

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Telidji - Laghouat



Faculté de Technologie

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Electrotechnique

Présentée et soutenue publiquement

Le 11/06/ 2015

RABAH Djekidel

THEME

**Contribution à la modélisation des perturbations électromagnétiques
générées par une ligne électrique haute tension sur un pipeline**

JURY:

Monsieur ZEGNINI Boubakeur	Président du jury	Professeur	Université Amar Telidji -Laghouat
Monsieur MAHI Djillali	Rapporteur	Professeur	Université Amar Telidji -Laghouat
Monsieur OUCHAR Ali	Co-Rapporteur	Professeur	Université Amar Telidji -Laghouat
Monsieur AZZEDDINE Hamid	Examineur	Professeur	Université USTO - MB- Oran
Monsieur BOUKEZZI Larbi	Examineur	Professeur	Université Ziane Achour- Djelfa
Monsieur HADJADJ A Chafik	Examineur	MCA	Université Amar Telidji -Laghouat
Madame CHETTIH Saliha	Examineur	MCA	Université Amar Telidji -Laghouat

ملخص:

في الوقت الحاضر أصبح التداخل الكهرومغناطيسي مزعجا بشكل متزايد للعديد من مجالات الأنشطة الصناعية بما في ذلك المعدات الكهربائية و هذا ما يمكن أن يسبب آثار غير مرغوب فيها خطيرة على سلامة الأشخاص والممتلكات. العمل الحالي يخص التداخلات الكهرومغناطيسية بسبب خطوط نقل الطاقة الكهربائية ذات الجهد العالي على خطوط الأنابيب المعدنية لنقل النفط والغاز. تعتمد الدراسة على نموذج لنظام خط الجهد العالي- خط الأنابيب باستخدام طرق المحاكاة التمثيل بالشحنات والتيارات مقترنة مع الخوارزمية الجينية وطريقة كارسون. ويهدف هذا النموذج إلى حساب المتغيرات المثلى للجملة الكهربائية المجال الكهربائي والمغناطيسي والجهد المستحث و حساب التيار الكهربائي المار في خط الأنابيب. استخدمت النتائج المتحصل عليها لتحديد نظام تخفيف الآثار السلبية الكهربائية التي يجب تطبيقه. تم التحقق من صحة برامج الحساب المنجزة بمقارنة نتائج المحاكاة مع تلك الموجودة في المنشورات السابقة.

عبارات هامة : خطوط نقل الطاقة الكهربائية العالية، خط الأنابيب، الاقتران السعوي والحثي ، المجال الكهربائي ، طريقة التمثيل بالشحنات ، الخوارزميات الجينية، طريقة التمثيل بالتيارات، طريقة كارسون، التوترات الفولتية، التيار الحثي ، التلطيف.

Résumé :

De nos jours, la perturbation électromagnétique devient de plus en plus gênante pour des nombreux domaines d'activités industrielles notamment sur les équipements électriques. Ce qui peut avoir des conséquences dangereuses pour la sécurité des personnes et des biens.

Le travail mené concerne les interférences dues aux lignes de transport d'énergie électrique HT sur les conduites métalliques de transport d'hydrocarbures.

L'étude est basée sur une modélisation du système ligne HT-Pipeline, utilisant la méthode de simulation des charges et la méthode de simulation de courants combinées avec l'algorithme génétique ainsi que la méthode de Carson. Cette modélisation vise à calculer les paramètres optimaux du système, le champ électrique et magnétique ainsi que la tension induite et le courant de contact avec le pipeline. Les résultats obtenus ont permis de déterminer un système d'atténuation des effets électriques indésirables qu'il faut mettre en place. Les programmes de calcul développés ont été validés par comparaison avec des résultats issus de la littérature.

Mots clés : lignes de transport HT, pipeline, couplages inductif et capacitif, champ électrique, champ magnétique, méthode de simulation des charges, méthode de simulation des courants, algorithmes génétiques, méthode de Carson, tension induite, courant induit, atténuation.

Abstract:

Nowadays, the electromagnetic interference becomes increasingly troublesome for many fields of industrial activities including electrical equipment. This can have dangerous consequences for the safety of persons and property. The present work carried out concerning interference due to HV transmission power lines on metal pipelines for transporting hydrocarbons. The study is based on a modeling of the HV power lines -Pipeline system using the charge simulation method and the simulation method currents combined with the genetic algorithm and the method of Carson. This modeling aims is to determine the optimal parameters of the system, the electric and magnetic field and the induced voltage and current on the pipeline. The obtained results were used to determine a mitigation system for adverse electrical effects that must be in place. Developed calculation programs have been validated by comparison with results from the literature.

Key word: HV power transmission, pipeline, inductive and capacitive coupling, electric field, charge simulation method, genetic algorithms, current simulation method, Carson method, induced voltage, induced current, mitigation.

Remerciements

Je remercie le dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force et la puissance pour suivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés

Ce travail a été réalisé au laboratoire d'Etude et Développement des Matériaux Semi-conducteurs et Diélectriques, Université Amar Telidji de Laghouat.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur Mahi Djilali, Professeur à l'université Amar Thelidji de Laghouat, directeur du laboratoire d' Etude et Développement des Matériaux Semi-conducteurs et Diélectriques, Université Amar Telidji de Laghouat pour m'avoir conseillée, encouragée et soutenue tout au long de ce travail avec patience et disponibilité.

Aussi, mes vifs remerciements à mon co-directeur de thèse, Monsieur Ouchar Ali, Professeur à l'université Amar Thelidji de Laghouat pour ses encouragements depuis son acceptation de la co-direction de cette thèse.

J'adresse mes remerciements à Messieurs les membres de Jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail et en particulier Monsieur Zegnini Boubakeur. Professeur à l'UATL-Laghouat et Président du jury, Monsieur Azzeddine Hamid. Professeur à l'USTO-MB-Oran, Monsieur Boukezzi Larbi . Professeur à l'Université Ziane Achour, Djelfa, Monsieur Hadjadj Abdel Chafik. Docteur à l'UATL- Laghouat et Chettih Saliha Docteur à l'UATL-Laghouat. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance et mes respectueuses salutations pour le temps consacré à la lecture de ce document et l'amélioration suggérées.

Je remercie également Monsieur Lefkir, Professeur à l'université Amar Thelidji de Laghouat, pour l'aide qu'il m'a apportée et les conseils qu'il m'a donnés.

Mes gratitudes vont aussi à tous mes enseignants et enseignantes pendant tout mon cursus d'études pour leurs disponibilités et pour le savoir qu'ils m'ont fidèlement transmis.

Enfin, mes sincères remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont apporté leur aide et leur appui pour mener à bien ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :
La mémoire de mes chers défuntes père et mère
Que Dieu ait ces âmes et les accueille en Son Vaste Paradis.
A ma femme pour son soutien et encouragement.
A mes anges, Malak Safa, Ahmed Ayoub, Mohammed Abdel Aziz et
Asia Soujoud, j'ai pris de votre temps pour ce modeste Travail, qu'ils
me pardonnent.

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

CHAPITRE I

Rappels théoriques et Etude bibliographique

I.1. Introduction.....	04
I.2. la formulation de maxwell pour l'électromagnétisme.....	04
I.2.1. Le cas général.....	04
I.2.2. Le cas statique.....	06
I.2.3. Équations de Poisson.....	06
I.2.4. Conditions d interface.....	08
I.2.5. Conditions aux limites.....	08
I.2.5.1. Condition de Dirichlet.....	09
I.2.5.2. Condition de Neumann.....	09
I.2.5.3. Condition mixte Dirichlet - Neumann.....	09
I.3. Champ électromagnétique.....	09
I.3.1. Champ électrique.....	10
I.3.2. Champ magnétique.....	11
I.3.3. Onde électromagnétique.....	11
I.4. Les problèmes de Compatibilité Electromagnétique (CEM).....	13
I.4.1. Définition de la Compatibilité Electromagnétique.....	13
I.4.2. Les perturbations électromagnétiques.....	13
I.4.3. Décomposition d'un problème de Compatibilité Electromagnétique.....	14
I.4.4. Émission et susceptibilité.....	14
I.4.4.1. Emission.....	14
I.4.4.2. Susceptibilité.....	15
I.4.5. Les différents modes de couplage.....	15
I.4.5.1. Le couplage par diaphonie capacitive.....	16
I.4.5.2. Le couplage par diaphonie inductive.....	17
I.4.5.3. Le couplage par impédance commune.....	17
I.4.5.4. Le couplage par champ électrique.....	18
I.4.5.5. Le couplage par champ magnétique.....	18
I.4.6. La Normalisation en CEM.....	19
I.5. Revue des travaux antérieurs sur l'interférence électromagnétique entre les lignes électriques et les pipelines métalliques	21
I.6. Conclusion.....	30

CHAPITRE II

Les interférences électromagnétiques entre les lignes de transport HT et les pipelines métalliques

II.1. Introduction.....	31
II.2. Les perturbations des lignes aériennes HT de transport d'énergie.....	31
II.3. Définition d'un pipeline.....	32
II.4. Type des couplages entre la ligne aérienne HT et le pipeline métallique et les	

risques associés.....	33
II.4.1. Le couplage électrostatique (capacitif)	34
II.4.2. Effets du couplage électrostatique.....	36
II.4.3. Le couplage magnétique (inductif).....	36
II.4.4. Effets du couplage magnétique.....	38
II.4.4.1. Danger pour les personnes en contact avec le pipeline.....	38
II.4.4.2. Danger pour les brides isolantes.....	39
II.4.4.3. Danger pour l'équipement connecté au pipeline.....	39
II.4.5. Le couplage conductif (résistif).....	39
II.4.6. Effets du couplage conductif.....	39
II.4.6.1. Danger pour le personnel de travail.....	39
II.4.6.2. Risque de dommages au revêtement.....	40
II.4.6.3. Risque de dommage au métal.....	40
II.4.6.4. Dommages des brides isolantes.....	41
II.4.6.5. Les dommages aux systèmes de protection cathodique.....	41
II.4.7. Corrosion des pipelines et moyens de protection.....	42
II.4.7.1. La protection passive.....	43
II.4.7.2. La protection cathodique.....	45
II.4.7.2.1. Protection cathodique par anode sacrificielle.....	45
II.4.7.2.2. Protection cathodique par courant imposé.....	45
II.5. Techniques d'atténuation des effets des perturbations électromagnétiques....	47
II.5.1. Distance de séparation entre la ligne électrique de transport et le pipeline.....	47
II.5.2. les mesures appliquées aux lignes électriques de transport.....	47
II.5.2.1. Mise à la terre.....	47
II.5.2.2. Transposition des conducteurs des phases.....	48
II.5.3. Les mesure appliquées aux pipelines.....	48
II.5.3.1. Mise à la terre du pipeline avec des électrodes de terre.....	48
II.5.3.2. La prise de terre localisée.....	50
II.5.3.3. Utilisation de joints isolants.....	50
II.5.3.4. Isolation renforcée du revêtement.....	51
II.5.3.5. Câble de terre parallèle au pipeline.....	51
II.5.3.6. Conducteur de contrôle du gradient.....	52
II.6. Normes de sécurité.....	52
II.7. Conclusion.....	55

CHAPITRE III

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

III.1. Introduction.....	56
III.2. la méthode des charges fictives (méthode de simulation des charges).....	56
III.2.1. Principe de base de la méthode.....	57
III.2.2. Détermination des valeurs des charges de simulation.....	58
III.2.3. Evaluation de la précision.....	58
III.3. Technique des Algorithmes Génétiques.....	59
III.3.1. Introduction.....	59

III.3.2. Algorithmes Génétiques.....	60
III.3.3. Organigramme d'un Algorithme Génétique.....	60
III.3.4. Application de l'algorithme Génétique combiné avec la méthode des charges fictives	61
III.4. Calcul du couplage capacitif entre la ligne HT et le pipeline métallique.....	61
III.4.1. Application de la méthode des charges fictives pour le calcul du champ électrique.....	62
III.4.2. Simplification de la géométrie longitudinale de la ligne électrique HT.....	62
III.4.3. Modélisation de la ligne aérienne HT et le pipeline par les charges fictives.....	64
III.4.4. Calcul du champ électrique au voisinage du système (Ligne HT-pipeline).....	65
III.4.5. Calcul du potentiel électrique induit.....	67
III.4.6. Courant de décharge dans le corps humain en contact avec le pipeline.....	68
III.4.7. Mise en équations du couplage capacitif.....	71
III.5. Cas d'une longueur d'exposition oblique entre la ligne HT et le pipeline métallique	73
III.6. Calcul de la tension induite avec la méthode de la matrice d'admittance.....	75
III.7. Conclusion.....	78

CHAPITRE IV

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

IV.1. Introduction.....	79
IV.2. La zone d'influence entre une ligne aérienne HT et un pipeline métallique....	79
IV.2.1. Le cas simple d'un parallélisme parfait entre la ligne aérienne HT et le pipeline.	79
IV.2.2. Le cas général de voisinage entre la ligne aérienne HT et le pipeline.....	80
IV.3. Calcul du champ magnétique au voisinage du système (Ligne HT-pipeline)..	81
IV.3.1. Méthode de simulation des courants (MSC).....	82
IV.3.2. Calcul des courants induits dans les câbles de garde.....	85
IV.4. Calcul de la force électromotrice longitudinale induite dans le pipeline.....	86
IV.4.1. Calcul des impédances linéiques propres et mutuelles du système électrique....	86
IV.4.2. Force électromotrice induite en condition normale de fonctionnement.....	89
IV.4.3. Force électromotrice induite en cas de défaut de court-circuit.....	92
IV.4.4. Facteur de blindage.....	94
IV.5. Calcul des tensions induites en un pipeline par le couplage inductif.....	96
IV.5.1. La modélisation du système électrique.....	96
IV.5.2. Parfait parallélisme entre la ligne aérienne HT et le pipeline.....	97
IV.5.2.1. Cas d'un pipeline aérien.....	97
IV.5.2.2. Cas d'un pipeline souterrain.....	99
IV.6. Zone d'influence formée par les parallélismes, les rapprochements, les passages.....	106
IV.7. Caractéristiques électriques des pipelines métalliques.....	110
IV.7.1. Impédance longitudinale (série) avec retour par le sol.....	111
IV.7.2. Admittance transversale (shunt) du pipeline.....	112
IV.8. Validation de la tension induite du couplage inductif.....	113

IV.9. Conclusion.....	115
CHAPITRE V	
Analyse et interprétation des résultats	
V.1. Introduction.....	116
V.2. Analyse du couplage capacitif.....	116
V.2.1. Calcul du champ électrique.....	116
V.2.1.1. Application des algorithmes GA pour l'optimisation des paramètres.....	117
V.2.1.2. Analyse du champ électrique en présence d'un pipeline métallique.....	120
V.2.1.3. L'effet de différents paramètres sur le champ électrique.....	122
V.2.1.3.1. Effet de la distance de séparation du pipeline.....	122
V.2.1.3.2. Effet du rayon du pipeline.....	122
V.2.1.3.3. Effet de la hauteur du pipeline.....	123
V.2.1.3.4. Effet du câble de garde.....	124
V.2.1.3.5. Influence de la configuration géométrique du circuit.....	124
V.2.3. La tension induite dans le pipeline.....	126
V.2.4. Courant induit dans le corps humain en contact avec le pipeline.....	127
V.2.5. La technique d'atténuation.....	127
V.2.6. Calcul de la tension induite dans le cas complexe.....	129
V.2.7. Comparaison des résultats du couplage capacitif avec la littérature.....	132
V.3. Analyse du couplage inductif.....	134
V.3.1. Calcul du champ magnétique au niveau du pipeline.....	134
V.3.1.1. Application des algorithmes génétiques pour l'optimisation des paramètres.....	134
V.3.1.2. Analyse du champ magnétique en présence d'un pipeline métallique.....	137
V.3.2. Cas du parallélisme parfait entre la ligne aérienne HT et le pipeline.....	139
V.3.2.1. La tension induite dans un pipeline aérien isolé.....	139
V.3.2.2. L'effet de différents paramètres sur la tension induite.....	141
V.3.2.2.1. Effet du câble de garde.....	141
V.3.2.2.2. Effet de la résistivité du sol.....	142
V.3.2.2.3. Effet de la longueur de parallélisme sur la tension induite.....	142
V.3.2.3. Application de l'atténuation.....	142
V.3.2.4. La tension induite dans un pipeline enterré- les différents cas discutés.....	143
V.3.3. Le cas général de voisinage.....	149
V.3.3.1. Condition normale de fonctionnement.....	151
V.3.3.2. Défaut à l'extrémité de la zone d'influence.....	158
V.3.3.3. Défaut à l'intérieur de la zone d'influence.....	160
V.3.3.4. Atténuation de la tension induite.....	161
V.3.3.5. Comparaison des résultats de simulation avec la littérature.....	163
V.4. Conclusion.....	168
Conclusion générale.....	169
Annexe A.....	172
Annexe B.....	173
Annexe C.....	179
Bibliographie.....	182

Liste des figures

- Figure I-1:** Interface entre deux milieux différents
- Figure I-2:** Champ électromagnétique
- Figure I-3:** Effet d'un champ électrique E sur un fil
- Figure I-4:** Effet d'un champ magnétique H sur une boucle
- Figure I-5:** Représentation schématique d'une onde électromagnétique.
- Figure I-6:** Décomposition d'un problème de CEM
- Figure I-7:** Classement des différents niveaux de perturbations électromagnétiques
- Figure I-8:** Illustration des modes de couplage entre deux appareils
- Figure I-9:** Principe du couplage par diaphonie capacitive
- Figure I-10:** Principe du couplage par diaphonie inductive
- Figure I-11:** Principe du couplage par impédance commune
- Figure I-12:** Principe du couplage par champ électrique
- Figure I-13:** Principe du couplage par champ magnétique
-
- Figure II-1:** Champ électrique (à gauche) et magnétique (à droite) produit par une ligne électrique
- Figure II-2:** Illustration d'une coupe transversale d'un pipeline
- Figure II-3:** Présence d'une canalisation métallique de transport d'hydrocarbures dans un couloir de passage d'une ligne électrique à haute tension
- Figure II-4:** Le couplage capacitif entre la ligne HT et le pipeline métallique
- Figure II-5:** Schéma simplifié d'un couplage capacitif
- Figure II-6:** le couplage inductif entre la ligne HT et le pipeline métallique
- Figure II-7:** L'induction électromagnétique dans un pipeline métallique
- Figure II-8:** Le couplage conductif entre la ligne HT et le pipeline métallique
- Figure II-9:** Mécanismes et effets d'interférence sur le pipeline
- Figure II-10:** Création d'un courant alternatif induit dans une canalisation parallèle à une ligne à haute tension
- Figure II-11:** Corrosion d'un pipeline situé à proximité des lignes de transport d'énergie a haute tension
- Figure II-12:** La protection passive par revêtement
- Figure II-13:** Revêtement d'un pipeline de tube PP (Polypropylène) tri-couche
- Figure II-14:** Schéma simplifié de protection cathodique par anode sacrificielle
- Figure II-15:** Schéma simplifié de protection cathodique par générateur de courant
- Figure II-16:** Transposition d'une ligne électrique de transport
- Figure II-17:** Circuit équivalent d'un pipeline enterré en interférence avec une ligne électrique à haute tension
- Figure II-18:** Utilisation des joints isolants
- Figure II-19:** Joint isolant à brides
- Figure II-20:** Utilisation du conducteur de contrôle du gradient
- Figure II-21:** Tension de pas
- Figure II-22:** Tension de contact
-
- Figure III-1:** Organigramme de calcul utilisant la méthode de simulation des charges
-

- Figure III-2:** Illustration du couplage capacitif entre une ligne aérienne et un pipeline
- Figure III-3:** Les dimensions d'une ligne électrique aérienne.
- Figure III-4:** Distribution des charges dans un conducteur et un pipeline
- Figure III-5:** Faisceau de conducteurs
- Figure III-6:** Illustration d'un conducteur électrique et son image
- Figure III-7:** Circuit équivalent de calcul du courant dans un corps humain entrant en contact avec un pipeline
- Figure III-8:** Technique d'atténuation: mise à la terre du pipeline pour la sécurité personnelle
- Figure III-9:** Couplages possibles entre la ligne électrique et le pipeline, (a) exposition parallèle, (b) exposition oblique, (c) exposition croisée
- Figure III-10:** Conversion des expositions non parallèles à des expositions parallèles entre une ligne électrique et un pipeline
- Figure III-11:** Détermination des coefficients de potentiel d'une ligne électrique
-
- Figure IV-1:** Illustration d'une exposition parallèle entre une ligne aérienne et un pipeline
- Figure IV-2:** Exemple de subdivision d'une zone d'influence en sections
- Figure IV-3:** Considération des différents passages pipeline – ligne HT
- Figure IV-4:** Composantes normale et tangentielle du champ magnétique
- Figure IV-5:** Induction magnétique créée par un conducteur parcouru par un courant en un point d'observation $P(x, y)$
- Figure IV-6:** Organigramme de calcul utilisant la Méthode de simulation des courants
- Figure IV-7:** Configuration d'une ligne triphasée HT en nappe horizontale avec un pipeline
- Figure IV-8:** Distances équivalentes entre les conducteurs, le sol et le pipeline
- Figure IV-9:** Induction sur un pipeline dans des conditions normales de fonctionnement
- Figure IV-10:** Exemple de variation du courant perturbateur avec la distance à la source (pour une ligne alimentée par une extrémité seulement)
- Figure IV-11:** Variation du courant perturbateur le long d'une ligne alimentée par les deux extrémités
- Figure IV-12:** Induction sur un pipeline sous condition de défaut
- Figure IV-13:** Représentation du circuit équivalent entre le pipeline et le sol
- Figure IV-14:** Mise à la terre du pipeline par électrodes de terre
- Figure IV-15:** Evolution de la tension le long d'un pipeline qui s'étendant au-delà de la zone d'influence
- Figure IV-16:** Evolution de la tension lorsque le pipeline s'étend au-delà de zone d'influence dans une seule direction
- Figure IV-17:** Evolution de la tension lorsque le pipeline est mis à la terre à une extrémité
- Figure IV-18 :** Organigramme illustrant le principe de l'algorithme proposé pour le couplage inductif
- Figure IV-19:** Zone d'influence : pipeline – ligne HT
- Figure IV-20:** Circuit électrique équivalent en π
- Figure IV-21:** Représentation du circuit équivalent pipeline-sol
- Figure IV-22:** Tension induite dans le pipeline par le couplage inductif
-
- Figure V-1:** Géométrie d'une ligne triphasée en nappe horizontale parallèle avec un pipeline

- Figure V-2:** Convergence de la fonction objective (FO) de l'algorithme
- Figure V-3:** Convergence de l'algorithme vers les solutions optimales du nombre des charges de simulation
- Figure V-4:** Convergence de l'algorithme vers les solutions optimales des valeurs des rayons fictifs
- Figure V-5:** Profil transversal du champ électrique à 1 mètre au-dessus du sol avec et sans la présence d'un pipeline métallique
- Figure V-6:** Profil transversal du champ électrique au niveau du sol avec et sans la présence d'un pipeline métallique
- Figure V-7:** Visualisation du champ électrique crée par le système : Ligne triphasée 400 kV - pipeline métallique (coupe transversale)
- Figure V-8:** L'effet de la position horizontale du pipeline sur la distribution du champ électrique
- Figure V-9:** L'effet du rayon du pipeline sur la distribution du champ électrique
- Figure V-10:** L'effet de la hauteur du pipeline sur la distribution du champ électrique
- Figure V-11:** L'effet du câble de garde sur la distribution du champ électrique
- Figure V-12:** Représentation géométrique des différentes configurations d'une ligne électrique.
(a) nappe horizontale, (b) nappe verticale, (c) triangle, (d) triangle inverse
- Figure V-13:** Profil transversal du champ électrique pour différentes configuration à simple circuit
- Figure V-14:** Tension induite sur le pipeline pour la configuration en nappe horizontale
- Figure V-15:** Tension induite sur le pipeline pour différentes configurations de phase
- Figure V-16:** Le courant induit par couplage capacitif pour la configuration en nappe horizontale
- Figure V-17:** Profil de la résistance de mise à la terre du pipeline en fonction de sa position horizontale
- Figure V-18:** Cas de voisinage complexe entre une ligne électrique HT et un pipeline métallique aérien
- Figure V-19:** Profil longitudinal de la tension induite du pipeline aérien : Cas complexe
- Figure V-20:** Représentation en 3-D de la tension induite le long du pipeline aérien : Cas complexe
- Figure V-21:** Comparaison des résultats du potentiel électrique induit pour les deux méthodes de calcul
- Figure V-22:** Disposition en nappe horizontale d'une ligne électrique THT de 750 kV avec un pipeline au voisinage
- Figure V-23:** Comparaison des profils de la tension induite et du courant entre le programme de calcul et la littérature [30]
- Figure V-24:** Configuration horizontale d'une ligne électrique avec un pipeline aérien
- Figure V-25:** Convergence de la fonction objective (FO) de l'algorithme
- Figure V-26:** Convergence de l'algorithme vers les solutions optimales du nombre des filaments de courant
- Figure V-27 :** Convergence de l'algorithme vers les solutions optimales des positions des filaments de courant
- Figure V-28:** Induction magnétique à 1m du sol avec et sans la présence d'un pipeline métallique
- Figure V-29:** Induction magnétique au niveau du pipeline avec et sans la présence des câbles de garde
- Figure V-30 :** Visualisation de l'induction magnétique créée par le système : Ligne triphasée 275

kV - pipeline métallique (coupe transversale)

Figure V-31: Profil transversal de la tension induite dans un pipeline aérien

Figure V-32: Profil longitudinale de la tension induite dans un pipeline aérien

Figure V-33: L'effet du câble de garde sur la distribution de la tension induite

Figure V-34: L'effet de la résistivité du sol sur la distribution de la tension

Figure V-35: L'effet de la longueur de parallélisme sur la distribution de la tension induite

Figure V-36: Résistance de l'électrode de terre du pipeline

Figure V-37: Tension de l'électrode

Figure V-38: Profil longitudinale de la tension induite dans un pipeline enterré : Cas (a)

Figure V-39: Le courant induit le long du pipeline : Cas (a)

Figure V-40 : Profil transversal de la tension induite dans un pipeline enterré : Cas (a)

Figure V-41: Représentation en 3-D de la tension induite dans un pipeline enterré : Cas (a)

Figure V-42: Représentation en 3-D du courant induit le long du pipeline enterré: Cas (a)

Figure V-43: Profil longitudinale de la tension induite dans un pipeline enterré : Cas (b)

Figure V-44: Le courant induit le long du pipeline enterré: Cas (b)

Figure V-45: Profil longitudinale de la tension induite dans un pipeline enterré : Cas (c)

Figure V-46: Le courant induit le long du pipeline enterré : Cas (c)

Figure V-47: Zone d'influence pour le cas complexe : Ligne HT- Pipeline

Figure V-48: Tension induite dans un pipeline en cas de fonctionnement normal : revêtement bitumineux

Figure V-49: Représentation en 3-D de la tension induite le long du pipeline enterré en cas de fonctionnement normal : revêtement bitumineux

Figure V-50: Courant induit le long du pipeline en cas de fonctionnement normal : revêtement bitumineux

Figure V-51: Tension induite dans un pipeline en cas de fonctionnement normal pour les trois types de revêtements

Figure V-52 : Courant le long du pipeline en cas de fonctionnement normal pour les trois types de revêtements

Figure V-53: Variation des valeurs maximales de la tension en fonction de l'épaisseur du revêtement

Figure V-54: Variation des valeurs maximales des courants en fonction de l'épaisseur du revêtement

Figure V-55: Variation tridimensionnelle (3D) des valeurs maximales des tensions induites

Figure V-56: Variation tridimensionnelle (3D) des valeurs maximales des courants induits

Figure V-57: Variation de l'admittance transversale en fonction de l'épaisseur du revêtement

Figure V-58: Les valeurs de l'impédance longitudinale en fonction de l'épaisseur du revêtement

Figure V-59: Tension induite dans un pipeline en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence pour les trois types de revêtements

Figure V-60: Le courant le long du pipeline en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence pour les trois types de revêtements

Figure V-61: Tension induite dans un pipeline en cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence pour les trois types de revêtements

Figure V-62: Courant induit le long du pipeline en cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence

- Figure V-63:** Installation des résistances de mise à la terre aux différents nœuds le long du pipeline
- Figure V-64:** Effet de la résistance de terre sur la tension induite dans le pipeline en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence: revêtement en polyéthylène
- Figure V-65:** Effet de la résistance de terre sur la tension induite dans le pipeline en cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence : revêtement en polyéthylène
- Figure V-66:** Comparaison des profils de la tension induite entre les deux méthodes de calcul
- Figure V-67:** Configuration verticale d'une ligne électrique de 400 kV
- Figure V-68:** La zone d'influence pour le cas complexe : Ligne HT- Pipeline
- Figure V-69:** Comparaison des profils de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de fonctionnement normal pour les deux types de revêtement
- Figure V-70:** Comparaison des profils de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence : revêtement en bitume
- Figure V-71:** Comparaison des profils du courant le long du pipeline entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence : revêtement en polyéthylène
- Figure V-72:** Comparaison des profils de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence (revêtement en polyéthylène)
- Figure V-73:** Comparaison des profils de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence : revêtement en bitume
- Figure V-74:** Comparaison des profils de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence : revêtement en polyéthylène

Liste des tableaux

Tableau IV.1: Résistance de revêtement des pipelines

Tableau V.1 : Les paramètres des méthodes AG et MCF

Tableau V.2 : Résultats de l'application des algorithmes Génétique (AG)

Tableau V.3: Comparaison des valeurs du champ électrique perturbé sous la ligne HT en nappe horizontale avec et sans les câbles de garde

Tableau V.4 : Résultats du champ électrique pour les différentes configurations d'une ligne aérienne

Tableau V.5 : Dimensions des sections de la zone d'influence : ligne HT- pipeline

Tableau V.6 : Valeurs des résistances de mise à la terre du pipeline suivant le courant admissible

Tableau V.7 : Résultats de la tension induite pour les deux procédés de calcul

Tableau V.8 : Les paramètres des méthodes AG et MSC

Tableau V.9 : Résultats de l'application des algorithmes Génétique (AG)

Tableau V.10 : Coordonnées des tronçons de la zone d'influence

Tableau V.11 : Les paramètres des revêtements des pipelines utilisés dans la simulation

Tableau V.12 : Comparaison des valeurs de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de fonctionnement normal pour les deux types de revêtements

Tableau V.13 : Comparaison des valeurs de la tension induite et du courant entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence pour les deux types de revêtements

Tableau V.14 : Comparaison des valeurs de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence pour les deux types de revêtements

Liste de symbole

<i>Symbole</i>	<i>Grandeur</i>
<i>CEM</i>	<i>Champ électromagnétique</i>
<i>BF</i>	<i>basses fréquences</i>
<i>HF</i>	<i>hautes fréquences</i>
<i>CEM</i>	<i>Compatibilité Electromagnétique</i>
<i>Div</i>	<i>Divergence</i>
<i>M.D.F</i>	<i>Méthode des Différences Finies</i>
<i>M.E.F</i>	<i>Méthode des Éléments Finis</i>
<i>M.S.C</i>	<i>méthode de simulation des Charge</i>
<i>rot</i>	<i>Rotationnel</i>
<i>grad</i>	<i>Gradient</i>
<i>lap</i>	<i>Laplacien</i>
<i>CHESF</i>	<i>São Francisco's Hydroelectric Company</i>
<i>AGA</i>	<i>American Gas Association</i>
<i>ECCAPP</i>	<i>Electromagnetic and Conductive Coupling Analysis from Power lines to Pipelines</i>
<i>CIGRE</i>	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
<i>AS / NZS 4853:2000</i>	<i>Norme en Australie et en Nouvelle-Zélande</i>
<i>CDEGS</i>	<i>Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis</i>
<i>EMTP</i>	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
<i>ATP – LCC</i>	<i>Alternative Transient Program- Lines/Cables</i>
<i>HT</i>	<i>haute tension</i>
<i>THT</i>	<i>très haute tension</i>
<i>ANN</i>	<i>réseau neurones artificiels</i>
<i>TRI</i>	<i>Triade Réseau Italie</i>
<i>ROW</i>	<i>Right-of-way</i>
<i>PE</i>	<i>Polyéthylène</i>
<i>AG</i>	<i>Algorithme Génétique</i>
<i>IEM</i>	<i>interférences électromagnétiques</i>
<i>CCM</i>	<i>conventional circuit method</i>
<i>TLM</i>	<i>Théorie de la ligne de transmission</i>

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Nul ne peut dénier à l'électricité son rôle et son apport dans le développement de l'humanité depuis la découverte de l'électrification. En effet, grâce aux efforts continus des chercheurs, l'électricité a facilité et amélioré énormément le quotidien de l'homme. Mais ce développement n'a pas été sans inconvénients, même si l'énergie électrique est réputée être une énergie "propre". L'utilisation simultanée de plusieurs équipements électriques a vite montré l'existence de désagréments. On s'est rendu compte que la promiscuité de ces équipements engendrait des interactions mutuelles qui n'existent que lors de leur fonctionnement! Ce sont donc les grandeurs électriques circulant dans ces équipements qui provoqueraient ces interactions. C'est une véritable perturbation de nature électromagnétique mais de cause électrique qui est produite par ces équipements lors de leur fonctionnement.

De nos jours, la perturbation électromagnétique devient de plus en plus très gênante pour des nombreux domaines d'activités industrielles et sur les équipements électriques. Chaque système électrique et/ou électronique peut provoquer sur l'environnement des perturbations de nature électromagnétique susceptibles de générer un dysfonctionnement d'un système et avoir des conséquences dangereuses pour la sécurité des personnes et des biens. Cela pose un problème de coexistence et, donc, de compatibilité, entre ces équipements.

Aujourd'hui, il est nécessaire d'effectuer une étude électromagnétique des équipements lors de leur conception théorique. Ainsi, on peut diminuer leur pouvoir perturbateur et augmenter leur résistance, ou susceptibilité, aux perturbations avant la mise en œuvre des équipements. La compatibilité électromagnétique (CEM) étant une discipline touchant à tout ce qui se rapproche de l'électricité, elle est définie dans les normes européennes [1] comme étant «l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement». C'est-à-dire chaque système doit fonctionner sans perturber son environnement électromagnétique ni être lui-même affecté. Un système « électromagnétiquement compatible » respecte les critères suivants [1] :

- Il ne produit aucune interférence avec d'autres systèmes
- Il n'est pas susceptible aux émissions d'autres systèmes
- Il ne produit aucune interférence avec lui-même.

Si nous nous intéressons à l'environnement électromagnétique d'un équipement, nous pouvons distinguer les sources de perturbations d'origine naturelle (foudre, décharges électrostatiques, rayonnements cosmiques,...) et les sources de perturbations d'origine artificielle qui tiennent à l'activité humaine (émetteurs radio, TV, radars, équipements électriques,...).

Parmi les sources des équipements électriques de perturbation d'origine artificielle, nous pouvons citer les lignes de transport d'énergie électrique qui est une source de perturbation involontaire .

Les lignes aériennes à haute tension sont les composants principaux des grands réseaux de transport d'électricité. Elles transportent l'énergie par l'intermédiaire de l'électricité de la centrale électrique au consommateur. Ces lignes sont considérées comme l'une des principales sources de champ électromagnétique en basses fréquences. Le cas d'interférence électromagnétique entre les lignes de transport d'électricité à haute tension et les pipelines métalliques de transport de pétrole et de gaz naturel a été un sujet de préoccupation majeur et d'un grand intérêt depuis le début des années 60 principalement pour les raisons suivantes [2].

- Le coût croissant sans cesse de moyens pour la conception technologique des lignes électriques et des pipelines, ainsi que les réglementations environnementales récentes, visant à protéger la nature et la faune, a contraint les divers services publics de partager des corridors communs pour les lignes à haute tension et les pipelines. Par conséquent, les situations où un pipeline est prévu à une distance de près d'une ligne de transport sur plusieurs kilomètres sont devenues très fréquentes.
- L'augmentation rapide de la consommation d'énergie, les besoins des villes et des zones industrielles augmentent, en particulier dans les pays occidentaux, ce qui a conduit à l'adoption des réseaux à des échelons de tension et niveaux de courant de court circuit très élevés, ce qui rend le problème plus aiguë.

La présence d'une ligne à haute tension (HT) parallèle ou à proximité d'un pipeline peut être une source d'influence électrique dangereuse pour ce pipeline. Des interférences électromagnétiques (EMI) entre les systèmes électriques de transport de la haute tension HT et les pipelines métalliques peuvent exister. Ces interférences peuvent être de trois types : capacitif, inductif et conducteur. Chacun de ces phénomènes induit des effets indésirables sur la canalisation à travers leurs grandeurs physiques associées. Ces effets indésirables peuvent représenter un risque de choc électrique pour la sécurité de l'opérateur et le personnel. Elles peuvent aussi menacer l'intégrité de l'équipement de protection cathodique, le revêtement du pipeline et de l'acier. Cette interférence électromagnétique est présente aussi bien dans des conditions de fonctionnement normal ainsi que lors des défauts [1]. En effet, la communauté scientifique doit s'efforcer de trouver de nouvelles solutions qui permettent de limiter et/ou réduire l'impact des différentes sources de couplage électromagnétique sur ces pipelines métalliques.

L'objectif de ce travail de thèse est de contribuer à l'étude des interférences capacitives et inductives des lignes de transport HT à proximité des conduites métalliques de gaz et de pétrole, afin d'assurer la sécurité des opérateurs d'intervention et les équipements connectés au pipeline. Ceci doit être effectué à chaque fois que les lignes électriques aériennes de transport haute tension sont installés dans le voisinage des pipelines et, vice-versa. Il est particulièrement

préoccupant lorsque le pipeline est géré à proximité et parallèlement à la ligne de transport sur des longues distances.

Nous entamons le premier chapitre par une présentation d'une synthèse bibliographique sur les formulations des équations de Maxwell qui gouvernent les distributions des problèmes statiques, ainsi que quelques notions élémentaires de la compatibilité électromagnétique (CEM) suivi d'un bref aperçu des travaux antérieurs portant sur l'étude des couplages des lignes électriques avec les pipelines métalliques installés à proximité.

Dans le deuxième chapitre, on décrit la nature du problème, en détaillant les différents mécanismes de perturbations électromagnétiques qui existent entre les lignes aériennes haute tension et les pipelines métalliques, leurs origines et leurs conséquences ainsi que les techniques de lutte contre ces phénomènes. En outre on rappelle les principales réglementations applicables en la matière.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation du système afin de calculer les interférences dues au couplage capacitif basée sur la méthode de simulation des charges combinée avec l'algorithme génétique afin d'obtenir les paramètres optimaux du système. Cette modélisation vise à calculer le champ électrique (avec et sans la présence du pipeline), les tensions induites et le courant de contact avec le pipeline. Le but étant la mise en place d'un dispositif de sécurité approprié pour atténuer les effets électriques indésirables.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons la modélisation électromagnétique de l'interférence inductive entre les lignes électriques aériennes et les pipelines métalliques aériens et enterrés. Cette étude s'appuie sur une technique hybride de calcul du champ magnétique au niveau du pipeline basé sur la méthode de simulation des courants avec une optimisation à l'aide des algorithmes génétiques. Il est aussi évalué les tensions induites dans les pipelines, les courants induits circulant le long des pipelines, en fonctionnement normal ainsi qu'en défaut 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. Le procédé de modélisation est basé sur les concepts de Carson.

Le cinquième chapitre présente les résultats issus de la simulation numérique réalisée. Ces résultats ont été longuement discutés et analysés.

On s'intéresse dans un premier temps, au couplage capacitif puis au couplage inductif. Les résultats obtenus par les programmes de calcul développés sont comparés avec ceux trouvés dans la littérature.

Nous clôturons ce travail par une conclusion générale permettant de synthétiser les résultats obtenus et d'envisager quelques perspectives.

CHAPITRE I

Rappels théoriques et Étude bibliographique

I.1 Introduction

L'énergie électrique est essentielle à notre qualité de vie, car elle facilite incontestablement notre vie quotidienne. L'énergie électrique est devenue le partenaire indispensable du développement technologique de notre société moderne.

Les chercheurs qui ont étudié l'électricité et développé ses différentes applications, étaient loin de se douter que cette forme d'énergie, réputée propre, ne l'était pas réellement. Comme tout facteur de modernité et de développement, elle n'est pas sans produire des effets secondaires indésirables sur l'environnement. Les victimes de cette pollution, d'origine électrique et de nature électromagnétique, sont les êtres vivants ainsi que les équipements électrique et électronique. Ces équipements, sous l'effet des perturbations électromagnétiques, peuvent avoir un dysfonctionnement d'une, de plusieurs, voire la totalité, de leurs parties ou sous-systèmes. La génération, la propagation et l'influence de cette pollution électromagnétique sont trois facteurs qui font l'objet d'étude et de recherche dans le cadre de ce qu'on appelle la compatibilité électromagnétique ou CEM. La compatibilité électromagnétique est la discipline qui étudie ces perturbations électromagnétiques (sources, causes, moyens de propagation, effets sur l'environnement, protection, etc.....).

L'étude de ces perturbations associe toutes les disciplines scientifiques et techniques. Une perturbation électromagnétique est un phénomène plus ou moins complexe de par ses causes et ses effets; elle est occasionnée par la source qui induira des tensions ou courants parasites dans la "victime".

Nous commencerons ce chapitre par un rappel de la formulation générale des phénomènes physiques en électromagnétisme, la formulation des équations de Maxwell pour l'approximation statique. Nous aborderons ensuite quelques définitions relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM), aux sources de perturbations et aux couplages, et ferons un résumé des travaux antérieurs réalisés par des chercheurs sur l'interférence électromagnétique entre les lignes électriques aériennes (HT) et les pipelines métalliques.

I.2. La formulation de Maxwell pour l'électromagnétisme

I.2.1. Le cas général

Les phénomènes physiques en électromagnétisme, qu'ils soient statiques ou variables dans le temps, sont décrits par un ensemble de quatre équations, connues comme les équations de Maxwell [3], qui lient les phénomènes magnétiques caractérisés par le champ magnétique H et l'induction magnétique B aux phénomènes électriques caractérisés par le champ électrique E et

l'induction électrique D , Cet ensemble des équations écrites sous forme locale, comme le montrent les équations ci-dessous [3].

- Équation de Maxwell Faraday

$$\text{rot.} \vec{E} = - \frac{d \vec{B}}{dt} \quad (\text{I-1})$$

- Équation de Maxwell Flux

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{I-2})$$

- Équation de Maxwell Ampère

$$\text{rot.} \vec{H} = \vec{J} + \frac{d \vec{D}}{dt} \quad (\text{I-3})$$

- Équation de Maxwell Gauss

$$\text{div} \vec{D} = \rho_v \quad (\text{I-4})$$

Où:

\vec{E} : Le champ électrique.

\vec{D} : Densité de flux électrique.

\vec{H} : Intensité du champ magnétique

\vec{B} : Densité de flux magnétique

\vec{J} : Densité de courant.

ρ_v : Densité volumique de charge.

Avec l'équation de Maxwell- Farady (I-1), on voit que les variations temporelles du champ magnétique B sont nécessairement liées à la présence d'un champ électrique E . Cette équation décrit tous les phénomènes d'induction.

L'équation de Maxwell- Flux (I-2), est indépendante des sources, elle indique simplement que le champ d'induction magnétique B est à flux conservatif.

On retrouve le lien entre le champ magnétique et ses sources dans l'équation de Maxwell - Ampère (I-3): la présence d'un champ magnétique B est due à l'existence de courants électriques (densité J) et à la dépendance au temps du champ électrique E .

Avec l'équation de Maxwell-Gauss (I-4), on constate que les charges électriques fixes (densité volumiques) sont sources du champ électrique E .

A l'ensemble des équations de Maxwell, il faut ajouter les équations constitutives qui relient le vecteur du champ (E et/ou H) et la densité de flux correspondante (D et/ou B), le vecteur du champ et la densité de courant (E à J), ces équations sont écrites comme suit (I-5) :

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon \cdot \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \cdot \vec{H} \\ \vec{J} &= \sigma \cdot \vec{E}\end{aligned}\tag{I-5}$$

Où :

μ : Perméabilité magnétique

ϵ : Permittivité diélectrique

σ : Conductivité électrique

I.2.2. Le cas statique

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, donc on obtient deux types de problèmes indépendants: électrostatique et magnétostatique. Dans ce cas, il faut deux équations de Maxwell pour décrire chaque type de champ.

Le champ électrique E apparaît seul dans les équations de maxwell-gauss et maxwell-faraday, tandis que le champ magnétique B ne figure que dans les équations de maxwell-flux et maxwell-ampère [3].

I.2.3. Équation de Poisson

Il en résulte que le rotationnel du champ E est égal à zéro. Comme le rotationnel d'un gradient est toujours identiquement nul, il est possible ici d'identifier le champ E au gradient d'une fonction scalaire V que l'on appelle potentiel. L'équation de maxwell faraday conduit à [3].

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V\tag{I-6}$$

Si on introduit cette expression dans l'équation de maxwell gauss, il vient :

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} = \text{div}(-\overrightarrow{\text{grad}} V) = \frac{\rho}{\epsilon} \Rightarrow \Delta V + \frac{\rho}{\epsilon} = 0\tag{I-7}$$

Le nouvel 'opérateur $\Delta \equiv \text{div} \overrightarrow{\text{grad}}$ est appelé laplacien scalaire.

Cette équation, appelée équation de Poisson du potentiel scalaire électrique. Si aucune charge n'est présente dans le milieu la densité volumique de charge $\rho = 0$.

Avec ces hypothèses, on obtient l'équation de Laplace :

$$\Delta V = 0 \quad (\text{I-8})$$

De manière analogue, sachant que la divergence de l'induction \mathbf{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 :

$$\vec{\mathbf{B}} = \text{rot.} \vec{\mathbf{A}} \quad (\text{I-9})$$

Nous déduisons que l'induction \mathbf{B} dérive de \mathbf{A} que nous appelons le potentiel vecteur magnétique.

L'équation de Maxwell Ampère s'écrit alors :

$$\text{rot.} \text{rot.} \vec{\mathbf{A}} = \mu \vec{\mathbf{J}} \quad (\text{I-10})$$

Soit:

$$\overline{\text{grad div}} \vec{\mathbf{A}} - \Delta \vec{\mathbf{A}} = \mu \vec{\mathbf{J}} \quad (\text{I-11})$$

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

$$\text{div} \vec{\mathbf{A}} = 0 \quad (\text{I-12})$$

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

$$\Delta \vec{\mathbf{A}} + \mu \vec{\mathbf{J}} = 0 \quad (\text{I-13})$$

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

$$\Delta \vec{\mathbf{A}} = 0 \quad (\text{I-14})$$

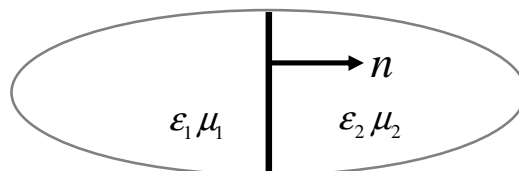


Figure I-1: Interface entre deux milieux différents

I.2.4. Conditions d'interfaces

Lorsqu'on a des milieux différents, on doit imposer certaines conditions de continuité aux champs électrique et magnétique. Ces conditions sont bien connues: à l'interface de deux milieux, respectivement caractérisés par μ_1, ϵ_1 et μ_2, ϵ_2 , comme le montre la Figure I-1 [4, 5].

- Pour les composantes tangentielles des vecteurs des champs E et H. on a:

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \quad (\text{I-15})$$

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \vec{J}_s \quad (\text{I-16})$$

L'équation (I-15) traduit la conservation de la composante tangentielle du champ électrique à la traversée de toute surface, chargée ou non.

L'équation (I-16) montre la condition de passage pour la composante tangentielle du champ magnétique lors de la traversée d'une surface parcourue par des courants. La composante tangentielle du champ magnétique subit alors une discontinuité.

- pour les composantes normales de l'induction magnétique B et du déplacement électrique D:

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \rho_s \quad (\text{I-17})$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \quad (\text{I-18})$$

Où :

n : Le vecteur normal à la surface de séparation entre les deux milieux 1 et 2 ;

J_s : La densité surfacique de courant entre les deux milieux;

ρ_s : La densité surfacique de charge.

L'équation (I-17) traduit la discontinuité de la composante normale du vecteur d'induction électrique D lors de la traversée d'une surface chargée (en présence de charges superficielles ρ_s).

L'équation (I-18) traduit la conservation de la composante normale du vecteur d'induction magnétique B à travers l'interface.

I.2.5. Conditions aux limites

Les conditions aux limites servent en fait à déterminer une solution unique aux équations différentielles précédemment définies. Ces conditions sont principalement de trois types [4, 5]:

I.2.5.1. Condition de Dirichlet

Cette condition nous informe sur la valeur de l'inconnue sur la frontière du domaine de résolution. Elle apparaît souvent sur les axes de symétrie du domaine d'étude, les surfaces des conducteurs, les surfaces équipotentiels, ou les limites infinies du domaine d'étude:

$$A = g_0 \quad (\text{I-19})$$

Où :

A est la fonction inconnue et g_0 représente une constante.

I.2.5.2. Condition de Neumann

Elle nous renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnue sur la limite du domaine à étudier. Elle apparaît aussi souvent sur les plans de symétrie ou les surfaces à flux imposé:

$$\frac{\partial A}{\partial n} = g_0 \quad (\text{I-20})$$

I.2.5.3. Condition mixte Dirichlet - Neumann

C'est une combinaison des deux conditions aux limites de type Dirichlet et Newman qui s'exprime comme suit:

$$a.A + b.\frac{\partial A}{\partial n} = g \quad (\text{I-21})$$

Où :

g est la valeur de l'inconnue sur les frontières, a et b sont les coefficients définis sur le domaine d'étude.

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 électrique et magnétique 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 [6].

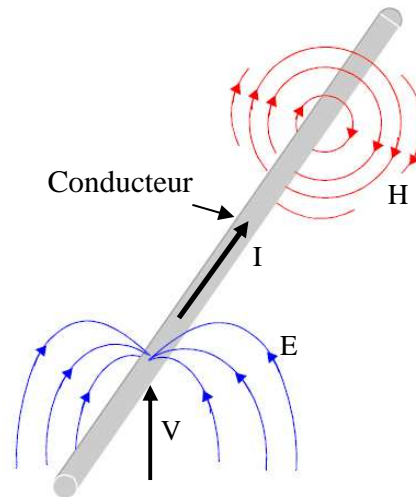


Figure I-2 : Champ électromagnétique

I.3.1. Champ électrique

Quand on porte sous une différence de potentiel un conducteur, il engendre un champ électrique. Le champ électrique est lié à la tension (c'est-à-dire la présence des charges électriques). Plus la tension est élevée, plus le champ qui en résulte est intense. Il survient même si aucun courant électrique ne passe. L'intensité d'un champ électrique s'exprime en Volts par mètre (V/m).

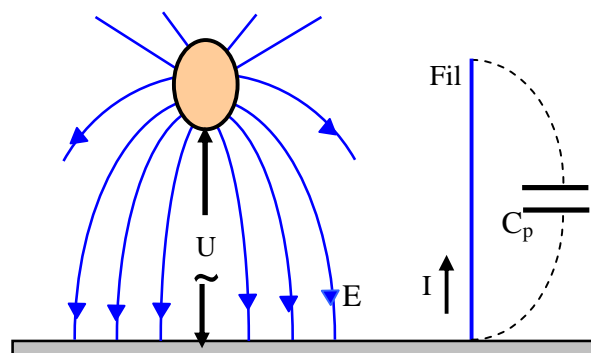


Figure I-3 : Effet d'un champ électrique E sur un fil

Le champ électrique décroît rapidement comme l'inverse du carré de la distance ($1/d^2$) entre le lieu d'émission et le lieu de mesure. L'effet du champ électrique (variable) est d'induire un

courant sur les fils qui sont parallèles aux lignes de champ. Le courant se referme dans la capacité parasite entre le fil et la masse [6].

I.3.2. Champ magnétique

Un conducteur parcouru par un courant i engendre un champ magnétique H . Le champ magnétique est lié au passage du courant (c'est-à-dire le déplacement de charges électriques) à travers le conducteur électrique. Il est d'autant plus intense que le courant est élevé. L'intensité d'un champ magnétique se mesure en ampère par mètre (A/m). Il est plus courant d'utiliser une autre grandeur : l'induction magnétique. Elle s'exprime en Teslas (T). Le champ magnétique diminue également rapidement en fonction du carré de la distance. L'effet du champ magnétique (variable) est d'induire une tension dans les boucles perpendiculaires aux lignes de champ. La tension induite est proportionnelle à la surface de la boucle [6].

I.3.3. Onde électromagnétique

Comme son nom l'indique l'onde électromagnétique est constituée d'une composante électrique et d'une composante magnétique, avec une fréquence très basse, on peut les considérer séparément, mais s'il y a une évolution de tension et de courant dans le temps avec une fréquence non négligeable, ils deviennent indissociables. Un champ électromagnétique (CEM) est le couplage d'un champ électrique et d'un champ magnétique. La figure I-5 illustre un tel phénomène [6].

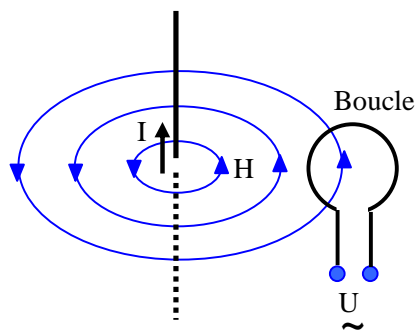


Figure I-4 : Effet d'un champ magnétique H sur une boucle

Les effets respectifs des deux champs sont conjugués. Le champ électromagnétique se propage dans l'environnement (vide) à la vitesse de la lumière (vitesse de CEM dans un matériau). Le conducteur se comporte alors comme une antenne en émettant des ondes électromagnétiques. L'intensité de ce champ est mesurée par la densité de puissance qui s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2) [6].

La caractérisation d'un champ électromagnétique se fait par sa fréquence ou la longueur d'onde de son rayonnement.

La fréquence est le nombre d'oscillations ou de cycles par seconde. La longueur de l'onde électromagnétique émise par le champ électromagnétique est exprimée en mètres. Elle est définie comme le trajet d'une onde après une période d'oscillation T :

$$\lambda = cT = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{I.22})$$

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

ϵ : étant la permittivité absolue

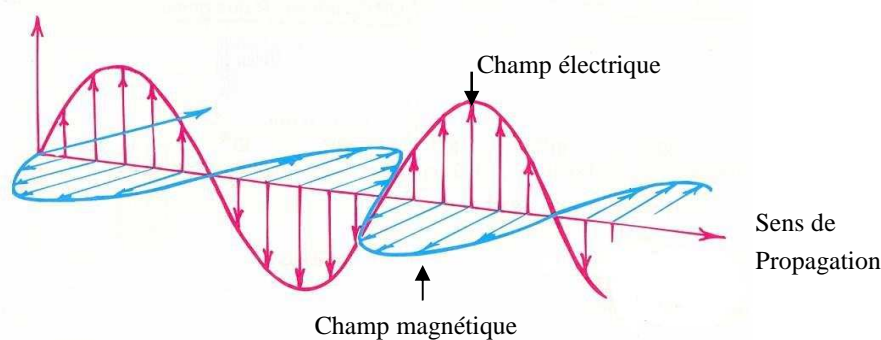


Figure I-5: Représentation schématique d'une onde électromagnétique

Plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est courte et inversement. 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.

$$Z = \frac{\vec{E}}{\vec{H}} \quad (\text{I.23})$$

Un champ électromagnétique produit une force électromagnétique qui s'exerce sur toute particule chargée et qui est la somme de la force électrique produite par le champ électrique et de la force magnétique produite par le champ magnétique.

I.4. Les problèmes de Compatibilité Electromagnétique (CEM)

I.4.1. Définition de la Compatibilité Electromagnétique

La Compatibilité Electromagnétique (CEM) est une discipline scientifique et technique qui permet de lutter contre les perturbations électromagnétiques. Plus précisément ses objectifs sont :

- d'assurer que le rayonnement électromagnétique d'un système électrique n'affecte pas le fonctionnement d'autres dispositifs.
- d'assurer qu'un système dispose d'un niveau d'immunité adéquat vis-à-vis des perturbations électromagnétiques ambiantes. Le système est alors caractérisé par sa « susceptibilité ».

La Communauté Européenne propose la définition suivante pour décrire la compatibilité électromagnétique [1]: c'est « l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques ».

I.4.2. Les perturbations électromagnétiques

Une interférence électromagnétique est la perturbation d'un système par un autre circuit ou phénomène extérieur. Littéralement, l'interférence n'est pas le signal perturbateur lui-même mais le fait qu'il se couple avec un système suffisamment vulnérable pour être affecté. Ainsi, les problèmes de CEM sont traités en termes de sources et de victimes, et en s'interrogeant sur les chemins de couplage [7].

La Communauté Européenne définit de la manière suivante la notion de la perturbation électromagnétique (La norme VEI 161-01-07, Vocabulaire Electrotechnique Internationale) c'est un «phénomène électromagnétique susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil, ou d'un système électrique ou électronique. En outre, elle peut également affecter défavorablement la matière vivante ou inerte. Une perturbation électromagnétique peut être provoquée par un bruit, un signal non désiré ou une modification du milieu de propagation lui-même ». La plupart des équipements électriques et électroniques génèrent des champs électromagnétiques perceptibles dans leur environnement. Le champ électromagnétique crée une véritable pollution qui perturbe parfois le fonctionnement d'autres équipements [8].

Ce champ peut induire des tensions et des courants sur des boucles et des conducteurs électriques. Il peut par ailleurs interférer avec d'autres champs électromagnétiques, se coupler avec un champ électromagnétique de même fréquence. Le système électrique participe à la pollution électromagnétique de son environnement. Ce phénomène est appelé interférence électromagnétique [6].

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-6. 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.

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 [6].

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.

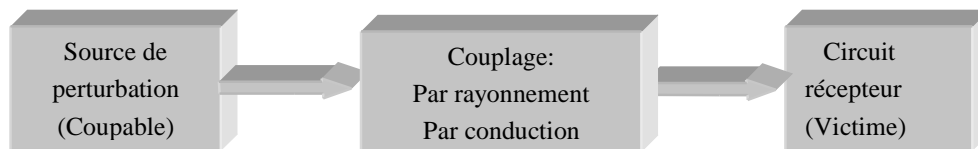


Figure I-6: Décomposition d'un problème de CEM

I.4.4. Émission et susceptibilité

La compatibilité doit être assurée dans sa globalité. Nous devons donc définir deux types de phénomènes :

I.4.4.1. Emission

Les émissions désignent les signaux et les bruits électromagnétiques (volontaires ou non) générés par des systèmes électriques et/ou électroniques dont la propagation est de nature à nuire au bon fonctionnement d'un appareil situé au voisinage. L'émission peut être classé selon son mode de propagation : conduit par un conducteur électrique - émission conduite – ou à travers l'espace - émission rayonnée.

I.4.4.2. Susceptibilité

Aussi appelée l'immunité, la susceptibilité désigne un comportement d'un appareil, en réponse à une contrainte externe, jugée incompatible avec une utilisation normale. Cette contrainte peut être volontaire ou non, naturelle ou artificielle. C'est l'aptitude d'un système électrique à résister aux perturbations électromagnétiques extérieures.

Pour assurer une bonne compatibilité entre les équipements, différents niveaux et différentes marges ont été définis [8] :

- 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-7 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].

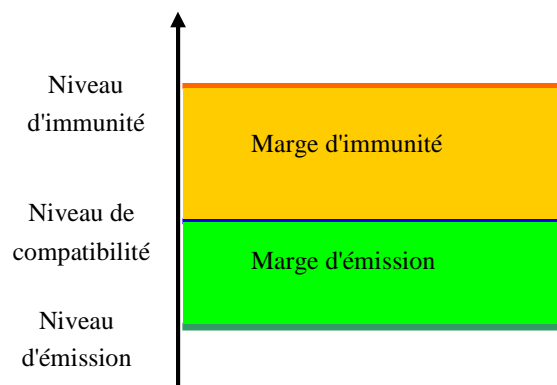


Figure I-7 : Classement des différents niveaux de perturbations électromagnétiques

I.4.5. Les différents modes de couplage

On appelle couplage le processus par lequel l'énergie du perturbateur atteint la victime. Chaque fois que l'on parle de courant, de tension ou de champ, on n'oubliera pas qu'il s'agit de grandeurs électriques variables dans le temps. Le schéma de la figure I-8 illustre les modes de couplage couramment rencontrés : le couplage rayonné et le couplage conduit.

