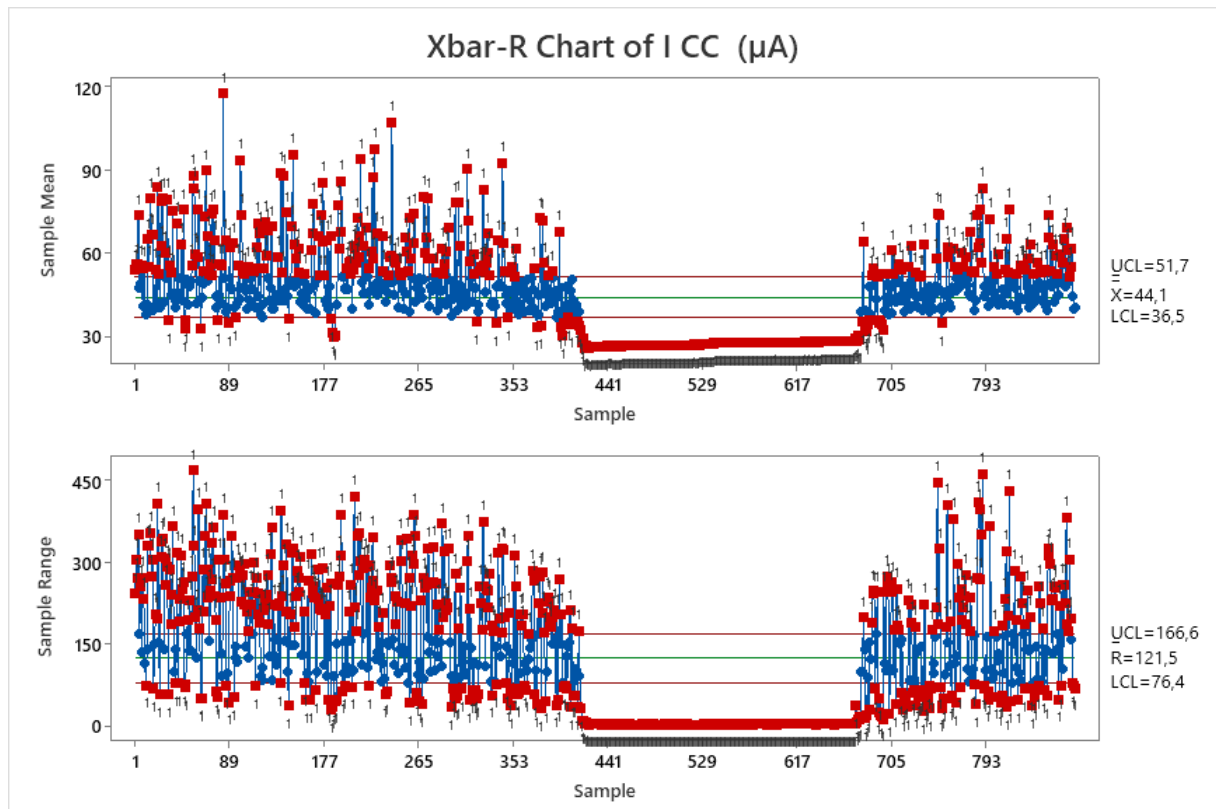


Figure IV.19. Résultats du point 23 : Courant transitant le témoin métallique I_{CC} .

IV.5.5. Discussion

Dans notre analyse, nous avons examiné un ensemble de données comprenant des observations sur plus de 84000 (chaque 100 seconde le modèle contrôle un échantillon) échantillons, avec 4 points de contrôle principaux, chacun contenant 3 paramètres tels qu' E_{ON} , E_{OFF} et I_{CC} . Les résultats des cartes \bar{X} et R pour E_{ON} , présentés dans la Figure IV.8, montrent clairement des signes de processus instable. En effet, chaque 100 minutes, une valeur sort des limites de contrôle, indiquant une anomalie significative dans le processus. Cette observation est cohérente avec le fait que tous les points de contrôle présentent au moins 100 échantillons en dehors des limites de contrôle, confirmant ainsi un processus instable.

L'anomalie de comportement que nous observons peut être attribuée à une surprotection excessive du système. Il est également possible que des mesures correctives excessives aient été prises, entraînant une variabilité accrue dans le processus. De plus, des problèmes de réglage ou des changements non maîtrisés dans les conditions du processus pourraient être à l'origine de ces variations indésirables.

Pour remédier à cette situation, il est essentiel de réévaluer les procédures de contrôle en place et de mettre en œuvre des actions correctives ciblées pour ramener le processus à un état stable. Nous recommandons également de surveiller étroitement le processus et d'investiguer les causes sous-jacentes de ces variations afin d'éviter les erreurs coûteuses et de garantir la qualité du produit ou du service final. Ces constatations mettent en évidence l'importance de l'analyse des données à l'aide des cartes \bar{X} et R, ainsi que la nécessité de réagir de manière proactive pour maintenir la stabilité du processus et minimiser les risques potentiels.

IV.6. Analyse des risques par la méthode de la statistique multivariée

Contrairement à la statistique univariée, la statistique multivariée représente une extension des cartes de contrôle univariées. Elle constitue une méthode d'analyse permettant d'identifier et d'évaluer les risques associés à plusieurs variables simultanément. Il s'agit d'une technique avancée en statistique visant à comprendre la relation entre les différentes variables du processus [122].

Cette technique trouve son application dans divers domaines tels que l'assurance, la finance et la sécurité industrielle. Dans cette section, nous réalisons une analyse appliquée à l'impact des courants vagabonds en utilisant les statistiques multivariées. Cette approche permet de visualiser les interactions entre les différentes variables, facilitant ainsi une prise de décision plus précise en matière de prévision des dégâts.

Dans cette analyse, nous combinons deux approches avancées de la statistique multivariée : la carte de contrôle T carrée de Hotelling (T^2 Hotelling) et la méthode EWMA (Exponentially Weighted Moving Average).

IV.6.1. Technique T^2 de Hotelling

La carte de contrôle T^2 Hotelling développée par Harold Hotelling en 1947, est une approche avancée qui regroupe et généralise les cartes X-barre, la carte R et la carte S. Au lieu de contrôler une seule variable, cette technique permet de tester un vecteur d'un échantillon pour plusieurs variables [122].

Cette méthode est la plus connue parmi les différentes formes des cartes de contrôle en statistique multivariée. En raison de sa simplicité et de sa facilité d'utilisation, elle est largement appliquée dans l'industrie pour résoudre divers problèmes [123]. De plus, elle peut être considérée comme une extension de la statistique univariée, notamment de la carte de contrôle Shewhart [124]. Les équations (IV.11) et (IV.12) représentent la carte T^2 pour des groupes d'observations.

$$T_i^2 = n(\bar{X} - \mu)^T \Sigma^{-1} (\bar{X} - \mu) \quad Eq(IV.11)$$

Ou par la formule avec $\bar{\bar{X}}$ est la moyenne des moyennes

$$T_i^2 = n(\bar{X} - \bar{\bar{X}})^T S^{-1} (\bar{X} - \bar{\bar{X}}) \quad Eq(IV.12)$$

Avec μ est la moyenne et Σ est la matrice de variance –covariance.

La limite UCL est définie par :

$$UCL = F_{x^2}^{-1}(1 - \alpha|p) \quad Eq(IV.13)$$

Les équations (IV.11) et (IV.13) sont applicables dans le cas où μ et Σ sont définies et La statistique T_i^2 suit la loi de distribution du x^2 à p degré de liberté, avec α est l'erreur de type1 et $F_{x^2}^{-1}$ est la fonction inverse de la distribution du x^2 à p degré de liberté [123].

Dans le cas où les paramètres ne sont pas connus, les équations de la carte pour un groupe de variable devient :

$$T_i^2 = n(\bar{X} - \mu)^T S^{-1} (\bar{X} - \mu) \quad Eq(IV.14)$$

$$UCL = \frac{p(m+1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{x^2}^{-1}(1-\alpha|p, m(n-1)-p+1) \quad Eq(IV.15)$$

Ou $F_{x^2}^{-1}(1-\alpha|p, m(n-1)-p+1)$ est la fonction de répartition de la loi Fisher de paramètre p et $(m(n-1)-p+1)$, il est noté que m et p sont respectivement la taille de l'échantillon et le nombre de variables [123].

Dans les deux cas, la limite de contrôle inférieure prend la valeur nulle

$$LCL = 0 \quad Eq(IV.16)$$

IV.6.2. Technique MEWMA multivariée

La méthode MEWMA, proposée par Lowry en 1992, est utilisée pour surveiller les variations des risques sur une période donnée en vue de prendre des mesures préventives. Son principal objectif est de surveiller à la fois le vecteur des moyennes μ et la matrice des variances-covariances (Σ) [124]. Cette technique de contrôle vise à suivre la statistique de processus définie par Q_i .

$$Q_i = Y_i^T \Sigma_{Y_i}^{-1} Y_i \quad Eq(IV.17)$$

Avec,

$$\Sigma_{Y_i} = \frac{r}{2-r} \Sigma \quad Eq(IV.18)$$

Et

$$Y_i = r(X_i - \mu) + (1-r)Y_{i-1} \quad Eq(IV.19)$$

Ou $r \in (0,1)$, (r est équivalent à λ pour les cartes EWMA univariées. Une limite de contrôle spécifiée définie par le symbole H est signalé un cas hors contrôle quand $Q_i > H$ où $H > 0$.

Pour la surveillance d'une seule variable, la statistique surveillée est définie par l'équation (IV.20).

$$Y_i = (1-\lambda)Y_{i-1} + \lambda \bar{X}_i \quad Eq(IV.20)$$

Ou λ est constante compris entre $0 < \lambda < 1$ et la moyenne stratégique $Y_0 = \mu_0$

La carte EWMA est une moyenne pondérée de toute les moyenne des échantillons précédents et peut être exprimée par la relation (IV.21)

$$Y_i = \lambda \sum_{j=0}^{i-1} (1-\lambda)^j Y_{i-j} + (1-\lambda)^i Y_0 \quad Eq(IV.21)$$

Les contrôle limites supérieure et inférieure sont calculées par les équations (IV.22) et (IV.23) respectivement

$$LCL = \mu_0 + K\sigma \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2-\lambda}\right) [1 - (1-\lambda)^{2i}]} \quad Eq(IV.22)$$

$$LCL = \mu_0 - K\sigma \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2-\lambda}\right) [1 - (1-\lambda)^{2i}]}, K > 0 \tag{Eq(IV.23)}$$

L'analyse des risques par la statistique multivariée, en combinant ces deux approches, permet d'obtenir des observations plus précises des risques. De plus, la combinaison des deux cartes de contrôle permet de détecter facilement les risques potentiels et d'identifier les causes possibles des anomalies dans les échantillons. Cela facilite la prise de décisions visant à limiter les effets néfastes dans l'industrie en maîtrisant les causes sous-jacentes.

IV.6.3. Résultats du point N°01

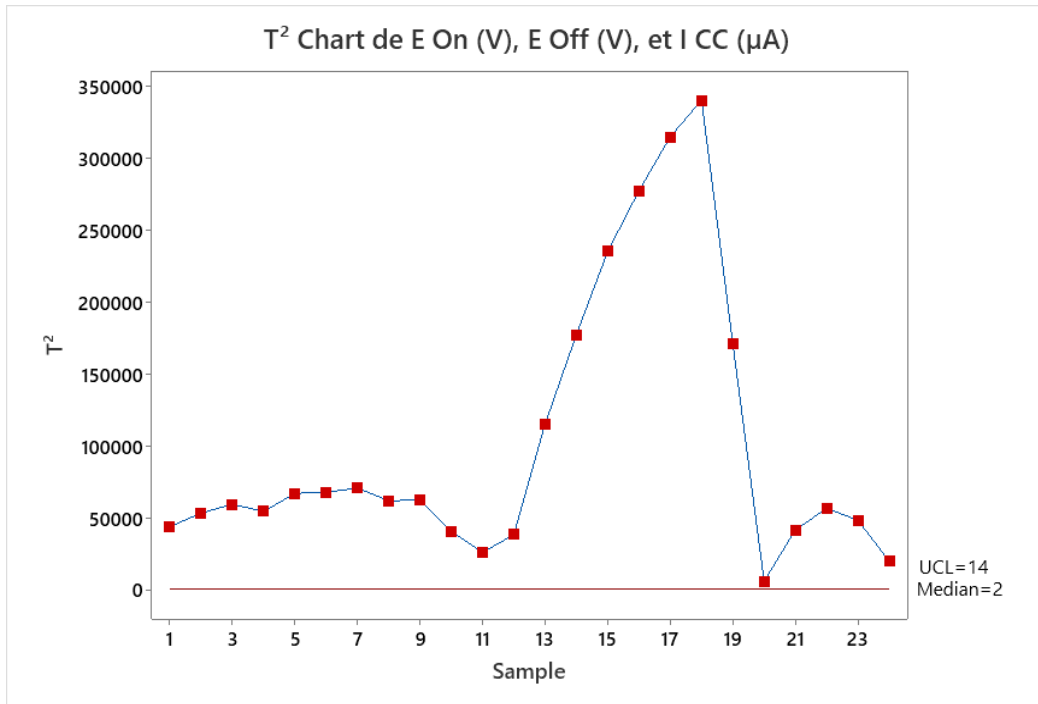


Figure IV.20. Résultats du point 01 par la carte T² de Hotelling.

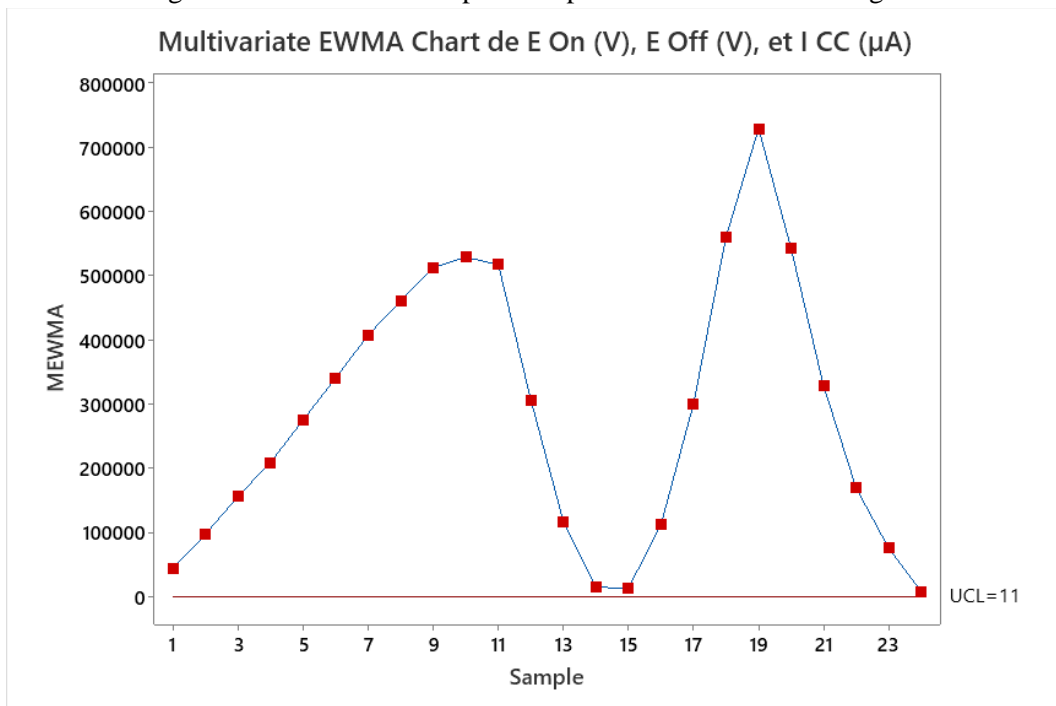


Figure IV.21. Résultats du point 01 par la carte MEWMA.

IV.6.4. Résultats du point N°05

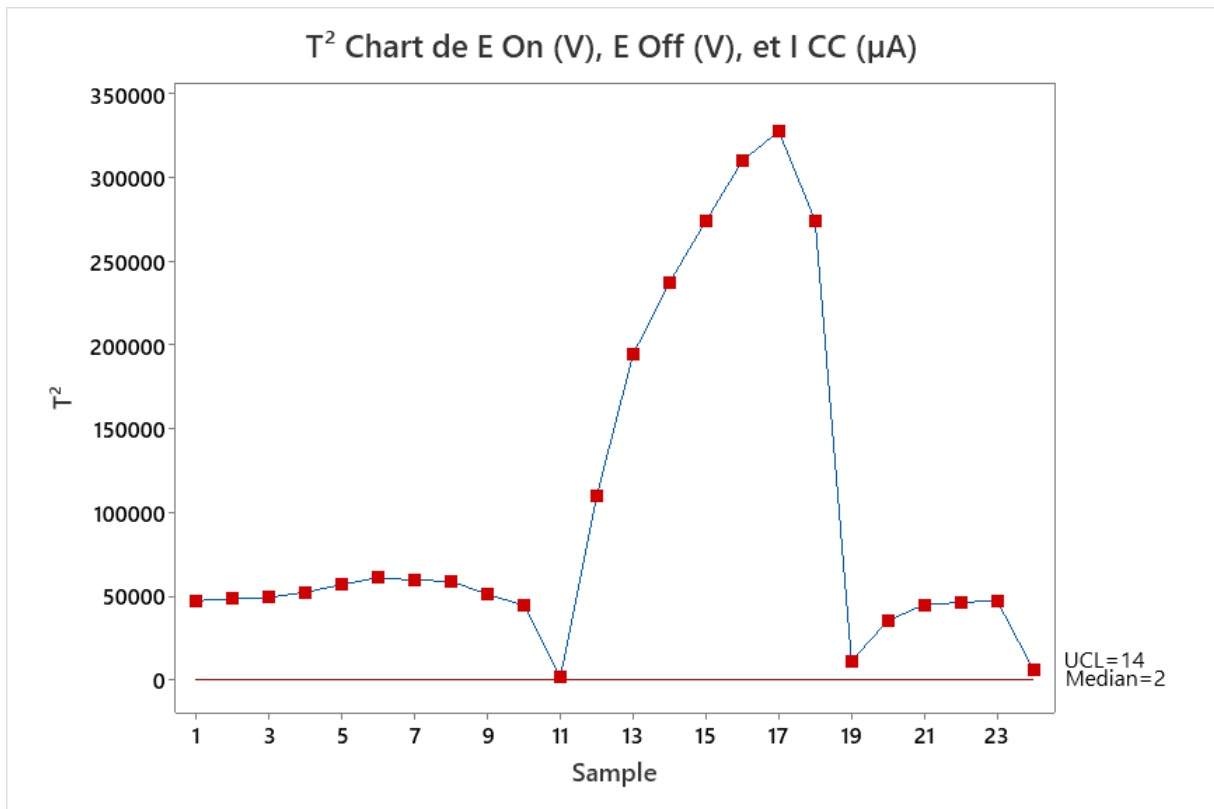


Figure IV.22. Résultats du point 05 par la carte T² de Hotelling.

