

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE DÉMOCRATIQUE D'ALGÉRIE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
LE MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة عمّار تليجي بالأغواط
UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT
كلية التكنولوجيا
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE



Mémoire de master

Domaine : Science et technologie

Filière : Électrotechnique

Option : Électrotechnique industrielle

Présenté par :

**Dib younes
Ben bougrine imadeddine**

THEME

Analyse du couplage inductif entre une ligne aérienne Haute tension et un pipeline métallique

Soutenu publiquement devant un jury composé de:

Mr. Mekhanet Mohamed

M.C.A

Président

Mr. benssedik sid ahmed

M.C.A

examineur

Mr. Djekidel Rabah

M.C.A

promoteur

Année académique 2020/2021

ملخص:

هذه المذكرة تركز على دراسة تأثير خطوط نقل الطاقة ذات الجهد العالي على أنابيب نقل البترول والغاز المتواجدة بالقرب من هذه الخطوط بواسطة المجالات المغناطيسية الناتجة عنها حيث تؤدي هذه المجالات الى توليد فولتية (فرق كمون) في خط الأنابيب، والتي يمكن أن تشكل خطر تآكل المعادن التي تصنع منها الأنابيب بالإضافة الى التأثير على سلامة عمال الصيانة، كما يمكن أن تهدد سلامة معدات الحماية المهبطية، وسيركز العمل مع الأخذ بعين الاعتبار التغيرات في العوامل و المقادير الفيزيائية المختلفة، من أجل تحديد قيم الجهد التي تسببها المجالات المغناطيسية على خطوط الأنابيب باستخدام معادلات كارسون-كليم ومعرفة ما إذا كانت ضمن المعايير المسموح بها دولياً (عتبة الأمان) ، سنحاول في هذه الدراسة تطبيق وسيلة للتخفيف من تأثير التداخل الكهرومغناطيسي.

كلمات المفتاحية: خطوط نقل الطاقة ذات الجهد العالي، أنابيب نقل البترول والغاز ، الحماية الكاثودية، التداخل الكهرومغناطيسي، معادلات كارسون كليم.

RESUME :

Ce mémoire se concentre sur l'étude de l'effet des lignes de transport d'électricité à haute tension sur les pipelines de transport de pétrole et de gaz situés à proximité de ces lignes à cause des champs magnétiques provoqués par ces lignes. Ces champs provoquent l'induction et la génération des tensions (différence de potentiel) dans le pipeline, qui peuvent présenter un danger de corrosion pour les métaux des pipelines, ainsi affectent négativement la sécurité des travailleurs de maintenance et peuvent menacer les équipements de la protection cathodique. cette étude tient en compte la variation des divers facteurs physiques et mécaniques, afin de déterminer les valeurs de la tension induite causées par la les champs magnétiques sur les pipelines à l'aide des équations de Carson-Clem et de s'assurer que sont situées dans les limites permises par les normes internationales (seuil de sécurité), par revanche si ces valeurs excèdent le seuil de sécurité, il est souhaitable d'appliquer une méthode pour atténuer l'effet des interférences électromagnétiques.

Mot clés : des lignes de transport d'électricité à haute tension, pipeline, protection cathodique, interférence électromagnétique, Equations de Carson-Clem.

ABSTRACT:

This memory focuses on the study of the effect of high voltage power transmission lines on oil and gas transmission pipelines located near these power lines due to the magnetic fields caused by these lines. These fields cause the induction and generation of voltages (potential difference) in the pipeline, which can present a corrosion hazard to the pipeline's metal, thus negatively affect the safety of maintenance workers and can threaten the protective equipment cathodic , this study takes into account the variation of various physical and mechanical factors, In order to determine the values of the induced voltage caused by the magnetic fields on the pipelines using the Carson-Clem equations and to ensure that are located within the limits allowed by international standards (safety threshold), on the other hand if these values exceed the safety threshold, it is desirable to apply a method to attenuate the effect of electromagnetic interference.

Key words: high voltage power transmission lines, pipeline, catholic protection, electromagnetic interference, Carson's Clem equations.

Remerciements

Avant tout, nous remercions notre Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force d'atteindre notre but et d'accomplir notre travail.

Que nos remerciements les plus sincères s'adressent tout particulièrement à notre encadreur Monsieur Djekidel Rabah, qui nous a encadré durant tout le long de ce travail, pour leur disponibilité, leurs conseils, pour leur patience, leur soutien permanent et leurs encouragements qui nous ont permis de mener à bien ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont également au membre du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant d'examiner notre mémoire et de l'enrichir par leur recommandation.

Enfin on adresse tous nos remerciements les plus sincères à tous les professeurs qui nous ont enseigné et tout ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Nos remerciements vont également à tous les personnes qu'on n'a pas citées et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail.

Dib younes
Ben bougrine imadeddine

Dédicaces :

Je dédie ce modeste mémoire de master à :

Ma mère et mon père pour leur soutien

Mes sœurs et mes frères

À tout mon proche de la famille

Et à toute ma chère amie et mon collègue de l'université

Et à tous ce qui ont enseigné au long de ma vie scolaire

Dib younes

Dédicaces :

Je dédie modestement ce travail à:

Mes parents qui méritent tous mon respect.

Mon frère et mes sœurs.

Mes Oncles, mes Tantes, Cousines, Cousins

la promotion de 2ème Année Master ELTI .

Tous mes amis.

Tous les gens qui m'ont encouragé.

Ben bougrine imadeddine

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Étude bibliographique	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Formulation de Maxwell pour l'électromagnétisme.....	3
I.2.1. Équations de Poisson et de Laplace	5
I.3. Champ électromagnétique.....	5
I.3.1. Champ électrique	6
I.3.2. Champ magnétique.....	7
I.3.3. Ondes électromagnétiques.....	7
I.4. Problèmes de Compatibilité Electromagnétique (CEM).....	9
I.4.1. Définition de la Compatibilité Electromagnétique.....	9
I.4.2. Perturbations électromagnétiques.....	9
I.4.3. Décomposition d'un problème de Compatibilité Electromagnétique	9
I.4.4. Émission et susceptibilité	10
I.4.4.1. Emission.....	10
I.4.4.2. Susceptibilité	11
I.5. Sources d'interférences	12
I.6. Mécanismes de couplages	12
I.6.1. Couplage electromagnetique ou inductif.....	12
I.6.1.1.Effet du couplage inductif.....	13
I.6.1.2. Types de la Protection cathodique	21
I.6.2. Couplage resistif ou conductif.....	23
I.6.2.1. Les effets du couplage conductif.....	24
I.6.2.2. Types de revêtements.....	25
I.6.3. Couplage electrostatique ou capacitif.....	26
I.7. recepteurs	27
I.8. Conclusion.....	28

Chapitre II : Calcul des interférences inductives entre la ligne aérienne HT et le pipeline métallique

II.1. Introduction.....	29
II.2. La zone d'influence entre une ligne aérienne HT et un pipeline métallique.....	29
II.2.1. Le cas simple d'un parallélisme parfait entre la ligne aérienne HT et pipeline.....	29
II.2.2. Le cas général de voisinage entre la ligne aérienne HT et le pipeline	30
II.3. Calcul du champ magnétique au voisinage du système (Ligne HT-pipeline)	32
II.3.1. Calcul du champ magnétique sous une ligne aérienne THT.....	32
II.3.2. principe de la méthode de calcul (théorie des images, méthode de Carson)....	32
II.3.3. Calcul des courants induits dans les câbles de garde	36
II.4. Calcul de la force électromotrice longitudinale induite dans le pipeline.....	37
II.4.1. Calcul des impédances linéiques propres et mutuelles du système électrique.....	38
II.4.2. Force électromotrice induite en condition normale de fonctionnement.....	40
II.5. Calcul des tensions induites dans un pipeline par le couplage inductif.....	44
II.5.1. La modélisation du système électrique	44
II.5.2. Parfait parallélisme entre la ligne électrique et le pipeline	45
II.5.2.1. Cas d'un pipeline aérien	45
II.6. Validation de la tension induite du couplage inductif	47
II.7. Conclusion	49

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.1. Introduction	50
III.2. Calcul du champ magnétique au niveau du pipeline	50
III.2.1. Analyse du champ magnétique en présence d'un pipeline métallique	51
III.2.2 Cas du parallélisme parfait entre la ligne aérienne HT et le pipeline	54
III. 2.2.1. La tension induite dans un pipeline aérien isolé.....	54
III.3. L'effet des différents paramètres sur la tension induite et l'induction magnétique	55
III.3.1.Effet de la hauteur des conducteurs des phases sur l'induction magnétique ...	55
III.3.2.Effet de distance de séparation entre les phases sur l'induction magnétique ..	56
III. 3.3. Effet du courant sur l'intensité de l'induction magnétique	57
III. 3.4. Effet du câble de garde sur la tension induite.....	58
III. 3.5. Effet de la résistivité du sol sur la tension induite	58
III. 3.6. Effet de la longueur du parallélisme sur la tension induite	59
III.4. Application de l'atténuation	60
III.5. Comparaison des résultats de simulation avec la littérature	61
III.6. Conclusion.....	62
Conclusion générale	64

Liste des figures

Figure I-1 : Champ électromagnétique.....	6
Figure I-2 : Effet d'un champ électrique E sur un fil.....	6
Figure I-3 : Effet d'un champ magnétique H sur une boucle	7
Figure I-4 : Propagation de l'onde électromagnétique.....	7
Figure I-5 : Systèmes « coupables » et « victimes ».....	10
Figure I-6 : Classement des différents niveaux de perturbations électromagnétiques.....	11
Figure I-7 : Couplage inductif	12
Figure I-8 : Lignes de champ magnétique	13
Figure I-9 : Champ magnétique produit par une ligne de transmission	13
Figure I-10: Cause de différence de potentiel.....	14
Figure I-11 : Pipeline et réseau électrique	15
Figure I-12 : Principe de corrosion par courant alternatif	15
Figure I-13 :. Défectuosité du revêtement (15 x 20 mm) sur la génératrice supérieure de la canalisation, la dimension du trou dans le revêtement est de quelques mm ² , [1].....	16
Figure I-14. a) Oxyde et produit de corrosion, b) Corrosion	16
Figure I-15 : Schéma de mesure de la méthode de Wenner	16
Figure I-16 : un PH-mètre	18
Figure I-17 : Densité de courant et potentiel de la protection cathodique.....	19
Figure I-18: Diagramme de Pourbaix du fer (à 25 °C)	20
Figure I-19 : la protection cathodique par anode sacrificielle	21
Figure I-20 : la protection cathodique par courant imposé.....	22
Figure I-21 : Influence des courants alternatifs sur le potentiel de protection	22
Figure I-22 : Couplage Conductif.....	23
Figure I-23 : Phénomène de conduction et surface équipotentielle	24
Figure I-24 : Défaut due au couplage conductif	26
Figure I-25 : Schéma d'un revêtement présentant des porosités, dont certaines relie directement le métal au milieu extérieur	26

Figure I-26 : Profil du champ électrique à 1m du sol pour une ligne en nappe horizontale en fonction de la distance de séparation entre les conducteurs	27
Figure II-1: Illustration d'une exposition parallèle entre une ligne aérienne et un pipeline	30
Figure II-2: Exemple de subdivision d'une zone d'influence en sections	30
Figure II-3 : Considération des différents passages: pipeline – ligne HT	31
Figure II-4 : Champ magnétique généré par un conducteur en un point d'observation $P(x, y)$..	34
Figure II-5 : Intensité magnétique engendrée par un courant image	35
Figure II-6 : Configuration d'une ligne triphasée HT en nappe horizontale avec un pipeline.....	38
Figure II-7 : Distances équivalentes entre les conducteurs, le sol et le pipeline	40
Figure II-8 : Induction sur un pipeline métallique en condition normale de fonctionnement.....	44
Figure II-9 : Représentation du circuit équivalent entre le pipeline et le sol	45
Figure II-10 : Mise à la terre du pipeline par électrodes de terre.....	47
Figure II-11 : Tension induite dans le pipeline par le couplage inductif	48
Figure III-1 : Configuration horizontale d'une ligne électrique avec un pipeline aérien.....	50
Figure III-2: Induction magnétique à 1m du sol sans la présence d'un pipeline	51
Figure III-3 : Induction magnétique à 1m du sol avec la présence d'un pipeline	51
Figure III-4 : Induction magnétique à 1m du sol avec et sans la présence d'un pipeline	52
Figure III-5 : Induction magnétique au niveau du pipeline avec et sans la présence des câbles de garde	52
Figure III-6 : Visualisation de l'induction magnétique créée par le système : Ligne triphasée 275 kV - pipeline métallique (coupe transversale)	53
Figure III-7 : Profil latéral de la tension induite due au couplage inductif dans pipeline aérien.	54
Figure III-8 : Profil longitudinal de la tension induite due au couplage inductif dans un pipeline aérien	55
Figure III-9: L'effet du câble de garde sur la distribution de la tension induite.....	55
Figure III-10 : L'effet de la résistivité du sol sur la distribution de la tension induite	56
Figure III-11 : L'effet de la longueur du parallélisme sur la distribution de la tension.....	56
Figure III-12 : Induction magnétique au niveau du pipeline avec un hauteur $h=13$ m.....	57
Figure III-13 : Induction magnétique au niveau du pipeline avec un hauteur $h=10$ m.....	57

Figure III-14 : Induction magnétique au niveau du pipeline avec un séparation entre les phases de 10 m.....	58
Figure III-15 : Induction magnétique au niveau du pipeline avec un séparation entre les phases de 8 m.....	59
Figure III-16 : Profil du champ magnétique à 1m du sol pour une ligne HT en fonction de plusieurs valeurs de tension	59
Figure III-17 : Résistance de l'électrode de terre du pipeline	60
Figure III-18 : Tension de l'électrode.....	61
Figure III-19 : Comparaison des profils de la tension induite entre les deux méthodes de calcul	62

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Normes de sécurité.....	14
Tableau I-2 : Rigidité diélectrique des revêtements.....	26
Tableau I-3 : Caractéristiques mécaniques requises des pipelines en acier de grade API ...	28

Introduction Générale

Introduction générale

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centrales de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué principalement de lignes électriques et des câbles souterrains et de postes.

Les champs électriques et magnétiques créés par les lignes de transport à haute tension à la fréquence industrielle (50 et 60 Hz) avec des niveaux plus élevée de tensions et de courant peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement et sur les êtres vivants. En conséquence, il est très utile de calculer avec précision la distribution des champs électriques et magnétiques dans les équipements à haute tension et très haute tension, et il est souvent nécessaire de diminuer les valeurs de ces champs par plusieurs techniques s'il est nécessaire.

Les lignes électriques de transport d'énergie électrique sont considérées parmi les importantes sources de la pollution électromagnétique. De nos jours, les pipelines métalliques de transport de pétrole et de gaz situés au voisinage immédiat et parallèles à ces lignes sont exposé à une pollution électromagnétique qui résulte de l'utilisation toujours croissante de l'énergie électrique en basse fréquence, à cause des champs électriques et magnétiques générés par ces lignes, cette exposition devient de plus en plus importante à mesure que la technologie progresse et que les nouvelles applications industrielles se multiplient avec la construction des nouveaux lignes avec la très et extra haute tension, ce qui implique d'évaluer avec précision les interférences capacitatives et inductives entre les lignes de transport de les pipelines métalliques.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail étant d'analyser la distribution de l'induction magnétique sous et au voisinage d'une ligne aérienne à haute tension et de déterminer les valeurs de la tension induites sur les pipelines à cause de la variation de l'induction magnétique et l'effet de différents paramètres qui affectent la tension induite et de proposer un moyen d'atténuation (mitigation) si ces valeur de la tension induites dépassent le seuil de sécurité recommandé par la norme internationale telle que la Commission internationale contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) et l'Association internationale de radioprotection (IRPA) .

Le premier chapitre s'intéresse à une étude bibliographique sur les équations de maxwell pour le champ électrique et le champ magnétique dans le cas général, ainsi à la présentation d'une notion sur la compatibilité électromagnétique (CEM) et les différents phénomènes

Introduction générale

électromagnétiques, ensuite nous abordons essentiellement les trois couplages à savoir : l'effet inductif, capacitif, conducteur et l'effet de chaque couplage sur les pipelines métalliques.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons la méthode de calcul de l'induction magnétique produite par une ligne aérienne, ainsi la modélisation électromagnétique de l'interférence inductive entre les lignes électriques aériennes et les pipelines métalliques aériens à l'aide des équations de Carson-Clem. Le but est d'évaluer avec précision l'induction magnétique et les tensions induites dans les pipelines métalliques, afin de déterminer le moyen d'atténuation de ces interférences visant à réduire les valeurs de la tension induite dans les pipelines à des valeurs acceptables selon les normes.

Le dernier chapitre présente les résultats issus de la simulation numérique réalisée à l'aide d'un programme de calcul sous l'environnement Matlab. Ces résultats ont été discutés et analysés.

Nous clôturons ce travail par une conclusion générale et d'envisager quelques perspectives.

Chapitre I:

Étude

Bibliographique

I.1 Introduction

La haute tension est un terme qui caractérise, selon des normes européennes, les valeurs de la tension électrique supérieures à 1 000 volts en courant alternatif et 1 500 volts en courant continu.

La haute tension est un domaine très important dans les pays industriels, actuellement la haute tension est utilisée pour une large variété d'applications couvrant les systèmes d'alimentation, les lignes et les postes aériens de transport d'énergie électrique à de hauts niveaux de tension, dans l'industrie, la médecine et des laboratoires de recherche. Ces applications sont devenues indispensables à la civilisation moderne.

S'il n'est pas question de remettre en cause les avantages énormes apportés par l'électricité dans la vie quotidienne, le grand public se préoccupe de plus en plus, depuis une vingtaine d'années, des effets nocifs potentiels de l'exposition aux champs électriques et magnétiques de fréquences extrêmement basse. Cette exposition résulte principalement du transport et de l'utilisation de l'énergie électrique à haute tension aux fréquences de 50 et 60 Hz [1].

Ce chapitre vise à donner une vision générale des équations de Maxwell qui décrivent le comportement des champs électromagnétiques, une notion sur la compatibilité électromagnétique, La Compatibilité Électromagnétique (CEM) est la discipline qui étudie ces perturbations électromagnétiques (sources, causes, moyens de propagation, effets sur l'environnement, protection, etc...). Enfin, on représente les trois couplages à savoir l'effet inductif, capacitif, conducteur et l'effet de chaque couplage sur les pipelines et les types de la protection cathodique.

I.2 Formulation de Maxwell pour l'électromagnétisme

Dans l'électromagnétisme, les équations qui gouvernent la répartition du potentiel et des champs électrique et magnétique dans un milieu donné dérivent des équations de James Clerk Maxwell (1831-1879) dans le 19^{ème} siècle, c'est un physicien et mathématicien écossais (1873). Celles-ci sont formées par quatre équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques caractérisés par le champ magnétique $H(A/m)$ et l'induction magnétique $B(Wb/m^2)$ aux phénomènes électriques caractérisés par le champ électrique $E(V/m)$ et l'induction électrique $D(C/m^2)$, tous ces champs sont des grandeurs vectorielles.

Ces quatre équations vectorielles aux dérivées partielles deux de couplage (I .1) et (I .2) et deux de conservation (I .3) et (I .4) sous intégrale ou locale (différentielle) sont [2,3]:

	Forme locale	Forme intégrale	
Équation de Maxwell-Faraday	$\overrightarrow{\text{rot}} \cdot \overrightarrow{E} = -\frac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t}$	$e = -\frac{\partial \phi}{\partial t}$	(I-1)
Équation de Maxwell-Ampère	$\overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{H} = \overrightarrow{J}_C + \frac{\partial \overrightarrow{D}}{\partial t}$	$\oint_C \overrightarrow{H} d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i$	(I-2)
Équation de Maxwell-Gauss	$\text{div} \overrightarrow{D} = \rho_v$	$\iint_S \overrightarrow{D} d\vec{S} = Q_{\text{int}}$	(I-3)
Équation de Maxwell-Thomson	$\text{div} \overrightarrow{B} = 0$	$\iint_S \overrightarrow{B} d\vec{S} = 0$	(I-4)

Avec:

$$\phi = \iint_S \overrightarrow{B} \cdot d\vec{S} ; e = \text{fem induite}$$

\overrightarrow{J}_C : La densité de courant (A/m^2).

ρ_v : La densité volumique de charges (C/m^3).

On peut écrire ces équations sous forme différentielle. On passe de la forme différentielle à la forme intégrale en utilisant les théorèmes de Stokes et d'Ostrogradski.

On remarque dans la deuxième équation de Maxwell l'existence de deux sortes de courants \overrightarrow{J}_C et $\frac{\partial \overrightarrow{D}}{\partial t}$. Ceux-ci représentent respectivement les courants de conduction $\overrightarrow{J}_C = \sigma \overrightarrow{E}$ et le courant de déplacement ($\overrightarrow{J}_d = \frac{\partial \overrightarrow{D}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial \overrightarrow{E}}{\partial t}$), la somme des deux courants $\overrightarrow{J}_C + \overrightarrow{J}_d$ constitue le courant total \overrightarrow{J}_t .

dans le cas statique, l'électrostatique est la branche de la physique qui étudie les phénomènes créés par des charges électriques statiques (charges au repos), et des forces qu'elles exercent entre elles, c'est-à-dire de leurs interactions électrostatiques (la loi de Coulomb), la charge est une propriété de la matière qui lui fait produire et subir des effets électriques et magnétiques, pour les applications électrostatiques, les valeurs et les positions ne varient pas en fonction du temps. Les termes qui dépendent du temps, dans les équations de Maxwell s'annulent, et les champs électriques et magnétiques ne sont plus reliés Cela donne naissance à des modèles plus simples [2,3].