Une perturbation issue d'un appareil 1, considéré comme source de perturbation arrive à un appareil 2, considéré comme la victime de la perturbation en utilisant un mode conduit ou un mode rayonné.

Les couplages en mode conduit, lorsque la perturbation se superpose sur un conducteur de type câble, plan de masse ou carcasse métallique, et les couplages par rayonnement lorsque la perturbation se propage dans l'air ou dans le milieu sous la forme d'un champ électrique E, magnétique H ou électromagnétique. Ces types de couplages dépendent fortement de la fréquence de la source. Par définition, les basses fréquences (BF) induiront des perturbations en mode conduit tandis que les hautes fréquences (HF) induiront des perturbations dites « rayonnées », la frontière entre ces deux mondes reste difficile à fixer [8,9,10].

Les principaux modes de couplage d'une perturbation électromagnétique sont :

- Couplage par diaphonie capacitive,
- Couplage par diaphonie inductive,
- Couplage par impédance commune,
- Couplage par champ électrique,
- Couplage par champ magnétique.

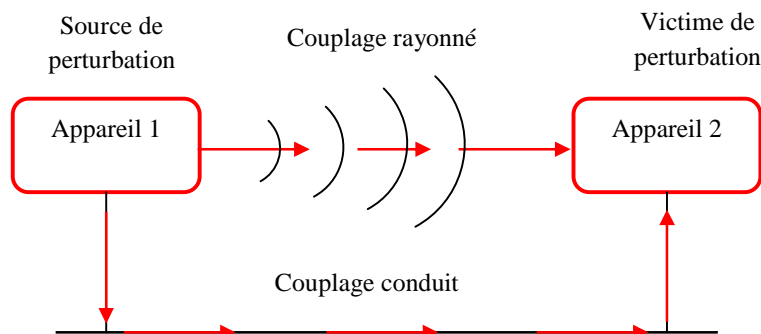


Figure I-8 : Illustration des modes de couplage entre deux appareils

I.4.5.1. Le couplage par diaphonie capacitive

C'est un couplage de type conduit. Dans ce couplage, il existe sur le perturbateur une tension susceptible de produire des perturbations. Il existe aussi une capacité entre ce conducteur source et un autre, qui est la victime. Par cette capacité, de l'énergie électrique perturbatrice atteint la victime. Le circuit perturbateur et le circuit victime étant proches, il existe une capacité entre eux, responsable du couplage. Le couplage est d'autant plus élevé que l'impédance du

circuit victime est grande, du fait du pont diviseur de tension constitué de la capacité et de l'impédance de la victime (Figure I-9) [8,9,10].

Le conducteur victime est porté à un certain potentiel V_P s'il est isolé, soit chargé superficiellement s'il est relié à la terre. L'écoulement des charges vers le sol est lié au courant de charge. Ce courant est proportionnel à la capacité de couplage.

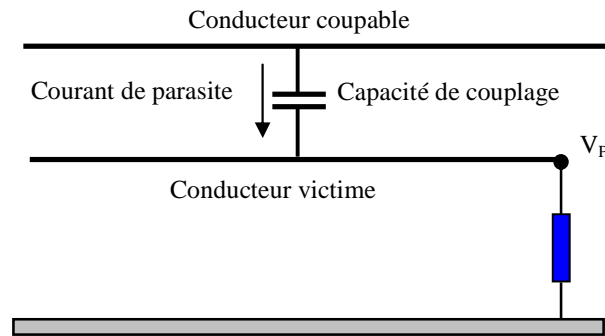


Figure I-9 : Principe du couplage par diaphonie capacitive

I.4.5.2. Le couplage par diaphonie inductive

C'est un couplage de type conduit. Dans ce couplage, il existe dans le circuit perturbateur un courant susceptible de produire des perturbations. À proximité de ce circuit se trouve un circuit victime. Le courant du conducteur du circuit perturbateur produit autour de lui un champ magnétique. La variation du champ magnétique induit un courant parasite dans le circuit victime. A son tour ce courant induit dans ce dernier une tension parasite par la loi de Faraday (équation I-24) (Figure I-10).

$$\text{fém} = \oint_A \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (\text{I.24})$$

Où A est la boucle fermée, fém est la force électromotrice induite exprimée en V, E est le champ électrique en [V/m], et Φ_B est le flux magnétique à travers la surface enfermée dans la boucle. La tension induite est proportionnelle aux courants qui circulent dans les conducteurs et aux longueurs de parallélisme entre les boucles. Plus l'impédance du circuit victime est faible, plus cette tension induit une énergie perturbatrice importante [8,9,10].

I.4.5.3. Le couplage par impédance commune

C'est un couplage de type conduit. Dans ce couplage, le dispositif perturbateur possède une impédance commune avec la victime. Aux bornes de cette impédance commune se trouve une

tension générée par le courant passant dans le perturbateur. La victime subie cette tension parasite car elle est aussi connectée à cette impédance (Figure I-11) [8,9,10].

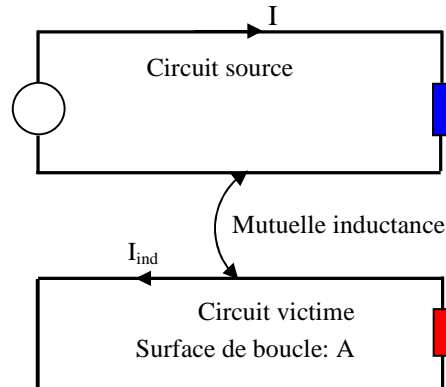


Figure I-10: Principe du couplage par diaphonie inductive

I.4.5.4. Le couplage par champ électrique

C'est un couplage de type rayonné en champ proche. Le couplage par champ électrique est aussi appelé couplage champ à fil. C'est un champ incident qui va produire une perturbation sur un circuit victime. Ce couplage est de même nature que le couplage par diaphonie capacitive ci-dessus, puisque la capacité de couplage amène des lignes de champ sur la victime. La seule différence est que le perturbateur est plus éloigné. Au lieu d'identifier le perturbateur lui-même, on identifie le champ électrique qui en est issu (Figure I-12).

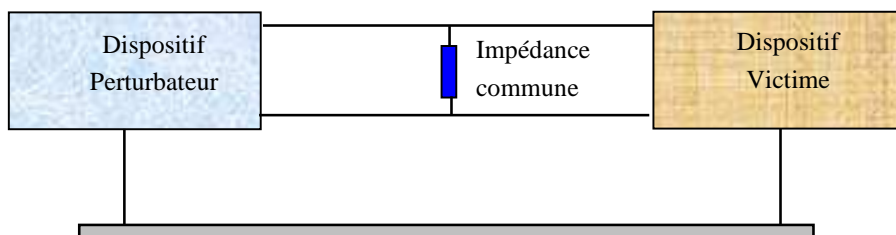


Figure I-11: Principe du couplage par impédance commune

I.4.5.5. Le couplage par champ magnétique

C'est un couplage de type rayonné en champ proche. Il est aussi appelé couplage champ à boucle. Un champ magnétique variable traversant une boucle conductrice y induit une différence de potentiel parasite. Ce couplage est de même nature que le par diaphonie inductive susmentionné

ci-dessus. Au lieu d'identifier le perturbateur lui-même, on identifie le champ magnétique qu'il a généré comme étant la perturbation (Figure I-13).

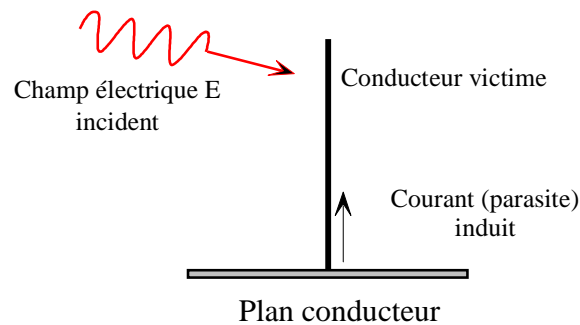


Figure I-12: Principe du couplage par champ électrique

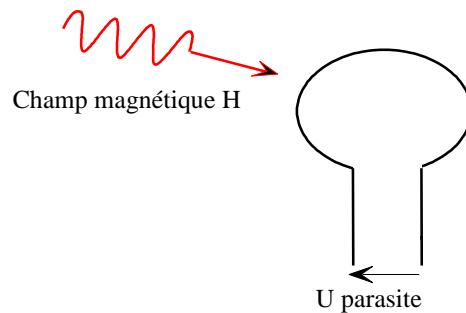


Figure I-13: Principe du couplage par champ magnétique

I.4.6. La Normalisation en CEM

La normalisation est l'ensemble des processus qui permettent de donner à des documents de référence le statut de norme et de les publier comme telles. La normalisation comporte deux phases :

- Une phase technique.
- Une phase de décision par la démonstration de l'existence d'un consensus.

Une fois la conception bien menée, il faut vérifier la qualité des produits finis. Pour ce faire, depuis 1992, tous les appareils doivent être conçus en conformité par rapport à diverses normes fixant les niveaux limites de perturbation pouvant être générées, ainsi que les niveaux minimum de perturbation extérieure devant être supportées sans dysfonctionnement.

Deux principales catégories de normes existent : celles qui définissent les niveaux tolérés d'émission conduite ou rayonnée, et celles qui définissent la susceptibilité électromagnétique d'un

équipement, à savoir sa tolérance aux agressions électromagnétiques. L'objectif principal des normes est de fixer :

- Les niveaux de perturbations devant être supportés sans dysfonctionnement : niveaux d'immunité - susceptibilité.
- Les valeurs maximales des perturbations que peut produire un appareil électrique : niveaux d'émission.
- les conditions de mesure (longueur des câbles, distance des antennes, hauteur, angle, etc..).
- la calibration et le réglage des appareils de mesure utilisés, ceci dans le but d'effectuer des mesures reproductibles et fiables.

À partir du 1er janvier 1996, tout produit électrique mis sur le marché européen doit obligatoirement satisfaire aux exigences des normes CEM d'émission et d'immunité liée à sa catégorie [9].

Au niveau international, l'organisme général de normalisation est l'ISO, mais spécifiquement pour la partie électrique, l'organisme est le CEN (Comité Européen de Normalisation) et pour l'électricité le CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrique). Son équivalent aux États-Unis c'est la commission Américaine fédérale de communication (« FCC »). Le CENELEC (Comité Européen de Normalisation en électrotechnique), est chargée d'élaborer la directive de normalisation donnant les références des normes harmonisées entre les pays de la CEE. Chaque état membre s'engage à transposer en normes nationales, les normes qui sont retenues par le CENELEC, et dont les références sont publiées au journal officiel de la communauté. Les publications concernant l'industrie électrique sont les publications de CEI (Commission Electrotechnique International) .

La plupart des pays ont leurs propres normes pour les interférences électromagnétiques sur les canalisations métalliques (pipelines). En Europe, on cite quelques normes fondamentales

EN 15280 - 2013 : Évaluation du risque de corrosion occasionnée par les courants alternatifs des canalisations enterrées protégées cathodiquement.

EN 50443 - 2012: Applications ferroviaires – Installations fixes - Effets des perturbations électromagnétiques causées par les lignes ferroviaires en courant alternatif sur les canalisations métalliques

NF EN 12954 - 2001 : Protection cathodique des structures métalliques enterrées ou immergées. Principes généraux et application pour les canalisations métalliques.

NF EN 13636 - 2004 : Protection cathodique des réservoirs métalliques enterrés et tuyauteries associées.

NF C13-200 2009 : Installations électriques à haute tension.

I.5. Revue des travaux antérieurs sur l'interférence électromagnétique entre les lignes électriques et les pipelines métalliques

Il existe un nombre important d'études portant sur l'interférence électromagnétique entre une ligne électrique aérienne (HT) et les pipelines métalliques. Ces études ont été publiées à la fois sur les mécanismes d'interférences, le calcul et la modélisation des tensions induites et leurs atténuations dans les canalisations métalliques. Un aperçu de ces recherches développées jusqu'ici est présenté ci-dessous. Nous rappelons brièvement l'ensemble des travaux parus selon un ordre chronologique.

Les premières tentatives pour étudier les interférences électromagnétiques sont basées sur les équations connues de Carson et Pollaczek en 1926 [11,12], permettant de calculer l'impédance mutuelle entre les conducteurs des systèmes de transmission. Ces équations sont la base de tous les modèles des lignes électriques et des pipelines. Ces travaux furent majoritairement utilisés dans le monde du transport et de la distribution de l'énergie électrique.

Plus tard, en 1949, Sunde [13] a développé le travail de Carson et Pollaczek . Il a proposé une approche pour le calcul de l'impédance linéique propre d'un câble enterré dans le cas d'une terre à deux couches sous certaines hypothèses.

Favez et al. [14] ont étudié l'utilisation de câble d'atténuation enterré en s'inspirant du modèle électrique basé sur les relations de Carson. Les auteurs ont suggéré que la liaison du câble d'atténuation au pipeline par l'intermédiaire d'un éclateur offre davantage d'efficacité de l'atténuation.

La première méthode de calcul des tensions induites, sur les pipelines de transport de gaz, par une ligne de transport d'énergie à courant alternatif de 60 Hz, partageant un droit de passage commun, était présenté par Taflove et Dabkowski [15, 16] dans le projet de recherche de l'Electric Power Research Institute (EPRI) et American Gas Association (AGA) [17]. Elle utilisait la théorie de la ligne de transmission électrique (TLM). Une comparaison a été faite entre les tensions mesurées dues au couplage inductif et les résultats obtenus à l'aide de la théorie TLM.

Plus tard, les chercheurs Taflove et Dabkowski[18], ont présenté quelques techniques très utiles de réduction de la tension induite. Ils décrivent comment un couloir commun de canalisation/ligne électrique peut être conçu pour réduire au minimum le couplage inductif et dans un deuxième document [19], les mêmes auteurs proposent des méthodes de mise à la terre des pipelines pour réduire les crêtes de tension de canalisation après l'installation des utilités sur le droit de passage commun.

Le problème de la tension induite due à un champ magnétique produit par les lignes électriques de distribution sur les pipelines d'irrigation enterrés a été examiné par Jaffa et al. [20].

L'étude menée s'appuie sur la théorie décrite dans le rapport EPRI , portant sur le cas d'une canalisation d'irrigation enterrée et s'étendant parallèlement à un circuit de distribution. Les auteurs ont montré que dans des conditions d'exploitation déséquilibrées, des tensions dangereuses peuvent être induites sur les pipelines d'irrigation. Des méthodes d'atténuation appliquée entre les lignes électriques d'énergie et les pipelines d'irrigation sont également discutées.

Dawalibi et al. [21] ont proposé une étude visant à déterminer les effets de l'induction électromagnétique causée par les courants dans des conditions de défaut et leur impact sur le pipeline. Le but étant d'assurer la sécurité du personnel et l'intégrité des pipelines durant des défauts du système électrique se produisant près de la Trans Québec et Maritime gazoduc.

Daconti et al. [22] ont développé une méthode d'analyse utilisant une procédure de calcul de base et les techniques d'atténuation existantes. La méthode a été testée, avec succès, sur un cas réel existant au Brésil par CHESF (Companhia Hidro Eletrica do Sao Francisco).

Brandes et al. [23] ont étudié la protection des pipelines en acier contre la corrosion, suite à une interférence à partir d'un système électrique. Un modèle de calcul menant à l'analyse des interférences résistives et inductives est présenté. Les résultats obtenus sont validés par des relevés expérimentaux.

Dawalibi et al. [24,25] ont développé un code de calcul dénommé ECCAPP (Electromagnetic and Conductive Coupling Analysis from Power lines to Pipelines). Il traite tous les cas possibles du couplage inductif et conductif pour différentes configurations de pipelines enterrés et les systèmes d'atténuation si c'est nécessaire. Il aborde ainsi les concepts fondamentaux et théoriques, qui sont nécessaires pour prévoir avec précision les effets de ces couplages.

Dans un autre travail Dawalibi et al. [26] ont présenté un ensemble de résultats qui illustrent les effets de différents paramètres sur les couplages conductif et inductif entre les lignes de transport et les pipelines. L'analyse paramétrique indique que les fils d'atténuation enterrés pourraient être très efficaces car ils permettent une réduction allant jusqu'à 65% du potentiel de pointe du pipeline pendant le défaut. L'étude a été poursuivie par le même groupe de travail [27]. Elle concernait l'analyse des effets induits par couplages capacitif, inductif et résistif entre des structures métalliques et les lignes aériennes de transmission de courant alternatif.

Jacquet et al. [28] ont publié un rapport portant sur les problèmes liés à l'influence des lignes électriques sur les pipelines métalliques. Il traite également des différentes techniques d'atténuations.

Abdel-Salam et al. [29] ont développé une méthode basée sur la méthode des charges fictives (MCF) pour calculer les tensions induites sur les pipelines en dessous des lignes de

transport d'énergie. Les tensions induites calculées sont en accord satisfaisant à celles mesurées expérimentalement.

Le groupe de travail CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Électriques), Comité 36.02 [30] a publié un guide général portant sur l'influence des systèmes d'alimentation à haute tension sur les pipelines métalliques. Il présente les différents modes de couplages (Capacitif, inductif et conducteur) et les différents problèmes qui en résultent. Il présente des méthodes simples de calcul de la tension induite et de mesure des perturbations. Il propose également des procédés d'atténuation et de protection.

Djogo et al. [31] ont proposé une méthode basée sur le modèle de ligne de transmission avec pertes pour les conducteurs enterrés afin de calculer les courants et les tensions induites dans un système de pipelines parallèles avec des conducteurs enterrés.

En Australie et en Nouvelle-Zélande, une norme AS / NZS 4853:2000 [32], a été publiée sous forme de projet intitulé : Risques électriques sur les pipelines métalliques. Cette norme fournit les limites de tension et les contraintes temporelles correspondante et acceptable sur les pipelines métalliques souterrain et aérien, soumis à des interactions électriques dues aux lignes électriques de transport d'énergie électrique HT. Des orientations portant sur le calcul des tensions induites et l'atténuation des dangers sont fournies.

Southey et al. [33] ainsi que Dawalibi et al. [34] ont décrits dans deux travaux en association avec le groupe (SES) le mécanisme d'interférence électromagnétique entre une ligne de transport d'énergie électrique et un pipeline voisin. Deux approches théoriques sont utilisées . Les résultats présentés dans ces articles illustrent clairement les mécanismes des interférences électromagnétiques et les moyens d'atténuation.

Dawalibi et al. [35] ont également étudié la sécurité des pipelines à proximité de lignes de transport électrique et les niveaux des tensions de contact et des tensions de pas pour plusieurs configurations : lignes électriques – pipelines dans des conditions normales de fonctionnement et de défaut.

Christoforidis et al. [36] ont présenté dans une méthode dite méthode améliorée hybride, utilisant la méthode des éléments finis avec la loi de Faraday et les techniques d'analyse des circuits électriques, afin de prédire les tensions et les courants induits sur un pipeline avec un défaut sur son revêtement.

Isabelle Ragault et al. [37] ont définis, d'après les résultats d'observations et de mesures sur site (chez Gaz de France) et en laboratoire les paramètres qui prévalent dans les risques de corrosion par les courants alternatifs. Ils proposent des mesures à prendre en compte dans l'évaluation des risques de corrosion dues aux influences des courants alternatifs par des lignes très haute tension sur des canalisations en acier revêtues de polyéthylène.

Southey et al. [38] ont étudié les moyens d'atténuation des tensions induites par une ligne à haute tension alternative sur des pipelines installés dans le même couloir afin de les maintenir à des niveaux acceptables dans les conditions normales de fonctionnement.

G. Lucca et al. [39] ont présenté un nouvel algorithme pour le calcul des tensions et des courants induits sur un réseau de canalisations complexe situé à proximité d'une station électrique. L'analyse concerne les couplages inductifs (produit par le courant dans la ligne électrique) et conducifs (produit par le courant injecté dans le sol à travers la grille de mise à la terre du poste).

M. Radwan et al. [40] ont établi un modèle théorique qui prend en considération les effets, associés, des champs électrique et magnétique des lignes électriques à haute tension sur une canalisation métallique revêtu d'un matériau isolant. Le modèle a été testé et validé.

L'étude expérimentale réalisée par M. Vakilian et al. [41], dans une zone industrielle densément peuplée au nord de l'Iran où des lignes aériennes HT et des pipelines enterrés partagent le même corridor de transport, a permis d'évaluer la tension induite dans les pipelines de gaz et son effet sur les systèmes de protection cathodique et les revêtements des pipelines. Une méthode d'atténuation de la tension induite est appliquée sur les pipelines enterrés. Elle a abouti à une diminution considérable de la tension induite dans le pipeline.

K.A. Ellithy et al. [42] ont étudié les interférences électromagnétiques causées par une ligne de transmission de puissance 132 kV, ayant subi un défaut phase terre, à proximité du pipeline enterré à Oman, en utilisant le logiciel CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil structure). Les résultats obtenus ont montré que les effets des tensions induites dépassent les limites acceptables recommandées par la norme ANSI / IEEE Standard 80 (American National Standards Institute/Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards). L'effet des différents paramètres : longueur de parallélisme, distance de séparation, résistivité du sol, courant de défaut, résistance de revêtement du pipeline, diamètre du pipeline, sur les niveaux d'interférence a également été étudiée.

Southey et al. [43], ont proposé une étude permettant d'estimer et d'atténuer la tension induite afin de maintenir la tension de claquage du revêtement des pipelines dans des limites acceptables. Ils ont également étudié l'effet des divers facteurs tels que la résistivité du sol, la stratification du sol, la longueur de parallélisme, la distance de proximité du pipeline, le niveau des courants de défaut, le type de ligne de transport et la résistance du revêtement) dans la détermination de l'atténuation.

Shwehdi et al. [2] ont présenté un modèle mathématique qui permet de déterminer l'effet électrostatique de la ligne d'alimentation sur les pipelines. Le cas d'une ligne à 380 KV dans la région orientale de l'Arabie saoudite a été discutée.

Elhirbawy et al. [44] ont développé un travail utilisant la méthode des différences finies (FDM) pour le calcul des champs électromagnétiques dans des conditions de défaut. Les résultats obtenus ont été validés avec des relevés expérimentaux.

Christoforidis [45] a présenté une méthode améliorée permettant d'évaluer les tensions et les courants induits sur un pipeline fonctionnant en parallèle avec une ligne électrique, dans le cas d'un défaut apparaissant sur le revêtement du pipeline.

Christoforidis et al. [46] ont étudié l'interférence inductive entre les lignes électriques et les pipelines d'irrigation, en utilisant une méthode hybride fusionnant la méthode des éléments finis et l'analyse des circuits. L'étude a porté sur un cas rencontré dans le réseau électrique Grec. Il s'agit d'une structure : ligne électrique- pipeline d'irrigation, fonctionnant dans des conditions déséquilibrées. L'effet des différents paramètres a été discuté.

D. Markovic et al. [47] ont développé une étude sur l'interférence entre les pipelines et les lignes de transport dans un couloir de services publics communs en Australie permettant de déterminer les tensions induites sur un pipeline lors d'un fonctionnement normal et dans des conditions de défaut. Un programme de calcul est établi et des mesures d'atténuation, en conformité avec les normes, sont proposées.

Shwehdi [48] a présenté une étude réalisée en Arabie Saoudite, portant sur l'évaluation de la tension induite due aux effets inductifs et électrostatiques d'une ligne de transmission 380 KV sur un pipeline.

Mohamed M. Saied [49] a élaboré un modèle mathématique destiné à évaluer le champ électrique maximal sur la surface du pipeline et la densité de la charge électrique totale du pipeline entre les lignes aériennes de transmission THT et les pipelines.

Hyun Goo Lee et al. [50] ont calculé la tension induite, en utilisant l'analyse nodale dans les réseaux électriques.

Dans son travail, G.Amer [51], a étudié le couplage inductif mutuel entre les lignes électriques et les pipelines en particulier dans les conditions de court-circuit et a montré l'influence des câbles de garde dans la réduction du couplage mutuel. L'effet de la variation de la résistivité du sol est pris en considération. Les outils de calcul utilisés sont le logiciel EMTP (Electro-Magnetic-Programme transitoire) et un code de calcul.

Christoforidis et al. [52] ont proposé une méthode permettant de calculer les tensions et les courants induits sur un pipeline parallèle avec une ligne électrique en cas de défaut. Les résultats obtenus ont été validés avec ceux empruntés à la littérature.

Christoforidis et al. [53] ont étudié l'influence de l'état du sol (résistivités différentes) sur les interférences inductives dans un système : ligne HT-pipeline.

Al-Alawi et al. [54] ont présenté une technique basée sur le développement d'un modèle de réseau neurones artificiels (ANN) pour prédire les effets d'interférences électromagnétiques sur les pipelines. .

D .Markovic et al. [55] se sont intéressés aux méthodes d'atténuation des tensions induites, utilisant les joints isolants et les fils de contrôle du gradient. L'étude a porté sur un pipeline modélisé à l'aide du logiciel spécialisé CDEGS et incorporant ces deux méthodes d'atténuation.

Un deuxième guide est présenté par CIGRE [56], les informations de base fournies concernent le phénomène de la corrosion par courant alternatif. Des recommandations, portant sur l'évaluation globale du risque, sont données. Des méthodes de modélisation et de calcul appropriés sont traitées en fonction des critères pour l'évaluation du risque de la corrosion.

Abhishek Gupta [57], a utilisé respectivement la méthode des charges fictives (Charge Simulation Method) et la méthode de Carson pour calculer les tensions induites dans le pipeline dues aux couplages capacitif et inductif. Le but étant de proposer une configuration adéquate du système : ligne HT –Pipeline. Une configuration d'un réseau de mise à la terre à faible résistance a été suggérée. Elle vise à assurer une meilleure protection.

Bortels et al. [58] ont proposé un algorithme de calcul prenant en considération la configuration (ligne HT-pipeline), les paramètres du pipeline (diamètre, revêtement, la résistivité du sol, ...) qui permet de déterminer les tensions et les courants induits. Les résultats obtenus ont été comparés avec succès avec ceux issus de la littérature.

Cotton et al. [59] ont présenté une étude concernant les tensions induites créées par les lignes électriques opèrent en régime permanent et transitoire dans les pipelines. Dans cette étude, les auteurs évaluent les tensions induites dans un sol à différentes résistivités.

Paucar et al. [60] ont présenté une étude sur l'influence des champs électrostatique et magnétostatique d'une ligne de transmission de puissance sur un système de distribution de gaz de pipeline. Cette approche basée sur l'analyse du modèle nodal pour une ligne d'alimentation, permet de quantifier les effets capacitifs, inductifs et les impédances mutuelles.

Ametani et al. [61] ont calculé la tension induite sur un système : ligne électrique à haute tension –pipeline, en utilisant le logiciel EMTP (Electro-Magnetic-Programme transitoire). Les résultats de la simulation montrent un accord acceptable avec les résultats des tests sur site.

M. Hanafy [62] a étudié l'influence de la présence d'un pipeline situé dans un couloir commun parallèlement avec une ligne de transmission sur la répartition du champ électrique au niveau du sol. Les effets de la distance de séparation entre les conducteurs et le pipeline et le rayon du pipeline sont évalué, à l'aide de la méthode des charges fictives. Des graphes et des profils de distribution du champ électrique, au niveau du sol et sur la surface du conducteurs, et du pipeline sont présentés.

Le niveau des tensions induites sur les pipelines métalliques à proximité des lignes de transmission, peuvent être réduite à une valeur sûre en conformité avec la norme IEEE 80 par la conception d'un système d'atténuation appropriée.

Abdullah. Al- Badi et al. [63] ont proposé un modèle neuro flou capable de prédire le niveau de la tension induite sur un conducteur métallique avant et après l'application d'un système d'atténuation.

A- Hossam El-Din et al. [64] ont illustré un cas pratique d'interférence inductive entre un pipeline et une ligne électrique de transmission, en fonctionnement normal, en calculant la tension induite et le courant longitudinal dans le pipeline.

Kim. Hyoun Su et al. [65] ont présenté une méthode de calcul de la tension induite sur les pipelines métalliques en prenant en considération la valeur réelle du courant du neutre et les effets du câble de garde. La méthode de calcul proposée est validée en comparant les résultats obtenus avec ceux calculés à partir du logiciel de simulation EMTP (Electro-Magnetic-Programme transitoire).

L'étude menée par D.Stet et al. [66] vise à étudier les interférences électromagnétiques des lignes de transmission électriques avec des équipements tels que les pipelines se trouvant dans les mêmes couloirs, en utilisant une nouvelle technique à l'aide d'un logiciel professionnel d'analyse et de modélisation CCM (conventional circuit method).

L'étude menée par B.Al-Gahtani [67] a montré que la tension maximale induite sur les pipelines enterrés à proximité des lignes aériennes à haute tension se trouvant à l'Est de l'Arabie Saoudite fonctionnant à l'état d'équilibre est dans les limites recommandées par la norme. Tandis que dans des situations déséquilibrées (court circuit), les résultats obtenus dépassent les limites de sécurité. Par conséquent un système d'atténuation utilisant des fils de contrôle du gradient a été simulé et proposé pour réduire le potentiel de pipeline à la limite de sécurité.

D-Micu et al. [68] ont présenté un développement d'un réseau neuronal pour une étude de cas d'une interférence électromagnétique entre les lignes à haute tension et pipelines métalliques souterrains. Des résultats obtenus sont comparés à ceux calculés par la méthode des éléments finis.

L. Bortels et al. [69] ont présenté une étude englobant le calcul des tensions induites et l'atténuation sur pipeline enterré au voisinage des lignes de transmission à haute tension. L'effet de changement de l'ordre des phases pour les lignes est considéré. Des résultats de simulation sur différentes configurations sont présentés et comparés avec des résultats expérimentaux.

E.Sawma et al. [70] ont présenté des résultats de calcul de la tension induite et son effet sur le pipeline telle que la corrosion.

Suad. Shahl [71], s'est intéressée à l'effet Joule dû aux courants de Foucault induits dans les pipelines enterrés de pétroles situés à proximité des lignes HT à 400 kV se trouvant au Sud de l'Irak. Le modèle de calcul utilisé est basé sur la méthode des éléments finis. Plusieurs situations des pipelines ont été étudiées et des systèmes d'atténuation sont proposés.

A.Hellany et al. [72] ont traité le problème de la sécurité électrique dans un pipeline parallèle à une ligne de transmission haute tension en calculant la tension induite dans le pipeline à travers l'impédance mutuelle.

Une étude a été menée par R.Braustein et al. [73]. Elle permet de réduire les tensions induites en assurant une meilleure combinaison entre les systèmes de mise à la terre, les joints d'isolation et la transposition des conducteurs phases de la ligne électrique.

Zhang et al. [74] ont présenté une étude approfondie sur les différents paramètres affectant la tension induite dans les pipelines, un modèle de circuit pour multiples pipeline est utilisé, pour représenter le cas parallèle parfait et le cas complexe. L'effet des différents paramètres, à l'état d'équilibre, sur les niveaux de la tension induite et du courant a été analysé.

Une étude a été menée par B. Milesevic et al. [75] pour analyser et évaluer la tension induite par une ligne (chemin de fer) alimenté en courant 25 kV/50 Hz sur une canalisation parallèle au dessus du sol située à proximité de la ligne. La valeur du courant à travers le corps humain est évaluée et comparée à la valeur de seuil donnée dans les normes. Différentes impédances du corps humain et la durée de passage du courant ont été discutés.

H.M.Ismail et al. [76] ont calculé la tension induite sur un pipeline aérien partageant la même emprise avec les lignes de transmission à haute tension. Les méthodes de calcul, utilisant le logiciel ATP-LCC (Alternative Transient Program, Line Cable Constant) et la méthode des charges fictives (MCF) sont appliquées pour différentes configurations. L'effet des différents paramètres des pipelines tels que le diamètre du pipeline et sa hauteur au-dessus du sol a été étudié.

A.Pieretti [77], a présenté une étude concernant un projet, en Italie, de réalisation de deux lignes électriques à haute tension qui partagent le même couloir avec un pipeline (Triade Réseau Italie-TRI). Une analyse simplifiée des effets dûs au couplage inductif et leurs atténuations ont été proposés conformément aux recommandations du groupe Cigré (Conseil International des Grands Réseaux Électriques).

Une étude récemment menée par D.D. Micu et al. [78] a permis de montrer l'influence de certains paramètres importants, tels que le déphasage et la différence de charge entre les deux circuits, la charge déséquilibrée et la séquence de phase sur l'interférence inductive entre une ligne de transmission à double circuit de 110 kV et un pipeline enterré à proximité. L'étude fournit des graphiques détaillés et données numériques utiles pour les chercheurs pour évaluer le niveau d'interférence ou dans le choix et l'application des mesures de protection appropriées.

En résumé ces travaux réalisés dans la majorité dans les 15 dernières années présentent les différentes méthodes et techniques de simulation utilisées dans l'étude et l'évaluation de mécanismes d'interférences capacitives et inductives, entre les lignes de transport d'énergie et les pipelines métalliques, pour différentes configurations de lignes de transport et de pipelines, dans les deux états de fonctionnement : l'état normal (régime permanent) et en défaut (régime transitoire). Les différentes techniques d'atténuation pour la sécurité des opérateurs et les équipements connectés au pipeline sont présentées.

La revue de ces travaux, nous a permis de retenir les méthodes adoptées qu'il faut retenir dans notre étude en l'occurrence la méthode des charges fictives et la méthode de Carson. Ces méthodes ont fait l'objet de nombreuses publications d'un grand intérêt. Les résultats rapportés dans ces publications ont été comparés aux autres résultats de la littérature. Ils ont permis de mettre en évidence la robustesse et l'efficacité de ces méthodologies proposées pour le calcul du couplage capacitif et inductif entre des lignes électriques et des circuits perturbés.

La méthode des charges fictives a été développée par Steinbugler en 1969 [79]. Elle a été soumise à des diverses améliorations et a été employée avec un grand succès pour résoudre les problèmes de calcul des champs électriques dans les équipements à haute tension [80,81,82,83]. En conséquence, cette méthode s'est transformée en un outil très puissant, efficace et précis pour des calculs de champ électrique. Le problème de l'obtention des positions optimales des charges fictives a été résolu grâce aux méthodes d'optimisation stochastiques (Algorithmes génétiques).

La méthode de Carson est basée sur la description des impédances et des admittances linéiques propres et mutuelles pour modéliser les lignes aériennes et les conducteurs enterrés qui composent les circuits perturbateurs et perturbés [84,85]. Ces paramètres sont utilisés pour déterminer les tensions et les courants induits du système. Cette méthode repose sur certaines hypothèses, elle est valable pour des fréquences basses pour que les courants de déplacement soient négligés, le sol est considéré comme une couche homogène, parfaitement plan, infinie et de résistivité constante.

Ces hypothèses confirment le besoin de méthodes rigoureuses d'analyse et de modélisation pour les problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) associés au système des canalisations de transport de gaz, d'hydrocarbures et aux systèmes avoisinants.

A partir de cette revue bibliographique, notre étude s'est orientée vers :

- Une modélisation du couplage capacitif, basée sur une combinaison entre la méthode des charges fictives et l'algorithme génétique, afin de quantifier les interférences électrostatiques.

- Une modélisation qui couple la méthode de simulation des courants avec l'algorithme génétique pour l'évaluation des niveaux du champ de l'induction magnétique au niveau du pipeline.
- Une modélisation du couplage inductif utilisant la méthode de Carson, pour les pipelines aériens et enterrés, afin d'évaluer les interférences inductives.
- Et enfin une validation des résultats obtenus par les programmes de calcul avec ceux rapportés dans la littérature.

I.6. 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 potentiel scalaire et du champ électrique en électrostatique, du champ magnétique et potentiel vecteur en magnétostatique. 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 rappelé brièvement la notion de base de la compatibilité électromagnétique entre un système perturbateur constitué par des sources de perturbation électromagnétiques et un autre système victime et les modes de couplage. Le but de la CEM est d'assurer une compatibilité entre les équipements et/ou composants d'un même environnement. Ainsi, dans un environnement donné, tous les éléments doivent respecter les marges définies. Nous avons présenté ensuite un résumé des travaux antérieurs permettant d'étudier les différents couplages d'interférences, entre les lignes électrique de transport de l'énergie électrique à haute tension HT et les pipelines métalliques, en présentant les différentes méthodes de calculs, et les modèles existants. Sur la base de travaux antérieurs, nous projetons de mettre en place les méthodes permettant d'étudier les couplages des pipelines avec les lignes de transmission haute tension, en s'intéressant en premier lieu à l'étude du couplage capacitif d'un pipeline puis au couplage inductif avec des lignes de transport.

CHAPITRE II

*Les interférences électromagnétiques
entre les lignes de transport HT et les
pipelines métalliques*

II.1. Introduction

Parmi les principales sources de perturbation électromagnétiques d'origine artificielle provenant de l'activité d'électricité, on peut distinguer les lignes haute tension (HT) et très haute tension (THT) en courant alternatif.

De nos jours, les problèmes liés au fonctionnement des réseaux d'énergie électrique ont pris une importance considérable. La protection de l'environnement soumis aux contraintes de plus en plus sévères, dues aux réseaux, est un des principaux défis que doit relever l'industrie énergétique. Le transport d'énergie à niveau de tension élevé, est à l'origine des perturbations importantes, aussi bien lors de l'exploitation normale de la ligne HT que lorsque des défauts se produisent sur la ligne électrique. Les champs électrique et magnétique créés par une ligne aérienne très haute tension de transport induisent des charges et des courants dans les objets métalliques voisins. L'influence électrique dépend des caractéristiques électriques et de la géométrie du système voisin (pipeline, par exemple). La gravité de l'effet étant directement liée à la longueur continue du pipeline qui passe au voisinage de la ligne électrique et la façon dont le pipeline est isolé. Il existe trois couplages prédominants permettant le passage des courants et l'induction des tensions alternatives sur les pipelines. Le premier étant le couplage électrostatique (capacitif) où la structure aérienne agit comme un côté d'un condensateur par rapport au sol. Le deuxième est le couplage électromagnétique (inductif) qui peut se produire lorsque la structure est au-dessus ou en dessous du sol. Dans ce cas, la structure agit comme un circuit secondaire d'un transformateur à noyau d'air dans lequel la ligne électrique aérienne est le primaire. Enfin, un couplage résistif (ohmique) causé par les courants de défaut d'alimentation qui circulent sur et en dehors de la structure souterraine.

Ce chapitre traite des problèmes liés aux interférences électromagnétiques qui se manifestent entre les lignes électriques et les pipelines métalliques, de l'influence des différents types d'interférences et des moyens qui pourraient être appliqués pour les réduire ainsi que leurs conséquences.

II.2. Les perturbations des lignes aériennes HT de transport d'énergie

Le but des lignes est de transporter l'énergie électrique à partir des centrales électriques jusqu'au système de distribution, qui alimente la charge. Les lignes de transport sont souvent portées sur des pylônes en acier, en bois ou en béton renforcé, ces lignes ont leurs propres emprises (Right-of-way).

Devant la complexité croissante des réseaux d'énergie électrique, Les lignes électriques constituent d'avantage des sources électromagnétiques perturbatrices non intentionnelles. Les

perturbations électromagnétiques provoquées sont d'autant plus importants que leur tension de service est élevée.

Les champs magnétiques associés aux systèmes de transport d'énergie affectent les objets à proximité de la ligne. Ils induisent des tensions dans les objets conducteurs de grandes dimensions (barrières, canalisations, fils téléphoniques,.....) et se trouvant au voisinage des lignes de transport.

Les champs électriques d'une ligne de transmission affectent les objets conducteurs (métalliques) qui se trouvent aux alentours de la ligne. Ils peuvent induire des courants électriques et des tensions qui sont source potentielle de chocs. A des niveaux de tension élevée, les effets des champs électriques deviennent plus importants. Les champs électriques produits par la tension de la ligne, sont la première cause de l'induction des véhicules, des bâtiments et des objets de taille comparable. La figure II-1 illustre une telle situation [86] :

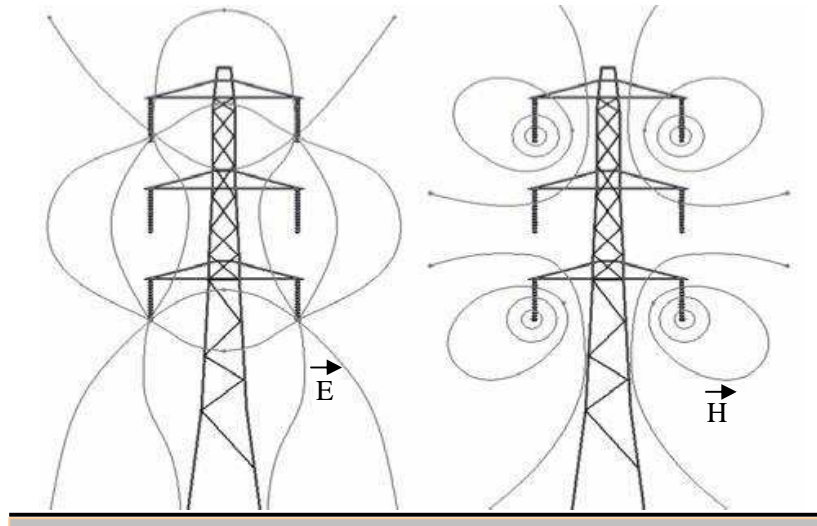


Figure II-1 : Champ électrique (à gauche) et magnétique (à droite) produit par une ligne électrique

II.3. Définition d'un pipeline

Un pipeline est un mot emprunté à l'anglais signifiant littéralement « ligne-tuyau ». Les pipelines métalliques sont largement utilisés pour transporter des fluides et des hydrocarbures liquides ou gazeux en particulier (pétrole ou gaz naturel), et des produits comme l'eau. Leur longueur peut atteindre plusieurs centaines ou des milliers de kilomètres et de diamètres allant dans la plupart des cas entre 50 et 150 cm. L'épaisseur du tube acier est généralement comprise entre 5 et 8 mm, selon la pression de service. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement, voir intérieurement. Dans le passé l'isolation était réalisée essentiellement par un revêtement bitumineux; actuellement le revêtement

par le Polyéthylène (PE) est le plus souvent utilisé. Généralement les pipelines sont enterrés à faible profondeur, mais ils peuvent aussi être aériens. Ces pipelines s'avèrent coûteux, dues à la quantité et à la qualité de l'acier des tubes qu'ils nécessitent, et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés, c'est le cas sous l'eau, au passage des fleuves, sur du pergélisol qui fond, en zone de risque sismique. Afin d'éviter la corrosion électrochimique du métal, les pipelines souterrains sont fournis avec un revêtement extérieur isolant et relié à une installation de protection cathodique. Le métal est polarisé négativement par rapport à la terre. Des joints isolants sont utilisés pour interrompre la conduction électrique de la canalisation à différents endroits. La protection de long du pipeline peut nécessiter plusieurs installations de protection cathodique [30 ,87].

Une coupe d'une section transversale du pipeline est présentée à la figure II-2 [88]

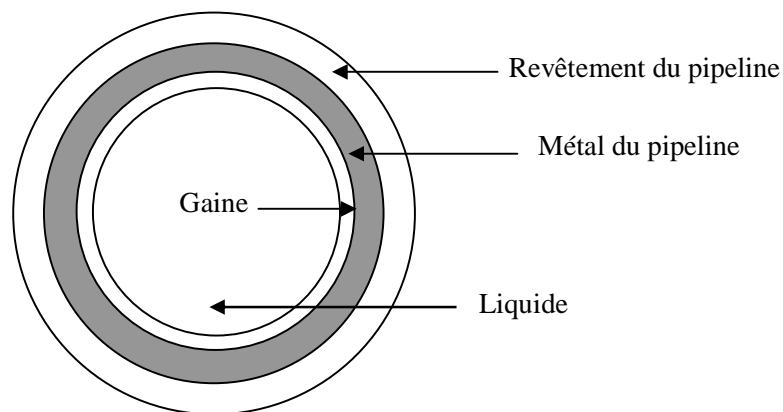


Figure II-2: Illustration d'une coupe transversale d'un pipeline

II.4. Type de couplages entre la ligne aérienne HT et le pipeline métallique et les risques associés

La proximité des lignes électriques de haute tension et de canalisations métalliques est parfois inévitable pour des raisons de densité d'encombrement du sol et du sous-sol (Figure II-3). Dans ce cas des interférences électromagnétiques peuvent exister, la source de perturbations est la ligne électrique, le récepteur victime est le pipeline métallique. Ces interférences peuvent induire des risques dangereux pour cette canalisation notamment en cas de dysfonctionnement des lignes électriques. Ces risques peuvent se traduire par le claquage du revêtement et/ou le percement de la canalisation, la corrosion de la canalisation et l'électrocution des personnes. Il existe trois mécanismes de couplage de ces perturbations électromagnétiques, le couplage capacitif, inductif et conducteur.



Figure II-3 : Présence d'une canalisation métallique de transport d'hydrocarbures dans un couloir de passage d'une ligne électrique à haute tension

II.4.1. Le couplage électrostatique (capacitif)

Le couplage capacitif se produit sous l'effet du champ électrique de la ligne de transport haute tension en induisant des charges électriques dans les structures métalliques voisines. Il s'agit d'une forme de couplage fonctionnant à travers la capacité entre les lignes électriques et le pipeline, en série avec la capacité entre le pipeline et la terre adjacente, qui forment un diviseur de tension capacitif, comme représenté sur la figure II-4.

Tant que la capacité entre le pipeline et le sol est négligeable, un potentiel n'est pas normalement induit sur une canalisation enterrée, même si les revêtements diélectriques collés sont utilisés. Le sol agit comme un écran électrostatique, qui fournit un effet de blindage contre les champs électriques. Le couplage capacitif se produit dans les conditions normales et les conditions de défaut du réseau électrique et lors de l'installation du pipeline. En effet une tension pourrait être produite par l'influence d'un fort champ électrique sur un pipeline isolé lorsqu'il est levé du sol et transporté à l'aide d'une grue [30, 86,89, 90].

D'après la figure II-5, on peut déterminer le potentiel du pipeline. La charge accumulée Q dans le tronçon est donnée par la relation ci-dessous:

$$Q = C_{12} \cdot (V_L - V_P) = C_2 \cdot V_P \quad (\text{II.1})$$

D'où:

$$V_P = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2} V_L \quad (\text{II.2})$$

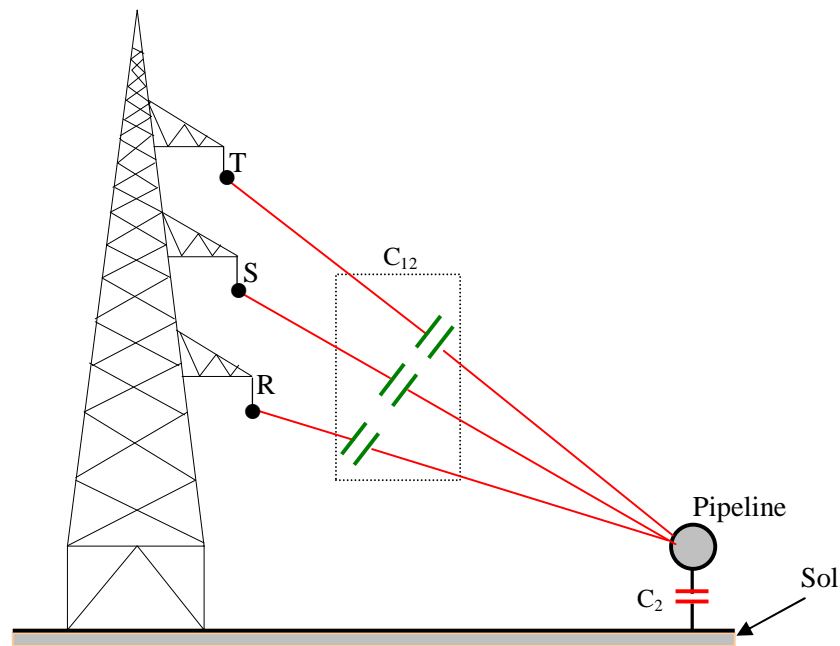


Figure II-4: Le couplage capacitif entre la ligne HT et le pipeline métallique

L'influence capacitive d'une ligne électrique HT sur un pipeline dépend essentiellement [30]:

- De la tension de ligne de transmission; l'influence capacitive augmente proportionnellement avec le niveau de la tension.
- De la séparation latérale entre la ligne de transmission et le pipeline; l'augmentation de cette distance conduit à la réduction du niveau de la tension induite.
- De l'arrangement de phases des lignes haute tension qui à une influence importante sur le couplage capacitif.

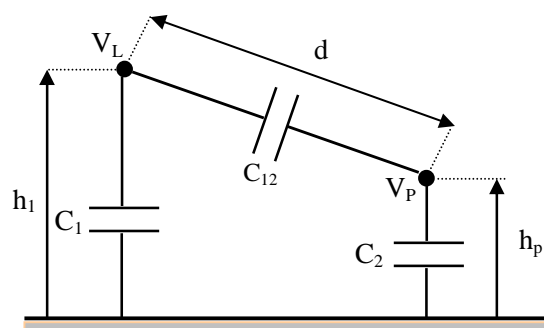


Figure II-5: Schéma simplifié d'un couplage capacitif

II.4.2. Effets du couplage électrostatique

Les problèmes dus à un couplage capacitif concernent essentiellement la sécurité des personnes entrant en contact avec le métal du pipeline. Le couplage provoque des tensions qui apparaissent sur le pipeline isolé du sol. Si un opérateur est mis, accidentellement, à la terre, l'énergie stockée dans le pipeline est déchargée à travers son corps. Si le courant est assez grand, il peut entraîner des blessures graves ou la mort. Généralement il est admis que des courants à 50 ou 60 Hz et ne dépassent pas 20 mA, ne constituent aucun danger pour le corps humain. Néanmoins Dans la plupart des pays, des mesures de protection sont exigées quand le courant en régime permanent dans le corps dépasse les valeurs dans la gamme 5-15 mA [30,57].

II.4.3. Le couplage magnétique (inductif)

L'effet inductif est peut-être le plus important de tous les trois couplages. L'interférence inductive est le résultat du champ magnétique produit par les courants circulants dans les conducteurs des lignes de transmission (figure II-6). Les canalisations aériennes et souterraines installées à proximité des lignes électriques de transport sont soumises à des tensions induites provoquées par les champs magnétiques variant dans le temps.

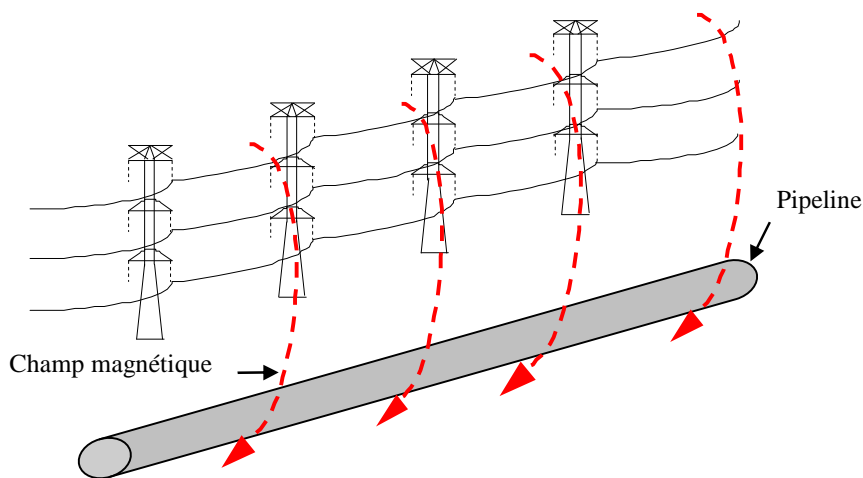


Figure II-6: Le couplage inductif entre la ligne HT et le pipeline métallique

L'influence inductive est un problème sévère dans le cas de défaut. La force électromotrice induite cause des courants de circulation sur le pipeline et des tensions entre le pipeline et la terre environnante [30, 86,89, 90].

Dans un système triphasé symétrique équilibré triphasés, où les amplitudes de courant dans les trois phases sont égales et les trois conducteurs aériens sont situés à la même distance de l'axe

de la canalisation, aucune tension ne sera induite sur la canalisation. En pratique ce cas est rarement rencontré.

Dans le cas d'un réseau à courant alternatif, l'asymétrie entre les trois conducteurs de phases et le pipeline entraîne l'induction d'une tension dans le pipeline. Dans les conditions normales de fonctionnement, l'équilibre entre les trois courants de phase ne provoque aucun effet substantiel. Toutefois, dans des conditions de défauts, des tensions et courants élevés peuvent être induits dans le pipeline, ce qui peut entraîner des risques de choc pour les personnes ou le personnel travaillant en touchant le pipeline ou d'autres structures métalliques qui y sont connectées (figure II-7) [30, 86,89, 90].

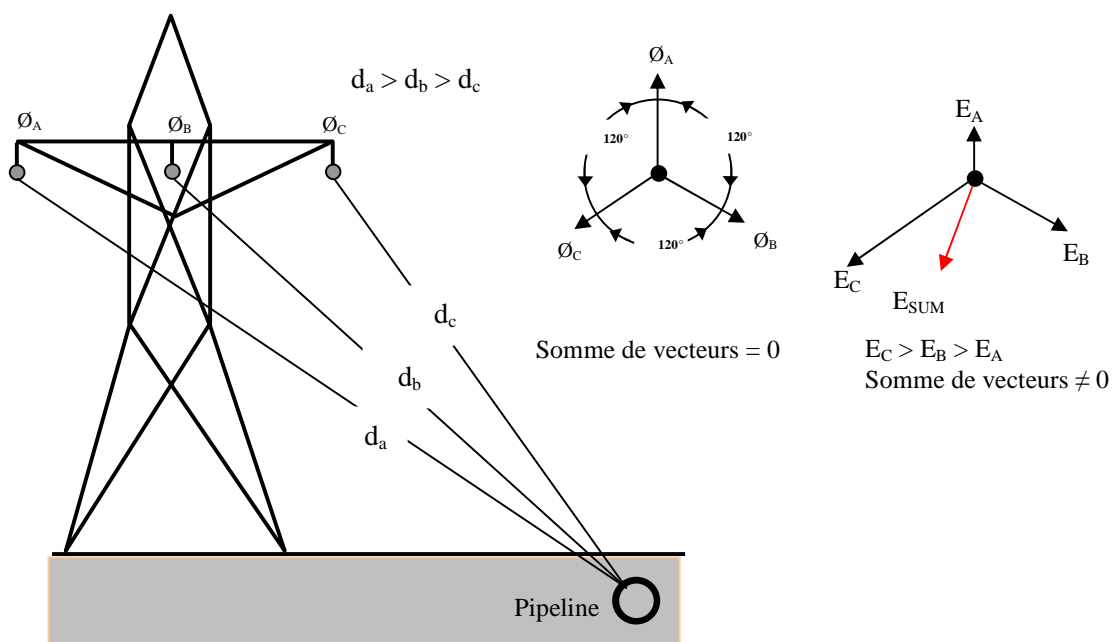


Figure II-7: L'induction électromagnétique dans un pipeline métallique

La tension induite dans la section parallèle du pipeline peut être exprimée par l'équation (II.3).

$$E = \omega.M.I.L \quad (II.3)$$

Avec :

E : est la force électromotrice induite [V], ω est la pulsation [rad/s] ;

I : est le courant inducteur dans la ligne ;

M : est le coefficient d'induction mutuelle ;

L : est la longueur du parallélisme entre la ligne et le pipeline.

L'influence inductive d'une ligne électrique HT sur un pipeline, dépend essentiellement de trois paramètres [30,57,67]:

- Les courants des lignes électriques et les conditions de fonctionnement. Dans les conditions normales de fonctionnement, les champs électromagnétiques induits dépendent des courants dans les phases. En cas de défaut, les champs électromagnétiques induits dépendent du courant de défaut. Les tensions induites peuvent être beaucoup plus élevées que dans les situations normales, mais leur durée est très courte.
- La distance entre la ligne électrique et le pipeline ; la distance entre la ligne de transmission et le pipeline est un facteur important qui influe sur le niveau de la tension induite de façon inversement proportionnelle.
- La longueur d'exposition ; la longueur de l'exposition est la longueur de la zone où l'influence est considérable.

L'influence est considérée comme significative lorsque une force électromotrice induite due à un courant de défaut à la terre-retour est supérieure à 10 V / (km.x kA). Autrement dit quand un courant avec retour à la terre de 1 kA produit une force électromotrice supérieure à 10 V par kilomètre. Ces valeurs correspondent approximativement à distances entre la ligne électrique et le pipeline inférieur à la valeur donnée par la relation :

$$d_{\text{influence}} = 200 \cdot \sqrt{\rho} \quad (\text{II.4})$$

Où :

ρ : est la résistivité du sol.

Bien que l'augmentation totale de la force électromotrice avec la longueur d'exposition, provoque une augmentation linéaire de la tension induite avec la longueur d'exposition seulement pour des longueurs courtes (de 1 à quelques kilomètres selon le revêtement du pipeline). Pour des longueurs de longue exposition, il y a une limitation des tensions induites en raison de l'impédance de fuite du revêtement [30,57,67].

II.4.4. Effets du couplage magnétique

II.4.4.1. Danger pour les personnes en contact avec le pipeline

Dans le couplage inductif, les tensions induites peuvent constituer une menace pour la sécurité des personnes travaillant à proximité des pipelines aériens ou souterrains situés dans le voisinage des lignes électriques HT. A l'état normale de fonctionnement dans le réseau électrique, la plupart des réglementations recommandent que pour des mesures de sécurité, la tension induite

ne doit pas dépasser 50 ou 65V [30,67,86,89]. A l'état d'un défaut à la terre du réseau électrique, des tensions plus élevées pourraient être admissibles, à cause de la courte durée du défaut et la faible probabilité que quelqu'un se trouverait en contact avec le pipeline en ce moment.

II.4.4.2. Danger pour les brides isolantes

Les brides isolantes sont destinées à interrompre la conductibilité d'un pipeline. En cas de défaut à la terre, la tension induite peut dépasser la tension de tenue de l'isolation des brides, et peut l'endommager.

II.4.4.3. Danger pour l'équipement connecté au pipeline

Les équipements (installation de protection cathodique en particulier) connectés au pipeline peuvent être aussi endommagés lors d'un défaut. Il y aura un risque élevé de dommage sur le revêtement du pipeline[17,30].

II.4.5. Le couplage conductif (résistif)

Le phénomène de conduction correspond à l'élévation de potentiel du sol à proximité du pylône en cas de défaut, lorsqu'un courant de défaut s'écoule dans le sol.

Quand un coup de foudre se produit dans une installation électrique (centrale électrique, transformateur, pylône, etc.) le courant traversant l'électrode de terre produit une élévation de potentiel de l'électrode et de la terre voisine (voir figure II.8). Un couplage conductif survient entre l'installation électrique et un pipeline à proximité:

– Si le pipeline est directement relié à l'électrode de masse du système HT (c.-à-d. à l'intérieur d'une centrale électrique).

Si le pipeline entre la «zone d'influence» de l'installation électrique. Une grande différence de potentiel peut alors apparaître à travers le revêtement du pipeline à cause de l'élévation du potentiel de la terre locale (le courant de défaut s'écoule dans le sol). En pratique, ce couplage résulte le plus souvent à partir de cette situation [30,90].

II.4.6. Effets du couplage conductif

II.4.6.1. Danger pour le personnel de travail

Quand une tension induite se développe le long d'un pipeline, les travailleurs en contact avec le pipeline peuvent être soumis à des chocs électriques. Cela peut causer la mort et / ou la fibrillation ventriculaire. Le risque dépend de plusieurs facteurs:

La durée du défaut, l'amplitude de la tension, la probabilité combinée pour les personnes d'être dans une position exposée au cours d'un défaut phase-terre, la distribution de tension autour le point d'accès, la qualité des gants et des chaussures portés par les travailleurs [30,57].

