

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Kasdi Merbah Ouargla  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **Diplôme de MASTER Académique**

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Électrotechnique

**Spécialité** : Réseaux Électriques

Par :

➤ Guemmou Souhil

➤ Mahboub Madani

On Thème :

**Etude d'optimisation des intensités des champs magnétique à  
proximité des lignes électriques HT**

Soutenu publiquement Le : 16/ 06/ 2025

Devant le jury composé de :

|                 |     |            |             |
|-----------------|-----|------------|-------------|
| Benaouadj Mahdi | MCA | President  | UKM Ouargla |
| Rouibah Tahar   | MCA | Encadreur  | UKM Ouargla |
| Ayad Ahmed      | MCB | Examinator | UKM Ouargla |

Année universitaire 2024/2025





## **Remerciements**

Je tiens à remercier avant tout

**ALLAH**

Qui m'a donné la force et le courage pour terminer mes études et élaborer ce modeste travail.

Un grand merci à mes parents qui croient toujours et inconditionnellement en moi et qui me sont soutenues non seulement spirituellement, mais aussi logistiquement lors de la rédaction de ce mémoire.

Je remercie très sincèrement mon encadreur :

**Dr. Rouibah Tahar**

A tous ceux qui nous ont donnés un coup de main par la communication des connaissances.

Soit par leurs encouragements et leurs conseils qui nous étaient d'une grande utilité pour l'accomplissement de nos tâches dans les meilleures conditions.

## *Dedicace*

Louange à Dieu. Tout d'abord, je rends grâce à Dieu, le Très-Haut, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Je dédie ce mémoire, avec tout l'amour et la reconnaissance qu'il mérite, à ceux qui ont été la lumière de mon chemin :

À mon cher père, **Guemmou Abd Eljabbar**, dont la droiture et la bonté ont toujours été une source d'inspiration pour moi.

À ma tendre mère, **Saoudi Wissam**, qui m'a entouré d'un amour inconditionnel et d'un soutien inébranlable.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **Rouibah Tahar**, mon encadrant, pour sa patience, ses conseils et sa confiance.

Un remerciement tout particulier à mon binôme, mon frère et ami **Mahboub Madani**, avec qui j'ai partagé tous les défis et les réussites de ce travail de fin d'études.

À toutes mes sœurs et à ma famille : **GUEMMOU**.

Enfin, je remercie de tout cœur tous mes amis, pour leur amitié sincère et leur soutien fidèle, tant dans les moments de doute que dans ceux de joie.

**Guemmou Souhil**

## Dédicace

Louange à Dieu. Tout d'abord, je rends grâce à Dieu, le Très-Haut, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Je dédie ce mémoire, avec tout l'amour et la reconnaissance qu'il mérite, à ceux qui ont été la lumière de mon chemin :

À mon cher père, **Mahboub Mouhemmed Elmin**, dont la droiture et la bonté ont toujours été une source d'inspiration pour moi.

À ma tendre mère, qui m'a entouré d'un amour inconditionnel et d'un soutien inébranlable.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **Rouibah Tahar**, mon encadrant, pour sa patience, ses conseils et sa confiance.

Un remerciement tout particulier à mon binôme, mon frère et ami **Guemmou Souhil**, avec qui j'ai partagé tous les défis et les réussites de ce travail de fin d'études.

À toutes mes sœurs et à ma famille : **MAHBOUB**.

Enfin, je remercie de tout cœur tous mes amis, pour leur amitié sincère et leur soutien fidèle, tant dans les moments de doute que dans ceux de joie.

**Mahboub Madani**

## Résumé :

Les lignes de transport d'énergie électrique à haute et très haute tension génèrent des champs électromagnétiques susceptibles d'affecter la santé humaine.

Il devient donc essentiel, lors de la conception des réseaux électriques, de connaître l'intensité de ces champs magnétiques afin de limiter leurs effets néfastes sur l'environnement. L'objectif de notre travail est de proposer une méthode analytique simple, basée sur la théorie des images, pour déterminer le champ magnétique généré par les lignes à haute tension (HT) et très haute tension (THT), en plus d'étudier les caractéristiques spécifiques à ces lignes.

Le champ magnétique  $B$  est directement lié à l'intensité du courant, mais aussi à d'autres paramètres tels que la hauteur des lignes, la distance entre les phases et leur positionnement, qui influencent tous la valeur du champ.

Un programme de simulation a été développé sous MATLAB pour modéliser l'intensité des champs magnétiques à proximité des lignes de transport, en réalisant plusieurs études afin d'obtenir les résultats optimaux pour ce système.

Mots-clés : lignes à très haute tension, champ magnétique, effets du champ magnétique sur l'environnement.

### ملخص:

تولد خطوط نقل الطاقة الكهربائية ذات الجهد العالي والجهد الفائق العالي حقول كهرومغناطيسية يمكن ان تؤثر على البشر

أصبح من الضروري على بناء شبكات الكهربائية معرفة قيمة هذا الحقل المغناطيسي للحد من تأثيراتها الضارة على البيئة

الهدف من عملنا هو تقديم طريقة تحليلية بسيطة ونظرية الصور لتحديد هذا الحقل لخطوط التوتر العالي HT والجهد الفائق العالي THT بالإضافة الى الخصائص التي تميزها. حيث يرتبط المجال المغناطيسي  $B$  ارتباطا مباشرا بشدة التيار كذلك خصائص اخرى كارتفاع الخط وتباعد الاطوار ووضعيتهم كلها تؤثر على هذه القيم

تم تطوير برنامج لمحاكاة شدة الحقول المغناطيسية بالقرب من خطوط النقل باستعمال مبرمج MATLAB من خلال القيام بعدة دراسات للوصول الى النتائج المثالية لهذا النظام

كلمات مفتاحية: خطوط الجهد الفائق العالي، الحقل المغناطيسي، تأثيرات الحقل المغناطيسي على البيئة.

## **Abstract:**

High- and very high-voltage power transmission lines generate electromagnetic fields that may affect human health

Therefore, it is essential, during the design of electrical networks, to determine the intensity of these magnetic fields to minimize their harmful effects on the environment.

The objective of our work is to present a simple analytical method, based on image theory, to determine the magnetic field generated by high voltage (HV) and very high voltage (VHV) lines, as well as to study the specific characteristics of these lines.

The magnetic field  $B$  is directly related to the current intensity, but also to other parameters such as line height, phase spacing, and conductor positioning, all of which influence the value of the field.

A simulation program was developed using MATLAB to model the intensity of magnetic fields near transmission lines, by conducting several studies to achieve optimal results for this system.