I.2.1. Équations de Poisson et de Laplace

Dans un système électrique dont les grandeurs ne varient pas dans le temps, et que l'on appelle par conséquent statique, toutes les dérivées par rapport au temps sont nulles, et les champs électrique et magnétique ne sont plus reliés. Sachant que la divergence de l'induction \vec{B} est nulle, et que d'autre part la divergence d'un rotationnel est toujours identiquement nulle, on peut en tout point de l'espace identifier l'induction avec le rotationnel d'une grandeur vectorielle à l'équation de Maxwell flux amène à [2,3]:

$$\vec{B} = \text{rot.} \vec{A} \quad (\text{I-5})$$

Nous déduisons que l'induction \vec{B} dérive de \vec{A} que nous appelons le potentiel vecteur magnétique. L'équation de Maxwell Ampère s'écrit alors :

$$\text{rot.} \text{rot.} \vec{A} = \mu \vec{J} \quad (\text{I-6})$$

Soit:

$$\overline{\text{grad div}} \vec{A} - \Delta \vec{A} = \mu \vec{J} \quad (\text{I-7})$$

La condition de Jauge suppose que le vecteur \vec{A} est à flux conservatif, elle s'écrivant en statique [4] :

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{I-8})$$

On obtient l'équation de Poisson du potentiel vecteur magnétique.

$$\Delta \vec{A} + \mu \vec{J} = 0 \quad (\text{I-9})$$

Dans le cas où il n'existe pas une densité de courant, on obtient :

$$\Delta \vec{A} = 0 \quad (\text{I-10})$$

I.3. Champ électromagnétique

Un champ est un phénomène physique d'échange d'énergie et de forces qui s'exercent à distance provoquant des effets induits sur des objets. Il se caractérise par son intensité et sa direction. Communément, il désigne la zone dans laquelle s'exerce le phénomène.

Dans l'électromagnétisme, les champs électriques et magnétiques sont présents partout dans notre environnement. Toute utilisation de l'électricité génère un champ électrique et un champ magnétique.

Ces deux types de champs composent le champ électromagnétique. A proximité d'un réseau électrique à haute tension, la tension des conducteurs des lignes de transport produit un champ électrique dans l'espace entre les conducteurs et le sol. Le courant circulant dans les conducteurs d'une ligne de transport génère un champ magnétique dans l'air et le sol entourant la ligne de transport. L'intensité du champ électrique (ou magnétique) dépend en premier lieu de la tension (ou du courant), de la disposition et la distance de séparation des conducteurs, ainsi que de la hauteur des conducteurs par rapport au sol [5].

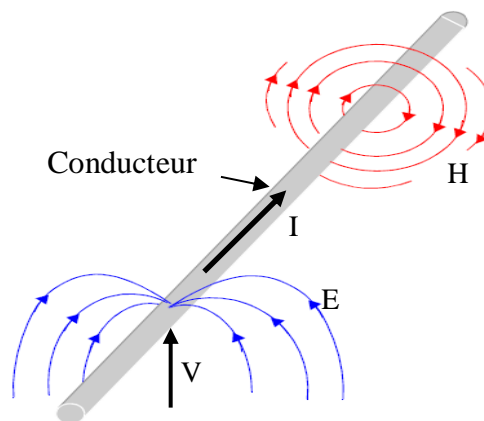


Figure I-1 : Champ électromagnétique

I.3.1. Champ électrique

Un champ électrique est produit par une différence de potentiel entre deux points : plus la différence de potentiel est élevée, plus le champ qui en résulte est intense. Ce champ électrique survient même s'il n'y a pas de circulation de courant. Tout fil électrique sous tension produit un champ électrique dans son voisinage [5].

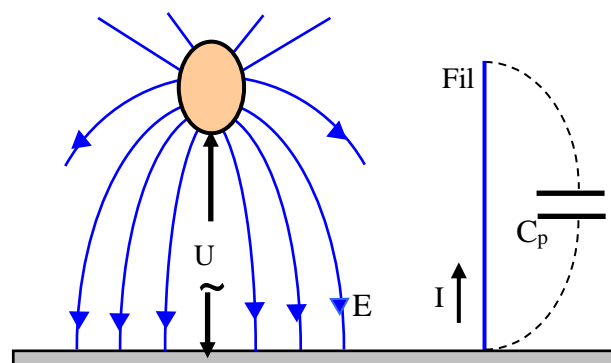


Figure I-2 : Effet d'un champ électrique E sur un fil

I.3.2. Champ magnétique

Le champ magnétique est provoqué par le déplacement de charges électriques. Il n'apparaît que lors du passage d'un courant électrique dans un conducteur. Plus l'intensité du courant est élevée, plus le champ magnétique est important [5].

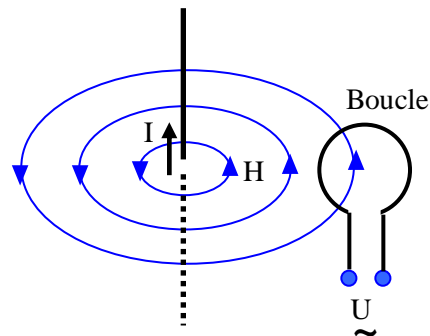


Figure I-3 : Effet d'un champ magnétique H sur une boucle

I.3.3. Ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique comporte à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre se propagent dans un milieu selon une direction orthogonale (figure ci-dessous). La propagation de ces ondes s'effectue à une vitesse qui dépend du milieu considéré. Dans le vide, la vitesse de propagation est égale à $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ [6].

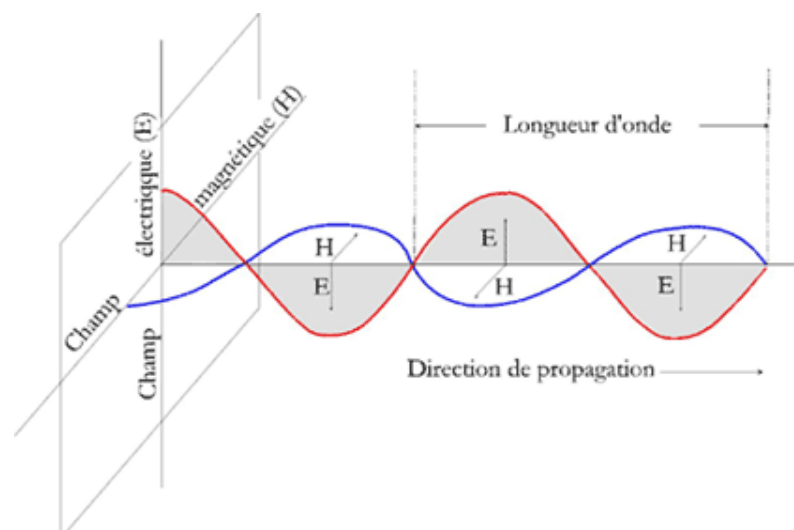


Figure I-4: Propagation de l'onde électromagnétique

Une onde électromagnétique est caractérisée par plusieurs grandeurs physiques :

- La longueur d'onde(λ) : elle exprime le caractère oscillatoire périodique de l'onde dans l'espace. C'est la longueur d'un cycle d'une onde, la distance séparant deux crêtes successives. Elle est mesurée en mètre ou en l'un de ses sous-multiples, les ondes électromagnétiques utilisées en télédétection spatiale ayant des longueurs d'onde relativement courtes :
- La période (**T**) : elle représente le temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle. L'unité est la seconde
- La fréquence(**f**) : inverse de la période, elle traduit le nombre de cycles par unité de temps. Elle s'exprime en Hertz (Hz) - un Hz équivaut à une oscillation par seconde - ou en multiples du Hertz, les ondes électromagnétiques utilisées en télédétection spatiale ayant des fréquences très élevées

Longueur d'onde et fréquence sont inversement proportionnelles et unies par la relation suivante :

$$\lambda = cT = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{I.11})$$

Où :

C : est la célérité de la lumière;

f : la fréquence d'oscillation de l'onde

ϵ_r : est la permittivité diélectrique relative du milieu, elle est égale à $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$

ϵ_0 : étant la permittivité du vide

L'effet du champ électromagnétique sur un récepteur dépend de la longueur d'onde émise par le champ électromagnétique et de la distance à la source. Cet effet peut être caractérisé par l'impédance du champ, définie par le rapport de l'amplitude de son champ électrique à celle de son champ magnétique. Elle est exprimée en Ohms.

$$Z = \frac{\vec{E}}{\vec{H}} \quad (\text{I.12})$$

I.4. Problèmes de Compatibilité Electromagnétique (CEM)

I.4.1. Définition de la Compatibilité Electromagnétique

CEM (compatibilité électromagnétique) recouvre tous les aspects de la pollution électromagnétique dans son environnement, la sécurité des biens et des personnes, en d'autres termes elle désigne toutes les perturbations d'ordre électrique qui peuvent être dommageables.

La Compatibilité Electromagnétique d'un dispositif électrique ou électronique quelconque est définie par son aptitude à fonctionner dans un environnement électromagnétique de façon acceptable et satisfaisante sans pour autant perturber, au-delà de certaines limites, ce qui se trouve autour de lui dans ce même environnement [5,6,7].

I.4.2. Perturbations électromagnétiques

On appelle « perturbation électromagnétique » tout phénomène électromagnétique susceptible de dégrader les performances d'un dispositif, d'un équipement ou d'un système. Ces perturbations peuvent être un bruit électromagnétique, un signal non désiré ou une modification du milieu de propagation.

Une perturbation électromagnétique met en œuvre 3 éléments [5,6,7]:

- une source : elle génère la perturbation
- une victime : elle reçoit la perturbation
- un mode de couplage : le vecteur de propagation, qui transmet la perturbation de la source à la victime

Il existe de nombreuses sources éventuelles de perturbations. On peut les classer ainsi :

- Sources naturelles (foudre, rayonnements solaires, ...)
- Sources électrostatiques : elles apparaissent lors de la friction de matériaux entre eux (une personne, un ballon de baudruche, ...)
- Sources liées à l'activité humaine
 - Sources volontaires (émetteurs radio ou de télévision, antennes relais, radars, ...)
 - Sources involontaires (lignes haute tension, moteurs, ...).

I.4.3. Décomposition d'un problème de Compatibilité Electromagnétique

Lors de l'analyse d'un problème de perturbation électromagnétique, on constate que celui-ci englobe trois éléments comme l'illustre la figure I-5. Il exprime le fait qu'une perturbation est

considérée si elle est nuisible pour une victime et s'il existe un chemin de couplage par lequel cette perturbation peut passer de la source à la victime.

1. une source de perturbation qui émet de l'énergie électromagnétique est appelée "source coupable".
2. un canal de couplage au travers duquel l'énergie de ces perturbations se propage.
3. un récepteur qui capte cette énergie est appelé "victime", vulnérable à ce signal parasite.
4. Si un de ces trois éléments est manquant, on considère qu'il n'existe aucun problème de compatibilité électromagnétique.

Les conséquences de ce phénomène peuvent aller du dysfonctionnement de la victime jusqu'à sa destruction [5,6,7].

Il y a trois moyens de réduire les perturbations à un niveau acceptable :

1. Supprimer ou diminuer l'émission à la source.
2. Rendre le couplage le plus inefficace possible.
3. Rendre le récepteur moins susceptible aux émissions.

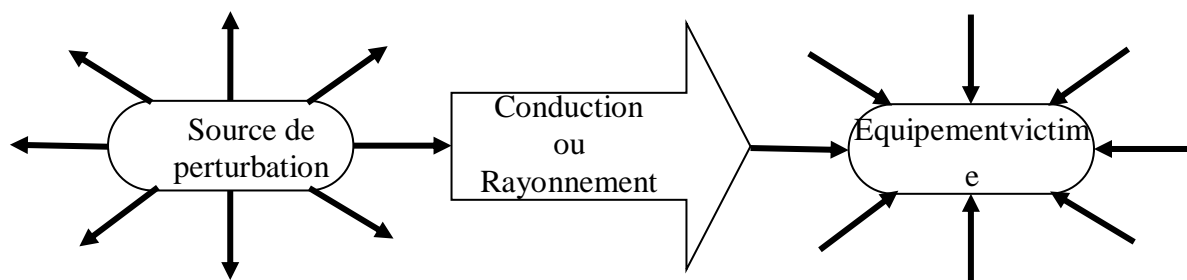


Figure I-5 : Systèmes « coupables » et « victimes »

I.4.4. Émission et susceptibilité

La compatibilité devant être assurée dans les deux sens, on est conduit à définir deux types de phénomènes [5,6,7]:

I.4.4.1. Emission

Les émissions (terme choisi par les normes aérospatiales ou similaires) ou perturbations (équivalent dans les normes industrielles) désignent les signaux (volontaires ou non) dont la propagation est de nature à nuire au bon fonctionnement des objets ou à la santé des êtres vivants situés au voisinage.

I.4.4.2. Susceptibilité

La susceptibilité désigne un comportement d'un appareil, en réponse à une contrainte externe (volontaire ou non, naturelle ou artificielle), jugé incompatible avec une utilisation normale. La susceptibilité est aussi appelée l'immunité.

Pour assurer une bonne compatibilité entre les équipements, différents niveaux et différentes marges ont été définis [5,6,7]:

- Le niveau d'émission : C'est le niveau maximal de perturbation que doit émettre un matériel.
- Le niveau d'immunité : Il s'agit du niveau à partir duquel il y a dysfonctionnement d'un matériel ou d'un système.
- Le niveau de compatibilité : C'est le niveau maximal de perturbation auquel on peut s'attendre dans un environnement donné.

La figure I-6 illustre la définition des marges de sécurité en compatibilité électromagnétique. Le niveau d'émission de la source doit être inférieur au niveau de compatibilité. L'écart entre le niveau d'émission et le niveau de compatibilité définit la marge d'émission. Pour assurer une bonne compatibilité, le niveau d'immunité de la victime doit être supérieur au niveau de compatibilité. La différence entre le niveau d'immunité et le niveau de compatibilité donne la marge d'immunité [8,9,10].

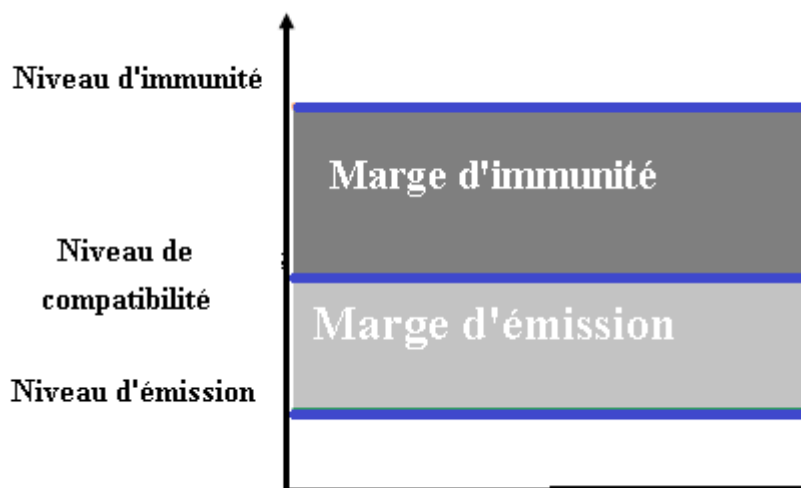


Figure I-6: Classement des différents niveaux des perturbations électromagnétiques

I.5. Sources d'interférences

Les principales sources d'interférence dues aux courants alternatifs sont [10]:

- Lignes de puissance a haute tension (HT) aériennes ou enterrées.
- Lignes de puissance longues et parallèles.
- Système de traction à haute vitesse (habituellement alimentée par une ligne de 132 kV et 25 kV en parallèle).

I.6. Mécanismes de couplages

On distingue trois types de couplages entre les lignes de haute tension et les canalisations métalliques :

- Couplage électromagnétique (inductif).
- Couplage résistif (conductif).
- Couplage électrostatique (capacitive).

I.6.1. Couplage électromagnétique (inductif)

Les lignes de haute tension génèrent un champ magnétique. Ces lignes peuvent être assimilées au primaire d'un transformateur. Les canalisations situées dans ce champ sont soumises aux variations de ce champ et développe une force électromotrice (f.é.m). Les canalisations peuvent être assimilées au secondaire du transformateur. L'importance de la tension induite dépend de la valeur de la f.é.m., de la longueur et de rapprochement du parallélisme, des caractéristiques de la canalisation (défauts de revêtement).

La tension alternative produit un courant alternatif circulant de la canalisation à travers tout défaut de revêtement.

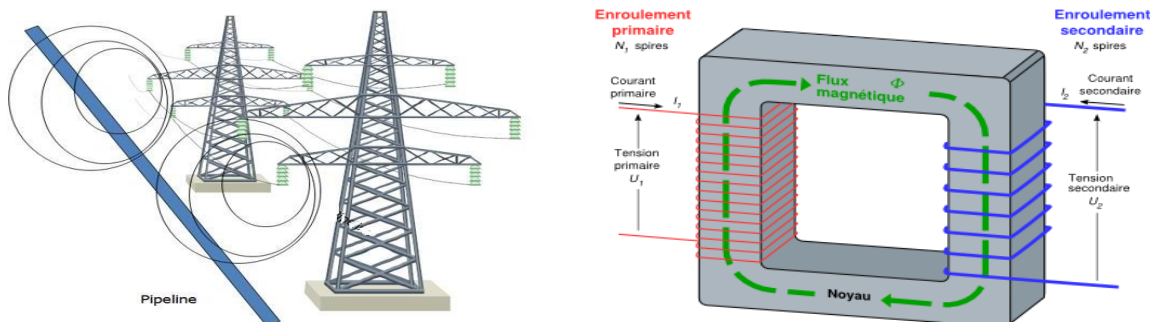


Figure I-7: Couplage inductif [10]

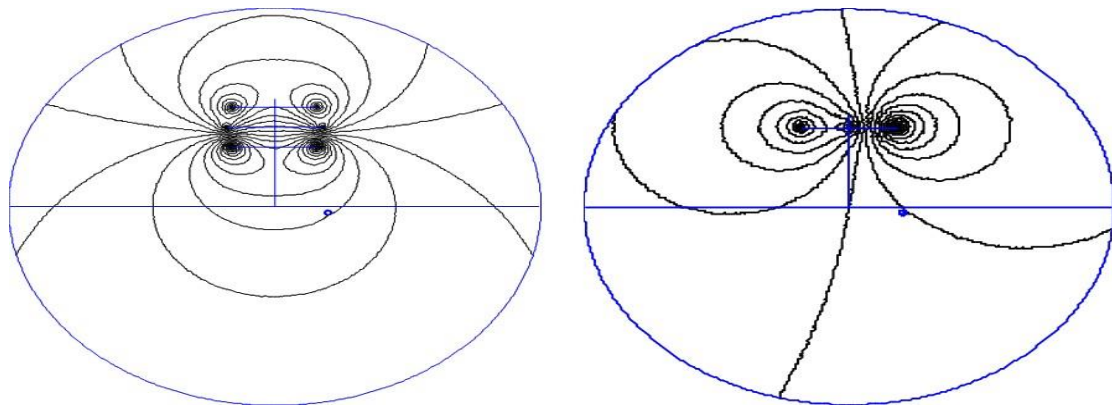


Figure I.8:Lignes de champ magnétique [11]

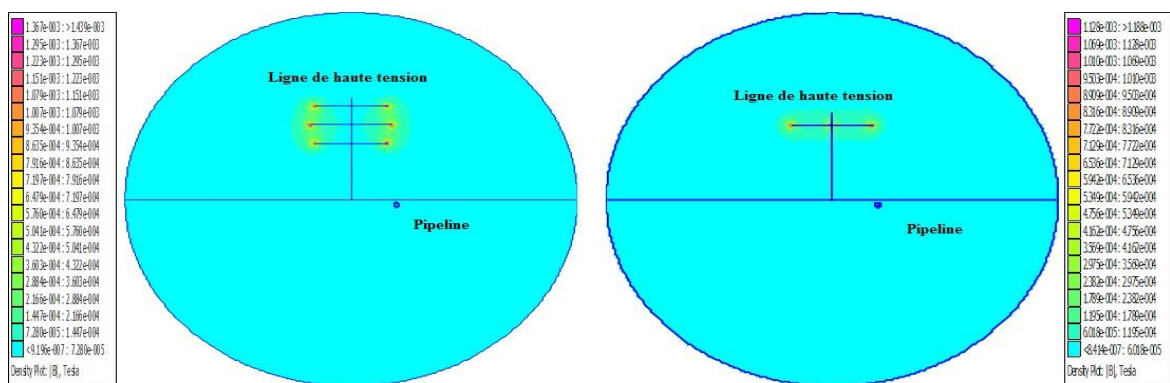


Figure I.9:Champ magnétique produit par une ligne de transmission [11]

Parmi les facteurs qui contribuent à l'augmentation de tension due à des courants alternatifs sur les canalisations, on peut compter :

- Nombre croissant de lignes de puissance en haute tension.
- Système de traction à haute vitesse fonctionnant par courant alternatif.

I.6.1.1 Effet du couplage inductif

Les dangers de l'induction permanente sont de trois (03) types:

❖ **Pour le personnel:** Le personnel travaillant à proximité de pipelines peut être exposé à des risques d'origine électrique. La tension maximale admissible sur les canalisations étant fixée entre **50 à 65 V** [12,13].