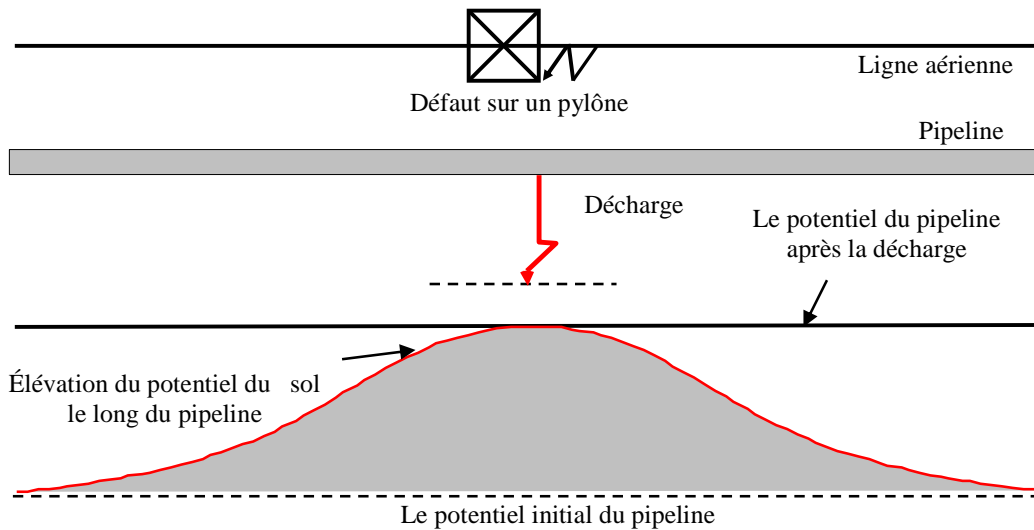


Figure II-8 : Le couplage conductif entre la ligne HT et le pipeline métallique

II.4.6.2. Risque de dommage sur le revêtement

Quand une différence de potentiel apparaît entre le pipeline métallique et le sol environnant est appliquée à la couche isolante (le revêtement isolant), les investigations ont montré que pour des tensions relativement basses (1000 à 1200 V), il résulte un préchauffage et décharge d'arc sur toute la surface du revêtement en bitume du pipeline. Suite à ces phénomènes, l'admittance transversale du pipeline à la terre augmente (c'est à dire le revêtement devient plus conducteur). Si la dégradation du revêtement est irréversible, il résulte également une augmentation de la consommation du courant par les systèmes de protection cathodique, les dommages au revêtement en polyéthylène seront généralement plus localisés [30,57].

II.4.6.3. Risque de dommage de métal

Le passage d'une intensité élevée de courant à travers une petite taille de crevasse (perforation) du revêtement chaufferait le métal du pipeline et pourrait le faire fondre. Il peut arriver que si le pipeline est très proche d'un pied du pylône HT (ou la grille de mise à la terre du poste) qu'un arc électrique apparaît dans le sol, en établissant un chemin de très faible résistance entre l'électrode et le pipeline, ce qui permet l'écoulement d'un grand courant directement dans le pipeline [30,57].

II.4.6.4. Dommage des brides isolantes

La tension induite dans une section de pipeline peut entraîner des contraintes diélectriques à travers les brides isolantes. Si la rigidité diélectrique de la bride isolante est dépassée, une décharge se produira, avec la destruction de la bride isolante. Cependant, un tel accident est assez peu probable, puisque les tensions induites par un couplage résistif sont le plus souvent beaucoup plus basses que les tensions dues au couplage inductif pour lequel les brides isolantes sont dimensionnées.

II.4.6.5. Les dommages des systèmes de protection cathodique

Le système actif de protection cathodique y compris les redresseurs commandés à semi-conducteurs peut être endommagé par des tensions élevées résultantes de tensions induites si aucune mesure de protection n'est prise.

La figure II-9 résume les effets des différents types de couplages.

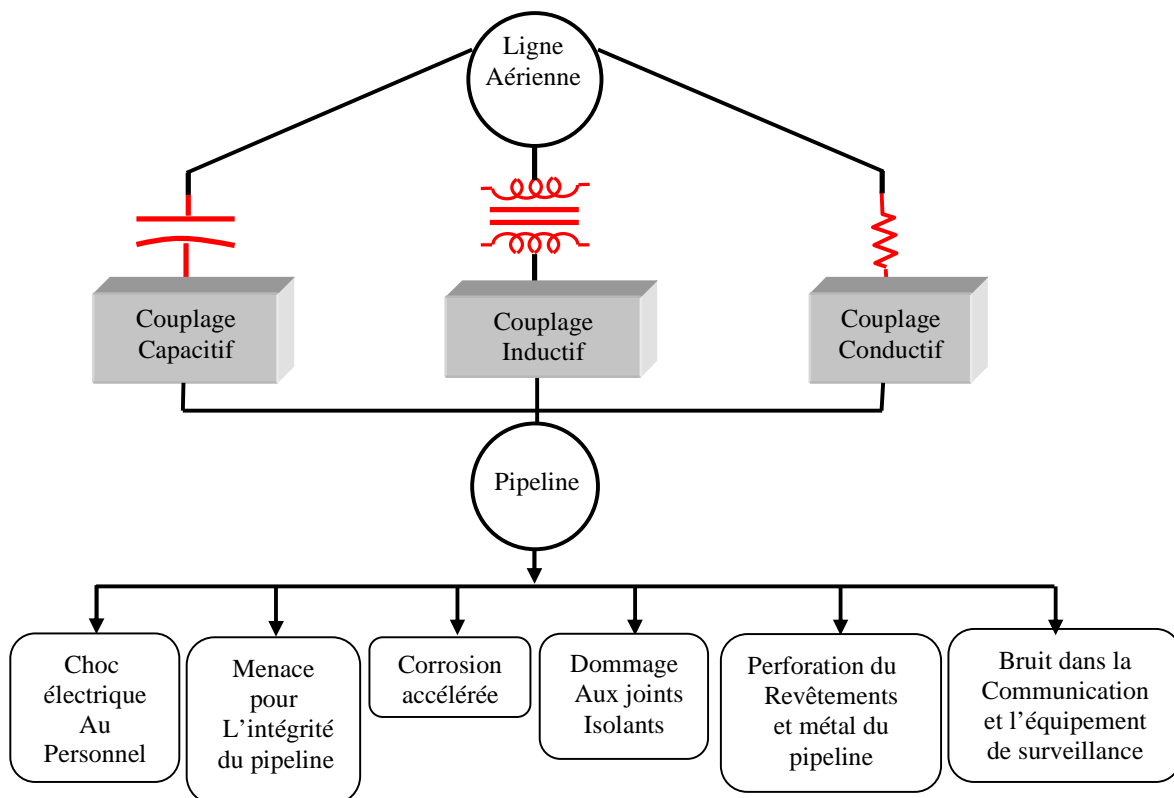


Figure II-9: Mécanismes et effets d'interférences sur le pipeline métallique

II.4.7. Corrosion des pipelines et moyens de protection

La longévité et la sécurité des pipelines en acier sont des éléments importants pour le transport et la distribution de gaz. Les canalisations en acier enterrées peuvent être exposées aux attaques liées à la corrosion par l'influence des courants alternatifs induits qui endommagent les réseaux. La corrosion de l'acier des pipelines est un phénomène électrochimique qui se manifeste sur les contacts du pipeline au sol qui l'entourent, elle entraîne une dégradation du matériau et de ses propriétés.

La norme EN 12954 2001 précise que dans le cas d'influences de longue durée du courant alternatif sur des structures métalliques, il est nécessaire de prendre en compte la possibilité d'une corrosion induite par le courant alternatif. Le risque de corrosion par courant alternatif est plus important sur de petits défauts que sur des grands. Dans ce cas la tension alternative produit un courant circulant de la canalisation à travers tout défaut de revêtement vers la terre [91].

La figure II-10 illustre cette situation. Ce courant alternatif entraîne une circulation d'électrons, ou un échange de courant entre le sol et le métal, il y a corrosion du métal. Cet échange de courant dépend de la tension induite sur les canalisations [92].

- L'amplitude de la tension induite est due à des paramètres divers tels que :
 - Distance entre les câbles de phase;
 - Distance entre la ligne électrique à haute tension et la canalisation;
 - Résistance du revêtement de la canalisation.

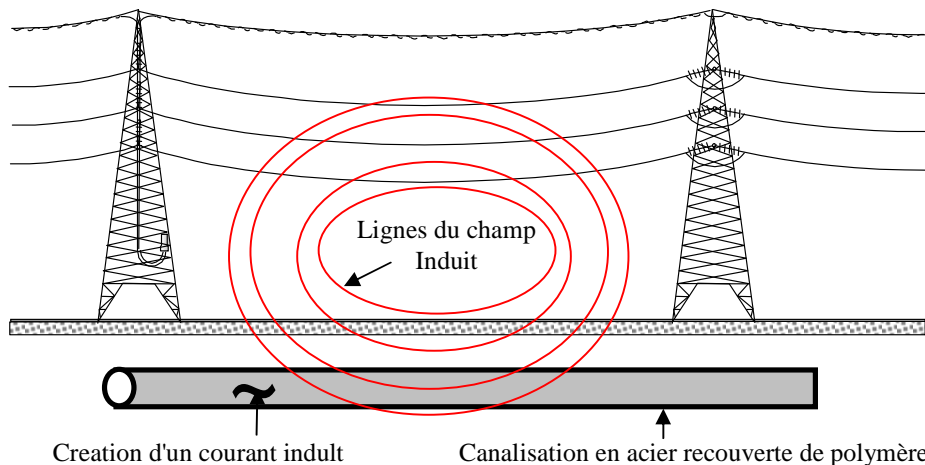


Figure II-10: Création d'un courant alternatif induit dans un pipeline parallèle à une ligne HT

La corrosion est principalement influencée ou associée à [92]:

- La densité de courant alternatif;
- La dimension du défaut de revêtement;

- La résistivité locale du sol;
- La composition chimique locale du sol;

La probabilité d'une corrosion peut être:

Lorsque la densité de courant alternatif est inférieure à 20 A/m², la probabilité de courant alternatif à la corrosion est négligeable; lorsque la densité de courant alternatif est comprise entre 20 et 100 A/m², le risque de corrosion par courant alternatif est moyen, et il est conseillé de poursuivre les investigations. Lorsque la densité de courant alternatif est supérieure à 100 A/m² la probabilité de courant alternatif à la corrosion est élevée et des mesures immédiates de remédiation doivent être prises [92,93,94].

Un exemple de ce phénomène est présenté en figure II-11[95].



Figure II-11 : Corrosion d'un pipeline situé à proximité des lignes de transport HT

Pour accroître la durée de vie et protéger les canalisations en acier potentiellement soumises à l'action corrosive, en combinant deux types de protections complémentaires couplées l'une à l'autre pour garantir une bonne protection des canalisations.

- La protection par couche organique dite protection passive.
- La protection cathodique dite protection active [96].

II.4.7.1. La protection passive

La protection passive consiste soit à agir sur le métal en utilisant un revêtement sur les canalisations enterrées en acier de transport, afin de le soustraire du réactif ou à agir sur le milieu (l'électrolyte) par faible addition d'inhibiteurs de corrosion. Il est important de savoir que l'efficacité de ce type de revêtement repose sur l'absence de défaut, mais en pratique cela est quasi impossible (voir figure II-12).

L'on exige d'un revêtement les caractéristiques suivantes:

- Une résistance d'isolement élevée pour présenter sous l'épaisseur d'application une résistance électrique convenable.
- Une excellente adhérence avec le métal, pour éviter toute propagation d'un défaut (fissure) de continuité accidentel.
- Une étanchéité, continuité et homogénéité satisfaisante, pour ne pas être envahie par le milieu environnant.
- Présenter une résistance assez élevée aux agents biologiques et aux produits transportés.

Au fil des années, les différents types de revêtements protecteurs utilisés ont considérablement évolué. Les revêtements à base de liants hydrocarbonés (bitume et brai de houille), d'époxy (Fusion Bonded Epoxy), de polyuréthane, de Polypropylène, puis les revêtements épais en polyéthylène (bicouche et tricouche) extrudé se sont succédé comme couche protectrice externe, et de peinture sur acier pour les ouvrages aériens. [96,97].

Les revêtements comportent tout ou partie des composants suivants :

- Un primaire d'accrochage : produit de liaison entre la couche anticorrosive et le métal ;
- Une couche anticorrosive ;
- Une couche de protection mécanique complémentaire si nécessaire.

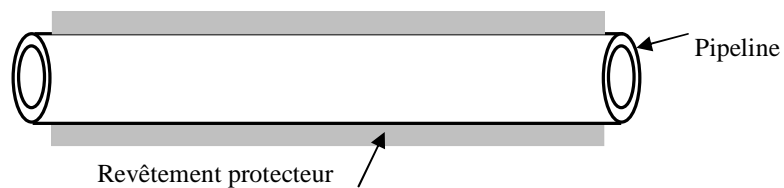
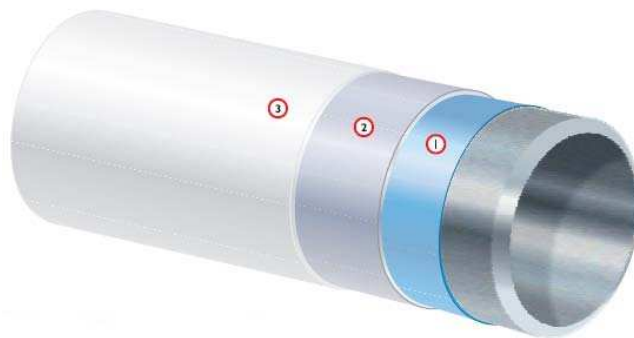


Figure II-12 : La protection passive par revêtement

Le cas d'un revêtement tri-couche d'un pipeline de tube PP est présenté en figure II-13.



- ① Epoxy (FBE) ② Copolymère adhésif ③ Couche externe de polypropylène

Figure II-13 : Revêtement d'un pipeline de tube PP (Polypropylène) tri-couche

II.4.7.2. La protection cathodique

Elle consiste à amener par des moyens extérieurs et artificiels l'ensemble de la surface extérieure du métal à un potentiel suffisamment négatif pour rendre le métal entièrement cathodique et supprimer ainsi tous risques de corrosion [93,96,97].

Pour rendre le potentiel du métal suffisamment négatif, il faut que l'interface métal électrolyte soit saturée d'électrons ; cela permettra d'empêcher le départ des cations métalliques positifs vers l'électrolyte, d'où la suppression de la réaction d'oxydation qui est responsable de la corrosion.

Dans le cas pratique cet objectif est atteint en faisant circuler un courant entre deux structures de telle sorte que ;

- Celle à protéger constitue la cathode ;
- Celle à sacrifier constitue l'anode.

Ceci étant, il faut savoir que la protection cathodique est caractérisée par certains paramètres dont:

- La nature des structures mises en jeux
- Le potentiel pris par la structure protégée
- L'intensité du courant injecté pour la protection
- La résistance électrique des éléments du circuit

La protection cathodique, peut être réalisée de deux manières:

- Par l'utilisation d'anodes sacrificielles galvaniques ;
- Par courant imposé.

II.4.7.2.1. Protection cathodique par anode sacrificielle

Le principe de la protection par anodes sacrificielles est de créer une pile électrique, par l'association, dans un même électrolyte, de deux métaux différents: le métal à protéger et un métal moins noble qui constitue l'anode sacrificielle. Si ces deux métaux sont raccordés l'un à l'autre par un circuit électrique, l'anode se sacrifiera au bénéfice de la cathode, l'anode se consomme par dissolution en portant la surface du métal à protéger au-delà de son potentiel d'immunité. La réalisation est schématisée dans la figure II-14 [96,97, 98,99].

II.4.7.2.2. Protection cathodique par courant imposé

La protection par courant imposé utilise un générateur extérieur en courant continu qui débite dans un circuit comprenant :

- Un déversoir (ou masse anodique),
- L'électrolyte (sol ou eau),

- La canalisation à protéger (la cathode).

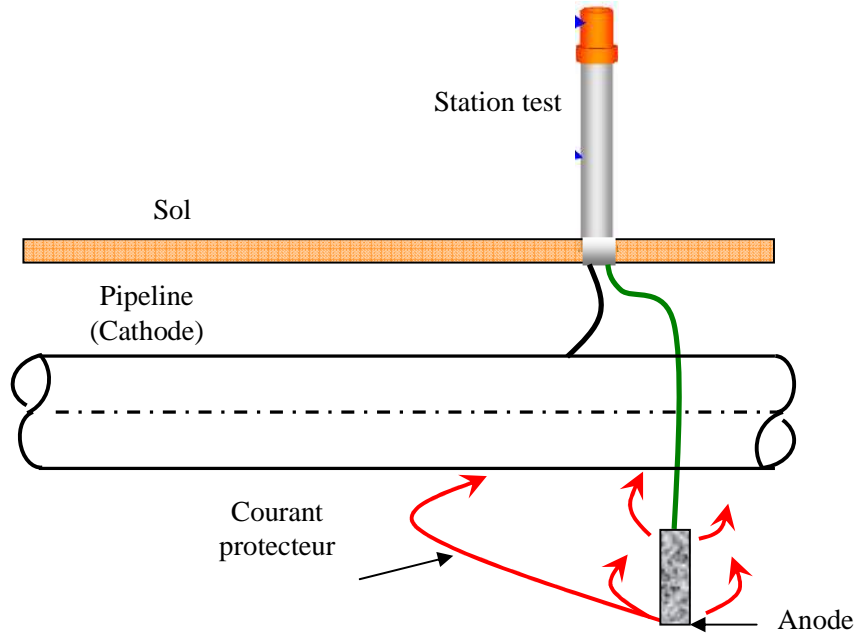


Figure II-14: Schéma simplifié de protection cathodique par anode sacrificielle

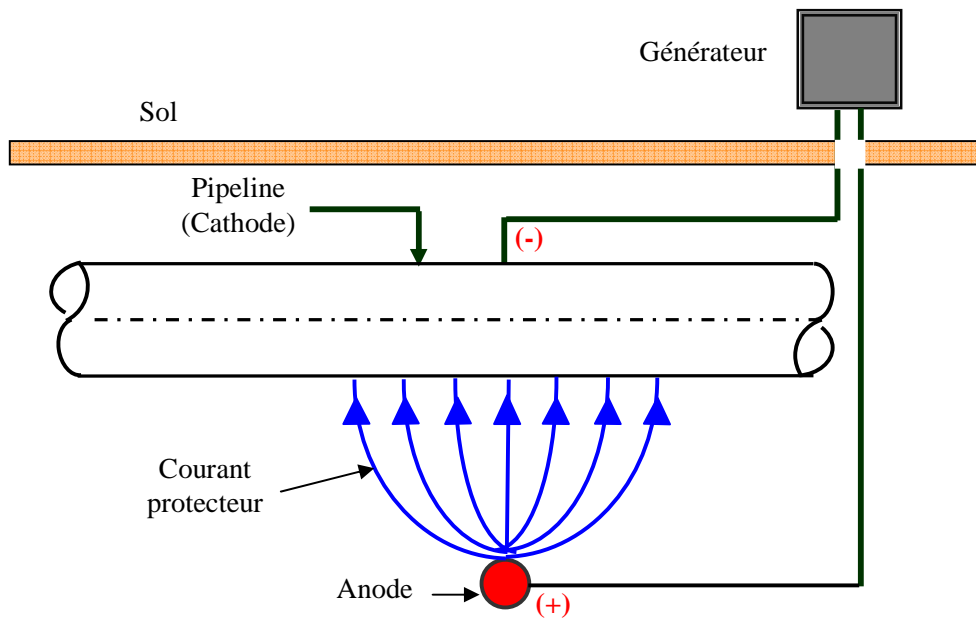


Figure II-15: Schéma simplifié de protection cathodique par générateur de courant

Le pôle positif du générateur est relié au déversoir (anode), alors que le pôle négatif est relié à la canalisation à protéger. Le courant venant du déversoir traverse l'électrolyte, puis entre

dans la structure créant ainsi un abaissement de potentiel électrochimique du métal en zone d'immunité électrochimique du métal. (Figure II-15) [96,97, 98,99].

II.5. Techniques d'atténuation des effets des perturbations électromagnétiques

Un système d'atténuation des perturbations électromagnétiques doit atteindre plusieurs objectifs visant à protéger la canalisation métallique. Dans des conditions d'exploitation sévères, même en cas de défaut, du réseau électrique, le potentiel de la canalisation enterrée par rapport au sol local doit être réduit à un niveau acceptable pour la sécurité des personnels exploitants et le public [30,57].

Le système d'atténuation doit également assurer que la tension de tenue de revêtement (l'enduit) du pipeline reste dans des limites acceptables pour éviter d'endommager le revêtement ou même l'acier du pipeline.

Les paragraphes qui suivent regroupent les techniques d'atténuations et les mesures de sécurité les plus courantes qui peuvent contrôler et maintenir la tension induite dans des limites recommandées par les normes, sur une canalisation métallique [30].

II.5.1. Distance de séparation entre la ligne électrique de transport et le pipeline

Cette mesure doit être considérée lors de l'installation d'un nouveau pipeline ou d'une nouvelle ligne à haute tension. Le déplacement du pipeline du centre de l'emprise de la ligne électrique (Right-of-way) réduit le niveau de la tension induite, due au couplage capacitif, inductif et conductif, sur le pipeline. Il a été constaté que cette mesure n'est pas généralement utilisée pour atténuer les effets du couplage capacitif car une simple mise à la terre de la canalisation, peu coûteuse, est efficace. Pour le couplage inductif, cette technique entraîne une légère réduction, car la variation de l'inductance mutuelle en fonction de la distance de séparation est faible. L'augmentation de la distance de séparation est particulièrement adaptée pour le couplage conductif à proximité des pylônes hauts tension, où une augmentation raisonnable peut surmonter la plupart des problèmes [17,30,57].

II.5.2. les mesures appliquées aux lignes électriques de transport

II.5.2.1. Mise à la terre

Un réseau de terre est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol et reliés électriquement entre eux. Un réseau de terre a pour fonction d'assurer l'écoulement à l'intérieur du sol des courants de chocs de toutes origines, et pour but de réduire l'élévation du potentielle du sol à proximité des pylônes et la tension due à un couplage inductif

au cours d'un défaut à la terre. La plupart des lignes haute tension sont équipées de deux câbles de garde raccordés à la terre [30,57].

II.5.2.2 Transposition des conducteurs de phase

Dans un système transposé, chaque phase occupe l'emplacement des autres phases pour un tiers de la longueur total de la ligne comme montré dans la figure II-16. Une transposition régulière des conducteurs de phase sur les pylônes, permet de réduire les tensions induites en régime triphasé équilibré pour un couplage capacitif ou inductif, lorsque le pipeline aérien est pratiquement parallèle à la ligne électrique. L'efficacité est très limitée pour un pipeline enterré, parce que la longueur caractéristique du pipeline est généralement inférieure à la distance entre les points de transposition [30,57].

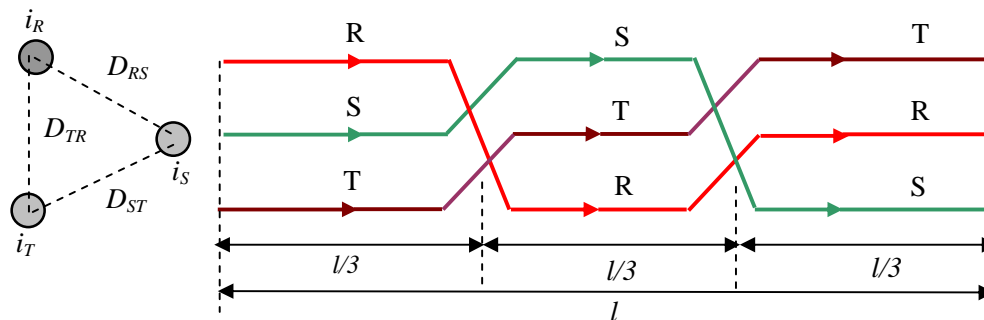


Figure II-16: Transposition d'une ligne électrique de transport HT

Donc la manière "la moins coûteuse" pour réduire la tension induite est de transposer les conducteurs de phases, ce qui signifie changer physiquement la position du conducteur de phase sur le pylône à haute tension, trois fois au moins, dans une zone d'interférence. Cette mesure inclut :

- Configuration géométrique des phases R, S, T sur le pylône ;
- Configuration géométrique des câbles de garde ;
- Emplacement des pylônes de transposition.

II.5.3. Les mesure appliquées aux pipelines

II.5.3.1. Mise à la terre du pipeline avec des électrodes de terre

Une méthode très courante, afin de réduire les tensions induites par couplage capacitif et inductif, est de relier le pipeline à la terre à l'extrémité de la longueur de l'exposition ou à différents endroits dans la zone d'influence. Cette méthode fonctionne bien pour le couplage capacitif, mais pour parvenir à une atténuation efficace aux interférences inductives, de

nombreuses prises de terre à faible résistance sont généralement nécessaires à des endroits bien définis.

L'intérêt de la méthode est donc limité à des zones où la résistivité du sol est élevée. Lorsque les mesures de protection ne concernent que des interférences produites par des défauts de courte durée, des mises à la terre peuvent être réalisées par un élément non linéaire (éclateur, parafoudre,...) [30,57].

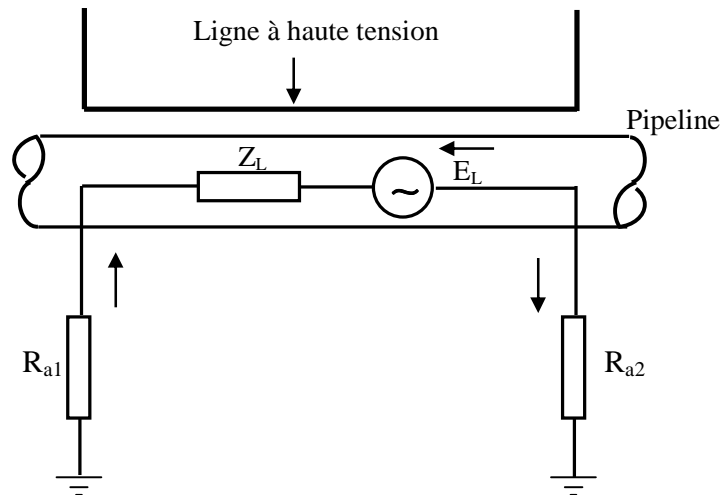


Figure II-17: Circuit équivalent d'un pipeline enterré en interférence avec une ligne électrique à haute tension

La mise à la terre correspond à une réduction de résistance de recouvrement de la canalisation. La figure II-17 en indique le principe.

Z_L signifie l'impédance par unité de longueur du pipeline, E_L la force électromotrice induits par unité de longueur. Dans cette figure, la résistance du revêtement et les sections de pipeline dépassant le cheminement parallèle avec la ligne à haute tension sont négligés. L'impédance d'un pipeline en acier est de l'ordre de 0,5 Ω /km pour des fréquences industrielles de 50 Hz [86].

A la fin du cheminement parallèle, le pipeline est mis à la terre avec des résistances :

$$R_{a1} = R_{a2} = R_a \quad (\text{II.5})$$

U est la tension entre le pipeline et la terre éloignée nécessaire à la réalisation de la réduction de tension de courant alternatif induite aux tensions de contact admissibles est selon la figure II-17 :

$$\frac{U}{R_a} = \frac{E_L}{2.R_a + Z_L} \quad (\text{II.6})$$

U est la tension entre le pipeline et la terre éloignée.

$$U = \frac{E_L}{2 + Z_L/R_a} \quad (\text{II.7})$$

En général, ce moyen présente une bonne et efficace solution du point de vue du coût, mais des problèmes peuvent apparaître dans des sols à haute résistivité dus à une grande résistance de la mise à la terre.

II.5.3.2. La prise de terre localisée

La méthode la plus simple pour réduire le niveau d'interférences électriques alternatives dans un pipeline est de le connecter à la prise de terre à des endroits stratégiques, la prise de terre rejoint la terre via un conducteur qui peut être assez long. Cette technique connue sous le nom de «méthode de la force brute». Elle vise à protéger le pipeline à la fois dans des conditions d'équilibre et de défaut dans le réseau. La résistivité du sol dans la zone peut affecter la taille de l'électrode nécessaire de manière significative. Même que cette méthode fonctionne bien pour les systèmes d'atténuation avec les exigences de faible impédance et une résistivité du sol très basse. Dans de nombreux cas pratiques cette méthode est peu pratique et très coûteuse [30,57].

II.5.3.3. Utilisation de joints isolants

En principe une réduction de la tension induite peut être réalisée en utilisant des joints isolants, qui sont installés pour interrompre la conductibilité électrique longitudinale des pipelines métallique, et en subdiviser le pipeline en plusieurs sections isolées électriquement à l'intérieur d'une longue zone d'influence de telle sorte que la tension induite ne peut pas atteindre des niveaux élevés, car la force électromotrice dans le pipeline est proportionnelle à la longueur de cheminement parallèle, comme l'indique la figure II-18. La terre locale est alors reliée au pipeline sur chaque côté du joint isolant. Chaque électrode de terre est connectée au pipeline à travers un inverseur de surtension, qui ne fonctionne que lorsque la tension dans le pipeline est supérieure à son niveau de claquage. Avec cette méthode, le pipeline est protégé contre les courants vagabonds qui peuvent causer la corrosion et les courants de protection cathodique sont empêchés de la fuite. L'utilisation de joints isolants semble une technique efficace pour l'atténuation des tensions induites dans les pipelines en cas d'interférence inductive [30,55,57,92]. La figure II-19 schématise un joint isolant de type à brides.

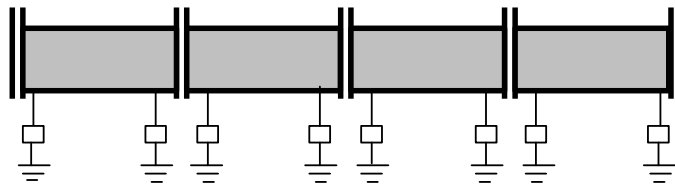


Figure II-18: Utilisation des joints isolants

II.5.3.4. Isolation renforcée du revêtement

Une amélioration du revêtement isolante du pipeline peut être utilisée pour éviter les problèmes dus au couplage conductif dans la proximité d'un pylône. Il peut être obtenu par:

- Augmentation de l'épaisseur d'isolation du revêtement (l'enduit) ou l'utilisation de matériau de revêtement ayant une résistivité plus élevée.
- Placer le pipeline à l'intérieur d'une gaine isolante.

La longueur de l'isolation améliorée doit être définie en termes de l'élévation du potentiel de terre locale [30,57].

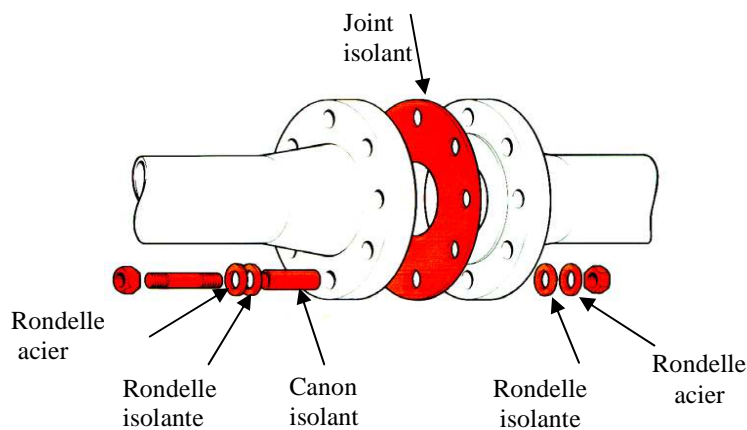


Figure II-19: Joint isolant à brides

II.5.3.5. Câble de terre parallèle au pipeline

La méthode du conducteur de terre d'atténuation a été développée dans les années 1980 dans le cadre d'une série de projets de recherche EPRI / AGA. Il se compose d'un long conducteur enterré en parallèle à la ligne de transmission dans toute la zone d'influence, posé souvent sur le côté de la ligne de transmission et opposé à la canalisation enterrée, c'est à dire la ligne de transmission est située entre le pipeline et le fil enterré d'atténuation. En reliant une extrémité du fil d'annulation à la canalisation, le courant induit dans ce conducteur parallèle produit dans le pipeline une force électromotrice qui compense partiellement la force électromotrice produite par

ligne à haute tension lorsque l'autre extrémité du conducteur est laissé libre. Ces conducteurs sont en aluminium, acier, plomb ou cuivre. Ils ont une perméabilité et permittivité relatives égales à 1

L'efficacité dépend de la résistance du conducteur et de la distance séparant le pipeline et le conducteur. La réduction par un facteur de 2 est possible avec un conducteur en cuivre ayant une section transversale d'environ 50 mm². Le problème avec cette méthode est celui qu'elle annule seulement la composante inductive des courants de défaut et il peut transférer des tensions excessives à son extrémité libre [30,55,57,92].

II.5.3.6. Conducteur de contrôle du gradient

La dernière méthode pour atténuer les tensions induites sur les pipelines est l'utilisation du fil de contrôle du gradient. Il se compose d'un ou deux fils de zinc enterrés parallèlement au pipeline, avec des connexions électriques régulières au pipeline. Un exemple avec deux fils est représenté sur la figure II-20.

Les connexions doivent être réalisées à travers des parafoudres, comme dans le cas de joints isolants. Deux joints isolants sont également présents au début et à l'extrémité de la canalisation. Il est un moyen très efficace pour atténuer les potentiels excessifs de pipelines dus à la fois aux interférences inductives et conductives [55].

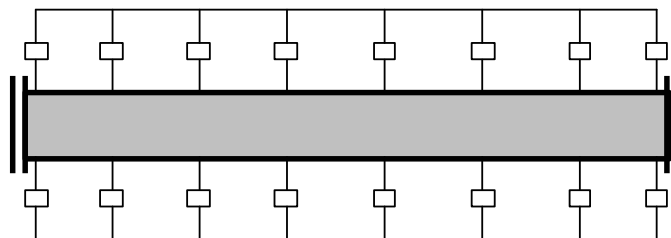


Figure II-20 : Utilisation du conducteur de contrôle du gradient

II.6. Normes de sécurité

Plusieurs normes internationales de sécurité pour le personnel fournissent une méthodologie pour déterminer les tensions maximales acceptables de pas et de contact.

La tension de pas, est la différence de potentiel mesurée entre deux points sur la surface du sol séparé par une distance d'un pas, environ 1m dans la direction de gradient de potentiel maximal. Le courant passe d'un pied à l'autre (figure II-21).

La tension de contact, est définie comme la différence de potentiel entre deux parties pouvant simultanément être touchées, une structure métallique et un point situé sur la surface du

sol, dans le cas d'un défaut d'isolement, séparés par une distance égale à la portée maximale horizontale, environ 1m (figure II-22).

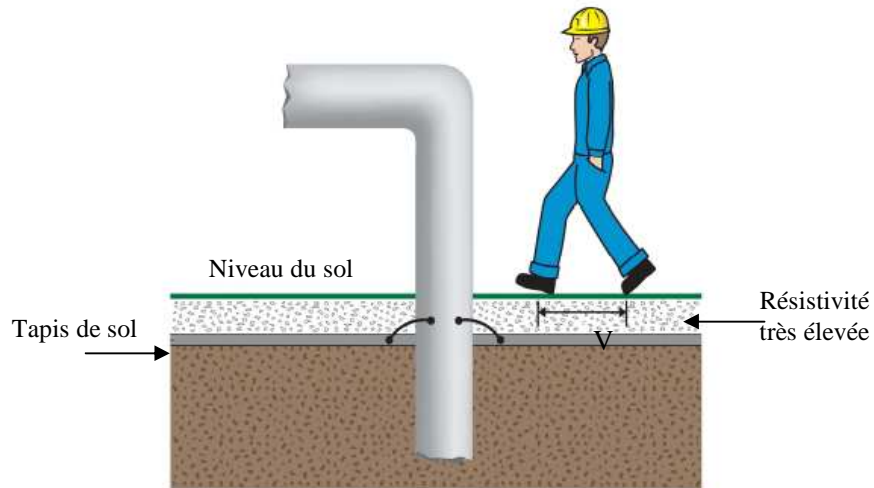


Figure II-21: Tension de pas

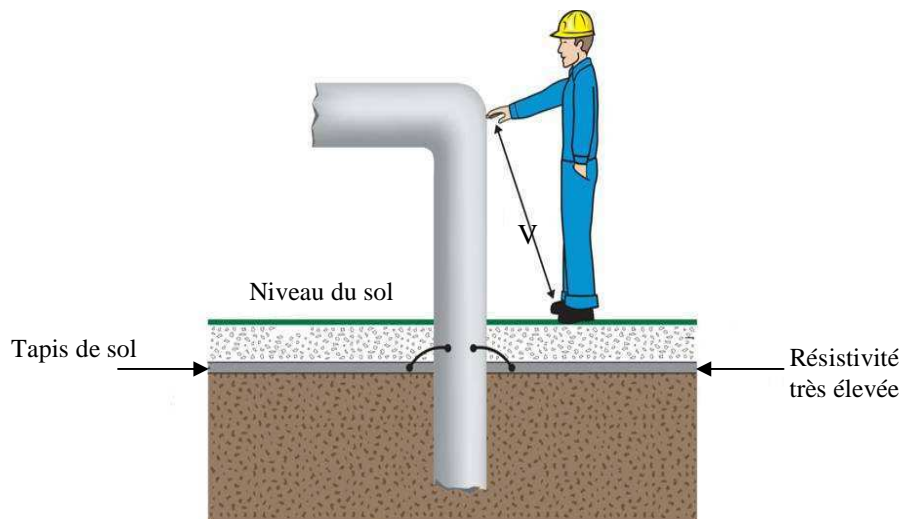


Figure II-22: Tension de contact

Le poids corporel influence le calcul de ces tensions. Les tensions admissibles de contact et de pas conformes aux pratiques normalisées décrites dans la norme IEEE Standard 80-2000 sont données ci-dessous pour deux références 50kg et 70kg [100.101].

Pour un poids corporel de 70kg nous avons :

$$V_{\text{pas70}} = \frac{(1000 + 6 \times C_s \times \rho_s) \times 0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{II.8})$$

$$V_{\text{contact 70}} = \frac{(1000 + 1.5 \times C_s \times \rho_s) \times 0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{II.9})$$

Pour un poids corporel de 50kg nous avons :

$$V_{\text{pas50}} = \frac{(1000 + 6 \times C_s \times \rho_s) \times 0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{II.10})$$

$$V_{\text{contact 50}} = \frac{(1000 + 1.5 \times C_s \times \rho_s) \times 0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (\text{II.11})$$

Où:

C_s : Le coefficient de déclassement dû à la présence de matériaux à haute résistivité (gravier) à la surface du sol, il est calculé grâce à l'équation suivante :

$$C_s = 1 - 0.09 \left[\frac{1 - (\rho / \rho_s)}{2 \times h_s + 0.09} \right] \quad (\text{II.12})$$

t_s : est la durée d'écoulement du courant de défaut en secondes.

ρ : la résistivité du sol, .m

ρ_s : représente la résistivité du sol près de la surface ;

h_s : l'épaisseur du matériau de surface en m.

L'objectif principal est de protéger toute personne susceptible de travailler sur le pipeline ou un circuit électrique contre un danger d'électrocution

Par exemple, la norme NACE RP0177-001 considère un courant alternatif de tension de pas ≥ 15 V ou un courant disponible ≥ 5 mA à un risque de choc électrique. Les tensions et les courants supérieurs à ce niveau nécessitent une atténuation, ou une preuve que le risque de choc électrique n'existe pas [67,102,103]. Dans la norme CEI 60479-1:2005 ce courant seuil passe aux valeurs : 10mA pour les hommes adultes et 5mA pour toute la population d'adultes (hommes et femmes) et les enfants. La norme canadienne CAN / CSA C22.3 n° 62 considère également ce niveau dangereux. La norme ANSI / IEEE 80 fournit des critères de sécurité liés à la fibrillation cardiaque. Les limites de sécurité sont inversement proportionnelles à la durée de défaut et directement proportionnelle à la résistivité de surface. Plusieurs normes sont fixées par leurs pays pour fournir leurs propres limites de sécurité [67,102,103].

Généralement il n'y a pas de consensus mondial sur le niveau de tension de contact maximale de sécurité. La tension de contact maximale admissible est définie dans les différents pays avec différentes façons, allant de 200 V jusqu'à 1700 V en fonction de la durée maximale de défaut. Des valeurs plus élevées sont appliquées uniquement en Australie (1500 V) et au Brésil (1700 V). Un tableau (annexe A) indique les différents pays et les normes pour le niveau maximum admissible de tension de contact [67,102,103].

II.7. Conclusion

La nécessité de réseau de lignes aériennes à haute (HT) et très haute tension (THT) pour le transport de l'énergie électrique sur de longues distances, depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation est importante. Ces lignes génèrent des interférences électromagnétiques et donnent lieu à des perturbations dans leur voisinage immédiat qui peuvent avoir des effets indésirables sur les objets conducteurs (métalliques) ou sur les organismes vivants dans cet environnement. Les effets dus aux champs électromagnétiques d'une ligne de transport d'énergie HT sur des canalisations métalliques de transport de gaz, d'hydrocarbures ont été rappelés. Ces influences des lignes électriques HT peuvent résulter de trois couplages prédominants que sont les couplages capacitif, inductif et conducteur. De nombreuses méthodes et techniques d'atténuation de ces interférences ont été présentées. Elles visent à réduire considérablement les perturbations électromagnétiques à des niveaux acceptables de sécurité selon les recommandations des normes locales et internationales.

CHAPITRE III

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

III.1. Introduction

La proximité des lignes électriques de haute tension et des ouvrages de transport de gaz est parfois inévitable pour des raisons de densité d'encombrement du sol. Cependant, l'énergie électrique peut être transférée à partir de lignes de transmission de puissance aux pipelines par couplage capacitif, inductif et conducteur.

Quand une ligne de transport fonctionne en parallèle avec un pipeline d'une longueur considérable, des tensions induites alternatives peuvent apparaître sur le pipeline.

Bien qu'il existe des avantages significatifs en partageant un corridor entre les pipelines et les lignes de transport d'électricité, par exemple l'utilisation des terrains communs, il y a un risque d'interférences électriques, tel que :

- un choc électrique pour l'opérateur et le personnel en contact avec les pipelines ;
- les effets directs sur le pipeline : le claquage du revêtement de la canalisation et la corrosion de l'acier,
- les effets sur les appareils électriques associés au pipeline liés à la protection cathodique, au comptage et à la surveillance.

L'étude et l'évaluation des interférences électromagnétiques s'avèrent nécessaire pour assurer une sécurité efficace pour les personnels et les biens [2].

Le présent chapitre vise à décrire la modélisation électrique utilisée pour représenter et quantifier l'interférence capacitive à l'état d'équilibre. Cette modélisation comprend, la méthodologie de calcul du champ électrique (avec et sans la présence du pipeline) basée sur la méthode des charges fictives. Ce procédé est combiné avec une technique d'optimisation de l'algorithme génétique (GA) afin de déterminer la position et le nombre optimal de charges fictives ainsi que les points de contour.

Dans la méthode des charges fictives, le champ électrique réel est simulé avec un champ constitué par un certain nombre de charges discrètes placées à l'intérieur des conducteurs.

On évalue aussi le potentiel électrique induit dans le pipeline, le courant circulant dans le corps humain, potentiellement en contact avec les pipelines, et les techniques d'atténuation des effets électriques indésirables.

Afin de valider l'approche utilisée, une autre méthode, basée sur la technique de la matrice des admittances est proposée pour vérifier l'efficacité du programme de calcul développé.

III.2. la méthode des charges fictives (méthode de simulation des charges)

La méthode de simulation de charges, en raison de ses caractéristiques favorables a été employée avec succès pour résoudre une variété de problèmes de calcul de champ électrique.

En conséquence, cette méthode s'est transformée en un outil très puissant et efficace pour calculer les champs électriques des dispositifs de haute tension et dans les systèmes d'isolation à haute tension. On introduit brièvement, dans ce qui suit, la méthode des charges fictives [104,105].

III.2.1. Principe de base de la méthode

Le principe de base de la méthode des charges fictives est très simple. Si plusieurs charges discrètes de tout type (par exemple la charge, ponctuelle, linéique de longueur infinie où finie, annulaire) sont présentes dans une région, le potentiel électrostatique à un point quelconque C peut être trouvé par l'addition des potentiels résultant des différentes charges.

Soit q_j un certain nombre de n charges, le potentiel V à un point quelconque C dans l'espace. Selon le principe de superposition, une relation peut être trouvée entre le potentiel et le nombre des charges de simulation:

$$V_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} q_j \quad (\text{III.1})$$

Où P_{ij} , sont les coefficients de potentiel, qui peuvent être évalués analytiquement pour plusieurs types de charges.

Ainsi, une fois que les types des charges et de leurs emplacements sont définis, il est possible de relier V_i et q_j quantitativement à tout point de contour. Dans la méthode des charges fictives (MCF), les charges de simulation sont placées en dehors de l'espace dans lequel la solution du champ est désirée (ou à l'intérieur de n'importe quelle surface équipotentielle telle que des électrodes). Si le point C de contour, est situé sur la surface d'un conducteur, alors V_i à ce point de contour est égal au potentiel V du conducteur. Quand cette procédure est appliqué à m points de contour, elle conduit au système suivant de m équations linéaires et pour n charges inconnues [104,105,106].

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \cdots & P_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

III.2.2. Détermination des valeurs des charges de simulation

La méthode des charges de simulation est basée sur une distribution optimale des charges de simulation à l'intérieur du volume occupé par l'électrode. Ces charges seront placées de manière à ce que leur effet intégré satisfasse aux conditions de type Dirichlet.

Pour déterminer la matrice des charges de simulation, on est obligé de connaître le potentiel dans le point P_i . Pour cette raison on peut ramener le point P_i sur le contour du conducteur pour avoir le même potentiel puisque ce dernier est connu.

L'application de l'équation (III-1) pour un nombre de points d'un contour choisis dont les potentiels V_{ci} sont connus, nous permet d'établir la forme matricielle suivante :

$$[q_j] = [P_{ij}]^{-1} \cdot [V_{ci}] \quad (\text{III.3})$$

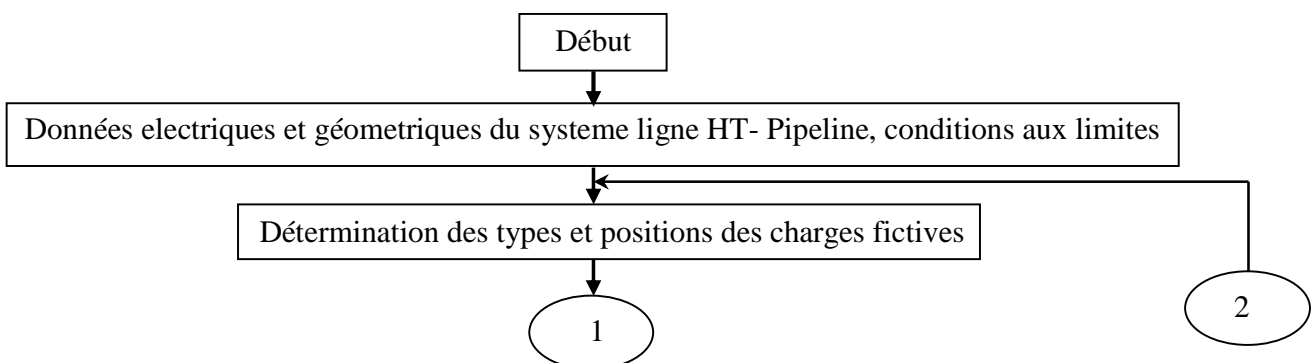
III.2.3. Evaluation de la précision

Après avoir déterminé les valeurs des charges de simulation d'après la résolution du système matriciel de l'équation (III.2), on choisit alors n autres points de vérification situés aussi sur le contour des conducteurs. On calcule à nouveau les potentiels V_{vi} donnés par les charges q_j .

L'écart entre le potentiel calculé V_{vi} et le potentiel réel V_{ci} auquel est soumise le conducteur actif au point P_{ci} représentera la précision du calcul [104,105,106].

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{n_t} \left| \frac{V_{ci} - V_{vi}(n_t, r_f)}{V_{ci}} \right| \cdot 100 \quad (\text{III.4})$$

La simulation est acceptable si cette valeur est inférieure à la précision souhaitée de la simulation, sinon il faudra répéter les calculs en modifiant un ou plusieurs paramètres, tels que le nombre et la localisation des charges de simulation. Les étapes de la méthode des charges fictives sont résumées dans l'organigramme de la figure III-1 ci-dessous.:



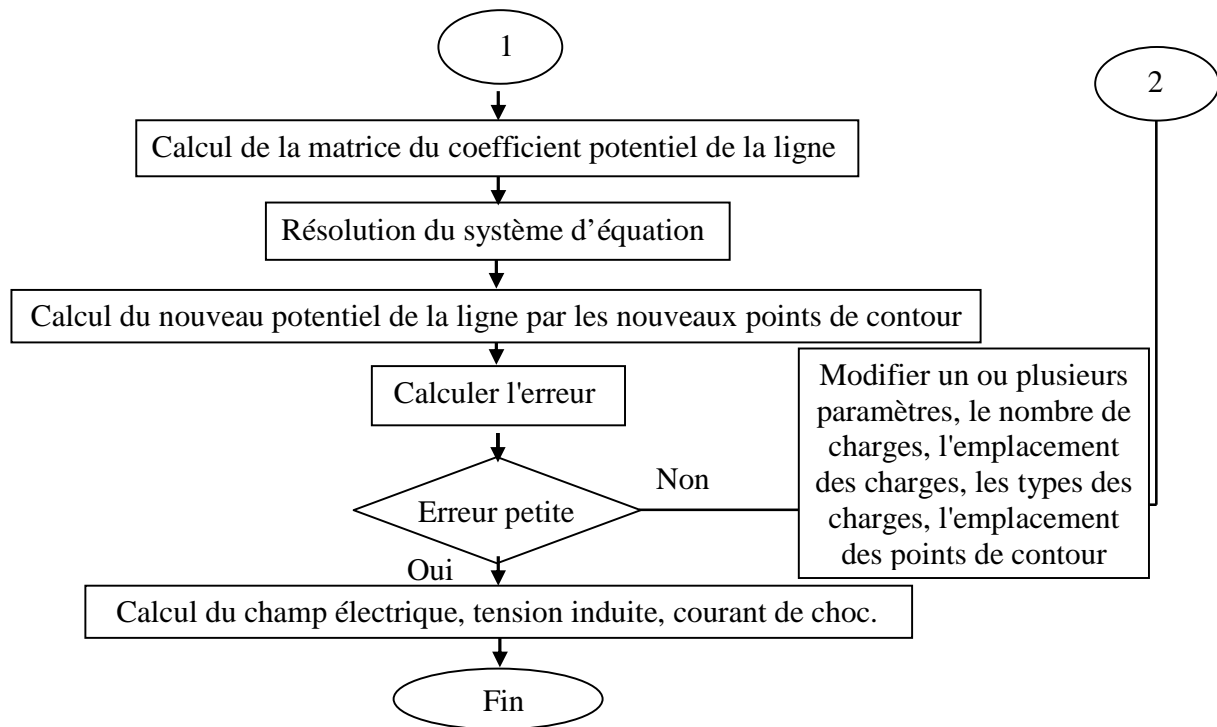


Figure III-1: Organigramme de calcul utilisant la méthode de simulation des charges

III.3. Technique des Algorithmes Génétiques

Un grand nombre de méthodes ont été développées pour tenter d'apporter une réponse satisfaisante aux problèmes d'optimisation multi objectifs. Parmi lesquels, on peut citer les essais de particules, les systèmes immunitaires et les algorithmes évolutionnaires. Ces méthodes sont des heuristiques capables d'approcher efficacement les solutions optimales d'un problème quelconque avec un temps de calcul raisonnable et en ayant un minimum d'adaptations à réaliser pour ce problème.

Dans ce travail, nous proposons l'algorithme génétique comme un outil d'optimisation flexible pour traiter les problèmes de l'emplacement des charges de simulation dans la méthode de calcul afin d'améliorer sa précision dans l'analyse du champ électrique.

III.3.1. Introduction

Dans la méthode des charges fictives, le choix des positions optimales des charges fictives présente une difficulté majeure pour cette méthode, qui a une influence considérable sur la précision de la méthode. Dans le cas général, la détermination de la position et du nombre des charges fictives se base sur l'expérience de l'utilisateur de cette méthode. Néanmoins, il existe certaines relations empiriques permettant d'optimiser ces emplacements dans certains cas de

figures simples [107]. Dans les années récentes, pour résoudre les problèmes d'optimisation, les algorithmes génétiques (AG) sont souvent utilisés comme des excellents outils et méthodes de recherche très efficaces. En conséquence, une disposition appropriée des charges de simulation et des points de contour sont nécessaires pour avoir un résultat plus précis pour l'analyse du champ électrique.

III.3.2. Algorithmes Génétiques

Un algorithme génétique est une technique de recherche et d'optimisation stochastique qui imite l'évolution biologique comme une stratégie de résolution de problèmes. Il a été inventé par John Holland de l'Université du Michigan dans l'année 1960 et il a été développé plus tard par Goldberg. Dans les algorithmes génétiques, les solutions du candidat au problème donné sont analogues aux individus dans une population. Chaque individu est codé comme corde, appelée chromosome. Un algorithme génétique de base comporte quatre composantes principales: les chromosomes, la fonction de remise en forme, l'opérateur de croisement et l'opérateur de mutation. Les solutions candidates sont représentées par des chromosomes. Des nouvelles solutions de candidat sont produites à partir des chromosomes de parent par l'opérateur de croisement. Les chromosomes des parents peuvent être sélectionnés par la technique de la roulette. L'opérateur de mutation sera ensuite appliqué à la population et en ce moment une génération ou itération est terminée. Les nouveaux chromosomes dans une population sont évalués par leur aptitude mesurée grâce à une fonction de remise en forme (fitness function).

Quand un chromosome avec la forme physique désirée est formé, il sera considéré comme la solution optimale et le processus d'optimisation est terminé. Dans le cas contraire, le processus est répété jusqu'à ce que le nombre maximum des générations soit atteint et le chromosome le plus convenable, ainsi formé, sera choisi comme solution optimale [108, 109,110].

III.3.3. Organigramme d'un Algorithme Génétique

Les étapes de l'algorithme consistent donc à faire évoluer une population initiale, de façon à ce que les individus soient de plus en plus adaptés au fil des générations.

1. Initialement une population (un ensemble de solutions) est choisie au hasard.
2. Chaque individu (ou chromosome s'il n'y a qu'un seul chromosome par individu) voit son indice d'adaptation (fitness) évalué.
3. Une nouvelle population est créée pour la génération suivante en réitérant les étapes suivantes jusqu'à ce que celle-ci soit complète :
 - Sélection de 2 parents de la population dépendant de leur fitness.

- Croisement (Crossover) d'après un taux de croisement. S'il y a croisement, 2 enfants sont produits, sinon les parents sont conservés tel quel dans la génération suivante. Le taux de croisement est en général élevé (70%).
 - Mutation d'un individu par modification d'un locus (position dans le chromosome) de son chromosome d'après un taux de mutation (en général très faible 1%).
4. Cette nouvelle population remplace l'ancienne.
 5. L'algorithme s'arrête si le critère d'arrêt est atteint et renvoie la meilleure solution (le meilleur individu) de la génération sinon l'algorithme reprend à l'évaluation de la fitness (Retour à l'étape 2).

III.3.4. Application de l'algorithme Génétique combiné avec la méthode des charges fictives

L'algorithme Génétique a été précédemment appliqué, avec succès au domaine de la haute tension dans plusieurs travaux [111, 112, 113, 114]. Dans cette partie, on essaye d'appliquer la technique de l'algorithme Génétique en combinaison avec la méthode des charges fictives pour déterminer automatiquement les emplacements optimaux des charges de simulation, afin de calculer avec précision le champ électrique des lignes aériennes à haute tension.

La séquence de l'algorithme AG-MCF proposée est la suivante [111]:

1. Déterminer le domaine pour les paramètres d'optimisation.
2. L'algorithme Génétique génère des valeurs aléatoires uniformes initiales pour les paramètres d'optimisation
3. Pour chaque appel à la routine de la méthode MCF par l'AG, la méthode MCF produit l'erreur de simulation pour cet ensemble de paramètres d'optimisation.
4. L'algorithme Génétique évalue la fonction de remise en forme, selon l'équation (III.4), et modifier les paramètres d'optimisation en conséquence de minimiser l'erreur de simulation.
5. Étapes 3 et 4 sont répétées pour un nombre prédéterminé des générations.

III.5. Calcul du couplage capacitif entre la ligne HT et le pipeline métallique

Les pipelines installés au dessus du sol sont soumis à un couplage capacitif avec les conducteurs de la ligne aérienne, comme illustré dans la figure III-2. Lorsque le pipeline est installé en parallèle avec les conducteurs de la ligne aérienne, cette exposition parallèle on l'appelle un parallélisme.

III.4.1. Application de la méthode des charges fictives pour le calcul du champ électrique

La méthode des charges fictives (MCF) est utilisée pour le calcul du champ électrique et de la tension induite due à un couplage capacitif, sur un pipeline métallique parallèle partageant le même couloir en dessous de la ligne de transport haute tension.

La présence des pipelines près des lignes haute tension modifie la distribution des charges sur les conducteurs de la ligne de transport, ainsi que sur la surface du sol et est également électriquement chargé.

La perturbation du champ électrique et du potentiel dû à la présence d'un pipeline sous la ligne électrique aérienne est simplement expliquée par le fait que, en présence d'un pipeline, la répartition des charges de surface sur les conducteurs de phases et les câbles de garde deviennent non uniformes. Le champ électrique au niveau du sol est fortement perturbé, en raison des charges extérieures accumulées sur le pipeline. La nouvelle distribution des charges dépendra des données géométriques de la ligne électrique et du pipeline, ainsi que la distance de séparation entre les lignes et le pipeline.

Pour cela nous nous sommes intéressés à évaluer le champ électrique et la tension induite, sur un pipeline se trouvant près de ces lignes, afin de quantifier le degré d'influence. L'analyse commencera par formuler le rapport entre le potentiel électrique des conducteurs de la ligne et la canalisation en terme de charges des conducteurs en utilisant le concept des coefficients de potentiel et les conditions aux limites [104, 105, 106].

III.4.2. Simplification de la géométrie longitudinale de la ligne électrique HT

On apprend, en mécanique rationnelle, que la courbe d'équilibre d'un fil pesant, homogène, inextensible, flexible, suspendu entre deux points fixes est une chaînette, autrement dit un cosinus hyperbolique. La chaînette est souvent assimilée à une parabole, ce qui simplifie les formules, et est valable pratiquement dans toutes les applications. La forme géométrique la plus juste d'un conducteur suspendu entre deux pylônes peut être décrite en sachant les paramètres tels que la distance entre les deux points de suspension, la flèche f , la hauteur minimale h_{\min} (à mi-portée) et la Hauteur maximale h_{\max} ((au voisinage du pylône)), comme présentée à la figure III-3. [104, 105]. L'équation de cette parabole est :

$$y = h_{\min} + f \left(\frac{2.Z}{L} \right)^2 \quad (\text{III .5})$$

Où:

f : la flèche de la ligne.

L : la longueur de la ligne.

Z : la position du conducteur autour de l'axe longitudinal z , pour une ligne symétrique, au voisinage du pylône ($z = \pm L/2$), à mi portée (au niveau de la flèche $z = 0$).

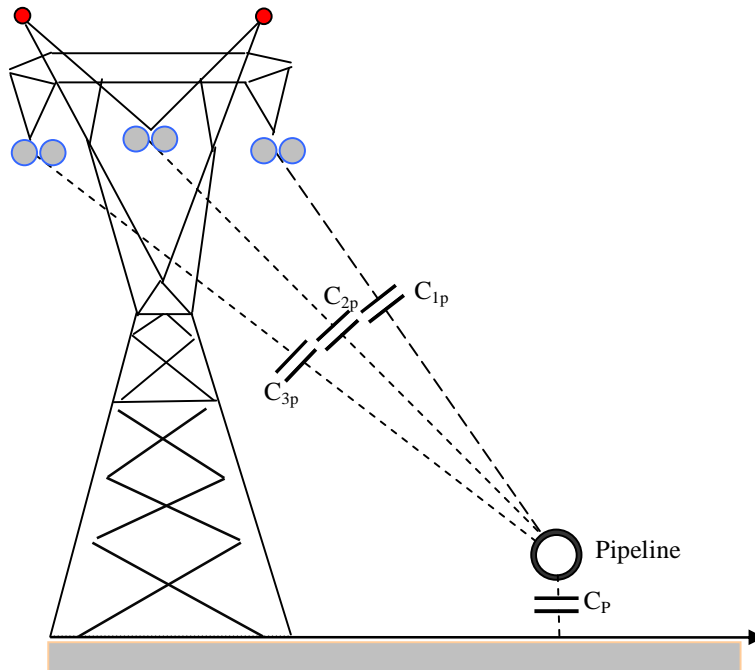


Figure III-2: Illustration du couplage capacitif entre une ligne aérienne et un pipeline

Ce calcul prend en considération les effets caténaux de la ligne. L'effet caténaire fait courber les conducteurs sous l'effet de leur propre poids. La symétrie se trouve à mi-distance entre les pylônes. La courbe dessinée par la ligne est supposée de forme parabolique.