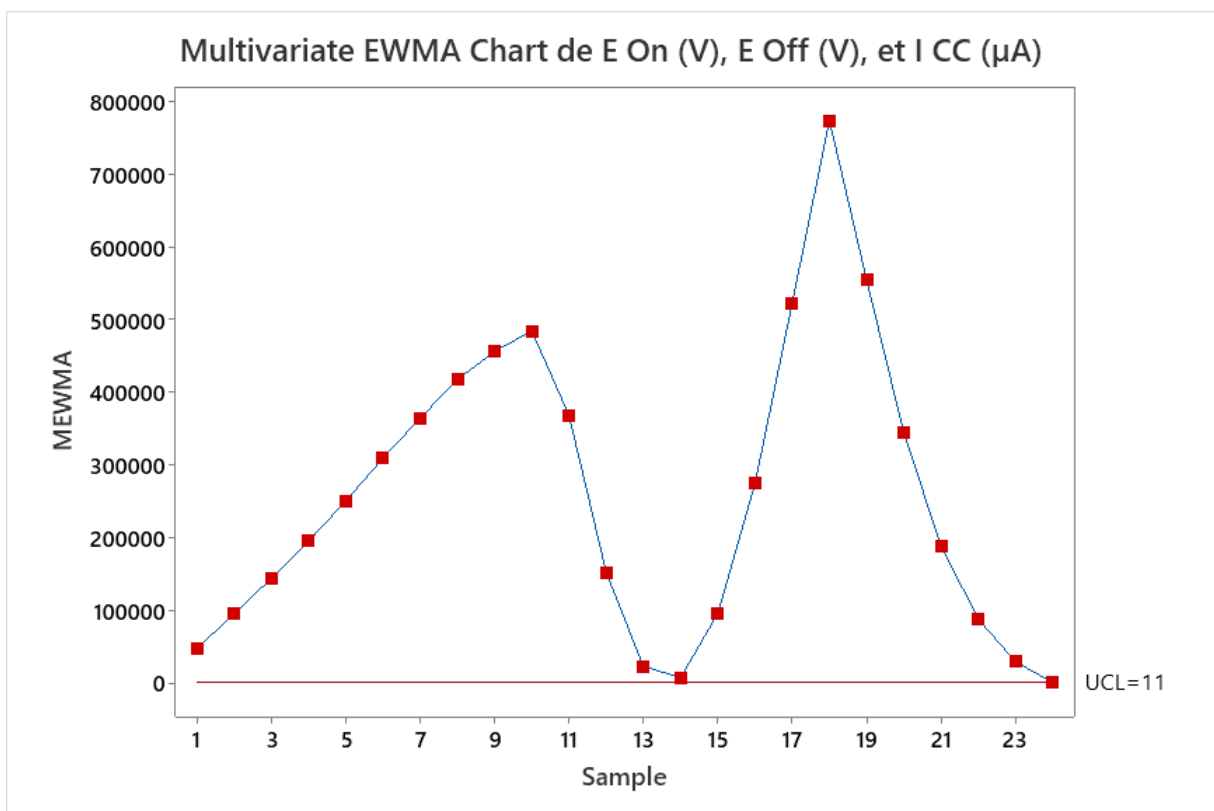


Figure IV.23. Résultats du point 05 par la carte MEWMA.

IV.6.5. Résultats du point N°19

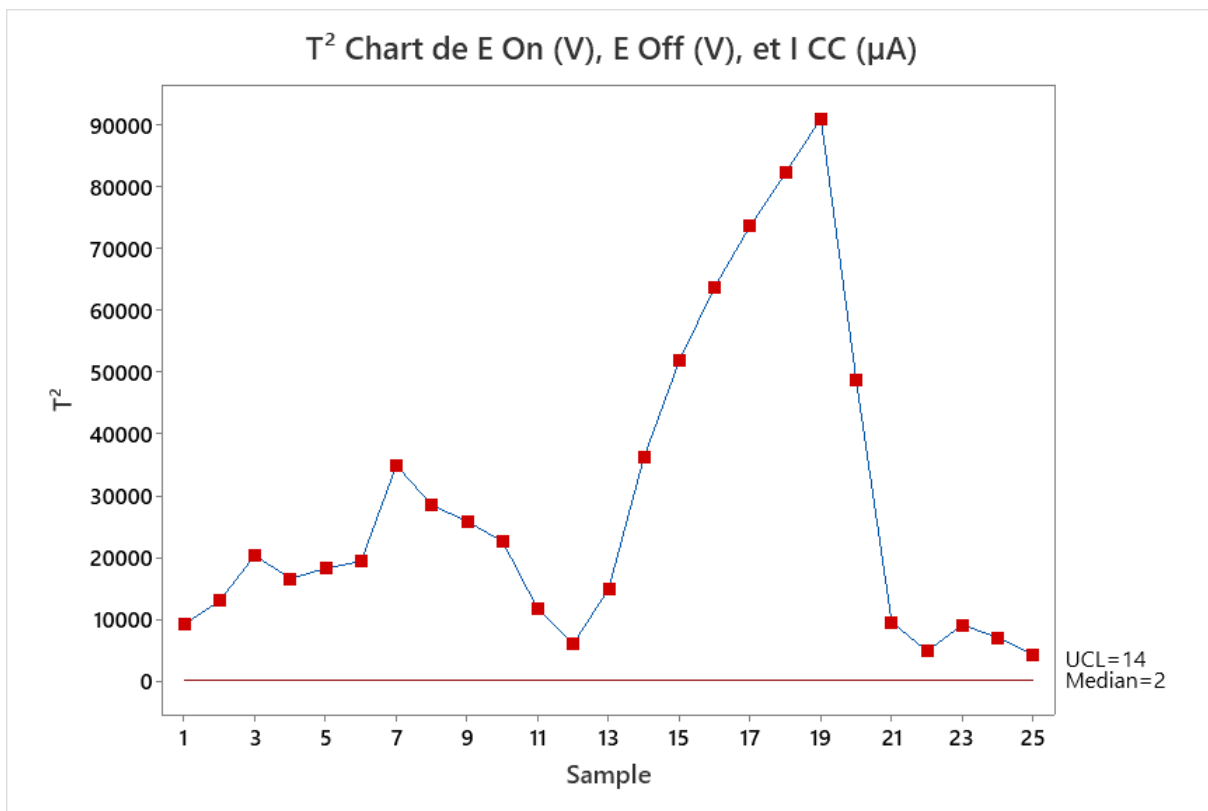


Figure IV.24. Résultats du point 19 par la carte T² de Hotelling.

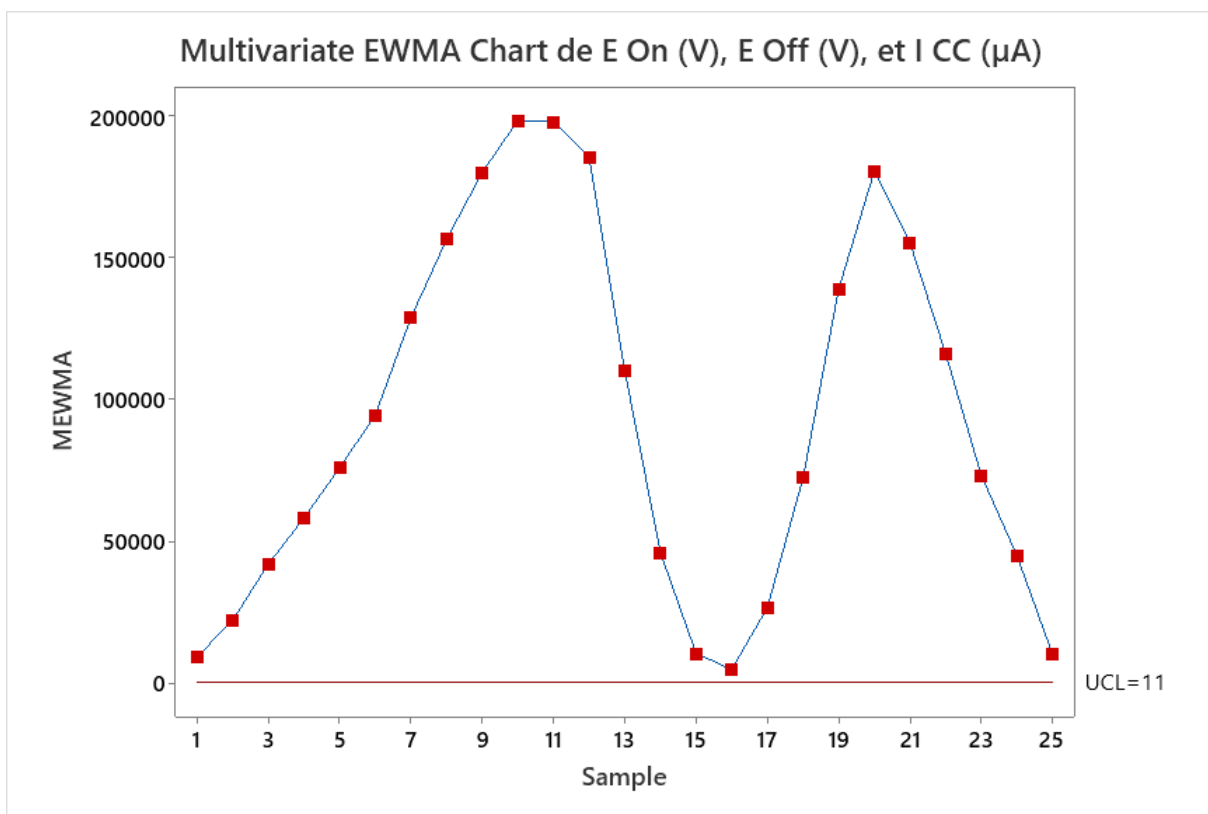


Figure IV.25. Résultats du point 19 par la carte MEWMA.

IV.6.6. Résultats du point N°23

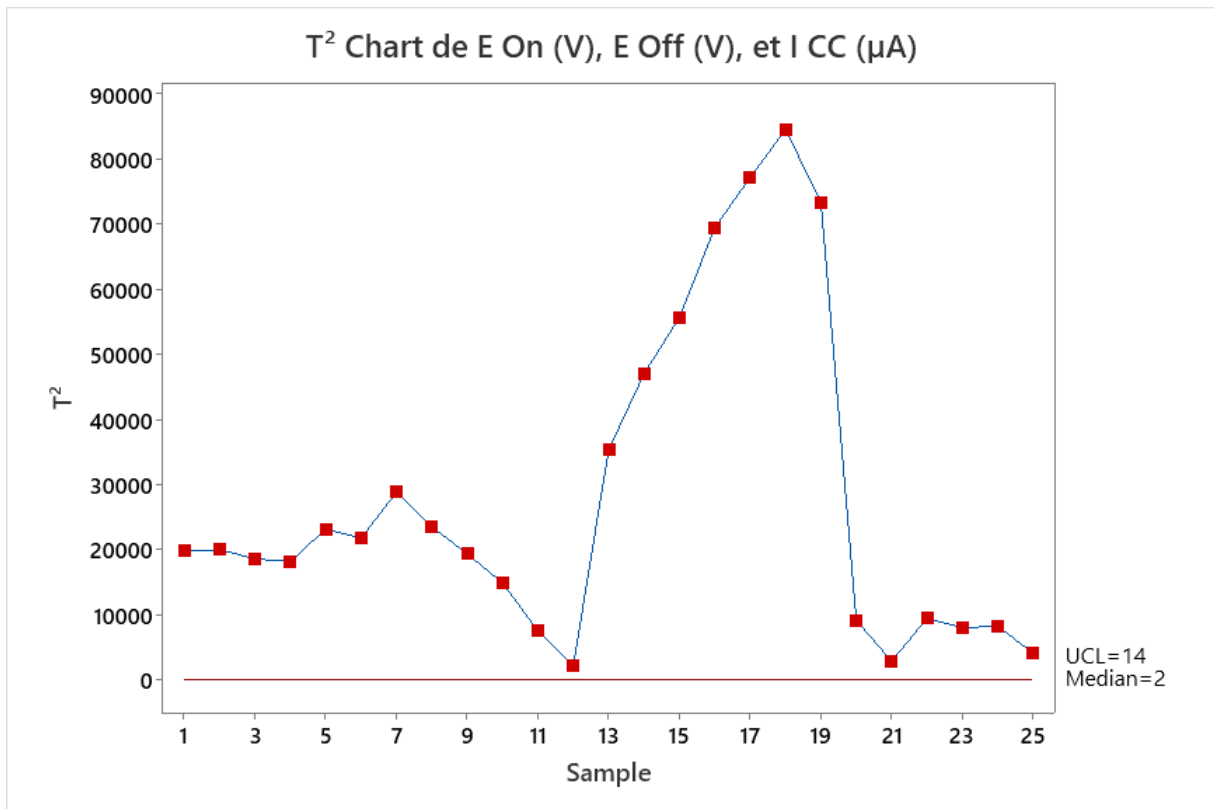


Figure IV.26. Résultats du point 23 par la carte T² de Hotelling.

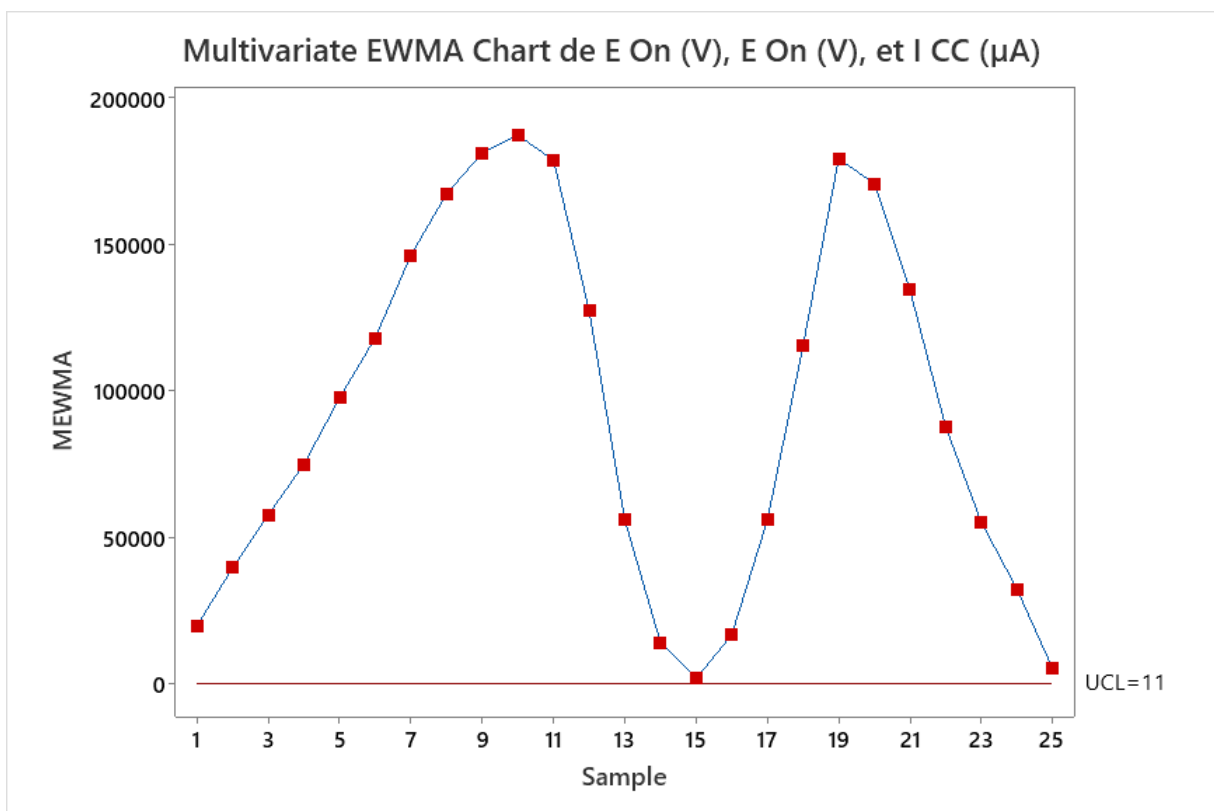


Figure IV.27. Résultats du point 23 par la carte MEWMA.

IV.6.7. Discussion

Dans notre analyse, nous avons utilisé la puissante statistique multivariée avec les cartes T² Hotelling et EWMA pour surveiller notre processus. Ces outils ont été essentiels pour évaluer la variabilité et la stabilité de plusieurs variables simultanément. La carte T² Hotelling a rapidement détecté tout écart significatif dans les moyennes et les covariances des variables, tandis que la méthode EWMA nous a aidés à repérer les tendances temporelles pour une prévention précoce.

Cette combinaison d'approches nous a fourni une vue complète de notre processus. Elle a permis des observations plus précises des risques potentiels et une identification rapide des causes des anomalies. Ces informations ont été cruciales pour prendre des décisions éclairées, garantissant la qualité et la stabilité du processus.

Ces méthodes se sont révélées extrêmement efficaces pour la gestion proactive des risques et ont contribué à l'amélioration continue de nos opérations.

IV.7. Analyse du risque par la méthode de la théorie de probabilité

L'analyse de la corrosion par courants vagabonds vise à estimer les valeurs du potentiel et du courant transitant à travers une structure dans les deux modes, à savoir le courant établi et le courant coupé. Cette analyse a pour objectif d'évaluer la probabilité de défaillance des pipelines, afin de prendre des décisions concernant la planification de la maintenance et de gérer les risques associés [125].