Le tableau ci-dessous représente la tension maximale admissible pour la sécurité du personnel dans le cas d'un fonctionnement normale, ainsi que dans le cas de fonctionnement de défaut, lorsqu'on prend en compte uniquement la tension induite due à l'effet inductif

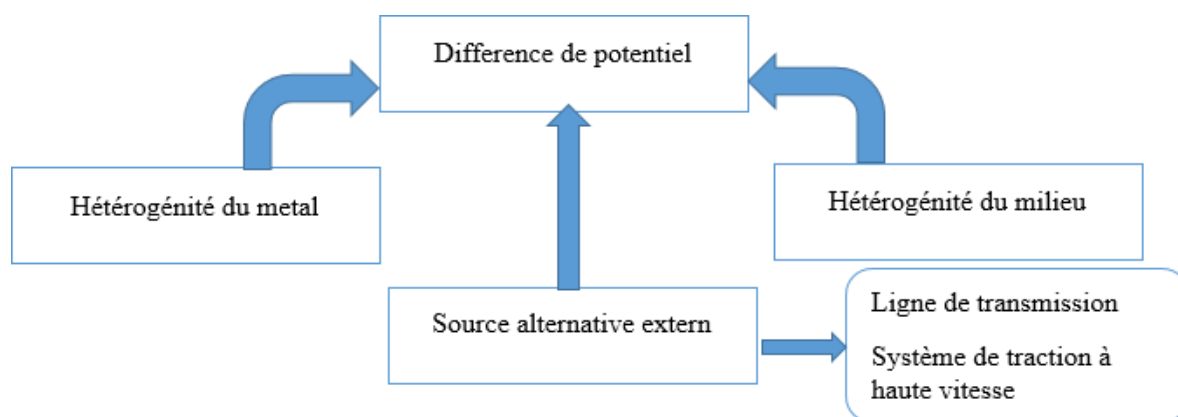
Tableau I.1: Normes de sécurité [12]

Norme	Fonctionnement normale Tension maximale [V]	Cas de défaut	
		Temps max (S)	Tension max (V)
IEEE80-2000	15	0.5	287
CEI-479	-	0.45	220
Etats Unis	25	0.5	287
Allemagne	65	0.5	1000
Suède	15	0.5	600
Suisse	50	0.3	300
Afrique du Sud	50	0.35	430

❖ **Pour les canalisations**, toutes canalisations soumise à des courants alternatifs induits est susceptible, selon les conditions environnementales et ses caractéristiques propres, de développer des cas de corrosions.

Un nouveau phénomène de corrosion lié aux courants alternatifs s'est ajouté à la liste des phénomènes de corrosion. Ceci résulte habituellement de tensions alternatives induites dans les canalisations dont le tracé est parallèle ou croisent les lignes à haute tension ou des chemins de fer électrifiés [19,18].

La corrosion est une réaction électrochimique entre un métal et son environnement qui se forme lorsque deux parties d'une structure possèdent un potentiel électrique différent. La différence de potentiel résulte souvent d'une hétérogénéité dans le métal, dans le milieu environnant ou l'existence d'une source électrique externe.

**Figure I.10:** Cause de différence de potentiel

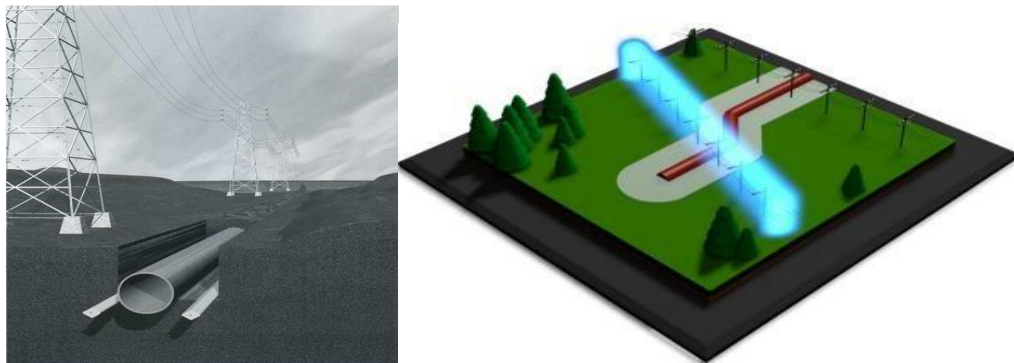


Figure I.11: Pipeline et réseau électrique

La corrosion est provoquée par un échange de courant entre le sol et le métal, cet échange de courant dépend de la tension induite sur les canalisations.

La corrosion par courant alternatif est causée par la formation et la dissolution répétées de la couche de passivation, de tel sorte que l’alternance positive engendre une couche de passivation et pendant l’alternance négative il y aura une dissolution de la couche de passivation qui se transforme en rouille ,c’est un cycle qui se répète et cause une dégradation du métal.

L’oxydation d’une couche atomique par cycle résulte un taux de corrosion de 70 mm/ans, la corrosion par courant alternatif est stoppée si on préserve la couche de passivation [16].

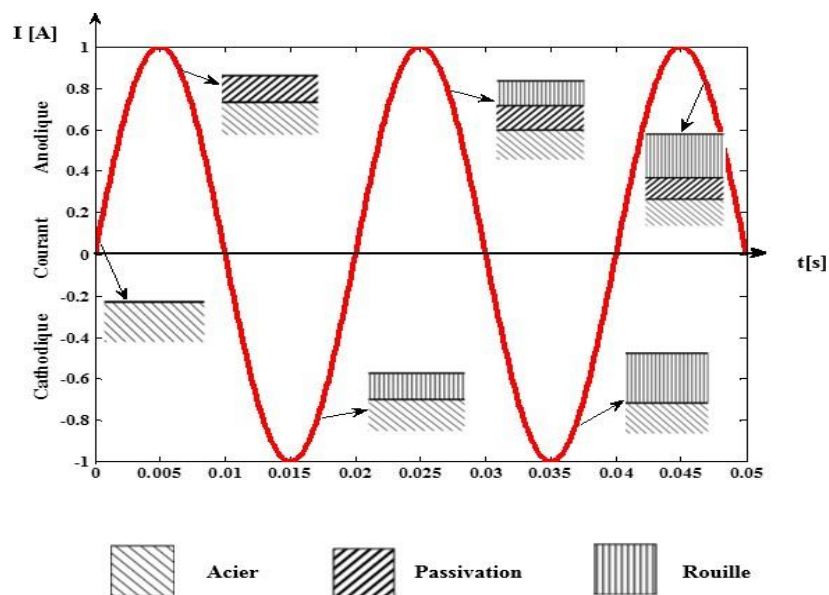


Figure I.12:Principe de corrosion par courant alternatif



Figure I.13: Défectuosité du revêtement ($15 \times 20 \text{ mm}$) sur la génératrice supérieure de la canalisation, la dimension du trou dans le revêtement est de quelques mm^2 [10].

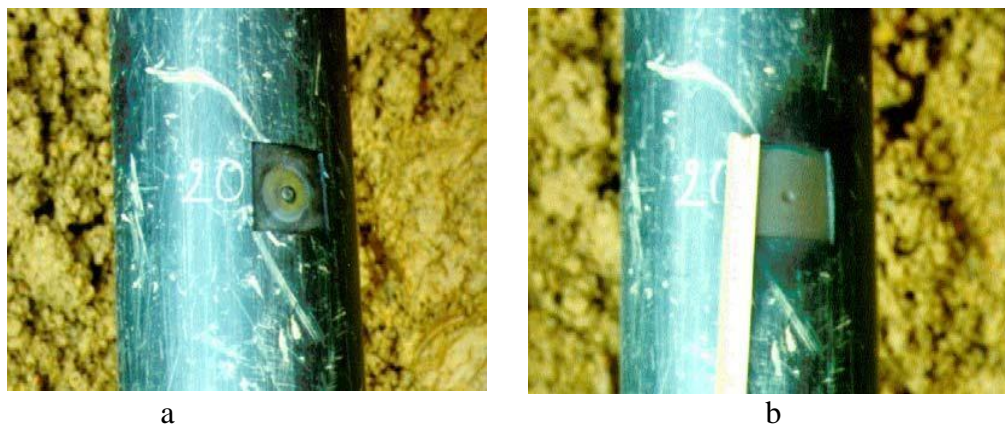


Figure I.14: a) Oxyde et produit de corrosion -b) Corrosion [10]

La corrosion est principalement influencée par:

- **la résistivité locale du sol :** La résistivité du sol est la capacité de celui-ci à s'imposer au passage du courant électrique. Elle est noté (ρ) et s'exprime en ($\Omega \cdot \text{m}$). Pour la mesure de ce paramètre important plusieurs méthodes existent, mais la plus usitée est la méthode dite des quatre piquets qu'on retrouve également sous le nom de méthode de Wenner.

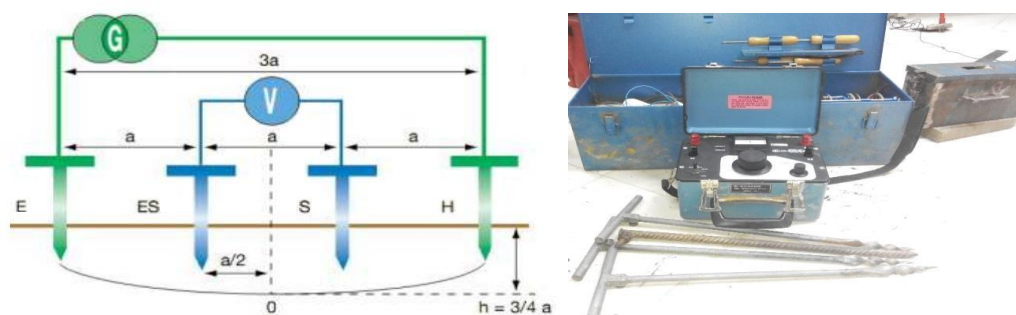


Figure I.15: Schéma de mesure de la méthode de Wenner

Le principe de mesure consiste à utiliser quatre électrodes qui sont disposées en ligne sur le sol, équidistantes d'une longueur a (Figure I.9). Entre les deux électrodes extrêmes E et H, on injecte un courant de mesure I grâce à un générateur ; E et H s'appellent électrodes de courant. Entre les deux électrodes centrales S et ES, on mesure le potentiel ΔV grâce à un voltmètre ; S et ES s'appellent électrodes de potentiel. Le terme V/I est la résistance R qui est mesurée avec un telluromètre à quatre bornes.

La valeur de la résistance R lue sur l'ohmmètre permet de calculer la résistivité (ρ) au point situé sous le point O, à une profondeur $h = (3/4) * a$ obtenue dans le cas d'un sol homogène:

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot R \text{ } [\Omega \cdot m] \quad (I-13)$$

Avec:

a: Distance entre les électrodes en m;

R: Valeur(en Ω) de la résistance lue sur telluromètre.

Ce paramètre est le critère d'appréciation le plus fréquemment utilisé pour évaluer l'agressivité des sols pour les métaux. Ainsi en général on convient que :

- ✓ Pour une résistivité de sol supérieure à $100\Omega \cdot m$; le sol est considéré comme étant peu agressif ; ce qui est le cas des terrains pierreux, calcaires ou sables secs.
- ✓ Pour une résistivité de sol compris entre 50 et $100\Omega \cdot m$; l'agressivité est moyenne; c'est souvent le cas des terrains agricoles, limoneux, légèrement sableux.
- ✓ Pour une résistivité de sol inférieure à $50\Omega \cdot m$, le terrain est agressif, terrains argileux
- **Le PH** : Le phénomène de corrosion dépend du PH de la solution (électrolyte), car il met en évidence les propriétés chimiques de celle-ci. Pour évaluer le PH d'un milieu, il existe plusieurs méthodes, mais à l'échelle industrielle on utilise un PH-mètre. Cet instrument est généralement constitué d'un boîtier électronique (comportant entre autre équipements électriques un millivoltmètre) permettant la lecture de la valeur du pH et d'une sonde de pH constituée d'une
 - électrode de verre permettant la mesure et d'une électrode de référence. Comme tout appareil de mesure ; il doit être étalonné si l'on veut obtenir des résultats satisfaisant.

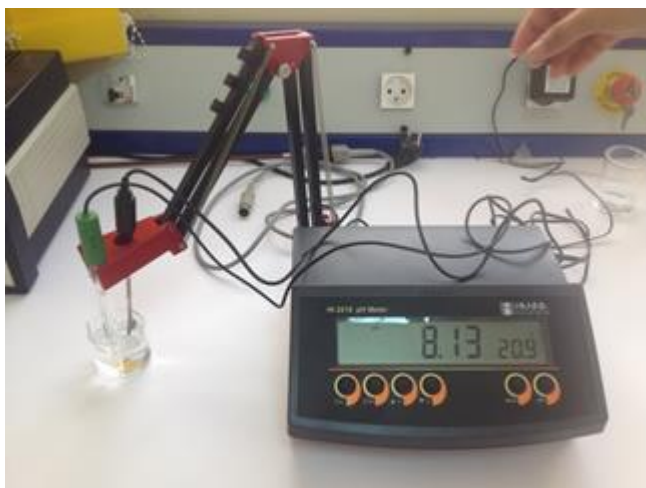


Figure I.16: Un PH-mètre

- La densité de courant alternatif.
- la dimension du défaut de revêtement.

À la date de la publication de la norme NF EN 12954-2001, le mécanisme de corrosion agissant en présence d'influences du courant alternatif n'est pas entièrement compris. Néanmoins, les points ci-dessous recouvrent les meilleures connaissances actuelles permettant d'évaluer le risque de corrosion induit par le courant alternatif sur des structures en acier ordinaires et d'effectuer des mesures

- La probabilité d'une corrosion peut être négligeable si la densité de courant alternatif relative à une surface nue de 1 cm^2 est inférieure à 30 A/m^2 et si le potentiel d'électrode de la structure satisfait aux critères de la protection cathodique.
- Les structures comportant un petit nombre de défauts de revêtement de petite taille peuvent présenter un risque supérieur de corrosion due au courant alternatif.

Pour la protection cathodique: Pour la protection contre la corrosion de structures métalliques enterrées, effet inverse aux équipements de protection cathodique.

La protection cathodique a pour objectif de ramener le potentiel de la structure métallique dans le domaine d'immunité de l'acier. D'après Pourbaix le potentiel est limité à -850 mV par rapport à l'électrode de référence Cu/CuSO_4 .

Pour atteindre le potentiel correspondant au seuil de la protection cathodique, la surface entière de l'objet doit être parcourue par un courant s'exprimant en densité de courant (A/m^2). Cette situation est décrite dans la figure I.19.

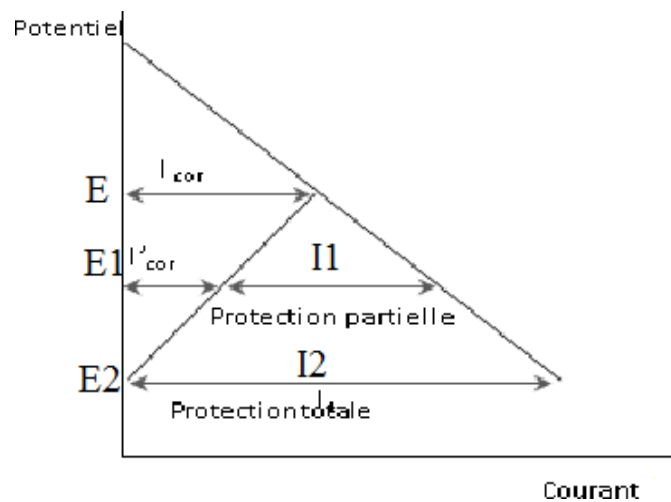


Figure I.17: Densité de courant et potentiel de la protection cathodique [17].

Dans les conditions de corrosion libre, la structure métallique a un potentiel de corrosion mixte E et se corrode à une vitesse proportionnelle à I_{cor} . Si l'on applique la polarisation cathodique afin que le potentiel de la structure diminue jusqu'à E_1 par le courant I_1 appliqué extérieurement, alors l'objet est partiellement protégé, puisque la vitesse de corrosion a diminué et vaut I'_{cor} . Si l'on augmente le courant extérieur jusqu'à I_2 pour que le potentiel descende à E_2 correspondant au potentiel réversible de la réaction anodique, alors la dissolution anodique sera stoppée. L'objet est alors sous protection cathodique.

Les diagrammes de Pourbaix, aussi appelés diagrammes potentiel-pH, indiquent sur un plan E-pH les domaines d'existence ou de prédominance d'un élément à différents degrés d'oxydation. Ils sont construits à partir de données thermodynamiques. La figure I.18 donne l'exemple d'un diagramme simplifié de Pourbaix du fer.

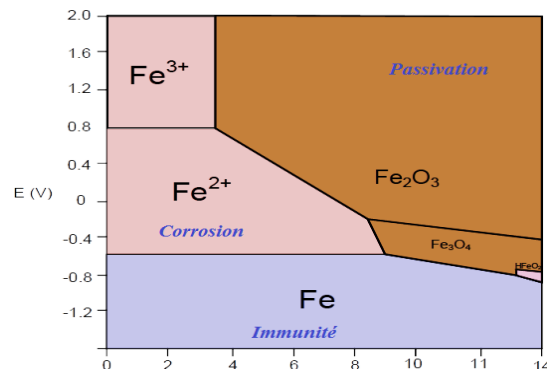


Figure I.18: Diagramme de Pourbaix du fer (à 25°C) [17].

Selon le diagramme de la figure I.18, le fer peut se trouver dans trois états thermodynamiques suivants on potentiel et le pH de la solution dans laquelle il est immergé:

- Passivation thermodynamique s'il se trouve dans les domaines de stabilité des hydroxydes ferreux ou ferrique (Fe_2O_3) ; Activité ou corrosion dans les domaines de stabilité des ions ferreux et Ferrique (Fe^{3+} , Fe^{2+} et H Fe vers les pH extrêmes);

- Immunité dans le domaine du diagramme correspondant à la stabilité du fer (Fe).

❖ Dans l'état d'immunité, le métal et le milieu ambiants ont dans un état de stabilité thermodynamique: ils ne peuvent réagir et par conséquent, la corrosion n'est pas possible. Cette situation se rencontre naturellement avec les métaux nobles (potentiel bien supérieur à celui de l'électrode d'hydrogène).

❖ Dans l'état de passivité, le métal et le milieu ne sont pas dans un état de stabilité thermodynamique, mais le métal se recouvre naturellement d'un film protecteur qui l'isole du milieu extérieur. Ce film (couche passive) doit être thermodynamiquement stable vis à vis du milieu extérieur et ne pas présenter de faiblesse localement. Dans le cas contraire, le métal se corrode localement. Dans la pratique en situation courante, l'acier inoxydable et le titane, par exemple, doivent leur résistance à la corrosion à leur comportement passif.

- Dans l'état d'activité, le métal n'est pas stable thermodynamiquement, et n'est pas recouvert d'un film protecteur: il réagit avec son environnement et se corrode.

I.6.1.2 Types de la Protection cathodique

Protection par anodes sacrificielles

Le principe de protection par anodes sacrificielles est basé sur la connexion d'une anode ou une série d'anodes sacrificielles avec la structure à protéger en présence d'un milieu électrolytique conducteur (sol ou eau) comme le montre la Figure I.19. La structure se polarise négativement jusqu' à ce qu'elle atteigne un niveau de potentiel suffisant et uniforme qui assure l'immunité de la surface contre l'activité de corrosion. Le courant généré par les anodes sacrificielles du système de protection est la source du processus de polarisation de la structure métallique. Au fil des années, l'anode se consomme graduellement selon un principe électrochimique défini par la loi de Faraday qui stipule que la masse consommée d'une matière impliquée dans la réaction d'oxydo-réduction est directement proportionnelle à la quantité du courant délivré. Ainsi, le taux de consommation de l'anode (g/A. Ans) dépend de la quantité du courant émis par l'anode, de la taille de l'anode et sa composition chimique ainsi que de la structure à protéger et de l'environnement [17].

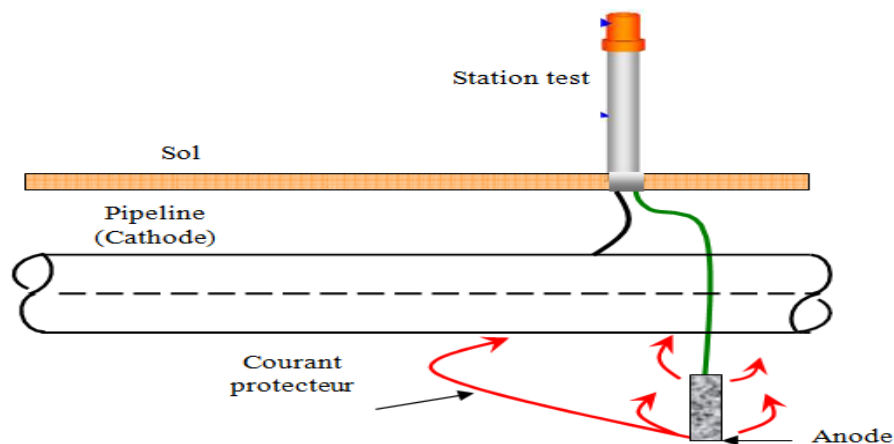


Figure I.19: la protection cathodique par anode sacrificielle

Protection cathodique par courant imposé

La protection par courant imposé (ou de soutirage) utilise une source d'énergie électrique en courant continu qui débite dans un circuit comprenant:

- Masse anodique ou (un déversoir).
- L'électrolyte (sol ou eau).
- La structure à protéger.

Le pôle positif de la source est relié au déversoir alors que le pôle négatif est relié à la structure à protéger. Comme le montre la figure I.20 Le courant venant du déversoir traverse l'électrolyte, puis entre dans la structure créant ainsi un abaissement de potentiel recherché correspondant à l'immunité du métal. Par exemple, pour de l'acier dans un sol type, la différence de potentiel entre l'électrode de référence au sulfate de cuivre saturé est inférieure à $-0,850V$ en tous points de la structure [18].