Afin de simplifier la géométrie de la ligne électrique en annulant l'effet de chaînette, le fléchissement dû au poids de la ligne est négligé. Dans ce cas on introduit la notion de la hauteur moyenne entre la hauteur maximale et la hauteur minimale de la ligne, comme le montre l'équation ci-dessous [104,105].

$$h_{moy} = h_{max} - \left(\frac{2}{3}\right)f \quad (\text{III .6})$$

Où: h_{max} est la hauteur maximale ; f est la flèche de la ligne.

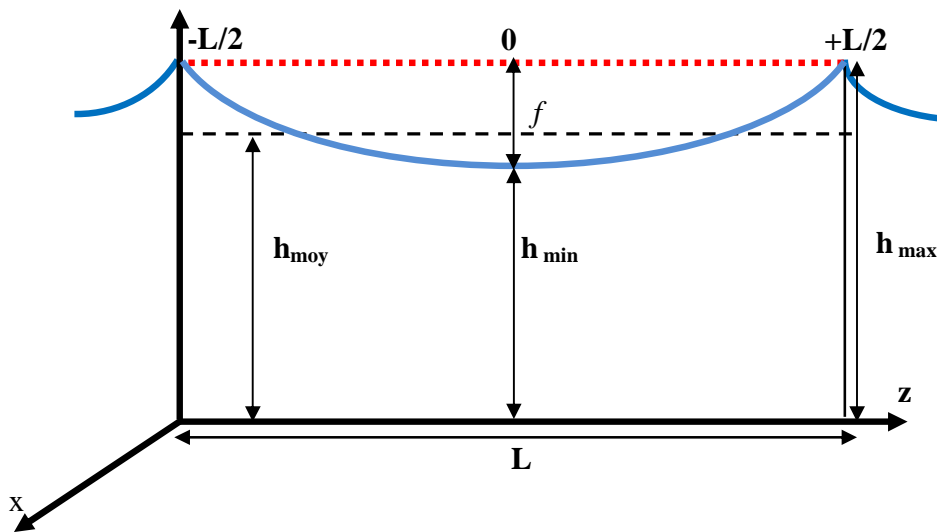


Figure III-3: Les dimensions d'une ligne électrique aérienne HT

III.4.3. Modélisation de la ligne aérienne HT et le pipeline par les charges fictives

Pour la ligne électrique, les charges sont simulées par un ensemble des charges linéiques infinies, d'un nombre n_c charges pour chaque phase, et n_g pour le câble de garde. Les charges surfaciques du pipeline, exprimées par un nombre n_p , sont modélisées par des charges infinies maintenues à l'intérieur de la périphérie du pipeline (à l'intérieur de l'épaisseur).

Notons qu'un nombre raisonnable des charges garantit une bonne précision de la simulation. Les images des charges de simulation sont également considérées en regard du plan de masse. La simulation des charges pour les conducteurs de la ligne et le pipeline est montrée dans la figure III-4.

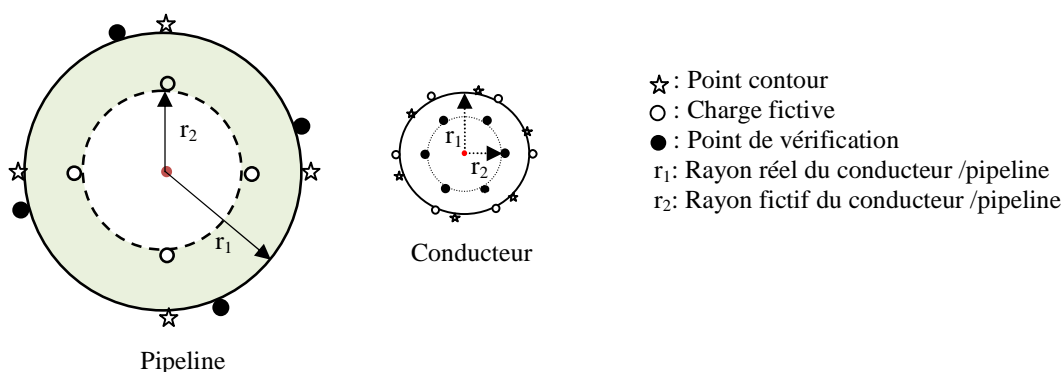


Figure III- 4: Distribution des charges dans un conducteur et un pipeline

Les coordonnées des charges et des points contours situés sur le pipeline ainsi que sur la ligne électrique sont donnés par les équations suivantes [104,105] :

$$\left. \begin{aligned} x_k &= x_{con} + R \cdot \cos \frac{\pi}{n_c - 1} \cdot (k - 1) \\ y_k &= H_{con} + R \cdot \sin \frac{\pi}{n_c - 1} \cdot (k - 1) \end{aligned} \right\} \quad (\text{III .7})$$

Où :

$$R = \begin{cases} r_1 & \text{si } k = i \\ r_2 & \text{si } k = j \end{cases} \quad (\text{III .8})$$

Avec :

H_{con} : Hauteur des conducteurs et du pipeline au dessus du sol;

x_{con} : Coordonnées horizontales des conducteurs et du pipeline;

n_c : Le nombre des charges de simulation.

III.4.4. Calcul du champ électrique au voisinage du système (Ligne HT-pipeline)

Il est noté qu'en présence du pipeline, le principe de la méthode des charges fictives ne change pas. Les charges électriques simulant le pipeline, donc le nombre est n_p sont prises en compte dans le calcul des coefficients de maxwell, en affectant le potentiel zéro au pipeline dans la matrice du potentiel. Les conducteurs de phases et les fils de garde de la ligne de transport sont considérés comme des charges linéiques infinies (en supposant les conducteurs infiniment longs).

L'applicabilité et l'efficacité de cette méthode (MCF) exige un choix approprié du nombre de charges et leur position tout en prenant en compte la géométrie des dispositifs haute tension. Les points contours sont choisis pour satisfaire les conditions aux limites convenables [104,105].

Le potentiel V_i au point de contours est la somme des contributions potentielles de toutes les charges fictives q_j . Alors le potentiel est exprimé par:

$$V_i = \sum_{j=1}^{n_c} P_{ij} \cdot q_j \quad (\text{III .9})$$

Où :

P_{ij} : Le coefficient de potentiel dépendant des types de charges et de la distance entre les points i et j.

Le coefficient de potentiel de Maxwell pour une charge linéique infinie est calculé par la formule suivante.

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \right) \quad (\text{III .10})$$

Avec :

x_i : abscisse du point contour ;

x_j : abscisse de la charge ;

y_i : ordonnée du point contour ;

y_j : ordonnée de la charge.

En général, les coefficients de potentiel et de champ suivant le type de charges fictives sont indiqués par les expressions analytiques dans l'annexe B.

Le champ électrique résultant à proximité d'une ligne de transmission peut être calculé en représentant l'effet de la terre par l'image des charges situées au-dessous des conducteurs à une profondeur égale à la hauteur du conducteur. Les coordonnées du conducteur sont (x_j, y_j) et les coordonnées de son image sont $(x_j, -y_j)$.

Connaissant les charges linéiques portées par les conducteurs (ou les faisceaux), qui sont disposées perpendiculairement au plan (x,y) , on applique le principe de superposition, le champ résultant E est égal à la somme vectorielle des champs individuels générés par les conducteurs de la ligne. Les composantes E_x et E_y de l'intensité du champ électrique s'expriment par les relations suivantes :

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{2\pi\epsilon} \left[\frac{x - x_j}{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} - \frac{x - x_j}{(x - x_j)^2 + (y + y_j)^2} \right] \\ E_y &= \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{2\pi\epsilon} \left[\frac{y - y_j}{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} - \frac{y + y_j}{(x - x_j)^2 + (y + y_j)^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (\text{III .11})$$

La résultante des composantes de l'intensité du champ électrique en tout point (x,y) est donnée par la relation suivante :

$$E_T = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (\text{III .12})$$

Dans le cas où le conducteur de phase est constitué d'un, de deux ou de plusieurs faisceaux de rayon r situés sur une circonférence de rayon d , comme montré à la figure III -5, le rayon équivalent du conducteur fictif est :

$$R_{\text{équivalent}} = d \cdot \sqrt[3]{\frac{N \cdot r}{d}} \quad (\text{III .13})$$

Où :

$$d = \frac{\delta}{\left[2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N}\right) \right]} \quad (\text{III .14})$$

N : nombre de sous conducteurs du faisceau ;

r : rayon moyen du conducteur élémentaire du faisceau ;

d : rayon géométrique du faisceau

δ : la distance entre deux sous conducteurs consécutifs.

Le rayon équivalent du faisceau est le rayon fictif d'un conducteur cylindrique du point de vue électrique, qui aurait les mêmes capacités que le faisceau réel par rapport à tous les autres conducteurs avoisinants [115].

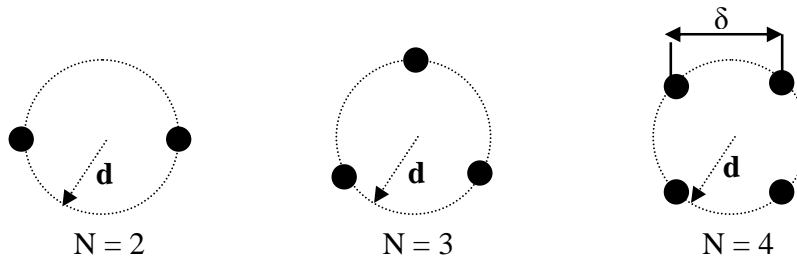


Figure III -5: Faisceau de conducteurs

III.4.5. Calcul du potentiel électrique induit

Le niveau du potentiel électrique au point P par rapport à une référence est obtenu, généralement par la résolution numérique de l'intégration du champ électrique. Ce potentiel est donné par l'équation (III.15) [116].

$$V_P - V_R = - \int_R^P \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (\text{III .15})$$

Dans le cas d'une ligne aérienne, la solution de l'équation (III .15) peut être approchée par une ligne infinie avec une distribution uniforme de la charge par unité de longueur. On devrait connaître le potentiel au point de référence R. L'équation précédente devient alors :

$$V_P = \frac{q_j}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{D_R}{D_P}\right) + V_R \quad (\text{III .16})$$

Dans l'équation (III .16), D_P et D_R sont les distances verticales, respectivement, à partir des points P et R de la ligne de transmission à l'axe. Si nous prenons comme valeur du potentiel de la terre, qui est considéré comme un conducteur parfait, le potentiel de référence la valeur zéro $V_R= 0$. En utilisant le principe de superposition, et à l'aide de la méthode des images électriques, le potentiel électrique généré par une ligne de transmission triphasée, en un point P (x,y) due à un couplage capacitif sur un pipeline métallique installé en dessous de la ligne électrique , est donné par l'équation (III.17) :

$$V_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \sum_{j=1}^n q_j \ln \left(\frac{D'_{ij}}{D_{ij}} \right) \quad (\text{III .17})$$

Où : D_{ij} et D'_{ij} sont les distances entre le point P et respectivement les axes du conducteur réel et de son image, comme illustré à la figure III-6.

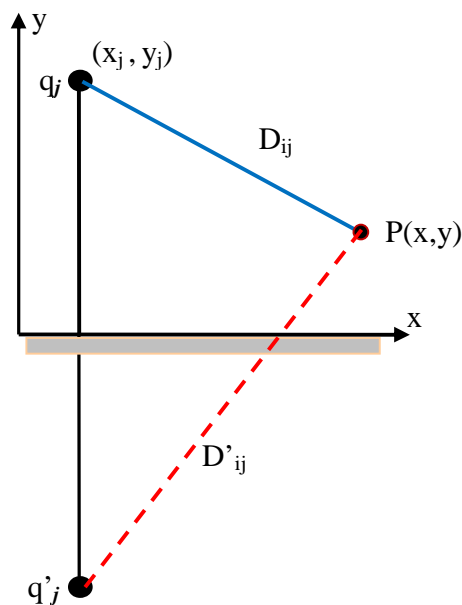


Figure III -6: Illustration d'un conducteur électrique et son image

III.4.6. Courant de décharge dans le corps humain en contact avec le pipeline

Le principal effet du couplage capacitif entre les lignes de transmission et les pipelines est lié aux aspects de la sécurité humaine. Lorsqu'une personne entre en contact direct avec le pipeline, elle est soumise à des niveaux élevés de courant dépassant, souvent, le maximum tolérable par le corps humain. Les pipelines peuvent être aussi affectés et des dégâts nombreux et

importants sont à attendre sur l'isolation, les pièces métalliques et le matériel en ligne (système de protection cathodique).

L'effet du courant électrique sur le corps humain est mesuré par son intensité et sa durée. Dans le fonctionnement normal de la ligne, le couplage capacitif est inséré dans l'effet à long terme. Dans ce cas, les normes indiquent que les mesures de sécurité sont nécessaires lorsque les courants atteignent des valeurs comprises entre 5 et 15 mA [30].

Cet effet dû au couplage capacitif est illustré par le circuit équivalent de Thévenin montré à la figure III-7.

L'influence de la ligne est représentée par une source de tension ayant les paramètres suivants:

- Le potentiel électrique induit pipeline -sol (V_p) ;
- L'impédance interne (Z_p) associée à la capacité totale pipeline-sol.

Cette impédance correspond à l'impédance de Thévenin. Elle est insérée en série avec l'impédance de la personne en contact avec le pipeline (R_c). Selon le standard American (IEEE 80:2000), pour des phénomènes quasi-statique, l'impédance du corps humain vaut 1000Ω [117].

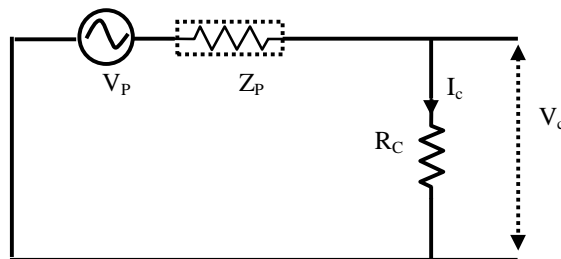


Figure III-7: Circuit équivalent de calcul du courant dans un corps humain entrant en contact avec un pipeline

Cette impédance est calculée par la relation suivante :

$$Z_p = \frac{1}{j \cdot \omega C_p} \quad (\text{III} .18)$$

D'après le circuit équivalent, le courant qui passe à travers la résistance R_c est :

$$I_c = V_p \cdot \frac{j \cdot \omega C_p}{1 + j \cdot \omega C_p \cdot R_c} \quad (\text{III} .19)$$

Dans la plupart des cas, l'impédance capacitive Z_p est beaucoup plus élevée que la résistance du corps, le courant de décharge est donnée par :

$$I_p = j \cdot \omega C_p \cdot L_p \cdot V_p \tag{III .20}$$

Le courant dans le corps I_p est fonction de la longueur du parallélisme et relativement indépendant de la résistance de contact [30].

La réduction du courant à une valeur inférieure au courant admissible par le corps humain tel que recommandé par les réglementations internationales dans l'état d'équilibre égal à 5-15 mA [30] comme citée précédemment, ce qui exige une technique d'atténuation.

Comme on peut le voir sur la figure III-7, le courant traversant le pipeline peut être écrit de la façon suivante :

$$I_c = \frac{V_p}{Z_p + R_c} \approx \frac{V_p}{Z_p} > I_{adm} \tag{III .21}$$

Où : I_{adm} est le courant tolérable (acceptable) par le corps humain.

Dans ce cas, il est nécessaire de relier le pipeline, avec une résistance de terre parallèlement à la résistance du corps humain, de telle sorte que :

$$I'_c < I_{adm} \tag{III .22}$$

Où I'_c est le nouveau courant qui traverse la personne en contact avec le pipeline. La figure III - 8, illustre cette situation.

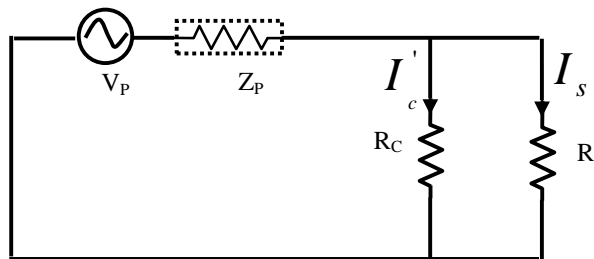


Figure III-8: Technique d'atténuation: mise à la terre du pipeline pour la sécurité personnelle

En tenant compte de l'approximation $Z_p \gg R_c$, le courant est donné par la relation suivante :

$$I'_c = \frac{I_c \cdot R_s}{R_s + R_c} \quad (\text{III .23})$$

En considérant que $I'_c < I_{adm}$ et en substituant cette expression dans l'équation (III .23), on obtient:

$$R_s < \frac{R_c}{\alpha - 1} \quad (\text{III .24})$$

Avec :

$$\alpha = \frac{I_c}{I_{adm}} \quad (\text{III .25})$$

Cette équation décrit le comportement montré à la figure ci-dessus, faire diminuer la résistance de mise à la terre, le courant évacué vers le sol augmente et le courant traversant le corps humain diminue. Par conséquent, cette démarche assure une plus grande sécurité des personnes.

III.4.7. Mise en équations du couplage capacitif

La formulation mathématique utilisée pour modéliser ce type de couplage est décrite par l'ensemble des équations suivant :

a)- Expression du champ électrique

L'expression de l'intensité du champ électrique est calculée par la superposition des grandeurs vectorielles de différents composants du système ligne HT- pipeline.

Les coefficients du champ électrique pour une charge linéique infinie d'un point i (x_i, y_i) sont donnés par les formules suivantes [29] :

$$f(i, j)_x = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left[\left(\frac{(x_i - x_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right) - \left(\frac{(x_i - x_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2} \right) \right] \quad (\text{III .26})$$

$$f(i, j)_y = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left[\left(\frac{(y_i - y_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right) - \left(\frac{(y_i + y_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2} \right) \right]$$

$f(i, j)$: Le coefficient de champ est exprimé par:

$$f(i, j)_x = -\frac{\partial P(i, j)_x}{\partial x}$$

$$f(i, j)_y = -\frac{\partial P(i, j)_y}{\partial y}$$
(III .27)

Finalement et pour tout les charges fictives, les composantes du champ électrique et le champ électrique résultant peuvent être calculés par les équations suivantes :

$$E_{x_i} = \sum_{j=1}^{n_i} f(i, j)_x \cdot Q_j$$
(III .28)

$$E_{y_i} = \sum_{j=1}^{n_i} f(i, j)_y \cdot Q_j$$

$$E_i = \sqrt{E_{x_i}^2 + E_{y_i}^2}$$
(III .29)

b)- Expression de la tension induite

La tension induite à un point quelconque i (x_i, y_i) dans l'espace peut être trouvée par l'addition des potentiels résultant des différentes charges Q_j situés à (x_j, y_j), selon le principe de superposition, en utilisant l'équation (III .30) ci-dessous. :

$$V_{ind}(i, j) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \sum_{j=1}^{n_i} \ln \left(Q_j \cdot \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \right)$$
(III .30)

c)- Expression de l'intensité du courant de choc électrique dans le corps humain

Dans des conditions de contact entre le corps d'une personne et le pipeline métallique isolé du sol, le courant de décharge traversant ce corps est donné par :

$$I_p = j \cdot C_p \cdot L_p \cdot \frac{dV_{ind}}{dt}$$
(III .31)

Où: C_p - la capacité de la conduite métallique par rapport au sol par unité de longueur est donnée par:

$$C_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln \frac{h_p + \sqrt{h_p^2 - r_p^2}}{r_p}}$$
(III .32)

Où: r_p est le rayon du pipeline; ϵ_r est la permittivité relative du revêtement du pipeline; h_p est la hauteur du pipeline au-dessus du sol.

III.5. Cas d'une longueur d'exposition oblique entre la ligne HT et le pipeline métallique

Les sections de couplage sont déterminées à partir de la zone d'influence de la ligne électrique, la manière dont les sections sont définies et la manière dont la relation entre les sections de la ligne électrique (l'ouvrage perturbateur) et du pipeline (l'ouvrage perturbé) est établie génèrent trois cas de figure [118].

- Rapprochement parallèle ;
- Rapprochement oblique ;
- Croisement.

Comme illustré à la figure III-9.

Si le pipeline ou l'une de ses sections ne sont pas parallèles à la ligne électrique, la distance entre le pipeline, ou une section du pipeline, et les différents conducteurs de lignes électriques n'est plus constante. Dans les deux derniers cas, l'exposition du pipeline non parallèle peut être convertie en un parallélisme où le pipeline sera parallèle à la ligne électrique. Sous une telle hypothèse, comme le montre la figure III-9, la tension induite sur chaque section du pipeline peut être déterminé par les expressions données pour les expositions parallèles, mais en utilisant une distance équivalente de séparation à partir de la ligne électrique égale à [30]:

$$x_{eq} = \sqrt{x_n \cdot x_{n+1}} \quad (\text{III .33})$$

Avec:

$$\frac{1}{3} \leq \frac{x_n}{x_{n+1}} \leq 3 \quad (\text{III .34})$$

Où :

x_{eq} : est la distance moyenne géométrique de la ligne électrique et x_1 et x_2 sont les distances minimale et maximale de la canalisation à la ligne électrique de transport.

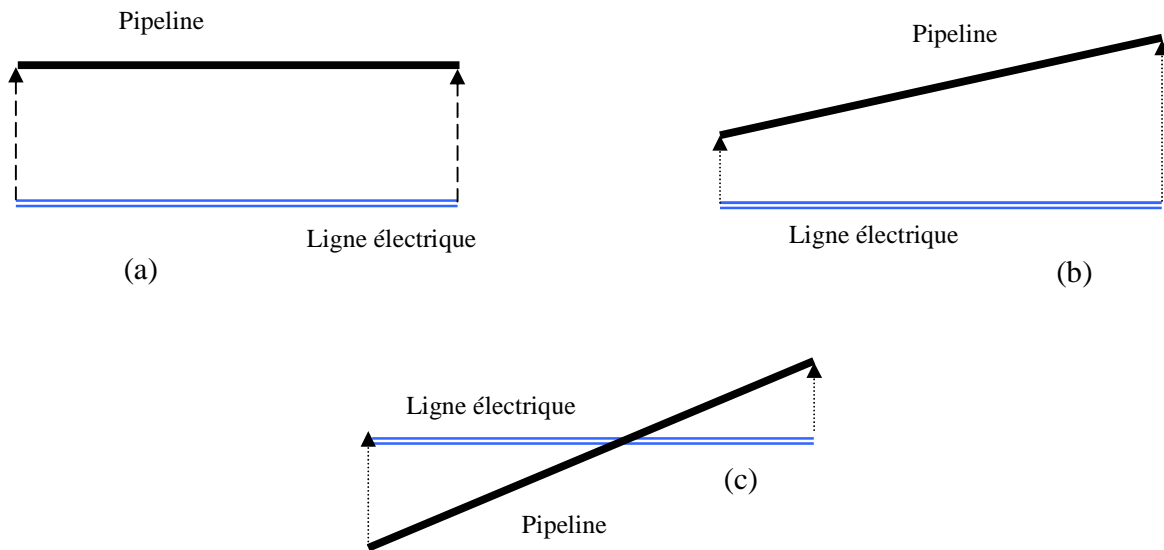


Figure III-9: Couplages possibles entre la ligne électrique et le pipeline, (a) exposition parallèle, (b) exposition oblique, (c) exposition croisée

Dans le cas d'une section de passage, cette section doit être définie afin de limiter la valeur absolue de séparations x_1 et x_2 à 10 m de maximum (figure III-10) [30].

La condition de l'équation (III.34) est appliquée afin de maintenir une précision suffisante pour le calcul des paramètres communs entre le pipeline et la ligne électrique. Cette contrainte met efficacement une limite sur la longueur d'une section de pipeline non parallèle qui nécessite la division du pipeline en plusieurs sections qui seront convertis à des sections parallèles à la ligne électrique.

Pour un pipeline isolé comportant un certain nombre de sections de deux expositions parallèles et non parallèles, la tension totale du pipeline à la terre peut être calculée comme la moyenne des tensions dans chaque section de la pondération par sa longueur relative à la longueur totale du pipeline isolé [30].

$$V_p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N V_{p(i)} \cdot L_i \quad (\text{III .35})$$

Où :

$V_p (i)$: la tension induite dans la section i ;

L_i : longueur de la section i ;

L : longueur totale du pipeline isolée.

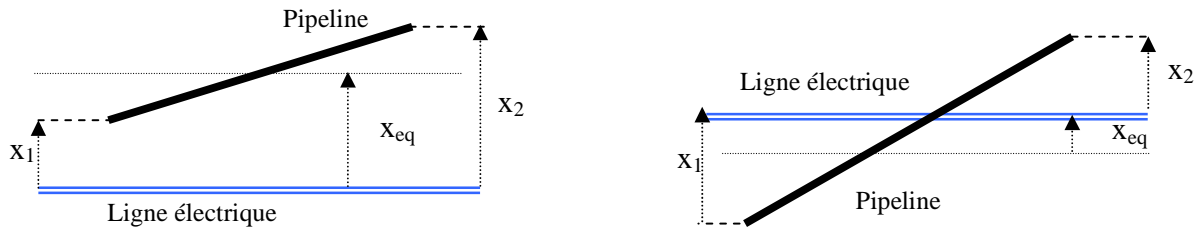


Figure III-10: Conversion des expositions non parallèles à des expositions parallèles entre une ligne électrique et un pipeline

III.6. Calcul de la tension induite avec la méthode de la matrice d'admittance

En présence d'une ligne électrique de transport d'énergie en parallèle avec un pipeline métallique aérien, des tensions sont induites à la surface du pipeline par les champs électriques produits par la ligne électrique. En utilisant la technique d'analyse des admittances, nous pouvons évaluer ces tensions induites.

Dans la figure III-11, est représenté un pipeline métallique au dessus du sol, disposé en parallèle avec une ligne triphasée équilibrée. La matrice des coefficients de potentiel ou de Maxwell formé pour un système multiconducteur composé des conducteurs de phases, de câble de garde et d'un pipeline, est donnée par la relation (III .36).

$$[V_i] = [P_i] \cdot [q_i] \tag{III .36}$$

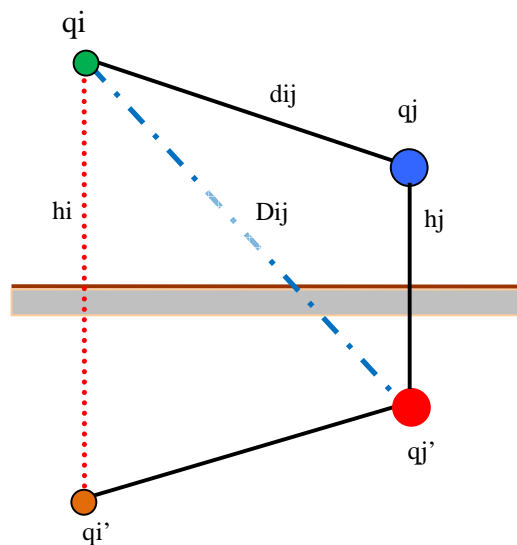


Figure III-11: Détermination des coefficients de potentiel d'une ligne électrique

Les coefficients de potentiel de la ligne sont obtenus d'après l'application directe de la théorie des images où le sol, considéré comme un plan de potentiel nul est remplacé par l'image des conducteurs.

Désignons par les indices i, j les conducteurs parallèle et par i', j' leur images respectives. L'ensemble est représenté à la figure III-11. Il vient alors, pour les coefficients de potentiel, les relations suivantes [30,119]:

$$\left. \begin{aligned} P_{ii} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} Ln \left[\frac{h_i}{r_i} + \sqrt{\left(\frac{h_i}{r_i}\right)^2 - 1} \right] \\ P_{ij} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} Ln \left[\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right] \end{aligned} \right\} \quad \text{(III.37)}$$

Avec :

r_i : Le rayon du conducteur 'i' ;

D_{ij} : La distance entre le conducteur 'i' et l'image du conducteur 'j' ;

d_{ij} : La distance réelle entre le conducteur 'i' et le conducteur 'j' ;

h_i : La hauteur du conducteur 'i' à partir du sol ;

h_j : La hauteur du conducteur 'j' à partir du sol ;

P_{ij} : Coefficient d'influence du conducteur i sur le conducteur j en présence de tous les autres ;

P_{ii} : Coefficient propre par unité de longueur du conducteur d'indice i en présence de tous les autres.

En appliquant l'équation (III.37) des coefficients de potentiel ou de Maxwell pour le système des conducteurs phases, pipeline métallique et câbles de garde, on forme ainsi la matrice des capacités linéiques par inversion de la matrice P [119]:

$$[C] = [P]^{-1} \quad \text{(III.38)}$$

Pour la résolution d'un problème de répartition de charges, il est plus commode de travailler avec les admittances, l'admittance par unité de longueur est donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} [Y] &= j \cdot \omega \cdot [C] \\ [I] &= [Y] \cdot [V] \end{aligned} \quad \text{(III.39)}$$

La matrice résultante des admittances pour le système des conducteurs phases, pipeline métallique et câbles de garde de la figure précédente, est donnée par [30,119]:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_p \\ I_{g1} \\ I_{g2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{1p} & Y_{1g} & Y_{1g} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{2p} & Y_{2g} & Y_{2g} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{3p} & Y_{3g} & Y_{3g} \\ Y_{p1} & Y_{p2} & Y_{p3} & Y_{pp} & Y_{pg} & Y_{pg} \\ Y_{g1} & Y_{g2} & Y_{g3} & Y_{gp} & Y_{gg} & Y_{gg} \\ Y_{g1} & Y_{g2} & Y_{g3} & Y_{gp} & Y_{gg} & Y_{gg} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_p \\ V_{g1} \\ V_{g2} \end{bmatrix} \quad (\text{III .40})$$

Les indices c, p et g représentent les conducteurs de phase de la ligne électrique, le pipeline et câble de garde de ligne, respectivement.

L'équation est générale et permet la présence de plus d'une ligne électrique avec plus d'un câble de garde et plus d'un pipeline. Tous les coefficients potentiels dans l'équation (III .40) sont des matrices. Le système de cette équation peut être écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} I_c \\ I_p \\ I_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_c & Y_{cp} & Y_{cg} \\ Y_{pc} & Y_{pp} & Y_{pg} \\ Y_{gc} & Y_{gp} & Y_{gg} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ V_p \\ V_g \end{bmatrix} \quad (\text{III .41})$$

Avec :

$I_c : (I_1, I_2, I_3)$: est appelées matrice des courants de ligne.

La mise à la terre des câbles de garde ($I_g = 0$) permet d'avoir la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} I_c \\ I_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y'_c & Y'_{cp} \\ Y'_{pc} & Y'_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_c \\ V_p \end{bmatrix} \quad (\text{III .42})$$

Avec:

$$\left. \begin{aligned} Y'_c &= Y_c - Y_{cg} \cdot Y_g^{-1} \cdot Y_{gc} \\ Y'_{cp} &= Y_{cp} - Y_{cg} \cdot Y_g^{-1} \cdot Y_{gp} \\ Y'_{pc} &= Y_{pc} - Y_{pg} \cdot Y_g^{-1} \cdot Y_{gc} \\ Y'_p &= Y_p - Y_{pg} \cdot Y_g^{-1} \cdot Y_{gp} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III .43})$$

A partir de l'équation (III .42) on peut écrire :

$$\begin{aligned} [I_c] &= [Y'_c] \cdot [V_c] + [Y'_{cp}] \cdot [V_p] \\ [I_p] &= [Y'_{pc}] \cdot [V_c] + [Y'_p] \cdot [V_p] \end{aligned} \quad (\text{III .44})$$

Avec :

$[I_c]$: Vecteur de courant par unité de longueur du circuit triphasé ;

Pour un pipeline isolé $q_p = 0$ ($I_p = 0$), la tension induite est donné par la relation.

$$[V_p] = -[Y_{pc}'] \cdot [Y_p']^{-1} \cdot [V_c] \quad (\text{III .45})$$

Où :

V_C sont les tensions des phases connues de la ligne électrique.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les principes de base de la méthode de simulation des charges fictives, de l'algorithme génétique (AG), de l'application de ces outils pour une meilleure position et un nombre optimal des charges discrètes et des points de contour. L'optimisation améliore l'analyse de simulation et la possibilité d'avoir une plus grande précision.

Nous avons également étudié la procédure d'utilisation de cette méthode dans l'évaluation de l'interférence entre les lignes électriques de transport et des pipelines métalliques aériens lors du fonctionnement normal du réseau électrique, en établissant un formalisme permettant de calculer le champ électrique avec et sans la présence des pipelines.

Il est présenté aussi, la formulation principale pour l'évaluation des niveaux du potentiel électrique induit dans le pipeline métallique, le courant induit dans des personnes entrant en contact avec ces pipelines et l'évaluation des aspects de la sécurité personnelle.

Une autre approche basée sur l'analyse des admittances est présentée, elle a pour but de vérifier la performance de la méthode proposée.

CHAPITRE IV

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

IV.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 (enterré ou 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 couplage entre la méthode de simulation des courants et les algorithmes génétiques. 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 et les paramètres géométriques, le calcul de tension induite sera d'abord décrit pour un cas simple de parallélisme, et dans ce qui suit, dans le cas général.

IV.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.

IV.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 [30]. Ceci est illustré sur la figure IV-1.

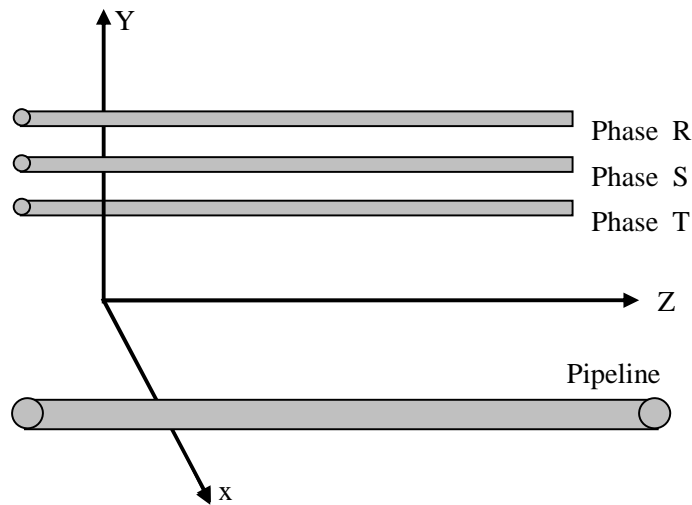


Figure IV-1: Illustration d'une exposition parallèle entre une ligne aérienne et un pipeline

IV.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 IV-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 calculée selon l'équation (III .33), 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 [30].

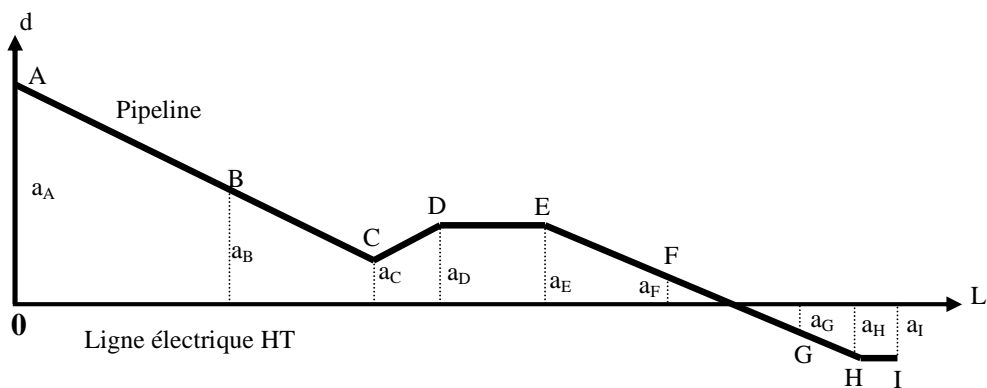


Figure IV-2: Exemple de subdivision d'une zone d'influence en sections

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 IV-3.

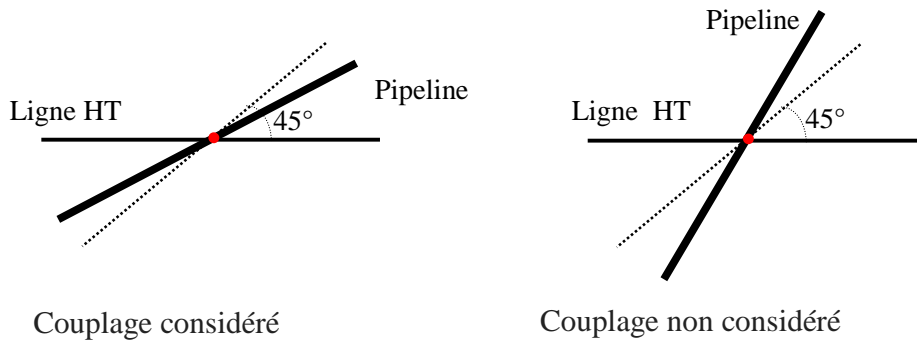


Figure IV-3 : Considération des différents passages: pipeline – ligne HT

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) [30,57,119].

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 courant 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.

IV.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 technique plus adaptée à la simulation des lignes de transport d'énergie, appelée la méthode de simulation des courants (MSC).

IV.3.1. Méthode de simulation des courants (MSC)

De façon analogue à la méthode de simulation des charges fictives appliquée aux lignes de transmission pour calculer le champ électrique, il est possible d'avoir une technique de simulation de courant (MSC) adaptée au calcul du champ d'induction magnétique créée par les lignes électriques aériennes à haute tension. Dans cette technique, pour une ligne triphasée avec faisceaux de conducteurs, chaque sous-conducteur de la ligne est simulé par un certain nombre de filaments de courants distribués sur une surface cylindrique fictive à l'intérieur du conducteur. Le nombre et les coordonnées des courants de simulation sont déterminés en satisfaisant les conditions suivantes [120 ,121].

1. La composante du champ magnétique normal à la surface des conducteurs égale à zéro.
2. La somme des intensités des courants filaments qui simulant un conducteur doit être égale à l'intensité du courant qui le parcourt.

Considérons la ligne de transmission à N phases et m sub-conducteurs par phase, Le nombre de conducteurs est (N×m) situés au-dessus du sol. Aussi (N×m) images sont utilisées pour satisfaire les conditions aux limites à la surface du sol. Un nombre n de points de simulation du courant traversant chaque conducteur est choisi dans ce calcul. Les images des conducteurs 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.

Pour déterminer les courants filaments inconnus, un ensemble d'équations est formulée à un certain nombre de points de contours choisis sur la surface des conducteurs pour satisfaire les conditions aux limites comme suit [120 ,121]:

$$\sum_{i=1}^{Nnm} P_{ij} \cdot I_i = 0, j = 1,2,3,\dots,Nm \text{ (n-1)} \quad (\text{IV.1})$$

$$\sum_{i=(q-1).n+1}^{nq} I_i = I_{cq}, q = 1,2,3,\dots,Nm \quad (\text{IV.2})$$

Où : P_{ij} est le coefficient magnétique du champ normal déterminé par les coordonnées du $j^{\text{ème}}$ point aux limites et le $i^{\text{ème}}$ filament de courant ; ce coefficient est donné par :

$$P_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R_i}{R_{ij}} \quad (\text{IV.3})$$

Où :

R_{ij} est la distance entre le point de simulation du courant (i) et le point de contour (j), R_j est le rayon du point de simulation du courant.

On retrouve dans la référence [121] une autre formulation qui est adoptée pour décrire la solution du problème, le coefficient magnétique est représenté par la formule suivante :

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi R_{ij}} \sin \theta_{ij} \quad (\text{IV.4})$$

Avec:

$$\theta_{ij} = \alpha_{ij} - \phi_j \quad (\text{IV.5})$$

Comme cela est représenté sur la figure IV-4.

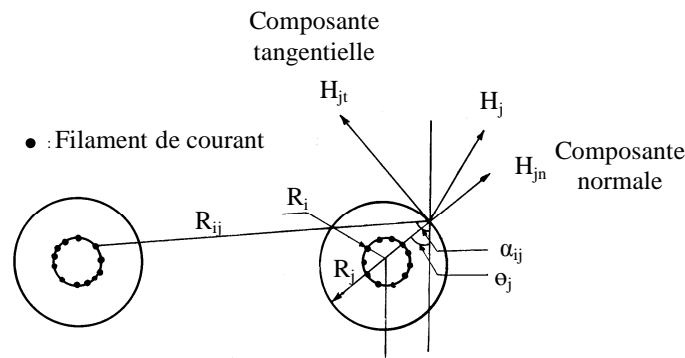


Figure IV-4: Composantes normale et tangentielle du champ magnétique

Les valeurs des courants de filament déterminées seront comparées à ceux déterminées par les nouveaux courants qui correspondent aux nouveaux points de contours. L'écart entre le nouveau courant calculé et le courant réel auquel est soumis le conducteur actif au point P_{cj} représentera la précision du calcul [120 ,121].

La simulation est acceptable si cette valeur est inférieure à la précision souhaitée, sinon il faudra augmenter le nombre de filaments et les redistribuer.

Une fois que les valeurs et les positions des différents courants de simulation sont connues, les composantes de l'induction magnétique à n'importe quel point dans l'espace avoisinant de la ligne électrique peuvent être calculées par les équations suivantes [120 ,121]:

$$B_{xj} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^{nm} I_i \left[\frac{y - y_j}{r_{ij}^2} - \frac{y + y_j + D_e}{r_{ij}'^2} \right] \quad (\text{IV.6})$$

$$B_{yj} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^{nm} I_i \left[\frac{x - x_j}{r_{ij}^2} - \frac{x - x_j}{r_{ij}'^2} \right]$$

Avec:

$$r_{ij} = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \tag{IV.7}$$

$$r'_{ij} = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y + y_j + D_e)^2}$$

L'induction magnétique résultant d'une ligne de transmission est donc :

$$B_{res} = \sqrt{B_{xj}^2 + B_{yj}^2} \tag{IV.8}$$

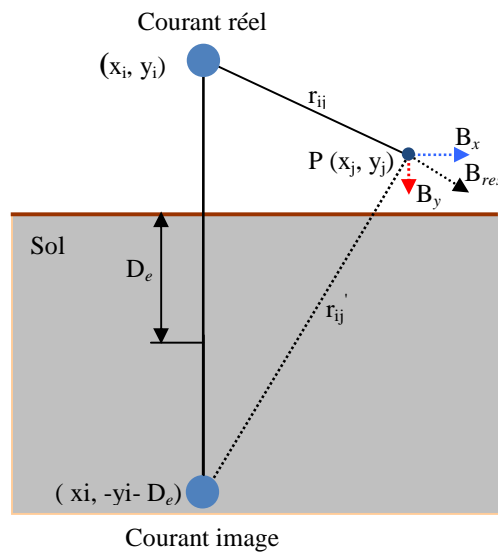


Figure IV-5: Induction magnétique créée par un conducteur parcouru par un courant en un point d'observation $P(x, y)$

La méthode de Carson 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 D_e . Cette grandeur complexe définit une profondeur de pénétration des courants dans le sol tenant en compte la résistivité du milieu et la fréquence du courant. Cette grandeur s'ajoute à la distance séparant les conducteurs aériens de la terre. Comme représenté sur la figure (2), la profondeur D_e vaut [122,123,124]:

$$D_e = \sqrt{2} \cdot \delta \cdot e^{-j\pi/4} \tag{IV.9}$$

Avec :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot f}} \tag{IV.10}$$

δ : La profondeur de pénétration

ρ : La résistivité électrique du sol ($\Omega.m$)

f : La fréquence en Hz.

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

Les étapes du calcul basé sur la méthode précédente sont résumées dans l'organigramme de la figure IV-6 [121].

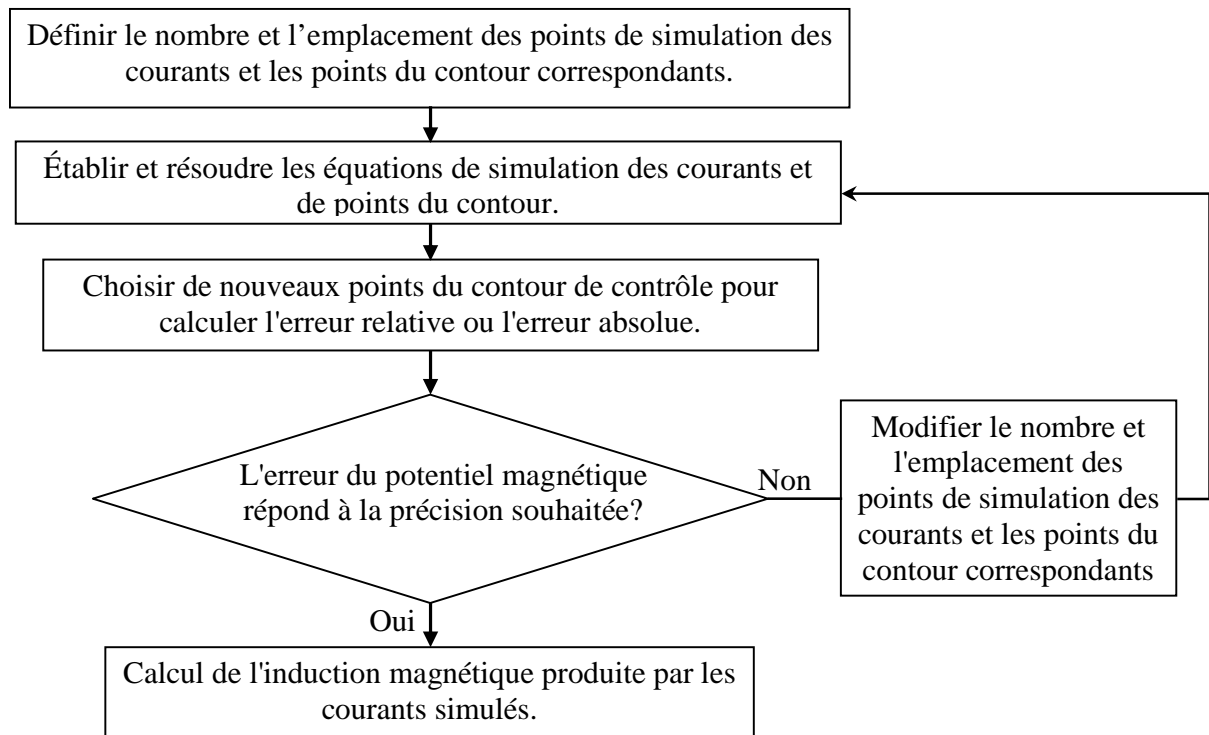


Figure IV-6: Organigramme de calcul utilisant la Méthode de simulation des courants

Le choix optimal du nombre et le bon emplacement des courants filaments et leurs bons emplacements dans chaque conducteur, à une influence considérable sur la précision de calcul. À cet égard, l'utilisation de la procédure d'optimisation des algorithmes génétiques décrite dans le paragraphe (III.3) est nécessaire.

IV.3.2. 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 créée 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 [17,115,125].

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

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

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

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

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 (IV. 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

IV.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 [30,57,119].

IV.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 IV-7.

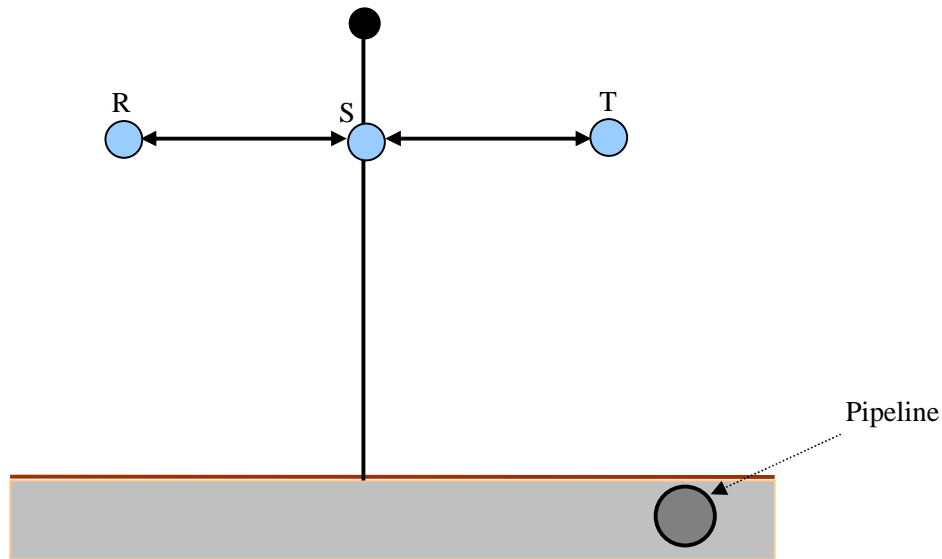


Figure IV-7 : Configuration d'une ligne triphasée HT en nappe horizontale avec un pipeline

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 : [126].

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

- 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 :

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

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 $p = 0,2$ [126].

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

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

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

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 (IV.15) et (IV.16) les valeurs respectives obtenues pour p il vient des formules simplifiées (IV.17) et (IV.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 [30,32,119].

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

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 (IV.09).

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

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

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 :

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

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).

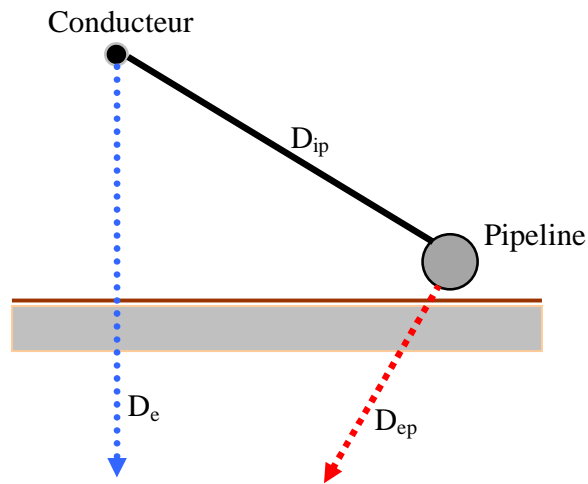


Figure IV-8 : Distances équivalentes entre les conducteurs, le sol et le pipeline

IV.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 [30,32,119]:

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

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 :

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

Avec :

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

a : est un opérateur de rotation de 120°.

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

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

- Cette expression peut être simplifiée comme suit :

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

En revanche, et dans le cas où la ligne électrique aérienne est équipée de câble de garde (voir figure IV-9), la force électromotrice induite dans le pipeline est calculée selon l'équation suivante :

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

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 :

$$\Delta V_g = I_1 \cdot Z_{g1} + I_2 \cdot Z_{g2} + I_3 \cdot Z_{g3} + I_g \cdot Z_{gg} \approx 0 \quad (\text{IV.26})$$

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

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

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

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

Où :

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

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

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

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

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 (IV. 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 :

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

Cette expression peut se mettre sous la forme suivante :

$$E_p = -\frac{\mu_0 \cdot \omega}{2\pi} I^p \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \left(\frac{D_{3p}}{D_{2p}} \right) + j \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{D_{2p} \cdot D_{3p}}}{D_{1p}} \right) \right] \\ - \frac{Z_{pg_1}}{Z_{g_1g_1}^2 - Z_{g_1g_2}^2} \left[Z_{g_1g_1} c - Z_{g_1g_2} d \right] \\ - \frac{Z_{pg_2}}{Z_{g_1g_1}^2 - Z_{g_1g_2}^2} \left[Z_{g_1g_1} d - Z_{g_1g_2} c \right] \end{array} \right\} \quad (IV-32)$$

Avec :

$$\begin{aligned} c &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \left(\frac{D_{3g_1}}{D_{2g_1}} \right) + j \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{D_{2g_1} \cdot D_{3g_1}}}{D_{1g_1}} \right) \\ d &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \left(\frac{D_{3g_2}}{D_{2g_2}} \right) + j \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{D_{2g_2} \cdot D_{3g_2}}}{D_{1g_2}} \right) \end{aligned} \quad (IV-33)$$

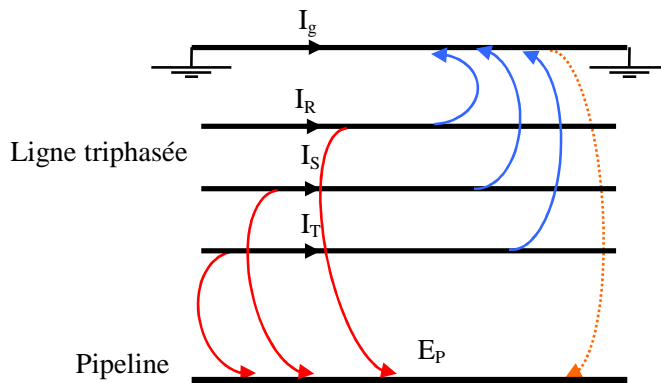


Figure IV-9 : Induction sur un pipeline métallique en condition normale de fonctionnement

IV.4.3. Force électromotrice induite en cas de défaut de court-circuit

Parmi les différents types de défauts électriques, le court-circuit entre une phase et la terre (phase-terre) est le plus fréquent (80% des courts-circuits). Il est dû en général à des ruptures d'isolement phase-terre consécutives à des surtensions d'origine atmosphérique, des casses ou contournements d'isolateur. Lorsqu'un défaut phase-terre se produit, les conséquences provoquées sont très sévères [30,119].

Dans ce cas, le calcul revient à évaluer le couplage entre les deux circuits ayant la terre comme conducteur de retour. Dans la configuration la plus simple, où le circuit électrique est une ligne aérienne sans fil de garde, et en l'absence d'autres conducteurs métalliques dans le voisinage,

la force électromotrice E_p touchant le circuit pipeline - terre par unité de longueur est liée au courant inducteur I circulant dans la ligne pendant le défaut par l'expression suivante:

$$E_p = -Z_m I_A \quad (\text{IV.34})$$

Où :

Z_m : représente l'impédance mutuelle par unité de longueur des circuits phase conducteur - terre et pipeline - terre.

Pour un défaut alimenté à partir d'une seule extrémité (figure IV-10), le courant inducteur I_A est l'intensité globale de défaut. Sa valeur égale à $3I_0$; I_0 étant le courant de séquence zéro. L'amplitude du courant de défaut diminue avec la distance à la source comme le montre la figure IV-10.

Le calcul de la force électromotrice doit prendre en considération la variation du courant de défaut avec la position de ce défaut sur la ligne. Dans la plupart des cas, les défauts sont alimentés par les deux extrémités de la ligne (figure IV-11). Selon l'emplacement du défaut, le pipeline considéré dans la figure IV-11; comme parallèle à la ligne de HT entre les points C et D, il peut être influencé seulement par le courant circulant d'une extrémité (A ou B) ou par les deux courants aux deux extrémités de la ligne. Pour un défaut entre :

A et C – l'influence à considérer est celle du courant I_B alimenté par B

C et D - l'influence à considérer est celle des deux courants I_A et I_B

D et B - l'influence à considérer est celle du courant I_A alimenté par A.

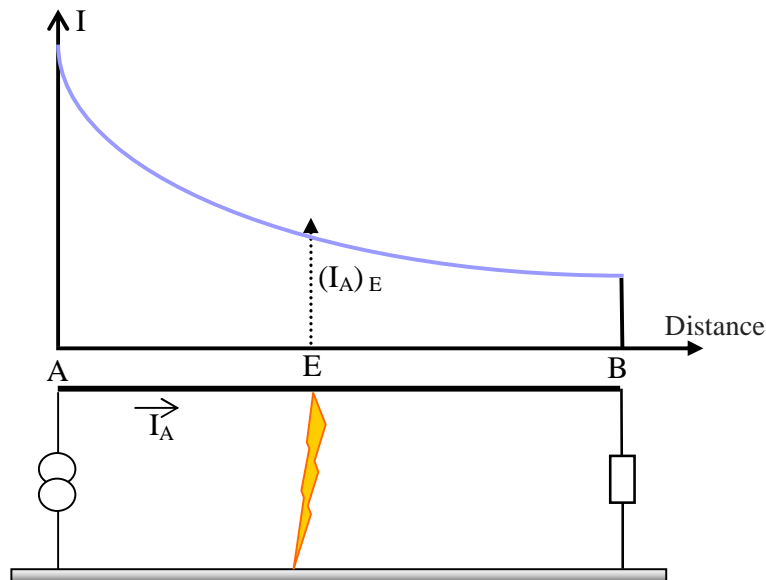


Figure IV-10 : Exemple de variation du courant perturbateur avec la distance à la source (pour une ligne alimentée par une extrémité seulement)

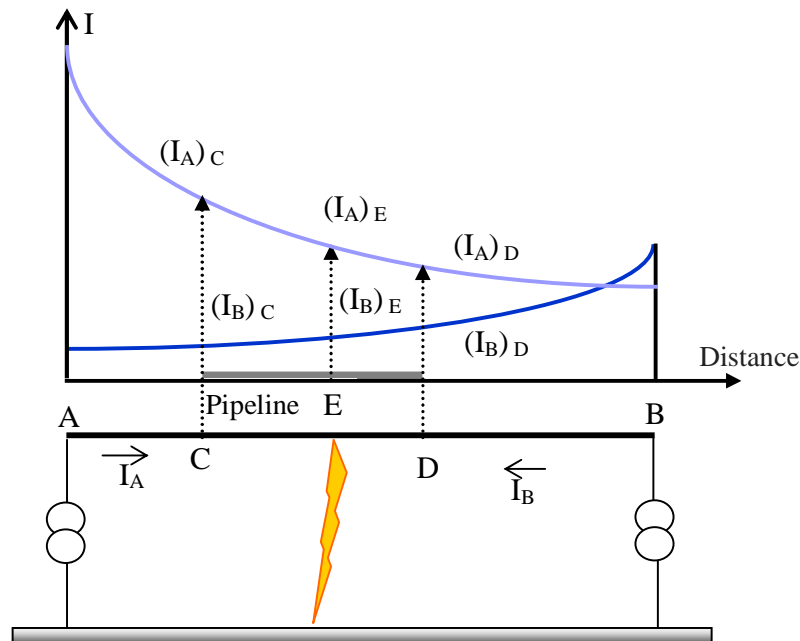


Figure IV-11 : Variation du courant perturbateur le long d'une ligne alimentée par les deux extrémités

Pour un défaut à l'intérieur de la zone d'influence CD, par exemple dans E, la sous-zone CE est influencée par $(I_A)_E$ tandis que la sous-zone ED est influencée par $(I_B)_E$. Comme les courants $(I_A)_E$ et $(I_B)_E$ sont de signes opposés, les forces électromotrices induites dans les sous-zones CE et ED sont également de signes opposés.

IV.4.4. Facteur de blindage

Les conducteurs métalliques à proximité de la ligne à haute tension ou de la canalisation permettent de réduire les perturbations dues aux défauts. Le courant induit dans les conducteurs de la ligne produit dans le pipeline une force électromotrice (fém) qui annule partiellement la force électromotrice due au courant de défaut.

Le facteur de blindage représente le rapport entre la force électromotrice induite en présence du conducteur métallique et celle en l'absence de ce conducteur [30,92,119]. Dans le cas des lignes aériennes, l'effet de réduction principale est généralement produit par le fil (s) de garde qui équipe la ligne. Cet effet est environ de 0,7 à 0,75 pour un fil de garde et de 0,5 à 0,55 pour deux fils de garde. Les fils placés le long du pipeline (fils nus en particulier) peuvent également être efficace. La figure IV-12 illustre un exemple de défaut d'une seule phase à la terre sur le réseau électrique. Il s'agit d'un défaut de court-circuit sur le conducteur de phase T, c'est le conducteur le plus proche de la canalisation, comme le montre la figure IV-12. La localisation du défaut est supposée à l'extrémité du parallélisme.