**Keywords:** very high voltage lines, magnetic field, effects of magnetic field on the environment.

## **Table De Matières**



---

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Remerciements.....                                                                    | ii  |
| Dedicace .....                                                                        | iii |
| Résumé : .....                                                                        | v   |
| Table de Figure .....                                                                 | ix  |
| Introduction Generale .....                                                           | 1   |
| Chapitre I Fondements théoriques des champs magnétiques des lignes haute Tension..... | 2   |
| I.1 Introduction .....                                                                | 4   |
| I.2 Description des réseaux électriques .....                                         | 4   |
| I.3 Réseaux de transport et de transmission .....                                     | 5   |
| I.3.1 Les lignes électriques HT .....                                                 | 5   |
| I.3.2 Les réseaux de transport MT .....                                               | 5   |
| I.3.3 Le réseau de distribution BT .....                                              | 5   |
| I.4 Caractéristiques des lignes haute tension .....                                   | 6   |
| I.5 Sources de champs électromagnétiques .....                                        | 6   |
| I.5.1 Source naturelle.....                                                           | 6   |
| I.5.2 Sources d'origine artificielle .....                                            | 7   |
| I.6 Comportement des champs magnétiques dans différents milieux .....                 | 8   |
| I.7 Comportement physique des champs magnétiques en courant alternatif .....          | 8   |
| I.7.1 Nature oscillatoire et représentation complexe.....                             | 9   |
| I.7.2 Phénomènes d'induction .....                                                    | 10  |
| I.7.3 Atténuation et propagation dans l'environnement.....                            | 10  |
| I.8 Exposition aux champs électromagnétiques.....                                     | 10  |
| I.8.1 Facteurs influençant l'exposition.....                                          | 11  |
| I.8.2 Effets du champ magnétique sur le corps humain.....                             | 12  |
| I.9 Normes et réglementations .....                                                   | 12  |
| I.10 Conclusion.....                                                                  | 13  |

|                                                                                      |                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| <i>Chapitre II Calcul Du Champ Magnétique.....</i>                                   | <i>14</i>                          |
| II.1 Introduction .....                                                              | 15                                 |
| II.2 Principes fondamentaux de l'électromagnétisme.....                              | 15                                 |
| II.2.1 Les équations de Maxwell .....                                                | 15                                 |
| II.2.2 La loi de Biot-Savart .....                                                   | 16                                 |
| II.3 Champ magnétique généré par une ligne de transmission.....                      | 17                                 |
| II.4 Méthode de calcul du Champ magnétique .....                                     | 19                                 |
| II.4.1 Champ magnétique généré par un seul conducteur.....                           | 19                                 |
| II.5 Champ magnétique généré par une ligne de transmission triphasée.....            | 21                                 |
| II.6 Effet de flèche .....                                                           | 23                                 |
| II.6.1 Introduction.....                                                             | 23                                 |
| II.6.2 Simplification de la géométrie de la ligne électrique aérienne.....           | 24                                 |
| II.7 Conclusion.....                                                                 | 25                                 |
| <i>Chapitre III Applications et résultats.....</i>                                   | <i>26</i>                          |
| III.1 Introduction .....                                                             | 27                                 |
| III.2 Champ magnétique au voisinage d'une ligne électrique à haute tension .....     | 27                                 |
| III.3 Mesures expérimentales du champ magnétique autour des lignes électriques ..... | 32                                 |
| III.3.1 Description de l'appareil de mesure du champ magnétique.....                 | 32                                 |
| III.3.2 Objectif et caractéristiques .....                                           | 33                                 |
| III.3.3 IIIEtude expérimentaux du champ magnétique .....                             | 33                                 |
| III.4 Conclusion.....                                                                | 40                                 |
| REFERENCES.....                                                                      | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |

---

## Table de Figure

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I-1: Schéma d'un réseau électriques[2].                                                                                                      | 4  |
| Figure I-2: Ligne de transport THT et HT[3]                                                                                                         | 5  |
| Figure I-3: Champ électromagnétique terrestre assimi [5]                                                                                            | 7  |
| Figure I-4: Différentes sources des champs électromagnétiques.                                                                                      | 8  |
| Figure I-5: Effets sur le corps humain des champs[8]                                                                                                | 11 |
| Figure I-6: Influence du champ magnétique sur la sante[9].                                                                                          | 12 |
| Figure II-1: Loi de Biot-Savart                                                                                                                     | 16 |
| Figure II-2: Champ magnétique généré par un conducteur                                                                                              | 18 |
| Figure II-3: Règle de main droite pour la direction du champ magnétique provenant d'un conducteur porteur de courant.                               | 18 |
| Figure II-4: Intensité magnétique engendré par un courant circulant dans un conducteur unique                                                       | 19 |
| Figure II-5: Intensité magnétique engendré par un système de courant triphasé                                                                       | 22 |
| Figure II-6: Conducteurs des lignes aériennes entre pylônes.                                                                                        | 24 |
| Figure II-7: Les dimensions d'une ligne électrique aérienne.                                                                                        | 24 |
| Figure III-1: Disposition des conducteurs de ligne de transmission                                                                                  | 27 |
| Figure III-2: Profil latéral de la distribution de l'induction magnétique à 1 mètre au-dessus du sol sous une ligne de transmission aérienne 220kV. | 28 |
| Figure III-3: Variation de la composante $B_y$ du champ magnétique.                                                                                 | 29 |
| Figure III-4: Variation du champ magnétique $B_t$ .                                                                                                 | 29 |
| Figure III-5: Intensité du champ magnétique en fonction des différentes valeurs du courant de charge circulant dans les conducteurs de phase.       | 30 |
| Figure III-6: Variation spatiale en 3D de la composante $B_y$ du champ magnétique                                                                   | 31 |

## Table de Figures

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III-7: Variation spatiale en 3D du champ magnétique total et de sa composante $B_y$ .....                              | 31 |
| Figure III-8: Champ magnétique autour des trois conducteurs de phase .....                                                    | 32 |
| Figure III-9: PHYWE Teslameter, digital.....                                                                                  | 33 |
| Figure III-10: Tronçon de ligne à haute tension 220 kV.....                                                                   | 34 |
| Figure III-11: Mesure du champ magnétique au voisinage des lignes électriques. aériennes 220kV à l'aide d'un Teslamètre. .... | 35 |
| Figure III-12: Induction magnétique en fonction de l'intensité du courant 77A .....                                           | 36 |
| Figure III-13: Induction magnétique en fonction de l'intensité du courant 82A .....                                           | 36 |
| Figure III-14: Induction magnétique en fonction de l'intensité du courant 91A .....                                           | 37 |
| Figure III-15: Induction magnétique en fonction de l'intensité du courant 77A .....                                           | 37 |
| Figure III-16: Induction magnétique en fonction de l'intensité du courant 82A .....                                           | 38 |
| Figure III-17: Induction magnétique en fonction de l'intensité du courant 93A .....                                           | 38 |
| Figure III-18: Induction magnétique pour $h=1m$ . ....                                                                        | 39 |
| Figure III-19: Induction magnétique pour $h=2m$ .....                                                                         | 39 |

## Introduction Generale

L'énergie électrique joue un rôle clé dans la stimulation et le soutien de la croissance économique et de la qualité de vie. La forte augmentation de la demande d'électricité est due à la croissance démographique et économique. L'électricité est transportée par des lignes de transmission d'énergie haute et très haute tension (HT et THT), qui génèrent des champs électromagnétiques qui rayonnent autour d'elles. Ces champs peuvent influencer notre vie quotidienne. Depuis plus de 30 ans, il y a eu des recherches approfondies sur les effets de l'exposition aux champs électromagnétiques générés par les lignes de transmission d'énergie électrique.

Ces études sont caractérisées par la diversité des méthodes utilisées pour caractériser ces champs et la définition de leurs mécanismes de couplage avec les tissus biologiques et l'équipement électrique. Cette étude vise donc à analyser et modéliser la distribution du champ magnétique dans le voisinage des lignes de transmission haute tension. En combinant des approches théoriques et des simulations numériques, il vise à fournir une compréhension approfondie des champs magnétiques générés et à proposer des recommandations pour minimiser les expositions indésirables. Un programme MATLAB est développé pour modéliser et visualiser la distribution spatiale du champ magnétique à proximité des lignes de transport THT au moyen de la méthode analytique et de la théorie des images de conducteurs. Notre thèse de master est organisée en trois chapitres comme suit : Dans le premier chapitre, nous présentons les lignes THT qui sont utilisées dans la transmission d'énergie électrique et ses paramètres importants tels que : Les cônes utilisés en HV et THT, Champs magnétiques des lignes THT, Effet de champ magnétique élevé sur l'environnement, ... etc. Dans le deuxième chapitre, nous présentons la méthode de calcul du champ magnétique ou mon conducteur et des 3 conducteurs générés par les lignes THT. Pour le troisième chapitre, est une application de ce qui a été présenté dans le chapitre II, sur les lignes THT de deux cas différents (simple pilote et 3 pilotes I les lignes THT. Pour le troisième chapitre, est une application de ce qui a été présenté dans le chapitre II, sur les lignes THT de deux cas différents (seul conducteur et

# **Chapitre I**

## **Fondements théoriques des champs magnétiques des lignes haute Tension**



## I.1 Introduction

L'électricité à très haute tension est principalement transportée par des lignes aériennes, bien que des câbles souterrains soient et parfois utilisés, notamment à proximité des zones urbaines. Ce transport débute par des postes de transformation élévateurs, qui permettent d'augmenter la tension avant l'acheminement vers les différentes zones de distribution.