Cette approche repose sur l'étude des risques appliquée aux paramètres à surveiller, en établissant des limites de contrôle. Cependant, dans notre cas, contrairement aux méthodes des cartes de contrôle (univariées et multivariées), où les calculs des limites de contrôle sont effectués par l'outil d'analyse lui-même (SPSS ou MINITAB), les seuils de contrôle (UCL et LCL) sont déterminés par l'opérateur. En d'autres termes, les limites de contrôle correspondent aux bornes de l'intervalle d'immunité permettant à la structure de rester toujours protégée, quelle que soit la variation des paramètres physico-chimiques et environnementaux. Cela équivaut à la zone de protection cathodique dans le diagramme de Pourbaix.

Dans le domaine de la probabilité, il est primordiale d'utiliser la loi de distribution normale, également connue sous le nom de loi gaussienne, car elle est compatible avec la représentation de résultats fiables et permet de modéliser le risque et le vieillissement des processus industriels [126].

Pour cela, la fonction de densité est exprimée selon cette loi par l'équation (IV.22) [127].

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}, -\infty \leq t \leq +\infty \quad Eq(IV.22)$$

Où, μ et σ sont des paramètres pour définie la racine carrée de la variance.

[127] a défini la fonction de densité cumulative (FDC) exprimée par $F(t)$ pour la distribution normale dans l'équation (IV.23).

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad Eq(IV.23)$$

La fonction de fiabilité pour la distribution normale, selon [127], est exprimée par la relation (IV.24).

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad Eq(IV.24)$$

Si l'on remplace $(t - \mu)/\sigma$ par la transformation Z , l'expression de la fonction de densité cumulative devient la suivante :

$$\Phi(Z) = \int_{-\infty}^Z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad Eq(IV.25)$$

Par conséquent, la fonction de risque $h(t)$ pour la distribution normale est exprimée par l'équation (IV.26) selon [127].

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - \Phi(Z)} \quad Eq(IV.26)$$

Une autre méthode applicable pour estimer le taux de panne consiste à utiliser la méthode log-normal. La distribution log-normale prend la forme suivante :

$$Y = \mathbf{log}(T) \quad Eq(IV.27)$$

Alors, la durée de vie T suit aussi une distribution normale. Ainsi, Si Y est une fonction gaussienne avec une espérance μ_Y et la variance σ_Y^2 , dans ce cas la fonction de la densité comitative suit la relation (IV.28) [128].

$$\phi(y) = \frac{1}{\sigma_Y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_Y}{\sigma_Y}\right)^2}, -\infty \leq t \leq +\infty \quad Eq(IV.28)$$

Et la densité $f(t)$ devient ;

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma_Y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\mathbf{log}(t)-\mu_Y}{\sigma_Y}\right)^2}, t > 0 \quad Eq(IV.29)$$

Contrairement, les paramètres μ et σ dans la loi normale ne représentent pas la moyenne et la variance, mais expriment plutôt les paramètres d'échelle et de forme, respectivement. La fonction de survie suivant une loi log-normale est exprimée par la relation (IV.30) [129].

$$S(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\mathbf{log}(t) - \mu_Y}{\sigma_Y}\right) \quad Eq(IV.30)$$

Avec Φ est la fonction de répartition relative à loi gaussienne exprimé par l'équation(IV.31)

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2} dx \quad Eq(IV.31)$$

Le taux de panne de ce cas est donné par la relation (IV.32)

$$r(t) = \frac{f \frac{1}{t\sigma_Y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\mathbf{log}(t)-\mu_Y}{\sigma_Y}\right)^2} (t)}{1 - \Phi\left(\frac{\mathbf{log}(t) - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)} \quad Eq(IV.32)$$

Dans cette section, l'analyse repose sur le calcul du risque pour chaque paramètre dans les quatre points de contrôle. Ensuite, une estimation du risque global pour les trois paramètres électriques est réalisée en utilisant une combinaison d'outils de programmation. Ce qui rend ce travail original, c'est l'application d'une combinaison de techniques de probabilité par programmation dans le domaine de la corrosion par courants vagabonds, basée sur des mesures et des enregistrements des paramètres sur une période de vingt-quatre heures, totalisant plus de 84 100 mesures.

La présentation des résultats pour les quatre cas est organisée dans l'ordre suivant :

1. La limite de contrôle CL (référence) pour le courant continu transiant I_{CC}
2. Les limites de contrôles UCL/LCL (supérieure et inférieure) pour le potentiel E_{ON}
3. Les limites de contrôles UCL/LCL (supérieure et inférieure) pour le potentiel E_{OFF}
4. Le risque pour le courant continu transiant I_{CC}
5. Le risque pour les potentiels E_{ON}/ E_{OFF} pour la limite supérieure
6. Le risque pour les potentiels E_{ON}/ E_{OFF} pour la limite inférieure
7. Le risque global pour les trois paramètres (E_{ON} , E_{OFF} , I_{CC})

On rappelle que, les limites de contrôle pour estimer le risque sont fixées comme suit

- La limite de contrôle supérieure du potentiel : $UCL_E = -850\text{mV}$
- La limite de contrôle inférieure du potentiel: $LCL_E = -1200\text{mV}$
- La limite de contrôle supérieure du courant: $UCL_{I_{CC}} = 0$ (centre).
- La limite de contrôle inférieure du courant n'existe pas

IV.7.1. Résultats du point N°01

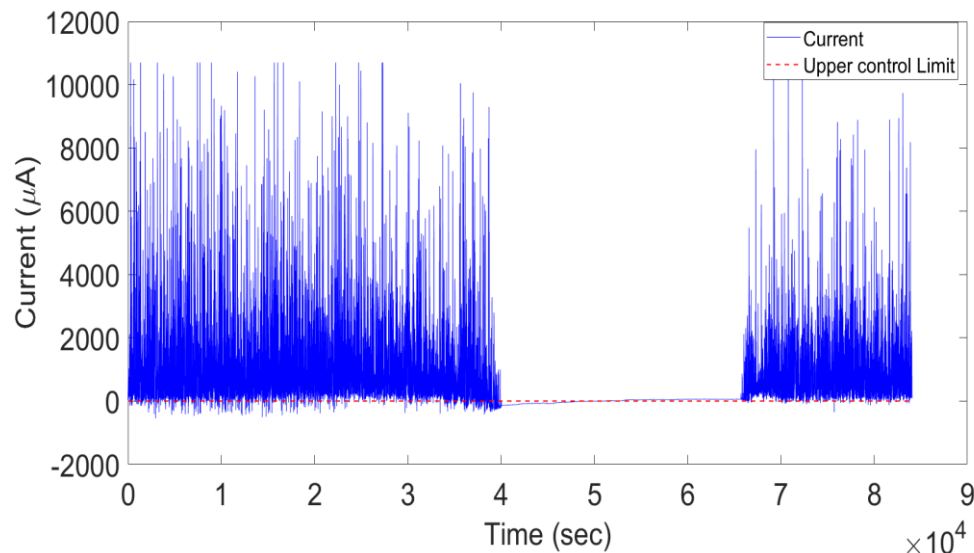


Figure IV.28. Limite de contrôle UCL pour le courant I_{CC} (point N°01).

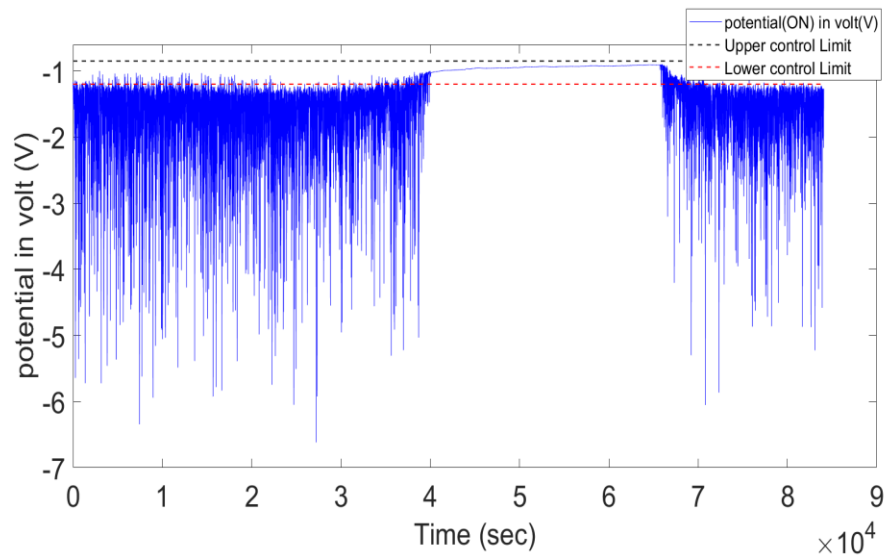


Figure IV.29. Limites de contrôles UCL/LCL pour le courant E_{ON} (point N°01).

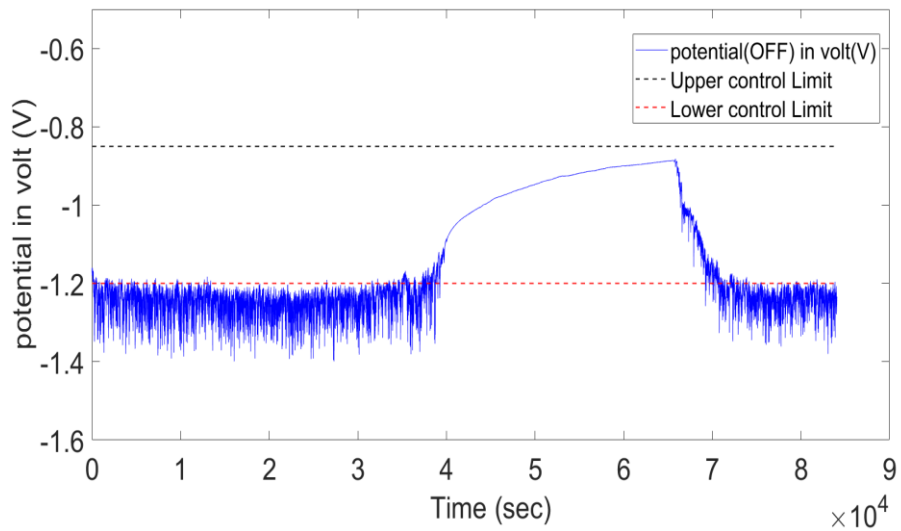


Figure IV.30. Limites de contrôles UCL/LCL pour le courant E_{OFF} (point N°01).

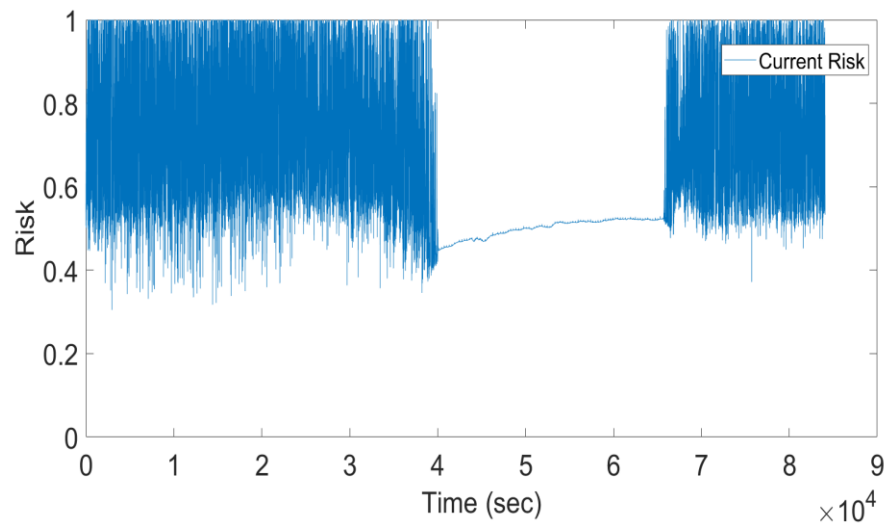


Figure IV.31. Risque pour la limite UCL pour le courant I_{CC} (point N°01).

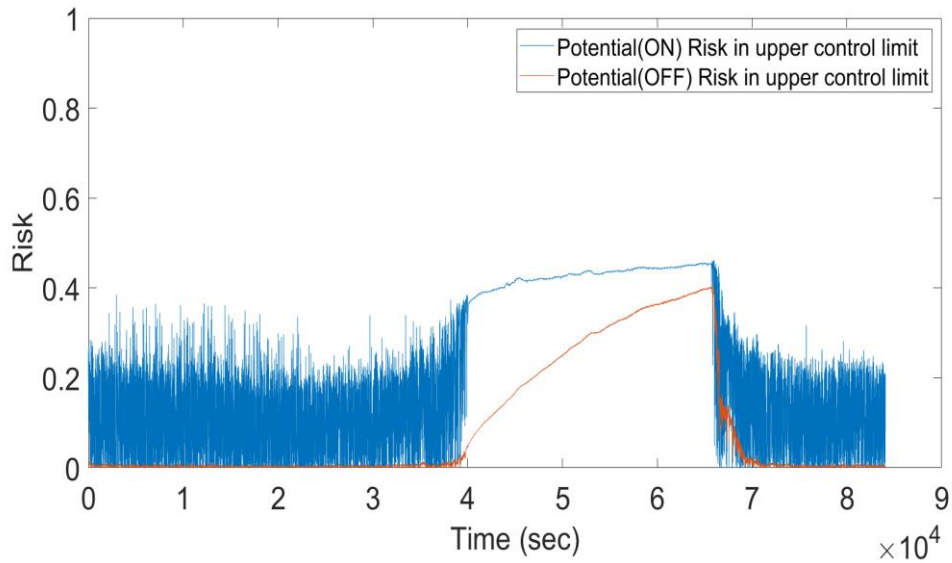


Figure IV.32. Risque pour la limite UCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°01).

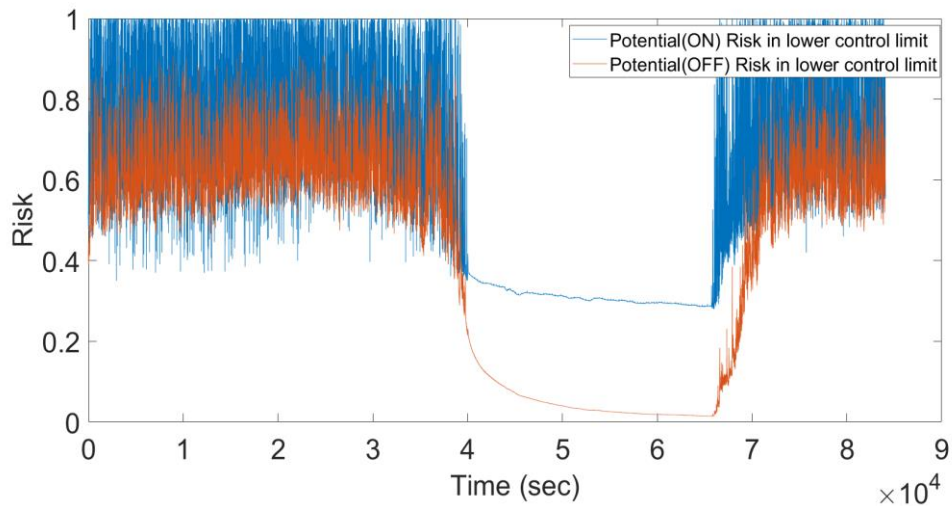


Figure IV.33. Risque pour la limite LCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°01).

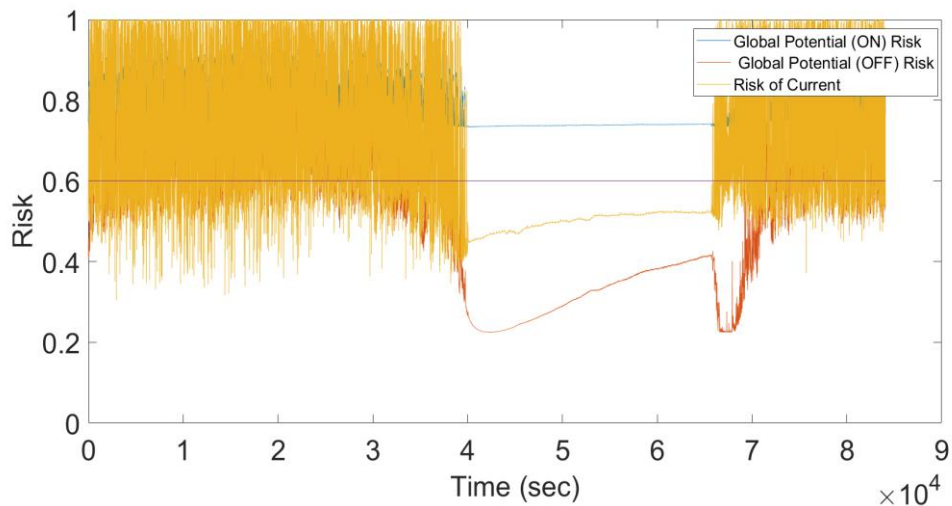


Figure IV.34. Risque global pour tous les paramètres (point N°01).

IV.7.2. Résultats du point N°05

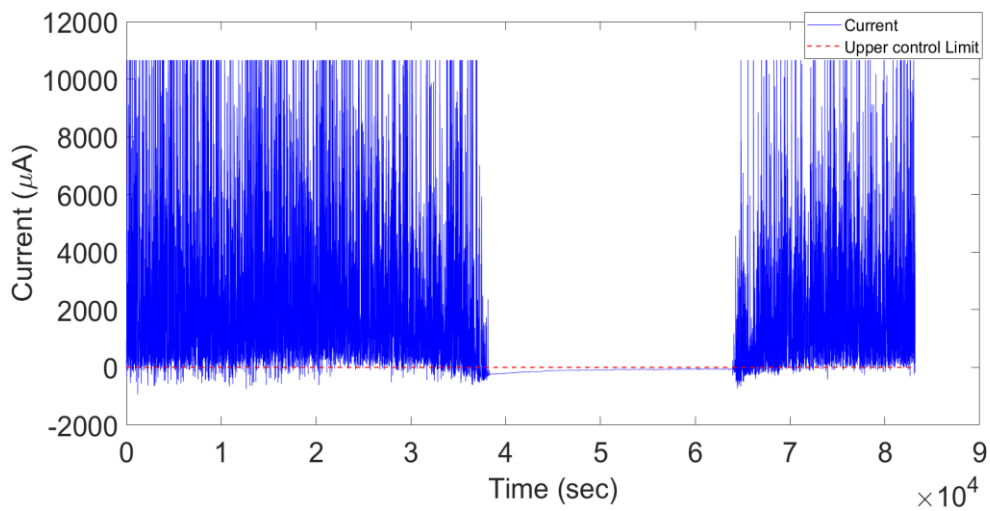


Figure IV.35. Limite de contrôle UCL pour le courant I_{CC} (point N°05).