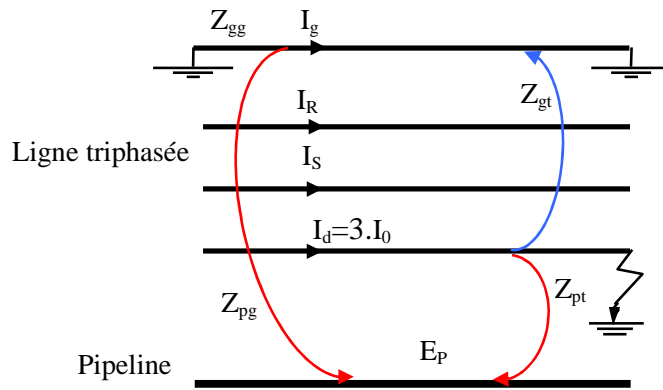


Figure IV-12 : Induction sur un pipeline sous condition de défaut

D'après la figure IV-12, la chute de tension en série à travers le fil de garde est donnée par :

$$\Delta V_g = Z_{gt} \cdot I_d + Z_{gg} \cdot I_g = 0 \quad (IV-35)$$

Où :

$$\frac{I_g}{I_d} = - \frac{Z_{gt}}{Z_{gg}} \quad (IV-36)$$

La force électromotrice induite sur le pipeline est donnée par :

$$E_p = -Z_{pt} \cdot I_d - Z_{pg} \cdot I_g \quad (IV-37)$$

D'après la figure IV-12, la chute de tension dans le câble de garde est donnée par l'équation (IV.35).

En substituant le rapport entre les courants donné par l'équation (IV.36) dans l'équation (IV-37), l'expression de la force électromotrice induite devient :

$$E_p = -Z_{pt} \cdot I_d \cdot K \quad (IV-38)$$

Où : K est le facteur de blindage donné par :

$$K = 1 - \frac{Z_{gt}}{Z_{gg}} \cdot \frac{Z_{pg}}{Z_{pt}} \quad (IV-39)$$

Le facteur de blindage K comprend à la fois l'effet du fil de garde et le pipeline. L'équation (IV-38) montre que, lorsque le courant de défaut est constant à l'intérieur du parallélisme, la force électromotrice induite longitudinale par unité de longueur dans le pipeline est également constante.

Dans le cas où la ligne électrique aérienne HT est équipée de câbles de garde, ce facteur de blindage est donné par la formule:

$$K = 1 - \frac{\left(Z_{g_1} \cdot Z_{g_2,t} - Z_{g_1g_2} \cdot Z_{g_1,t} \right) Z_{pg_1}}{\left(Z_{g_1} \cdot Z_{g_2} - Z_{g_1g_2}^2 \right) Z_{pt}} - \frac{\left(Z_{g_2} \cdot Z_{g_1,t} - Z_{g_2g_1} \cdot Z_{g_2,t} \right) Z_{pg_2}}{\left(Z_{g_1} \cdot Z_{g_2} - Z_{g_1g_2}^2 \right) Z_{pt}} \quad (\text{IV-40})$$

IV.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.

IV.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 [30,57,119].

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.

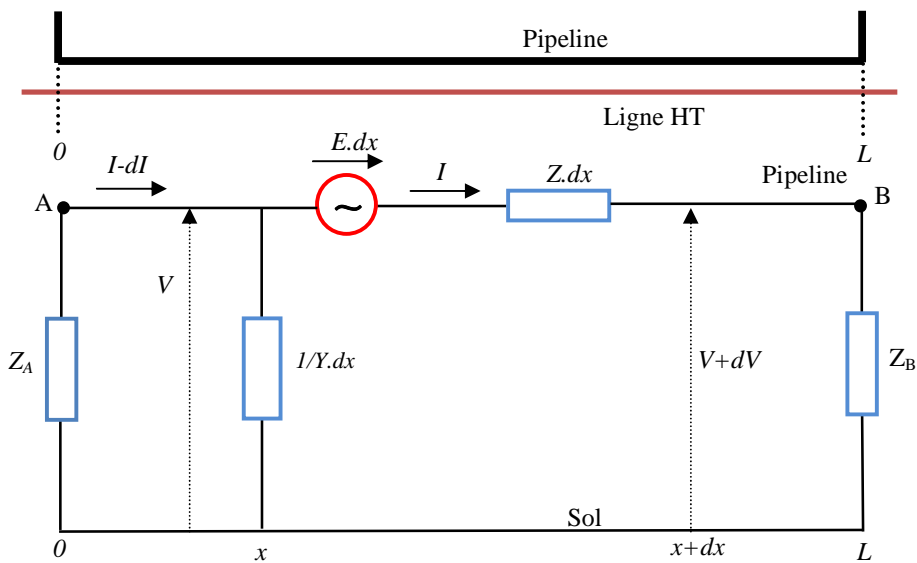


Figure IV-13 : Représentation du circuit équivalent entre le pipeline et le sol

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

IV.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:

$$V_p = E_p \cdot L \quad (\text{IV-41})$$

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 [32].

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 [30,32]. 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 (figure IV-14), 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 [32,72] :

$$I_R = \frac{V_p}{Z_T} \quad (\text{IV-42})$$

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

$$Z_T = \sqrt{(2.R)^2 + (Z_{pp})^2} \quad (\text{IV-43})$$

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 IV-14, nous pouvons déduire la relation suivante:

$$I_R = \frac{V_p}{\sqrt{4 + (Z_{pp}/R)^2}} \quad (\text{IV-44})$$

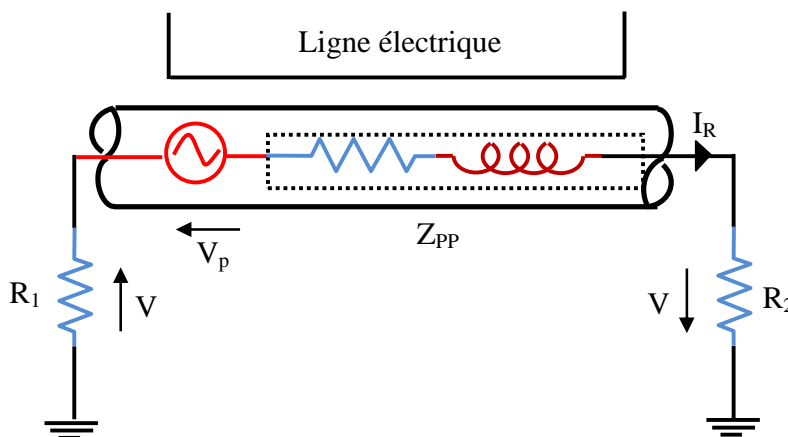


Figure IV-14 : Mise à la terre du pipeline par électrodes de terre

IV.5.2.2. Cas d'un pipeline souterrain

En cas de parallélisme parfait, le circuit équivalent d'une section du pipeline enterré de longueur L , en parallèle avec la ligne électrique aérienne entre les points $x = 0$ et $x = L$, est représentée dans la figure IV-13.

Rappelons que Z_A est l'impédance du pipeline située sur le côté gauche de 0 et vu à partir du point 0, et que Z_B est l'impédance du pipeline située sur le côté droit de L et vu à partir de L . Sur la base des hypothèses mentionnées ci-dessus, les équations du circuit pipeline - sol peuvent être écrites comme suit [30,57,119]:

$$V(x) - z dx.I(x) + E(x)dx - [V(x) + dV(x)] = 0 \quad (\text{IV-45})$$

Où :

$$\frac{dV(x)}{dx} + z.I(x) - E(x) = 0 \quad (\text{IV-46})$$

Et :

$$I(x) - dI(x) = y dx.V(x) + I(x) \quad (\text{IV-47})$$

Où :

$$\frac{dI(x)}{dx} + y.V(x) = 0 \quad (\text{IV-48})$$

Avec :

z : est l'impédance série par unité de longueur du circuit de pipeline - sol ;

y : est l'admittance shunt par unité de longueur du circuit de pipeline - sol ;

E : est la force électromotrice induite sur le pipeline par unité de longueur.

Les deux équations fondamentales données par les relations (IV-45) et (IV-47) sont appelées les équations des lignes de transmission. Il s'agit de deux équations différentielles totales exactes de premier ordre, avec des dérivées par rapport à la coordonnée longitudinale (x).

En combinant les deux équations complexes des lignes (IV-46) et (IV-48), on obtient deux équations différentielles de second ordre :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} - y.z.V(x) - \frac{dE(x)}{dx} = 0 \quad (\text{IV-49})$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} - y.z.I(x) + y.E(x) = 0 \quad (\text{IV-50})$$

Lors du fonctionnement normal du réseau électrique, si le courant perturbateur de charge influant sur la section parallèle du pipeline est constant le long de la zone d'influence, par conséquent, la force électromotrice induite (f.é.m) résultante $E(x)$ est également constante, c'est à dire $E(x) = E$.

La solution générale des équations (IV-49) et (IV-50) est donnée par les relations suivantes :

$$V(x) = -Z_c (A.e^{\gamma x} - B.e^{-\gamma x}) \quad (\text{IV-51})$$

$$I(x) = (A.e^{\gamma x} + B.e^{-\gamma x}) + \frac{E}{Z_c} \quad (\text{IV-52})$$

Où : γ le coefficient de propagation du pipeline donnée par:

$$\gamma = \sqrt{z \cdot y} \quad (\text{IV-53})$$

Z_c l'impédance caractéristique du pipeline donnée par :

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (\text{IV-54})$$

A et B sont deux constantes déterminées par les conditions aux limites (conditions existant aux extrémités de la section du pipeline).

L'équation (IV-51) est utilisée pour évaluer la tension à la terre le long de la section du pipeline, en un point x compris entre zéro et L, et l'équation (IV-52) est utilisée pour calculer le courant circulant dans le pipeline.

Pour $x = 0$, les équations (IV-51) et (IV-52) peuvent être écrites comme suit :

$$V(0) = -Z_c (A - B) \quad (\text{IV-55})$$

$$I(0) = (A + B) + \frac{E}{Z_c} \quad (\text{IV-56})$$

L'impédance d'entrée du tronçon Z_A est obtenue lorsque $x = 0$, en faisant le rapport (voir le schéma de la figure IV-13).

$$\frac{V(0)}{I(0)} = -Z_A \quad (\text{IV-57})$$

En combinant les équations (IV-55), (IV-56) et (IV-57), on déduit la relation suivante :

$$(Z_A - Z_c)A + (Z_A + Z_c)B = \frac{Z_A}{Z_c} \cdot E \quad (\text{IV-58})$$

Pour l'abscisse $x = L$, les équations (IV-51) et (IV-52) peuvent être écrites ainsi:

$$V(L) = -Z_c (A e^{\gamma L} - B e^{-\gamma L}) \quad (\text{IV-59})$$

$$I(L) = (A e^{\gamma L} + B e^{-\gamma L}) + \frac{E}{Z_c} \quad (\text{IV-60})$$

L'impédance de sortie Z_B à $x = L$ est définie par la relation suivante :

$$\frac{V(L)}{I(L)} = -Z_B \quad (\text{IV-61})$$

Par la même manière que précédemment, on déduit la relation suivante :

$$A e^{\gamma L} (Z_B + Z_c) + B e^{-\gamma L} (Z_B - Z_c) + \frac{Z_B \cdot E}{Z_c} \quad (\text{IV-62})$$

En résolvant les équations (IV-58) et (IV-62), on obtient les valeurs de A et B données ci-dessous [119]:

$$A = \frac{E}{2 \cdot Z_c} \cdot \frac{(1 + v_1)v_2 - (1 + v_2)e^{\gamma L}}{e^{2\gamma L} - v_1 v_2} \quad (\text{IV-63})$$

$$B = \frac{E}{2 \cdot Z_c} \cdot \frac{(1 + v_2)v_1 - (1 + v_1)e^{\gamma L}}{e^{2\gamma L} - v_1 v_2} e^{\gamma L} \quad (\text{IV-64})$$

Avec v_1 et v_2 sont respectivement les coefficients de réflexion à l'entrée et à la sortie de la de la section du pipeline, données par la relations suivantes :

$$v_1 = \frac{Z_A - Z_c}{Z_A + Z_c} \quad (\text{IV-65})$$

$$v_2 = \frac{Z_B - Z_c}{Z_B + Z_c} \quad (\text{IV-66})$$

Les impédances terminales Z_A et Z_B sont choisis pour représenter les caractéristiques électriques de la section du pipeline aux extrémités A et B. Mis à part la configuration traitée pour le pipeline enterré, certains de cas particuliers méritent d'être examinés [30,57,119].

- a) - Le pipeline s'étend sur quelques kilomètres au-delà de la longueur de cheminement parallèle sur les deux côtés avec la ligne HT sans mise à la terre

Pour une section du pipeline qui continue pendant quelques kilomètres au delà sur les deux extrémités A et B de la longueur de cheminement parallèle, la continuité électrique du pipeline persiste et l'impédance du pipeline vue des points A et B peut être considéré comme égale à l'impédance caractéristique du pipeline.

Ainsi :

$$Z_A = Z_B = Z_c \tag{IV-67}$$

ce qui conduit aux relations suivantes:

$$v_1 = v_2 = 0 \tag{IV-68}$$

Ou :

$$V(x) = \frac{E}{2\gamma} (e^{\gamma(x-L)} - e^{-\gamma x}) \tag{IV-69}$$

$$I(x) = \frac{E}{2Z_c} (2 - e^{\gamma(x-L)} - e^{-\gamma x}) \tag{IV-70}$$

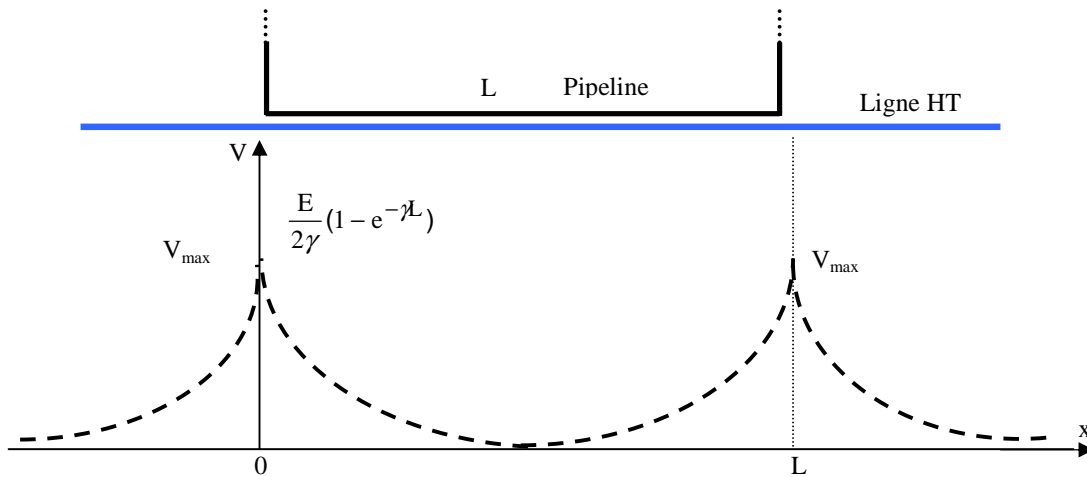


Figure IV-15 : Evolution de la tension le long d'un pipeline s'étendant au-delà de la zone d'influence

Si la ligne est uniforme, le potentiel maximum du pipeline au niveau des extrémités ($x = 0$ et $x = L$) est :

$$|V_{(0)}| = |V_{(L)}| = U_{\max} = \frac{E}{2 \cdot \gamma} (1 - e^{-\gamma L}) \quad (\text{IV-71})$$

Au point médian de parallélisme, c'est à dire à $x = L / 2$, le potentiel $V = 0$.

En dehors des extrémités, le potentiel et le courant du pipeline décline selon la fonction exponentielle:

$$V_x = V_{\max} (e^{-\gamma x}) \quad (\text{IV-72})$$

$$I_x = \frac{V_{\max} \cdot \gamma}{Z_c} (e^{-\gamma x}) \quad (\text{IV-73})$$

- b) - Le pipeline s'étend au-delà de l'extrémité A de la longueur de cheminement parallèle et isolé à l'extrémité B avec une bride isolante

La bride isolante offre la possibilité de faire un raccordement de point de rupture électrique. Dans ce cas, les impédances d'entrée et de sortie sont :

$$Z_A = Z_c ; Z_B = \infty \quad (\text{IV-74})$$

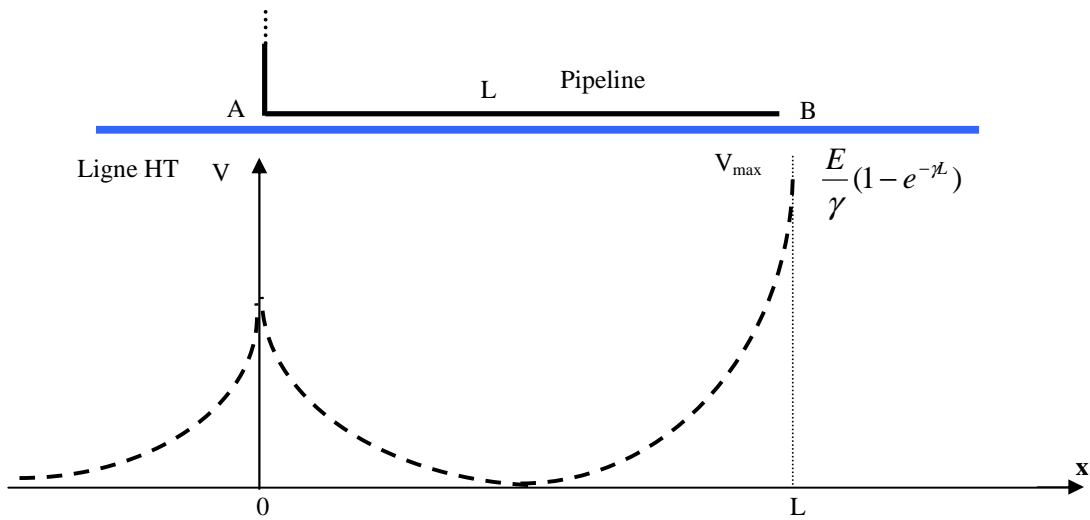


Figure IV-16: Evolution de la tension lorsque le pipeline s'étend au-delà de la zone d'influence dans une seule direction

Ce qui donne :

$$v_1 = 0; \quad v_2 = 1 \tag{IV-75}$$

$$V(x) = \frac{E}{2\gamma} \left[\left(e^{\gamma x} (2e^{-\gamma L} - e^{-2\gamma L}) - e^{\gamma x} \right) \right] \tag{IV-76}$$

$$V_{(0)} = \frac{-E}{2\gamma} (1 + e^{-2\gamma L} + 2e^{-\gamma L}) \tag{IV-77}$$

$$V_{(L)} = V_{\max} = \frac{E}{\gamma} (1 - e^{-\gamma L}) \tag{IV-78}$$

Et :

$$I(x) = \frac{E}{2Z_c} \left[2 + e^{\gamma x} (2e^{-\gamma L} - e^{-2\gamma L}) + e^{-\gamma x} \right] \tag{IV-79}$$

- c) - Le pipeline est solidement mis à la terre à l'extrémité A et s'étend au-delà de l'extrémité B de la longueur de cheminement parallèle

Le pipeline est mis à la terre à l'extrémité A, son potentiel est le même que celle-ci. Les différentes impédances mis en jeu prennent les valeurs suivantes :

$$Z_A = 0, Z_B = Z_c \tag{IV-80}$$

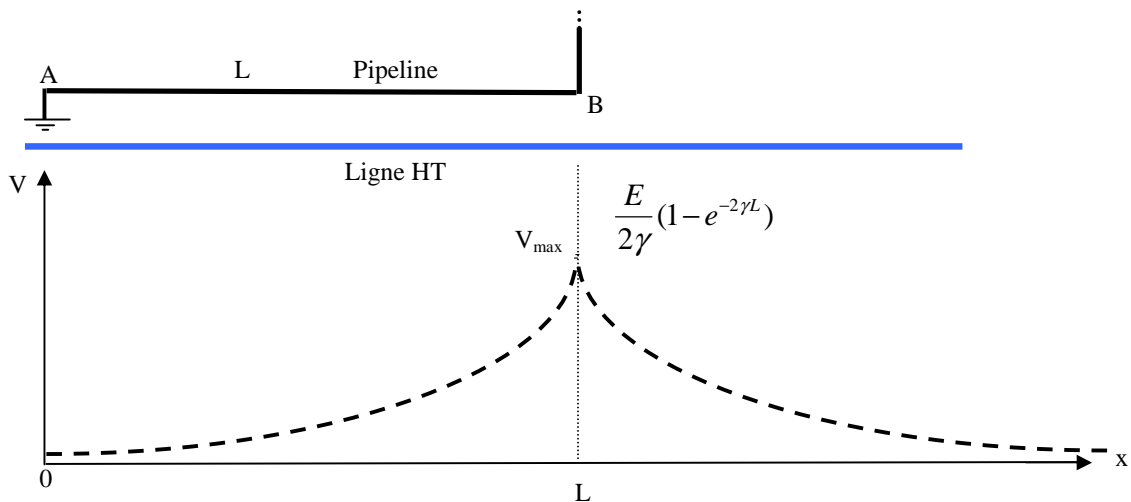


Figure IV-17 : Evolution de la tension lorsque le pipeline est mis à la terre à une extrémité

Ce qui aboutit aux équations suivantes :

$$v_1 = -1, v_2 = 0 \quad (\text{IV.81})$$

$$V(x) = \frac{E}{2 \cdot \gamma} \left[(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}) \right] \cdot e^{-\gamma \cdot L} \quad (\text{IV.82})$$

$$V_{(0)} = 0 \quad (\text{IV.83})$$

$$V_{(L)} = V_{\max} = \frac{E}{2 \cdot \gamma} (1 - e^{-2 \cdot \gamma \cdot L}) \quad (\text{IV.84})$$

Et :

$$I(x) = \frac{E}{2 \cdot Z_c} \left[2 - (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}) \cdot e^{-\gamma \cdot L} \right] \quad (\text{IV.85})$$

- d) - Le pipeline est isolé de deux côtés A et B de la longueur de cheminement parallèle avec une bride isolante :

Dans ce cas :

$$Z_A = Z_B = \infty \quad (\text{IV-86})$$

Il en découle les égalités suivantes:

$$v_1 = v_2 = 1 \quad (\text{IV-87})$$

$$V(x) = \frac{E}{\gamma} \cdot \frac{e^{\gamma x} - e^{\gamma(L-x)}}{e^{\gamma L} + 1} \quad (\text{IV-88})$$

Le potentiel maximum du pipeline est au niveau des extrémités ($x = 0$ et $x = L$)

$$U_{\max} = \frac{E}{\gamma} \cdot \frac{e^{\gamma L} - 1}{e^{\gamma L} + 1} \quad (\text{IV-89})$$

Au point médian du parallélisme, c'est à dire à $x = L / 2$, le potentiel est nul ($V = 0$).

La procédure d'application de l'algorithme proposé est représentée sur la figure IV-18.

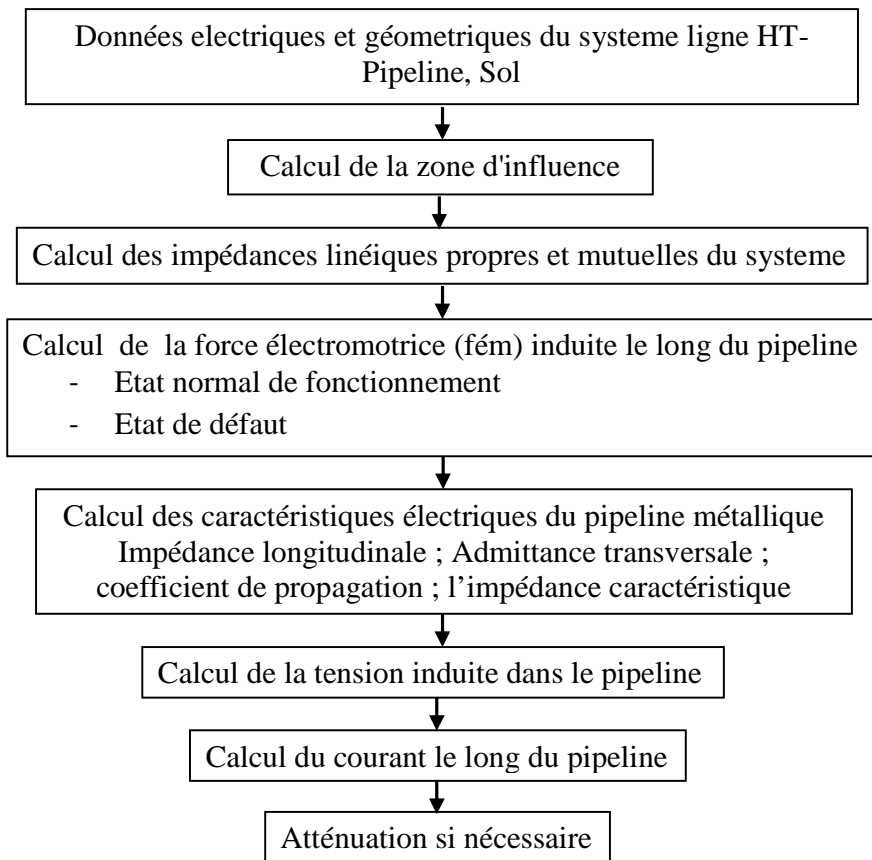


Figure IV-18 : Organigramme illustrant le principe de l'algorithme proposé pour le couplage inductif

IV.6. Zone d'influence formée par les parallélismes, les rapprochements, les passages

Pour les zones d'influence qui sont généralement formés par le parallélisme, les rapprochements, les croisements, comme le montre la figure IV-19. Le calcul consiste à subdiviser la zone l'influence en plusieurs sections selon les règles définies précédemment, ces sections seront converties à des parallélismes [30,57].

Pour l'évaluation, la zone complète de l'influence est représentée par des sections parallèles, chaque section est soumise à une force électromotrice induite (fém) équivalente par unité de longueur.

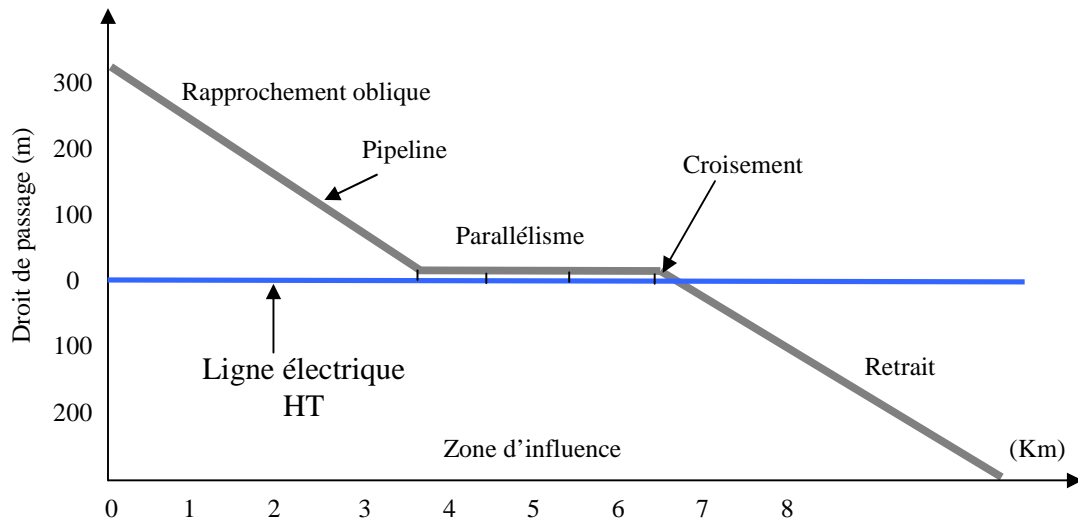


Figure IV-19: Zone d'influence: pipeline – ligne HT

Cette force électromotrice équivalente est donnée par l'expression:

$$E = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n E_i \cdot L_i \quad (\text{IV-90})$$

Où : E_i est la force électromotrice (fém) par unité de longueur dans la section i ; L_i est la longueur de la section i , n est le nombre de sections, L est la longueur totale de la zone d'influence définie comme :

$$L = \sum_{i=1}^n L_i \quad (\text{IV-91})$$

Le calcul des tensions est effectué à la fois aux deux extrémités des sections. Chaque section est représentée par un réseau électrique équivalent en π , d'une ligne qui est influencé par la force électromotrice induite.

L'impédance longitudinale Z est la somme de l'impédance interne du pipeline et de l'impédance externe du circuit avec retour par le sol.

L'admittance Y comprend deux termes, le premier correspond à la résistance parasite et le second à la capacité entre le pipeline et le sol.

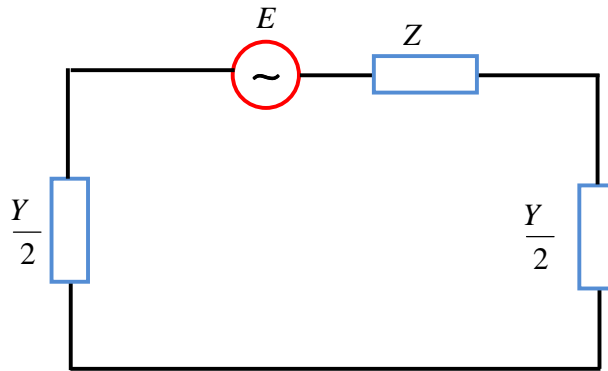


Figure IV-20 : Circuit électrique équivalent en π

L'équation de la cellule i (voir figure IV-21) est donnée par l'expression:

$$-Z_{i-1,i} \cdot I_{i-1} + (Z_{i-1,i} + Z_i + Z_{i,i+1}) \cdot I_i - Z_{i,i+1} \cdot I_{i+1} = e_i = E_i \cdot L_i \tag{IV-92}$$

Avec :

$$Z_{i-1,i} = \frac{2}{(Y_{i-1} + Y_i)} \tag{IV-93}$$

L_i = longueur de la section i .

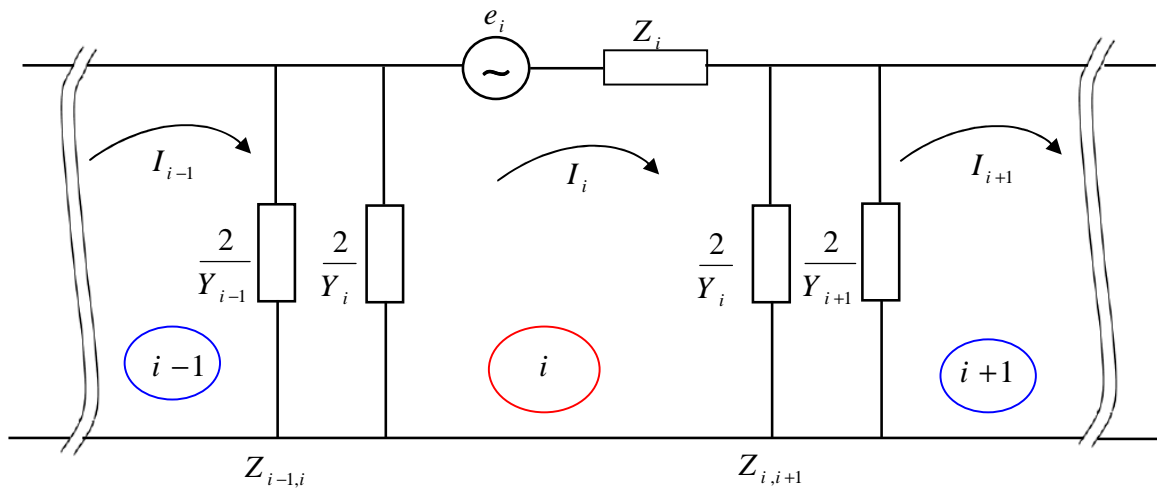


Figure IV-21 : Représentation du circuit équivalent pipeline-sol

En ce qui concerne les équations de la 1ère et de la dernière cellule, ils doivent prendre en considération la partie du pipeline qui s'étend éventuellement à l'extérieur de la zone d'influence; il peut être représenté par l'impédance caractéristique Z_c si le pipeline s'étend à quelques kilomètres en dehors de la zone d'influence.

L'équation de la cellule 1 est, dans cette condition :

$$(Z_{0,1} + Z_1 + Z_{1,2}) \cdot I_1 - Z_{1,2} \cdot I_2 = E_1 \cdot L_1 \quad (\text{IV-94})$$

Avec :

$$Z_{0,1} = Z_c // (2/Y_1) \quad (\text{IV-95})$$

Si le pipeline s'arrête à l'extrémité de la zone d'influence, l'équation de la cellule n devient :

$$-Z_{n-1,n} \cdot I_{n-1} + (Z_{n-1,n} + Z_n + Z_{n,n+1}) \cdot I_n = E_n \cdot L_n \quad (\text{IV-96})$$

Avec :

$$Z_{n,n+1} = (2/Y_n) \quad (\text{IV-97})$$

Le circuit équivalent peut maintenant être facilement analysé en utilisant les lois de Kirchhoff et transformé en un système d'équations linéaires.

Les tensions des nœuds (pipeline-terre) et les courants le long du pipeline inconnus peuvent être résolus à l'aide d'opérations matricielles. Selon le nombre de sections de ligne.

Ce système d'équations pour toute la zone d'influence peut être exprimé comme suit:

$$\begin{aligned} (Z_{0,1} + Z_1 + Z_{1,2}) \cdot I_1 - Z_{1,2} \cdot I_2 &= e_1 \\ -Z_{1,2} \cdot I_1 + (Z_2 + Z_{12} + Z_{2,3}) \cdot I_2 - Z_{2,3} \cdot I_3 &= e_2 \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ -Z_{i-2,i-1} \cdot I_{i-2} + (Z_{i-2,i-1} + Z_{i-1} + Z_{i-1,i}) \cdot I_{i-1} - Z_{i-1,i} \cdot I_i &= e_{i-1} \\ -Z_{i-1,i} \cdot I_{i-1} + (Z_{i-1,i} + Z_i + Z_{i,i+1}) \cdot I_i &= e_i \end{aligned} \quad (\text{IV-98})$$

Où : e_i est la force électromotrice induite dans la section i.

La résolution de ce système d'équations permettent de déterminer successivement :

- Les tensions au niveau des extrémités des différentes sections
- Les courants le long du pipeline

La longueur de chaque section sera limitée afin d'obtenir une bonne évaluation du profil de tension et de courant le long du pipeline.

Le même système de relations peut être utilisé pour prendre en considération l'influence des mises à la terre locale sur le niveau de tension et le profil. Pour une mise à la terre avec une résistance $R_{i-1, i}$, i entre les cellules $i-1$ et i , l'impédance :

$$Z_{i-1, i} = \frac{2}{Y_{i-1} + Y_i} \quad (\text{IV-99})$$

Sera remplacée par :

$$Z'_{i-1, i} = \frac{Z_{i-1, i} \cdot R_{i-1, i}}{Z_{i-1, i} + R_{i-1, i}} \quad (\text{IV-100})$$

D'après ce qui précède, un algorithme consiste à décrire les différentes étapes de calcul se déroule comme suit [127]:

Etape 1 : introduction de tous les paramètres électriques et géométriques de la ligne, pipeline et sol ;

Etape 2 : Définition de la zone d'influence en fonction de la résistivité du sol autour de pipeline ;

Etape 3 : subdivision du pipeline et de la ligne de transmission en petites sections, calcul des distances horizontales de séparation pour chaque section ;

Etape 4 : Calcul des distances efficaces, la distance entre chaque phase ou câble de garde et le pipeline ;

Etape 5 : Calcul des caractéristiques électriques du pipeline, impédance série longitudinale, admittance shunt, coefficient de propagation, impédance caractéristique ;

Etape 6 : Calcul des impédances linéiques propres et mutuelles du système ;

Etape 7: Calcul de la force électromotrice induite dans les cas (normales de fonctionnement, cas de défaut) ;

Etape 8: Calcul du courant le long du pipeline et de la tension induite ;

Étape 9: Réalisation de l'atténuation si nécessaire.

IV.7. Caractéristiques électriques des pipelines métalliques

Pour quantifier les tensions induites et les courants issus du couplage inductif entre les conducteurs et les pipelines, il est nécessaire de calculer les impédances linéiques propres et mutuelles. La majorité des formulations analytiques existent pour le calcul des impédances et des admittances linéiques sont basées sur les méthodes de Carson et Carson-Clem [126].

IV.7.1. Impédance longitudinale (série) avec retour par le sol

Dans le calcul de la tension du pipeline à la terre, nous avons représenté le pipeline comme une longue ligne de transmission avec perte. Le pipeline est caractérisé par sa constante de propagation et son impédance caractéristique données respectivement par les équations (IV-53) et (IV-54), où z et y sont respectivement l'impédance série du pipeline avec retour par la terre et l'admittance shunt. L'impédance série est constituée de l'impédance interne et de l'impédance externe par retour à la terre. Pour les pipelines installés au dessus du sol, l'impédance longitudinale série par retour à la terre par unité de longueur du pipeline est donnée par [30,119]:

$$Z = \frac{\sqrt{\rho_p \cdot \mu_p f}}{3.163 r_p} + \pi^2 \cdot 10^{-4} f + j \left[\frac{\sqrt{\rho_p \cdot \mu_p f}}{3.163 r_p} + 4 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-4} f \log_e \left(\frac{D_e}{r_p} \right) \right] \quad (\text{IV-101})$$

Où :

r_p est le rayon extérieur du pipeline ;

μ_p est la perméabilité relative du métal du pipeline, généralement un acier ferromagnétique;

ρ_p est la résistivité du métal de pipeline ;

f est la fréquence nominale de la ligne de transmission (Hz) ;

D_e est la profondeur équivalente par retour à la terre donnée dans l'équation (IV-09).

Pour les pipelines enterrés, l'impédance série d'un pipeline est donnée par la formule générale donnée ci-dessous [30,119]:

$$Z = \frac{\sqrt{\rho_p \cdot \mu_p f}}{(3.163) r_p} + \pi^2 \cdot 10^{-4} f + j \left[\frac{\sqrt{\rho_p \cdot \mu_p f}}{(3.163) r_p} + 4 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-4} f \times \log_e \left(\frac{1.85}{r_{p(eq)} \sqrt{\gamma^2 + 8 \cdot \pi^2 f \cdot 10^{-7} (1/\rho_s + j \cdot 2 \cdot \pi f \cdot \epsilon_s)}} \right) \right] \quad (\text{IV-102})$$

Où :

$$r_{p(eq)} = \sqrt{r_p^2 + 4 d_p^2} \quad (\text{IV-103})$$

$r_{p(eq)}$ est le rayon équivalent du pipeline;

d_p est représentée la profondeur du pipeline ;

ρ_s et ϵ_s : sont respectivement, la résistivité et la permittivité du sol ;

γ : est le coefficient de propagation du pipeline.

En règle générale, pour les modernes canalisations enterrées revêtues d'enduits, l'équation (IV-101) est suffisamment précise.

IV.7.2. Admittance transversale (shunt) du pipeline

Pour une canalisation en acier non revêtue installée au-dessus du sol à une hauteur h_p , l'admittance shunt du pipeline est calculée en utilisant l'équation suivante [30,119]:

$$Y = j.2.\pi.f.C_p \quad (\text{IV-104})$$

Où :

C_p est la capacité linéique du pipeline, se calcule à l'aide de l'équation (III .32). Ainsi :

$$Y = j. \frac{0.349549.f.10^{-6}}{\log_e \left(\frac{h_p + \sqrt{h_p^2 - r_p^2}}{r_p} \right)} \quad (\text{IV-105})$$

Pour une canalisation enterrée revêtue, l'admittance shunt équivalente entre le pipeline et le terrain environnant se compose de l'admittance du revêtement Y_r (Y_r est due au revêtement) en série avec l'admittance externe du sol Y_s (Y_s dépend de la constante de propagation γ) selon l'expression suivante:

$$Y = \frac{1}{\frac{1}{Y_r} + \frac{1}{Y_s}} \quad (\text{IV-106})$$

Avec :

$$Y_r = \frac{2000.\pi.r_p}{R_c} + j. \frac{\pi.r_p.f.\epsilon_c.10^{-6}}{9.t_c} \quad (\text{IV-107})$$

Et

$$Y_s = \frac{1000.\pi(1/\rho_s + j.2\pi.f.\epsilon_s)}{\log_e \left(\frac{1.12}{\gamma.r_{p(eq)}} \right)} \quad (\text{IV-108})$$

R_c est la résistivité électrique spécifique du revêtement de pipeline. Elle est calculée comme suit:

$$R_c = \rho_c.t_c \quad (\text{IV-109})$$

Où :

ρ_c est la résistivité du revêtement du pipeline en ($\Omega.m$) ;

t_c est l'épaisseur du revêtement en m;

ϵ_c est la permittivité relative du revêtement.

Pour des canalisations revêtues, généralement avec une grande résistivité du revêtement, Y_r est beaucoup plus grande que Y_s ($Y_r \gg Y_s$) et l'équation (IV-106) s'écrit donc de la manière suivante:

$$Y = Y_r = \frac{2000 \cdot \pi \cdot r_p}{R_c} + j \cdot \frac{\pi \cdot r_p \cdot f \cdot \epsilon_c \cdot 10^{-6}}{9 t_c} \quad (\text{IV-110})$$

Le tableau (IV.1) ci-dessous montre les épaisseurs et les résistances spécifiques de quelques types de revêtements utilisés pour protéger les pipelines [30,103].

Tableau IV.1: Résistance de revêtement des pipelines

Type de revêtement	Epaisseur du revêtement t_c (mm)	Résistance spécifique du revêtement R_c (k Ω .m ²)
Bitumineux	4-6	10
Polyéthylène	2-3	10 ²
Résine époxy	0.3-0.6	10

A partir des impédances et admittances propres et mutuelles des conducteurs d'une ligne en présence du sol, les courants et tensions peuvent être connus en tout point du système

IV.8. 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) [125,128, 129,130]:

$$e(t) = - \frac{d\phi_t}{dt} \quad (\text{IV-111})$$

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 [125,128, 129,130]:

$$\phi_i = \iint_S B \, ds \quad (\text{IV-112})$$

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

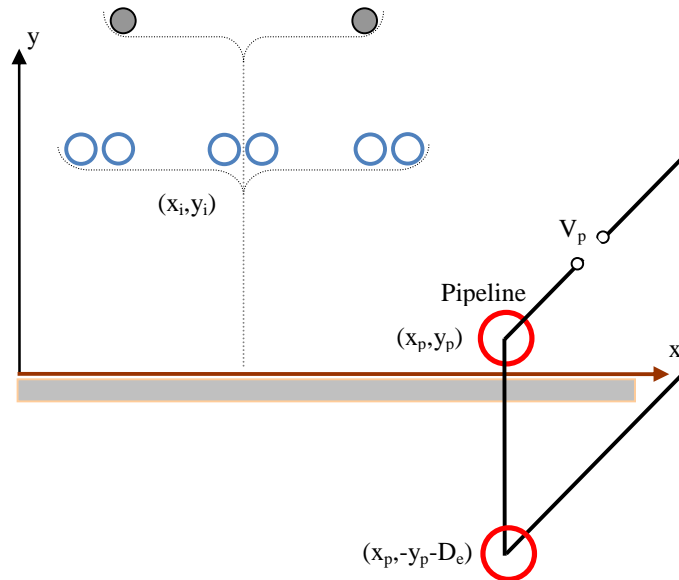


Figure IV-22: Tension induite dans le pipeline par le couplage inductif

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 IV-22, le flux magnétique total peut être exprimé comme suit [126,128, 129,130]:

$$\phi = \frac{\mu_0 \cdot L}{4\pi} \sum_{i=1}^n I_i \ln \frac{(x_p + x_i)^2 + (y_p + D_e + y_i)^2}{(x_p + x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} \quad (\text{IV-113})$$

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 (IV-112) et (IV-113), on obtient l'expression de la tension induite dans la boucle:

$$V_p = -j \cdot \omega \cdot \phi_t \quad (\text{IV-114})$$

Où :

V_p : est la tension induite dans la boucle ;

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

IV.9. Conclusion

Ce chapitre décrit les procédures adoptées pour déterminer l'induction magnétique au niveau de la canalisation métallique, le potentiel induit résultant 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 le long du pipeline.
- Le calcul de tension entre le pipeline le sol local, et l'intensité du courant induit en réponse à la force électromotrice induite.

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. Deux cas de voisinage entre la ligne électrique à haute tension et la canalisation métallique ont été étudiés, le cas simple de parallélisme et le cas du trajet complexe, tel que le rapprochement oblique et le croisement.

CHAPITRE V

Analyse et interprétation des résultats

V.1. Introduction

Après avoir décrit le système : lignes électriques- pipeline métallique, étudié les interactions pouvant exister et présenter les méthodologies utilisées pour le calcul des interférences dues aux couplages capacitif et inductif, nous présentons et discutons en détail dans ce qui suit l'ensemble des résultats de simulation obtenus.

Dans la première partie, on expose et discute les résultats de simulation du couplage capacitif. Ils concernent le champ électrique perturbé, le potentiel électrique induit, les courants circulant dans les corps en contact avec les pipelines et les techniques d'atténuation.

La deuxième 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, le courant le long du pipeline, et le moyen approprié de réduction de la tension induite, dans le cas d'un parallélisme parfait et le cas composé d'une succession de parallélismes, des rapprochements obliques et croisements.

V.2. Analyse du couplage capacitif

V.2.1. Calcul du champ électrique

L'étude porte sur une ligne de transmission d'énergie de 400 kV, à simple circuit, disposée en nappe horizontale avec une paire de câbles de garde et au voisinage un pipeline métallique en surface isolée comme montrée à la figure V-1.

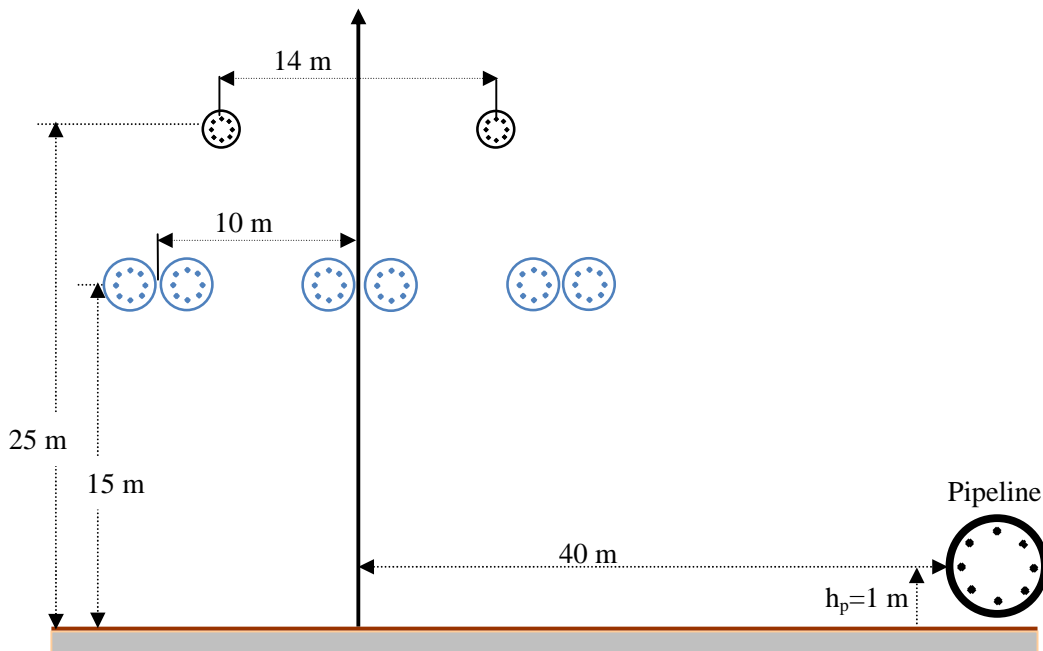


Figure V-1 : Géométrie d'une ligne triphasée en nappe horizontale parallèle avec un pipeline

Chaque phase est constituée d'un faisceau de deux conducteurs distants de 45 cm. Le rayon d'un conducteur de phase est 1,58 cm et celui du câble de garde est 1,12 cm.

Le pipeline installé à une distance de 40 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, une longueur d'exposition parallèle de 4 km et est placé à une hauteur de 1 m au-dessus du sol. Le fonctionnement de la ligne triphasée du réseau électrique est en régime normal.

V.2.1.1. Application des algorithmes génétiques pour l'optimisation des paramètres

Nous avons utilisé la méthode des charges fictives pour le calcul du champ électrique, il reste à rechercher et optimiser le nombre de charges et leurs emplacements. La recherche des meilleurs paramètres est faite à l'aide d'un algorithme génétique (AG). Les paramètres d'entrée utilisés dans l'algorithme génétique pour le calcul numérique sont présentés dans le tableau V.1.

Tableau V.1 : les paramètres des méthodes AG et MCF

	Paramètre des méthodes AG et MCF
Algorithme Génétique (AG) et méthode des charges fictives (MCF)	Nombre de variables population (06 variables); Nombre maximal d'itération $G_{\max} = 200$ Taille de la population (popsize=10); Nombre de bits (Nb=14); Probabilité de mutation (Pm=0.1) ; Probabilité de croisement (Pc=0.9); Rangée des charges de simulation <ul style="list-style-type: none"> - Pour le pipeline [02-30] - Pour le conducteur phase [02-12] - Pour le câble de garde [02-12] Rangée des rayons fictifs <ul style="list-style-type: none"> - Pour le Pipeline [0.1-0.27] - Pour le conducteur phase [0.01-0.06] - Pour le câble de garde [0.001-0.01]

Les résultats de l'application des Algorithme Génétique (AG) pour l'estimation des paramètres optimaux du circuit sont présentés au tableau V.2.

Tableau V.2 : Résultats de l'application des algorithmes Génétique (AG)

	Nombre de charges de simulation	Rayons fictifs [m]	Valeur de la fonction objective (FO)
conducteur phase	4	0.0404	2.8844e-016
câble de garde	10	0.0020	
Pipeline	18	0.1355	

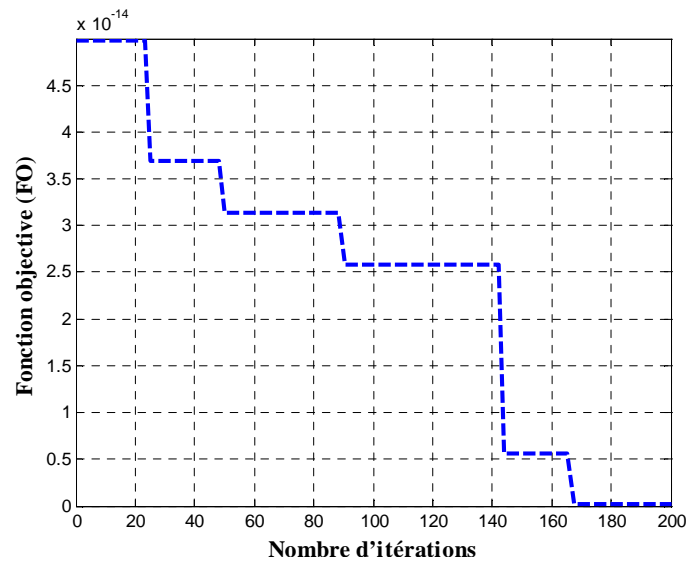


Figure V-2 : Convergence de la fonction objective (FO) de l'algorithme

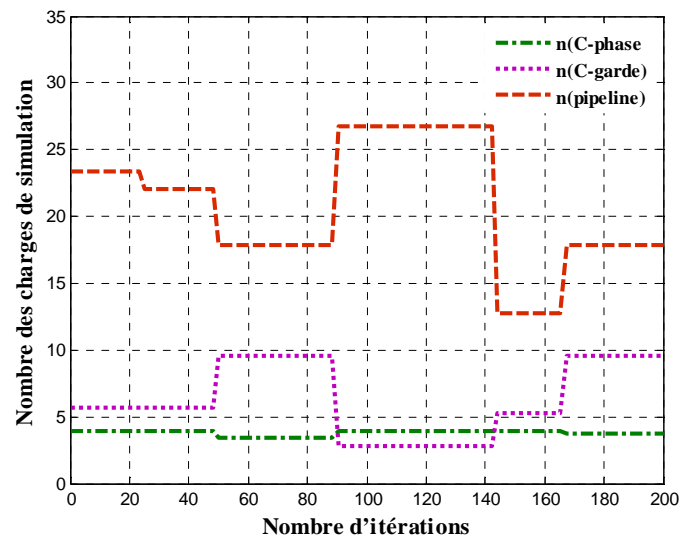


Figure V-3 : Convergence de l'algorithme vers les solutions optimales du nombre des charges de simulation

La variation de la fonction objective (FO) en fonction du nombre d'itérations (générations) de l'application est donnée par la figure V-2. Elle illustre les processus de recherche et d'optimisation entreprise par l'algorithme génétique. Les résultats de simulation pour le nombre des charges de simulation et les rayons fictifs des charges sont présentés dans les figures V-3 et V-4, où il devient évident que l'algorithme converge rapidement vers ces valeurs.

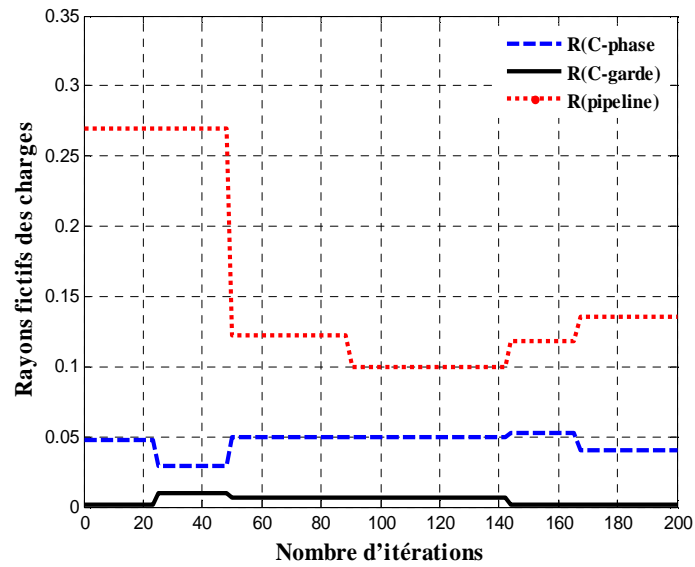


Figure V-4 : Convergence de l'algorithme vers les solutions optimales des valeurs des rayons fictifs

Après la détermination de la solution optimale des différents paramètres, tels que le nombre de charges fictives, la localisation des charges fictives. Il est facile de calculer le champ électrique en tout point entourant la ligne électrique.

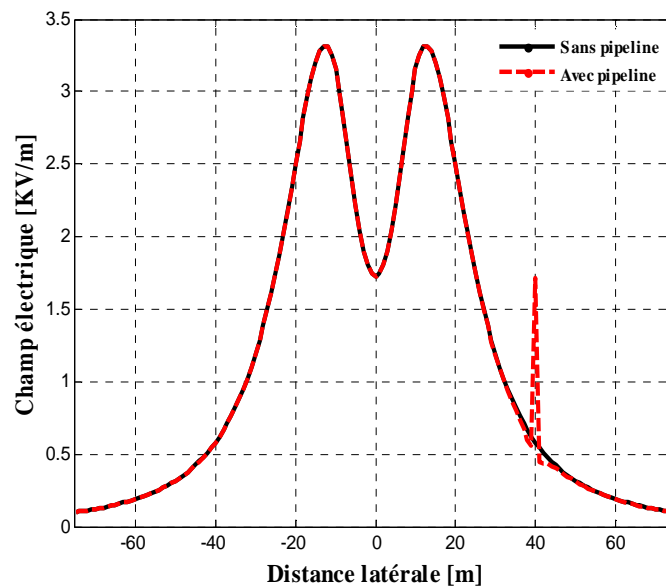


Figure V-5 : Profil latéral du champ électrique à 1 mètre au-dessus du sol avec et sans la présence d'un pipeline métallique

V.2.1.2. Analyse du champ électrique en présence d'un pipeline métallique

Dans ce paragraphe, nous évaluons l'influence de la présence du pipeline sur la distribution du champ électrique. Le pipeline est situé dans le corridor de la ligne de transmission.

La figure V-5 représente le profil latéral du champ électrique à une hauteur d'un 1 mètre au-dessus du sol, avec et sans la présence d'un pipeline métallique. On constate d'après ce graphe que la présence du pipeline a un effet significatif sur la distribution du champ électrique. En effet le champ électrique subit une augmentation considérable à l'endroit où le pipeline est implanté. Le profil, sans la présence du pipeline, du champ présente une symétrie par rapport au centre de la ligne de transmission.

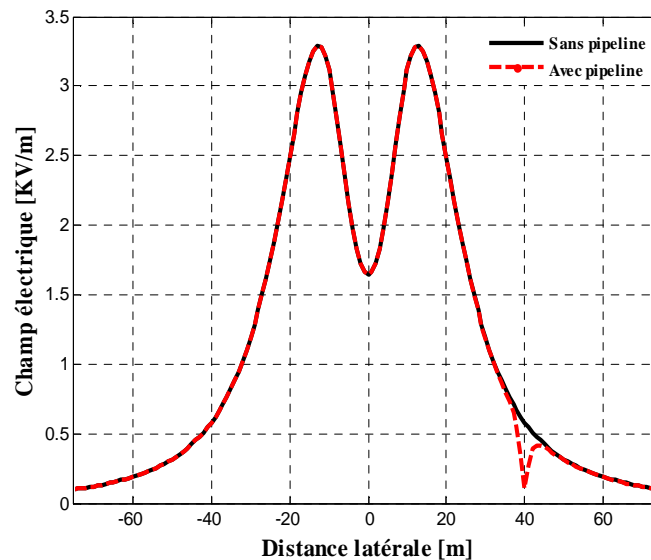


Figure V-6: Profil transversal du champ électrique au niveau du sol avec et sans la présence d'un pipeline métallique

La figure V-6 présente le profil latéral du champ électrique au niveau du sol. On remarque que ce profil est modifié. A la position où il se trouve le pipeline, la valeur du champ électrique est minimale. Bien que la présence des pipelines à proximité de lignes de transmission est bénéfique, elles permettent de réduire considérablement le niveau du champ électrique au niveau du sol dans son voisinage, il est néanmoins important d'évaluer les effets de leur exposition continue à long terme, afin de déterminer si ces champs peuvent causer des dommages à la structure métallique.

La figure V-7 décrit la cartographie du champ électrique du le système : ligne triphasée 400 kV - pipeline métallique, au long de la zone définie par la hauteur de la ligne HT, et l'axe de l'emprise de la ligne électrique haute tension. Le champ électrique est calculé aux différents points de la position des conducteurs, comme il est expliqué par la variation de la distribution latérale des niveaux du champ électrique dans cette figure. On peut remarquer que le niveau intense (concentré) du champ électrique est obtenu autour des conducteurs de phase de la ligne, le champ diminue progressivement avec l'éloignement du centre de la ligne dans les deux directions de l'emprise.

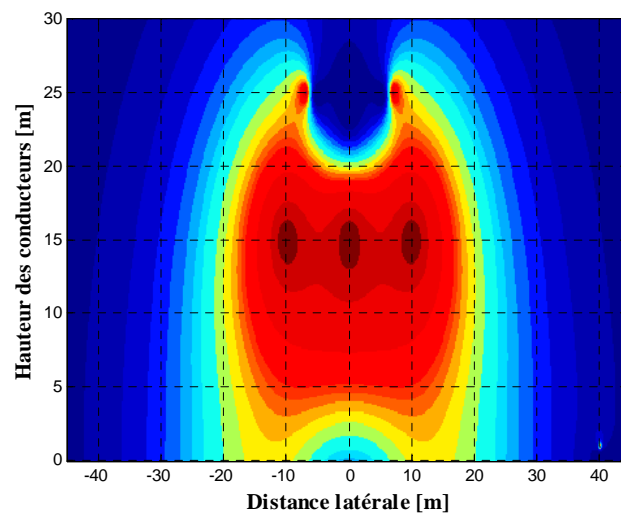


Figure V-7: Visualisation du champ électrique créée par le système : Ligne triphasée 400 kV - pipeline métallique (coupe transversale)

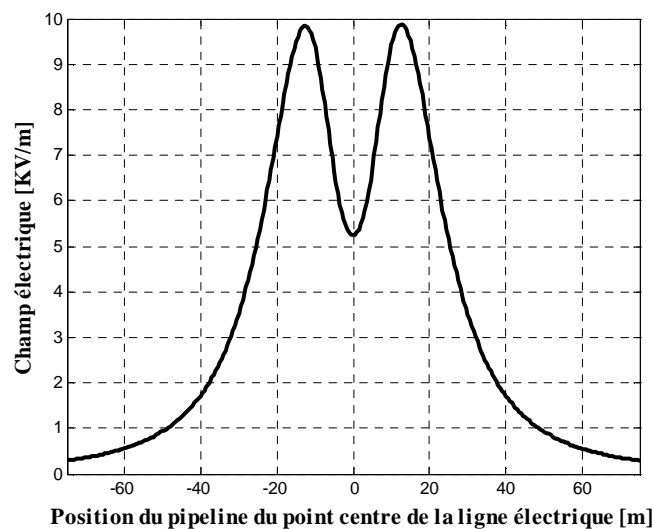


Figure V-8 : L'effet de la position horizontale du pipeline sur la distribution du champ électrique

V.2.1.3. L'effet de différents paramètres sur le champ électrique

V.2.1.3.1. Effet de la distance de séparation du pipeline

L'effet de l'emplacement du pipeline sur la répartition du champ électrique au niveau de la surface du pipeline est illustré à la figure V-8. On remarque que le champ électrique au niveau du pipeline croît progressivement à mesure qu'on s'éloigne du centre de la ligne de transmission jusqu'à une valeur maximale, puis il décroît régulièrement avec la distance pour atteindre des valeurs négligeables.