Dans ce premier chapitre, nous présentons un ensemble de définitions essentielles à la compréhension du réseau électrique, en abordant ses principales structures, ses différents types et niveaux de tension, ainsi que les diverses catégories de lignes aériennes.

Nous y définissons les lignes de transport d'énergie haute tension (HT) et très haute tension (THT), identifiées comme des sources de rayonnement électromagnétique.

Enfin, nous introduisons les notions fondamentales relatives aux champs électromagnétiques, en mettant l'accent sur le cas particulier du rayonnement émis par les lignes HT et THT dans le domaine des basses fréquences.

## I.2 Description des réseaux électriques

Un réseau électrique est un système d'infrastructures énergétiques plus ou moins accessibles qui permettent de transmettre l'énergie électrique des sources de production aux consommateurs d'électricité. Il est constitué de câbles électriques utilisés à des niveaux de tension variés, mis entre eux en liaison par des postes électriques. Les postes électriques, grâce aux transformateurs, permettent de distribuer l'électricité et de la faire passer d'un niveau de tension à un autre. Il est indispensable aussi que le réseau électrique garantisse une gestion dynamique de l'ensemble production, du transport et de consommation, en établissant des réglages destinés à assurer la stabilité de l'ensemble[1] :

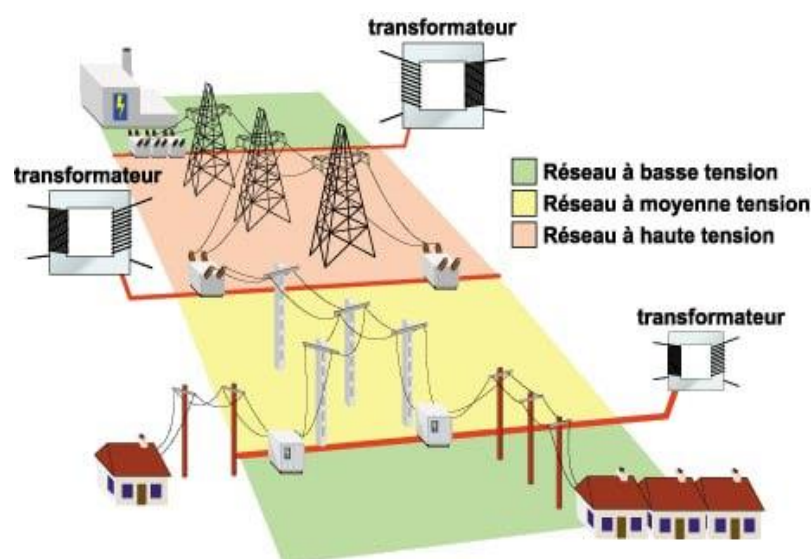


Figure I-1: Schéma d'un réseau électriques[2].



### I.3 Réseaux de transport et de transmission

Les réseaux de transport assurent l'acheminement de l'énergie électrique depuis les sites de production jusqu'aux postes de distribution, en utilisant des niveaux de tension très élevés, typiquement 220 kV ou 400 kV, afin de limiter les pertes.

#### I.3.1 Les lignes électriques HT

Ces lignes sont constituées de 3 phases. Chaque phase peut être formée d'un faisceau de plusieurs conducteurs espacés de quelques décimètres rendant ainsi le transport de l'énergie plus facile.

L'avantage du triphasé est que la somme des tensions et la somme des courants sur l'ensemble des trois phases est égale à zéro. Ceci a pour effet de réduire le champ électrique et magnétique au départ des phases.



**Figure I-2:** Ligne de transport THT et HT[3]

#### I.3.2 Les réseaux de transport MT

Les réseaux de transport MT (haute tension moyenne) sont des réseaux électriques qui fonctionnent sous une tension moyenne, généralement entre 1 kV (kilovolt) et 36 kV. Ces réseaux sont utilisés pour transporter l'électricité des centrales électriques ou des stations de transformation vers les sous-stations ou les zones résidentielles et industrielles nécessitant une tension inférieure à celle du réseau haute tension[4].

#### I.3.3 Le réseau de distribution BT

Le réseau de distribution BT (réseau de distribution à basse tension). En effet, les réseaux de distribution à basse tension constituent la dernière étape de la chaîne de distribution de l'électricité, assurant la livraison de l'électricité aux consommateurs finaux de manière sécurisée et efficace.

## **I.4 Caractéristiques des lignes haute tension**

Les lignes haute tension (HT) constituent des infrastructures essentielles pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances. Sur le plan structurel, les lignes haute tension reposent sur des pylônes métalliques ou des poteaux en béton. Les conducteurs, généralement en aluminium ou en cuivre renforcé d'acier, sont disposés en faisceau pour limiter les pertes par effet de couronne. Des isolateurs en verre, céramique ou composite maintiennent les conducteurs à distance des pylônes pour garantir l'isolation électrique.

Les lignes haute tension sont associées à plusieurs phénomènes physiques, notamment l'effet de couronne, qui se traduit par l'ionisation de l'air autour des conducteurs, provoquant des pertes et des interférences radio. À haute fréquence, le phénomène d'effet de peau concentre le courant sur la périphérie du conducteur, augmentant ainsi sa résistance apparente.

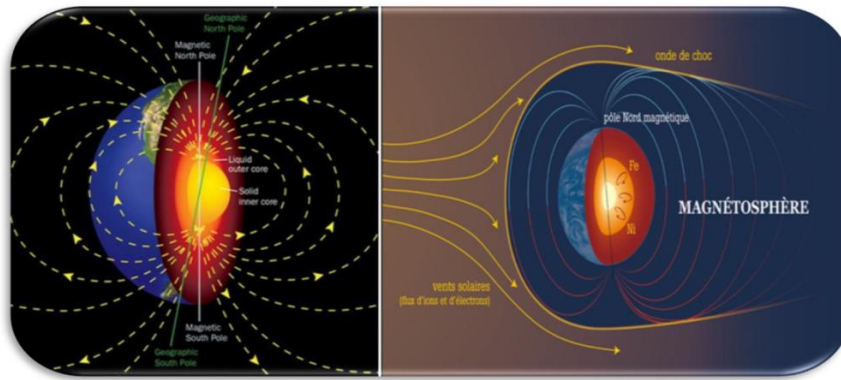
En matière de sécurité, les lignes haute tension sont soumises à des réglementations strictes. Les distances de sécurité minimales garantissent une exposition réduite aux champs électromagnétiques, et une zone de servitude est maintenue autour des lignes pour empêcher les constructions. Les pylônes et câbles de garde sont également mis à la terre pour se prémunir contre les surtensions et la foudre.

## **I.5 Sources de champs électromagnétiques**

Les champs électromagnétiques (CEM) proviennent de diverses sources, naturelles et artificielles.