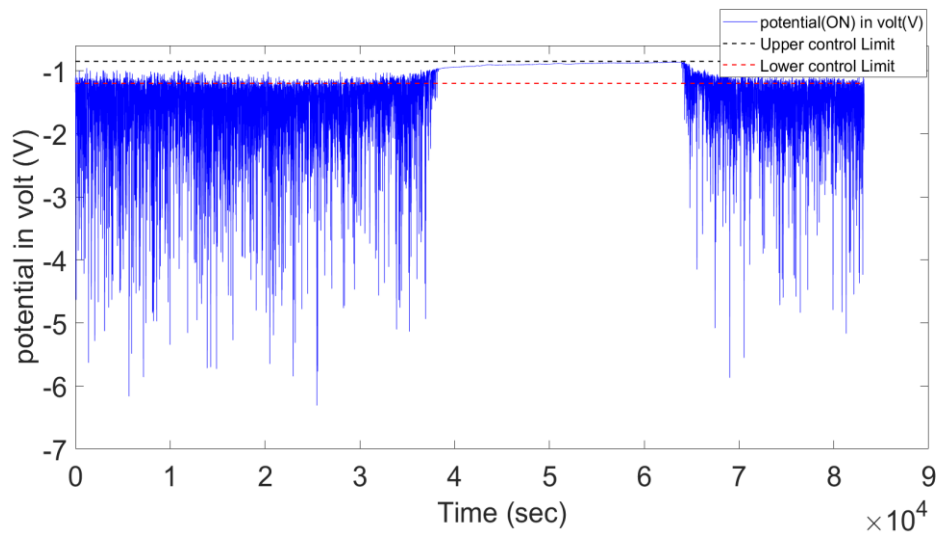


Figure IV.36. Limites de contrôles UCL/LCL pour le potentiel E_{ON} (point N°05).

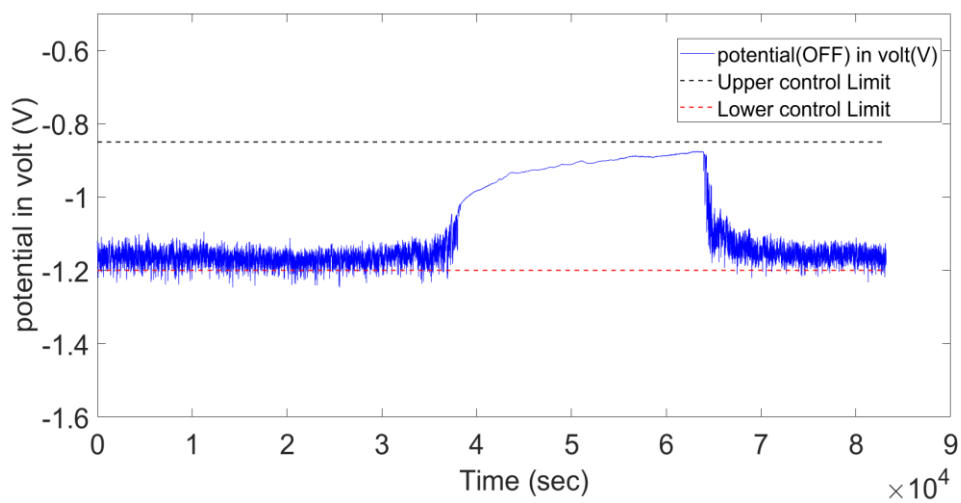


Figure IV.37. Limites de contrôles UCL/LCL pour le potentiel E_{OFF} (point N°05).

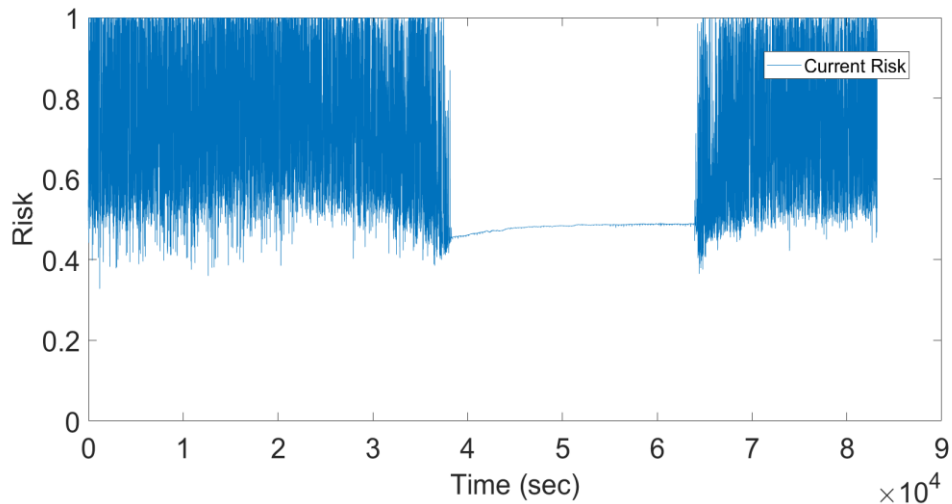


Figure IV.38. Risque pour la limite UCL pour le courant I_{CC} (point N°05).

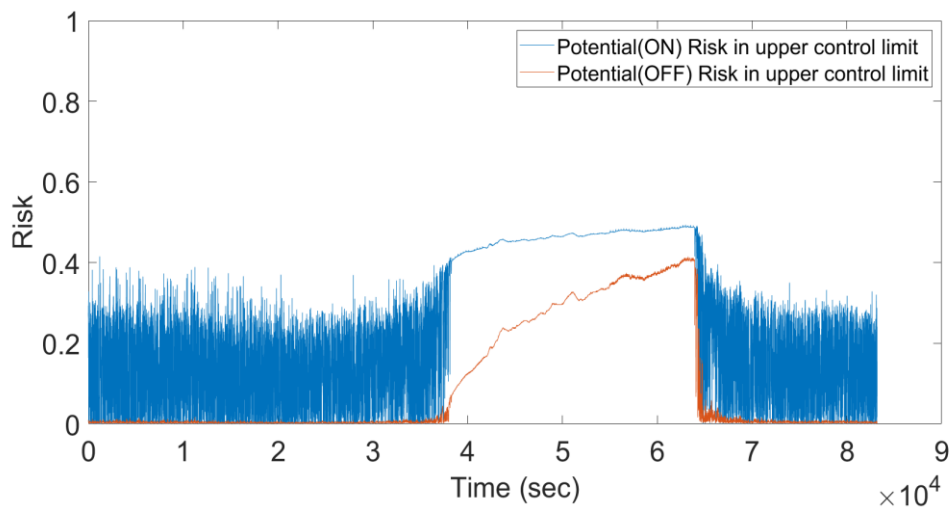


Figure IV.39. Risque pour la limite UCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°05).

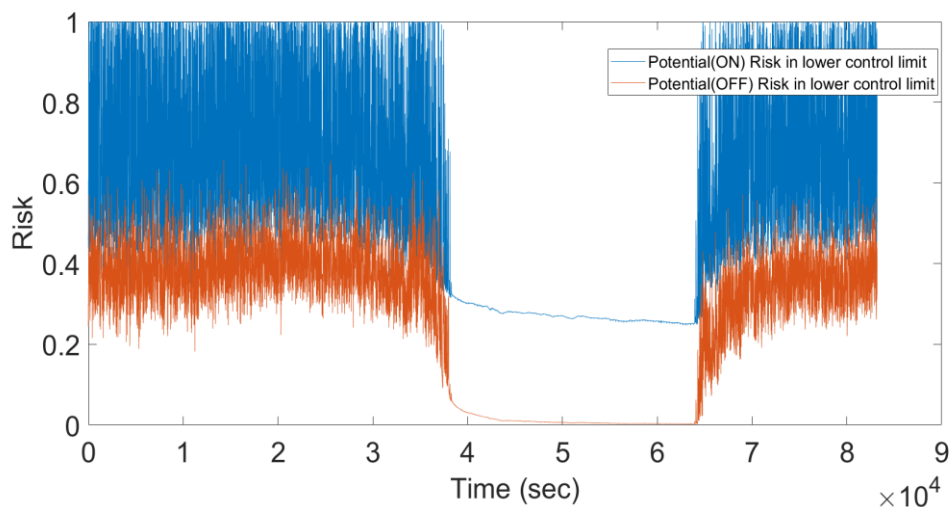


Figure IV.40. Risque pour la limite LCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°05).

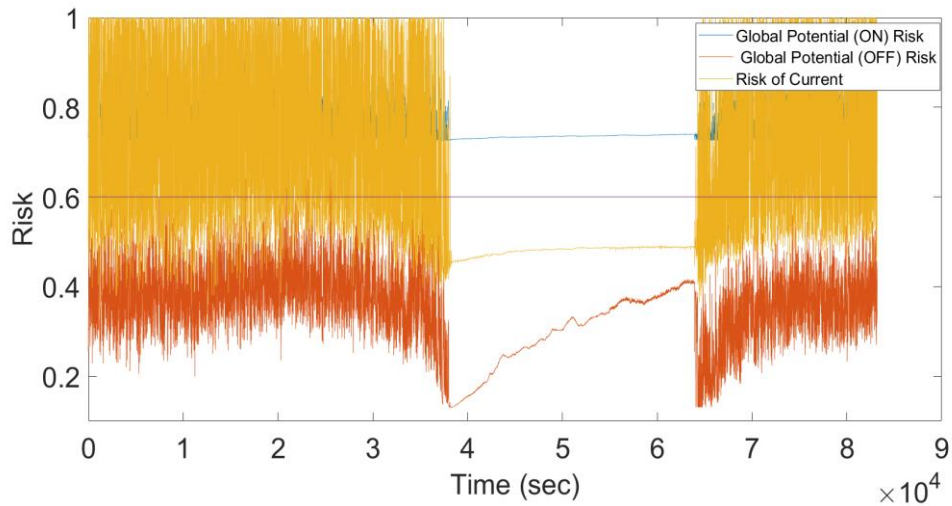


Figure IV.41. Risque global pour tous les paramètres (point N°05).

IV.7.3. Résultats du point N°19

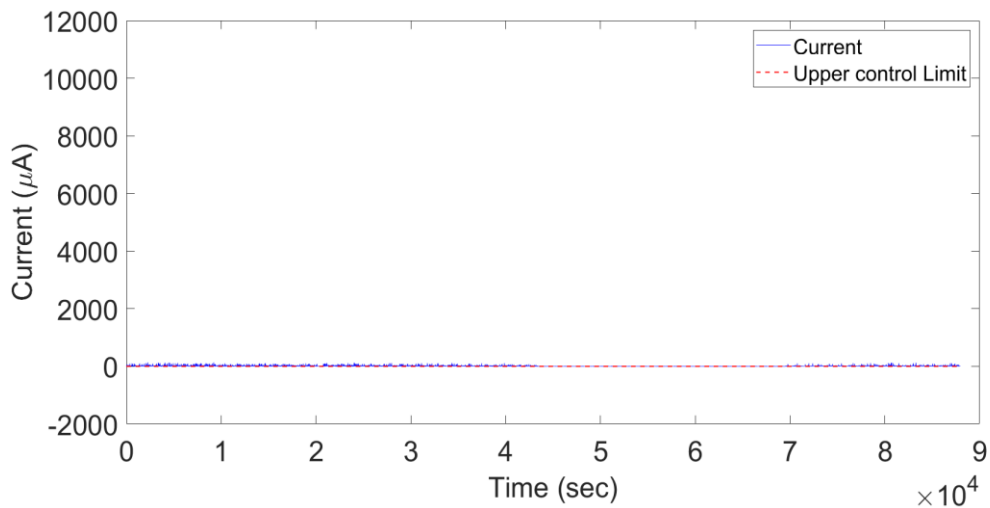


Figure IV.42. Limite de contrôle UCL pour le courant I_{CC} (point N°19).

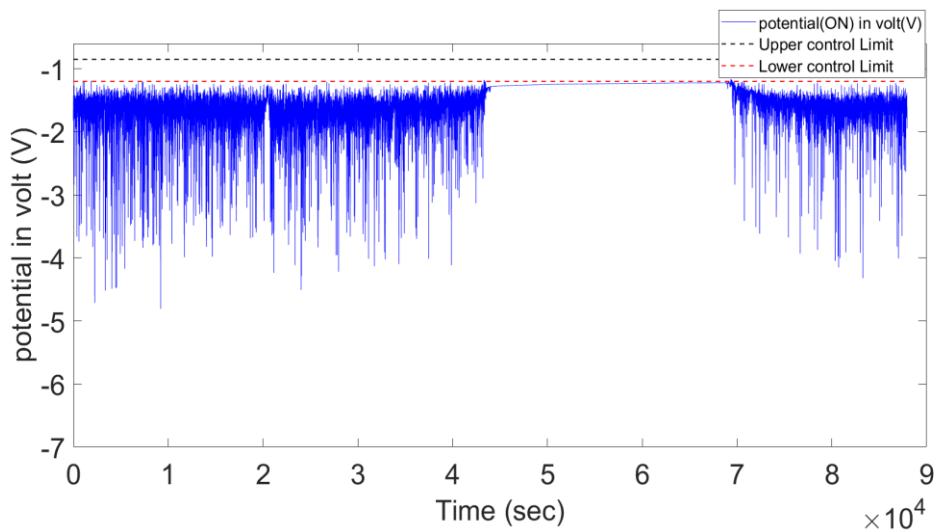


Figure IV.43. Limites de contrôles UCL/LCL pour le potentiel E_{ON} (point N°19).

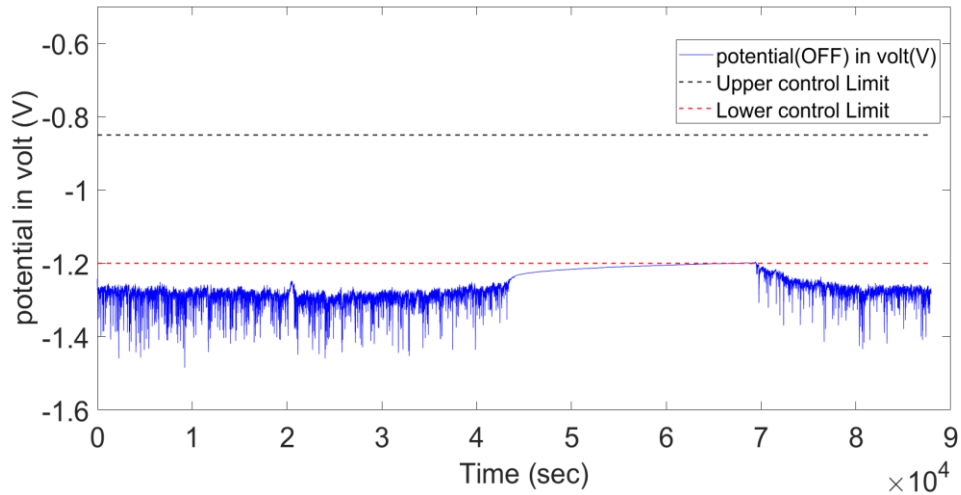


Figure IV.44. Limites de contrôles UCL/LCL pour le potentiel E_{OFF} (point N°19).

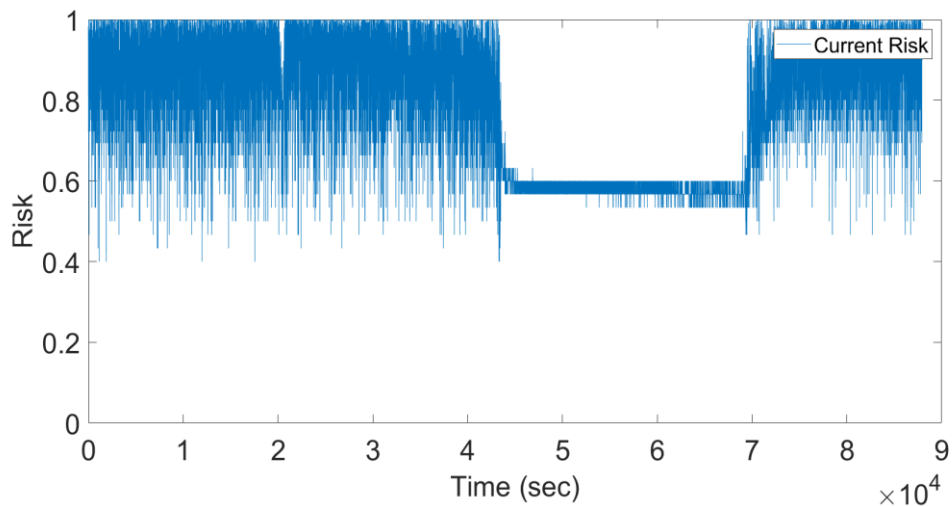


Figure IV.45. Risque pour la limite UCL pour le courant I_{CC} (point N°19).

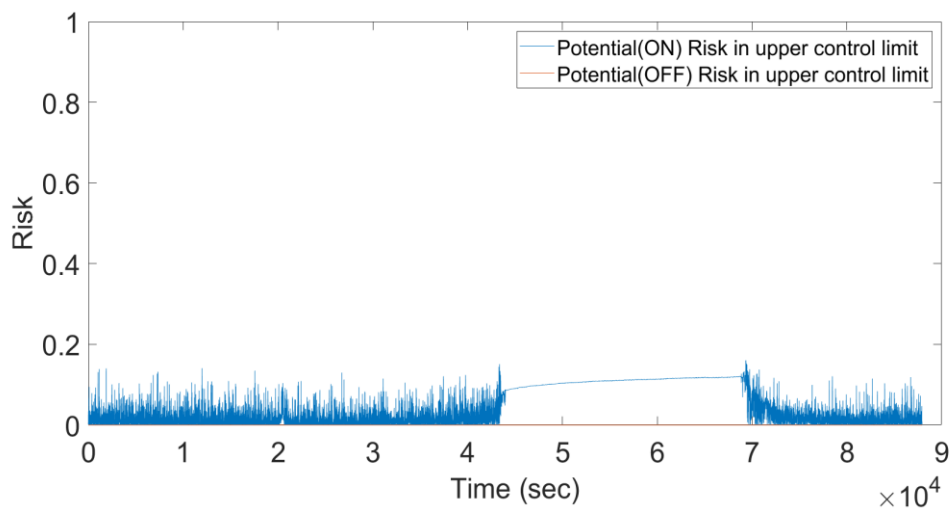


Figure IV.46. Risque pour la limite UCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°19).