V. 2.1.3.2. Effet du rayon du pipeline

Afin d'introduire l'effet du rayon du pipeline sur le niveau du champ électrique. On représente à la figure V-9, la variation du champ électrique en fonction du rayon du pipeline. La distance horizontale de séparation est maintenue égale à 40 m, avec une hauteur de 1 m. on peut voir que le champ électrique diminue lorsque le rayon du pipeline augmente. Ceci montre qu'une augmentation importante du rayon du pipeline conduit à une diminution significative du niveau du champ électrique. Cependant, une telle augmentation dans le rayon du pipeline serait irréaliste, car il serait très lourd et économiquement peu rentable.

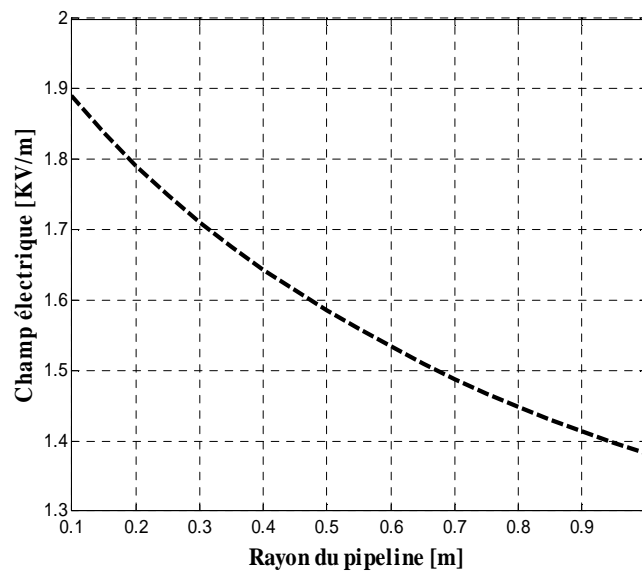


Figure V-9 : L'effet du rayon du pipeline sur la distribution du champ électrique

V. 2.1.3.3. Effet de la hauteur du pipeline

La figure V-10 montre le profil de champ électrique en fonction de la hauteur du pipeline. Comme on peut le voir, le champ électrique augmente proportionnellement avec la hauteur de la canalisation métallique. En changeant la hauteur du pipeline, le champ électrique est fortement affecté.

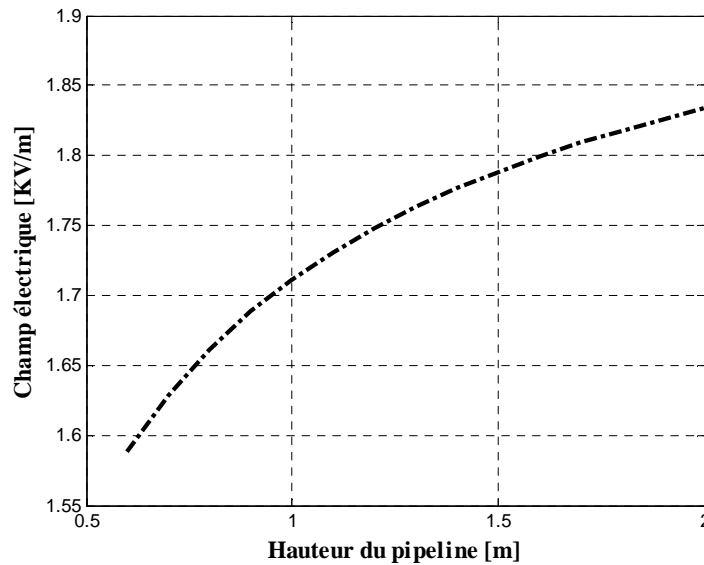


Figure V-10 : L'effet de la hauteur du pipeline sur la distribution du champ électrique

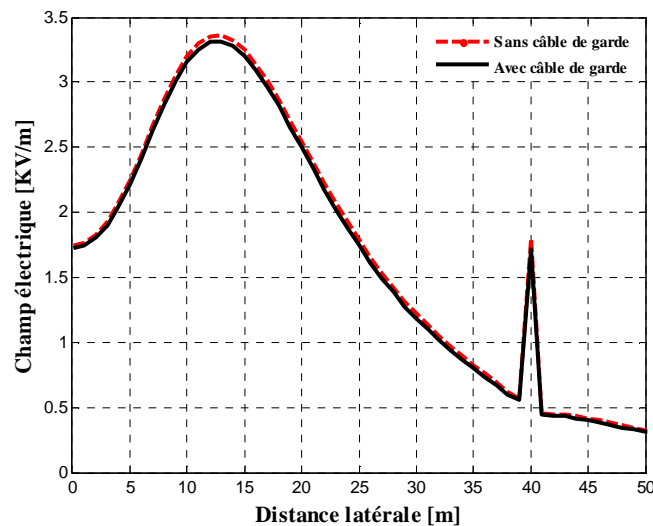


Figure V-11 : L'effet du câble de garde sur la distribution du champ électrique

V. 2.1.3.4. Effet du câble de garde

Les champs électriques en présence d'un pipeline avec et sans les câbles de garde sont calculés et présentés à la figure V-11, nous constatons que la présence du câble de garde entraîne une réduction de 4.52 % du champ électrique au niveau de la canalisation.

Les résultats de calcul sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau V.3 : Comparaison des valeurs du champ électrique perturbé sous la ligne HT en nappe horizontale avec et sans les câbles de garde

	Champ électrique perturbé (kV/m)	Réduction (%)
Sans câble de garde	1.792	
Avec câble de garde	1.711	4.52%

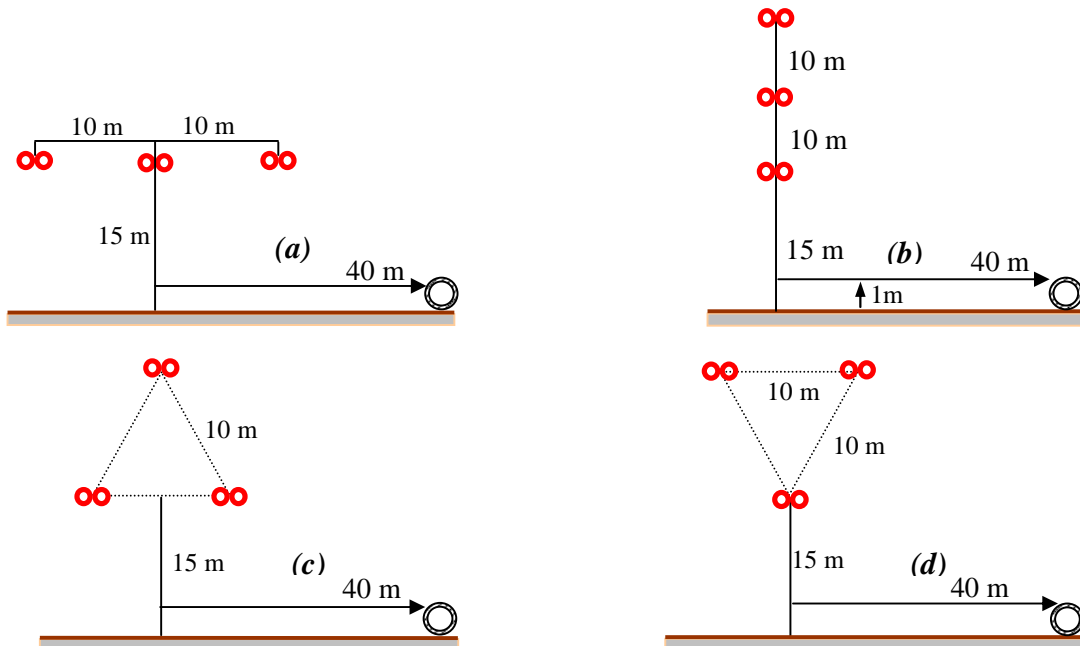


Figure V-12 : Représentation géométrique des différentes configurations d'une ligne électrique.
(a) nappe horizontale, (b) nappe verticale, (c) triangle, (d) triangle inversé

V. 2.1.3.5. Influence de la configuration géométrique du circuit

La figure V-13 représente les profils des champs électriques au niveau du pipeline pour différentes configurations de circuit (voir figure V-12). Nous remarquons que la configuration en nappe verticale donne une faible valeur du champ. La valeur la plus élevée du champ perturbé est obtenue par la géométrie en nappe horizontale.

Les résultats du champ électrique calculé au niveau du pipeline, sont indiqués dans le tableau V.4.

Tableau V.4 : Résultats du champ électrique pour les différentes configurations d'une ligne aérienne

	Nappe horizontale	Nappe verticale	Triangle	Triangle inverse
Champ électrique perturbé (kV/m)	1.792	0.590	1.022	1.176

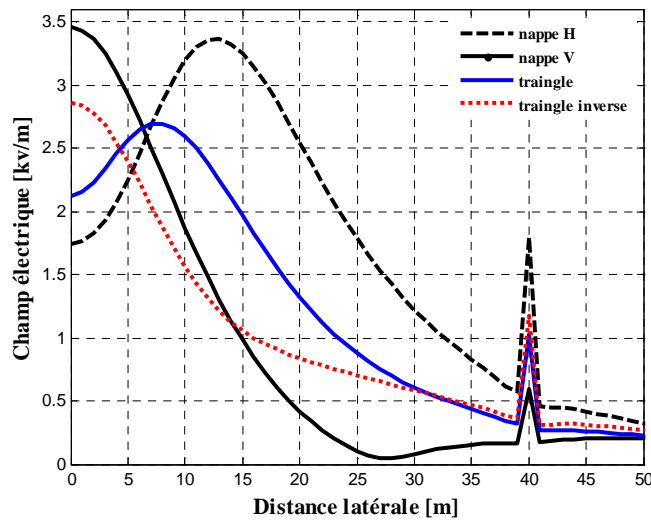


Figure V-13: profil transversal du champ électrique pour différentes configurations à simple circuit

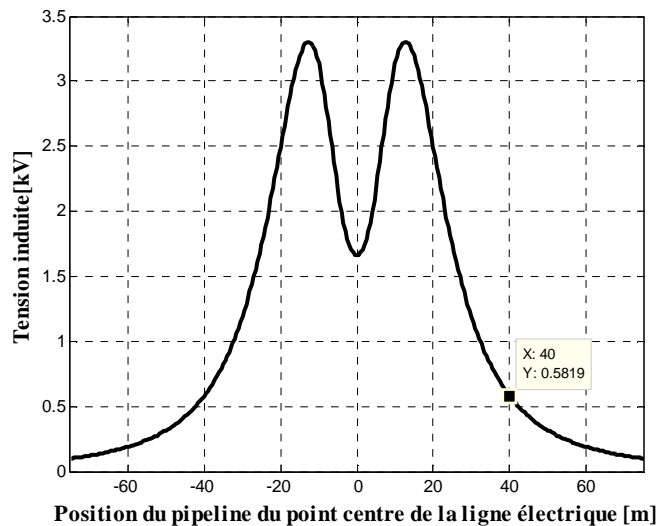


Figure V-14: Tension induite dans le pipeline pour la configuration en nappe horizontale

V.2.3. La tension induite dans le pipeline

La tension induite au niveau du pipeline est directement due à l'effet du champ électrique créé par la ligne électrique, son intensité est proportionnelle au champ électrique. Le potentiel créé présente un risque de choc électrique pour les personnes qui entrent en contact avec les installations des pipelines. Par conséquent, il est impératif de calculer cette tension afin de garantir la sécurité des personnes. La figure V-14, montre les résultats de calcul de la tension induite sur un pipeline situé à des distances différentes à partir de l'axe central de la ligne de transport.

On peut voir que la tension induite est maximale près et sous les conducteurs latéraux. La tension induite sous le conducteur central est inférieure à celle calculée précédemment que les conducteurs latéraux. La tension induite décroît rapidement avec la distance, à un point situé très loin de la ligne, la valeur est environ dix fois plus faible que la valeur maximale rencontrée sous la ligne.

Une comparaison des tensions induites selon des différentes configurations (figure V-12) est illustrée à la figure ci-dessous (figure V-15).

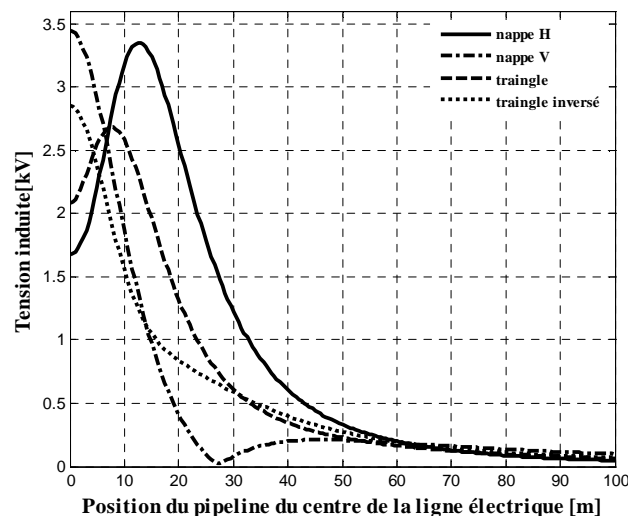


Figure V-15: Tension induite sur le pipeline pour différentes configurations de phase

On peut observer que la tension induite au niveau du pipeline est élevée pour la configuration en nappe verticale lorsque le pipeline est implanté au point axial de l'emprise de la ligne ou à proximité ($x \leq 7\text{m}$). La tension induite diminue progressivement à mesure qu'on s'éloigne de l'axe de la ligne de transmission. On peut aussi observer que la tension induite devient presque négligeable à une distance ($x=28\text{ m}$) au-delà de laquelle la tension induite

augmente à nouveau et reste toujours inférieure aux tensions induites déduites des autres configurations, jusqu'à une distance proche de 50 m.

Pour la configuration horizontale, la tension induite dans le pipeline est plus basse lorsque le pipeline est prévu sous ou à proximité du point centre de l'emprise de la ligne ($y \leq 7\text{m}$), à partir de ce point, la tension induite augmente où elle atteint sa valeur maximum, puis diminue ensuite jusqu'à être négligeable très loin de la ligne. Par conséquent, il est suggéré que le pipeline est situé tout près de la distance où la tension induite serait proche de zéro.

V.2.4. Courant induit dans le corps humain en contact avec le pipeline

Le calcul des courants circulant dans les personnes entrant en contact avec les pipelines est essentiel afin d'évaluer les risques vis-à-vis de la sécurité humaine. La figure V-16 montre la variation du courant (en mA) en fonction de la distance de séparation du pipeline le long de l'emprise du droit de passage (en mètres). Le profil du courant induit est similaire à celui du champ électrique et du potentiel. Dans notre cas de base d'étude (cf. paragraphe V.2.1) le courant induit en cas de contact avec le pipeline est de 21.71 mA. Ce courant est élevé par rapport aux recommandations des normes qui fixent les valeurs maximales admissibles tolérées de 5 mA à 15 mA [30]. Ainsi, il devient impératif d'appliquer une technique d'atténuation.

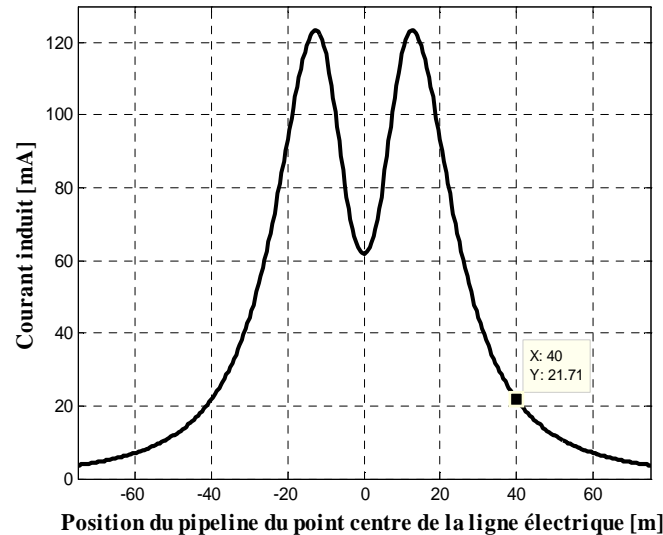


Figure V-16: Le courant induit par couplage capacitif pour la configuration en nappe horizontale

V.2.5. La technique d'atténuation

Le principal effet indésirable du couplage capacitif est associé à la sécurité des personnes et des biens. En effet, toute personne en contact avec un pipeline sous tension s'expose à un choc

électrique externe qui peut être dangereux et peut entraîner de graves blessures corporelles si le courant dépasse la limite admissible ($I_{adm} = 5-15 \text{ mA}$) [30] et si les mesures adéquates ne sont pas prises. Par exemple, le pipeline est généralement mis à la terre au moyen d'une résistance appropriée de l'ordre de quelques centaines d'ohms.

Selon la norme américaine IEEE 80:2000 [117], on considère généralement la résistance du corps humain prise dans le cas le plus défavorable comme étant égale à 1000Ω .

D'après la configuration du circuit : ligne HT – pipeline représentée à la figure V-1. Selon la relation (III .24), la résistance de mise à la terre du pipeline en fonction de la position horizontale du pipeline pour les trois valeurs de courant admissible I_{adm} est représenté à la figure V-17.

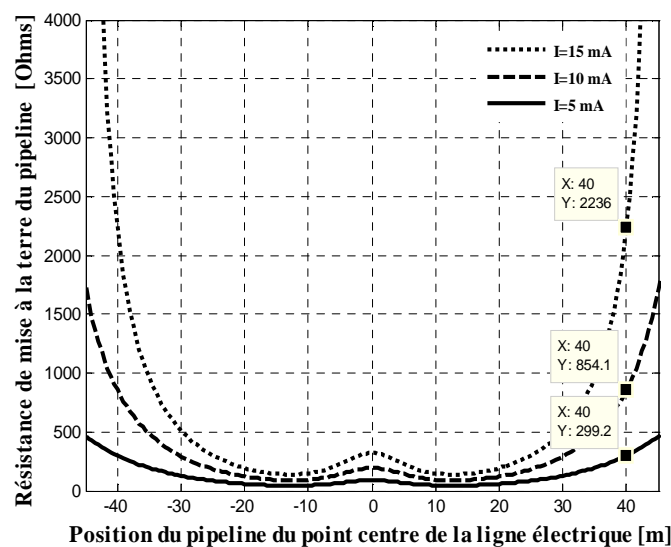


Figure V-17: Profil de la résistance de mise à la terre du pipeline en fonction de sa position horizontale

D'après la figure V-17, on remarque que le comportement de la résistance de mise à la terre est inversement proportionnel à la tension induite et au courant. Lorsque ces paramètres sont minimaux, la résistance est maximale et vice versa.

La résistance de mise à la terre est minimale sous le point central de la ligne, elle diminue avec l'augmentation de la distance de séparation du pipeline dans la largeur du couloir de droit de passage et atteint une valeur minimale à une distance de l'ordre de 13 m. à partir de ce point la résistance de mise à la terre augmente avec la distance de séparation.

Les valeurs des résistances de mise à la terre du pipeline pour la configuration horizontale suivant le courant admissible sont résumées dans le tableau V.5 ci-dessous :

Tableau V.5 : Valeurs des résistances de mise à la terre du pipeline suivant le courant admissible

Courant admissible	I=5 mA	I=10 mA	I=15 mA
Résistance de mise à la terre $R_s < \frac{R_c}{(I_c/I_{adm})-1} (\Omega)$	$R_s < \frac{1000}{(21.71/5)-1} = 299.22\Omega$	$R_s < \frac{1000}{(21.71/10)-1} = 853.94\Omega$	$R_s < \frac{1000}{(21.71/15)-1} = 2235.47\Omega$

On en déduit, que pour maintenir le courant dans le corps humain au-dessous de 5 mA, il est nécessaire que le pipeline possède une résistance de mise à la terre ($R_s=299.22 \Omega$) suffisante pour la protection des personnes. Les autres choix du courant admissible donnent des résistances de mise à la terre plus élevées, au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la ligne de transmission.

V.2.6. Calcul de la tension induite dans le cas complexe

La même configuration de la ligne électrique HT présentée sur la figure V-1 est utilisée dans ce cas complexe de voisinage, pour évaluer les tensions induites dans le pipeline. Le complexe cas comprend un rapprochement parallèle, rapprochement oblique et croisement, comme illustré à la figure V-18.

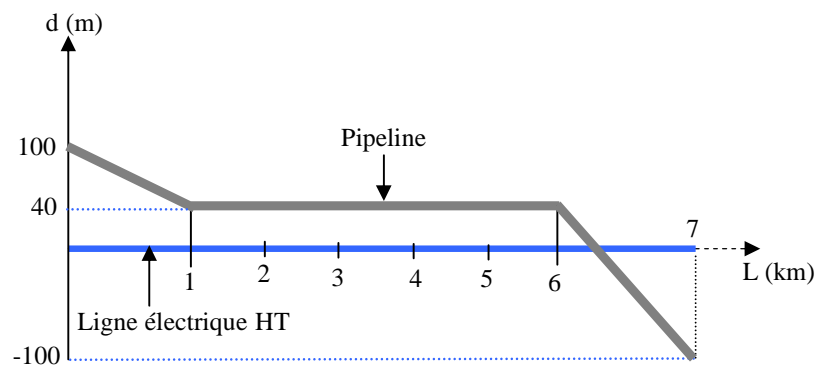


Figure V-18: Cas de voisinage complexe entre une ligne électrique HT et un pipeline métallique aérien

La zone d'influence du circuit (ligne électrique HT : pipeline) est découpé en sections parallèles, de telle façon que la condition géographique représenté par l'équation (III .34) est respectée.

Les résultats du calcul des différentes distances de séparation (ligne électrique- pipeline) et longueurs de parallélisme (coordonnées longitudinales et transversales), pour chaque section sont rassemblés dans le tableau V.6.

Tableau V.6 : Dimensions des sections de la zone d'influence : ligne HT- pipeline

Points	Coordonnées des points (x,y)		Rapport $\kappa p = (y_i/y_{i+1})$	Distance de séparation (m) $y_{\text{éq}} = \sqrt{y_i \times y_{i+1}}$	Longueur Equivalente (m) $L_{\text{éq}} = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}$
	x	y			
1	0	100			
2	500	70	1.43	83.67	500.9
3	1000	40	1.75	52.91	500.9
4	2000	40	1	40	1000
5	3000	40	1	40	1000
6	4000	40	1	40	1000
7	5000	40	1	40	1000
8	6000	40	1	40	1000
9	6050	20	2	28.28	53.85
10	6075	10	2	14.14	26.93
11	6190	-10	-1	6	116.73
12	6280	-20	0.5	14.14	90.55
13	6550	-50	0.4	31.62	271.66
14	7000	-100	0.5	70.71	452.77

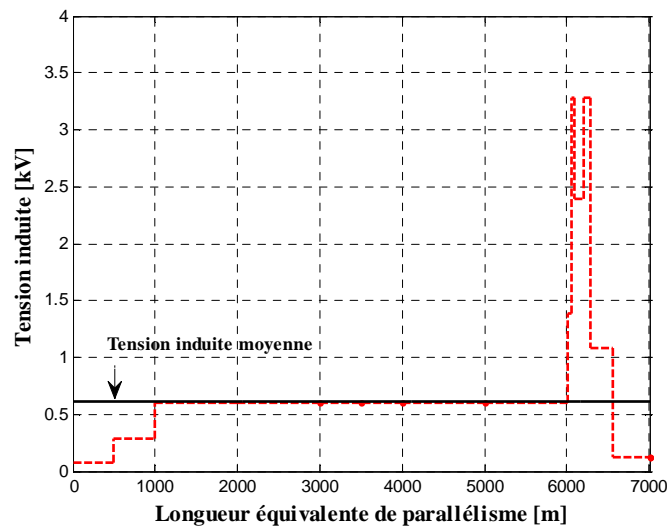


Figure V-19 : Profil longitudinal de la tension induite du pipeline aérien :
Cas complexe

La figure V.19 illustre la variation de la tension induite dans chaque section de la zone d'influence, en fonction de la longueur de cheminement parallèle. On remarque que la tension

induite augmente avec la diminution de la distance entre le pipeline et la ligne électrique, puis se maintient constante pour une distance constante de la ligne, lorsqu'on se rapproche vers la ligne électrique, on constate que cette tension atteint une valeur maximale pour une distance $d=14\text{m}$, puis décroît lorsque le pipeline métallique croise la ligne électrique, et lorsqu'on s'éloigne de la ligne, la tension atteint de nouveau sa valeur maximale pour la même distance de séparation, plus on s'éloigne de la ligne, la tension induite diminue.

Rappelons que dans ce type de couplage, le niveau de la tension induite dépend directement de la distance de séparation entre le pipeline et la ligne à haute tension et ne dépend pas de la longueur du pipeline exposée à la ligne HT.

La zone d'influence de la ligne électrique haute tension (l'ouvrage perturbateur) c'est-à-dire la zone significative (la limite du droit de passage) pour le couplage capacitif s'étend à quelques dizaines de mètres, l'amplitude moyenne de la tension induite considérée pour la structure métallique est calculée à partir de l'équation (III .35). On peut voir dans la figure V.19, que cette valeur de la tension induite est peu près égale à celle du cas d'un parallélisme parfait.

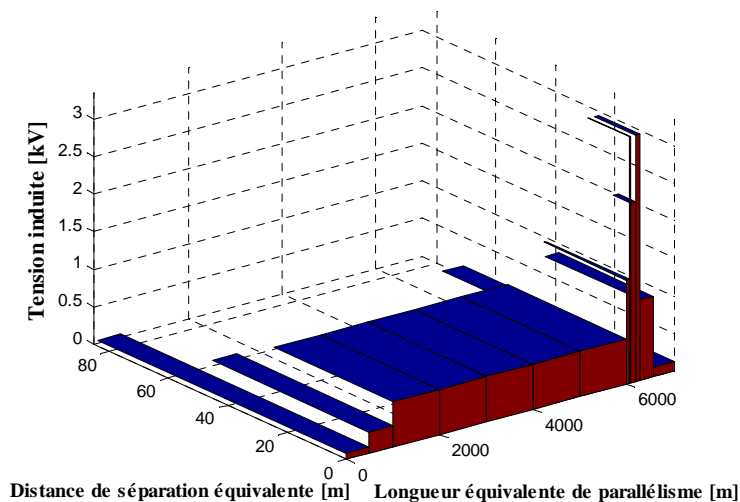


Figure V-20 : Représentation en 3-D de la tension induite le long du pipeline aérien : Cas complexe

La figure V.20 décrit la variation tridimensionnelle du profil de la tension induite, en fonction de la longueur équivalente de parallélisme et sa distance de séparation, Il est évident à partir de cette figure que le potentiel électrique induit dans les pipelines ne dépend pas de leurs longueurs exposées, d'un autre côté, il augmente avec la diminution de la distance de séparation entre le pipeline et la ligne aérienne à haute tension.

V.2.7. Comparaison des résultats du couplage capacitif avec la littérature

La méthode de la matrice d'admittance (cf. paragraphe III.6) permet aussi de déterminer le niveau de la tension induite dans le pipeline. Elle est basée sur le calcul des coefficients propres et mutuels de la ligne électrique et le pipeline. La figure V-21 montre le profil de la tension induite au niveau du pipeline situé à des distances différentes à partir du point centre de la ligne, pour les deux procédés de calcul, avec les mêmes données géométrique de la figure (V-1).

La comparaison entre ces deux courbes simulées par les deux méthodes montre bon accord entre les deux courbes. Les résultats de ces deux méthodes de calcul pour le cas étudié sont présentés dans le tableau V.7.

Tableau V.7 : Résultats de la tension induite pour les deux procédés de calcul

Méthode	Tension induite (V)	Erreur relative
MCF+AG	581.9	
Matrice d'admittance	608.3	4,3%.

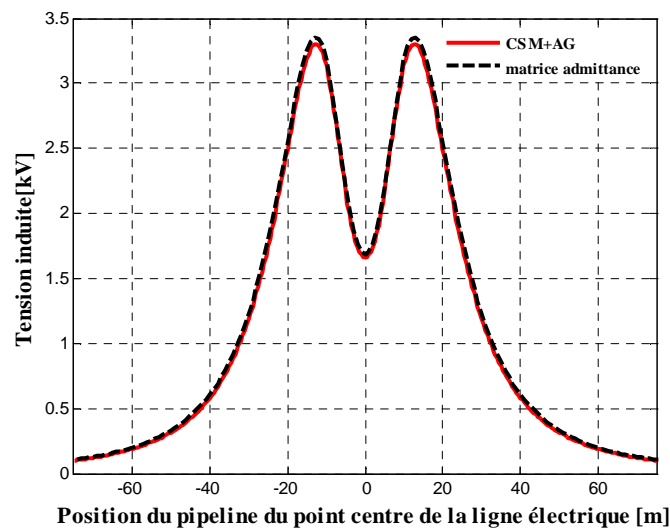


Figure V-21: Comparaison des résultats du potentiel électrique induit pour les deux méthodes de calcul

Il est à noter qu'il existe une relative bonne concordance des méthodes avec une marge d'erreur acceptable située dans l'intervalle de tolérance.

Une deuxième comparaison des résultats est effectuée, avec ceux tirés de la littérature (voir référence [30]), afin de valider notre programme de calcul.

Un exemple d'une ligne électrique THT à simple circuit de 750 kV disposé en nappe horizontale, les paramètres géométriques de la ligne utilisée pour la comparaison sont mentionnés sur la figure

V-22. Un pipeline métallique d'un diamètre de 0.6m installé au voisinage, avec une hauteur de 1 m au dessus du sol.

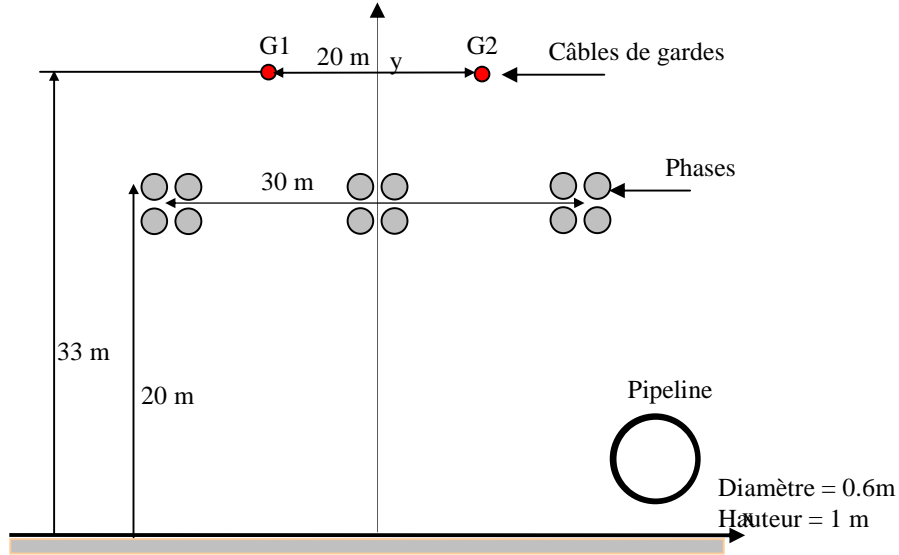


Figure V-22: Disposition en nappe horizontale d'une ligne électrique THT de 750 kV avec un pipeline au voisinage

Les résultats de la comparaison de cet exemple en question sont montrés à la figure V-23 (a et b).

Il peut être remarqué que les courbes de deux figures montrent un accord parfait entre les résultats de la référence [30] et ceux de notre programme de calcul.

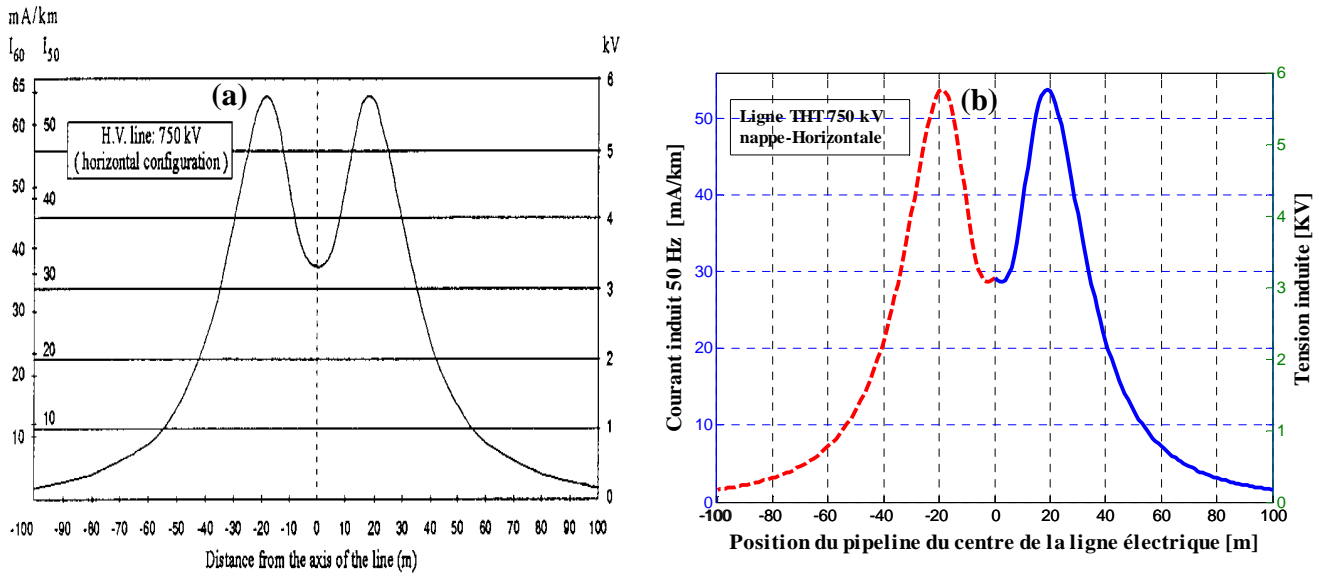


Figure V-23: Comparaison des profils de la tension induite et du courant entre le programme de calcul et la référence [30]

V.3. Analyse du couplage inductif

V.3.1. Calcul du champ magnétique au niveau du pipeline

Considérons une ligne triphasée aérienne à simple terna 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. Le but est de calculer l'intensité du flux magnétique au voisinage de la ligne et au niveau du pipeline.

Dans un premier temps, le pipeline métallique est supposé aérien en surface isolée à 1 m de hauteur au-dessus du sol. Ensuite, le pipeline est enterré à une distance de 1 m de la surface 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 $100\Omega.m$.

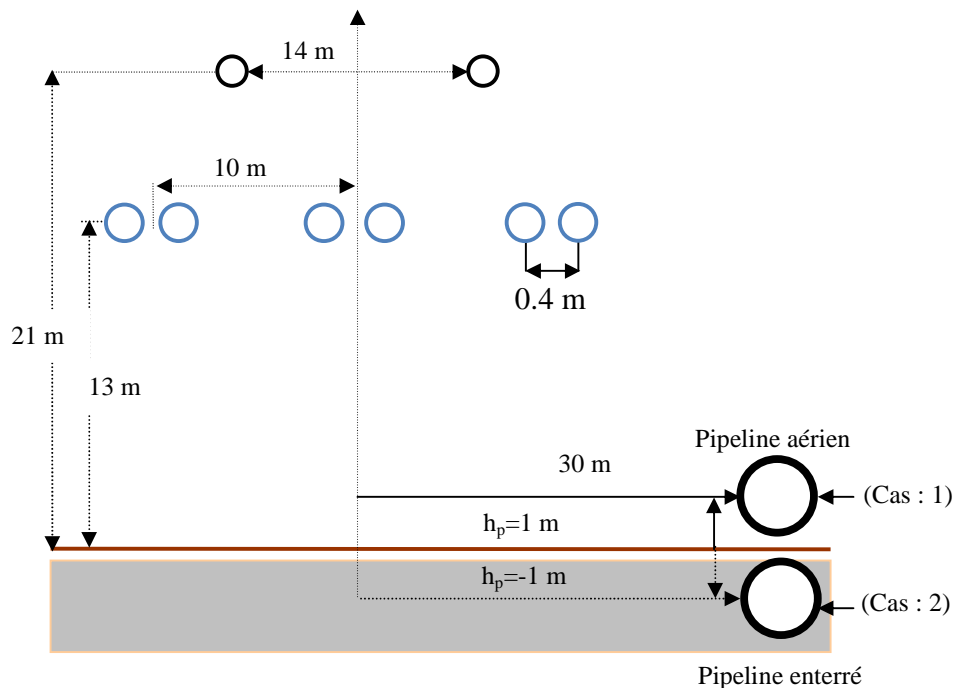


Figure V-24: Configuration horizontale d'une ligne électrique avec un pipeline aérien

V.3.1.1. Application des algorithmes génétiques pour l'optimisation des paramètres

Après avoir choisi les variables d'optimisation du problème, et limiter l'espace de recherche, afin de choisir les meilleurs paramètres à l'aide de la méthode d'optimisation des algorithmes génétiques (AG), nous avons effectué plusieurs essais aléatoirement. Les paramètres

qui rendre la fonction fitness minimal sont choisis à utiliser dans notre algorithme pour des résultats plus précis du champ magnétique.

Les paramètres des méthodes AG et MSC sont résumés dans le tableau V.8 ci-dessous :

Tableau V.8 : les paramètres des méthodes AG et MSC

	Paramètre des méthodes AG et MCF
Algorithme Génétique (AG) et méthode de simulation des courants (MSC)	Nombre de variables population (06 variables); Nombre maximal d'itération $G_{\max} = 200$ Taille de la population (popsize=10); Nombre de bits (Nb=14); Probabilité de mutation (Pm=0.1) ; Probabilité de croisement (Pc=0.9); Rangée des filaments de courant de simulation <ul style="list-style-type: none"> - Pour le pipeline [02-30] - Pour le conducteur phase [02-10] - Pour le câble de garde [02-10] Rangée de l'emplacement des filaments de courant <ul style="list-style-type: none"> - Pour le Pipeline [0.1-0.27] - Pour le conducteur phase [0.01-0.06] - Pour le câble de garde [0.001-0.006]

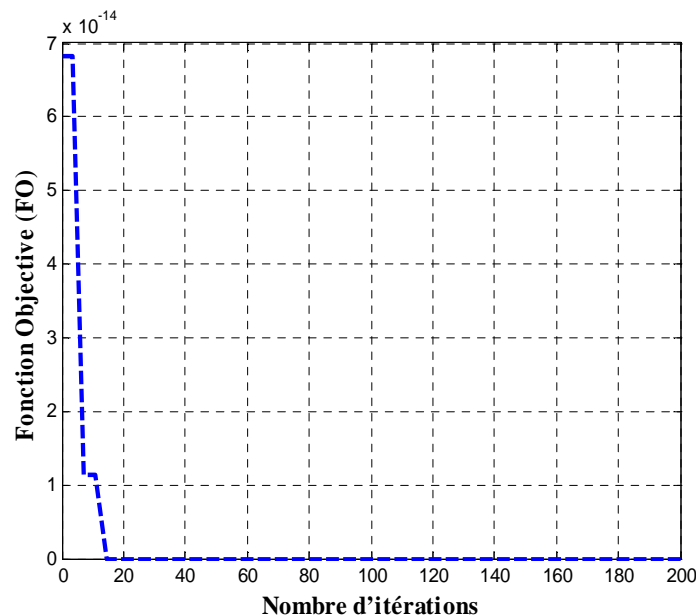


Figure V-25 : Convergence de la fonction objective (FO) de l'algorithme

Les résultats de l'application des Algorithmes Génétiques (AG) pour la détermination des valeurs optimales des paramètres du circuit sont présentés au tableau V.9.

Tableau V.9 : Résultats de l'application des algorithmes Génétiques (AG).

	Nombre des filaments de courant de simulation	l'emplacement des filaments de courant [m]
conducteur phase	5	0.0155
câble de garde	8	0.0050
Pipeline	18	0.1525

La variation de la valeur de la fonction objective (FO) avec le nombre d'itérations (générations) de l'algorithme est donnée par la figure V-25, en montrant le processus d'optimisation exécuté par l'algorithme génétique.

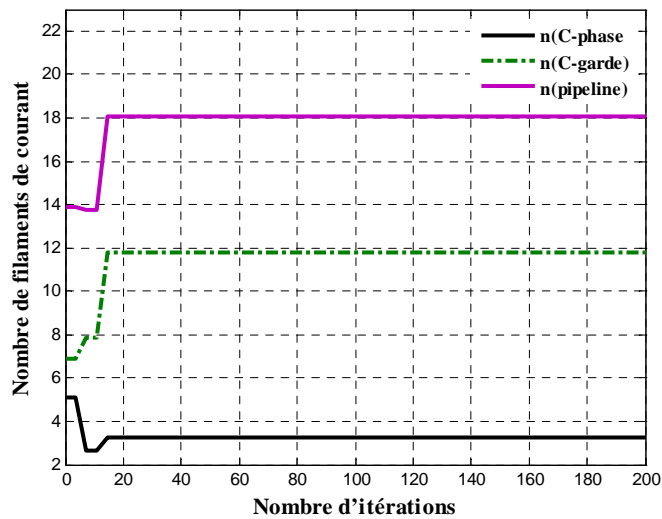


Figure V-26 : Convergence de l'algorithme vers les solutions optimales du nombre des filaments de courant

Les résultats d'optimisation obtenus par l'algorithme de recherche, concernant le nombre des filaments de courant de simulation, et la position de ces des filaments sont respectivement présentés sur les figures V-26 et V-27. Il apparaît de façon évidente que l'algorithme converge plus rapidement vers ces valeurs optimales.

Après la détermination des valeurs optimales des paramètres du circuit, alors on peut accéder au calcul du champ magnétique.

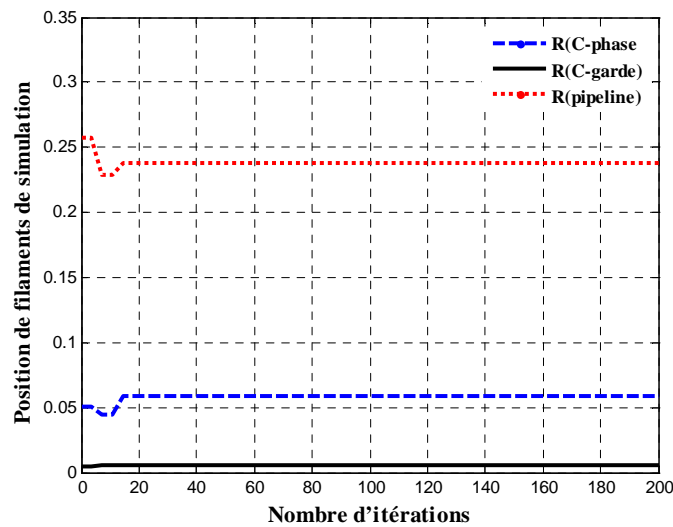


Figure V-27 : Convergence de l'algorithme vers les solutions optimales des positions des filaments de courant

V.3.1.2. Analyse du champ magnétique en présence d'un pipeline métallique

La figure V-28 montre la distribution latérale de l'induction du champ 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 du champ magnétique décroît rapidement en fonction de la distance latérale.

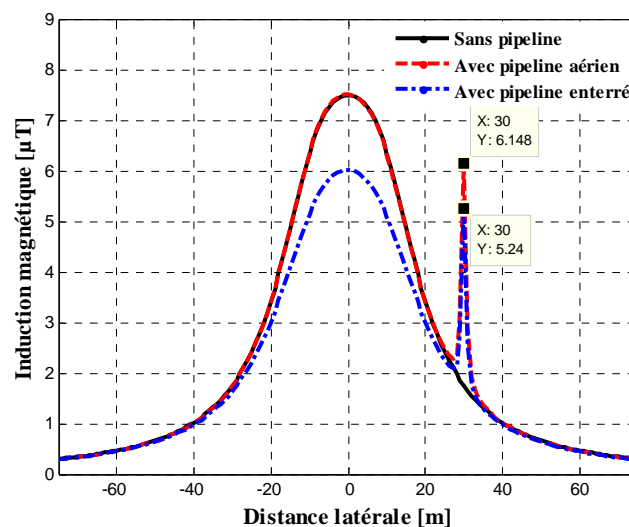


Figure V-28 : Induction magnétique à 1m du sol avec et sans la présence d'un pipeline métallique

La figure indique également, que la présence d'un pipeline métallique à proximité de la ligne perturbe la répartition de ce champ, le profil connaît une distorsion à l'endroit où le pipeline (aérien ou enterré) est implanté. Le pipeline sera influencé par ce champ, une tension et un courant prendront naissance aux extrémités de ce pipeline.

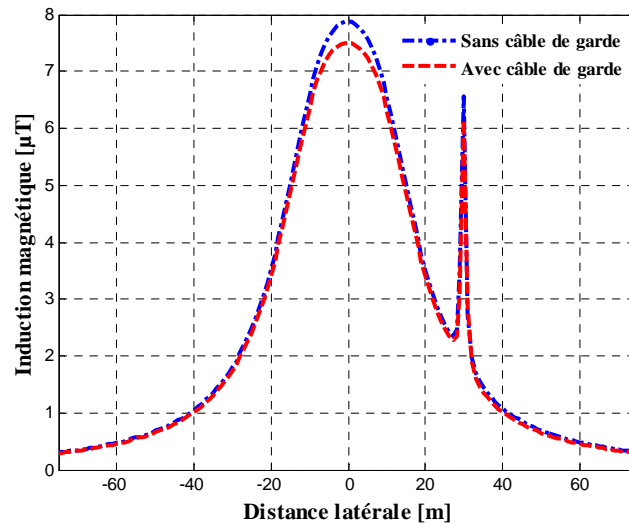


Figure V-29 : Induction magnétique au niveau du pipeline avec et sans la présence des câbles de garde

La figure V.29 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.

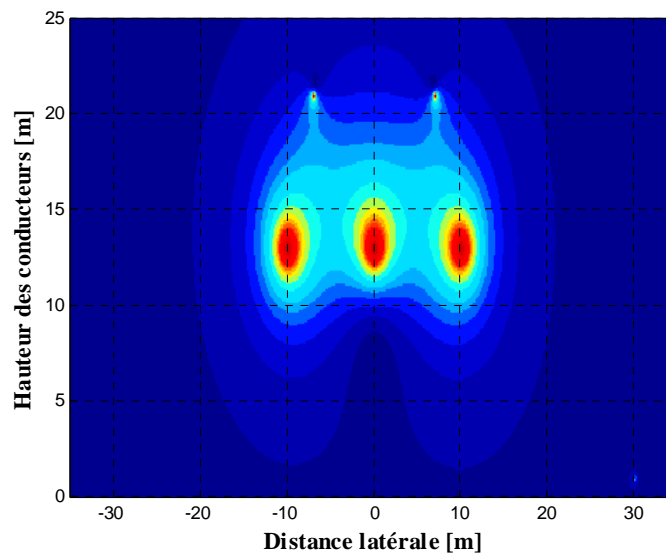


Figure V-30 : Visualisation de l'induction magnétique créée par le système : Ligne triphasée 275 kV - pipeline métallique (coupe transversale)

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.

La figure V.30 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.

V.3.2. Cas du parallélisme parfait entre la ligne aérienne HT et le pipeline

V. 3.2.1. 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 décrits au paragraphe (IV.5.2.1). Elles seront appliquées à la configuration de la ligne présentées ci-dessus dans la figure V-24

La longueur exposée du pipeline est $L = 5$ km. Le sol est supposé homogène avec une résistivité de $100\Omega.m$.

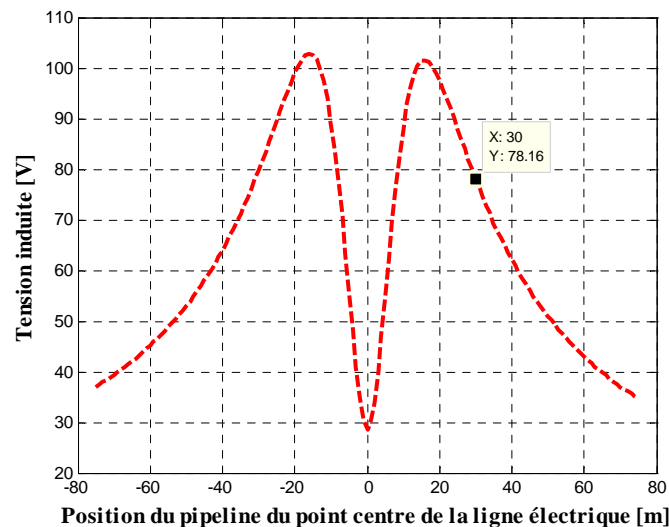


Figure V-31: Profil latéral de la tension induite due au couplage inductif dans un pipeline aérien

La tension induite due au couplage inductif est représenté sur la figure V-31. 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 [30].

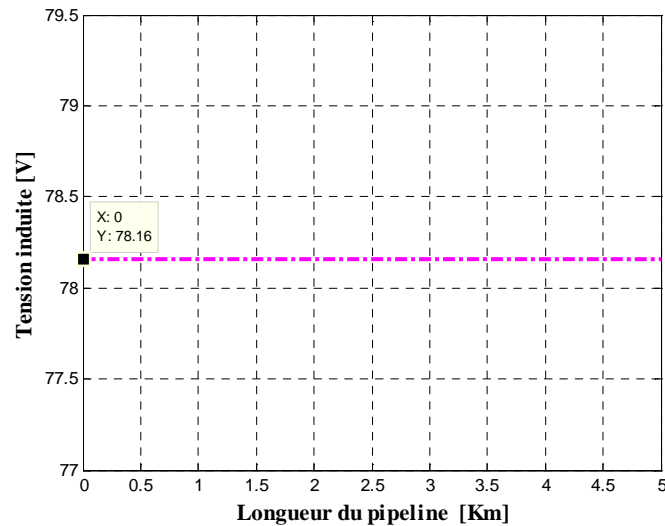


Figure V-32 : Profil longitudinal de la tension induite due au couplage inductif dans un pipeline aérien

La tension induite le long de la portée longitudinale est représentée à la figure V-32. 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.

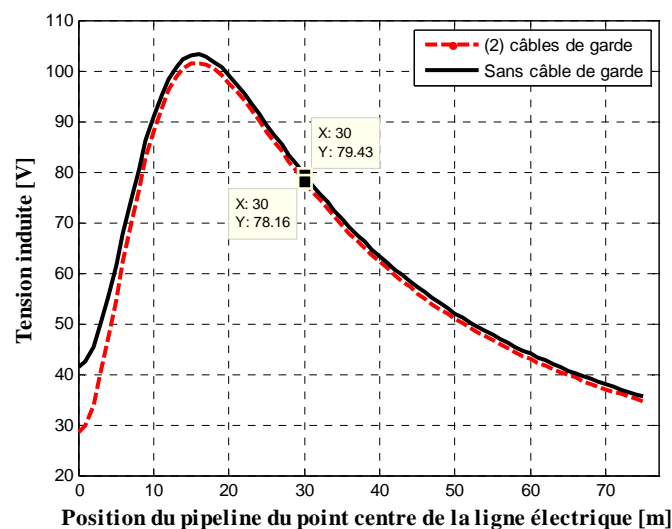


Figure V-33 : L'effet du câble de garde sur la distribution de la tension induite

V. 3.2.2. L'effet des différents paramètres sur la tension induite

V. 3.2.2.1. Effet du câble de garde

La figure V-33 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%.

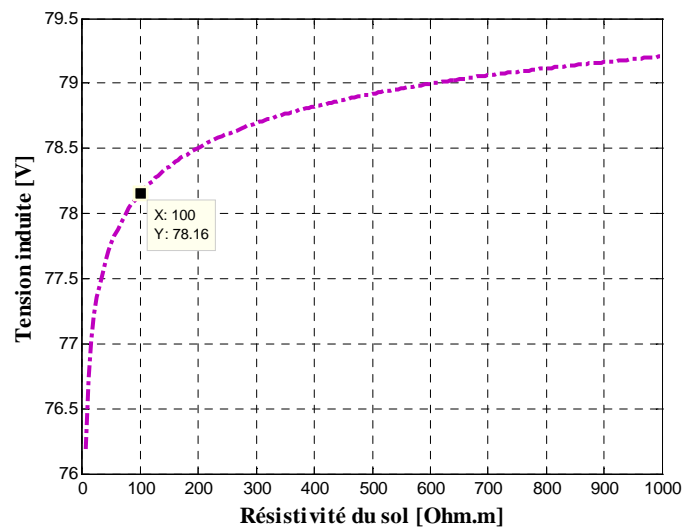


Figure V-34 : L'effet de la résistivité du sol sur la distribution de la tension induite

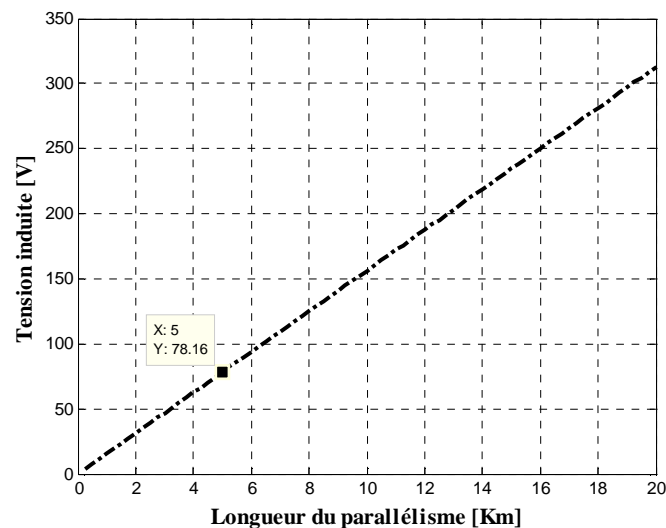


Figure V-35 : L'effet de la longueur du parallélisme sur la distribution de la tension induite

V. 3.2.2.2. Effet de la résistivité du sol sur la tension induite

La figure V-34, montre l'effet de la résistivité du sol sur la tension induite. On remarque que la variation de la résistivité du sol ne semble pas avoir un effet significatif sur la tension induite.

V. 3.2.2.3. Effet de la longueur du parallélisme sur 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 V-35. En effet la tension induite sur la canalisation augmente proportionnellement avec la longueur d'exposition parallèle.

V.3.2.3. 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 V-36, 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.

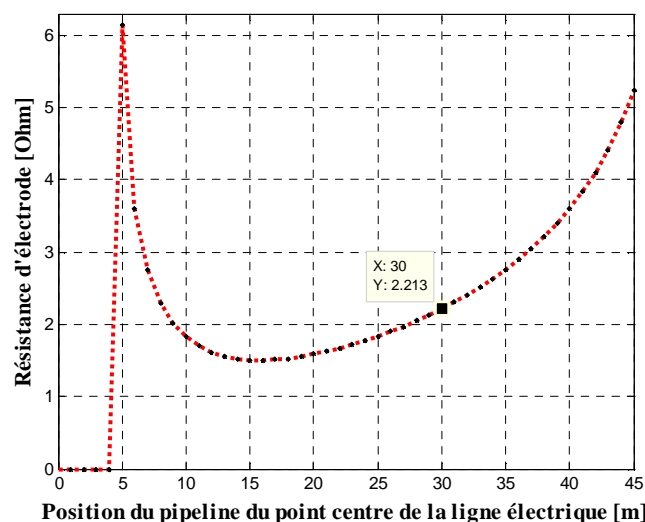


Figure V-36 : Résistance de l'électrode de terre du pipeline

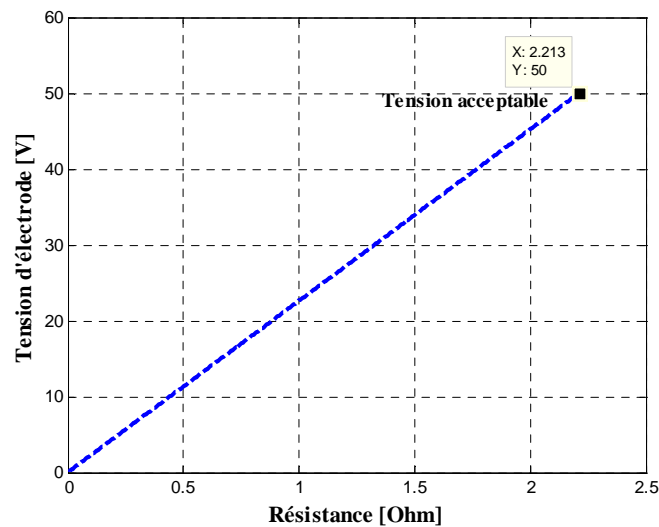


Figure V-37 : Tension de l'électrode

La figure V-37 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.

V.3.2.4. La tension induite dans un pipeline enterré- les différents cas discutés

En cas d'un parallélisme parfait entre la ligne aérienne et le pipeline, la méthode de calcul citée dans le paragraphe (IV.5.2.2) a été utilisée. Considérons la même configuration du système présentée dans la figure V-24

Les caractéristiques du système sont données ci-dessous.

le rayon du pipeline 0.3 m, enterré à 1 m de profondeur, la résistivité du sol $\rho = 100 \Omega \text{ m}$, la résistivité de l'acier du pipeline ($\rho_p = 1.7 \times 10^{-7} \Omega \text{ m}$), la perméabilité magnétique relative de l'acier du pipeline ($\mu_r = 300$), la permittivité relative du revêtement du pipeline ($\epsilon_r = 5$); l'épaisseur du revêtement isolante $e = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$, la résistance spécifique du revêtement $R_u = 10^4 \Omega \text{ m}^2$, Le courant alternatif de phase la ligne de transport ($I = 500 \text{ A}$), la résistivité du revêtement du pipeline $\rho_c = R_u / e$, la fréquence du réseau $f = 50 \text{ Hz}$; la longueur du parallélisme $L = 10 \text{ Km}$.

Les résultats du calcul des tensions et des courants induits pour les différents cas discutés précédemment sont présentés ci-après.

- 1)- Cas où le pipeline continue de fonctionner plusieurs kilomètres après la fin de l'acheminement parallèle avec la ligne de transport haute tension ($x=0$, et $x=L$).

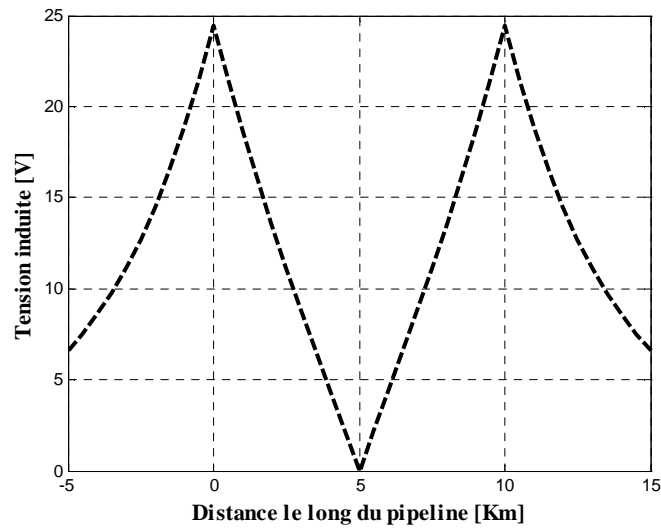


Figure V-38 : Profil longitudinale de la tension induite dans un pipeline enterré : Cas (a)

Dans ce cas et comme on peut le constater sur la figure V-38, la tension induite est pratiquement négligeable au niveau du point milieu de la zone d'influence et est maximale au niveau des deux extrémités du pipeline.