### **I.5.1 Source naturelle**

Les sources naturelles incluent principalement le champ magnétique terrestre, qui résulte de l'activité du noyau terrestre en fusion et dont l'intensité atteint environ 50  $\mu\text{T}$  à la surface. Les orages produisent des champs électromagnétiques transitoires, principalement sous forme d'ondes électromagnétiques dans le domaine des très basses fréquences (ELF, de 3 à 30 Hz). Ces champs résultent des décharges électriques rapides, comme les éclairs, tandis que le rayonnement solaire émet un large spectre d'ondes électromagnétiques, notamment des rayons ultraviolets (UV), des rayons X et gamma. Ces ondes atteignent la Terre en fonction de l'activité solaire et des conditions atmosphériques.



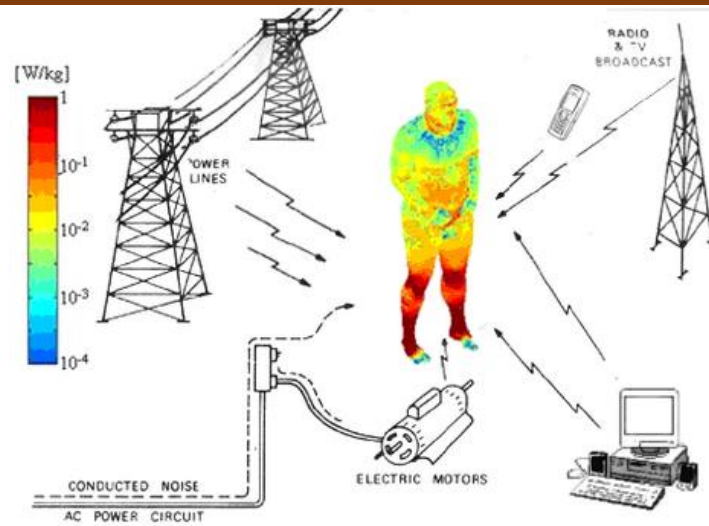
**Figure I-3:** Champ électromagnétique terrestre assimi [5]

### I.5.2 Sources d'origine artificielle

Les sources artificielles sont majoritairement liées aux activités humaines. Les installations électriques, comme les lignes haute tension et les transformateurs, produisent des champs magnétiques alternatifs (50/60 Hz), particulièrement intenses à proximité des lignes de 220 kV ou 400 kV. De même, de nombreux appareils électroménagers émettent des champs électriques et magnétiques de basse fréquence.

Les télécommunications et les technologies sans fil représentent également des sources importantes de CEM. Les antennes de téléphonie mobile, les réseaux Wi-Fi et Bluetooth, ainsi que les stations de radio et de télévision, génèrent des ondes dans les bandes UHF, micro-ondes et FM. À cela s'ajoutent les dispositifs industriels et médicaux, tels que les IRM, les équipements de soudage à haute fréquence et les fours à micro-ondes, qui produisent des champs électromagnétiques dans des bandes de fréquences spécifiques.

Enfin, les infrastructures de transport, notamment les trains électriques, les métros et les véhicules électriques ou hybrides, génèrent également des CEM, principalement lors du fonctionnement des moteurs et des systèmes de recharge [6, 7].



**Figure I-4:** Différentes sources des champs électromagnétiques.

## I.6 Comportement des champs magnétiques dans différents milieux

Le comportement des champs magnétiques dépend fortement des propriétés magnétiques des milieux qu'ils traversent. Ces variations influencent à la fois l'intensité, la direction et la distribution du champ, en fonction de la perméabilité magnétique et de la conductivité du matériau.

- **Dans le vide ou l'air :** Le champ magnétique se propage sans atténuation significative.
- **Dans les matériaux ferromagnétiques :** Ces matériaux concentrent les lignes de champ, amplifiant ainsi l'intensité du champ magnétique.
- **Dans les matériaux conducteurs :** Les champs magnétiques variables induisent des courants de Foucault qui, à leur tour, génèrent des champs magnétiques opposés, limitant la pénétration du champ initial.
- **Dans le sol :** La présence du sol, avec sa conductivité électrique non nulle, influence la distribution des champs magnétiques autour des lignes haute tension. Ce phénomène sera modélisé par la méthode des images de Carson, abordée dans le chapitre 2.

## I.7 Comportement physique des champs magnétiques en courant alternatif

Dans les réseaux électriques fonctionnant en courant alternatif, les courants varient de manière sinusoïdale au cours du temps, avec une fréquence généralement fixée à 50 Hz ou 60 Hz. Cette variation périodique engendre des propriétés particulières du champ magnétique associé. Le champ magnétique produit par les lignes à haute tension en courant alternatif présente ainsi des caractéristiques spécifiques, directement liées à la nature fluctuante du courant qui les alimente.

Cette section est consacrée à l'étude des propriétés fondamentales et du comportement des champs magnétiques en régime alternatif, en mettant en évidence les phénomènes physiques qui en découlent.

### I.7.1 Nature oscillatoire et représentation complexe

Les caractéristiques des lignes haute tension sont généralement des systèmes triphasés où circulent trois courants déphasés de  $120^\circ$  entre eux :

$$\begin{cases} I_A(t) = I_A \cos(\omega t) \\ I_B(t) = I_B \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ I_C(t) = I_C \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (I.1)$$

Cette configuration triphasée génère un champ magnétique résultant qui présente des propriétés remarquables :

- Le champ magnétique total est la superposition vectorielle des champs produits par chaque phase
- Dans un système parfaitement équilibré avec des conducteurs disposés symétriquement, le champ résultant a tendance à tourner dans l'espace autour de l'axe de la ligne
- L'amplitude du champ magnétique résultant reste relativement constante dans le temps, contrairement au cas monophasé
- Le champ magnétique oscille à la même fréquence que le courant qui le génère.
- Dans un système triphasé, les courants sont déphasés de  $120^\circ$  entre eux, créant des champs magnétiques également déphasés.

### Effet de peau et de proximité

À la fréquence industrielle (50-60 Hz), deux phénomènes affectent la distribution du courant dans les conducteurs :

- **Effet de peau** : Le courant a tendance à se concentrer à la périphérie du conducteur, augmentant sa résistance effective et modifiant légèrement la distribution spatiale du champ magnétique.
- **Effet de proximité** : La présence de conducteurs adjacents perturbe la distribution du courant dans chaque conducteur, accentuant l'asymétrie de la distribution du champ.

## I.7.2 Phénomènes d'induction

Le caractère variable du champ magnétique induit plusieurs phénomènes électromagnétiques :

- **Auto-induction** : La variation du courant dans un conducteur génère une force électromotrice (f.é.m.) qui s'oppose à cette variation selon la loi de Lenz
- **Induction mutuelle** : Le champ variable d'un conducteur induit une f.é.m. dans les conducteurs voisins
- **Induction dans les structures métalliques** : Les pylônes et autres éléments métalliques à proximité sont le siège de courants induits (courants de Foucault)
- **Induction dans le sol** : Des courants se développent dans le sol, modifiant la distribution du champ magnétique

## I.7.3 Atténuation et propagation dans l'environnement

Le champ magnétique en courant alternatif présente des caractéristiques de propagation spécifiques :

1. **Décroissance spatiale** : En première approximation, l'intensité du champ décroît inversement proportionnellement à la distance au conducteur ( $1/r$ )
2. **Pénétration dans les matériaux** : La profondeur de pénétration  $\delta$  dans un matériau conducteur est donnée par :  $\delta = \sqrt{2/\omega * \mu * \sigma}$  où  $\mu$  est la perméabilité magnétique et  $\sigma$  la conductivité électrique du matériau
3. **Effet de blindage** : Les matériaux conducteurs peuvent atténuer le champ magnétique par création de courants induits qui génèrent un champ opposé
4. **Interférence constructive et destructive** : Les contributions des différentes phases peuvent se renforcer ou s'annuler selon les positions spatiales, créant des zones de champ fort et faible

La compréhension de ces principes est essentielle pour l'analyse et la modélisation des champs magnétiques autour des lignes haute tension 220 kV, particulièrement pour l'application des méthodes de calcul qui seront développées dans le chapitre suivant.