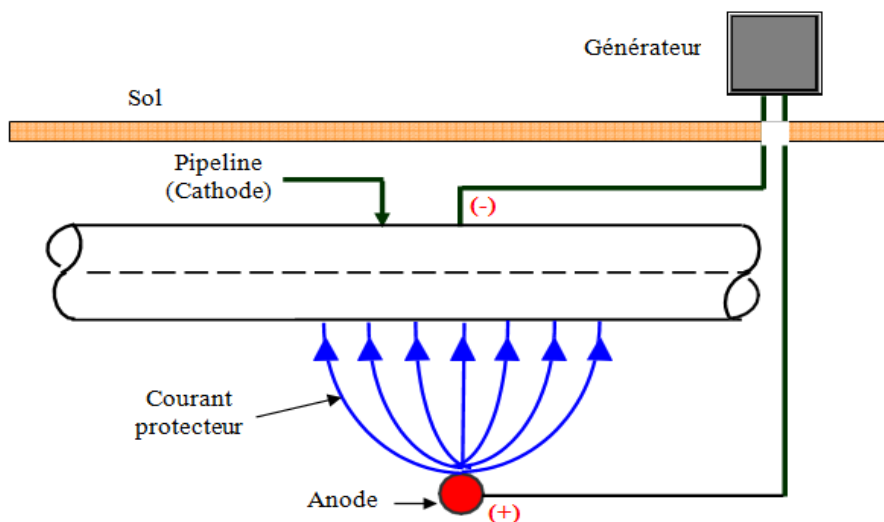


Figure I.20: la protection cathodique par courant imposé

Les courants alternatifs influent sur le bon fonctionnement des systèmes de protection cathodiques par le décalage de la tension de protection vers les valeurs les plus électro positives (insuffisance de la tension de protection).

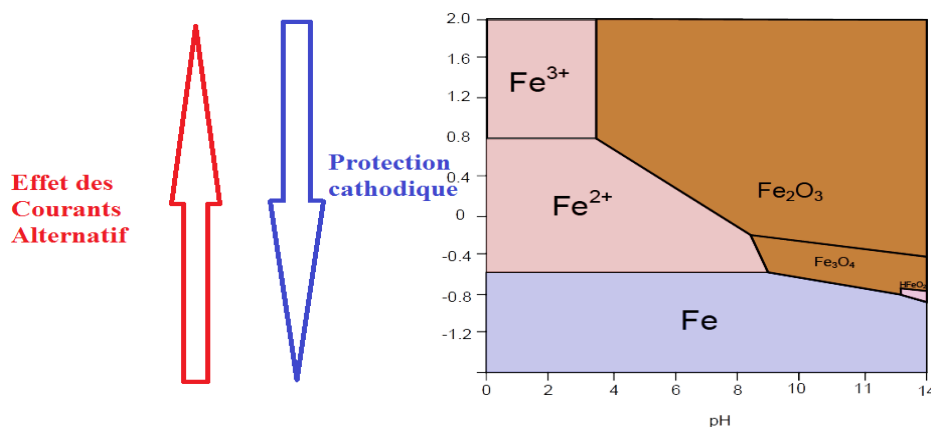


Figure I.21:Influence des courants alternatifs sur le potentiel de protection

I.6.2. Couplage résistif (conductif)

Lors d'un défaut sur une ligne de transmission, il y a déséquilibre du système triphasé et établissement d'un système homopolaire. S'il s'agit de court-circuit entre phase et terre, ce système homopolaire permet la circulation dans les conducteurs et le sol de courants homopolaires, dits de court-circuit.

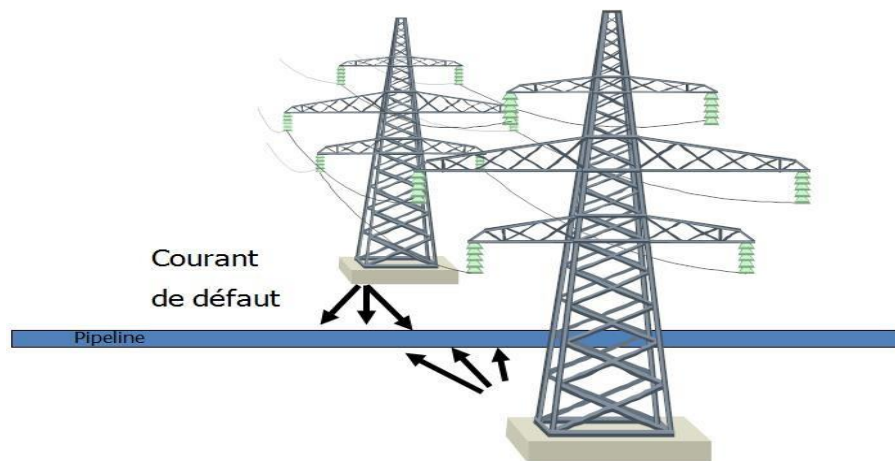


Figure I.22: Couplage Conductif

Le phénomène de conduction est local et n'intéresse que de petites portions de la canalisation à proximité du pylône, mais les tensions qui se développent peuvent atteindre des fortes valeurs.

Les risques électriques peuvent survenir sous la forme d'une tension de contact ou d'une tension de pas.

Une tension de contact peut exister lorsque le point situé entre un objet métallique et la terre doit supporter une tension d'un niveau dangereux.

Cela peut être causé par un courant alternatif de défaut ou par une surtension due à la foudre, qui augmente la tension entre la structure métallique et la terre. Les conduites situées à proximité de la mise à la terre d'un pylône d'une ligne électrique sont davantage exposées aux risques liés aux défaillances et à la foudre.

Le risque lié à la tension de pas survient lorsqu'un fort gradient de tension apparaît dans la terre entre les pieds d'une personne.

Cela se produit près d'une source de courant alternatif, une ligne de transmission ou de distribution par exemple, ou au voisinage d'un impact de foudre. Le gradient de tension qui en résulte dans la terre engendre un risque lié à la tension de pas [14].

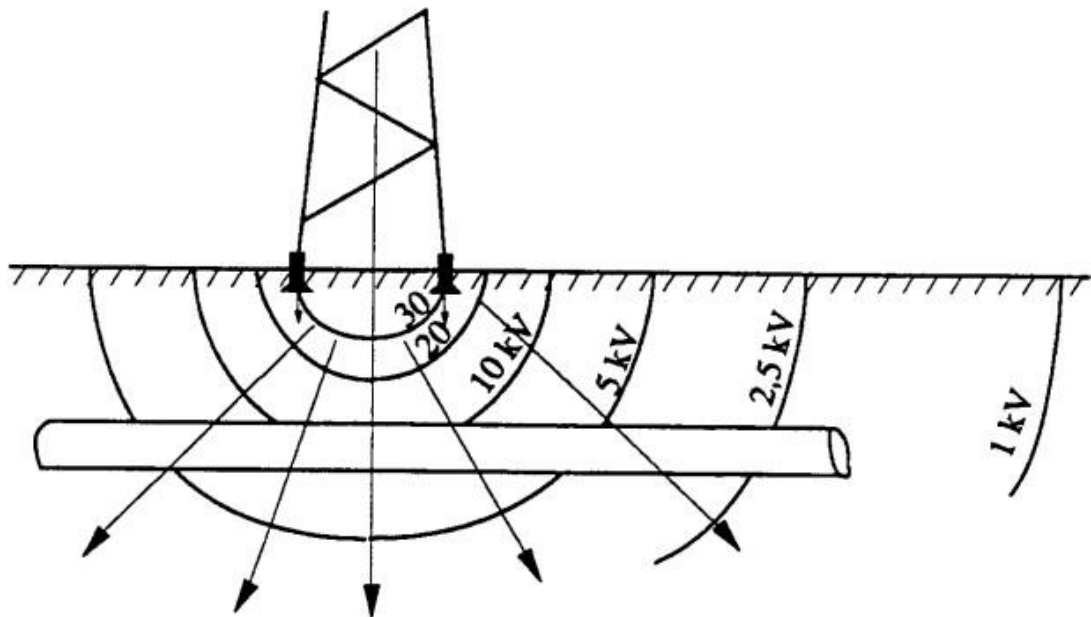


Figure I.23: Phénomène de conduction et surface équipotentielle

Sur le pylône en défaut il y a écoulement du courant de court-circuit vers le sol à travers la résistance de terre du pylône. Cette circulation de courant fait monter le potentiel du sol et crée une tension aux bornes du revêtement entre le sol et le métal de la conduite.

I.6.2.1. Les effets du couplage conductif

Les dangers du phénomène de conduction sont de deux(02) types:

1. **Pour le personnel**, Il y a risque pour les personnes en contact d'une part avec le sol, et d'autre part avec un équipement de la conduite. Ce risque, qui n'est pas à minimiser, correspond à la fréquence d'apparition des défauts sur la ligne et a une durée très brève de quelques périodes (1/25 de seconde).
2. **Pour les revêtements**, lors de l'établissement de la tension aux bornes de l'isolation, des effluves apparaissent au passage du courant à travers les pores et blessures du revêtement, et carbonisent légèrement sa surface, augmentant par ce fait sa conductance.

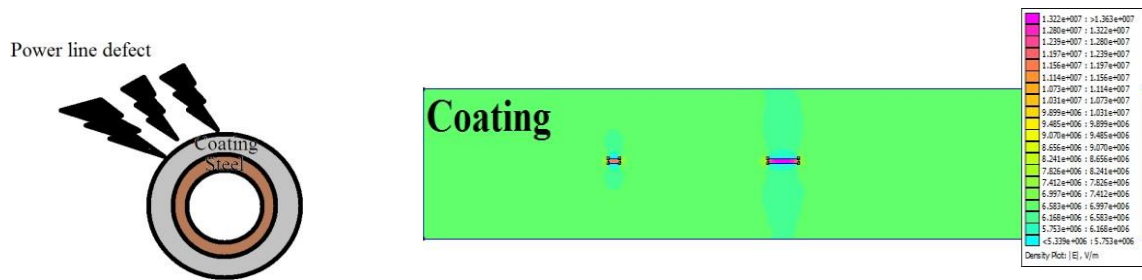


Figure I.24 : Défaut due au couplage conductif [11]

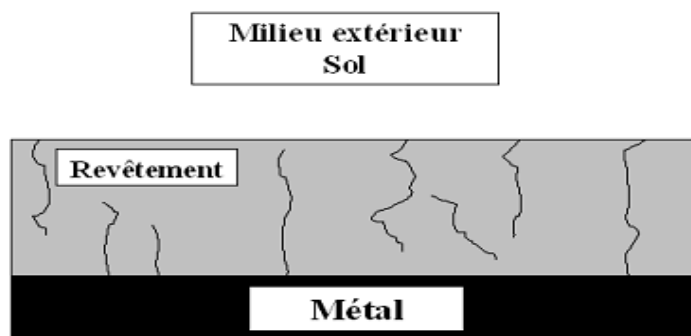


Figure I.25: Schéma d'un revêtement présentant des porosités, dont certaines relient directement le métal au milieu extérieur

I.6.2.2. Types de revêtements

a) Revêtement en bitume

Il est utilisé pour la protection des conduites en acier et en fonte. En général le revêtement en bitume a une épaisseur de 5 mm, grâce à sa plasticité il permet de réduire considérablement les risques d'endommagement mécanique provoqué lors de la pose et du transport des tubes.

b) Revêtement polymérique

On en distingue trois types:

- Les thermoplastiques: polyéthylènes, polypropylène, polyvinyle chloré (PVC)
- Les thermodurcissables: polyester, époxy
- Les caoutchoucs: naturels et synthétiques

Pour ce type de revêtement on utilise une épaisseur très faible qui varie entre 100 et 500 microns.

Les procédés de réalisation sont nombreux à savoir celui à la poudre, au pistolet et par immersion. Mais c'est celui à la poudre qui reste le plus répandu car il suffit de plonger le métal dans un lit de poudre agité et la poudre se dépose sur le métal.

Dans ce qui suit un tableau qui montre la rigidité diélectrique de chaque matière de revêtement:

Tableau I.2 : Rigidité diélectrique des revêtements

Matière de Revêtement	Rigidité diélectrique
élastomère éthylène-propylène	34KV/mm
Vinyle	10KV/mm
Mastic contre-couché sur film vinyle	9KV/mm
Caoutchoucs	20à 30kV/mm

3. **Pour les canalisations:** Lorsque la tension appliquée au revêtement devient trop forte (entre métal et sol au potentiel zéro) et claqué l'isolant, le risque pour la conduite est due à la circulation locale d'un courant dont les effets thermiques peuvent entraîner une perforation de la paroi de la conduite.

I.6.3. Couplage électrostatique (capacitif)

L'effet capacitif résulte du champ électrique dont les lignes de transmissions sont la source, des charges électriques sont apparait dans l'installation métallique qui se trouve à proximité de la ligne et on peut parler d'effet capacitif uniquement dans le cas où le pipeline soit posé au-dessus de la terre et isolé électriquement.

Les pipelines enterrés qui se situent à proximité d'une ligne de transmission aérienne ne sont pas exposé au couplage capacitif vu que la terre se comporte comme étant «Blindage électrostatique»[15].

Il convient de noter que le champ électrique est arrêté par le moindre obstacle, même faiblement conducteur (bâtiment, arbre, etc.).

Uniquement les pipelines installés sur la surface et sans mise à la terre sont l'objet de ce type de couplage, la figure I.26 illustre un exemple de couplage capacitif.

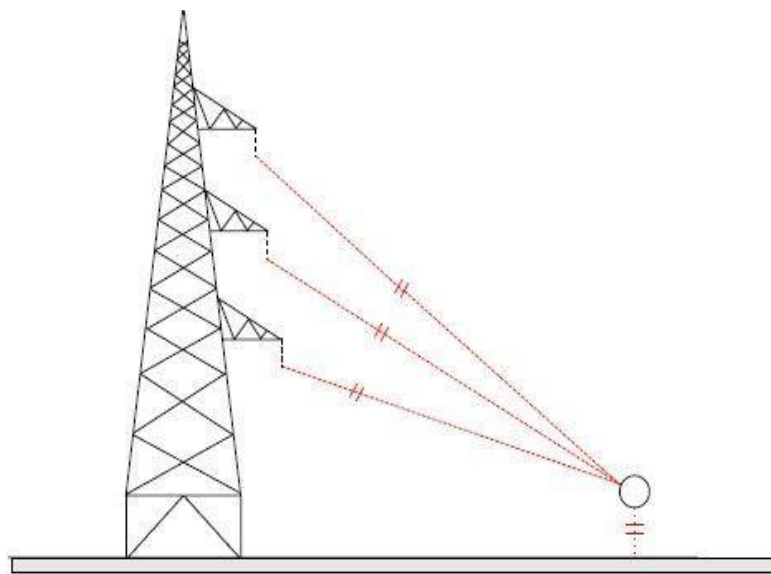


Figure I.26: Couplage capacitif [16]

Ce type de couplage se produit dans les conditions normales ainsi que dans les cas de défauts dans le système, il en résulte une tension induite qui peut être éliminée en faisant une mise à la terre au pipeline.

Les paramètres qui influencent sur le couplage capacitif:

- L'influence capacitive varie proportionnellement avec la variation de la tension de la ligne c.à.d. l'influence du couplage capacitif est intense lorsque l'amplitude de la tension de ligne est élevée.
- L'influence diminue avec l'augmentation de la distance latérale entre la ligne de transmission et le pipeline
- La répartition des phases ont une influence importante

I.7.Récepteurs

Les aciers aux carbones ont les plus utilisés dans la construction des pipelines. En raison de leur faible coût, la maîtrise des techniques de leur élaboration et leur production ils sont largement employés dans le secteur de l'énergie, comme les plates-formes de forage, le transport du pétrole ou du gaz naturel par le biais de gazoducs ou d'oléoducs. Ces aciers sont habituellement de nuances telles que X60, X65, X80, X52, X70, X80, X100 etc... [17].

Les principales caractéristiques des aciers API sont leur très haute résistance à la rupture et leur excellente ténacité à très basse température pour les aciers à forte épaisseur. De plus, ces qualités présentent une bonne aptitude au soudage, le Tableau I.3 montre les caractéristiques mécaniques requises des pipelines en acier de grade API (American Petroleum Institute).

Tableau I.3 : Caractéristiques mécaniques requises des pipelines en acier de grade API [18].

Nuance	Limite d'élasticité minimale R_{eH}	Résistance à la traction minimale R_m
	N/mm ²	N/mm ²
Gr. B	245	415
X-42	290	415
X-46	320	435
X-52	360	460
X-56	390	490
X-60	415	520
X-65	450	535
X-70	485	570

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelés les équations de Maxwell, les différentes formulations et les équations qui en résultent ainsi que l'ensemble des équations et des conditions qui gouvernent les répartitions du champ électrique en électrostatique. L'utilisation de l'électricité génère un champ électrique et un champ magnétique. Ces deux types de champs composent le champ électromagnétique. Ensuite nous avons détaillé toutes les interactions électromagnétiques entre les lignes de haute tension et les pipelines (couplages inductif, conducteur et capacitif). Les lignes de transport d'énergie HT peuvent induire des tensions dans les pipelines métalliques qui se trouvent à proximité et engendrent des effets néfastes tels que:

- Le risque sur le personnel (tension de contact et tension de pas).
- Risque de corrosion
- Risque d'endommager les équipements liés au pipeline (protection cathodique).
- Les perforations de revêtements du pipeline.

Chapitre II:

Calcul des interférences inductives entre la ligne aérienne HT et le pipeline métallique

II.1. Introduction

Quand une canalisation est plus ou moins parallèle à une ligne de haute tension sur une distance importante, le courant alternatif de cette ligne peut induire une tension sur toute la longueur longitudinale d'exposition du pipeline. Le principe de base de la tension induite peut être expliqué par la loi de Faraday. Cette loi précise que les champs magnétiques qui changent avec le temps vont induire des forces électromotrices sur un conducteur voisin. Ces forces induites provoquent la circulation de courants dans le conducteur, et par conséquent, l'établissement d'une tension induite sur le pipeline. Cette tension est assez petite, mais pour de longues canalisations qui s'étendent sur plusieurs kilomètres, elle devient importante.

Ce chapitre présente les procédures de calcul adoptées pour évaluer l'induction magnétique au niveau du pipeline, les niveaux de tensions induites en raison de l'interférence électromagnétique dans un pipeline métallique (aérien), installé dans le voisinage des lignes de transmission en fonctionnement normal ou lors d'un défaut de court-circuit.

Le procédé d'analyse de l'induction magnétique repose sur un la méthode de Carson. Concernant les grandeurs induites, une modélisation du système (ligne de transmission, pipeline, sol) est considérée. Les paramètres principaux du système tenus en compte sont les impédances linéiques propres et mutuelles, les paramètres électriques, le calcul de tension induite sera d'abord décrit pour un cas simple de parallélisme, et dans ce qui suit, dans le cas général.

II.2. La zone d'influence entre une ligne aérienne HT et un pipeline métallique

Deux configurations de voisinage sont possibles entre une ligne électrique HT et une canalisation métallique. La première configuration quand le pipeline est parallèle aux lignes électriques, et la seconde lorsqu'il y a un rapprochement par parallélisme, rapprochement oblique et croisement entre les lignes électriques et le pipeline. L'étude du premier cas nous facilite les calculs pour le second cas.

II.2.1. Le cas simple d'un parallélisme parfait entre la ligne aérienne HT et le pipeline

Lorsque le pipeline fonctionne physiquement en parallèle avec les conducteurs de la ligne d'alimentation, l'exposition parallèle de la canalisation et de la ligne électrique est appelée un parallélisme [19]. Ceci est illustré sur la figure II -1.

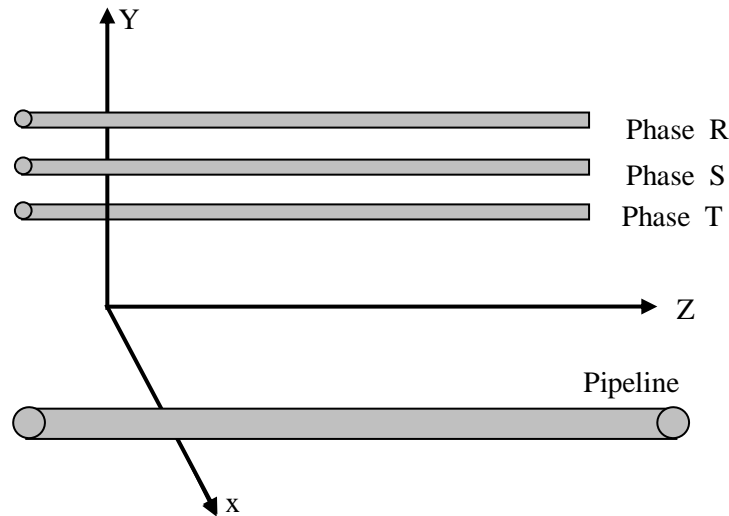


Figure II-1: Illustration d'une exposition parallèle entre une ligne aérienne et un pipeline

II.2.2. Le cas général de voisinage entre la ligne aérienne HT et le pipeline

Le cas général correspond à une configuration où la zone d'influence comprend généralement une succession des parallélismes, des rapprochements obliques, des croisements, tels que présentés à la figure II -2. Dans le cas d'un rapprochement oblique à des distances aux d_1 et d_2 aux extrémités, on peut approximer ce rapprochement à un parallélisme avec une distance de séparation à condition que le rapport entre la valeur maximale et minimale de la distance horizontale ne doive pas dépasser 3. Lorsque la condition précédente n'est pas remplie, le rapprochement oblique est subdivisée en deux (ou en plusieurs) sections de manière à satisfaire à l'exigence suscitée dans chaque section [20].