Dans les sections du pipeline perpendiculaires à la ligne électrique, partant des extrémités, on peut observer une diminution en exponentielle de la tension induite. L'allure du courant perturbateur qui circule dans le pipeline, est montrée dans la figure V-39. Il peut être remarqué qu'il est considérablement réduit dans les extrémités de la canalisation, et devient plus important au niveau du point milieu de la zone d'influence.

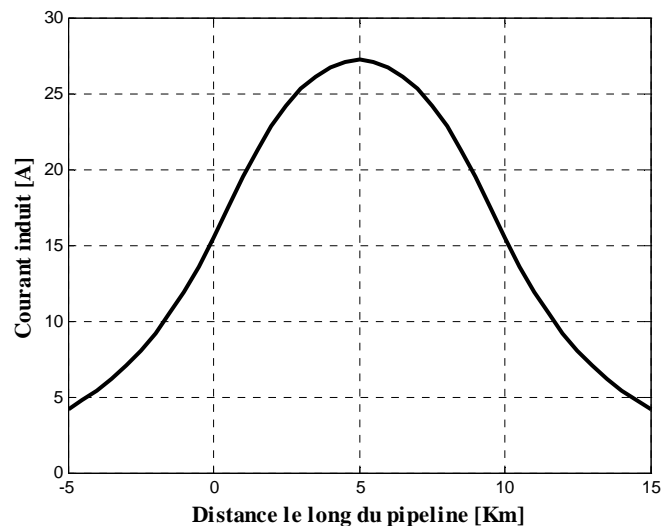


Figure V-39 : Le courant induit le long du pipeline : Cas (a)

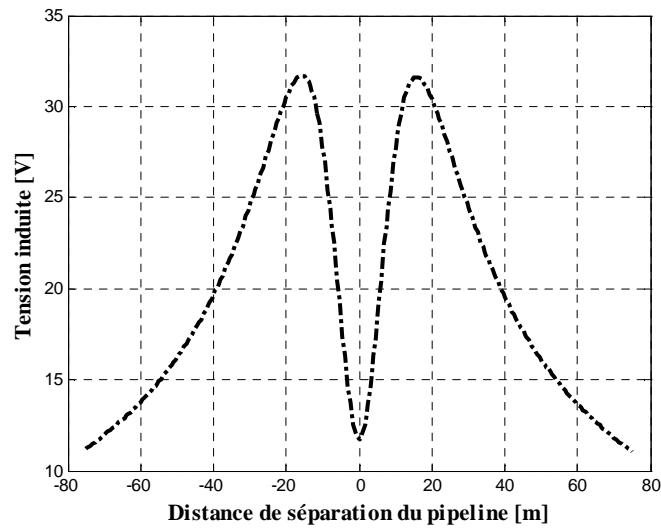


Figure V-40 : Profil latéral de la tension induite dans un pipeline enterré : Cas (a)

Dans cette situation, lorsque l'emplacement latéral du pipeline varie, on constate d'après la figure V-40, que le niveau de la tension induite est minimal si le pipeline est placé directement sous le conducteur central de phase et augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale pour une distance de séparation à l'intérieur du couloir du droit de passage égale à 15 m. A partir de cet emplacement, la tension induite diminue rapidement.

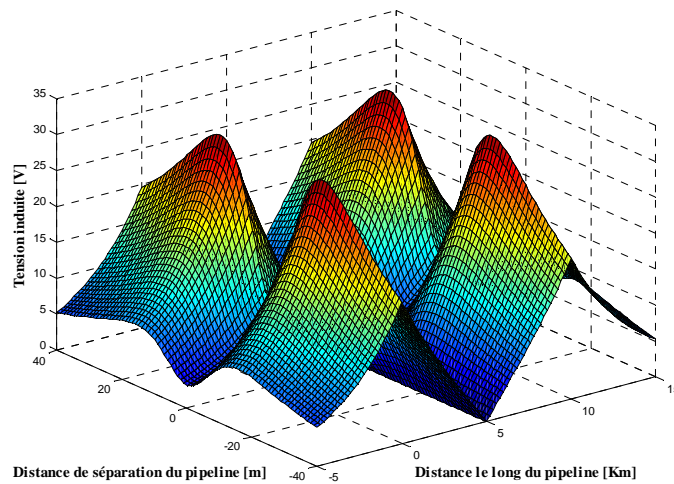


Figure V-41 : Représentation en 3-D de la tension induite dans un pipeline enterré : Cas (a)

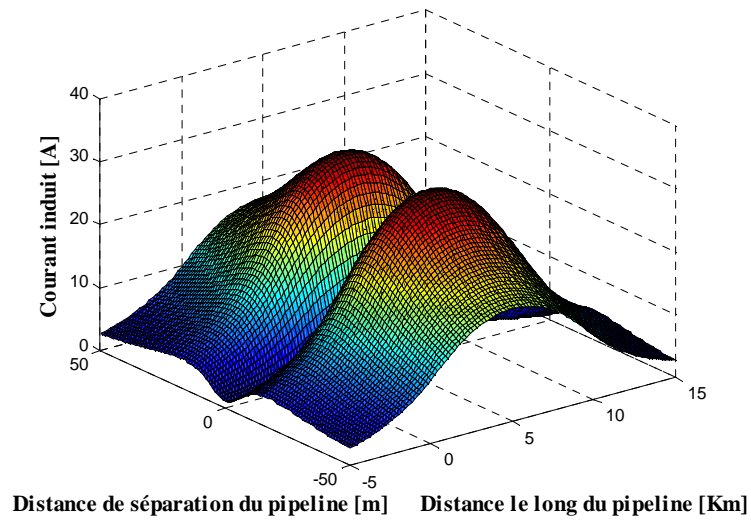


Figure V-42 : Représentation en 3-D du courant induit le long du pipeline enterré : Cas (a)

Les figures V-41 et V-42, montrent la distribution latérale et longitudinale des grandeurs induites de la tension et du courant en trois dimensions 3D. On peut voir que les tensions et les courants induits dépendent de la position latérale du pipeline. Ces grandeurs peuvent être réduites par un choix approprié de l'emplacement du pipeline.

2)- Cas où le pipeline s'étend au-delà de l'extrémité $x = 0$, perpendiculairement à la ligne et isolé à l'extrémité $x = L$ avec une bride isolante

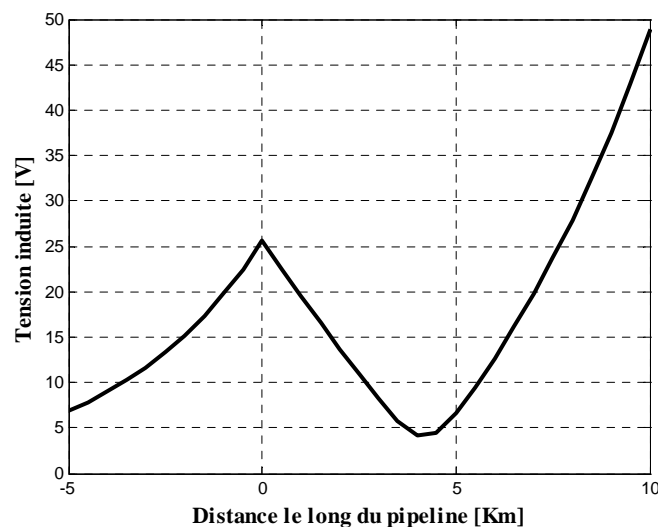


Figure V-43 : Profil longitudinale de la tension induite dans un pipeline enterré : Cas (b)

On peut observer dans la figure V-43, que la tension induite est maximale au point $x = L$ et est minimale à une distance de 4.5 km le long du pipeline. La figure V-44 montre que le courant dans le pipeline à l'extrémité $x = 0$, est de l'ordre de 14.2 A. Il atteint un maximum à une longueur de 4.5 Km, puis décroît jusqu'à zéro à l'extrémité où le pipeline est isolé.

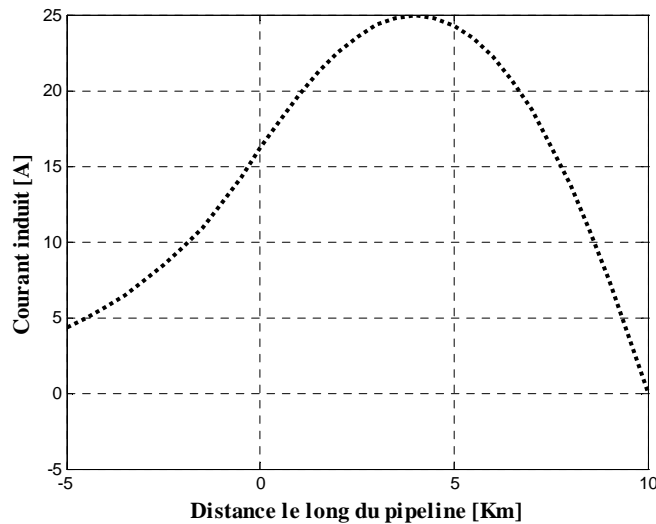


Figure V-44 : Le courant induit le long du pipeline enterré : Cas (b)

3)- Cas où le pipeline est mis à la terre à l'extrémité $x = L$, perpendiculairement à la ligne et s'étend au-delà de l'extrémité $x = 0$

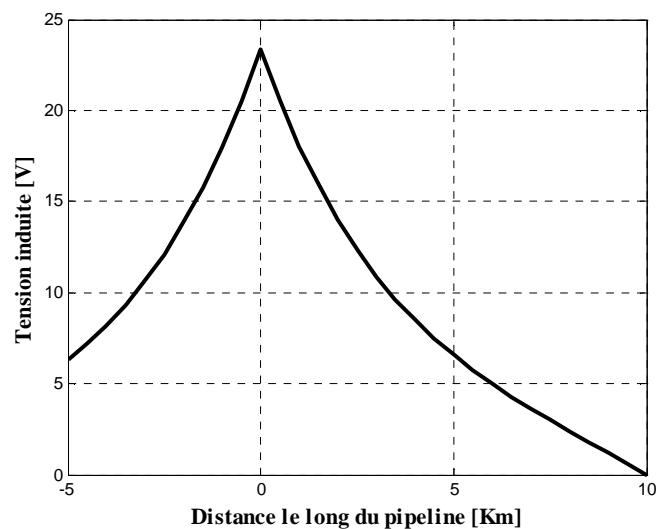


Figure V-45 : Profil longitudinal de la tension induite dans un pipeline enterré : Cas (c)

Les résultats présentés à la figure V-45, montrent que la tension induite est maximale au point $x = 0$, et est nulle à l'extrémité $x = L$. La figure V-46 représente les variations du courant qui parcourt le pipeline. Le courant augmente à partir de l'extrémité $x=0$, pour atteindre une valeur maximale à l'extrémité $x = L$.

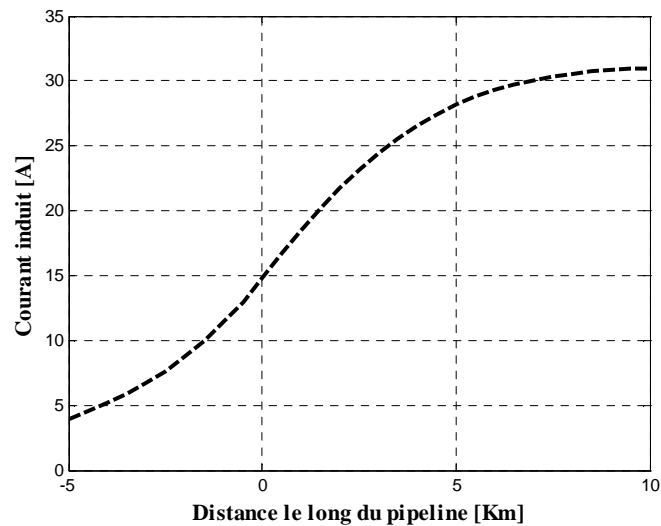


Figure V-46 : Le courant induit le long du pipeline enterré : Cas (c)

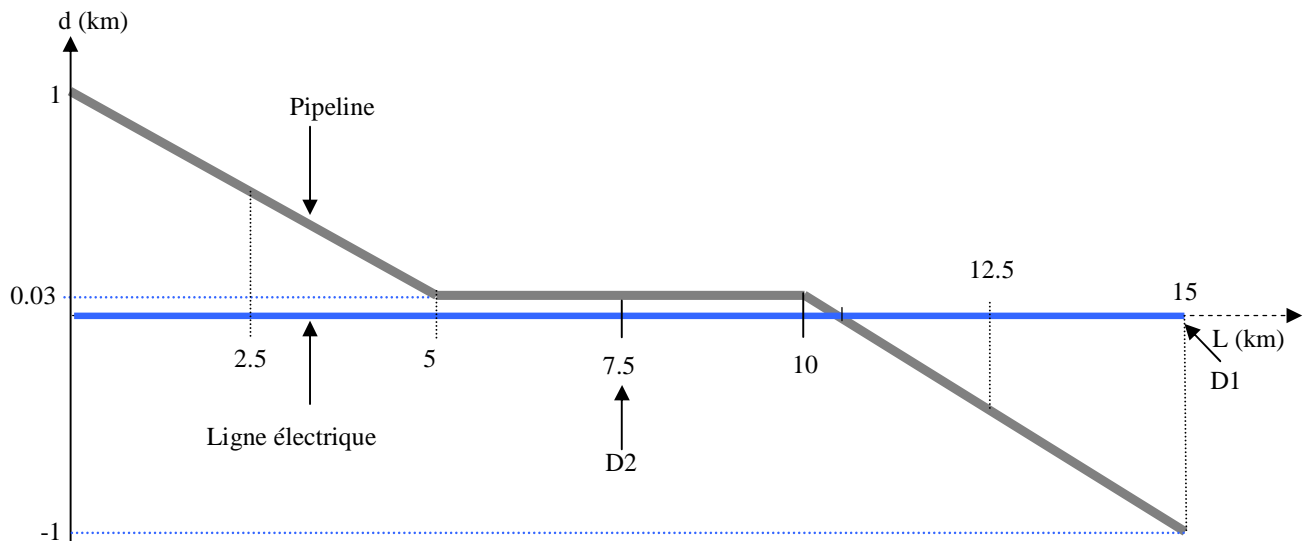


Figure V-47 : Zone d'influence pour un cas complexe : Ligne HT- Pipeline

V.3.3. Le cas général de voisinage

Pour la zone d'influence, qui est généralement formée par le rapprochement parallèle, rapprochement oblique et croisement, la méthode utilisée pour calculer le couplage inductif est exposée au paragraphe (IV.6).

La zone d'influence illustrée par la figure V-47 est prise pour cette étude. La configuration étudiée est similaire à celle de la figure V-24.

Un calcul correct de la tension induite est réalisé en utilisant la procédure décrite ci-dessous.

La première étape consiste à faire la subdivision du pipeline en plusieurs sections selon la zone d'influence, le nombre des segments de ligne électrique est égal à celui du pipeline.

En respectant la condition géographique indiquée dans l'équation (III .34), un cas oblique peut s'apparenter à un cas parallèle. Dans le cas d'un croisement, un segment parallèle remplace la section de l'ouvrage perturbé ayant une distance de séparation $d = 6$ m et une longueur qui est égale à la projection de cette partie du pipeline qui se trouve dans une zone de 10 m de part et d'autre de la ligne électrique. Dès que les valeurs finales des points de la ligne électrique et du pipeline sont établies, le calcul des distances équivalentes est effectué.

La méthode de Carson est utilisée pour déterminer les impédances linéiques propres et mutuelles des conducteurs et du pipeline. La dernière étape permet l'évaluation des tensions induites et les courants circulants dans le pipeline, ce calcul se fait pour les différents cas suivants :

- Conditions normales de fonctionnement ;
- Défaut à l'extrémité de la zone d'influence ;
- Défaut à l'intérieur de la zone d'influence.

Les résultats du calcul des différentes distances de séparation (ligne électrique- pipeline) et longueurs équivalentes de parallélisme, pour chaque tronçon sont donnés dans le tableau V.10.

Ci-dessous :

Tableau V.10 : Coordonnées des tronçons de la zone d'influence

Points	Coordonnées des points (x,y)		Rapport $np = (y_i/y_{i+1})$	Distance de séparation équivalente (m) $y_{\text{éq}} = \sqrt{y_i \times y_{i+1}}$	Longueur équivalente (m)
					$L_{\text{éq}} = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}$
1	0	1000			
2	876.5	830	1.2048	911.0434	892.8
3	1753	660	1.2576	740.1351	892.8
4	2629.5	490	1.3469	568.6827	892.8
5	3506	320	1.5313	395.9798	892.8
6	4381.5	150	2.1333	219.089	891.9
7	4845.5	60	2.5	94.8683	472.6
8	5000	30	2	42.4264	157.4
9	6000	30	1	30	1000
10	7000	30	1	30	1000
11	8000	30	1	30	1000
12	9000	30	1	30	1000
13	10000	30	1	30	1000
14	10033.33	20	1.5	24.4949	34.8
15	10066.67	10	2	14.1421	34.8
16	10150	-10	-1	6	85.7
17	10250	-20	0.5	14.1421	100.5
18	10350	-50	0.4	31.6228	104.4
19	10700	-120	0.4167	77.4597	356.9
20	12150.4	-296	0.4054	188.4675	1461
21	12418.8	-472	0.6271	373.7807	321
22	13275.2	-648	0.7284	553.0425	874.3
23	14137.6	-824	0.7864	730.7202	880.2
24	15000	-1000	0.8240	907.7445	880.2

Dans le calcul de la tension induite, il est important de tenir compte de la nature du revêtement du pipeline, le revêtement est généralement caractérisé par l'épaisseur et la résistivité, ce qui peut affecter le niveau de tension induite à la fréquence industrielle. Dans cette étude, on considère trois types de revêtements, bitume, résine époxy et polyéthylène.

Les grandeurs caractéristiques de différents revêtements utilisées dans la simulation sont indiquées dans le tableau V.11.

Tableau V.11 : Les paramètres des revêtements des pipelines utilisés dans la simulation

Type de revêtement	Épaisseur du revêtement (mm)	Résistance spécifique du revêtement ($k\Omega.m^2$)
Bitumineux	5	10
Polyéthylène	2.5	10^2
Résine époxy	0.45	10

V.3.3.1. Condition normale de fonctionnement

Dans ce cas de fonctionnement normal, les courants phases sont équilibrés, l'intensité du courant de phase est égal à 500 A, la tension entre le métal du pipeline ou de l'équipement connecté au pipeline et la terre ne doit pas dépasser 50 à 65 V à chaque point accessible aux personnes [30]. La tension induite le long du pipeline dans la zone d'influence est représenté à la figure V-48, pour un pipeline recouvert d'un revêtement bitumineux.

D'après cette figure, on voit que la tension induite est maximum au point de rapprochement de la ligne et au point de croisement entre la ligne HT et le pipeline. Cela est dû au fait que les sections entre ces deux points ont des longueurs constantes égale à 1000 m, ainsi des distances équivalentes d'influence égales, qui ne dépassent pas 30 m. A noter également que la tension induite est négligeable, près du point milieu de la zone d'influence. Au delà de ces sections la tension induite décroît avec la distance le long de la zone d'influence.

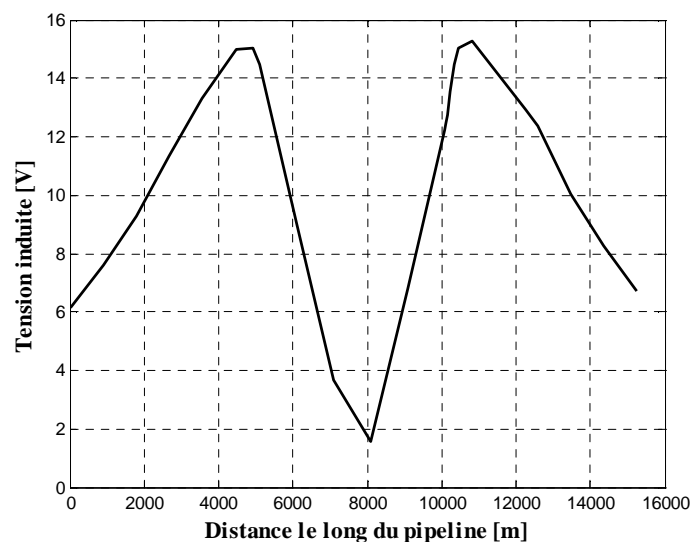


Figure V-48: Tension induite dans un pipeline en cas de fonctionnement normal : revêtement bitumineux

La figure V-49 montre la variation tridimensionnelle de tension induite selon la longueur de cheminement parallèle et la distance entre la ligne aérienne et le pipeline. Pour le parallélisme parfait de la zone d'influence, les distances de séparations sont constante, ainsi les longueurs d'exposition des sections. On constate, que la tension induite est négligeable dans le point centre de la zone d'influence, et maximum aux points des extrémités de ce parallélisme parfait, en dehors de ces points, le niveau de la tension induite est réduite avec l'augmentation de la longueur de cheminement parallèle du système (ligne à haute tension-pipeline).

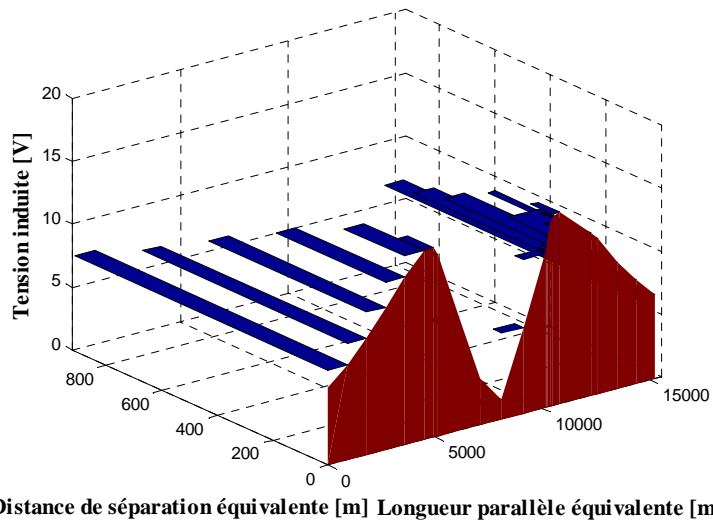


Figure V-49 : Représentation en 3-D de la tension induite le long du pipeline enterré en cas de fonctionnement normal : revêtement bitumineux

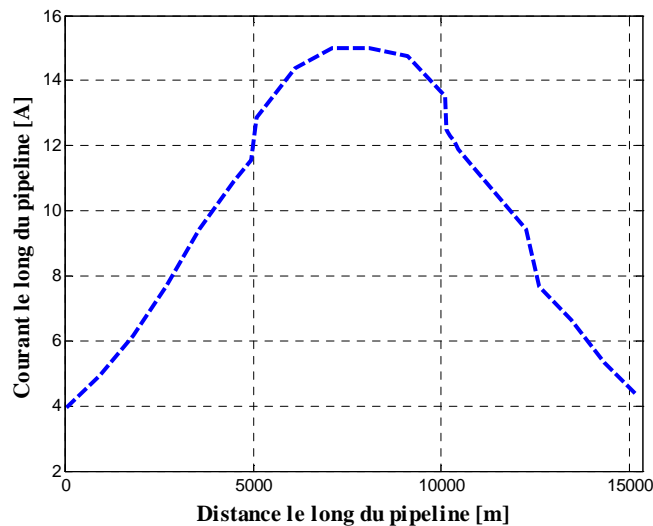


Figure V-50 : Courant induit le long du pipeline en cas de fonctionnement normal : revêtement bitumineux

La figure V-50 montre le courant longitudinal circulant dans le pipeline revêtu en bitume, la valeur du courant induit est élevée dans la zone comprise entre le point de rapprochement de la ligne et le point de croisement, dans les autres zones, il apparaît de façon évidente que ce courant est réduit.

Les résultats de simulation obtenus de la tension induite et le courant circulant dans le pipeline, pour les trois types de revêtements (bitume, polyéthylène et résine époxy) sont représentés sur les figures V-51 et V-52.

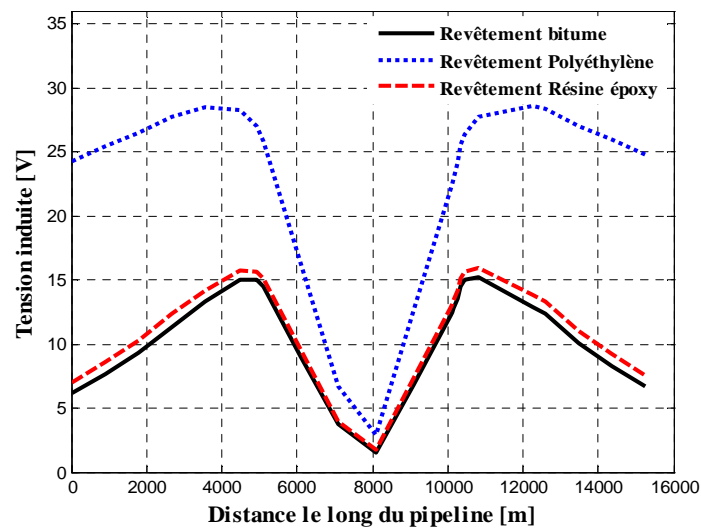


Figure V-51: Tension induite dans un pipeline en cas de fonctionnement normal pour les trois types de revêtements

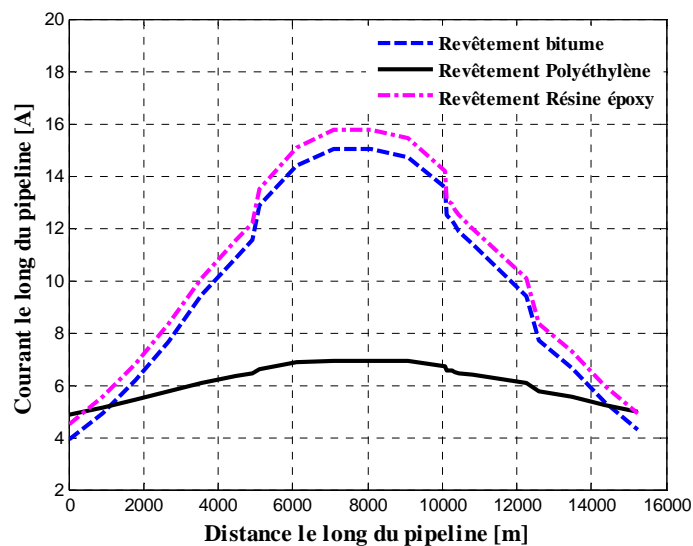


Figure V-52 : Courant le long du pipeline en cas de fonctionnement normal pour les trois types de revêtements

Nous constatons que la distribution longitudinale des trois profils des tensions induites et courants est quasiment identique, à celle du cas précédent (revêtement bitumineux).

Pour l'évaluation de l'influence du revêtement des pipelines, les résultats de cette figure montrent que les valeurs maximales de la tension induite sur le pipeline sont présentées par le revêtement polyéthylène, tandis que les valeurs réduites sont obtenues avec le revêtement bitumineux.

En ce qui concerne les courants induits, le niveau d'intensité le plus élevé et produit par le revêtement polyéthylène. Par contre, le niveau le moins élevée est donnée par un revêtement en résine époxy.

Une différence se dégage de la comparaison des trois profils, celle-ci est due au fait que les tensions et les courants induits dépendent de l'admittance transversale (shunt) du pipeline, varient avec la résistivité du revêtement et son épaisseur.

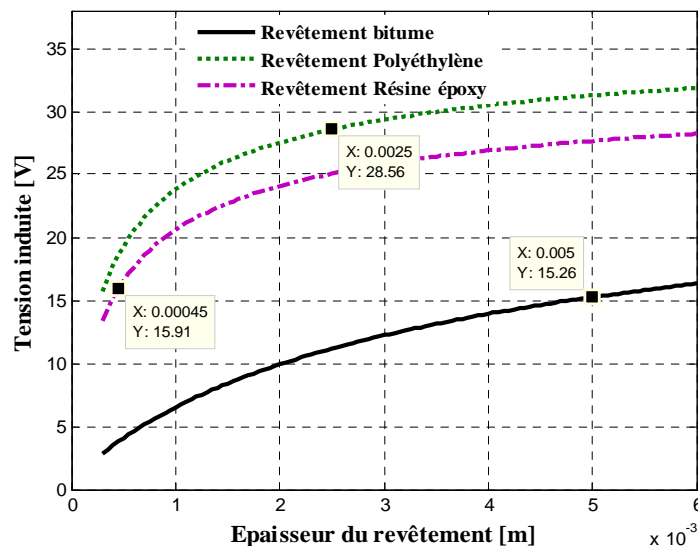


Figure V-53 : Variation des valeurs maximales de la tension en fonction de l'épaisseur du revêtement

La figure V-53 expose les résultats mettant en évidence l'effet de l'épaisseur du revêtement sur la variation des valeurs maximales de la tension induite du pipeline. Les résultats montrent que l'augmentation de l'épaisseur du revêtement implique l'augmentation des valeurs maximales de la tension induite pour les trois types de revêtements.

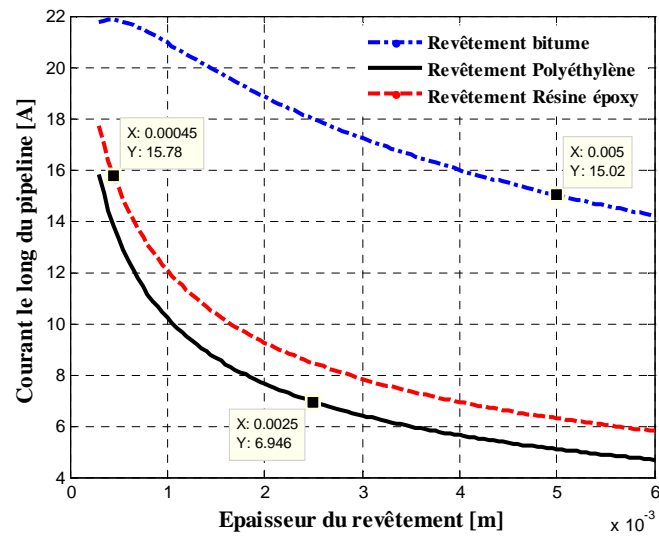


Figure V-54 : Variation des valeurs maximales des courants en fonction de l'épaisseur du revêtement

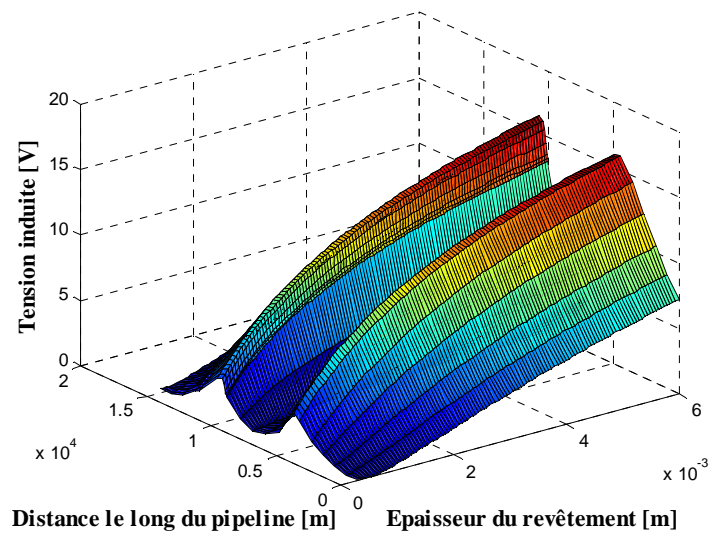


Figure V-55 : Variation tridimensionnelle (3D) des valeurs maximales des tensions induites

La figure V-54 représente la variation des valeurs maximales des courants induits. On constate que les valeurs maximums du courant induit circulant dans le pipeline diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur du revêtement.

La figure V-55 décrit la variation tridimensionnelle de la tension induite. Elle atteint son maximum en deux points différents le long de la longueur d'exposition parallèle. À partir de ces

points, la valeur maximale de la tension induite commence à augmenter graduellement en augmentant l'épaisseur du revêtement.

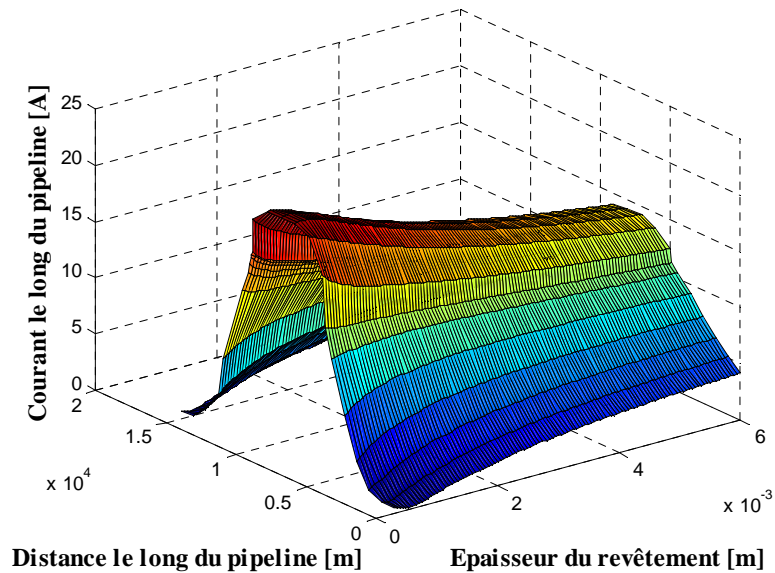


Figure V-56 : Variation tridimensionnelle (3D) des valeurs maximales des courants induits

La figure V-56 décrit la variation tridimensionnelle du courant induit. On constate que ce courant atteint son maximum au point centre de la longueur d'exposition parallèle, la valeur maximum de l'intensité du courant décroît continuellement, en accroissant l'épaisseur du revêtement isolant.

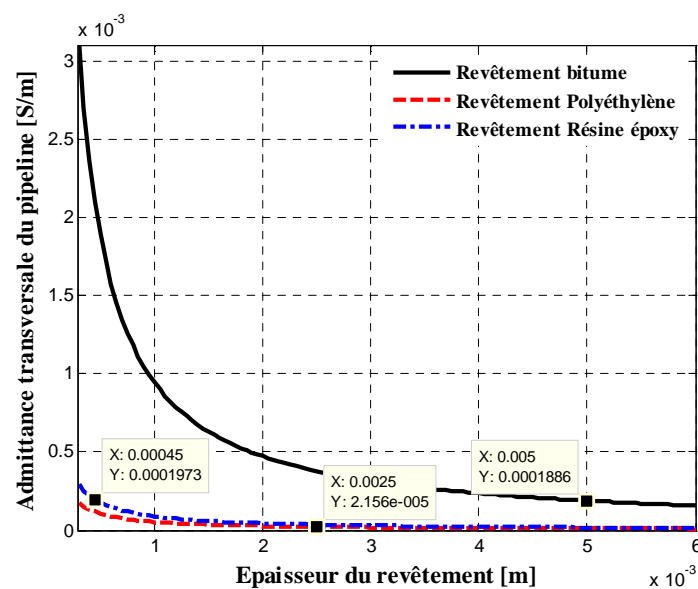


Figure V-57 : Variation de l'admittance transversale en fonction de l'épaisseur du revêtement

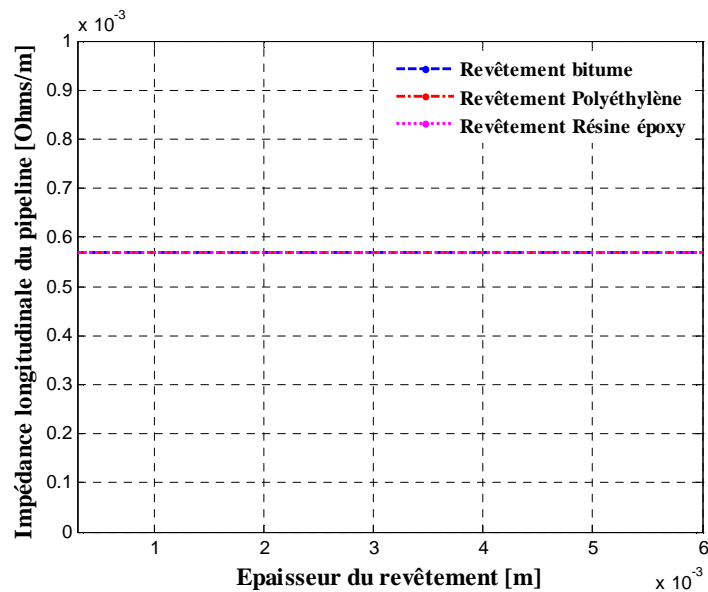


Figure V-58 : Les valeurs de l'impédance longitudinale en fonction de l'épaisseur du revêtement

L'impédance longitudinale et l'admittance transversale du pipeline sont déterminées à partir des équations (IV-101) et (IV-111), les valeurs des différents paramètres (caractéristiques géométriques et électriques) du pipeline intervenant dans ce calcul ont été présentées dans le paragraphe V.3.2.4.

Les figures V-57 et V-58 montrent les valeurs de l'impédance et de l'admittance du pipeline. Il peut être remarqué dans la figure V-57, qu'avec l'augmentation de l'épaisseur du revêtement l'admittance transversale du pipeline diminue. En effet, plus l'épaisseur augmente, la résistance devient plus élevée. Cette figure montre aussi que le polyéthylène présente une valeur d'admittance transversale plus faible par rapport aux autres revêtements.

A l'aide de la figure V-58, qui illustre l'évolution de l'impédance du pipeline avec l'épaisseur du revêtement, il peut être remarqué que l'impédance du pipeline garde une valeur stable. Elle est absolument indépendante de l'épaisseur et la résistivité du revêtement.

Rappelons que les limites permises de la tension induites en cas de fonctionnement normal du réseau électrique ne peuvent pas franchir les valeurs de 50 à 65 V [30]. On remarque que ces valeurs obtenues des tensions induites longitudinales sur le pipeline sont au-dessous du seuil recommandé et que les normes internationales sont respectées.

V.3.3.2. Défaut à l'extrémité de la zone d'influence

En cas de défaut entre un conducteur de phase et la terre, en supposant que ce défaut se produise à l'extrémité de la zone d'influence entre le conducteur phase inférieur et le pylône dans le point D1, au 15^{ème} kilomètre, comme montre la figure V-47. La valeur du courant perturbateur ou de défaut est supposée égale à 5 kA. La tension limite admissible, en cas de défaut est de l'ordre de 1000 V[30], la résistance à la terre du pylône a été considérée comme nulle.

La tension induite le long de la portée longitudinale du pipeline, lors d'un défaut qui survient à la fin de la zone d'influence est montré à la figure V-59, pour les trois types de revêtements

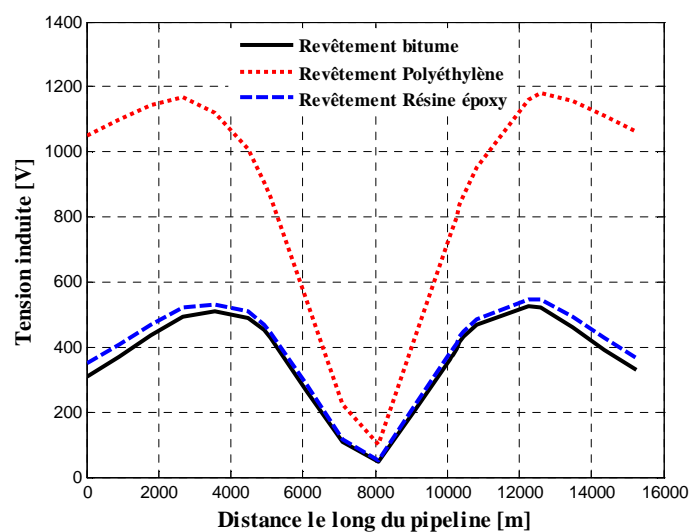


Figure V-59 : Tension induite dans un pipeline en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence pour les trois types de revêtements

On peut observer d'après cette figure, que la tension induite est beaucoup plus élevée par rapport au cas normal de fonctionnement dans la section de rapprochement du pipeline à la ligne et la section de passage et écartement du pipeline.

Le résultat montré à cette figure permet aussi de constater que le niveau de la tension induite dans un pipeline revêtu en polyéthylène dépasse la valeur de 1000V (la tension limite de sécurité) dans plusieurs sections de la zone d'influence [30]. En conséquence, il faut appliquer les mesures d'atténuation de façon appropriée.

Pour réduire la tension induite à une valeur inférieure à la limite permise, il suffit d'installer des résistances de mise à la terre à des nombres de points bien définis, autrement dit, dans les sections où les tensions induites dépassent cette limite admissible.

Les résultats obtenus du courant dans ce cas de défaut pour les deux revêtements du pipeline sont illustrés par la figure V-60. On constate que le courant circulant dans le pipeline est très élevée pour le revêtement à base de bitume de pétrole, il atteint une valeur maximale de 1500 A obtenue au point milieu de la zone d'influence. Au delà de ce point, le courant décroît avec la distance le long du pipeline.

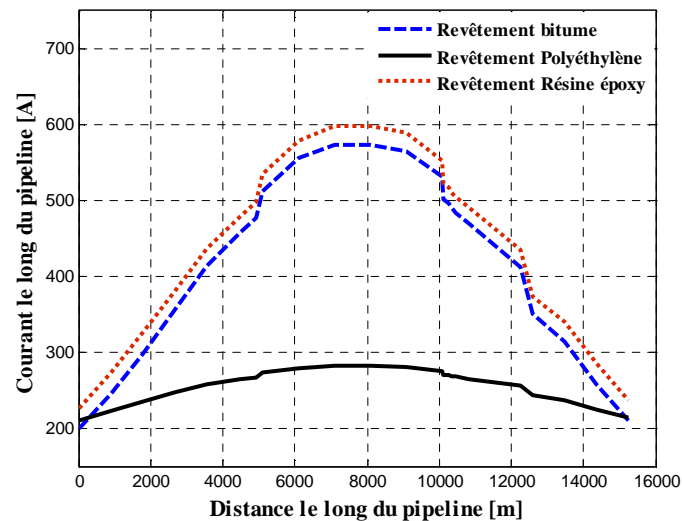


Figure V-60 : Le courant le long du pipeline en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence pour les trois types de revêtements

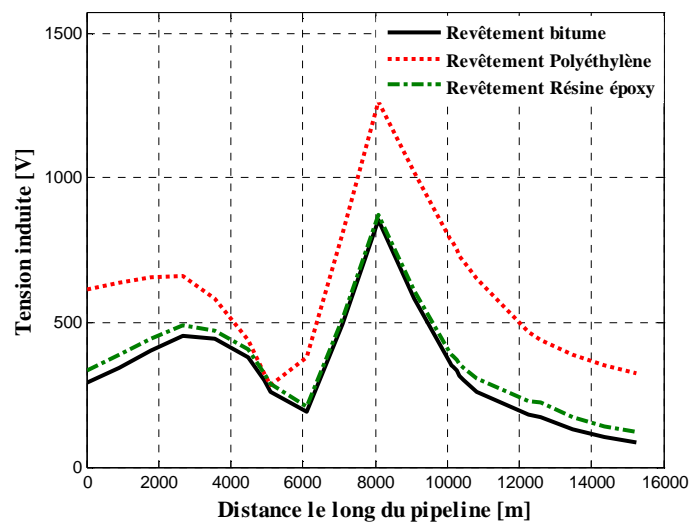


Figure V-61 : Tension induite dans un pipeline en cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence pour les trois types de revêtements

V.3.3.3. Défaut à l'intérieur de la zone d'influence

En cas de défaut survenant sur la ligne à l'intérieur de la zone d'influence, en supposant qu'un défaut apparaisse entre la phase inférieure de la ligne et le pylône au point D2, entre les kilomètres 7 et 8, comme indiqué sur la figure V-47, les valeurs prises par les courants de défaut à partir des stations sont $I_A = 6 \text{ kA}$ et $I_B = 2.5 \text{ kA}$. Les sections de 1 à 10 de la zone d'influence sont influencés par le courant de la station A, tandis que les sections de 11 à 23 sont influencés par le courant de la station B.

La tension induite le long de la portée du pipeline du pipeline pendant le défaut à l'intérieur de la zone d'influence est représenté sur la figure V-61 pour les trois types de revêtements. Comme le montre ces figures, la tension induite est moins élevée en un point proche de l'endroit du défaut. La valeur maximale de cette tension est supérieure pour un pipeline revêtu en polyéthylène à celle d'un pipeline avec revêtement de bitume, elle est obtenue à proximité du point milieu de la zone d'influence, ces figures montrent également que cette tension augmente très rapidement à partir du point (5 km) où la tension est minimale, et atteint sa valeur maximale au point (à 6.5 km), du 8 km 12 km, la tension induite diminue très lentement.

Le niveau du courant circulant le long du pipeline pour les deux types de revêtements est présenté à la figure V-62. Comme on peut le voir sur cette figure, des courants plus élevés circulant pour un pipeline recouverte d'un revêtement en bitume.

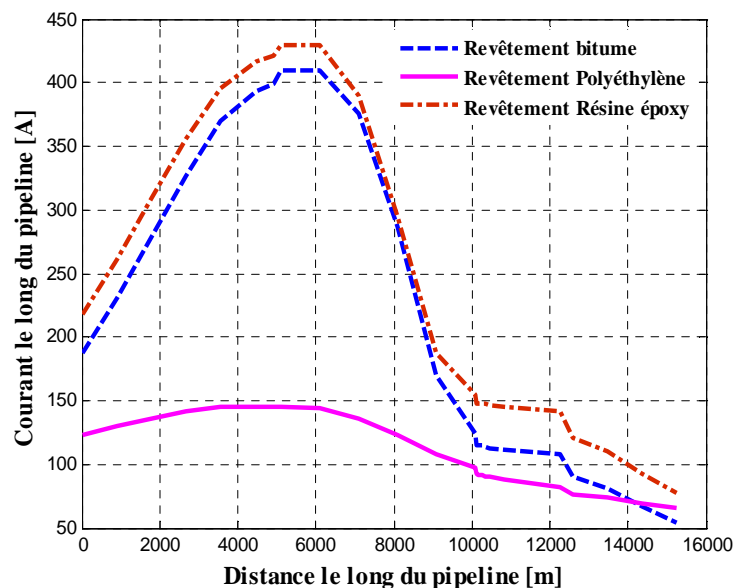


Figure V-62 : Courant induit le long du pipeline en cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence

V.3.3.4. Atténuation de la tension induite

Afin de réduire les tensions induites excessives dues au couplage magnétique entre le pipeline et la terre à des niveaux acceptables (inférieures à 1000 V) [30], en cas de défaut, plusieurs résistances de terre de 1 à 2 Ω sont reliées à différents nœuds bien définis le long du pipeline, comme il est présenté sur la figure V-63, en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence pour le revêtement en polyéthylène. Le résultat est présenté sur la figure V-64. On peut voir que la tension induite est réduite au-dessus de la limite permise en plaçant un nombre des résistances des mises à la terre de faibles valeurs.

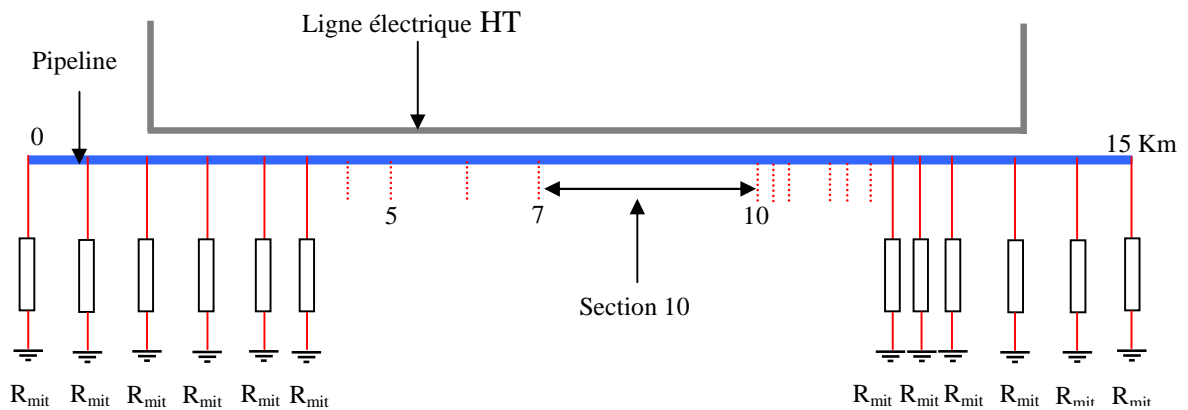


Figure V-63: Installation des résistances de mise à la terre aux différents nœuds le long du pipeline

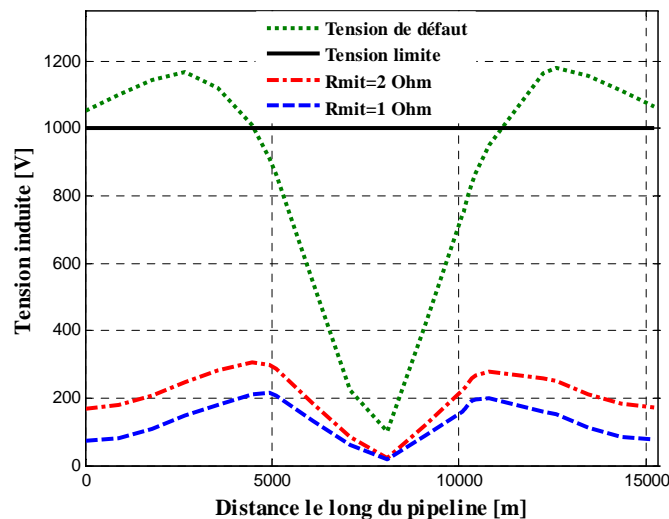


Figure V-64: Effet de la résistance de terre sur la tension induite dans le pipeline en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence: revêtement en polyéthylène

En cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence pour un revêtement en polyéthylène, le résultat du calcul de l'atténuation est montrée dans la figure V-65. De cette figure, il est visible que les tensions induites dans le pipeline sont en général au-dessous de la valeur recommandée. En outre, on remarque aussi sur les figures V-64 et V-65, l'impact de la résistance de mise à la terre, une meilleure réduction de la tension induite est due à l'utilisation d'une faible résistance.

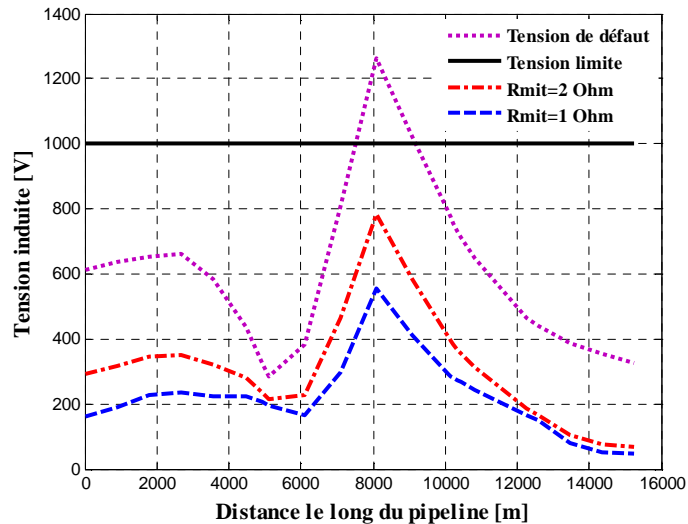


Figure V-65: Effet de la résistance de terre sur la tension induite dans le pipeline en cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence : revêtement en polyéthylène

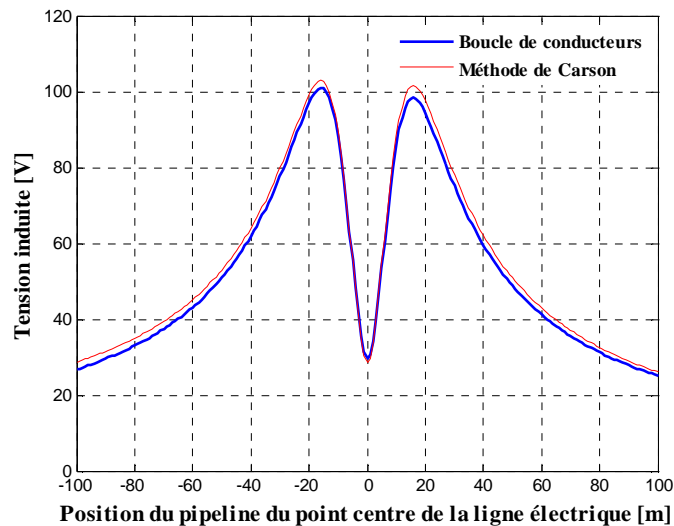


Figure V-66: Comparaison des profils de la tension induite entre les deux méthodes de calcul

V.3.3.5. 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 [30], pour valider notre programme de calcul.

La méthode de la boucle passive des conducteurs exposée dans le paragraphe IV.8 est utilisée pour calculer la force électromotrice induite par l'induction magnétique dans le pipeline. Nous présentons dans la figure V-66, 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.

Dans la référence [30] plusieurs simulations de calculs ont été réalisées, des résultats graphiques des tensions et courants induits ont été présentés, pour les trois types de couplages (capacitif, inductif et conductif) entre les lignes électriques et les pipelines recouverts par des différents types de revêtements.

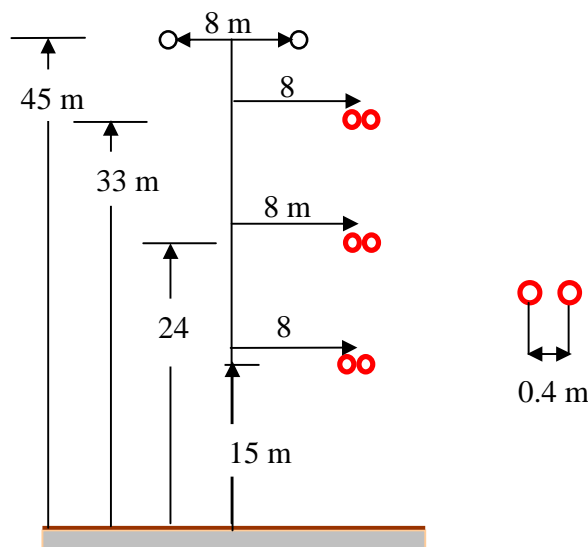


Figure V-67: Configuration verticale d'une ligne électrique de 400 kV

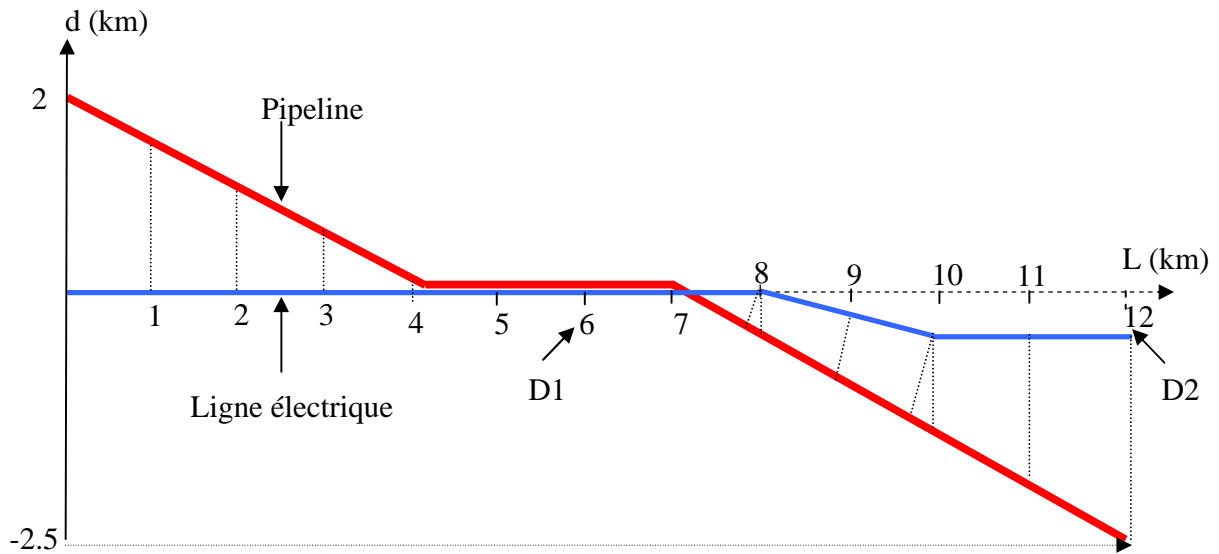


Figure V-68: La zone d'influence pour le cas complexe : Ligne HT- Pipeline

La configuration et la zone d'influence du système introduit dans la comparaison [30] sont présentées respectivement dans les figures V-67 et V-68.

Pour les résultats de la comparaison, la légende est la suivante:

- (a): la référence [30].
- (b) : programme de calcul.

On trace aux figures ci-dessous, les résultats de simulation de la référence [30] et de notre programme de calcul pour les trois cas précédemment cités dans le paragraphe V.3.2.