## I.8 Exposition aux champs électromagnétiques

L'exposition aux champs électromagnétiques (CEM) est un phénomène courant dans notre environnement moderne, en raison de la présence de multiples sources naturelles et artificielles. Les

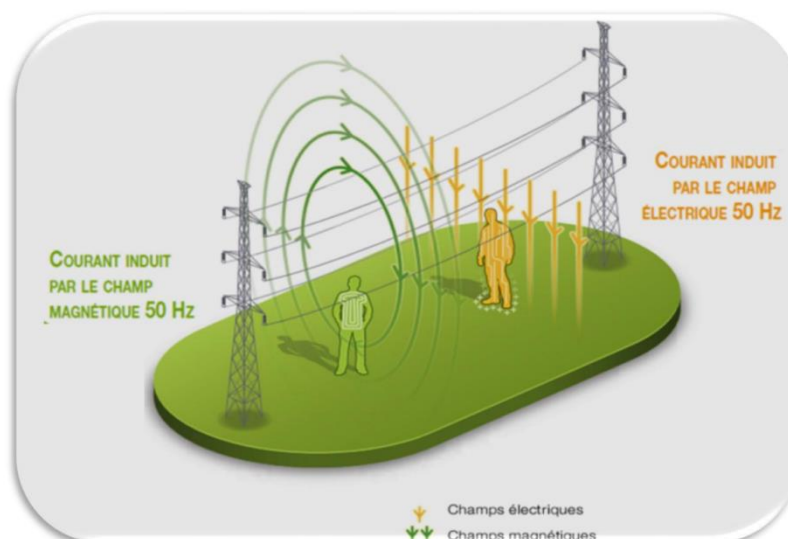
CEM sont générés par des dispositifs électriques, des infrastructures de télécommunication et des lignes haute tension, ainsi que par des sources naturelles comme le champ magnétique terrestre et les phénomènes atmosphériques. L'exposition aux CEM peut être classée en deux grandes catégories :

- **Exposition professionnelle :** Concerne les travailleurs exposés régulièrement aux CEM dans le cadre de leur activité, notamment dans les secteurs de l'énergie, des télécommunications ou de l'industrie.
- **Exposition du grand public :** Provient principalement des dispositifs domestiques (Wi-Fi, électroménager), des antennes de téléphonie mobile et des lignes électriques à proximité des habitations.

### I.8.1 Facteurs influençant l'exposition

Plusieurs facteurs déterminent le niveau d'exposition aux CEM :

- **Distance par rapport à la source :** L'intensité diminue rapidement avec l'éloignement.
- **Fréquence du champ :** Les champs de basse fréquence (50 Hz pour les lignes HT) ont un impact différent des radiofréquences (Wi-Fi, téléphonie mobile).
- **Puissance de la source :** Les équipements industriels génèrent souvent des CEM plus intenses que les dispositifs domestiques.

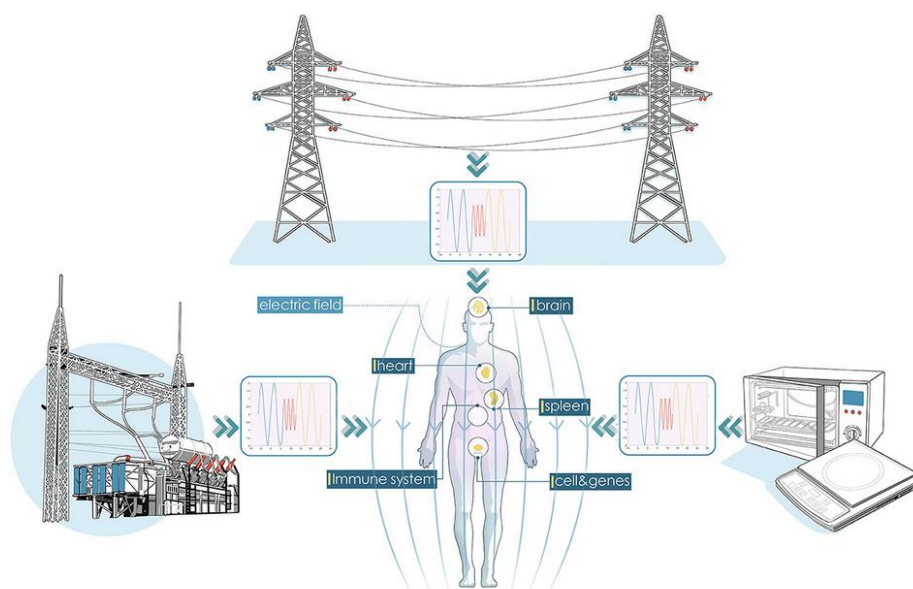


**Figure I-5:** Effets sur le corps humain des champs[8]



## I.8.2 Effets du champ magnétique sur le corps humain

Les champs électriques et magnétiques peuvent avoir des effets sur le corps humain, et de nombreuses études scientifiques sont en cours pour évaluer leurs éventuelles répercussions sur la santé. L'impact des CEM sur la santé dépend de la fréquence et de l'intensité du champ ainsi que de la durée d'exposition. Les champs magnétiques basse fréquence peuvent induire des courants électriques dans les tissus biologiques, tandis que les ondes à haute fréquence (comme les micro-ondes) peuvent chauffer les tissus. Lorsqu'un champ externe est appliqué, il induit des courants électriques dans le corps : les champs électriques génèrent des courants principalement à la périphérie, tandis que les champs magnétiques induisent des courants dans l'ensemble du corps. La répartition de ces courants dans les tissus biologiques dépend essentiellement de leurs propriétés, notamment de la conductivité électrique, qui détermine leur capacité à conduire le courant [9, 10].



**Figure I-6:** Influence du champ magnétique sur la sante[9].

Les recommandations internationales, comme celles de la Commission Internationale de Protection contre les Rayonnements Non Ionisants (ICNIRP), fixent des limites d'exposition pour réduire les risques sanitaires, notamment les effets thermiques et les potentiels effets biologiques à long terme.

## I.9 Normes et réglementations

Les normes internationales encadrent les niveaux d'exposition pour protéger à la fois les travailleurs et le grand public. Par exemple, pour les champs magnétiques à 50 Hz, la limite recommandée est de 200  $\mu\text{T}$  pour le public et de 1 000  $\mu\text{T}$  pour les travailleurs. Ces normes varient selon les pays, mais elles sont généralement basées sur les recommandations de l'ICNIRP et les directives européennes.



En résumé, l'exposition aux CEM est une réalité du monde moderne. Bien que les effets sur la santé fassent encore l'objet de recherches, les réglementations actuelles visent à minimiser les risques par l'adoption de seuils de sécurité adaptés aux différents contextes d'exposition [11, 12, 9].

## **I.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue d'ensemble des réseaux électriques. Nous avons commencé par leur description générale, leur classification, leurs principales fonctions, ainsi que les différents composants qui les constituent.

Par la suite, nous avons abordé le phénomène électromagnétique lié à la proximité des lignes aériennes à très haute tension (THT) destinées au transport de l'électricité.

# **Chapitre II**

## **Calcul Du Champ Magnétique**

## II.1 Introduction

Les lignes électriques à très haute tension (THT) génèrent des champs magnétiques intenses susceptibles d'entraîner des effets nuisibles sur l'environnement, en particulier sur les objets situés à proximité. Dans ce deuxième chapitre, après une brève présentation des équations de Maxwell et des conditions de passage, nous exposons la méthode de calcul du champ magnétique en régime basse fréquence.