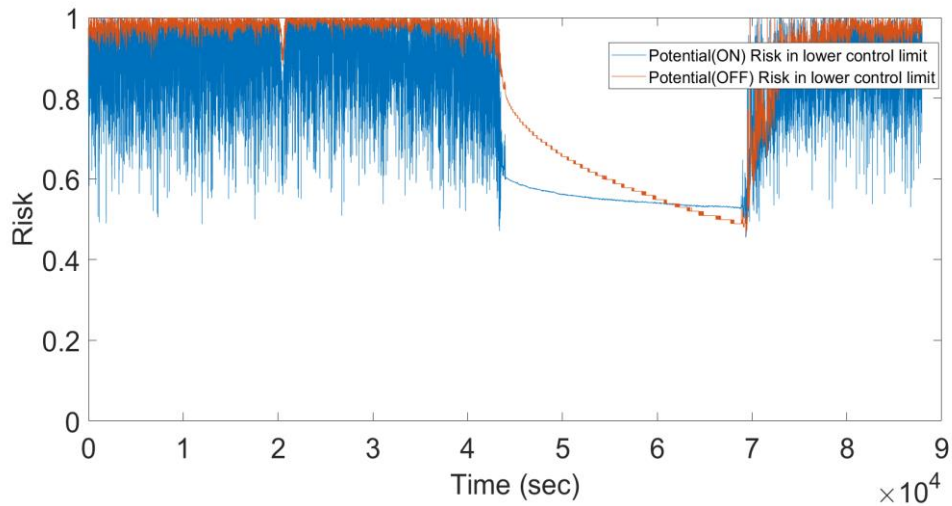


Figure IV.47. Risque pour la limite LCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°19).

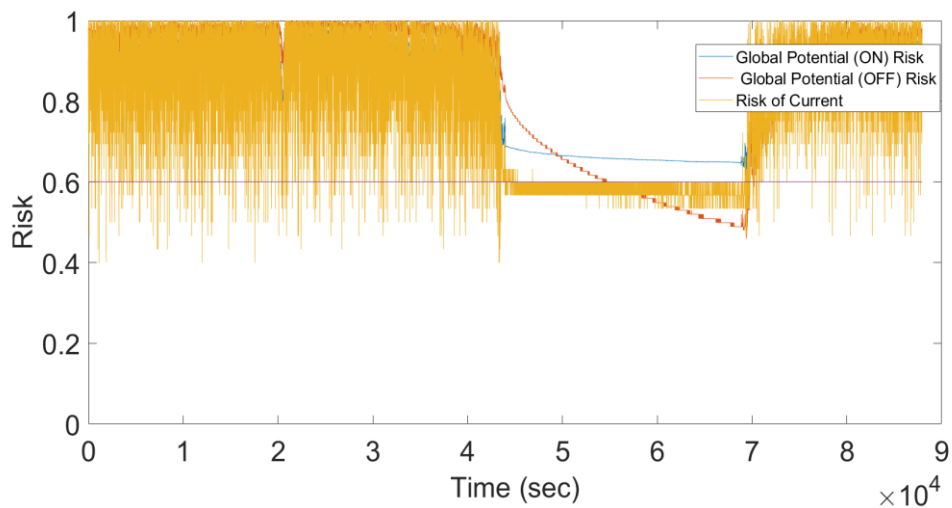


Figure IV.48. Risque global pour tous les paramètres (point N°19).

IV.7.4. Résultats du point N°23

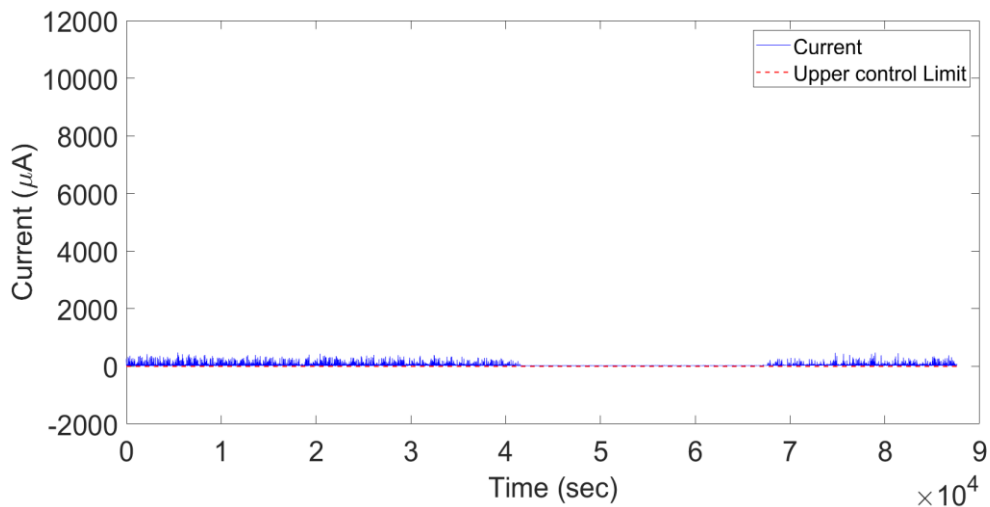


Figure IV.49. Limite de contrôle UCL pour le courant I_{cc} (point N°23).

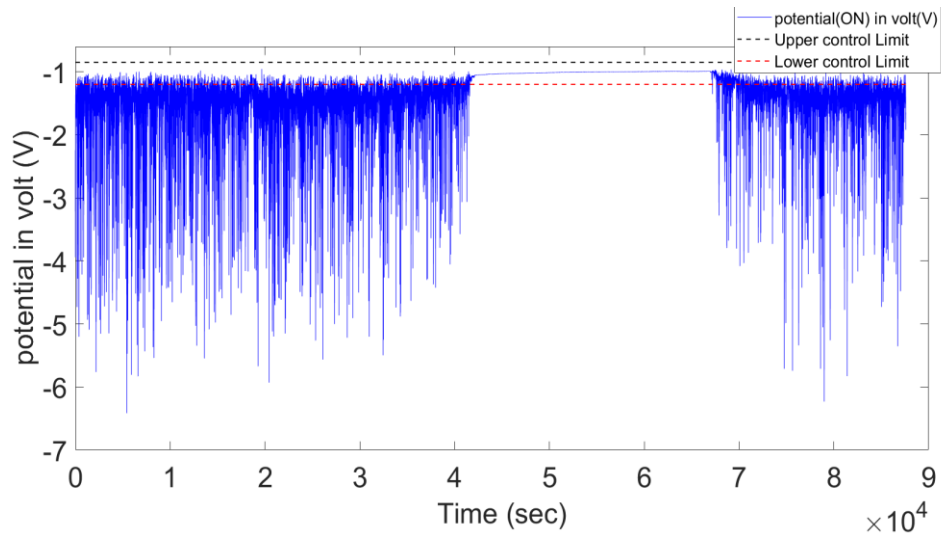


Figure IV.50. Limites de contrôles UCL/LCL pour le potentiel E_{ON} (point N°23).

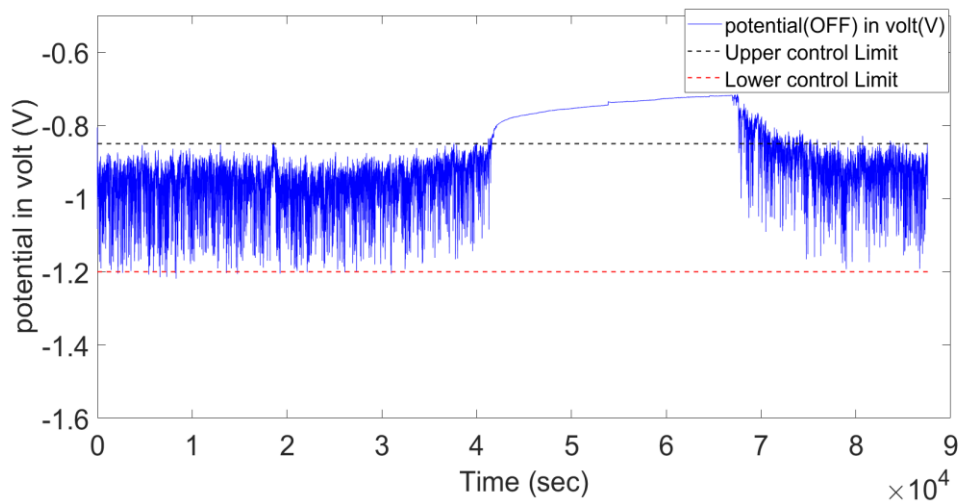


Figure IV.51. Limites de contrôles UCL/LCL pour le potentiel E_{OFF} (point N°23).

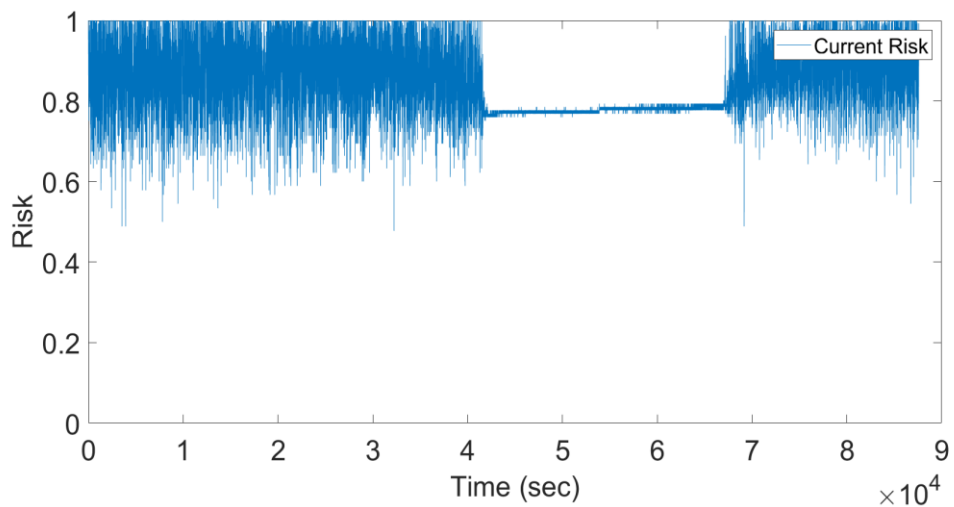


Figure IV.52. Risque pour la limite UCL pour le courant I_{CC} (point N°23).

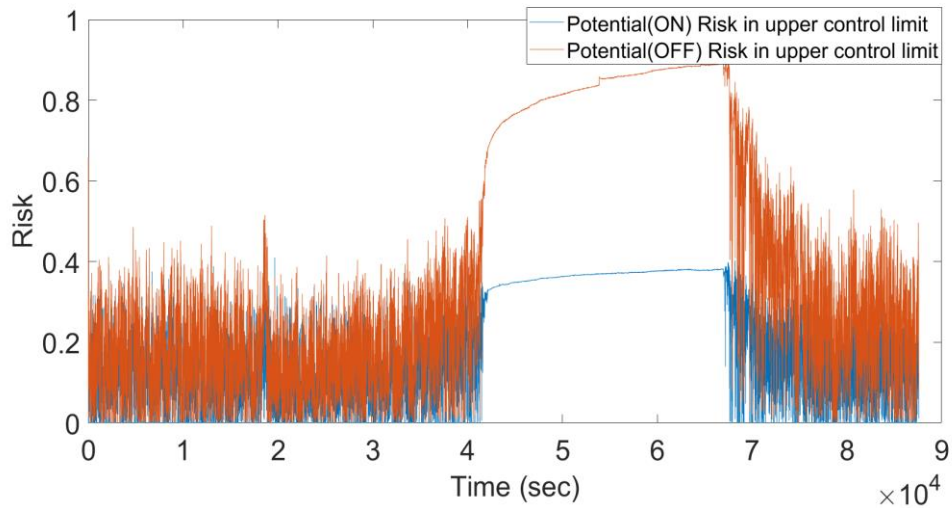


Figure IV.53. Risque pour la limite UCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°23).

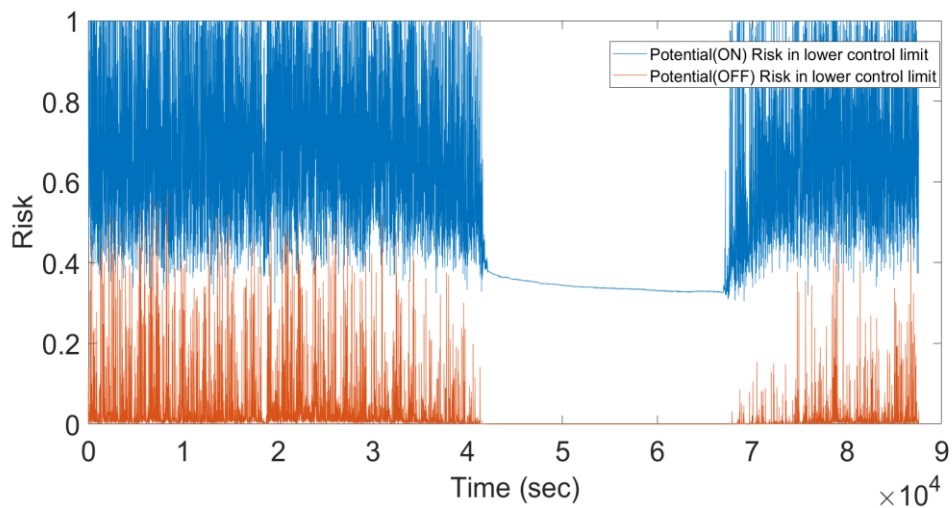


Figure IV.54. Risque pour la limite LCL pour les potentiels E_{ON}/E_{OFF} (point N°23).

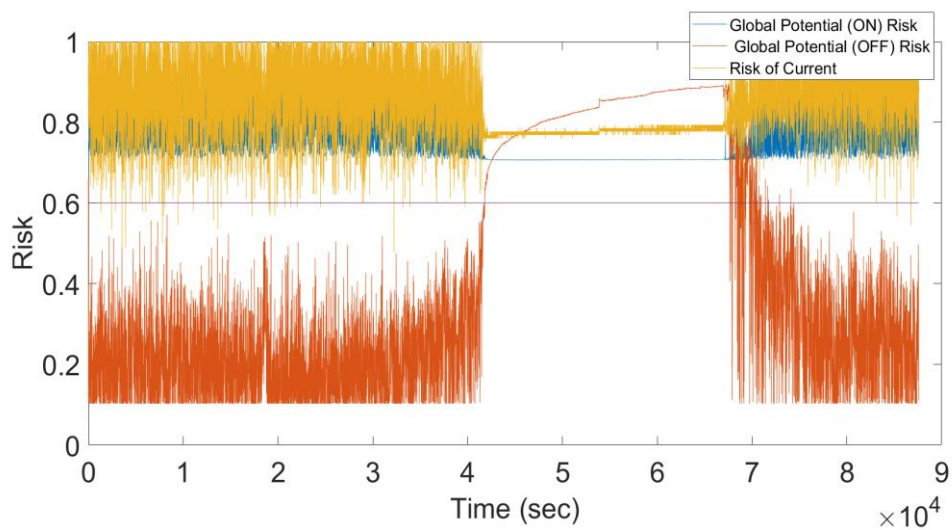


Figure IV.55. Risque global pour tous les paramètres (point N°23).

IV.7.5. Discussion

En appliquant une méthodologie avancée basée sur la théorie des probabilités pour déterminer les seuils de contrôle, un risque significatif est identifié au niveau des limites inférieures. Ce risque découle de la survenue d'une surintensité du courant dans la canalisation métallique de gaz, susceptible d'entraîner des fluctuations au niveau du revêtement protecteur, provoquant ainsi le dégagement d'hydrogène. La partie linéaire ou stable, généralement observée dans la plupart des graphiques, correspond à l'arrêt du tramway dans la plage horaire de 22h00 à 6h00 du matin. Cela suggère que la véritable valeur du potentiel se situe dans la plage sécurisée sous la protection cathodique.

Au niveau des points de mesure N°19 et N° 23, un risque est clairement identifié, même en l'absence d'une source de courants vagabonds alimentée (tramway à l'arrêt). Ceci met en évidence l'impact des courants vagabonds sur la fiabilité du système de protection cathodique, nécessitant une surveillance approfondie à ces deux emplacements. Cette influence est due à l'excès de courant circulant dans les canalisations, ce qui amène leur potentiel en dehors de la zone d'immunité, voire au-delà des limites de contrôle.

En ce qui concerne le courant traversant le matériau de référence métallique, une entrée importante induit une augmentation du potentiel, le rendant plus négatif et la conduite en état de protection (cathode). Cependant, une injection continue de courant entraîne une surpolarisation du potentiel, exposant ainsi la canalisation à un risque accru.

IV.8. Conclusion

En conclusion de ce chapitre dédié à l'analyse des risques associés aux courants vagabonds, plusieurs éléments clés se dégagent. Tout d'abord, nous avons examiné de manière approfondie quatre points d'intérêt spécifiques, où une corrélation entre la ligne de tramway et les conduites en acier est manifeste. Dans cette démarche, nous avons appliqué des méthodes statistiques à la fois univariées et multivariées, notamment les cartes de contrôle. Malgré leur caractère classique, l'application de ces méthodes à notre contexte de recherche s'est révélée innovante et pertinente.

Par ailleurs, l'analyse du risque a été poussée plus loin en utilisant la théorie de la probabilité et en faisant appel à des techniques d'apprentissage automatique (Machine Learning). Cette approche a permis de visualiser de manière plus précise les risques associés aux courants vagabonds et leur impact néfaste sur l'état des conduites métalliques. Dans l'ensemble, ce chapitre met en lumière l'importance capitale de cette recherche pour la compréhension des interactions complexes entre les courants vagabonds et les réseaux de gaz en acier. De plus, il souligne la pertinence de ces connaissances pour la planification et la gestion des infrastructures urbaines. À travers l'ensemble des chapitres de cette thèse, notre objectif est de fournir des avancées scientifiques de haute qualité ainsi que des recommandations pratiques afin de mieux préserver l'intégrité des canalisations de gaz en acier dans le contexte exigeant du transport urbain par traction électrique.