• Le cas du fonctionnement normal

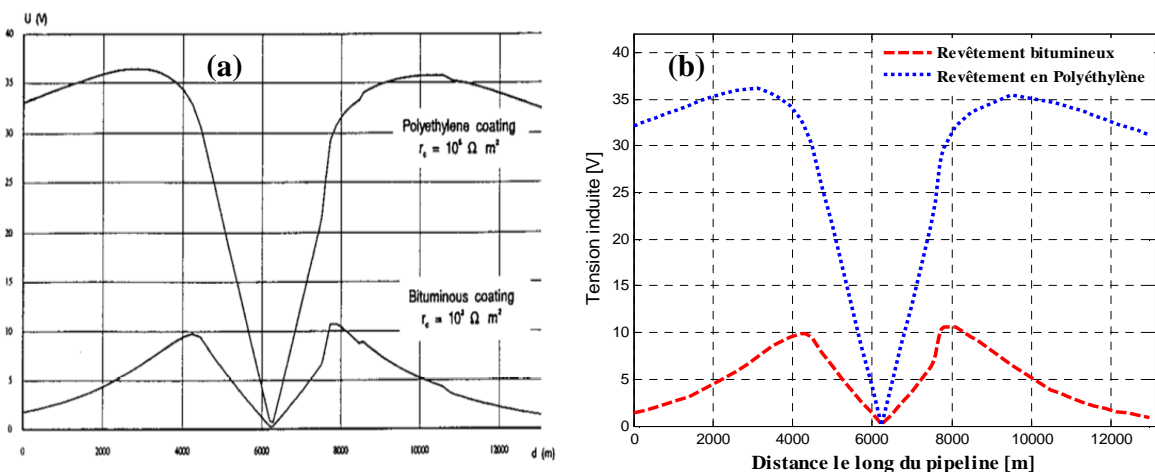


Figure V-69: Comparaison des profils de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de fonctionnement normal pour les deux types de revêtement

La figure V-69 décrit la tension induite au niveau du pipeline au voisinage de la ligne HT. Les résultats sont exactement les mêmes. Les résultats de calcul pour ce cas sont résumés dans le tableau V.12:

Tableau V.12 : Comparaison des valeurs de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de fonctionnement normal pour les deux types de revêtements

Revêtement	Programme de calcul		Référence [30]	
	bitume	polyéthylène	bitume	polyéthylène
Tension induite maximum (V)	10.67	36.14	11	37

• Le cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence

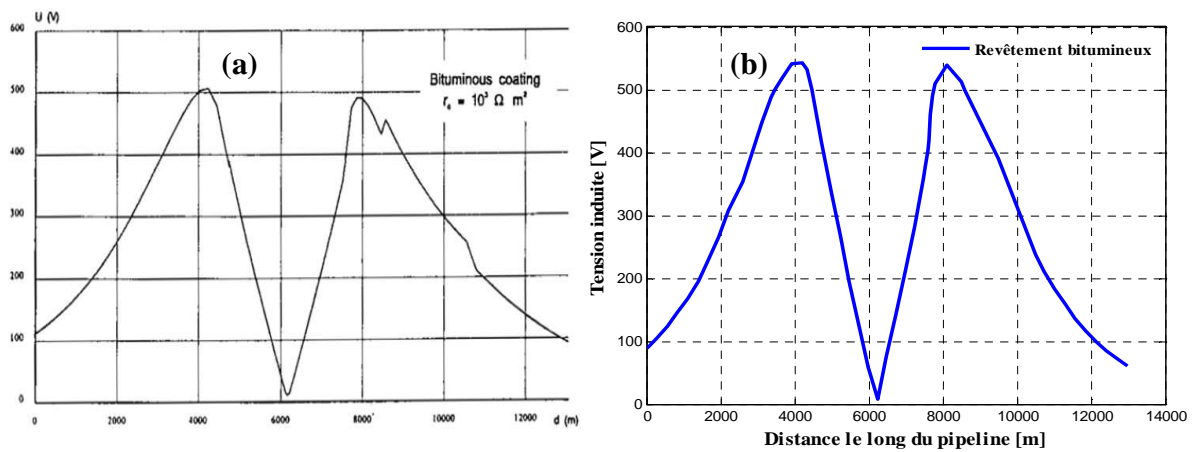


Figure V-70: Comparaison des profils de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence : revêtement en bitume

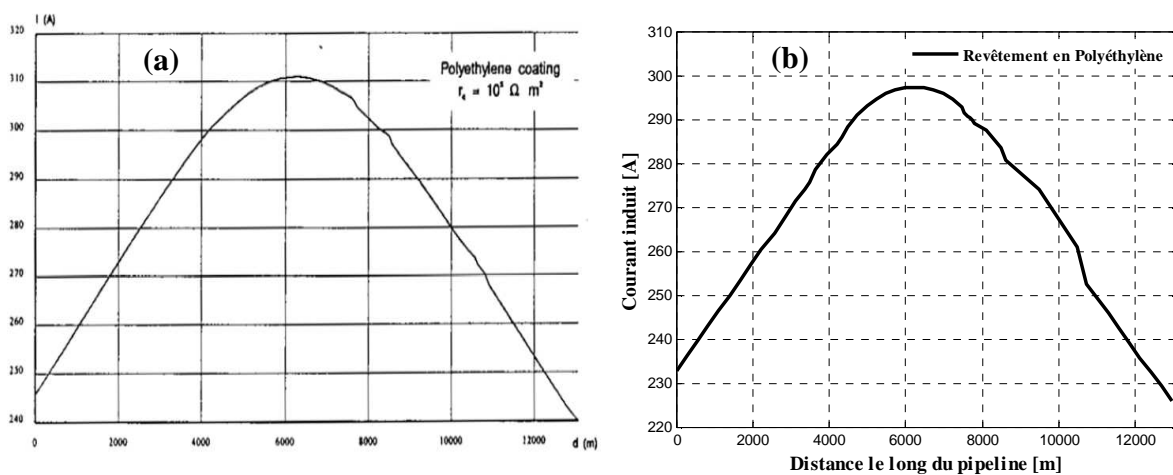


Figure V-71: Comparaison des profils du courant le long du pipeline entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence : revêtement en polyéthylène

Les résultats de calcul pour ce cas sont résumés dans le tableau V.13:

Tableau V.13: Comparaison des valeurs de la tension induite et du courant entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence pour les deux types de revêtements

Revêtement	Programme de calcul		Référence [30]	
	bitume	polyéthylène	bitume	polyéthylène
Tension induite maximum (V)	543.8	2144	510	2200
Courant induit maximum (A)		297.26		311.5

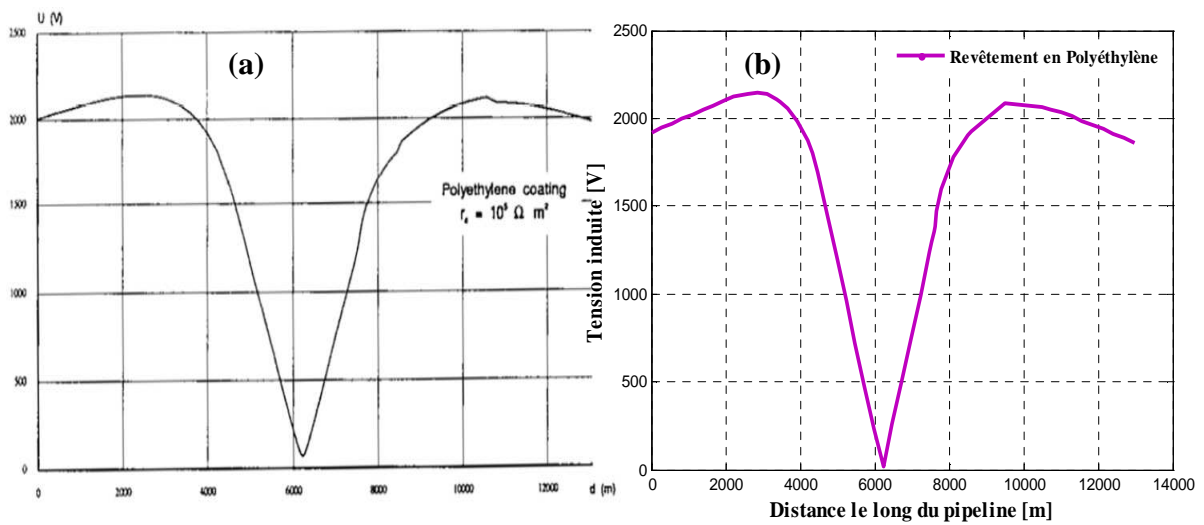


Figure V-72: Comparaison des profils de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'extrémité de la zone d'influence (revêtement en polyéthylène)

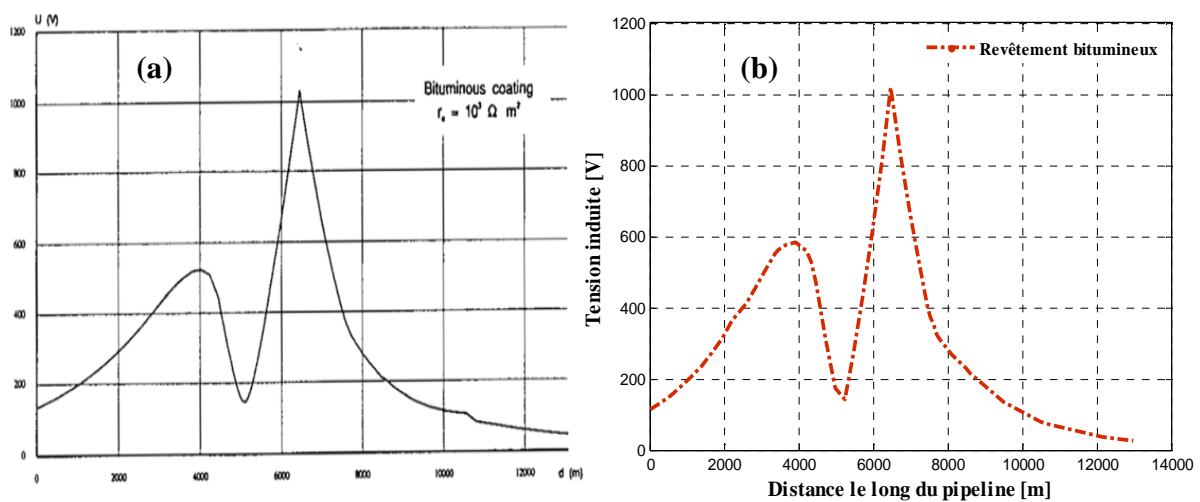


Figure V-73: Comparaison des profils de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence : revêtement en bitume

En comparant les graphiques (a) et (b) des figures V-70, V-71 et V-72, on remarque que la distribution de ces grandeurs est quasi-identique. On observe également que les grandeurs physiques induites (tension et courant) obtenues sont très proche, malgré la légère différence qui se dégage de la comparaison de ces trois profils

- **Le cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence**

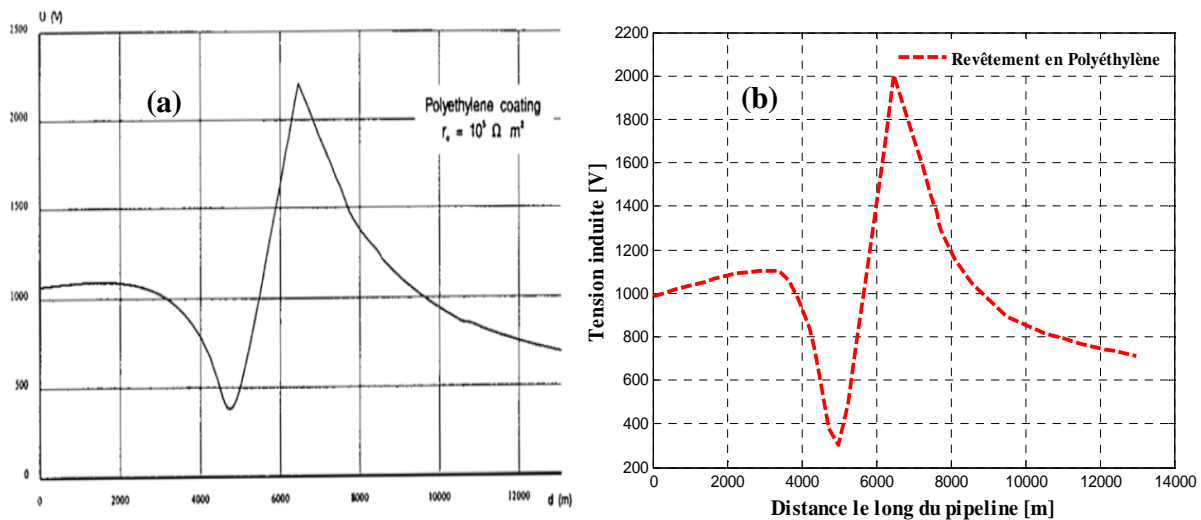


Figure V-74: Comparaison des profils de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence : revêtement en polyéthylène

Les résultats de calcul pour ce cas sont résumés dans le tableau V.14 :

Tableau V.14 : Comparaison des valeurs de la tension induite entre le programme de calcul et la référence [30], en cas de défaut à l'intérieur de la zone d'influence pour les deux types de revêtements

Revêtement	Programme de calcul		Référence [30]	
	bitume	polyéthylène	bitume	polyéthylène
Tension induite maximum (V)	1023	2004	1030	2200

Les figures V-73 et V-74 montrent que les deux distributions de la tension induite sont quasiment identiques. On peut constater également un léger décalage entre les deux résultats obtenus. D'après la comparaison entre ces résultats, nous remarquons que les performances obtenues à l'aide du Programme de calcul, sont quasiment identiques à ceux du document [30]. Il est à noter

que les valeurs maximales données dans les tableaux sont proches, malgré qui ne sont pas entièrement confondus avec les valeurs observées. Cela est dû notamment aux nombreuses méthodes utilisées pour déterminer les impédances linéiques propres et mutuelles entre les lignes électriques et les pipelines, en outre, l'expression du coefficient de blindage en cas de défaut, ce qui affecte directement la tension induite. Cette comparaison des résultats avec ceux trouvés dans la littérature de référence [30], nous permet de s'assurer de l'efficacité de ces méthodes et de valider les codes de calcul.

V.4. 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 capacitif, et après optimisation du nombre et de l'emplacement des charges dans la ligne électrique et le pipeline à l'aide des algorithmes génétiques, nous avons calculé le champ électrique, la tension induite dans le pipeline et le courant circulant dans les personnes en cas de contact direct avec les pipelines, en tenant compte des facteurs qui influent sur leur amplitude. Ce qui nous a permis de déterminer une zone d'influence dans laquelle tout équipement qui s'y trouve est fortement perturbé. Une technique d'atténuation visant à limiter les grandeurs perturbatrices en deçà des limites recommandées par les normes a été proposée.

Enfin, En ce qui concerne le couplage inductif, l'induction du champ magnétique au niveau du pipeline a été déterminée, en utilisant une méthode de simulation combinée avec un algorithme d'optimisation. 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, une méthode d'atténuation qui peut réduire efficacement ce type d'interférence à des niveaux acceptables a été discutée. Pour un pipeline enterré, les tensions induites et les courants le long du pipeline ont été analysés pour deux types de revêtements dans le cas simple, dans le cas complexe où pour la zone d'influence est constitué par des parallélismes et des rapprochements, ces paramètres induits ont été évalués au cours de deux conditions de fonctionnement normales et les conditions de défaut du système de transmission électrique. En conséquence, pendant les pires conditions de défaut, il est nécessaire d'atténuer les tensions excessives à un endroit à l'autre le long du pipeline. Un système de mise à la terre appropriée connecté au pipeline est considéré comme une approche très efficace pour réduire les interférences inductives. Les tensions induites calculées pour ce cas complexe 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 cette modélisation.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

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 trois mécanismes de couplage des perturbations électromagnétiques.

- couplage inductif;
- couplage capacitif;
- couplage conducteur.

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 électrostatiques (capacitives) et électromagnétiques (inductives) entre les lignes de transport électrique HT et les pipelines métalliques. Cette étude est divisée en deux parties :

- analyse du couplage capacitif
- analyse du couplage inductif

Le couplage capacitif

Cette partie est basée sur une modélisation d'un pipeline aérien parallèle à une ligne de transmission haute tension en utilisant la méthode des charges fictives (MCF) couplée avec les algorithmes génétiques. Il a été observé que la distribution du champ électrique est fortement perturbée par la présence du pipeline dans la zone d'influence. Cette situation est rencontrée dans tous les cas étudiés (rayon du pipeline, distance de séparation, géométrie de la configuration, câbles de garde) est finement analysée.

La tension induite calculée est élevée près et en dessous des conducteurs latéraux, puis décroît progressivement à mesure qu'on s'éloigne de la ligne jusqu'à devenir négligeable à une distance de séparation dite distance critique. On pourrait donc suggérer que le pipeline est à installer à cet emplacement.

Concernant le courant qui circule dans les personnes en contact direct avec le pipeline, il est utile de remarquer que son amplitude est fortement dépendante de la longueur du parallélisme. Si cette valeur dépasse la limite admissible, il devient impératif de mettre en place une technique d'atténuation. Celle-ci peut être appliquée sur le pipeline, en reliant ses accès à travers un système de mise à la terre. Les résultats issus de la technique de calcul proposée sont confrontés avec ceux empruntés à la littérature. Un bon accord est constaté.

Le couplage inductif

Pour l'analyse du couplage inductif, un programme de calcul basé sur la méthode de simulation des courants combinée avec les algorithmes génétiques a 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. Dans de telles situations, une approche de sécurité permettant d'assurer la protection du personnel contre le risque de choc électrique est recommandée. Il suffit par exemple de connecter les deux extrémités du pipeline avec un système de mise à la terre.

Pour un pipeline enterré et dans les deux cas simple et complexe, les tensions induites et les courants circulant le long du pipeline ont été évalués dans la zone d'influence, les résultats montrent que les impédances de terminaison utilisées aux extrémités de la zone d'influence (mises à la terre ou ouvertes) ont un effet significatif sur la tension induite le long du pipeline. Il a été observé que lorsque le pipeline se rapproche perpendiculairement à la ligne de transmission à haute tension, puis s'étend parallèlement à l'axe sur une certaine distance et enfin s'éloigner perpendiculairement de la ligne, la tension induite est maximale aux points de rapprochement ou de retrait « décrochement » du pipeline, et est pratiquement négligeable près du point central de la zone d'influence. Les résultats ont montré aussi que le profil de la tension induite dépend fortement du matériau utilisé pour le revêtement du pipeline. Ainsi pour un revêtement Bitumineux, la tension induite calculée est très inférieure à celle obtenue pour le revêtement en Polyéthylène. Il est à noter aussi que les valeurs de la tension induite, obtenues pour le cas de voisinage simple, sont en dessous des valeurs recommandées par les normes. Tandis que pour le cas complexe et lors d'un défaut sur la ligne, les valeurs obtenues de la tension induite sont très

élevées et dépassent les limites admissibles. D'où la nécessité de prévoir l'installation d'un système d'atténuation composé de résistances, mises à la terre, de faibles valeurs afin de maintenir la valeur de la tension à des valeurs raisonnables, admissibles.

Les programmes de calcul développés pour quantifier le courant et la tension induite ont été validés en comparant les résultats obtenus avec ceux trouvés dans la littérature. Un accord satisfaisant est trouvé.

On peut constater que l'étude développée, notamment les programmes de calcul mis en œuvre nous ont servis considérablement à :

- établir la cartographie des champs électrique et magnétique au niveau des pipelines implantés au voisinage des lignes de transport d'énergie,
- vérifier la conformité aux normes de sécurité entre l'ensemble des équipements électriques HT et les canalisations métalliques de transport de gaz ou de fluide ;
- aider à la conception des nouvelles lignes électriques HT, en cas de voisinage avec les canalisations métalliques et vice versa.

Perspectives

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

- Étude combinée à la fois des trois types de couplages (capacitif, inductif et conducteur) entre les lignes HT de transmission d'énergie et les pipelines métalliques en cas d'un défaut à la terre (régime transitoire).
 - Le cas où plusieurs pipelines sont présents ainsi que plusieurs lignes électriques hautes tensions doivent être pris en compte.
- Utilisation des logiciels numériques de spécialité (2D et 3D) dans la simulation des couplages pour plus de précision de calcul surtout dans des cas complexe, à titre d'exemple, le logiciel commercial EMTP (Electromagnetic Transients Program) et le logiciel CDEGS développé par Safe Engineering Services & Technologies (SES), une comparaison entre les divers résultats (théoriques, mesures ...).
- L'utilisation d'autres moyens d'atténuation pour réduire les perturbations électromagnétiques sur les pipelines en fonctionnement normal et en cas de défaut.

ANNEXE

ANNEXE A

Tension de contact maximale admissible (dite tension limite de sécurité UL) :

Normes / Pays	Etat stable tension max (V)	Etat de défaut	
		temps max (s)	Tension max (V)
IEEE 80-2000	15	0.5	287
IEC-479		0.45	220
NACE RP0177-2000	15	Aucune indication	
l'Arabie Saoudite	Selon la norme IEEE 80-2000		
États-Unis	25	Selon la norme IEEE 80-2000	
Allemagne	65	0.5	1000
Australie	60	0.35	1500
Brésil	50	0.5	1700
Danemark	50	0.5	300
Pays-Bas	50	0.1	750
Suède	15	0.5	600
Suisse	50	0.3	300
Afrique du Sud	50	> 0.35	430
Directives de l'Union internationale des Télécommunications	60	0.5	430

Tableau A-1 : Normes de niveau maximal de tension de contact admissible

ANNEXE B

La détermination des coefficients de potentiel et de champ électrique

Dans le but d'utiliser les différents types de charge de simulation, il est essentiel de déterminer les coefficients de champ et de potentiel associés à chaque type de charge ; pour cette raison on peut citer les types des charges fictives les plus utilisées.

2.1 Calcul des coefficients potentiels et champs pour une simulation par charges ponctuelles

On suppose une charge ponctuelle fictive q_j , comme montre la figure (B.1), située à une distance Z_j par rapport au plan $x y$ qui se trouve au potentiel zéro.

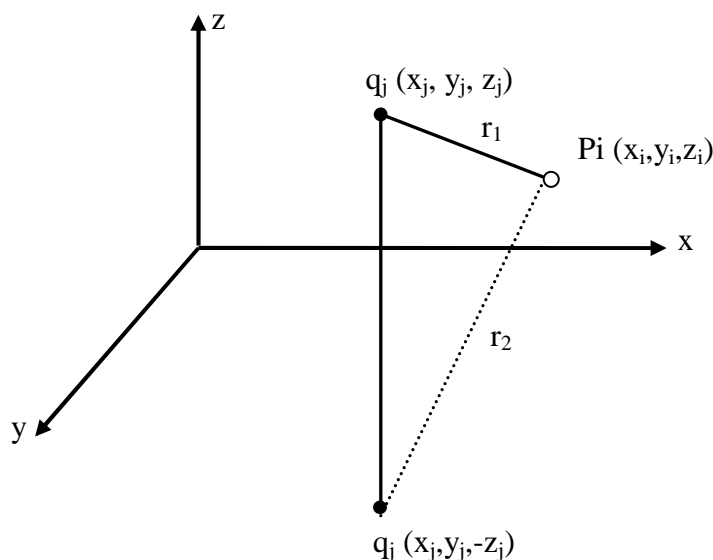


Figure B.1: Disposition de la charge ponctuelle et de son image

Le coefficient de potentiel est :

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (\text{B.1})$$

Avec:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z + z_j)^2} \end{array} \right\} \quad (\text{B.2})$$

L'équation (B.1) peut être écrite sous la forme:

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left[\frac{1}{\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z+z_j)^2}} \right] \quad (\text{B.3})$$

Dans ce cas les expressions des coefficients des champs suivant les trois directions sont:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{x,ij} = -\frac{\partial p_{ij}}{\partial x} = \frac{q_j}{4\pi\epsilon} \left[\frac{x-x_j}{\sqrt{r_1^3}} - \frac{x-x_j}{\sqrt{r_2^3}} \right] \\ F_{y,ij} = -\frac{\partial p_{ij}}{\partial y} = \frac{q_j}{4\pi\epsilon} \left[\frac{y-y_j}{\sqrt{r_1^3}} - \frac{y-y_j}{\sqrt{r_2^3}} \right] \\ F_{z,ij} = -\frac{\partial p_{ij}}{\partial z} = \frac{q_j}{4\pi\epsilon} \left[\frac{z-z_j}{\sqrt{r_1^3}} - \frac{z+z_j}{\sqrt{r_2^3}} \right] \end{array} \right\} \quad (\text{B.4})$$

2.2 Calcul des coefficients potentiels et champs pour une simulation par charges linéique de longueur infinie

La figure (B.2) représente la charge linéique infinie de coordonnée (x_j, y_j) et son point contour $P_i(x_i, y_i)$.

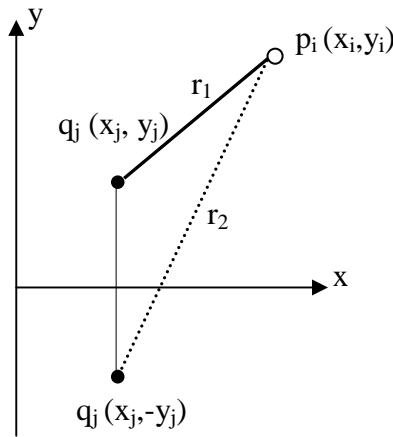


Figure B.2: Disposition de la charge linéique de longueur infinie et de son image

Dans le cas des charges fictives linéiques de longueur infinie, le coefficient potentiel qui correspond au point P_i et à la charge et à son image q_{j^*} sera égal à:

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{B.5})$$

Où: r_2 et r_1 respectivement sont les distances entre la charge image et le point P_i et la charge fictive et le point P_i .

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y + y_j)^2} \end{array} \right\} \quad (\text{B.6})$$

Les expressions des coefficients de champ sont de la forme:

$$\left. \begin{array}{l} F_x = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\frac{(x - x_j)}{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} - \frac{(x - x_j)}{(x - x_j)^2 + (y + y_j)^2} \right] \\ F_y = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[\frac{(y - y_j)}{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} - \frac{(y + y_j)}{(x - x_j)^2 + (y + y_j)^2} \right] \end{array} \right\} \quad (\text{B.7})$$

2.3 Calcul des coefficients potentiels et champs pour une simulation par charges annulaires

La charge annulaire c'est une charge qui est utilisée pour modéliser des formes sphériques ou cylindrique. Les caractéristiques de ce type de charge sont représentées dans la figure (B.3), où r_j est le rayon de cette charge, $p_i(r_i, z_i)$ est le point contour.

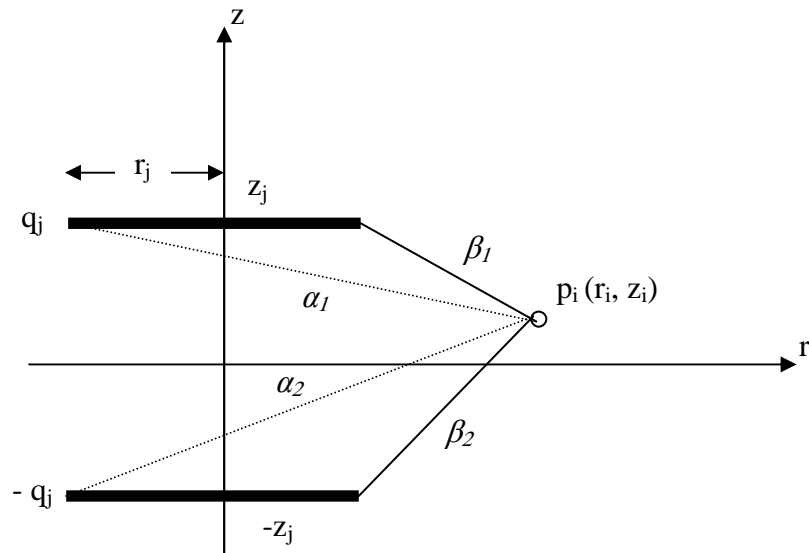


Figure B.3: Disposition de la charge annulaire et de son image

Le potentiel total au point P_i dû à la charge fictive annulaire disposée au dessus du plan $z = 0$ est alors égal la somme des contributions dues aux charges fictives et à l'image de celle-ci, le coefficient potentiel correspondant est égal à:

$$P_{ij} = \frac{1}{2.\pi^2.\epsilon} \left[\frac{K(k_1)}{\alpha_1} - \frac{K(k_2)}{\alpha_2} \right] \quad (\text{B .8})$$

Avec:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \sqrt{(r+r_j)^2 + (z-z_j)^2} \\ \alpha_2 = \sqrt{(r+r_j)^2 + (z+z_j)^2} \end{cases} \quad (\text{B .9})$$

Les distances sont exprimées en fonction des coordonnées des points P_i et de la charge fictive est de son image q_{j^*} .

$K(k)$: Est l'intégrale elliptique complète du premier ordre avec:

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}} \quad (\text{B .10})$$

$$\begin{cases} k_1 = \frac{2.\sqrt{r_j.r}}{\alpha_1} \\ k_2 = \frac{2.\sqrt{r_j.r}}{\alpha_2} \end{cases} \quad (\text{B .11})$$

Les coefficients des champs suivant les axes r et z sont donnés par les expressions:

$$E_r = -\frac{\partial P_{ij}}{\partial r} = \sum_{j=1}^n \frac{-q_j}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{\pi r} \cdot \left\{ \frac{\left[r_j^2 - r^2 + (z - z_j)^2 \right].E(k_1) - \beta_1^2.K(k_1)}{\alpha_1.\beta_1^2} - \frac{\left[r_j^2 - r^2 + (z + z_j)^2 \right].E(k_2) - \beta_2^2.K(k_2)}{\alpha_2.\beta_2^2} \right\} \quad (\text{B .12})$$

$$E_z = -\frac{\partial P_{ij}}{\partial z} = \sum_{j=1}^n \frac{-q_j}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \frac{(z - z_j).E(k_1)}{\alpha_1.\beta_1^2} + \frac{(z + z_j).E(k_2)}{\alpha_2.\beta_2^2} \right\} \quad (\text{B .13})$$

Où: β_1 et β_2 sont calculés par les formules suivantes :

$$\begin{cases} \beta_1 = \sqrt{(r-r_j)^2 + (z-z_j)^2} \\ \beta_2 = \sqrt{(r-r_j)^2 + (z+z_j)^2} \end{cases} \quad (\text{B.14})$$

Avec $E(k)$ l'intégrale elliptique complète du second ordre.

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad (\text{B.15})$$

2.4 Calcul des coefficients potentiels et champs pour une simulation par charges linéique de longueur finie

Ce type de charge est représenté dans la figure (B.4), où le point P de coordonnée (r, z) est le point contour et les deux ordonnées z_1 et z_2 sont les deux extrémités du segment désignant la charge linéique finie chargé d'une densité linéique de charges λ .

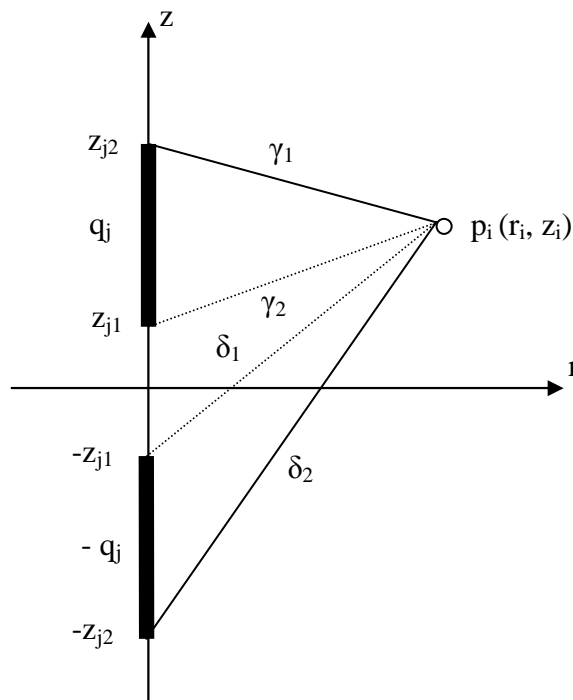


Figure B.4: Disposition de la charge linéique de longueur finie

Le coefficient de potentiel d'un segment uniformément chargé :

$$p_{ij} = \frac{1}{(z_{j2} - z_{j1})} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon} \left[\ln \frac{(z_{j2} - z + \gamma_1)(z_{j1} + z + \gamma_2)}{(z_{j1} - z + \delta_1)(z_{j2} + z + \delta_2)} \right] \quad (\text{B.16})$$

Avec:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \sqrt{r^2 + (z_{j2} - z)^2} \\ \gamma_2 &= \sqrt{r^2 + (z_{j1} + z)^2} \\ \delta_1 &= \sqrt{r^2 + (z_{j1} - z)^2} \\ \delta_2 &= \sqrt{r^2 + (z_{j2} + z)^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{B.17})$$

Les coefficients des champs suivant les axes r et z sont donnés par les expressions:

$$F_r = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_j}{(z_{j2} - z_{j1})} \left[\frac{(z_{j2} - z)}{r\gamma_1} - \frac{(z_{j1} - z)}{r\delta_1} + \frac{(z_{j1} + z)}{r\gamma_2} - \frac{(z_{j2} + z)}{r\delta_2} \right] \quad (\text{B.18})$$

$$F_z = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_j}{(z_{j2} - z_{j1})} \left[\frac{1}{\gamma_1} - \frac{1}{\delta_1} - \frac{1}{\gamma_2} + \frac{1}{\delta_2} \right]$$

ANNEXE C

Impédance mutuelle de circuits parallèles avec retour par le sol et l'impédance d'un conducteur à retour par le sol

▪ **Circuits parallèles à retour par le sol**

a) Expression of **Carson-Clem**

$$Z_m (\Omega / m) = \frac{\pi \mu_o f}{4} + j \mu_o f \left[\ln \frac{2}{g \alpha d} + \frac{1}{2} \right] \quad (C.1.)$$

where $\mu_o = 4 \pi 10^{-7}$ H/m

f = frequency (Hz)

g = 1.7811 - Euler's constant

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu_o}{\rho}}$$

ρ = soil resistivity (Ωm)

d = geometrical distance between conductors (m)

Expression C.1. can also take the following form :

$$Z_m (\Omega m) = \frac{\mu_o \omega}{8} + j \mu_o f \ln \frac{1.85}{\alpha d} \quad (C.2.)$$

Carson-Clem expression is only valid for relatively short distances between circuits :

$$d \leq 90 \sqrt{\rho / f}$$

b) **Haberland's** formula which gives a very good approximation of the modulus of the mutual impedance for the industrial frequencies, for all the distances to be considered.

$$\left| Z_m \right| = \omega \ln \left(1 + \frac{6 \cdot 10^5 \rho}{f d^2} \right) 10^{-7} \Omega / m \quad (C.3.)$$

c) Gary-Dubanton's expression (valid only when both power line and pipeline are aerial)

$$Z_m = j \frac{\mu f}{2} \left[\ln \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{d^2} - j \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{B}{A} \right] \quad (\text{C.4.})$$

where $A = (h_i + h_j) [(h_i + h_j) + 2 \sqrt{2} \delta] + s^2$

$$B = 2 \delta [(h_i + h_j) \sqrt{2} + 2 \delta]$$

d = distance between conductors i, j (m)

h_i = height of conductor i (m)

s = horizontal distance between conductors i, j (m)

$$\delta = 330 \sqrt{\rho / f}$$

$$\mu = 4 \pi 10^{-7} \text{ H/m}$$

d) Another expression, which can be useful for calculations on computers is given in the CCITT Directives . Its domain of validity is very broad

$$Z_m = [f_1(d) + j f_2(d)] 10^{-9} j \omega (\Omega/\text{m}) \quad (\text{C.5})$$

with

$$f_1(d) = a_1 - a_2 d + a_3 d^2 - a_4 d^3 + a_5 d^4 - a_6 d^5 - a_7 e^d + a_8 \ln d$$

$$f_2(d) = -b_1 + b_2 d - b_3 d^2 + b_4 d^3 - b_5 d^4 + b_6 d^5 + b_7 e^{-d} - b_8 e^d - b_9 \ln d$$

d = distance between conductors (m)

Table 1 gives the coefficient a_i and b_i

CCITT: Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified rail lines.

$f_1(d)$		$f_2(d)$	
a_1	123.31	b_1	339.03
a_2	1.69	b_2	193.67
a_3	23.93	b_3	49.76
a_4	4.96	b_4	6.97
a_5	0.44	b_5	0.52
a_6	0.01	b_6	0.01
a_7	0.00	b_7	180.41
a_8	199.98	b_8	0.00
		b_9	0.27

Table C.1

- **Impédance d'un circuit à retour par le sol**

• A good approximation of the impedance per unit length can be given by the following expressions (C.6.) or (C.7.) derived from Carson's expression

$$Z = R + \pi \frac{\mu_0 f}{4} + j \mu_0 f \left[\ln \frac{2}{g \alpha r} + \frac{1}{2} \right] \quad (C.6)$$

$$Z = R + \mu_0 f \operatorname{arctg} \frac{\beta}{1+\beta} + j \mu_0 f \left(\ln \frac{2h}{r} + \ln \sqrt{(1+\beta)^2 + \beta^2} \right) \quad (C.7)$$

where R = resistance of the conductor per unit length (Ω/m)

h = height of the conductor above the soil (m)

r = radius of the conductor (m)

μ_0 = magnetic permeability of the air : $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ H/m

$$\alpha = \sqrt{\omega \mu_0 / \rho}$$

$$\beta = \frac{330}{h} \sqrt{\frac{\rho}{2f}}$$

ρ : soil resistivity (Ωm)

f : frequency (Hz)

g : 1.7811

Z is a complex term; the real term corresponds to the resistance presented by the conductor and the earth; the imaginary term results from the magnetic flux in the loop conductor/earth.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] F. Rachidi : Compatibilité électromagnétique, Notes de cours, Introduction à la CEM, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005, EPFL-DE-LRE, CH-1015 Lausanne.
- [2] M. H. Shwehdi, U. M. Johar : Transmission Line EMF Interference with Buried Pipeline: Essentials and Cautions, Proceedings of the International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN (ICNIR 2003) Electromagnetic Fields and Our Health, Kuala Lumpur (Malaysia), October 2003.
- [3] P. Krempf : Précis Electromagnétisme, MP, Cours Méthodes Exercices résolus, Bréal 2004.
- [4] J. A. De Vasconcelos : Optimisation de forme des structures électromagnétiques, thèse doctorat, l'école centrale de Lyon, No d'ordre 94-32,1994.
- [5] Amimer Ratiba : Calcul numérique des performances en régime saturé d'un moteur asynchrone à rotor massif lisse, Ecole Nationale Polytechnique, Mémoire de Magister ,2004.
- [6] Dhanistha Panyasak : Réduction de l'émission électromagnétique des circuits intégrés : l'alternative asynchrone, thèse doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2004.
- [7] S. Demarty : Contribution à l'étude électromagnétique théorique et expérimentale des cartes de circuit imprimé, thèse doctorat, université de limoges, Thèse N° 40-2006.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] R.Carson: Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return, The Bell System Technical Journal, Vol.5 October 1926, pp.539-554.
- [12] F. Pollaczek : On the Field Produced by an Infinitely Long Wire Carrying Alternating Current, Elektrische Nachrichten Technik, Volume III, 1029, No. 9, pp. 339-359, 1926.
- [13] Sunde. Erling D: Earth conduction effects in transmission systems. New York: D. Van Nostrand Company, Inc, 373 p, 1949.
- [14] B. Favez, J. C. Gougeuil: Contribution to Studies on Problems Resulting from the Proximity of Overhead Lines with Underground Metal Pipelines, CIGRE Paper No.

- 336, June 1966.
- [15] A.Taflove, J.Dabkowski: Prediction Method for buried pipeline voltages due to 60 Hz AC inductive coupling, Part I - Analysis, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems Vol. PAS-98, No.3, May-June 1979, pp.780-787.
- [16] A.Taflove, J.Dabkowski : Prediction Method for buried pipeline voltages due to 60 Hz AC inductive coupling ,Part II - Field Test Verification, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.3, May/June 1979, pp.788-794.
- [17] 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.
- [18] A.Taflove, J.Dabkowski: Mitigation of Buried Pipeline Voltages Due to 60 Hz AC Inductive Coupling Part I - Design of Joint Rights-of-Way, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 98, No. 5, pp 1806-1813, 1979.
- [19] J. Dabkowski, A. Taflove: Mitigation of Buried Pipeline Voltages Due to 60 Hz AC Inductive Coupling Part II - Pipeline Grounding Methods, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 98, No.5, pp1814-1823, 1979.
- [20] Jaffa K. C, Stewart J. B: Magnetic Field Induction from Overhead Transmission and Distribution Power Lines on Buried Irrigation Pipelines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, No.3, pp 1039-1048, 1981.
- [21] F. Dawalibi, A. Pinho: Computerised Analysis of Power Systems and Pipelines Proximity Effects, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 1, No. 2, pp 40-48, 1986.
- [22] J. R. Daconti, D. O. Campones Do Brazil: Experience of CHESF Concerning Interferences between EHV Transmission Lines and Pipelines, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, CIGRE Session Paris 1986, Paper 36-07.
- [23] W. Brandes, H. J. Haubrich, K. Schmidt, R. Kahnt: Corrosion Protection Problems Due to Resistive and Inductive Interference of High Voltage Systems, CIGRE Proceedings, Vol II,Paper No. 36-08, 1988.
- [24] F. P. Dawalibi, R. D. Southey: Analysis of Electrical Interference From Power Lines To Gas Pipelines Part I: Computation Methods, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No.3, pp 1840-1846, 1989.
- [25] F. D. Dawalibi, R.D. Southey, Y. Malric, W. Tavcar: Power Line Fault Current Coupling To Nearby Natural Gas Pipelines, Volumes 1&2, EPRI/AGA Project 742, EL-5472/PR176-510, November 1987.
- [26] F. P. Dawalibi, R. D. Southey: Analysis of Electrical Interference From Power Lines To Gas Pipelines Part II: Parametric Analysis, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp 415-421, 1990.

- [27] R. Sanz, O. G. Vera, J. L. Pineiro, D. O. C. Brazil, A. M. Franca, J. R. Daconti: Induced Effects Caused by Overhead Transmission Lines on Metallic Structures, CIGRE Session Paris 1990, Paper 36-202.
- [28] B. Jacquet, P. Kouteynikoff: Influence of High Voltage Lines and Installations on Metal Pipelines, CIGRE Proceedings, Vol II, Paper No. 36-203, 1990.
- [29] Mazen Abdel-Salam, Abdallah Al-Shehri: Induced Voltages on Fence Wires and Pipelines by AC Power Transmission Lines, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 2, pp 341-349, 1994.
- [30] CIGRE: Guide Concerning Influence of High Voltage AC Power Systems on metallic Pipelines, CIGRE Working group 36.02 1995.
- [31] G. Djogo, M.M.A. Salama: Calculation of Inductive Coupling from Power Lines to Multiple Pipelines and Buried Conductors, Electric Power Systems Research, Vol: 41, pp 75-84, 1997.
- [32] Australian New Zealand Standard 4853:2000: Electrical Hazards on Metallic Pipelines, Standards Australia, Standards New Zealand.
- [33] F. P. Dawalibi, R.D. Southey, Y. Li, J. Ma: On the Mechanisms of Electromagnetic Interference between Electrical Power Systems and Neighboring Pipelines, sestech.2000.
- [34] Y. Li, F.P. Dawalibi, J. Ma: Electromagnetic Interference Caused by a Power system Network on a Neighboring Pipeline, sestech.2000.
- [35] F.P. Dawalibi, Y. Li, J. Ma: Safety of Pipelines in Close Proximity to Electric Transmission Lines, Proceedings of 2000 IEEE IAS Workshop on Electrical Safety in Industry, New Delhi, pp 15-20, April 14-15, 2000.
- [36] Georgios C. Christoforidis, Petros S. Dokopoulos, Kostas E. Psannis: Induced Voltages and Currents on Gas Pipelines with Imperfect Coatings Due to Faults in a Nearby Transmission Line, IEEE Porto Power Tech Conference, pp 401-406, September 2001.
- [37] Erwan Collet, Bernard Delores, Michel Gabillard, Isabelle Ragault : Corrosion due to AC Influence of Very High Voltage Power Lines on Polyethylene-Coated Steel Pipelines Evaluation of Risks-Preventive Measures, Emerald, Vol. 48, No. 4, pp 221-226, 2001.
- [38] R.D. Southey, W. Ruan, F.P. Dawalibi: AC Mitigation Requirements: A Parametric Analysis, Corrosion-2001 NACE International Conference, Texas, March 11-16, 2001.
- [39] G. Lucca, L. Zucchelli & M. Moro: Electromagnetic Interference Produced on a Complex metallic Pipeline Network by a Fault in a Power Substation, CIGRE Session 2002, Paper 36-101.
- [40] R. M. Radwan, R. Y. Amer and A. M. Emam: Combined Effect of Electric and Magnetic Fields of High Voltage Transmission Lines on Metallic Pipelines, paper no.

- 36-104, CIGRE session 2002.
- [41] M. Vakilian, K. Valadkhani, A.A. Shaigan, A.H. Nasiri and H. Gharagozlo: A method for evaluation and mitigation of AC induced voltages on buried gas pipe lines, Part 1: An Investigation on Presence of Ac Voltages on Gas Pipes Tehran, Sharif University of Technology · scientia iranica fall 2002.
- [42] K.A. Ellithy, A. H. AL-Badi: Determining the Electromagnetic Interference Effects on Pipelines Built in Power Transmission Lines Right-Of-Way, International Conference on Electrical Engineering 2002.
- [43] R.D. Southey, W. Ruan, F.P. Dawalibi, S. Fortin: Estimating AC Mitigation Requirements for Pipelines Installed in High Voltage AC Corridors: Fault Conditions, sestech 2003.
- [44] M. A. Elhirbawy, L. S. Jennings, S. M. Al Dhalaan, W.W.L. Keerthipala: Practical Results and Finite Difference Method to Analyze the Electric and Magnetic Field Coupling Between Power Transmission Line and Pipeline, Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS '03, pp 431-434, 2003.
- [45] G. C. Christoforidis: Inductive Interference Calculation on Imperfect Coated Pipelines Due to Nearby Faulted Parallel Transmission Lines, Electrical Power System Research, Vol. 66, pp 139-148, 2003.
- [46] G. C. Christoforidis, D. P. Labridis : Inductive Interference of Power Lines on Buried Irrigation Pipelines, IEEE Power Tech Conference, Bologna, Vol. 1, pp 196-202, 2003.
- [47] Markovic, D., Smith, V., Perera, S. and Elphick, S : Modelling of the Interaction between Gas Pipelines and Power Transmission Lines in Shared Corridors, Proc. AUPEC, September 2004, Brisbane, Australia, Paper 223.
- [48] M. H. Shwehdi : A Practical Study of an Electromagnetic Interference (EMI) Problem from Saudi Arabia, accepted for presentation at Large engineering Systems Conference on Power Engineering LESCOPE-04, pp 162 – 169, July 28-31, 2004, Halifax, Canada.
- [49] Mohamed M. Saied : The Capacitive Coupling Between EHV Lines and Nearby Pipelines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, pp 1225-1231, 2004.
- [50] Hyun.Goo Lee, Tae.Hyun Ha, Yoon. Cheol Ha, Jeong.Hyo Bae , Dae-Kyeong Kim : Analysis of voltages induced by distribution lines on gas pipelines, 2004 International Conference on Power System Technology, Power con 2004, Singapore, Vol. 1, pp 598-601.
- [51] Ghada M. Amer: Novel technique to calculate the effect of electromagnetic field of H.V.T.L. on the metallic pipelines by using EMTP program, cired ,18th International Conference on Electricity Distribution, Turin, 6-9 June 2005.
- [52] Georgios C. Christoforidis, Dimitris P. Labridis, Petros S. Dokopoulos : A Hybrid

- Method for Calculating the Inductive Interference Caused by Faulted Power Lines to Nearby Buried Pipelines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp 1465-1473, 2005.
- [53] Georgios C. Christoforidis, Dimitris P. Labridis, Petros S. Dokopoulos : Inductive Interference on Pipelines Buried in Multilayer Soil Due to Magnetic Fields From Nearby Faulted Power Lines, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 47, No. 2, pp 254-262, 2005.
- [54] S. Al-Alawi, A. Al-Badi and K. Ellithy : An Artificial Neural Network Model for Predicting Gas Pipeline Induced Voltage Caused by Power Lines Under Fault Conditions, Emerald, Vol. 24, No. 1, pp. 69-80, 2005.
- [55] Markovic, D., Smith, V. and Perera, S : Evaluation of Gradient Control Wire and Insulating Joints as Methods of Mitigating Induced Voltages in Gas Pipelines, Proc. AUPEC(1)05, Sept. 2005, Hobart, Australia Paper S01.5 .
- [56] CIGRE/CIREN Joint Working group C4.2.02: AC Corrosion on Metallic Pipelines Due to Interference from AC Power Lines Phenomenon, Modelling and Countermeasures, ELECTRA, No. 225, pp 63-69, 2006.
- [57] 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.
- [58] Leslie Bortels, Johan Deconinck, Calin Munteanu, and Vasile Topa : A General Applicable Model for AC Predictive and Mitigation Techniques for Pipeline Networks Influenced by HV Power Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 21, No. 1, pp 210-217, 2006.
- [59] I. Cotton, K. Kopsidas, Y. Zhang : Comparison of Transient and Power Frequency Induced Voltages on a Pipeline Parallel to an Overhead Transmission Line, IEEE Transactions on Power Delivery, P: 1706 - 1714, Volume: 22, Issue: 3, July 2007.
- [60] B.C Paucar, J. L. Ortiz, J. O. Pinto & P. I. Koltermann: Induced Voltage on Gas Pipeline With Angle Between a Transmission Line, Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, July 2007, Page(s):796 – 800.
- [61] Akihiro Ametani, Yuji Hosakawa: EMTP Simulations and Theoretical Formulation of Induced Voltages to Pipelines from Power Lines, Proc. IPST Conference .2007, Lyon, France.
- [62] Hanafy M. Ismail: Effect of Oil Pipelines Existing in an HVTL Corridor on the Electric-Field Distribution, IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 22, NO. 4, pp.2466-2471, 2007.
- [63] H. Al-Badi, S. M. Ghania, A. H. Kasem, E. F. EL-Saadany: Calculation Of Metallic Conductor Voltage Due To Electromagnetic Coupling Using Neural Fuzzy Modeling,

- 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 5 - 9 December 2007, Bursa – TURKEY, pp. 237-241.
- [64] A. A. Hossam-Eldin, W. Mokhtar: Interference between HV transmission line and nearby pipelines, Power System Conference, 2008. MEPCON 2008. 12th International Middle-East, page(s): 218-223. March 2008.
- [65] Kim Hyoun Su, Rhee, Sang-Bong, YEO, Sang-Min, KIM, Chul-Hwan: An Induced Voltage Calculation Method for Metallic Pipeline in Parallel Distribution Lines, No. P-095, The International Conference on Electrical Engineering, Hong Kong, 19-21 March, 2008.
- [66] D. Stet, D. Micu, A. Ceclan, L. Darabant , M. Plesa: The study of the Electromagnetic Interferences between HV Lines and Metallic Pipelines using a Professional Analysis Software, 2nd International Conference on Modern Power Systems (MPS 2008), November 2008, Cluj-Napoca, Romania.
- [67] B. J. Al-Gahtani: Electromagnetic Interference Caused by a high voltage Transmission network on Buried Pipelines and communication cables, Master of Science (M.S.) degree in Electrical Engineering, King Fahd University of Petroleum & Minerals. January, 2009. Dhahran, Saudi Arabia
- [68] Micu. D.D, Czumbil. L, Ceclan. A, Darabant. L, Stet. D, Christoforidis, G.C: Electromagnetic interferences between HV power lines and metallic pipelines evaluated with neural network technique, International Conference on electrical Power Quality and Utilisation, EPQU 2009. 16617 Sept. 2009, Cluj-Napoca, Romania
- [69] Leslie Bortels , Marius Purcar : Manage pipelines integrity by predicting and mitigating high voltage AC interference,Annales de l'Université d'Oradea,Romania, Fascicule de l'énergétique , Vol. 15 2009.
- [70] Sawma E,Zeitoun B, Harmouche N, Georges S, Hamad M, Slaoui F.H: Electromagnetic induction in pipelines due to overhead high voltage power lines ,International, Conference on Power System Technology (POWERCON), 2010 - Louizae, Lebanon.
- [71] Suad I. Shahl: Electromagnetic Interference Caused by Iraqi 400kV Transmission Lines on Buried Oil Pipelines, Electrical & Electronic Engineering Department, and University of Technology/Baghdad. Eng. & Tech. Journal, Vol. 28, No.24, 2010.
- [72] 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.
- [73] René Braunstein Ernst Schmutzner, Mario Oelz : simulation and optimised reduction of induced pipeline voltages caused by high-voltage lines on inductively interfered pipelines, CIRED, Paper 0014, 21st International Conference on Electricity Distribution. Frankfurt .2011.

- [74] Hui Zhang, George G. Karady, and Jim Hunt: Effect of Various Parameters on the Inductive Induced Voltage and Current on Pipelines, IEEE, Power and Energy Society General Meeting, Page(s):1 - 7 .2011.
- [75] Milesevic, B , Haddad, N: Estimation of current through human body in case of contact with pipeline in the vicinity of a 50 Hz-electrified railway, IEEE, Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), P:877 – 882. 2013.
- [76] H.M.Ismail , Ahmed.M.Amin , Salem Alkhoudary: Comparative study of the effect of HVTL Electrostatic fields on gas pipelines using the ATP-LCC& CSM methods, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2 Issue 9, September – 2013.
- [77] Alessandro Pieretti: Criteria and methods for assessing interference between High-voltage power lines and parallel linear infrastructures, cours de License magistrale en études d'ingénieurs électriques, 2013, université de padoue.
- [78] Dan D. Micu , Georgios C. Christoforidis, Levente Czumbil, :AC interference on pipelines due to double circuit power lines: A detailed study, Electric Power Systems Research, Volume 103, Pages 1–8 , October 2013.
- [79] Yoshinobu Kato: A Charge Simulation Method for the Calculation of Two-dimensional Electrostatic Fields, Memoirs of the Fukui Institute of Technology, japon,(1980).
- [80] Sayed A. Word, Samy M. Ghania, Essam M. Shaalan: Three-Dimensional Electric Field Calculation and Measurements inside High Voltage Substations, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), IEEE, P: 219 - 222, 2011.
- [81] D, Himadri :Implementation of Basic Charge Configurations to Charge Simulation Method for Electric Field Calculations, International journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering (IJAREEIE) Volume 3, Issue May, 2014.
- [82] M. Talaat: Calculation of electro statically induced field in humans subjected to high voltage transmission lines,Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 108, pp. 124– 133, 2014.
- [83] R, Djekidel, D,Mahi :Capacitive Interferences Modeling and Optimization between HV Power Lines and Aerial Pipelines,International Journal of Electrical and Computer Engineering(IJECE).Vol 4, No 4: August 2014.
- [84] R. Djekidel, D. Mahi: Calculation and analysis of inductive coupling effects for HV transmission lines on aerial pipelines, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 90, NR: 9/2014.
- [85] M. Nassereddine J. Rizk A. Hellany M. Nagrial: AC interference study on pipeline: OHEW split factor impacts on the induced voltage, journal of electrical engineering, Vol, 14.Issue 1, P: 132-137.2014.

- [86] Marius Purcar, Calin munteanu, Vasile Topa, Laura Grindei and Adina RACASAN: Actual Stage of the Research Regarding the AC Interferences on Common Corridors, Volume 50, Number 4, 2009, Acta Electrotehnica.
- [87] Sydney Thomas, Richard A. Dawe: Review of ways to transport natural gas energy from countries which do not need the gas for domestic use; Petroleum Engineering Unit, Department of Chemical Engineering, The University of West Indies, St. Augustine, Trinidad and Tobago; 03 January 2002.
- [88] P H Pretorius: Electromagnetic Coupling Between Services, swep, draft report, 10 March 2010.
- [89] R. W. Bonds: The effect of overhead AC power lines paralleling ductile iron pipelines, Dipra publication, Ductile Iron Pipe Research Association, 1997.
- [90] Jose R. Daconti : Electrical Risks in Transmission Line Pipeline Shared Rights of Way, Power Technology, International Symposium on Environmental Concerns in Rights of Way, October 2004.
- [91] Nguyen-Thuy Le, Badoris : Document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS), Protection cathodique, INERIS , janvier 2008
- [92] The Ceacor Booklet: AC corrosion on cathodically protected pipelines, Guidelines for risk assessment and mitigation measures, Proc. of 5th Int. Congress Ceacor, Brussels, May 2000.
- [93] Manual Cathodic protection: Design and Engineering Practice publications, DEP 30.10.73.10-Gen., November 2003.
- [94] R.A. Gummow, S.M. Segall, W. Fieltch : pipeline ac mitigation misconceptions, 20 NACE International, Canada
- [95] Philip D. Simon, PE: Overview of HVAC transmission line interference issues on buried pipelines, NACE International, Publications Division 2010.
- [96] Frédérique coeuille: Revêtements polymères de canalisation de fluide, caractérisation et évolution de l'adhésion en milieu agressif, thèse doctorat, école des mines de paris, Collège doctoral, Juillet 2002.
- [97] Corrosion et protection cathodique, école d'application des techniques gazières, Marec, Tran 1996.2.
- [98] Djamel Bouzidi: Corrosion et protection cathodique des conduites souterraines, école de technologie supérieure, université du Québec, maîtrise en génie concentration en génie de l'environnement, mars 2011.
- [99] Stéphane Gastaud: Influence de l'état du revêtement hydrocarboné sur le risque de corrosion des canalisations enterrées de transport de gaz, thèse doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, décembre 2002.
- [100] IEEE Standards - 80-2000, Guide for safety in AC substation grounding.

- [101] Oubaih. Ghizlane ,ballouk. Soufiane : Etude et dimensionnement de l'appareillage électrique du poste de transformation 225/60/11 kV de Chefchaouen, Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique Casablanca, Rapport de projet de fin d'étude, 2013.
- [102] Dusit Thongjun: Mitigation of AC Induced Voltage On Buried Metallic Pipelines, Managing Director CGL Engineering Co., Ltd. Cathodic Protection System, Thailand. (www.cgl-thailand.com)
- [103] Jurgen Schlabbach: Short Circuit Currents, IET, power and energy, Volume 51, 2005.
- [104] Djekidel.R : Application de la méthode des charges fictives sur l'équipement haute tension pour calcul de champ électrique, Thèse de Magister, université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.
- [105] Amiri Rabie: Calcul et analyse du champ électrique au voisinage d'une ligne haute Tension, Thèse de Magister, université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf,2006.
- [106] Rogti Fatiha: Simulation du champ électrique dans les milieux hétérogènes par la méthode des charges fictives, thèse magister, 2001, Université Amar Telidji Laghouat.
- [107] Gururaj.S. Punekar , et al: Effect of Non Uniformity Factors and Assignment Factors on Errors in Charge Simulation Method with Point Charge Model, World Academy of Science, Engineering and Technology ,Vol 22. 2008.
- [108] S.T. Priyanka, R. Vidya: BBO/DE: A Hybrid Biogeography Based Optimization with Differential Evolution for Congestion Management in Restructured Power Systems ,International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 3, Special Issue 4, May 2014.
- [109] Karishma Mendiratta, Ankush Goyal: Solving Travelling Salesman Problem Using CSP, International Journal of Engineering Science Invention, Volume 3 Issue 5, May 2014 PP.27-29.
- [110] Teodora Rusu, Oana Marlina Gogan, tabou search : Méthode dans la génération assistée sur ordinateur des composés macro moléculaires, scientific study & research , Vol. VII (4) ,Quatrième Colloque Franco-Roumain de Chimie Appliquée, 2006, Clermont-Ferrand, France.
- [111] M. M. Abouelsaad, M.A. Abouelatta, A.R. Salama: Genetic algorithm optimized charge simulation method for electric field modeling of plate-type electrostatic separators, IET Science, Measurement and Technology, the Institution of Engineering and Technology , IET Sci. Meas. Techno, Vol. 7, Iss. 1, pp. 16–22, 2013.
- [112] M.M. Abouelsaad, R. E. Morsi ,A. R. Salama: Optimization of the Method of Fundamental Solution for Computation of Charges and Forces on a Spherical Particle between Two Parallel Plates, Journal of Materials Science and Engineering, Formerly part of Journal of Materials Science and Engineering, B 1,2011.

- [113] Mohamed M. Abouelsaad, Reda E. Morsi, Abdel hadi R. Salama: Improved Optimization of The Charge Simulation Method for Sphere plane Gaps Using Genetic Algorithms, 13 Middle East Power Systems Conference, , Assiut University, December,2009, Egypt.
- [114] M. Talaat: Calculation of electrostatically induced field in humans subjected to high voltage transmission lines, Electric Power Systems Research, Elsevier, 2014.
- [115] Thierry Debu, Lignes aériennes, paramètres électrique, Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique. D 4435
- [116] Jean-Louis Lilien, Transport et Distribution de l'énergie électrique, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2000.
- [117] Safe Grid : Earthing Design Software – Comparison of substation safety criteria, American (IEEE) and European (IEC) Standards, ElectroTechnik Pty Ltd.
- [118] A. Xémard, P. Y. Valentin, B. Bressac, J. Mahseredjian, A. Coutu, G. Joós: Une approche systématique en compatibilité électromagnétique pour l'analyse et la conception des réseaux», C4-205, Session 2004, CIGRE.
- [119] Nasser D. Tleis: Power Systems Modeling and Fault Analysis. Theory and Practice, Elsevier First published 2008.
- [120] Degui Yao, Bing Li, Jun Deng, Danmei Huang and Xihong Wu: Power Frequency Magnetic Field of Heavy Current Transmit Electricity Lines Based on Simulation Current Method, Automation Congress, IEEE, P: 1 - 4, 2008.
- [121] M. Abdel Salam H. Abdallah, M.Th. El Mohandes, H. El-Kishky: Calculation of magnetic fields from electric power transmission lines, Electric Power Systems Research Volume 49, Issue 2, Pages 99–105, March 1999.
- [122] Roshdy Radwan ,Mazen Abdel-Salam, Abdel.Bary. Mahdy , Mohamed Samy: Laboratory Validation of Calculations of Magnetic Field Mitigation Underneath Transmission Lines Using Passive and Active Shield Wires, Innovative Systems Design and Engineering, Vol 2, No 4, 2011.
- [123] CIGRE. WG 36-01, Electric and magnetic fields produced by transmission systems. Description of phenomena - Practical Guide for calculation, Paris 1980.
- [124] Jordi Roger Riba Ruiz, Antonio Garcia Espinosa: Magnetic field generated by sagging conductors of overhead power lines, Computer Applications in Engineering Education, May 2009.
- [125] Transmission Line Reference Book. 345kV and Above (UHV) Second Edition.Electric Power Research Institute, 34 12. Hillview Avenue, Palo Alto, California.
- [126] Pierre Fayet : Modélisation des réseaux électriques ferroviaires alimentés en courant alternatif, thèse doctorat, l'école centrale de Lyon, No d'ordre N° D'ORDRE : 2008-04, Année 2008.

- [127] Open Electrical, Low Frequency Induction Calculation, free online resource for electrical (power systems), <http://www.openelectrical.org>. Open electrical.
- [128] 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.
- [129] 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.
- [130] 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.