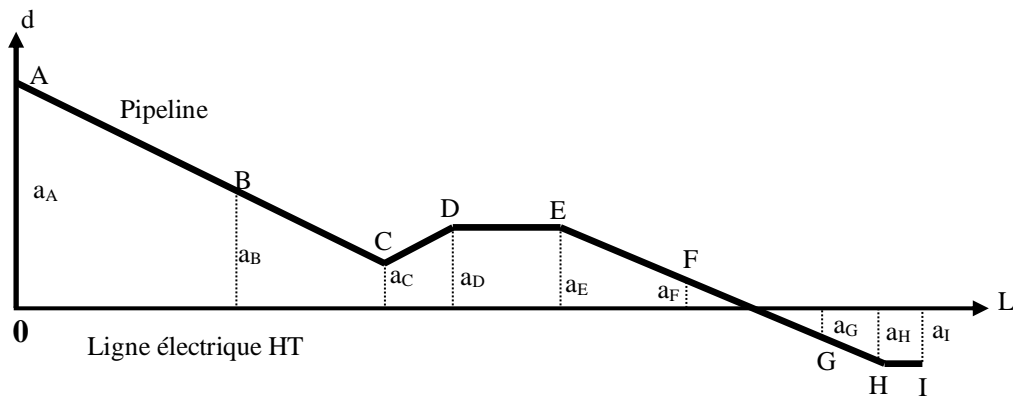


Figure II-2: Exemple de subdivision d'une zone d'influence en sections

Dans le cas d'un croisement, la zone située à l'intérieur d'une distance de 10 m des deux côtés de la ligne est considérée comme une section spéciale. Si l'angle aigu entre la ligne et le pipeline est supérieur à 45° , la section peut être négligée. En revanche, si l'angle est inférieur à cette valeur, la section est considérée comme un parallélisme avec une distance de séparation $d = 6$ m. Ceci est illustré sur la figure II -3.

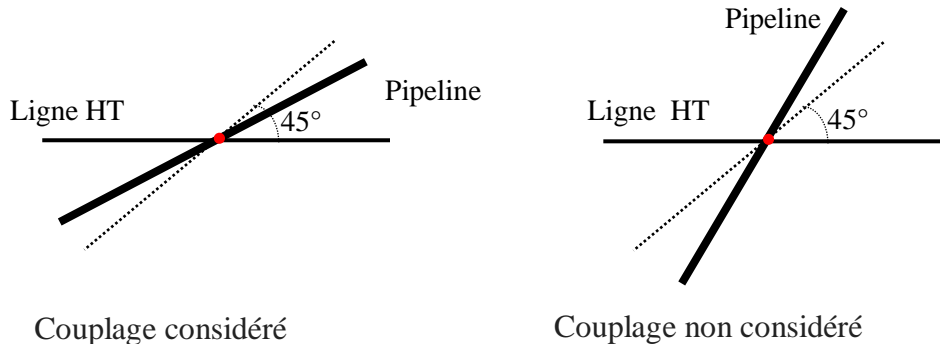


Figure II-3: Considération des différents passages: pipeline – ligne HT

Le calcul des tensions est fait le long du pipeline situé dans une zone d'influence. Cette zone est généralement un couloir où le pipeline et la ligne de transmission sont parallèles et en proximité. La zone d'influence s'étend le long de ce corridor jusqu'à ce que la séparation horizontale entre le pipeline et la ligne de transmission dépasse la limite considérée, en fonction de la résistivité du sol environnant (un kilomètre ou plus) [20,21,22].

Le calcul est fait en deux étapes:

- la première étape consiste à déterminer les forces électromotrices (fém) induites le long du pipeline, en raison du champ magnétique créé par la ligne de transmission.
- dans la seconde étape on calcule la différence de potentiel entre la canalisation et la terre, et de de circulation à cause de ces forces induites.

Il faut noter qu'il y a une différence patente entre la force électromotrice induite (fém) et la tension induite qui apparaît sur le pipeline. La force électromotrice induite est la source de tension, notée U , qui apparaît entre le sol et le pipeline. Seule la tension U représente les contraintes réelles sur le pipeline et son équipement.

II.3. Calcul du champ magnétique au voisinage du système (Ligne HT-pipeline)

L'analyse d'un problème électromagnétique aux fréquences industrielles, exige que l'analyse du champ magnétique soit réalisée séparément de l'analyse du champ électrique, le courant circulant dans les conducteurs d'une ligne aérienne de transport génère un champ magnétique dans l'air et le sol entourant la ligne. Ce champ peut induire des tensions et des courants (Loi de Faraday) sur les canalisations métalliques de grande dimensions et qui sont en parallèles à la ligne de transport à haute tension. Dans cette partie, on présente un procédé d'analyse en deux dimensions du champ magnétique engendré par une ligne de transport HT. Le procédé repose sur une approche électromagnétique de base celle de la loi d'Ampère.

II.3.1. Calcul du champ magnétique sous une ligne aérienne THT

L'analyse en régime quasi-statique d'un problème électromagnétique aux fréquences industrielles exige que l'analyse du champ magnétique soit réalisée séparément de l'analyse du champ électrique, le champ magnétique d'une ligne aérienne de transport est engendré uniquement par le passage du courant. Une simple application du principe physique de la loi d'Ampère permet de calculer la valeur de l'intensité du champ magnétique autour d'un simple conducteur, puis on applique le théorème de superposition des trois champs partiels pour obtenir le champ magnétique total

II.3.2. principe de la méthode de calcul (théorie des images, méthode de Carson)

Pour calculer le champ magnétique au niveau du sol au voisinage d'une ligne de transport d'énergie, On considère une ligne électrique aérienne longue et rectiligne parcourue par un courant électrique, un cercle de rayon (r) dans un plan perpendiculaire à l'axe du conducteur, centré sur celui-ci. Pour des raisons de symétrie, le champ magnétique H est constant tout au long du cercle [23,24,25,26].

La loi d'Ampère, c'est la première loi fondamentale de la magnétostatique, déclare que la circulation du champ magnétique le long d'une « boucle » fermée, est égale au courant qui le traverse:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (\text{II.1})$$

Le champ magnétique est donné par la formule :

$$H = \frac{I}{2.\pi.r} \quad (\text{II.2})$$

La densité de flux magnétique (ou champ d'induction magnétique) est donnée par la relation :

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2.\pi.r} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

μ_0 : La perméabilité magnétique du vide (N/A^2).

Il faut savoir que le champ B est dirigé tangentiellement aux cercles centrés sur le conducteur et est contenu dans le plan perpendiculaire à celui-ci.

Nous allons l'appliquer dans le cas d'un conducteur long et rectiligne parcouru par un courant comme montrée par la figure I-2. Un courant électrique d'intensité I au point (x_i, y_i) créé au point $p(x, y)$ de l'espace un champ magnétique, l'induction magnétique est définie par la relation :

$$B_i = \frac{I_i}{2.\pi.r_{ij}} [\text{Tesla}] \quad (\text{II.4})$$

On peut utiliser la théorie des images des conducteurs en tenant compte de la profondeur de pénétration. La méthodologie de l'image est utile pour prendre en considération les effets de la présence d'un sol conducteur.

Le champ magnétique alternatif que la ligne génère induit des courants de retour dans le sol et ceux-ci, dans le même temps génèrent un champ magnétique qui est superposé sur celui produit par la ligne. Le champ magnétique généré par un conducteur transportant un courant d'un sol parfaitement conducteur, peut être représenté par les champs combinés du conducteur et de son image.

Les images sont situées à une profondeur, dans le sol, bien plus grande que la hauteur des conducteurs de phase. Le calcul précis du champ magnétique nécessite l'emploi des termes de Carson.

La méthode de Carson, qui est basée sur la notion de courants de retour par le sol. On considère un plan fictif de retour de courant, parallèle à la surface du sol et placé à la profondeur de pénétration à une distance complexe égale à (α) . Cette grandeur complexe définit une profondeur de pénétration des courants dans le sol tenant en compte la résistivité du milieu et la fréquence des courants. Cette grandeur s'ajoute à la distance séparant les conducteurs aériens de la terre. Comme représenté sur le schéma 2, La profondeur d vaut:

$$\alpha = \sqrt{2} \cdot \delta \cdot e^{-j\pi/4}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot f}}$$
(II.5)

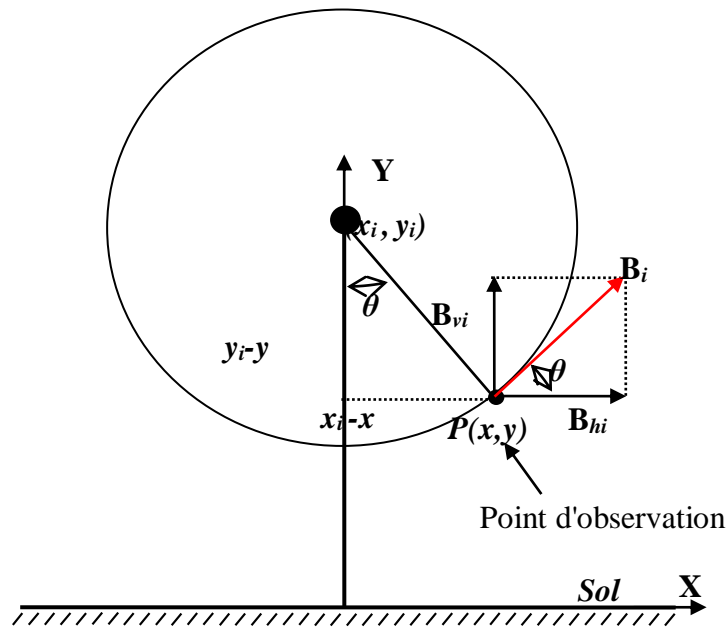


Figure II-4 : Champ magnétique généré par un conducteur en un point d'observation $P(x, y)$.

Avec :

δ : La profondeur de pénétration

ρ : la résistivité électrique du sol ($\Omega \cdot m$)

f : la fréquence en Hz.

μ_0 : la perméabilité magnétique du vide (N/A^2) .

Afin de calculer la profondeur de pénétration, la résistance du sol, $\rho = 100 (\Omega \cdot m)$ a été utilisé. En substituant dans l'équation (II.5), avec $f = 50 \text{ Hz}$, et $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} (\text{N/A}^2)$, donne un résultat $\delta \approx 711.76 \text{ m}$. Cette valeur est ainsi supérieure à la distance entre les conducteurs aériens de transport et le sol [23,25].

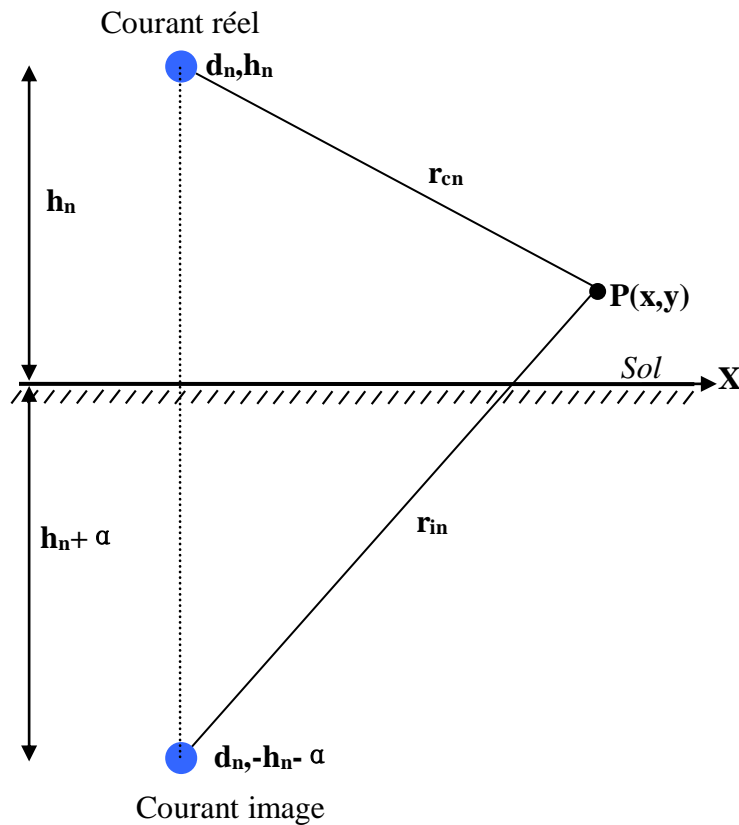


Figure II-5. Intensité magnétique engendrée par un courant I circulant dans un conducteur unique.

Dans le cas d'une ligne triphasée, les composantes horizontales et verticales du champ B des trois phases doivent être traitées comme vecteurs de phase et combinés séparément, en prenant en compte le déphasage entre les courants.

La solution appropriée pour le maximum de la densité de flux magnétique est donnée par les deux composantes verticales et horizontales:

$$B_{xn} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \hat{I}_n \left[\frac{y-h_n}{r_{cn}^2} - \frac{y+h_n+\alpha}{r_{in}^2} \right]$$

$$B_{yn} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \hat{I}_n \left[\frac{x-d_n}{r_{cn}^2} - \frac{x-d_n}{r_{in}^2} \right]$$
(II.6)

Avec :

$$r_{cn} = \sqrt{(x-d_n)^2 + (y-h_n)^2}$$

$$r_{in} = \sqrt{(x-d_n)^2 + (y+h_n+\alpha)^2}$$
(II.7)

Une ligne électrique se compose généralement de plusieurs conducteurs de phase et câbles de gardes. Par la superposition, le champ magnétique d'une ligne de transmission peut être écrit en ajoutant les composants de champ donné pour chaque conducteur.

$$B_x = \sum_{n=1}^N \hat{B}_{xn}$$

$$B_y = \sum_{n=1}^N \hat{B}_{yn}$$
(II.8) et (II.9)

Le champ résultant pour les trois conducteurs est [23,25].

$$B_t = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$$
(II.10)

Le calcul du champ magnétique dans notre étude est effectué à une hauteur de 1 m à partir du sol plat, les lignes proposées sont identiques à ceux utilisés lors de l'évaluation des champs électriques. La largeur de l'emprise considérée pour le calcul des champs magnétiques est de 75 m pour les lignes de transport.

II.3.3. Calcul des courants induits dans les câbles de garde

La mise en place de câbles de garde a pour effet de modifier légèrement les capacités et les inductances d'une ligne électrique. Ces câbles de garde baignent dans le champ magnétique créé par les conducteurs de phase de la ligne, l'interaction entre le champ magnétique et les câbles de garde résulte en un courant induit circulant dans ces câbles. Pour un calcul précis du champ

d'induction magnétique, l'influence des courants induits dans les câbles de garde par les courants de phase est prise en considération [26,27,28].

Les courants induits circulant dans les câbles de garde peuvent être calculés en résolvant le système d'équations suivant:

$$\begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cg} \\ Z_{gc} & Z_{gg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_c \\ I_g \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ V_g \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

La tension dans le câble de garde est supposée nulle ($V_g = 0$), le courant I_g est donné par l'expression suivante :

$$[I_g] = - [Z_g^{-1}] \cdot [Z_{cg}] \cdot [I_c] \quad (\text{II.12})$$

Où :

$[Z_{cg}]$: La matrice des impédances mutuelles entre les conducteurs de phase et les câbles de garde ;

$[Z_{gg}^{-1}]$: La matrice inverse des impédances propres des câbles de garde ;

$[I_c]$: La matrice des courants (I_i) qui parcourent les conducteurs de phase.

Ces impédances propres et mutuelles de la ligne sont calculées à partir de l'équation de Carson. Celles-ci seront données en détail au paragraphe (II. 4.1).

Ces courants des câbles de garde doivent être traités comme des courants de ligne dans le calcul du champ magnétique à induction sur les objets métalliques parallèles à la ligne électrique

II.4. Calcul de la force électromotrice longitudinale induite dans le pipeline

La force électromotrice induite sur un pipeline peut être calculée soit à l'état normal d'équilibre, soit dans des conditions de défaut du système d'alimentation. Dans les deux cas, les impédances mutuelles entre le pipeline et les conducteurs de la ligne électrique correspondante sont obligatoires [20,21,22].

II.4.1. Calcul des impédances linéiques propres et mutuelles du système électrique

Considérons une simple ligne de transmission aérienne à haute tension avec un câble de garde et une canalisation métallique enterrée parallèle à la ligne d'alimentation à l'intérieur de la zone d'influence, comme le montre la figure II -6.

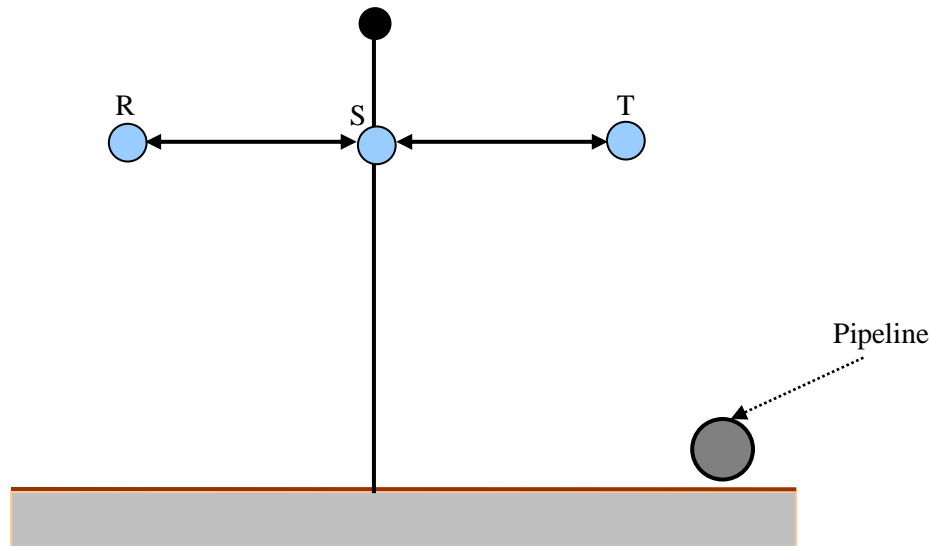


Figure II -6 : Configuration d'une ligne triphasée HT en nappe horizontale avec un pipeline

L'expression des impédances propres et mutuelles linéiques dans le cas d'une ligne à retour du courant par le sol est, d'après Carson, composé de deux termes [19].

$$Z_{ii} = R_{ii} + \Delta R_{ii} + j(X_{ii} + \Delta X_{ii}) \quad (\text{II.13})$$

- Un premier terme égal à l'impédance linéique propre et mutuelle que l'on obtient dans le cas d'un sol parfaitement conducteur, avec effets de peau et de proximité totaux, $R_{ik} + j X_{ik}$.
- Un terme de correction qui est fonction de la fréquence et de la résistivité du sol. $\Delta R_{ik} + j \Delta X_{ik}$.

L'expression générale des termes de la correction a été exprimée par Carson par une intégrale, qui est valable pour le calcul de l'impédance linéique propre et pour l'impédance linéique mutuelle, ΔR et ΔX sont des fonctions de variables p et q .

Cette intégrale est de la forme :

$$\Delta R_{ik}(p, q) + j\Delta X_{ik}(p, q) = 4 \cdot \omega \int_{v=0}^{\infty} \left(\left(\sqrt{v^2 + j} \right) - v \right) e^{-pv} \cdot \cos(q \cdot v) \cdot dv \quad (\text{II.14})$$

La solution de l'intégrale a été donnée par Carson sous la forme de séries infinies. Pour la plupart des lignes de transmission d'énergie à 50 Hz, les distances à considérer les conducteurs et leurs images sont inférieures à 100 m ce qui conduit, en admettant une résistivité moyenne de 100 Ωm à $p = 0,2$ [19].

Finalemnt, les formes générales de Carson pour les impédances propres et mutuelles des conducteurs sont données par les relations suivantes :

$$Z_{ii} = R_c + j \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \omega}{4 \cdot \pi} \ln \left(\frac{R_{GM}}{D_{ii'}} \right) + \frac{\mu_0 \cdot \omega}{\pi} \left[\frac{\pi}{8} + j \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2}{\gamma \cdot p} \right) \right) \right] \quad (\text{II.15})$$

$$Z_{ij} = j \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \omega}{4 \cdot \pi} \ln \left(\frac{D_{ij}}{D_{ij'}} \right) + \frac{\mu_0 \cdot \omega}{\pi} \left[\frac{\pi}{8} + j \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2}{\gamma \cdot p} \right) \right) \right] \quad (\text{II.16})$$

Où :

γ : représente la constante de Bessel ($\gamma = 1,7811$) ;

$D_{ii'}$: la distance entre le conducteur (i) et son image (i') en m;

D_{ij} : la distance entre le conducteur (i) et le conducteur (j) en m;

En introduisant dans ces expressions (II.15) et (II.16) les valeurs respectives obtenues pour p il vient des formules simplifiées (II.17) et (II.18) permettant le calcul des impédances propres et mutuelles linéiques pour un conducteur et entre deux lignes avec retour du courant par le sol.

L'impédance mutuelle entre le pipeline et une phase de la ligne aérienne ou un câble de garde, avec retour par la terre, est calculée en utilisant l'équation suivante [20,22,29].

$$Z_{cp} = \frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} + j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_e}{D_{ip}} \right) \quad (\text{II.17})$$

Où :

D_{ip} : est la distance entre le centre de chaque conducteur et le pipeline ; D_e est la profondeur de pénétration, du courant de retour via la terre, donnée par l'équation (II.5).

Pour chaque conducteur de phase ou câble de garde de la ligne électrique, l'impédance propre s'obtient à l'aide l'équation suivante :

$$Z_c = R_c + \frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} + j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{1}{4} + \ln \left(\frac{D_e}{R_{GM}} \right) \right] \quad (\text{II -18})$$

L'impédance mutuelle peut être calculée aussi selon la formule suivante, valable pour toute distance entre le pipeline et les conducteurs de la ligne électrique :

$$Z_{ip} = \frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} + j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{\left[\ln \left(1 + 1.382 \frac{D_e^2}{D_{ip}^2} \right) \right]^2}{4} - \frac{\pi^2}{16}} \quad (\text{II -19})$$

Où :

R_j : est la résistance linéique d'un conducteur de phase ou de câble de garde en (Ohm/m) ;

R_{GM} : est le rayon moyen géométrique du conducteur de phase ou câble de garde en (m).