## II.2 Principes fondamentaux de l'électromagnétisme

Dans l'environnement des lignes électriques aériennes, les champs magnétiques proviennent principalement des courants électriques circulant dans les conducteurs, ainsi que des courants induits dans le sol et dans les objets proches. Le calcul de ces champs, qui varient dans le temps, repose sur les équations de Maxwell. Ces champs étant généralement couplés, la résolution de ces équations est indispensable pour les caractériser précisément.

### II.2.1 Les équations de Maxwell

Au cœur de l'électromagnétisme se trouvent les équations de Maxwell, formulées au XIX<sup>e</sup> siècle par James Clerk Maxwell. Ces quatre équations fondamentales décrivent complètement les interactions entre champs électriques et magnétiques en tout point P (x, y, z) de l'espace. Les variations en fonction du temps s'expriment par la dérivée partielle par rapport au temps, les variations en fonction des coordonnées d'espace s'expriment par l'intermédiaire des opérateurs différentiels : rotationnel et divergence.

#### 1. Loi de Gauss pour l'électricité :

$$\nabla \cdot E = \rho / \epsilon_0 \quad (\text{II.1})$$

Cette équation relie le flux du champ électrique E à la densité de charge  $\rho$ , où  $\epsilon_0$  représente la permittivité du vide.

#### 2. Loi de Gauss pour le magnétisme :

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{II.2})$$

Cette relation exprime l'absence de monopôles magnétiques, indiquant que les lignes de champ magnétique B forment toujours des boucles fermées.

### 3. Loi de Faraday-Lenz :

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad (\text{II.3})$$

Cette équation décrit comment un champ magnétique variable dans le temps induit un champ électrique.

### 4. Loi d'Ampère-Maxwell :

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \partial E / \partial t$$

Cette relation montre comment un courant électrique  $J$  et un champ électrique variable dans le temps génèrent un champ magnétique, où  $\mu_0$  désigne la perméabilité magnétique du vide.

## II.2.2 La loi de Biot-Savart

Pour le calcul des champs magnétiques générés par des courants électriques, la loi de Biot-Savart revêt une importance particulière. Cette loi, formulée par Jean-Baptiste Biot et Félix Savart en 1820, permet de déterminer le champ magnétique créé par un élément de courant :

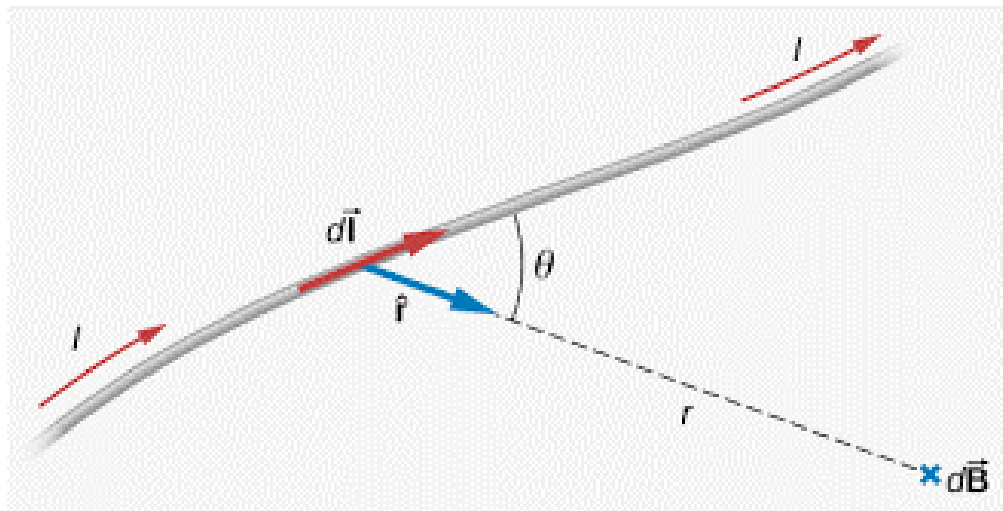


Figure II-1: Loi de Biot-Savart

$$dB = (\mu_0 / 4\pi) \times (Idl \times r) / r^2 \quad (\text{II.5})$$

où :

- $dB$  est la contribution élémentaire au champ magnétique
- $\mu_0$  est la perméabilité magnétique du vide ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m)
- $I$  est l'intensité du courant
- $dl$  est un élément infinitésimal du conducteur
- $\hat{r}$  est le vecteur unitaire dirigé de l'élément de courant vers le point d'observation
- $r$  est la distance entre l'élément de courant et le point d'observation

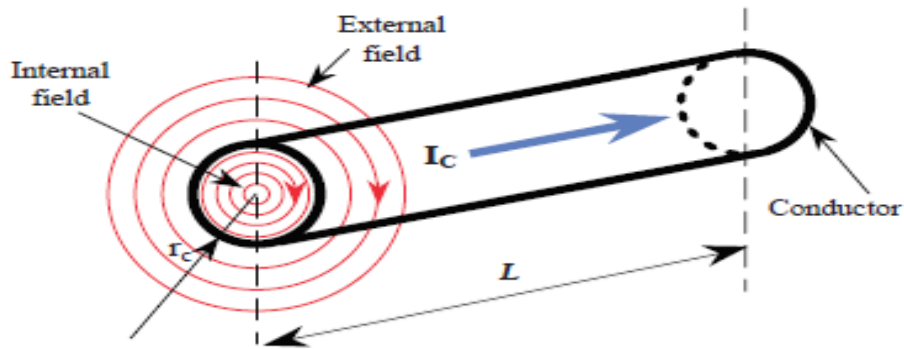
Pour un conducteur rectiligne infini parcouru par un courant  $I$ , le champ magnétique à une distance  $d$  s'exprime par

$$B = (\mu_0 I)/(2\pi d) \quad (\text{II.6})$$

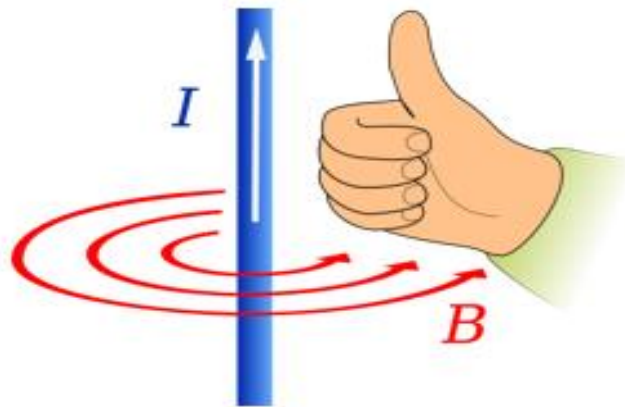
Cette formule sera particulièrement utile dans le contexte des lignes haute tension, où les conducteurs peuvent souvent être modélisés comme des fils rectilignes.

### II.3 Champ magnétique généré par une ligne de transmission

Le passage d'un courant électrique dans un conducteur génère un champ magnétique à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de celui-ci. Lorsque le conducteur est long, droit, rond et isolé, les lignes de flux magnétique qui en résultent prennent la forme de cercles concentriques autour du conducteur. La **Figure II.2** illustre la répartition du champ magnétique dans et autour du conducteur. La direction de ce champ peut être déterminée à l'aide de la **règle de la main droite**, représentée sur la **Figure II.2**. Selon cette règle, si le pouce de la main droite indique le sens du courant, alors les doigts repliés autour du conducteur montrent la direction du champ magnétique. Par exemple, comme montré sur la **Figure II.3**, le champ s'enroule dans le sens des aiguilles d'une montre autour du conducteur [288].