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

La présente thèse offre une analyse approfondie et novatrice des effets des courants vagabonds à courant continu induits par les systèmes de traction électrique sur les canalisations métalliques enterrées, en mettant particulièrement l'accent sur le réseau de distribution de gaz en acier en Algérie. Cette recherche revêt une grande importance, tant du point de vue académique que pratique, en contribuant à la compréhension des interactions complexes entre ces courants et les ouvrages métalliques souterrains.

Au fil des quatre chapitres, la thèse aborde divers aspects de cette problématique. Le premier chapitre met en lumière les différents types de corrosion, offrant une base solide pour comprendre les mécanismes relatifs à la corrosion due aux courants vagabonds. Il explore également les méthodes de protection passive et active, soulignant l'importance de choisir la stratégie appropriée en fonction des conditions environnementales spécifiques.

Une étude de cas significative, en se concentrant sur la ville de Constantine, Algérie, et en examinant les défis liés à la corrosion causée par les courants vagabonds sur le réseau de distribution de gaz. Cette analyse de terrain offre des données tangibles sur l'impact réel de ces courants, mettant en évidence la nécessité de prendre des mesures pour garantir la sécurité et la fiabilité du réseau.

L'originalité de ce travail est l'utilisation des données collectées sur le terrain, en combinaison avec des techniques d'intelligence artificielle, pour approfondir notre compréhension des courants vagabonds. L'utilisation d'un modèle inverse basé sur l'apprentissage automatique représente une avancée significative dans la recherche sur ce sujet complexe.

Enfin, une analyse de risque est appliquée, en utilisant à la fois des méthodes de statistiques pour évaluer les interactions entre les lignes de tramway et les canalisations métalliques. L'application de la théorie de la probabilité basée sur les techniques d'apprentissage automatique dans cette analyse renforce encore la contribution novatrice de l'étude de risque et offre une vision plus claire sur l'impact des courants vagabonds sur les structures métalliques protégées par un système de la protection cathodique.

Dans l'ensemble, cette thèse apporte une contribution précieuse à la fois à la communauté académique et à l'industrie en mettant en lumière les défis posés par les courants vagabonds à courant continu sur les canalisations métalliques enfouies à proximité des systèmes de traction électrique des tramways. Les recommandations pratiques qui en découlent ont le potentiel d'améliorer la planification et la gestion des infrastructures urbaines, en particulier dans le contexte du transport urbain par traction électrique. Il est à espérer que cette recherche stimulera davantage de travaux dans ce domaine et contribuera à la préservation de l'intégrité des canalisations métalliques dans des environnements similaires.

Cette thèse représente un ouvrage technique précieux destiné aux ingénieurs chargés de la conception et de la mise en place de nouvelles infrastructures de tramway dans diverses villes de l'Algérie. Elle met en lumière l'importance cruciale de l'évaluation minutieuse des paramètres

électriques et physicochimiques lors de la sélection des emplacements appropriés pour l'implantation des lignes de traction électrifiée. Cette analyse repose sur des approches de pointe en matière d'intelligence artificielle et de probabilité floue, ajoutant ainsi une dimension scientifique et académique significative à l'ensemble du processus.

Une perspective importante pour le développement ultérieur de cette thèse pourrait être l'extension de l'analyse des effets des courants alternatifs induits par les lignes électriques en haute tension sur les canalisations métalliques enfouillées en voisinage. Cette expansion pourrait constituer une continuation naturelle de la recherche actuelle, en approfondissant notre compréhension des interactions complexes entre les infrastructures de transport électrique et les infrastructures de distribution souterraines.

Les courants alternatifs induits (CAI) représentent une considération cruciale, notamment dans les régions où les lignes électriques à haute tension sont courantes. Les CAI peuvent avoir des effets similaires aux courants vagabonds à courant continu, mais leurs mécanismes et leurs conséquences peuvent être différentes. Une analyse détaillée des CAI, de leurs paramètres électriques et de leurs effets potentiels sur les canalisations métalliques est nécessaire pour une compréhension complète et une gestion efficace des risques.

Cette extension de la recherche pourrait inclure les aspects suivants :

- Développer des modèles mathématiques et des simulations numériques pour évaluer les niveaux de courants alternatifs induits dans différentes conditions. Cela permettrait de prédire les effets potentiels sur les canalisations métalliques.
- Réaliser des études de cas sur le terrain dans des zones où des lignes électriques à haute tension sont présentes à proximité de canalisations métalliques enfouillées. Collecter des données empiriques pour valider les modèles et évaluer l'impact réel des CAI.
- Proposer des recommandations pour l'optimisation des systèmes de protection cathodique des canalisations métalliques en tenant compte des courants alternatifs induits. Cela pourrait inclure des ajustements dans la conception des systèmes de protection ou l'utilisation de matériaux spécifiques.
- Effectuer une analyse de risque complète pour évaluer les conséquences potentielles des CAI sur la sécurité et la fiabilité des canalisations métalliques. Identifier les mesures préventives et correctives nécessaires.
- Étendre la recherche pour comparer les effets des CAI dans différentes régions, en tenant compte des variations dans les caractéristiques des réseaux électriques et des canalisations métalliques.

En intégrant une analyse approfondie des courants alternatifs induits dans votre thèse, vous pourriez contribuer de manière significative à la compréhension globale des risques et des défis liés à la coexistence des infrastructures électriques et de distribution souterraines. Cela pourrait également fournir des informations précieuses pour les ingénieurs et les responsables de la planification urbaine dans la prise de décision en matière d'implantation et de gestion des réseaux de transport électrique et des canalisations métalliques enfouillées.

Références

Références

- [1] Frankel, G. S. (2016). Fundamentals of corrosion kinetics. *Active protective coatings: new-generation coatings for metals*, 17-32. Iuzggfzidbidsic
- [2] Fayomi, O. S. I., Akande, I. G., & Odigie, S. (2019). Economic impact of corrosion in oil sectors and prevention: An overview. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1378, No. 2, p. 022037). IOP Publishing.
- [3] Li, H., Lai, Y., Wang, L., Yang, X., Jiang, N., Li, L., & Yang, B. (2019). Review of the state of the art: interactions between a buried pipeline and frozen soil. *Cold regions science and Technology*, 157, 171-186.
- [4] Cao, Q., Pojtanabuntoeng, T., Esmaily, M., Thomas, S., Brameld, M., Amer, A., & Birbilis, N. (2022). A review of corrosion under insulation: a critical issue in the oil and gas industry. *Metals*, 12(4), 561. Vvccv
- [5] Chalisgaonkar, R. (2020). Insight in applications, manufacturing and corrosion behaviour of magnesium and its alloys—A review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1060-1071.
- [6] Dekok, A. "RFC 8044: Data Types in RADIUS." (2017).
- [7] Rehman, S., & M. Al-Hadhrami, L. (2014). Web-based national corrosion cost inventory system for Saudi Arabia. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 61(2), 72-92.
- [8] Adesina, A. Y., Obot, I. B., Sorour, A. A., Mtongana, S., Mamilla, S. B., & Almathami, A. A. (2021). Corrosion challenges and prevention in Ethyl Acetate (EA) production and related processes—An overview. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105511.
- [9] Lekmine, F. (2021). *Etude de l'efficacité inhibitrice des composés cycliques soufrés dans des milieux acides sur des dépôts composites élaborés par voie électrolytique* (Doctoral dissertation, Université de Mohamed Kheider Biskra).
- [10] Feron, D. (2015). Corrosion issues in nuclear waste storages and disposals.
- [11] Millon, C. (2018). *Contribution to the inspection of metal additive manufacturing samples by Rayleigh waves using laser ultrasonics* (No. CEA-R--6533). Conservatoire national des arts et metiers-CNAM (France).
- [12] Hermawan, H. (2018). Updates on the research and development of absorbable metals for biomedical applications. *Progress in biomaterials*, 7, 93-110.
- [13] Pal, B., Yang, S., Ramesh, S., Thangadurai, V., & Jose, R. (2019). Electrolyte selection for supercapacitive devices: a critical review. *Nanoscale Advances*, 1(10), 3807-3835.
- [14] Jalali, H. Studied by electron paramagnetic resonance (EPR) of polymethyl methacrylate (PMMA) irradiated with gamma photons from cobalt 60.
- [15] Enaroseha, O. O., Oyibo, O., & Okpara, N. (2021). Analysis of Ground State Properties of Interacting Electrons in the Anderson Model. *The Journal of Applied Sciences Research*, 8(1), 15-27.
- [16] Bandurin, D. A., Tyurnina, A. V., Yu, G. L., Mishchenko, A., Zólyomi, V., Morozov, S. V., & Cao, Y. (2017). High electron mobility, quantum Hall effect and anomalous optical response in atomically thin InSe. *Nature nanotechnology*, 12(3), 223-227.
- [17] Zerrouki, T., Rached, H., Rached, D., Caid, M., Cheref, O., & Rabah, M. (2021). First-principles calculations to investigate structural stabilities, mechanical and optoelectronic properties of NbCoSn and NbFeSb half-Heusler compounds. *International Journal of Quantum Chemistry*, 121(8), e26582.

- [18] Rahmouni, S., Zighed, L., Tifouti, I., Had nine, S., & Aida, M. S. (2017). Experimental study of porous silicon films prepared on N and P type monocrystalline silicon wafers. *Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Communications*, 11(1-2), 105-108.
- [19] Sahli, Y., Mokhtari, E., Merzouk, B., Laignel, B., Vial, C., & Madani, K. (2019). Mapping surface water erosion potential in the Soummam watershed in Northeast Algeria with RUSLE model. *Journal of Mountain Science*, 16(7), 1606-1615.
- [20] Lwanga, E. H., Thapa, B., Yang, X., Gertsen, H., Salánki, T., Geissen, V., & Garbeva, P. (2018). Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: A potential for soil restoration. *Science of the Total Environment*, 624, 753-757.
- [21] Meriem, H. A. R. M. E. L. (2015). Thermodynamique Classique.
- [22] RO, T., & UC, D. (2018). SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE. *Sorbonne Université de cotutelle*, 22.
- [23] BRAHMI, Z. (2016). Elaboration et caractérisation des couches minces CIS déposé par la technique électrodéposition.
- [24] Gao, W., Zdrachek, E., Xie, X., & Bakker, E. (2020). A solid-state reference electrode based on a self-referencing pulstrode. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(6), 2294-2298.
- [25] Naima, B., Abdelkrim, R., Ouarda, B., Salah, N. N., & Larbi, B. A. M. (2019). Chemical composition, antimicrobial, antioxidant and anticancer activities of essential oil from *Ammodaucus leucotrichus* Cosson & Durieu (Apiaceae) growing in South Algeria. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 33(3), 541-549.
- [26] Es Sebar, L., Iannucci, L., Gori, C., Re, A., Parvis, M., Angelini, E., & Grassini, S. (2021). In-situ multi-analytical study of ongoing corrosion processes on bronze artworks exposed outdoor. *ACTA IMEKO*, 10(1), 241-249.
- [27] MANAA, S., & SETTOU, K. (2019). La synergie des sels phosphonum contre la corrosion (Doctoral dissertation). 39-40.
- [28] Terrani, K. A., Pint, B. A., Kim, Y. J., Unocic, K. A., Yang, Y., Silva, C. M., ... & Rebak, R. B. (2016). Uniform corrosion of FeCrAl alloys in LWR coolant environments. *Journal of Nuclear Materials*, 479, 36-47. Paré, D., Bernier, P., Thiffault, E., & Titus, B. D. (2011). The potential of forest biomass as an energy supply for Canada. *The Forestry Chronicle*, 87(1), 71-76.
- [29] Bai, Y., Kim, Y., Yan, H. B., Song, X. F., & Jiang, H. (2016). Reassessment of the jacket structure due to uniform corrosion damage. *Ships and Offshore Structures*, 11(1), 105-112.
- [30] Brahami, A., Fajoui, J., & Bouchouicha, B. (2020). Exfoliation corrosion impact on microstructure, mechanical properties, and fatigue crack growth of aeronautical aluminum alloy. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 20, 197-207.
- [31] Makhlof, A. S. H., Herrera, V., & Muñoz, E. (2018). Corrosion and protection of the metallic structures in the petroleum industry due to corrosion and the techniques for protection. In *Handbook of Materials Failure Analysis* (pp. 107-122). Butterworth-Heinemann.
- [32] Sen, P. K., Malmedal, K., & Nelson, J. P. (2002, May). Steel grounding design guide and application notes. In *2002 Rural Electric Power Conference. Papers Presented at the 46th Annual Conference (Cat. No. 02CH37360)* (pp. C2-1). IEEE.
- [33] Ayat, M., Belbachir, M., & Rahmouni, A. (2016). Selective synthesis, characterization and kinetics studies of poly (α -Methyl styrene) induced by Maghnite-Na⁺ clay (Algerian MMT). *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 11(3), 376-388.

- [34] Medine, M., Trouzine, H., de Aguiar, J. B., & Djadouni, H. (2020). Life cycle assessment of concrete incorporating scrap tire rubber: comparative study. *Revue Nature et Technologie*, 12(02), 11-11.
- [35] Liu, Y., Liu, M., Lu, X., & Wang, Z. (2022). Effect of temperature and ultraviolet radiation on corrosion behavior of carbon steel in high humidity tropical marine atmosphere. *Materials Chemistry and Physics*, 277, 124962.
- [36] HAMMOUDA, N., & BELMOKRE, K. (2019). Effect of surface treatment by sandblasting on the quality and electrochemical corrosion properties of a C-1020 carbon steel used by an Algerian oil company. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 272, p. 01001). EDP Sciences.
- [37] Rossi, S., Pinamonti, M., & Calovi, M. Case Studies in Construction Materials.
- [38] Wang, H., Song, Y., Yu, J., Shan, D., & Han, H. (2017). Characterization of filiform corrosion of Mg–3Zn Mg alloy. *Journal of the Electrochemical Society*, 164(9), C574.
- [39] Nazari, M. H., Zhang, Y., Mahmoodi, A., Xu, G., Yu, J., Wu, J., & Shi, X. (2022). Nanocomposite organic coatings for corrosion protection of metals: A review of recent advances. *Progress in Organic Coatings*, 162, 106573.
- [40] Kim, E. H., Cho, G. H., Lim, H. T., Byeun, Y. K., & Jung, Y. G. (2015). Development of MgO–C Refractory Having High Oxidation Resistance by Metal Coating Process. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 15(1), 514-517.
- [41] Abd El-Hameed, A. M., Abdel-Aziz, Y. A., & El-Tokhy, F. S. (2017). Anodic coating characteristics of different aluminum alloys for spacecraft materials applications. *Materials Sciences and Applications*, 8(2), 197-208.
- [42] Xu, M., Lam, C. C., Wong, D., & Asselin, E. (2020). Evaluation of the cathodic disbondment resistance of pipeline coatings—A review. *Progress in Organic Coatings*, 146, 105728.
- [43] Fouda, A. S., Mohamed, F. S., & El-Sherbeni, M. W. (2016). Corrosion inhibition of aluminum–silicon alloy in hydrochloric acid solutions using carbamidic thioanhydride derivatives. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 2, 1-16.
- [44] Chen, Z., Koleva, D., & van Breugel, K. (2017). A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure. *Corrosion Reviews*, 35(6), 397-423.
- [45] Song, G., Atrens, A., & St John, D. (2016). An hydrogen evolution method for the estimation of the corrosion rate of magnesium alloys. *Essential readings in magnesium technology*, 565-572.
- [46] Feliu Jr, S. (2020). Electrochemical impedance spectroscopy for the measurement of the corrosion rate of magnesium alloys: Brief review and challenges. *Metals*, 10(6), 775.
- [47] NEBBAR, M. C. (2020). *Etude de l'évolution microstructurale, texturale et de comportement mécanique des fils en acier mi-dur tréfilés industriellement* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).
- [48] Kahloul, L., Chadli, H., Boudebane, S., & Iost, A. (2019). Performances tribologique et électrochimique de l'alliage TiNi poreux. *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 25(1), 109-124.
- [49] Salam, M. A., Rahman, Q. M., Ang, S. P., & Wen, F. (2017). Soil resistivity and ground resistance for dry and wet soil. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 5(2), 290-297.
- [50] Melouah, O., & Zeddouri, A. (2016). Use of geophysical methods for the demonstration of Karstic phenomena in southern Algeria: Guerraraarea (district of Ghardaïa. Algeria). *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 8(3), 1097-1114.

- [51] Assat, G., & Tarascon, J. M. (2018). Fundamental understanding and practical challenges of anionic redox activity in Li-ion batteries. *Nature Energy*, 3(5), 373-386.
- [52] Murphy, B. W. (2015). Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research*, 53(6), 605-635.
- [53] Ibtissem, S., Feriel, R., Assia, B., & Fatima, C. (2021). Study of the quality of soils in the Annaba region north east Algeria. *Revue des Bioressources*, 11(1).
- [54] Obia, A., Cornelissen, G., Mulder, J., & Dörsch, P. (2015). Effect of soil pH increase by biochar on NO, N₂O and N₂ production during denitrification in acid soils. *PLoS one*, 10(9), e0138781.
- [55] Wang, W., Li, C. Q., Robert, D., & Zhou, A. (2018). Experimental investigation on corrosion effect on mechanical properties of buried cast iron pipes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018197.
- [56] Rasheed, P. A., Jabbar, K. A., Mackey, H. R., & Mahmoud, K. A. (2019). Recent advancements of nanomaterials as coatings and biocides for the inhibition of sulfate reducing bacteria induced corrosion. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 35-42.
- [57] Grosu, Y., Bondarchuk, O., & Faik, A. (2018). The effect of humidity, impurities and initial state on the corrosion of carbon and stainless steels in molten HitecXL salt for CSP application. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174, 34-41.
- [58] Yu, X., Jiang, B., Yang, H., Yang, Q., Xia, X., & Pan, F. (2015). High temperature oxidation behavior of Mg-Y-Sn, Mg-Y, Mg-Sn alloys and its effect on corrosion property. *Applied Surface Science*, 353, 1013-1022.
- [59] Esmaily, M., Shahabi-Navid, M., Svensson, J. E., Halvarsson, M., Nyborg, L., Cao, Y., & Johansson, L. G. (2015). Influence of temperature on the atmospheric corrosion of the Mg–Al alloy AM50. *Corrosion Science*, 90, 420-433.
- [60] Zhang, H., Tian, Y., Kang, M., Chen, C., Song, Y., & Li, H. (2019). Effects of chlorination/chlorine dioxide disinfection on biofilm bacterial community and corrosion process in a reclaimed water distribution system. *Chemosphere*, 215, 62-73.
- [61] Pancheva, H., Reznichenko, G., Miroshnichenko, N., Sincheskul, A., Pilipenko, A., & Loboichenko, V. (2017). Study into the influence of concentration of ions of chlorine and temperature of circulating water on the corrosion stability of carbon steel and cast iron.
- [62] Nie, Y. J., Dai, J. W., & Zhang, X. B. (2023). Effect of Ag Addition on Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties of Mg–Nd–Zn–Zr Alloy for Orthopedic Application. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 36(2), 295-309.
- [63] Winkler, D. A. (2017). Predicting the performance of organic corrosion inhibitors. *Metals*, 7(12), 553.
- [64] Hefaidh, H., Mébarek, D., Belkhir, N., & Driss, Z. (2023). Reliability degradation prediction of photovoltaic modules based on dependability methods. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 40(2), 478-495.
- [65] Haynes, J. A., Rigney, E. D., Ferber, M. K., & Porter, W. D. (1996). Oxidation and degradation of a plasma-sprayed thermal barrier coating system. *Surface and Coatings Technology*, 86, 102-108.
- [66] Wu, Y. J., Chen, X. B., Williams, G., Scully, J. R., Gengenbach, T., & Birbilis, N. (2016). Stifling magnesium corrosion via a novel anodic coating. *RSC advances*, 6(49), 43408-43417.