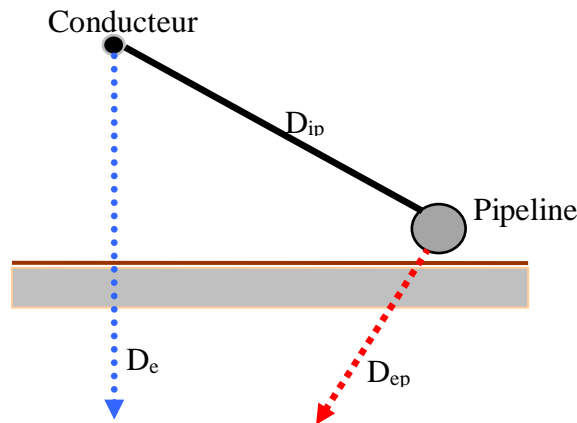


Figure II-7: Distances équivalentes entre les conducteurs, le sol et le pipeline

II.4.2. Force électromotrice induite en condition normale de fonctionnement

Nous considérons le cas où la ligne électrique haute tension est sans câble de garde. En raison de l'écoulement de courant en pleine charge dans les trois phases de la ligne, la force électromotrice longitudinale totale induite dans le pipeline est exprimée en fonction des impédances mutuelles entre le pipeline et les conducteurs de phase selon l'expression suivante [20,22,29]:

$$E_p = -I_1 \cdot Z_{p1} - I_2 \cdot Z_{p2} - I_3 \cdot Z_{p3} \quad (\text{II } 20)$$

Où :

E_p : est la force électromotrice induite dans le pipeline ; I_1, I_2 et I_3 sont les courants des phases à pleine charge sous forme complexe ; Z_{p1}, Z_{p2} et Z_{p3} sont les impédances du couplage mutuel entre les conducteurs phases et le pipeline.

- L'expression de la force induite est obtenue selon la démarche suivante.

Imposons à la ligne un système de trois courants triphasés équilibrés d'ordre positif (PPS), définis comme suit :

$$I_1 = I^p, I_2 = a^2 \cdot I^p \text{ et } I_3 = a \cdot I^p \quad (\text{II } 21)$$

Avec :

$$a = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ et } a^2 = -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (\text{II } 22)$$

a : est un opérateur de rotation de 120° .

- En substituant les expressions (II -17), (II -21) , dans l'équation (II -20), nous obtenons l'expression de la force électromotrice induite ci dessous:

$$E_p = -I^p \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} + j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_e}{D_{1p}} \right) + \right. \\ \left. \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \left[\frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} + j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_e}{D_{2p}} \right) \right] \right. \\ \left. \left. + \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \left[\frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} + j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{D_e}{D_{3p}} \right) \right] \right] \right\} \quad (\text{II } 23)$$

- Cette expression peut être simplifiée comme suit :

$$E_p = -\frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} I^p \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \left(\frac{D_{3p}}{D_{2p}} \right) + j \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{D_{2p} \cdot D_{3p}}}{D_{1p}} \right) \right\} \quad (\text{II } 24)$$

En revanche, et dans le cas où la ligne électrique aérienne est équipée de câble de garde. la force électromotrice induite dans le pipeline est calculée selon l'équation suivante :

$$E_p = -I_1 \cdot Z_{p1} - I_2 \cdot Z_{p2} - I_3 \cdot Z_{p3} - I_g \cdot Z_{pg} \quad (\text{II -25})$$

Le potentiel est nul sur toute la longueur des câbles de garde (mise à la terre par chacun des pylônes), la chute de tension s'écrit ainsi :

$$DV_g = I_1 \cdot Z_{g1} + I_2 \cdot Z_{g2} + I_3 \cdot Z_{g3} + I_g \cdot Z_{gg} \approx 0 \quad (\text{II-26})$$

Et nous pouvons donc en déduire le courant I_g dans le câble de garde :

$$I_g = -\frac{1}{Z_{gg}} (I_1 \cdot Z_{g1} + I_2 \cdot Z_{g2} + I_3 \cdot Z_{g3}) \quad (\text{II -27})$$

En combinant les équations (II -25), (II -26) et (II -27), nous obtenons l'équation suivante de la force électromotrice induite :

$$E_p = - (I_1 \cdot Z_{pg1} + I_2 \cdot Z_{pg2} + I_3 \cdot Z_{pg3}) \quad (\text{II -28})$$

Où :

Z_{pg1} , Z_{pg2} et Z_{pg3} , sont les impédances mutuelles entre les conducteurs des phases, câble de garde et le pipeline.

$$Z_{pg1} = Z_{p1} - \frac{Z_{pg}}{Z_{gg}} Z_{g1}, Z_{pg2} = Z_{p2} - \frac{Z_{pg}}{Z_{gg}} Z_{g2}, Z_{pg3} = Z_{p3} - \frac{Z_{pg}}{Z_{gg}} Z_{g3} \quad (\text{II.29})$$

Enfin, en utilisant l'expression de l'impédance mutuelle exprimée en (II -17), la force électromotrice induite se calcul selon l'équation suivante :

$$E_p = -\frac{\mu_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} I^p \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \left(\frac{D_{3p}}{D_{2p}} \right) + j \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{D_{2p} \cdot D_{3p}}}{D_{1p}} \right) - \frac{Z_{pg}}{Z_{gg}} \right] \\ \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \left(\frac{D_{3g}}{D_{2g}} \right) + j \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{D_{2g} \cdot D_{3g}}}{D_{1g}} \right) \right] \end{array} \right\} \quad (\text{II.30})$$

Les termes des impédances mutuelles entre les conducteurs des phases et les câbles de garde ($Z_{phase-g}$), ont des formes générales calculées par l'équation (II. 17) indiquée ci-dessus, où l'indice phase indique le numéro de phase.

Dans le cas où la ligne électrique aérienne est équipée de deux câbles de garde, la force électromotrice induite dans le pipeline est calculée selon l'équation suivante :

$$E_p = - \begin{bmatrix} I_1 \cdot \left(Z_{p1} - \frac{Z_{pg1}}{Z_{g1g1} + Z_{g1g2}} Z_{g11} - \frac{Z_{pg2}}{Z_{g2g2} + Z_{g2g1}} Z_{g21} \right) \\ + I_2 \cdot \left(Z_{p2} - \frac{Z_{pg1}}{Z_{g1g1} + Z_{g1g2}} Z_{g12} - \frac{Z_{pg2}}{Z_{g2g2} + Z_{g2g1}} Z_{g22} \right) \\ + I_3 \cdot \left(Z_{p3} - \frac{Z_{pg1}}{Z_{g1g1} + Z_{g1g2}} Z_{g13} - \frac{Z_{pg2}}{Z_{g2g2} + Z_{g2g1}} Z_{g23} \right) \end{bmatrix} \quad (\text{II -31})$$

Cette expression peut se mettre sous la forme suivante :

$$E_p = - \frac{\mu_0 \cdot \omega}{2\pi} I^p \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \left(\frac{D_{3p}}{D_{2p}} \right) + j \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{D_{2p} \cdot D_{3p}}}{D_{1p}} \right) \\ - \frac{Z_{pg1}}{Z_{g1g1}^2 - Z_{g1g2}^2} \left[Z_{g1g1} c - Z_{g1g2} d \right] \\ - \frac{Z_{pg2}}{Z_{g1g1}^2 - Z_{g1g2}^2} \left[Z_{g1g1} d - Z_{g1g2} c \right] \end{array} \right\} \quad (\text{II-32})$$

Avec :

$$c = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \left(\frac{D_{3g1}}{D_{2g1}} \right) + j \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{D_{2g1} \cdot D_{3g1}}}{D_{1g1}} \right) \quad (\text{II -33})$$

$$d = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \left(\frac{D_{3g2}}{D_{2g2}} \right) + j \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{D_{2g2} \cdot D_{3g2}}}{D_{1g2}} \right)$$

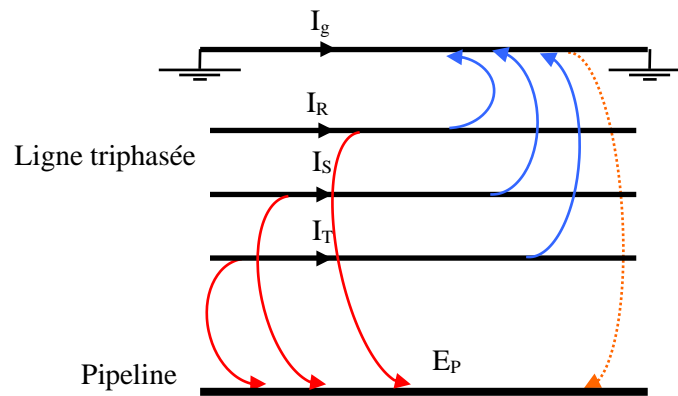


Figure II-8: Induction sur un pipeline métallique en condition normale de fonctionnement

II.5. Calcul des tensions induites dans un pipeline par le couplage inductif

Le calcul des tensions induites dans un pipeline engendrées par le couplage inductif d'une ligne de transport d'énergie, nécessite la modélisation de la canalisation et la détermination de ses caractéristiques électriques comme étant un des conducteurs de la ligne de transport aérienne.

Une canalisation métallique peut être modélisée comme une longue ligne de transmission avec perte, tout en connaissant les valeurs de ses dimensions géométriques et ses caractéristiques physiques.

II.5.1. La modélisation du système électrique

Dans le but de la modélisation mathématique du phénomène de tension induite sur le pipeline, nous avons choisi deux méthodes, la première méthode permet un calcul rapide et facile et donne une approximation de la tension induite en utilisant de simples concepts du réseau électrique HT. Cette approche est uniquement utilisée pour les pipelines qui sont au-dessus du sol, par contre, elle n'est pas applicable pour les pipelines qui sont enterrés. La seconde approche est une approche beaucoup plus compliquée basée sur les équations des lignes de transmission, qui prend en compte beaucoup plus des paramètres dans un format utilisable et est adapté pour les pipelines qui sont enterrés [20,21,22,26].

Dans le cas d'un parallélisme parfait entre la ligne électrique et le pipeline, le calcul des tensions induites apparaissant sur les pipelines est fondé sur les hypothèses suivantes:

- Le pipeline est parallèle à la ligne électrique ;
- L'admittance de fuite du pipeline est constante, c'est à dire la résistance du revêtement par unité de longueur du pipeline est uniforme, et indépendante de la tension appliquée ;
- La résistivité du sol le long de la ligne électrique parallèle est constante.

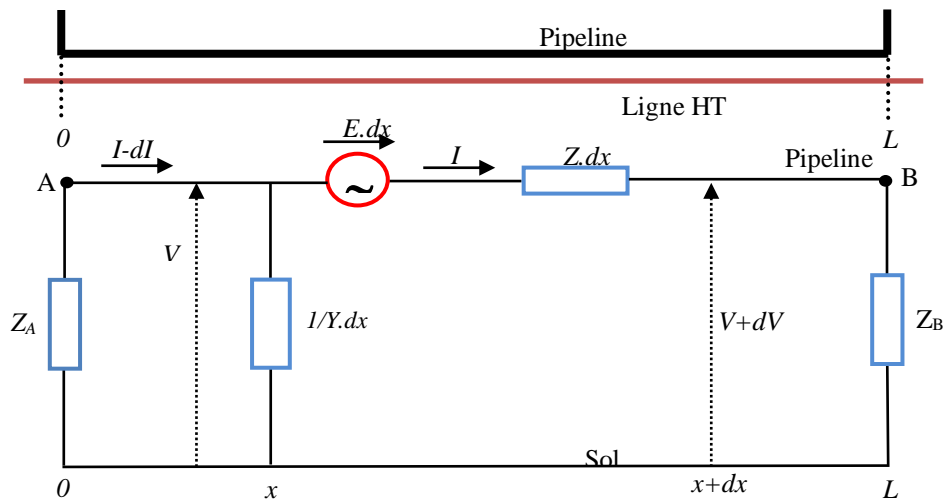


Figure II-9: Représentation du circuit équivalent entre le pipeline et le sol

II.5.2. Parfait parallélisme entre la ligne électrique et le pipeline

II.5.2.1. Cas d'un pipeline aérien

La tension induite dans le pipeline en raison de l'écoulement de courant en pleine charge dans la ligne de transmission est donnée par l'expression ci-dessous:

$$V_p = E_p \cdot L \tag{II -34}$$

Où : V_p est la tension induite dans le pipeline ; L est la longueur du parallélisme entre le pipeline et la ligne.

Dans cette approche, la tension induite dans la canalisation dépend à la fois de l'amplitude du courant de charge, des distances relatives entre les phases et le pipeline et de la longueur longitudinale d'exposition du pipeline.

Cette approche peut être utilisée comme une approximation pour prédire la tension induite sur un pipeline. C'est une méthode rapide et facile pour le calcul de la tension induite pour les différentes configurations. Cette approche fait beaucoup d'hypothèses et d'approximations. Elle est seulement valide pour les pipelines au-dessus du sol, car elle ne prend pas en compte les paramètres essentiels concernant la canalisation et la terre [29].

Dans certains cas, la tension induite peut être supérieure à la limite acceptable recommandée par les normes internationales. La plupart des réglementations internationales (en Europe, la norme EN 50443:2011, en Australie, AS / NZS 4853:2000) incitent à ce que des mesures de sécurité devraient être prises lorsque la tension sur le pipeline dépasse 50 V ou 65V à l'état d'équilibre [20,29]. Dans ce cas, l'atténuation est nécessaire pour maintenir la tension dans la limite admissible. La méthode la plus simple est de raccorder à la terre le pipeline avec deux électrodes à chaque extrémité du pipeline, ce qui peut réduire la tension due au couplage inductif. Le courant qui circule à une électrode de terre peut être calculé à partir du potentiel résiduel V_P du pipeline au niveau du point de l'installation et la résistance de terre [29,30,31] :

$$I_R = \frac{V_P}{Z_T} \quad (\text{II -35})$$

Où: Z_T est l'impédance totale du circuit définie par la relation suivante :

$$Z_T = \sqrt{(2.R)^2 + (Z_{pp})^2} \quad (\text{II -36})$$

La mise à la terre du pipeline est une mesure efficace pour réduire la tension induite. La résistance de l'électrode par rapport au sol doit être choisie pour assurer une chute de tension inférieure à 50V. Dans cette condition, le pipeline est mis à la terre avec des électrodes $R_1 = R_2 = R$. Selon la figure II -10, nous pouvons déduire la relation suivante:

$$I_R = \frac{V_P}{\sqrt{4 + (Z_{pp}/R)^2}} \quad (\text{II -37})$$

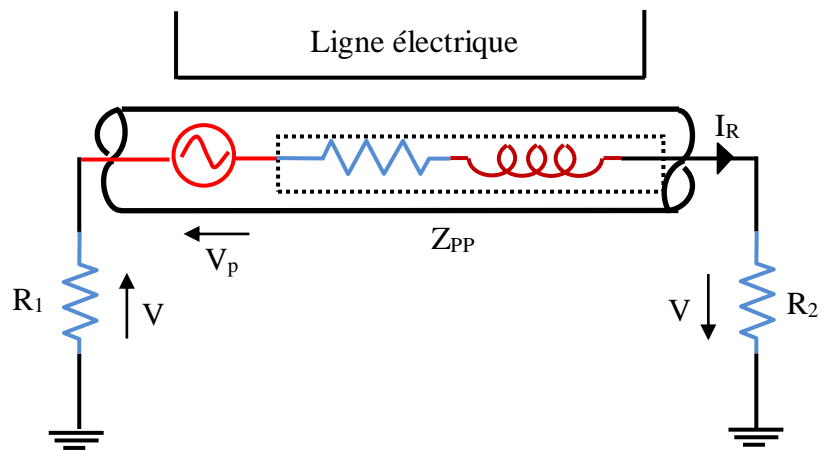


Figure II-10: Mise à la terre du pipeline par électrodes de terre

II.6. Validation de la tension induite du couplage inductif

Les tensions induites par les lignes électriques aériennes à haute tension dans les pipelines métalliques aériens trouvant dans le voisinage peuvent être déterminés à l'aide de la loi de Faraday. Cette loi explique que le champ magnétique qui varie dans le temps à travers un circuit conducteur fermé, il donne naissance à chaque instant, dans ce circuit, à une force électromotrice induite (tension induite) [28,32,33,34]:

$$e(t) = -\frac{d\phi_t}{dt} \quad (\text{II -38})$$

Avec :

ϕ_m : Le flux magnétique qui entoure la boucle conductrice, il s'exprime en webers (Wb), t est le temps en secondes (s), la force électromotrice e(t) en volts.

Le flux magnétique total ϕ_t est créé par la variation sinusoïdale du courant circulant dans chaque phase de la ligne aérienne à haute tension, à travers une boucle de conducteur fermée (S), est définie par [28,32,33,34]:

$$\phi_t = \iint_S B ds \quad (\text{II -39})$$

B : Intensité du champ magnétique en teslas (T), S : Aire de la surface (en m²).

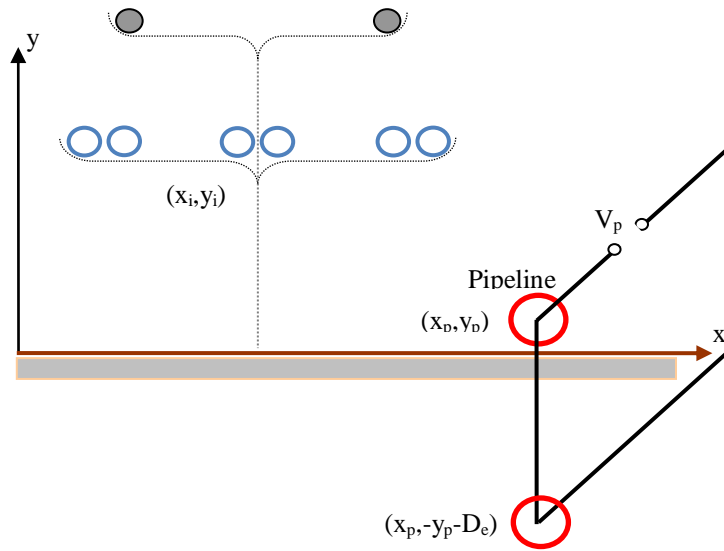


Figure II-11: Tension induite dans le pipeline par le couplage inductif

Les conducteurs du pipeline situés respectivement aux points de coordonnées (x_p, y_p) et $(x_p, -y_p - D_e)$, forment une boucle passive, étant donné les coordonnées des conducteurs de phase et de la boucle passive comme indiqué sur la figure II -11, le flux magnétique total peut être exprimé comme suit [32,33,34,35,36]:

$$\phi_t = -\frac{\mu_0 \cdot L}{4 \cdot \pi} \sum_{i=1}^n I_i \ln \frac{(x_p + x_i)^2 + (y_p + D_e + y_i)^2}{(x_p + x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} \quad (\text{II -40})$$

Où :

μ_0 : est la perméabilité relative de l'air ;

I : est les courants des conducteurs de phase et des câbles de garde;

L : est la longueur de la boucle conductrice.

Combinant les équations (II -39) et (II -40), on obtient l'expression de la tension induite dans la boucle:

$$V_p = -j \cdot \omega \cdot \phi_t \quad (\text{II -41})$$

Où :

V_p : est la tension induite dans la boucle ;

ω : est la pulsation angulaire (exprimée en radians par seconde rad/s).

II.7. Conclusion

Ce chapitre décrit les procédures adoptées pour déterminer l'induction magnétique sans et avec la présence d'une canalisation métallique aérienne, la tension induite résultante dans un pipeline métallique, en raison des interférences électromagnétiques émanant de lignes électriques à haute tension, dans des conditions normales, et de défauts. Le calcul de cette tension apparaissant sur le pipeline a été effectué en deux étapes :

- La détermination de la force électromotrice induite dans le long du pipeline et l'induction magnétique.
- Le calcul de tension entre la ligne et le pipeline et le sol local,

Pour la modélisation du circuit électrique (lignes aériennes, pipeline métallique et sol), les équations de Carson ont été utilisées pour calculer les impédances linéiques propres et mutuelles, et pour la validation de la tension induite du couplage inductif.

Chapitre III:

Résultats et Interprétations

III.1. Introduction

Après avoir décrit la formulation mathématique du système combinant les lignes électriques HT et le pipeline métallique et le sol, et étudié les interactions pouvant exister et présenter les méthodologies utilisées pour le calcul des interférences dues aux couplages inductif, nous présentons et discutons en détail dans ce qui suit l'ensemble des résultats de simulation obtenus. Cette partie est consacrée à l'analyse des résultats de simulation obtenus pour le couplage inductif, l'induction magnétique au niveau du pipeline, la tension induite, et le moyen approprié de réduction de la tension induite.

III.2. Calcul du champ magnétique au niveau du pipeline

Considérons une ligne triphasée aérienne à simple terne de 275 kV en régime normal de fonctionnement, en arrangement horizontal des phases, avec deux câbles de garde et au voisinage un pipeline métallique, parcouru par un courant de phase égal à 500 A. Ce pipeline métallique est supposé aérien en surface isolée à 1 m de hauteur au-dessus du sol. La phase est constituée d'un faisceau à 2 conducteurs avec un pas de 0.4 m séparant les deux conducteurs du faisceau. Le rayon d'un conducteur de phase est 1,34 cm et celui du câble de garde est 0,7 cm. Le pipeline installé à une distance de séparation égale 30 m parallèlement à l'axe de la ligne de transport, a un rayon extérieur de 0,3 m, une épaisseur en acier de 4 mm. Le sol est supposé homogène avec une résistivité de 100 Ω .m.