**Figure II-2:** Champ magnétique généré par un conducteur



**Figure II-3:** Règle de main droite pour la direction du champ magnétique provenant d'un conducteur porteur de courant

L'intensité du champ magnétique est directement proportionnelle au courant électrique. Les champs magnétiques générés par les courants alternatifs, qui varient dans le temps en fonction de la fréquence du système, suscitent certaines préoccupations, bien que leur amplitude reste largement inférieure à celle du champ magnétique terrestre.

Dans le cadre de l'évaluation de l'impact environnemental du transport d'énergie, il est courant d'estimer le champ magnétique à environ un mètre au-dessus du sol. En effet, les personnes circulant ou travaillant à proximité de la ligne sont exposées à ce champ externe. La relation entre le champ magnétique et le courant qui le génère est décrite par la loi d'Ampère, également connue comme la première équation de Maxwell. Cette loi stipule que l'intégrale du vecteur d'intensité du champ magnétique le long d'un chemin fermé est égale à la somme des courants traversant la surface délimitée par ce chemin. La forme intégrale de cette loi s'écrit :

$$\sum I_i = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (\text{II.7})$$

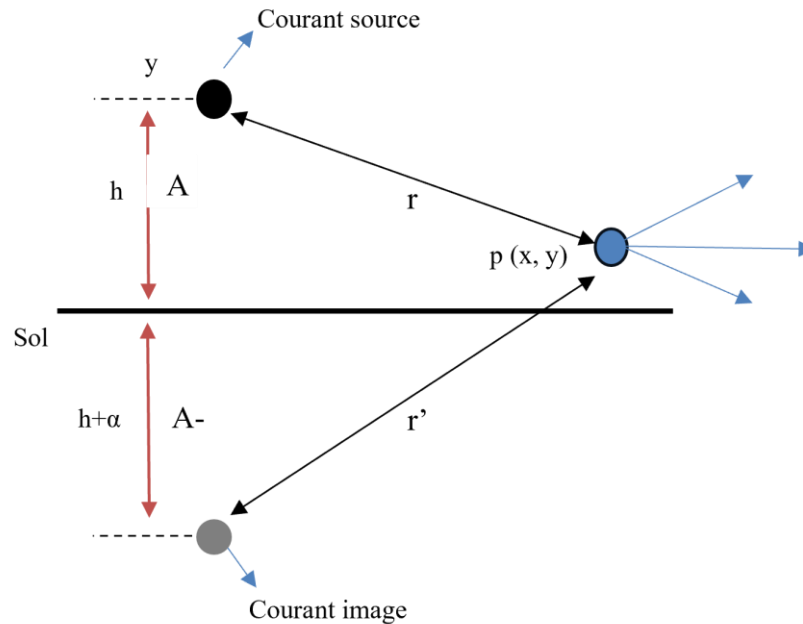
$\vec{H}$  : est le vecteur d'intensité du champ magnétique mesuré en (A/m)

$I_i$  : est les courants qui génèrent le champ

$\vec{dl}$  : est le vecteur de longueur de trajet élémentaire et  $\vec{H} \cdot \vec{dl}$  est un produit scalaire.

## II.4 Méthode de calcul du Champ magnétique

### II.4.1 Champ magnétique généré par un seul conducteur



**Figure II-4:** Intensité magnétique engendré par un courant circulant dans un conducteur unique

Un courant électrique d'intensité ( $I$ ) au point  $(x_i, y_i)$ , crée au point  $p (x, y)$  de l'espace un champ magnétique d'induction magnétique est défini par la relation :

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \quad (\text{II. 8})$$

Pour calculer le champ magnétique généré par une ligne électrique, on peut utiliser la théorie des images appliquée aux conducteurs, en tenant compte de la profondeur de pénétration électromagnétique. Le champ magnétique alternatif produit par la ligne induit des courants de retour dans le sol. Ces courants, à leur tour, génèrent un champ magnétique secondaire qui vient se superposer au champ initial produit par la ligne.

Un calcul précis de ce champ nécessite le recours à la méthode de Gerson, fondée sur la prise en compte explicite des courants de retour dans le sol. Cette méthode suppose l'existence d'un plan fictif de retour de courant, parallèle à la surface du sol, placé à une profondeur complexe notée  $\alpha$ ,

correspondant à la profondeur de pénétration. Comme illustré à la Figure II.3 [16], cette profondeur est définie par la relation suivante :

$$\alpha = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu_0 \cdot f}} \cdot e^{-j\frac{\pi}{4}} \quad (\text{II.9})$$

$\alpha$  : La profondeur de pénétration

$f$  : La résistivité électrique du sol ( $\Omega \cdot m$ )

$\rho$  : la fréquence en Hz

Le champ magnétique généré autour d'un conducteur rectiligne est constitué de lignes de champ circulaires centrées sur le conducteur. À un point d'observation arbitraire situé à l'extérieur du conducteur, le vecteur du champ magnétique  $\vec{H}$

$$H(x, y) = \frac{I}{2\pi r} = \frac{I_c}{2\pi \sqrt{(x-x_c)^2 - (y-y_c)^2}} \quad (\text{II.10})$$

avec :  $r = \sqrt{(x-x_c)^2 - (y-y_c)^2}$

$I_c$  : est le courant conducteur

$x_c, y_c$  : sont les coordonnées du point central du conducteur

$x, y$  : sont les coordonnées d'un point d'observation

$r$  : la distance entre le point d'observation et le point central du conducteur

Le vecteur  $\vec{H}$  est dirigé tangentiellement à la ligne de champ, dans un plan perpendiculaire au conducteur, selon la règle de la main droite.

À partir du point d'observation, les composantes x et y du champ magnétique sont :

$$H_{x \text{ real}}(x, y) = \frac{I_c}{2\pi r} = I_c \frac{y-y_c}{2\pi \sqrt{(x-x_c)^2 - (y-y_c)^2}} \quad (\text{II.11})$$

$$H_{y \text{ real}}(x, y) = \frac{I_c}{2\pi r} = I_c \frac{x-x_c}{2\pi \sqrt{(x-x_c)^2 - (y-y_c)^2}} \quad (\text{II.12})$$

Pour l'image de conducteur, le courant  $I_c$  (dont le sens est l'inverse à celui de conducteur) alors ce courant crée au point P le champ  $H_{x \text{ imag}}, H_{y \text{ imag}}$



$$H_{x\text{ imag}}(x, y) = \frac{I_c}{2\pi r} = I_c \frac{y+y_c+\alpha}{2\pi\sqrt{(x-x_c)^2-(y+y_c+\alpha)^2}} \quad (\text{II.13})$$

$$H_{y\text{ imag}}(x, y) = -\frac{I_c}{2\pi r} = -I_c \frac{x-x_c}{2\pi\sqrt{(x-x_c)^2-(y+y_c+\alpha)^2}} \quad (\text{II.14})$$

où  $\hat{i}$  et  $\hat{j}$  sont les vecteurs unitaires dans les directions  $x$  et  $y$ , respectivement. Le correspondant la grandeur du champ total est :

$$H(x, y) = (H_{x\text{ real}}(x, y) + H_{x\text{ imag}}(x, y))\hat{i} + (H_{y\text{ real}}(x, y) + H_{y\text{ imag}}(x, y))\hat{j} \quad (\text{II.15})$$

$$|H(x, y)| = \sqrt{(H_{x\text{ real}}(x, y) + H_{x\text{ imag}}(x, y))^2 + (H_{y\text{ real}}(x, y) + H_{y\text{ imag}}(x, y))^2} \quad (\text{II.16})$$

La densité de flux magnétique ( $B$ ) est :

$$B(x, y) = \mu_0 |H(x, y)| \quad (\text{II.17})$$

## II.5 Champ magnétique généré par une ligne de transmission triphasée

Une ligne de transmission triphasée transporte trois courants alternatifs déphasés de  $120^\circ$ , chacun circulant dans un conducteur distinct. Chaque conducteur génère un champ magnétique qui varie dans le temps, proportionnel à l'intensité du courant. Le champ magnétique total en un point donné de l'espace est obtenu en sommant vectoriellement les contributions individuelles des trois phases.