- [67] Mahdavi, F., Forsyth, M., & Tan, M. Y. (2017). Techniques for testing and monitoring the cathodic disbondment of organic coatings: An overview of major obstacles and innovations. *Progress in organic castings*, 105, 163-175.
- [68] Hammouda, N., & Belmokre, K. (2015). Study of the behavior of an organic coating applied on Algerian oil tanker in seawater. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 9(1), 219-224.
- [69] Rivetti, M. L. S., Netto, J., Junior, M. A., & Ribeiro, D. V. (2018). Corrosion inhibitors for reinforced concrete. *Corrosion inhibitors, principles and recent applications*, 35-58.
- [70] Sibiya, C. A., Numbi, B. P., & Kusakana, K. (2021). Modelling and simulation of a hybrid renewable/battery system powering a cathodic protection unit. *Environment*, 4, 6.
- [71] Byrne, A., Holmes, N., & Norton, B. (2016). State-of-the-art review of cathodic protection for reinforced concrete structures. *Magazine of Concrete Research*, 68(13), 664-677.
- [72] Maurice, V., & Marcus, P. (2018). Current developments of nanoscale insight into corrosion protection by passive oxide films. *Current opinion in solid state and materials science*, 22(4), 156-167.
- [73] Necib, S., Linard, Y., Crusset, D., Michau, N., Daumas, S., Burger, E., & Schlegel, M. L. (2016). Corrosion at the carbon steel/clay borehole water and gas interfaces at 85° C under anoxic and transient acidic conditions. *Corrosion Science*, 111, 242-258.
- [74] Povar, I., Spinu, O., Zinicovscaia, I., Pintilie, B., & Ubaldini, S. (2019). Revised Pourbaix diagrams for the vanadium–water system. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 9(2), 75-84.
- [75] Lekmine, F. (2021). *Etude de l'efficacité inhibitrice des composés cycliques soufrés dans des milieux acides sur des dépôts composites élaborés par voie électrolytique* (Doctoral dissertation, Université de Mohammed kheider Biskra).
- [76] Fabiano, S., Sani, N., Kawahara, J., Kergoat, L., Nissa, J., Engquist, I., & Berggren, M. (2017). Ferroelectric polarization induces electronic nonlinearity in ion-doped conducting polymers. *Science Advances*, 3(6), e1700345.
- [77] Elomaa, H., Rintala, L., Aromaa, J., & Lundström, M. (2018). Open circuit potential and leaching rate of pyrite in cupric chloride solution. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 57(4), 416-421.
- [78] Stutzman, W. L. (2018). *Polarization in electromagnetic systems*. Artech house.
- [79] Selwyn, L. (2019). *Comprendre la corrosion galvanique*. Institut canadien de conservation= Canadian Conservation Institute.
- [80] Shahedi, A., Darban, A. K., Taghipour, F., & Jamshidi-Zanjani, A. J. C. O. I. E. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current opinion in electrochemistry*, 22, 154-169.
- [81] Ducasse-Lapeyresse, J., Bouteiller, V., Marie-Victoire, E., Bouichou, M., Damien, G., Martinet, V., & Lesieutre, O. (2023). Assessment of the Impressed Current Cathodic Protection system after 4 years operation: Case study of the Saint-Cloud Viaduct (France). *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02023.
- [82] Sorokendya, V. S., & Sorokendya, O. V. (2019). Polarized forced inverter drainage with controlled reverse-current release. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 121, p. 02012). EDP Sciences.
- [83] Du, G., Wang, J., Jiang, X., Zhang, D., Yang, L., & Hu, Y. (2020). Evaluation of rail potential and stray current with dynamic traction networks in multitrain subway systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 6(2), 784-796.


- [84] Li, S., Ren, J., Wang, X., Ding, Y., Li, P., Hu, Y., & Yang, Y. (2022). Dilemmas and countermeasures of Fe-based biomaterials for next-generation bone implants. *Journal of Materials Research and Technology*.
- [85] Jin, S. (2022, March). Present Situation and Countermeasures of Corrosion Protection for Pipeline Crossing by Shield Tunneling. In *AMPP CORROSION* (p. D021S013R001). AMPP.
- [86] Zuo, L., Feng, K., Zhang, J., Li, G., Ma, X., Zhan, S., & Li, W. (2023). Experimental Study on Mechanical Behavior of Gas Transmission Shield Tunnel Segments. *Journal of Pipeline System Engineering and Practice*, 14(3), 04023019.
- [87] Engelskirchen, E., Gibson, R., Stubblefield, A., & Glynn, B. Challenges and Solutions for Carrier Pipe Design and Installation in Tunnels. In *Pipelines 2022* (pp. 283-292).
- [88] Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *The global e-waste monitors 2017: Quantities, flows and resources*. United Nations University, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association.
- [89] BABOUNIA, A., KHOULJI, S., & BOUREKKADI, S. International Journal of Innovation and Modern Applied Science.
- [90] Ouadah, M. H., Touhami, O., & Ibtouen, R. (2016). Diagnosis of the AC current densities effect on the cathodic protection performance of the steel x70 for a buried pipeline due to electromagnetic interference caused by HVPTL. *Progress In Electromagnetics Research M*, 45, 163-171.
- [91] Chen, Z., Koleva, D., & van Breugel, K. (2017). A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure. *Corrosion Reviews*, 35(6), 397-423.
- [92] Alamuti, M. M., Nouri, H., & Jamali, S. (2011). Effects of earthing systems on stray current for corrosion and safety behaviour in practical metro systems. *IET Electrical Systems in Transportation*, 1(2), 69-79.
- [93] Leena, P. P., Kumar, V. A., Mukherjee, S., Patil, R. D., Sonbawne, S. M., & Pandithurai, G. (2022). Influence of aerosol physico-chemical properties on cloud microphysical parameters perceived using in-situ high altitude observations. *Atmospheric Research*, 271, 106111
- [94] Babagayou, F., Zegnini, B., & Seghier, T. (2018). Study and Mitigation of AC Corrosion on Pipelines nearby the HV Power Lines. *Revue des sciences et sciences de l'ingénieur*, 7(2), 10-17.
- [95] Kuznetsov, Y. I., & Redkina, G. V. (2022). Thin protective coatings on metals formed by organic corrosion inhibitors in neutral media. *Coatings*, 12(2), 149.
- [96] Haida, M., Banasiak, K., Smolka, J., Hafner, A., & Eikevik, T. M. (2016). Experimental analysis of the R744 vapour compression rack equipped with the multi-ejector expansion work recovery module. *International Journal of Refrigeration*, 64, 93-107.
- [97] KAB, Z. C., & KEMASSI, K. *Technical and economic analysis of natural-gas pipeline infrastructure use for hydrogen transport in Algeria* (Doctoral dissertation, UNIVERSITY KASDI MERBAH OUARGLA).
- [98] Chen, Z., Koleva, D., & van Breugel, K. (2017). A review on stray current-induced steel corrosion in infrastructure. *Corrosion Reviews*, 35(6), 397-423.
- [99] Allenbach, J. M., Chapas, P., Comte, M., & Kaller, R. (2008). *Traction électrique*. PPUR presses polytechniques.
- [100] Brahim, M. (2018). Développement d'une approche de 'Prognostics and Health Management' pour l'infrastructure ferroviaire: application au système pantographe-caténaire.

- [101] Carouge. (1996). Conception, construction et exploitation des réseaux de transport de gaz. Association technique de l'installation du gaz en France
- [102] Lucca, G. (2015). Estimating stray current interference from DC traction lines on buried pipelines by means of a Monte Carlo algorithm. *Electrical Engineering*, 97(4), 277-286.
- [103] Haida, M., Banasiak, K., Smolka, J., Hafner, A., & Eikevik, T. M. (2016). Experimental analysis of the R744 vapour compression rack equipped with the multi-ejector expansion work recovery module. *International Journal of Refrigeration*, 64, 93-107.
- [104] Büchler, B., & Joos, D. Assessing the effectiveness of cathodic protection in combined AC and DC interference conditions.
- [105] Abdelmalek, H., & Ismail, K. (2023). ÉTUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE DES PIPES PAR COURANT IMPOSÉ (Doctoral dissertation, university center of Abdalhafid boussouf-MILA). Marshakov, A. I., & Rybkina, A. A. (2022). Effect of Cathodic Protection Potential Fluctuations on the Corrosion of Low-Carbon Steels and Hydrogen Absorption by the Metal in Chloride Solutions with Nearly Neutral pH. *Materials*, 15(23), 8279.
- [106] Abdelli, M., & Debbaghi, S. (2022). *Etude de la corrosion et la protection cathodique des installations des hydrocarbures en milieu urbains* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
- [107] Ahmed, S. M. (2017). Correlating the shear wave velocity with the cone penetration test. In *Conference: 2nd international conference on geotechnical research and engineering (ICGRE'17), Barcelona, Spain*.
- [108] Laboratoire des travaux publics de l'Est., (2022). (LTP/EST), direction régionale de Constantine
- [109] Yamin, J. A. A., Ali, E. S. E., & Al-Amiery, A. (2020). Statistical analysis and optimization of the corrosion inhibition efficiency of a locally made corrosion inhibitor under different operating variables using RSM. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 9(2), 502-518.
- [110] Ahmad, A. S., Hassan, M. Y., Abdullah, M. P., Rahman, H. A., Hussin, F., Abdullah, H., & Saidur, R. (2014). A review on applications of ANN and SVM for building electrical energy consumption forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 102-109.
- [111] Arend, M. G., & Schäfer, T. (2019). Statistical power in two-level models: A tutorial based on Monte Carlo simulation. *Psychological methods*, 24(1), 1.
- [112] Singh, A. P., Medida, S., & Duraisamy, K. (2017). Machine-learning-augmented predictive modeling of turbulent separated flows over airfoils. *AIAA journal*, 55(7), 2215-2227.
- [113] Labadlia, F. Z., Aoul, E. H., Hamaidi, B., & Bougofa, M. (2021). Optimization of Safety Instrumented System Configuration based on Simplex Algorithm. *International Journal of Performability Engineering*, 17(2).
- [114] Roche, P. M. (2015). L'essentiel sur la protection cathodique. *Centre français de l'Anticorrosion (CEFRACOR)*, 14.
- [115] Ghosh, S., Roy, A., & Chakraborty, S. (2018). Support vector regression based metamodeling for seismic reliability analysis of structures. *Applied Mathematical Modelling*, 64, 584-602.
- [116] Abid, M., Shabbir, A., Nazir, H. Z., Sherwani, R. A. K., & Riaz, M. (2020). A double homogeneously weighted moving average control chart for monitoring of the process mean. *Quality and Reliability Engineering International*, 36(5), 1513-1527.

- [117] Burhan, A. K., Khan, A. H., Bukhari, S. A. A., & Riaz, K. (2021). Univariate Statistics of the RCPs Forced ET–SCI Based Extreme Climate Indices Over Pakistan. *European Journal of Sustainable Development Research*, 5(3), em0166.
- [118] Wright, D. B., & London, K. (2009). First (and second) steps in statistics. Sage Publications.
- [119] Mnassri, B. (2012). *Analyse de données multivariées et surveillance des processus industriels par analyse en composantes principales* (Doctoral dissertation, Aix-Marseille).
- [120] Tiryaki, S., & Aydin, A. (2022). Multivariate Hotelling T2 Control Chart for Monitoring Some Quality Characteristics in Medium Density Fiberboard Manufacturing Process. *Drvna industrija*, 73(1), 35-46.
- [121] Anani, K. (2019). *Diagnostic de systèmes non linéaires par analyse en composantes principales à noyau* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- [122] Alam, M. A., Emura, K., Farnham, C., & Yuan, J. (2018). Best-fit probability distributions and return periods for maximum monthly rainfall in Bangladesh. *Climate*, 6(1), 9.
- [123] Leveson, N., Dulac, N., Marais, K., & Carroll, J. (2009). Moving beyond normal accidents and high reliability organizations: A systems approach to safety in complex systems. *Organization studies*, 30(2-3), 227-249.
- [124] Pham, H. (Ed.). (2006). *Springer handbook of engineering statistics* (Vol. 49). London: Springer.
- [125] Chadli, A., & Kermoune, S. (2021). Reliability estimation in a Rayleigh Pareto model with progressively type-ii right censored data. *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research*, 729-743
- [126] Yu, H. (2022, April). Application Strategy of Probability Theory and Mathematical Statistics in Big Data Analysis. In *2022 7th International Conference on Social Sciences and Economic Development (ICSSED 2022)* (pp. 2100-2103). Atlantis Press.
- [127] Zhang, J., Yan, J., Infield, D., Liu, Y., & Lien, F. S. (2019). Short-term forecasting and uncertainty analysis of wind turbine power based on long short-term memory network and Gaussian mixture model. *Applied Energy*, 241, 229-244.
- [128] Baker, J., Bradley, B., & Stafford, P. (2021). *Seismic hazard and risk analysis*. Cambridge University Press.

Annexes

A new hybrid approach for the prediction of corrosion due to DC stray currents emitted by electrical traction and nonlinear dynamic process monitoring

K. Khattab,^{1,2} * E.B. Azzag,³ K. Allali⁴ and B. Hamaidi²

¹*Badji Mokhtar University, Faculty of Technology, Department of Electromechanics, 23000, Annaba, Algeria*

²*Badji Mokhtar University, Electromechanical Engineering Laboratory, 23000 Annaba, Algeria*

³*Badji Mokhtar University, Faculty of Technology, Department of Electrical Engineering, 23000, Annaba, Algeria*

⁴*Mentouri Brothers University, Faculty of Science and Technology, Transport Engineering Department, 25000, Constantine-1, Algeria*

*E-mail: karimkhattab21@gmail.com

Abstract

The purpose of this paper is to present the results of an analysis of buried networks' susceptibility to stray currents and to define the methods and tools for tracking their damaging effects on potential victims as a result of the construction of tramways near gas networks. With the development of urban transport by electric tramways located near to buried metal pipes, corrosion defects due to stray currents have become a significant threat to these metal pipes, especially in Algeria. The ANN method has been chosen to solve the non-linear problems arising from leakage currents. This paper's originality lies in the use of advanced machine learning techniques, including ANN, the least squares method, and stepwise with interaction filtered by Lasso regression, to investigate the effects of DC stray current for the first time in Algeria. Finally, a sensitivity analysis using a Monte Carlo simulation algorithm was performed for validation of the method. This study was done using real data collected near the tramway in the city of Constantine (East Algeria).