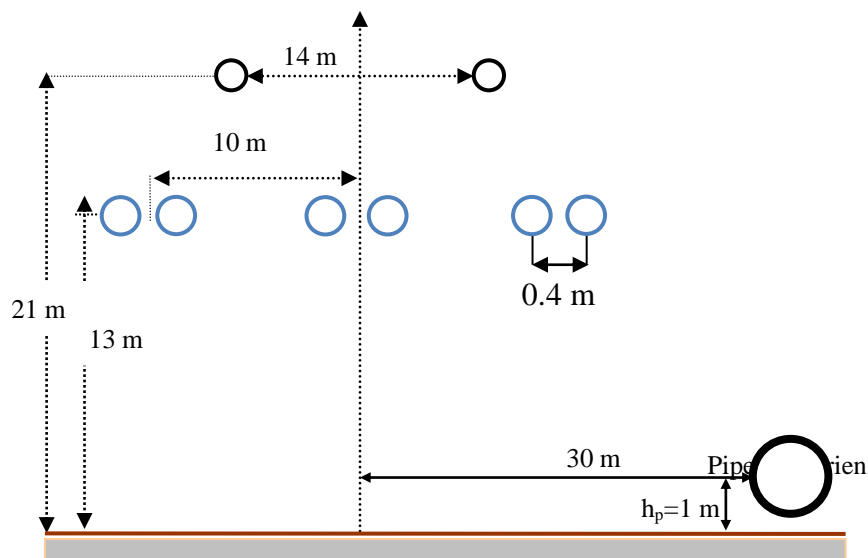


Figure III-1: Configuration horizontale d'une ligne électrique avec un pipeline aérien

III.2.1. Analyse du champ magnétique en présence d'un pipeline métallique

La figure III-2 montre la distribution latérale de l'induction magnétique à 1 m au dessus du sol, avec et sans la présence du pipeline. Sans le pipeline, on remarque que ce profil présente une symétrie par rapport au centre de la ligne ($x = 0$), quand il s'éloigne de part et d'autre du centre de la ligne, l'intensité de l'induction magnétique décroît rapidement avec l'augmentation de la distance latérale du point centre de la configuration.

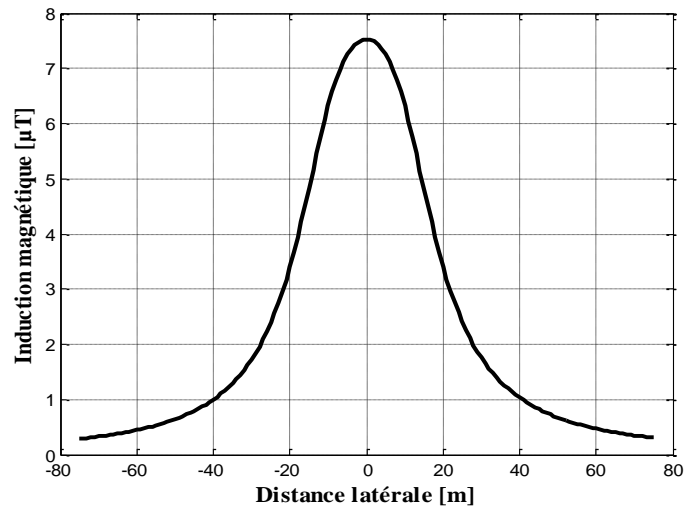


Figure III -2 : Induction magnétique à 1 m du sol sans la présence d'un pipeline

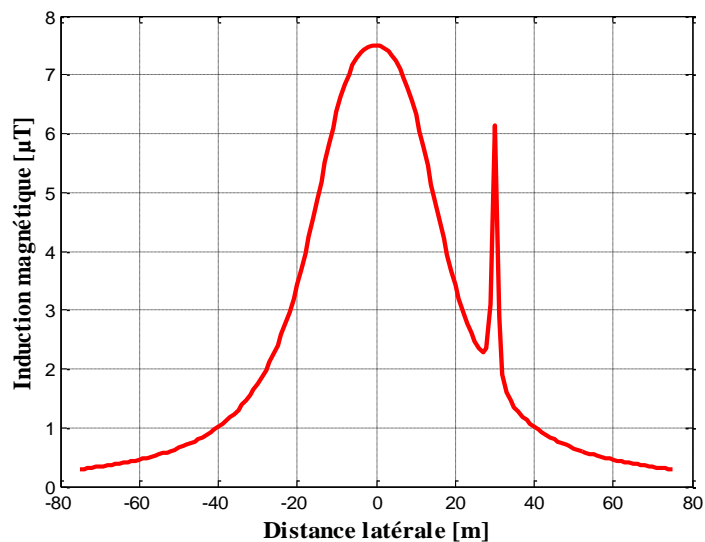


Figure III -3 : Induction magnétique à 1 m du sol avec la présence d'un pipeline

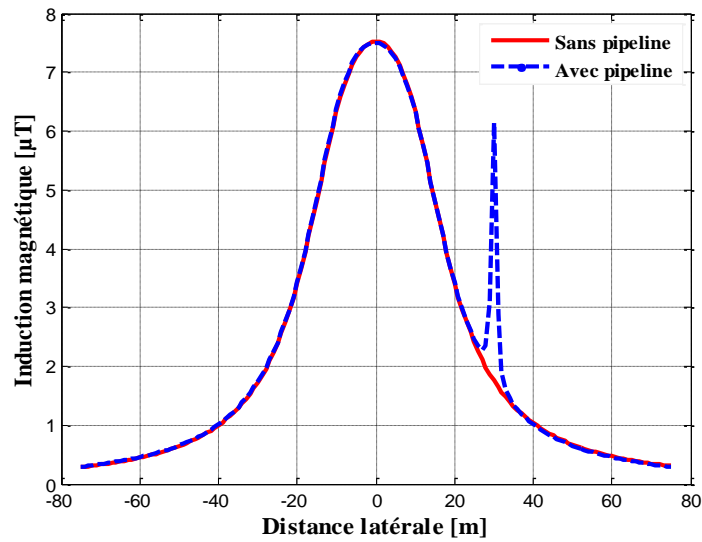


Figure III -4 : Induction magnétique à 1m du sol avec et sans la présence d'un pipeline

L'influence de la présence du pipeline sur la distribution de l'induction magnétique est illustrée par la figure III-3. On constate d'après ce graphe que la présence du pipeline a un effet significatif sur la distribution de l'induction magnétique. En effet l'induction magnétique subit une augmentation considérable à l'endroit où le pipeline est situé.

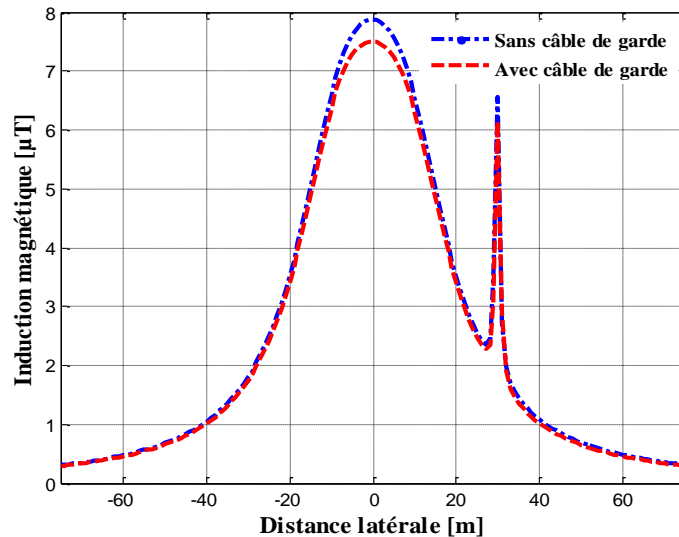


Figure III -5 : Induction magnétique au niveau du pipeline avec et sans la présence des câbles de garde

La figure III-4 montre l'induction magnétique avec et sans la présence d'un pipeline métallique. Cette figure indique que la présence d'un pipeline métallique à proximité de la ligne perturbe la répartition de cette induction magnétique, le profil connaît une distorsion à l'endroit où le pipeline (aérien) est implanté. Le pipeline sera influencé par cette induction magnétique, une tension et un courant prendront naissance aux extrémités de ce pipeline.

La figure III-5 décrit la variation du profil de l'induction du champ magnétique au niveau du pipeline, avec et sans l'effet des câbles de garde. Le calcul s'est fait à 1m du sol, en prenant en compte l'influence des courants induits dans les des câbles de garde. On constate que la présence des câbles de garde cause une légère diminution de l'induction magnétique au voisinage de la ligne et au niveau du pipeline.

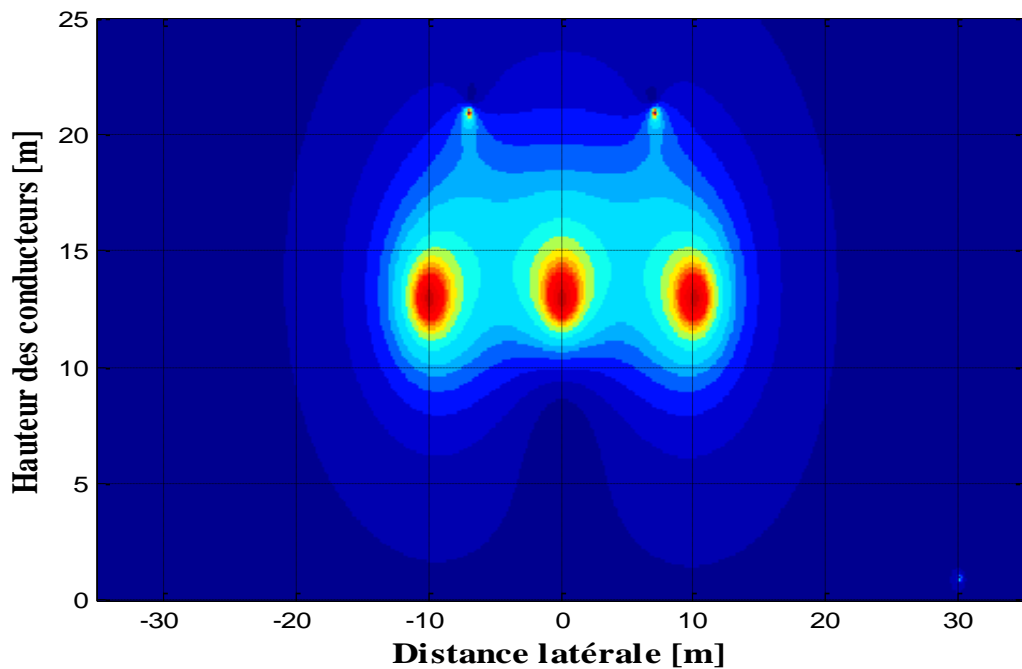


Figure III -6 : Visualisation de l'induction magnétique créée par le système : Ligne triphasée 275 kV - pipeline métallique (coupe transversale)

La figure III-6 illustre la cartographie de l'induction magnétique obtenue, dans un plan d'observation défini par la hauteur des conducteurs et les côtés latéraux de la ligne triphasée haute tension. La variation des niveaux du champ magnétique est due à la variation des points d'observation au dessus du sol, les points où l'induction magnétique est calculée. Cette figure montre la concentration de l'induction magnétique autour des conducteurs de phase, le niveau du

champ magnétique diminue de façon progressive lorsqu'on s'éloigne de la ligne.

III.2.2 Cas du parallélisme parfait entre la ligne aérienne HT et le pipeline

III. 2.2.1. La tension induite dans un pipeline aérien isolé

La tension induite dans un pipeline au dessus du sol pour un parallélisme parfait, peut être calculé en utilisant les concepts de Garson décrits dans le chapitre précédent. Elles seront appliquées à la configuration de la ligne présentées ci-dessus dans la figure III -1. La longueur exposée du pipeline est $L = 5$ km. Le sol est supposé homogène avec une résistivité de $100 \Omega.m$.

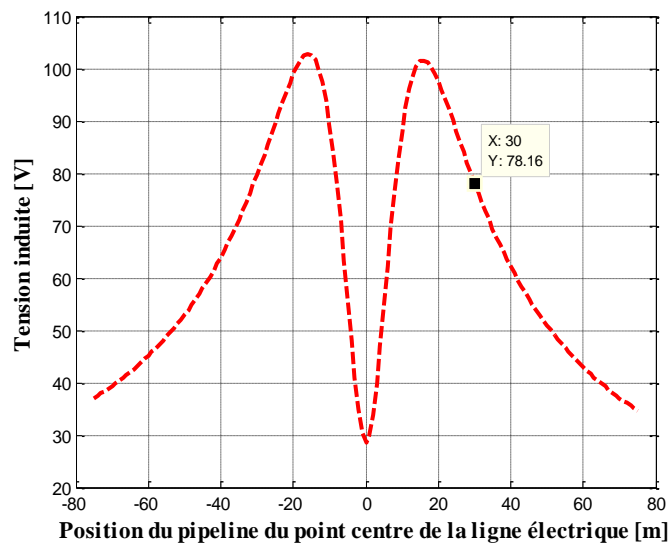


Figure III -7: Profil latéral de la tension induite due au couplage inductif dans un pipeline aérien

La tension induite due au couplage inductif est représenté sur la figure III-7. On remarque que la tension induite est pratiquement négligeable au niveau du centre de la ligne de transmission ($x=0$) et maximum à une distance de séparation égale à 16 m. Puis elle décroît progressivement à mesure que l'on s'éloigne du centre du couloir de droit de passage. Dans notre cas d'étude, la valeur de la tension induite obtenue au cours de la simulation est 78.16 V, cette valeur est supérieure à la valeur limite recommandée par la norme internationale de CIGRE.

La tension induite le long de la portée longitudinale est représentée à la figure III-8. La valeur de la tension induite calculée est $V_{ind} = 78.16$ V. Elle reste constante le long de la longueur d'exposition parallèle entre la ligne HT et le pipeline métallique aérien.

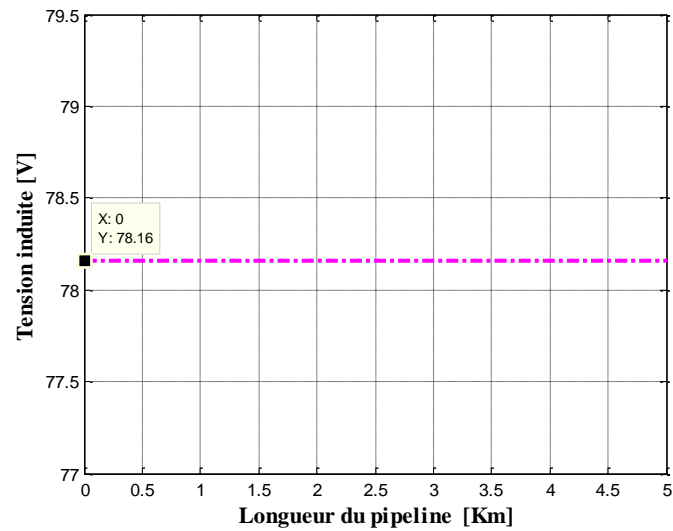


Figure III -8 : Profil longitudinal de la tension induite due au couplage inductif dans un pipeline aérien

III.3. L'effet des différents paramètres sur l'induction magnétique et la tension induite :

III. 3.1. Effet de de la hauteur des conducteurs des phases sur l'induction magnétique

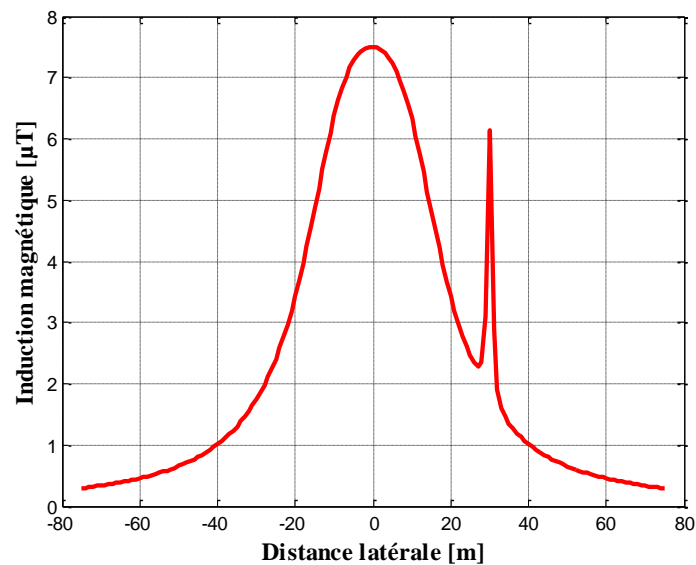


Figure III -9 : Induction magnétique au niveau du pipeline avec une hauteur des conducteurs $h=13$ m

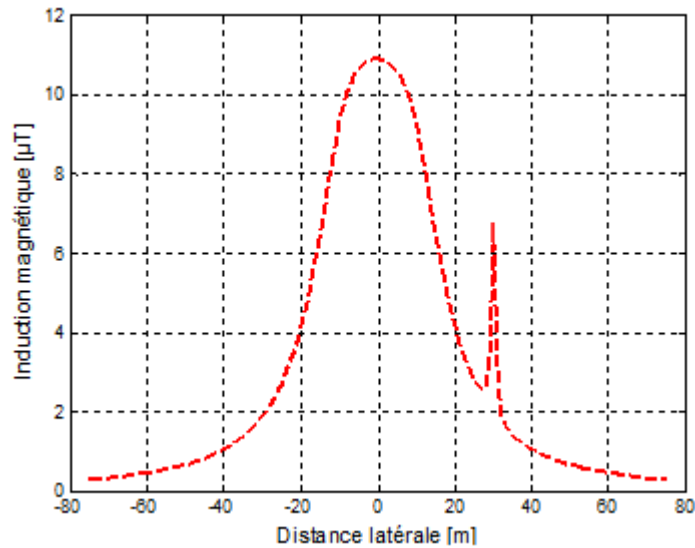


Figure III -10: Induction magnétique au niveau du pipeline avec une hauteur des conducteurs $h=10$ m

Le niveau de l'induction magnétique au niveau du pipeline dépend directement à la hauteur des conducteurs de phase de la ligne électrique à partir du sol, comme s'est représentée aux figures III-9 et III-10. En effet l'induction magnétique sur la canalisation est inversement proportionnellement avec la hauteur des conducteurs des phases, si on diminue la hauteur des conducteurs à partir du sol, l'induction magnétique augmente.

III. 3.2. Effet de la distance de séparation entre les phases sur l'induction magnétique

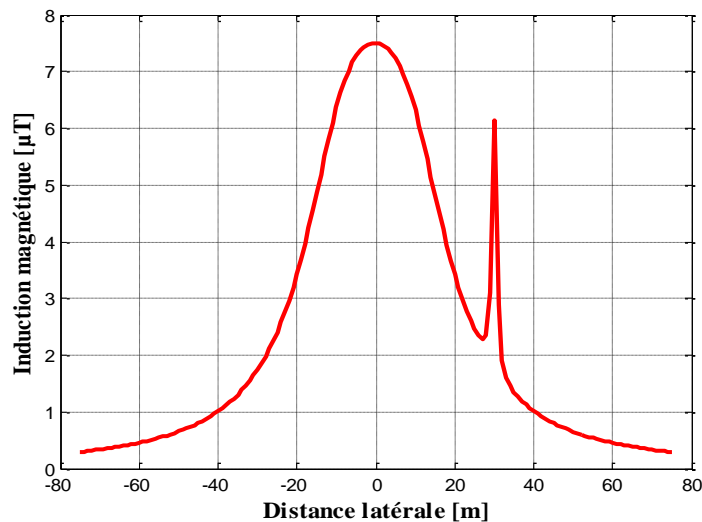


Figure III -11: Induction magnétique au niveau du pipeline avec une distance de séparation entre les phases $D=10$ m

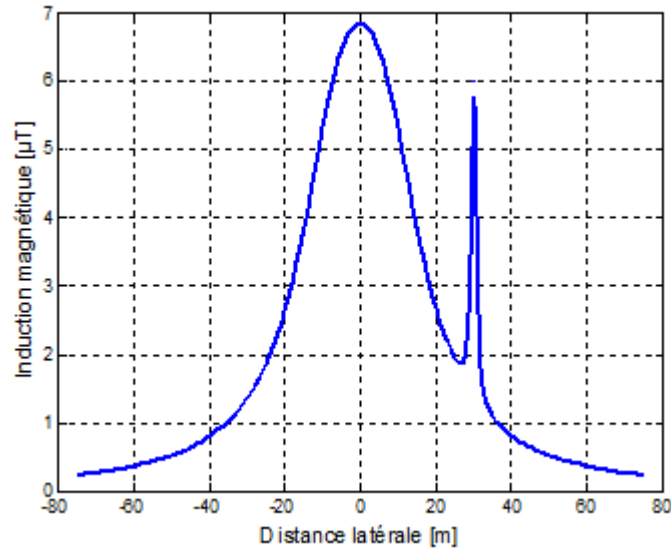


Figure III -12: Induction magnétique au niveau du pipeline avec une distance de séparation entre les phases $D=8$ m

La figure III-11 et III-12 présente les résultats de simulation de la variation de l'induction magnétique de la ligne à 1 m du sol en fonction de la distance de séparation entre les conducteurs de phase. Comme montré dans ces figures, l'augmentation de la distance de séparation entre les phases provoque une diminution de l'induction magnétique.

III. 3.3. Effet du courant sur l'intensité de l'induction magnétique

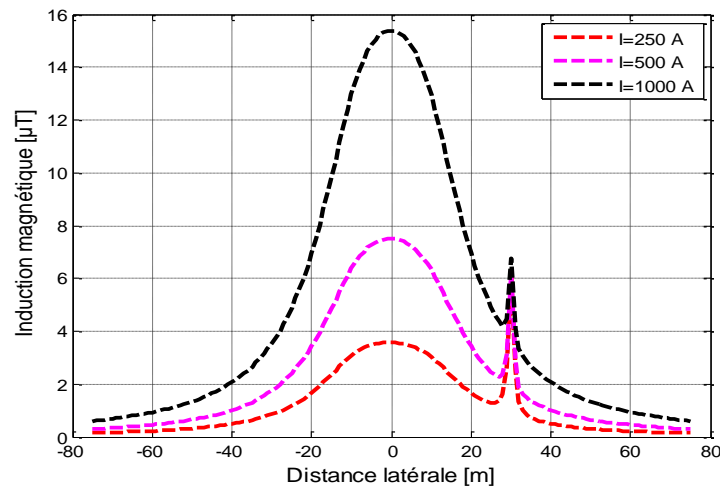


Figure III -13: Profil du champ magnétique à 1m du sol pour une ligne HT en fonction de plusieurs valeurs de courant de phase

La figure (III-13) montre la distribution latérale de l'induction magnétique à 1m de hauteur au-dessus du sol pour les trois valeurs de courant. Les valeurs maximales du champ magnétique pour ces valeurs de courant sont respectivement, 3.5, 7.5, 15.5 μT . Il ressort clairement de cette figure que le champ magnétique dépend directement du niveau de courant, plus le courant de la ligne est grande, plus l'induction magnétique est intense.