Received: December 29, 2022. Published: March 28, 2023

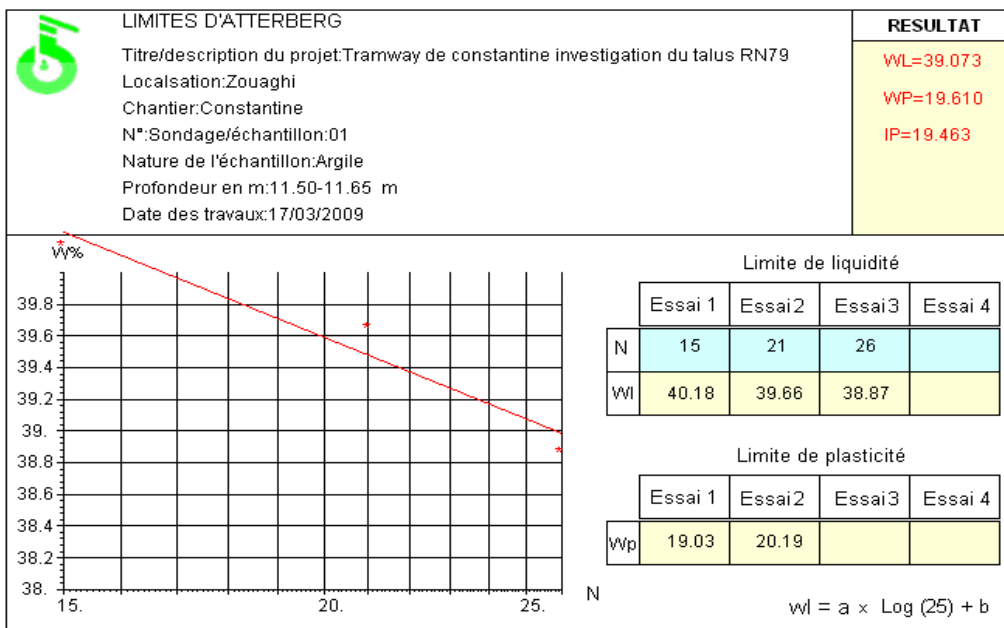
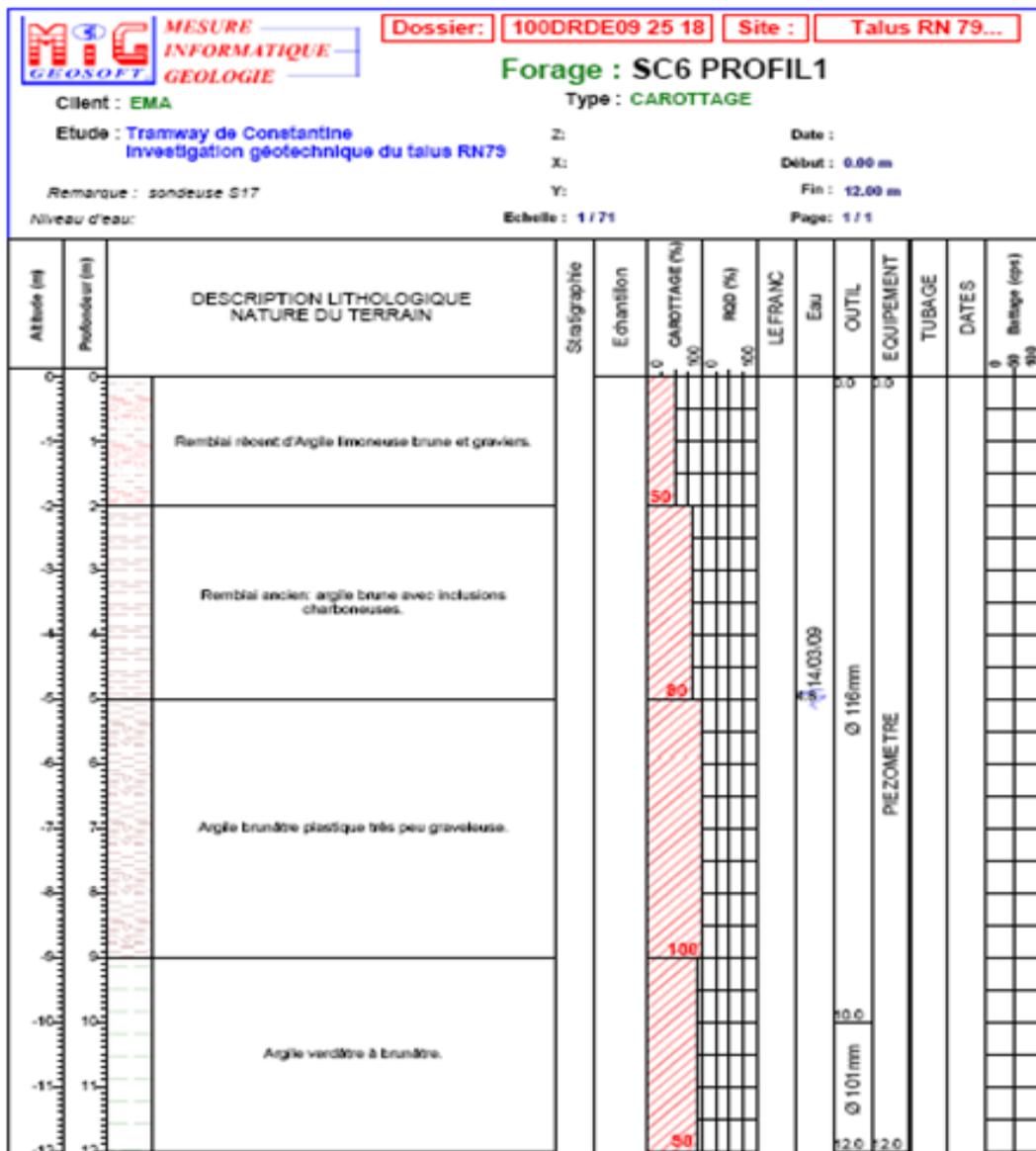
doi: [10.17675/2305-6894-2023-12-1-20](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-1-20)

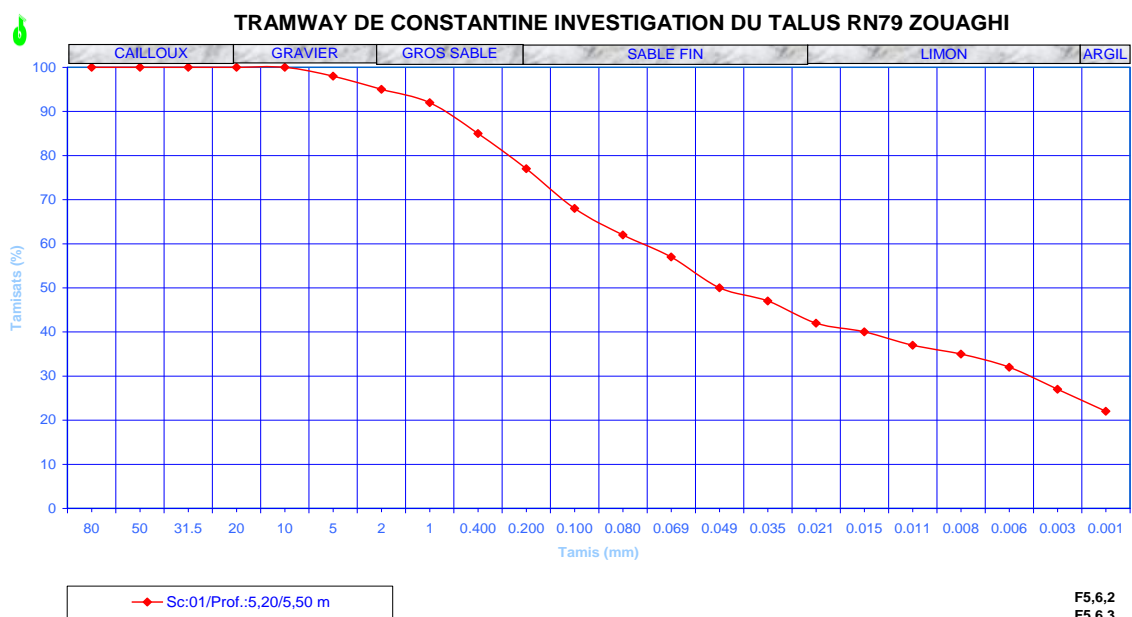
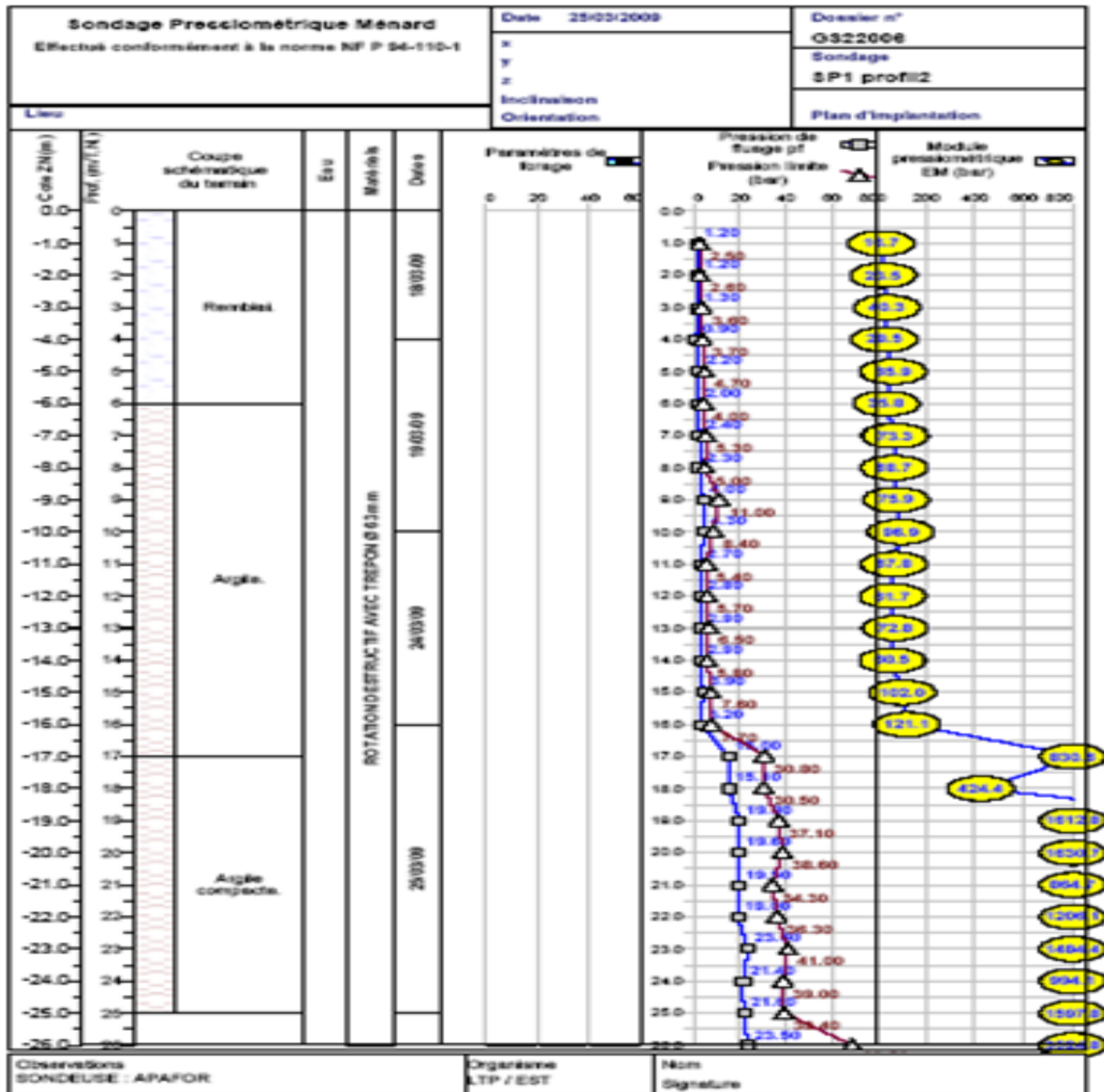
Keywords: *gas pipelines, stray current corrosion defect, potential, cathodic protection, artificial neural networks.*

Conférences

CIREI'2019, Oran	Conférence	1 ^{ère} conférence internationale sur les réseaux électriques intelligents, E.N.P Maurice Audin, Oran, 28//29 Avril 2019.
	Intitulé	<i>Analyse expérimentale sur l'impact du courant injecté dans un système de protection cathodique (Poster)</i>
Jsfm- CMC'2019, Annaba	Conférence	6 ^{ème} Journées Scientifiques Franco-Maghrébines, Université Badji Mokhtar Annaba ; 17/18 novembre 2019.
	Intitulé	<i>Analyse qualitative des défauts de la protection cathodique dans un réseau de distribution du gaz (Orale).</i> <i>Protection des gazoducs contre les lignes hautes tension : problèmes et solutions. (Poster)</i>
CISPICE'2021, Skikda	Conférence	1 ^{ère} Conférence Internationale Sur les Procédés Industriels et la Conservation et Environnementale, Skikda, 07/09 Décembre 2021.
	Intitulé	<i>L'influence des courants vagabonds émis par le tramway sur le potentiel d'un pipeline de gaz. (Poster).</i>
ISIEAM'2022, Skikda	Conférence	2 ^{ème} conférence internationale de génie industriel et math appliqué, université du 20Aout 1955 Skikda, 23 / 44 Octobre 2022.
	Intitulé	<i>Impact of DC stray currents emitted by electrical traction on the potential of gas pipeline (Poster).</i>
ICEE'2022, Skikda	Conférence	4 ^{ème} Conférence Internationale sur l'Ingénierie Électromécanique université du 20Aout 1955 Skikda, 13 / 14 décembre 2022.
	Intitulé	<i>Estimation of the drainage current of a steel gas network affected by stray currents emitted by electric traction (Poster).</i>

Paramètres du sol (tramway Constantine)





Passage sur ouvrage d'art (Pont Oued Rhumel, tramway Constantine)

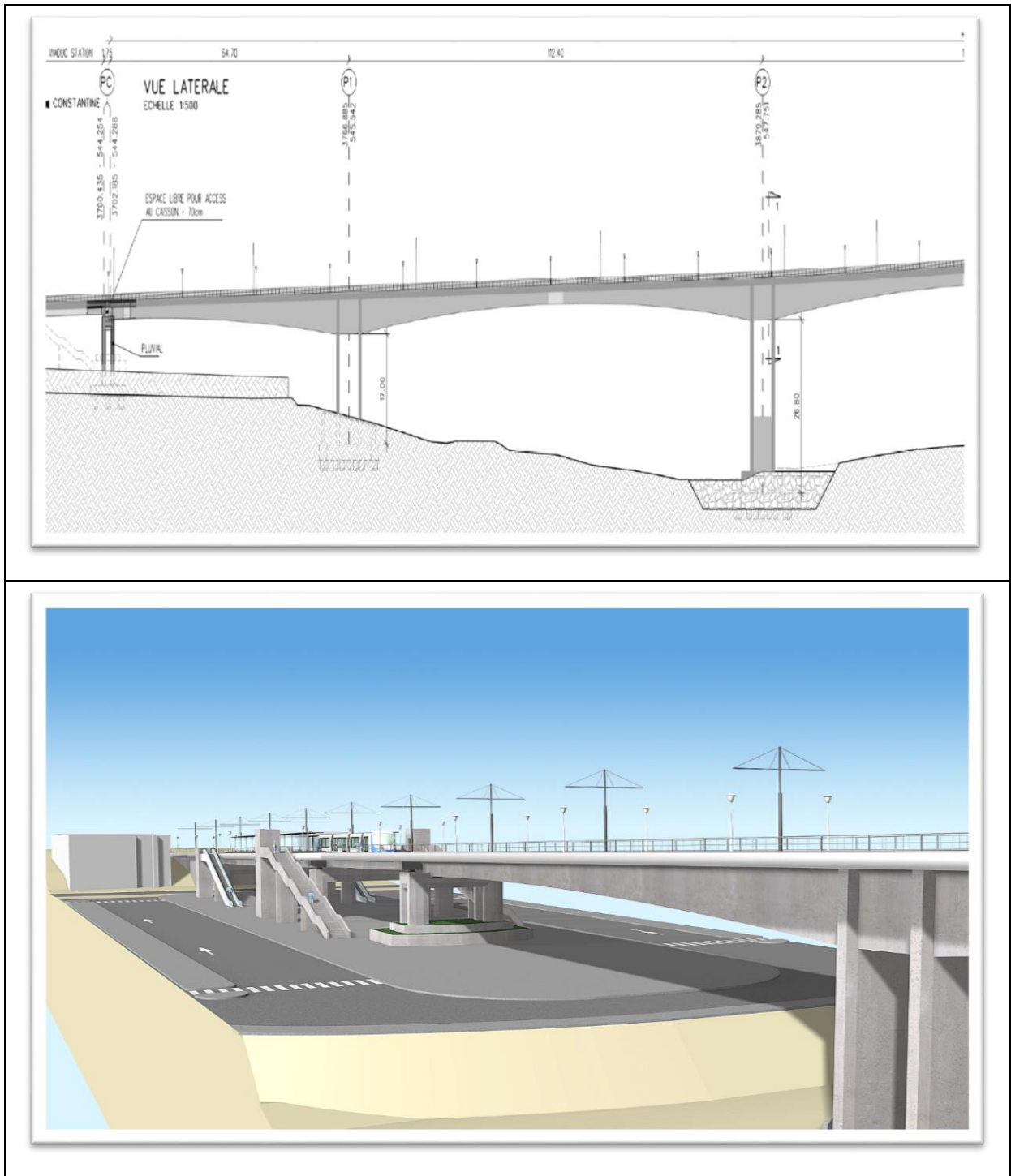


Tableau des Facteurs pour la construction des cartes de contrôles

Factors useful in the Construction of Control Charts

n	Chart for Averages			Chart for standard deviations					Chart for Ranges						
	Factors for Control Limits			Factors for:					Factors for Central Line		Factors for Control Limits				
				Central Line	Control Limits										
	A	A ₂	A ₃	c ₄	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	d ₂	1/d ₂	d ₃	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
2	2.121	1.880	2.659	0.7979	0	3.267	0	2.606	1.128	0.8862	0.852	0	3.686	0	3.266
3	1.732	1.023	1.954	0.8862	0	2.568	0	2.276	1.693	0.5908	0.888	0	4.357	0	2.574
4	1.500	0.729	1.628	0.9213	0	2.266	0	2.088	2.059	0.4857	0.879	0	4.697	0	2.281
5	1.342	0.577	1.427	0.9400	0	2.089	0	1.964	2.326	0.4299	0.864	0	4.918	0	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.9515	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.3946	0.848	0	5.078	0	2.003
7	1.134	0.419	1.182	0.9594	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.3698	0.833	0.206	5.203	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.9650	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.3512	0.819	0.389	5.306	0.137	1.863
9	1.000	0.337	1.032	0.9693	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.3367	0.807	0.548	5.392	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.9727	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.3249	0.797	0.688	5.467	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.9754	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.3152	0.787	0.813	5.533	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.9776	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.3069	0.778	0.924	5.593	0.284	1.716
13	0.832	0.249	0.850	0.9794	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.2998	0.770	1.026	5.646	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.9810	0.406	1.594	0.399	1.563	3.407	0.2935	0.763	1.119	5.695	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.9823	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.2880	0.756	1.204	5.739	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.9835	0.448	1.552	0.440	1.526	3.532	0.2831	0.750	1.283	5.781	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.9845	0.466	1.534	0.458	1.511	3.588	0.2787	0.744	1.357	5.819	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.9854	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.2747	0.738	1.425	5.855	0.392	1.608
19	0.688	0.187	0.698	0.9862	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.2711	0.733	1.490	5.888	0.404	1.596
20	0.671	0.180	0.680	0.9869	0.510	1.490	0.504	1.470	3.735	0.2677	0.728	1.550	5.920	0.415	1.585
21	0.655	0.173	0.663	0.9876	0.523	1.477	0.516	1.459	3.778	0.2647	0.724	1.607	5.950	0.425	1.575
22	0.640	0.167	0.647	0.9882	0.534	1.466	0.528	1.448	3.819	0.2618	0.719	1.661	5.978	0.435	1.565
23	0.626	0.162	0.633	0.9887	0.545	1.455	0.539	1.438	3.858	0.2592	0.715	1.712	6.004	0.444	1.556
24	0.612	0.157	0.619	0.9892	0.555	1.445	0.549	1.429	3.895	0.2567	0.712	1.761	6.030	0.452	1.548
25	0.600	0.153	0.606	0.9896	0.565	1.435	0.559	1.420	3.931	0.2544	0.708	1.807	6.055	0.460	1.540
Over 25	$3/\sqrt{n}$	$3/d_2\sqrt{n}$	...	...	*	**	...	...	...	...	...	...	...	...	...

$$* 1 - \frac{3}{\sqrt{2n}}$$

$$** 1 + \frac{3}{\sqrt{2n}}$$