III. 3.4. Effet du câble de garde sur la tension induite

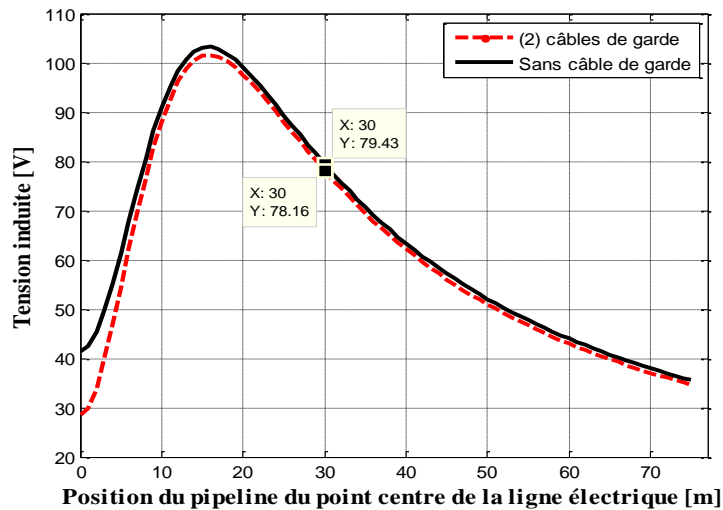


Figure III -14: L'effet du câble de garde sur la distribution de la tension induite

La figure III-14 illustre la variation de la tension induite avec et sans câble de garde dans le circuit électrique. On peut voir sur cette figure que la présence d'un câble de garde n'a pas d'influence significative sur la valeur de la tension induite, en raison de son emplacement au-dessus des conducteurs de phase. Le câble de garde permet de réduire légèrement la tension induite dans le pipeline de 1 à 2%.

III. 3.5. Effet de la résistivité du sol sur la tension induite

La figure III-15 montre l'effet de la résistivité du sol sur la tension induite sur la surface du pipeline. On remarque que la variation de la résistivité du sol ne semble pas avoir un effet significatif sur la tension induite.

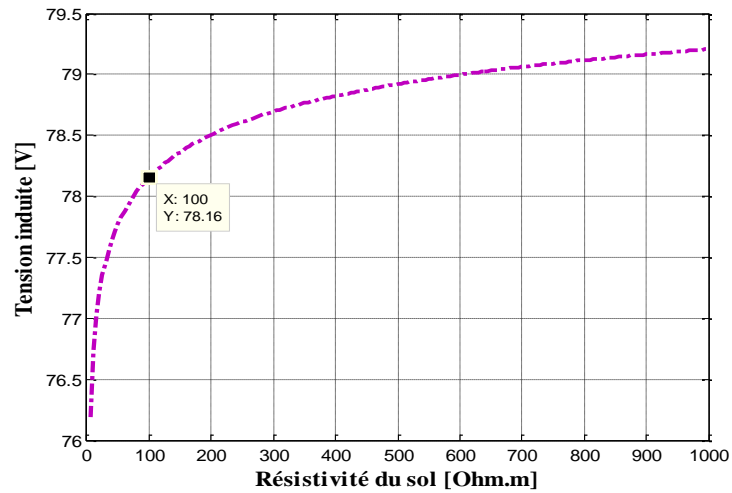


Figure III -15: L'effet de la résistivité du sol sur la distribution de la tension induite

III. 3.6. Effet de la longueur du parallélisme sur la tension induite

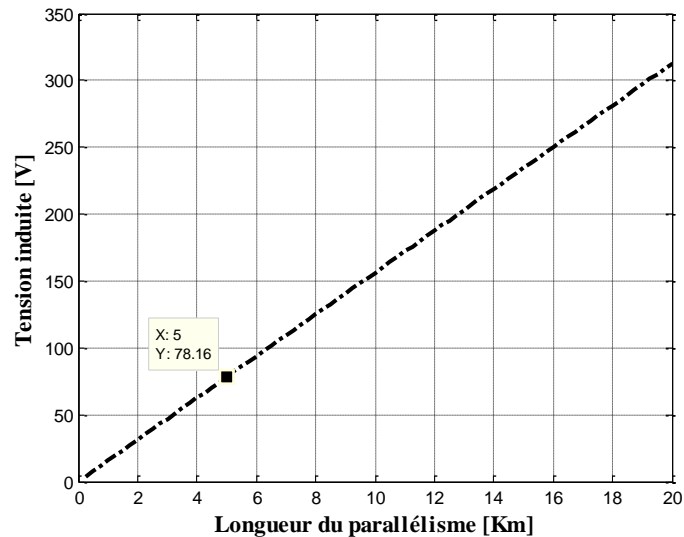


Figure III -16: L'effet de la longueur du parallélisme sur la distribution de la tension induite

Le niveau de la tension induite dépend de la longueur du pipeline exposé à la ligne électrique, comme s'est représentée à la figure III-16. En effet la tension induite sur la canalisation augmente proportionnellement avec la longueur d'exposition parallèle.

III.4. Application de l'atténuation

Pour atténuer la tension induite due à couplage magnétique, une technique de sécurité doit être prise pour maintenir la tension induite à la limite recommandée $V=50$ V. L'installation des conducteurs shunt de mise à la terre avec le pipeline permet l'écoulement du courant à la terre le long de la section du pipeline. La figure III -17 , montre la valeur de la résistance de l'électrode en fonction de la distance de séparation du pipeline. La résistance de mise à la terre diminue jusqu'à une valeur minimale puis augmente pour atteindre une valeur maximale. Pour un intervalle de distance de séparation allant de 0 à 5 m, le pipeline ne nécessite pas une résistance de mise à la terre car la tension induite obtenue est en-dessous du seuil de sécurité.

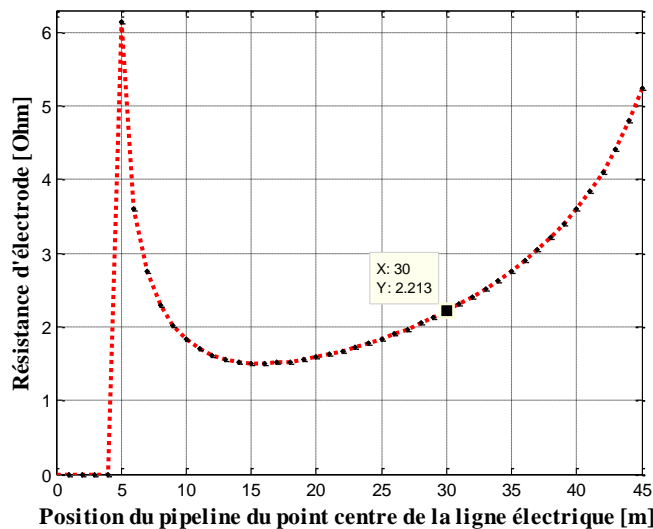


Figure III -17 : Résistance de l'électrode de terre du pipeline

La figure III-18 montre la tension induite au niveau de l'électrode. Afin d'obtenir une tension induite de sécurité, il est nécessaire d'installer une résistance de terre de valeur égale à 2,213 (Ω) à chaque extrémité du pipeline.

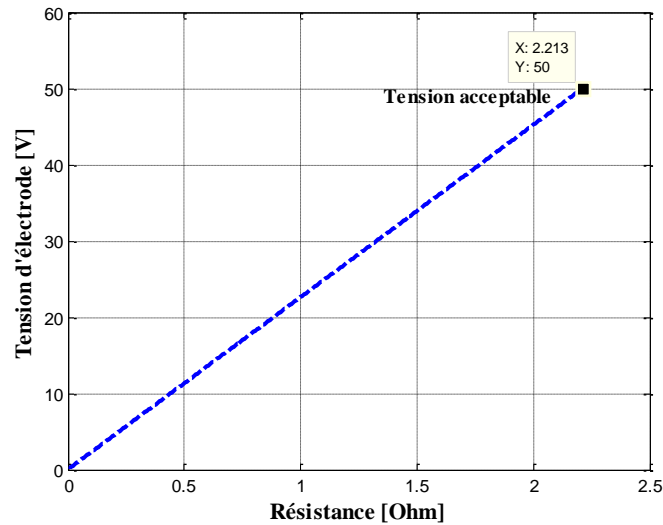


Figure III -18 : Tension de l'électrode

III.5. Comparaison des résultats de simulation avec la littérature

Nous voulons effectuer une comparaison des résultats de simulation obtenus par notre programme de calcul avec ceux obtenus dans la littérature, en se basant sur une autre méthode et les travaux présentés dans le guide CIGRE, pour valider notre programme de calcul.

La méthode de la boucle passive des conducteurs exposée dans le paragraphe II.6 est utilisée pour calculer la force électromotrice induite par l'induction magnétique dans le pipeline. Nous présentons dans la figure III-19, la comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes.

On observe que les valeurs maximums calculées avec la méthode de Carson sont quasiment identiques à ceux obtenus avec la méthode de la boucle passive.

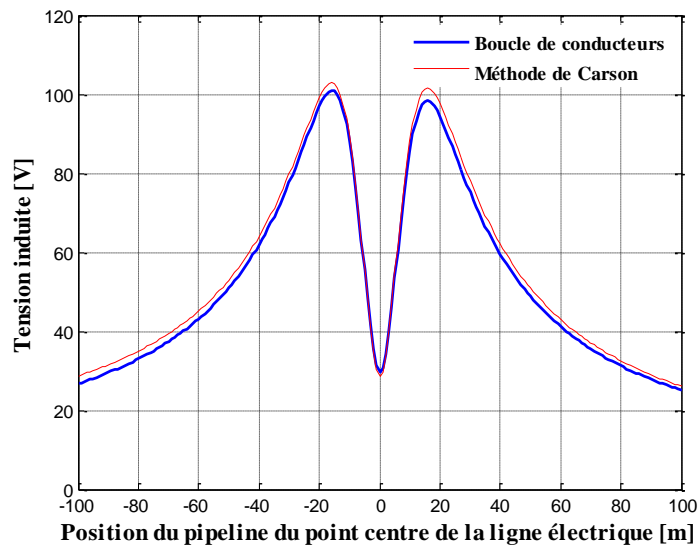


Figure III -19: Comparaison des profils de la tension induite entre les deux méthodes de calcul

III.6. Conclusion

Ce chapitre présente une série d'analyses appliquée à l'évaluation de l'interférence entre des lignes de transmission électrique et les pipelines métalliques. Pour le couplage inductif, l'induction du champ magnétique au niveau du pipeline a été déterminée, en utilisant une méthode de simulation (Matlab). Les tensions induites sur un pipeline aérien ont été calculées pour le cas d'un parallélisme parfait, aussi les différents facteurs qui influencent cette tension ont été présentés :

- la présence et l'absence des câbles de garde
- la résistivité du sol
- la longueur de parallélisme

Et les facteurs qui influencent sur l'induction magnétique ont été présentés :

- la hauteur des conducteurs de phases à partir du sol
- la distance de séparation entre les conducteurs de phases
- l'intensité de courant portée par la phase

Les résultats de notre étude indiquent que La présence de pipeline à proximité d'une ligne à haute tension provoquent des effets électromagnétiques peuvent introduire des tensions importantes sur les pipelines.

Le pipeline est un bon conducteur d'électricité, Sous l'influence d'un champ magnétique, les charges électriques déposées sur la surface de métal subissent un mouvement de va-et-vient au même rythme que la fréquence de la tension électrique, ce champ produit donc une densité du courant induit dans le pipeline.

Ces tensions et courants provoquent le risque de corrosion alors de réduire la durée de vie de pipeline. Une méthode d'atténuation qui peut réduire efficacement ce type d'interférence à des niveaux acceptables a été discutée. Un système de mise à la terre appropriée connecté au pipeline est considéré comme une approche très efficace pou réduire les interférences inductives.

Les tensions résultats calculées pour ce cas ont été comparées avec les résultats rapportées dans la littérature, un très bon accord a été obtenu. La comparaison de ces résultats a permis de valider cettomodélisation.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les lignes électriques assurent la fonction "transport de l'énergie" sur les longues distances, leur rôle est donc de transporter l'énergie électrique en un site de la production vers les consommateurs.

Le partage des passages communs entre les lignes aériennes de transport d'électricité et les pipelines métalliques de transport de gaz et d'hydrocarbure est assez commun. Des interférences électromagnétiques sont produites par les lignes électriques à très haute tension dans les pipelines métalliques, en condition normale d'exploitation et en condition de défaut. Cependant, l'énergie électrique peut être transférée à partir de ces lignes aux pipelines par le mécanisme de couplage des perturbations électromagnétiques inductif.

Des tensions induites et courant peuvent apparaître sur le pipeline métallique. Ces grandeurs induites peuvent représenter un risque de choc électrique pour le personnel d'entretien et le public; ils peuvent aussi menacer le revêtement et l'acier du pipeline, les équipements électriques associés au pipeline, liés à la protection cathodique, au système de surveillance et de comptage, et peuvent provoquer la corrosion des pipelines métalliques.

Cette étude a permis d'établir des procédures de calcul détaillées concernant les aspects de compatibilité électromagnétique liées aux interférences électromagnétiques (inductives) entre les lignes de transport électrique HT et les pipelines métalliques.

Pour l'analyse du couplage inductif, un programme de calcul basé sur la loi d'Ampère combiné avec la méthode des images à été développé pour le calcul de l'induction du champ magnétique à proximité d'un pipeline métallique. Il est observé que la présence d'un objet métallique notamment les pipelines cause une distorsion des lignes du champ et modifie leur intensité.

Une modélisation électromagnétique basée sur la méthode de Carson du couplage inductif entre les pipelines métalliques et les lignes de transmission est établie, pour un parallélisme parfait et pour une zone d'influence constituée par des parallélismes, des rapprochements obliques et des croisements. Les résultats obtenus montrent que pour un pipeline qui se trouve au-dessus du sol, la tension induite relevée dépasse la limite admissible. Son intensité dépend de plusieurs facteurs tels que la longueur de parallélisme, la résistivité du sol et la présence des câbles de garde.

Conclusion générale

Et l'intensité d'induction magnétique dépend des facteurs tels que la hauteur des conducteurs des phases et la distance de séparation entre les phases et l'intensité de courant de ligne.

D'où la nécessité de prévoir l'installation d'un système d'atténuation composé des conducteurs shunt de mise à la terre avec le pipeline permet l'écoulement du courant à la terre le long de la section du pipeline afin de maintenir la valeur de la tension à des valeurs raisonnables admissibles selon les normes internationales.

Perspectives

Ce travail de base pourra être élargi à d'autres études résumées comme suit :

- Le cas où plusieurs pipelines aériens sont présents ainsi que plusieurs lignes électriques hautes tensions doivent être pris en compte.
- Le cas d'un pipeline enterré au voisinage où des lignes électriques haute tension doit être étudié.

Bibliographie

- [1] Nekrouf. A, Sebbagh. W : Calcul des courants induits Dans les objets placés au voisinage des lignes Haute Tension. PFE, Université Djilali liabbes de SBA, 2002.
- [2] Nicolas FAURE: modélisation électromagnétique en présence d'espace application l'étude de tubes électronique de types magnétron, thèse de doctorat, université de limoges, 2006.
- [3] P. Krempf : Précis Electromagnétisme, MP, Cours Méthodes Exercices résolus, Bréal 2004..
- [4] Fred Gardiol: électromagnétisme volume 3, presses polytechnique et universitaires romandes Lausanne, 1994.
- [5] Dhanistha Panyasak : Réduction de l'émission électromagnétique des circuits intégrés : l'alternative asynchrone, thèse doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2004.
- [6] S. Demarty Contribution à l'étude électromagnétique théorique et expérimentale des cartes de circuit imprimé, thèse doctorat, université de limoges, Thèse N° 40-2006.
- [7] Samuel Akue Boulingui : Etude du couplage électromagnétique entre circuits intégrés par émulation du perturbateur - Application en téléphonie 3G, thèse doctorat, l'Université de Toulouse, 2009.
- [8] Redouane Tahmi : Contribution à l'Etude des Perturbations Electromagnétiques des Convertisseurs de l'Electronique de Puissance, Ecole Nationale Polytechnique, ENP, Thèse de Doctorat d'Etat ,2006.
- [9] Emmanuel Batista: Nouvelles Structures Electroniques pour le Transport Electrique, Impacts des nouvelles contraintes d'intégration sur les interférences électromagnétiques et moyens de prévision de la Compatibilité Electromagnétique, thèse doctorat, l'Université de Toulouse, 2009.
- [10] CEECOR, Comité d'étude de la corrosion et de la protection des canalisations , Corrosion par courant alternatif sur les canalisations cathodiquement protégées ,Recommandations pour l'évaluation des risques et mesures de remediation, 2001.
- [11] M.Ouadah,M.Zergoug Influences dues aux lignes aeriennes de transport d'energie sur les pipelines enterres problèmes et solutions, 3 ème Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Matériaux et Alliages (IC-WNDT-MI'12).
- [12] B. J. al-gahtani , Electromagnetic interference caused by a high voltage
-

transmission network on buried pipeline and communication cables, King Fahd University of Petroleum & Minerals, 2009.

[13] Djekidel Rabah, Mahi djillali, Calculation and analysis of inductive coupling effects for HV transmission Lines on aerial pipelines, University of Amar Telidji of Laghouat, 2014.

[14] p. Dairyland Electrical industrie isolate, Fiche technique des tapis de controle de gradient, 2010..

[15] Dr Michel Plante, Le réseau électrique et la santé, les champs électrique et magnétique, HydroQuébec, 2011.

[16] J. R. Daconti, Electrical risks in transmission line-Pipeline shared rights of way, Powertechnology, Newsletter issue 96, 2004.

[17] K. Amel, Memoire magister : synthèse et applications a l'inhibition de la corrosion acide des aciers, Octobre 2011.

[18] BELAID. S Analyse de la fiabilité de l'acier API 5L X60 Pour pipelines corrodés Modèle basé sur le critère B31G, mémoire de magister, université Tlemcen 2008..

[19] Djekidel.Rabah : Contribution à la modélisation des perturbations électromagnétiques générées par une ligne électrique haute tension sur un pipeline , Thèse de doctorat, université ammar thelidji laghouat, 2015.

[20] CIGRE: Guide Concerning Influence of High Voltage AC Power Systems on metallic Pipelines, CIGRE Working group 36.02 1995.

[21] Abhishek Gupta : A Study on High Voltage AC Power Transmission Line Electric and Magnetic Field Coupling with Nearby Metallic Pipelines, Master of Science (Engineering), Faculty of Engineering, Indian Institute of Science Bangalore- August 2006, India.

[22] Nasser D. Tleis: Power Systems Modeling and Fault Analysis. Theory and Practice, Elsevier First published 2008.

[23] CIGRE WG 36-01, Electric and magnetic fields produced by transmission systems. Description of phenomena - practical guide for calculation, Paris 1980.

[24] :A.Bendaoud, M.Brahmi.« Calcul du champ magnétique engendré par les réseaux de transport d'énergie électrique » SNGE'99-BISKRA-1999

[25] Jordi-Roger Riba Ruiz, Antonio Garcia Espinosa, Magnetic field generated by

sagging conductors of overhead power lines, Computer Applications in Engineering Education, MAY 2009.

[26] a. Taflove, J.Dabkowski: Mutual Design Considerations for Overhead AC Transmission Lines and Gas Transmission Pipelines, Final Report EPRI EL-904,AGA Cat No. L51278, IIT Research Institute, Chicago, IL Sept 1978.

[27] Thierry Debu, Lignes aériennes, paramètres électrique, Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique. D 4435.

[28] Transmission Line Reference Book. 345kV and Above (UHV) Second Edition.Electric Power Research Institute, 34 12. Hillview, Palo Alto, California.

[29] Australian New Zealand Standard 4853:2000: Electrical Hazards on Metallic Pipelines, Standards Australia, Standards New Zealand.

[30] The Ceacor Booklet: AC corrosion on cathodically protected pipelines, Guidelines for risk assessment and measure, Proc. of 5th Int. Congress Ceacor, Brussels, May 2000.

[31] A. Hellany, M. Nassereddine, M. N. Nagrial: Analysis of the impact of the OHEW under full load and fault current, international journal of energy and environment, Volume 1, Issue 4, 2010 pp.727-736, Australia.

[32] Kenichi Yamazaki, Tadashi Kawamoto, Hideo Fujinami: Requirements for Power Line Magnetic Field Mitigation Using a Passive Loop Conductor, IEEE transactions on power delivery, Vol. 15, No. 2, April 2000.

[33] Redy Mardiana , Majid Poshtan: mitigation of magnetic fields near transmission lines using a passive loop conductor, Conference Publications ,GCC Conference and Exhibition (GCC), 2011 IEEE, Abu Dhabi, United Arab emirates

[34] Pedro Cruz Romero, Jesús Riquelme Santos, Juan Carlos del Pino López, Antonio de la Villa Jaén, José Luis Martínez Ramos: A comparative Analysis of Passive Loop-Based Magnetic Field Mitigation of Overhead Lines, IEEE transactions on power delivery, vol. 22, no. 3, july 2007.

[35] Pierre Fayet : Modélisation des réseaux électriques ferroviaires alimentés en courant alternatif, thèse doctorat, l'école centrale de Lyon, No d'ordre N° D'ORDRE : 2008.

[36] Nehal youghourta : Diagnostic de la corrosion due à l'interférence électromagnétique entre les lignes HT et les pipelines enterrés, these master, Ecole Nationale Polytechnique (ENP) ,2015.