Le champ magnétique produit par une phase à un point d'observation dépend de la distance entre ce point et le conducteur, selon la relation :

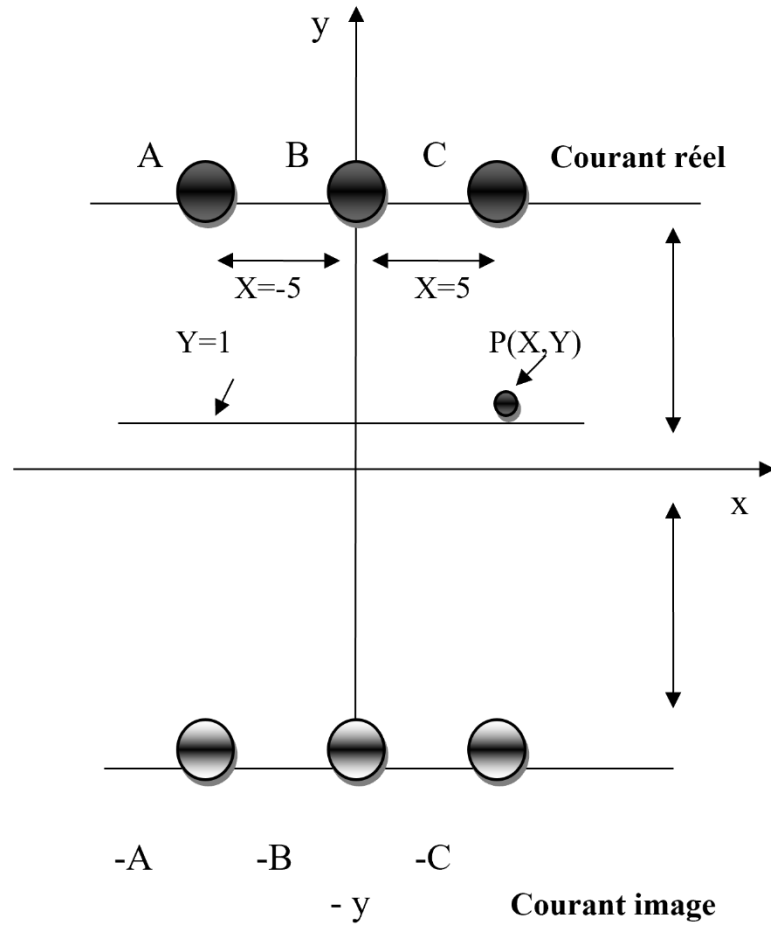
$$H = \frac{I_i}{2\pi r_i} \quad (\text{II.18})$$

où  $I$  est le courant instantané dans la phase  $i$ , et  $r$  est la distance entre le conducteur  $i$  et le point d'observation.

L'intensité totale du champ ( $H_T$ ) est la somme des vecteurs de champ magnétique générés par les trois phases ( $H_A, H_B, H_C$ ) :

$$\vec{H}_T = \vec{H}_a + \vec{H}_b + \vec{H}_c \quad (\text{II.19})$$

La modélisation précise du champ magnétique d'une ligne triphasée nécessite de connaître la géométrie exacte de la ligne, les intensités instantanées des courants, et la position du point d'observation.



**Figure II-5:** Intensité magnétique engendré par un système de courant triphasé

Le vecteur de champ magnétique total ( $H_T$ ) est calculé en déterminant d'abord les composantes de champ magnétique dans les directions  $x$  et  $y$  ( $H_x$  et  $H_y$ ) de chacun des conducteurs de phase. Les résultats individuels pour les trois conducteurs de phase sont :

$$H_{Ax}(x, y) = I_A \frac{y-y_A}{2\pi\sqrt{(x-x_A)^2-(y-y_A)^2}} + I_A \frac{y+y_A+\alpha}{2\pi\sqrt{(x-x_A)^2-(y+y_A+\alpha)^2}} \quad (\text{II.20})$$

$$H_{Bx}(x, y) = I_B \frac{y-y_B}{2\pi\sqrt{(x-x_B)^2-(y-y_B)^2}} + I_B \frac{y+y_B+\alpha}{2\pi\sqrt{(x-x_B)^2-(y+y_B+\alpha)^2}} \quad (\text{II.21})$$

$$H_{Cx}(x, y) = I_C \frac{y-y_C}{2\pi\sqrt{(x-x_C)^2-(y-y_C)^2}} + I_C \frac{y+y_C+\alpha}{2\pi\sqrt{(x-x_C)^2-(y+y_C+\alpha)^2}} \quad (\text{II.22})$$

$$H_{Ay}(x, y) = I_A \frac{x-x_A}{2\pi\sqrt{(x-x_A)^2-(y-y_A)^2}} + -I_A \frac{x-x_A}{2\pi\sqrt{(x-x_A)^2-(y+y_A+\alpha)^2}} \quad (\text{II.23})$$

$$H_{By}(x, y) = I_B \frac{x-x_B}{2\pi\sqrt{(x-x_B)^2-(y-y_B)^2}} + -I_B \frac{x-x_B}{2\pi\sqrt{(x-x_B)^2-(y+y_B+\alpha)^2}} \quad (\text{II.24})$$

$$H_{cy}(x, y) = I_c \frac{x-x_c}{2\pi\sqrt{(x-x_c)^2-(y-y_c)^2}} + -I_c \frac{x-x_c}{2\pi\sqrt{(x-x_c)^2-(y+y_c+\alpha)^2}} \quad (\text{II.25})$$

où  $\hat{i}$  et  $\hat{j}$  sont les vecteurs unitaires dans les directions  $x$  et  $y$ , respectivement. Le correspondant

la grandeur du champ total est :

$$H_x(x, y) = H_{Ax}(x, y) + H_{Bx}(x, y) + H_{Cx}(x, y) \quad (\text{II.26})$$

$$H_y(x, y) = H_{Ay}(x, y) + H_{By}(x, y) + H_{Cy}(x, y) \quad (\text{II.27})$$

$$|H_T(x, y)| = \sqrt{(H_x(x, y))^2 + (H_y(x, y))^2} \quad (\text{II.28})$$

Pour la densité de flux magnétique total ( $B_T$ ) des trois conducteurs est :

$$B_T(x, y) = \mu_0 \cdot |H_T(x, y)| \quad (\text{II.29})$$

Comme l'augmentation continue de population humaine et avec la tendance de se concentrer dans les grandes villes, à créer une demande sans précédent de l'énergie électrique et accéléré la concentration des lignes de transport HT près où sur les zones très peuplées.

## II.6 Effet de flèche

### II.6.1 Introduction

Les influences des champs magnétiques produits par les équipements à haute tension tel que les lignes aériennes THT sur l'environnement sont bien connues et analysées dans plusieurs travaux de recherche. L'évaluation précise des champs électriques est très importante. Il devient un souci important dans les dernières années. Les méthodes comportent en principe le calcul analytique, ainsi que le calcul numérique. La plus part de travaux de calcul et mesure des champs magnétiques créés par les lignes de transmission d'énergie électrique, supposent que les lignes sont horizontales, droites et parallèles à un sol plat, et le fléchissement dû au poids de la ligne est négligé [17].



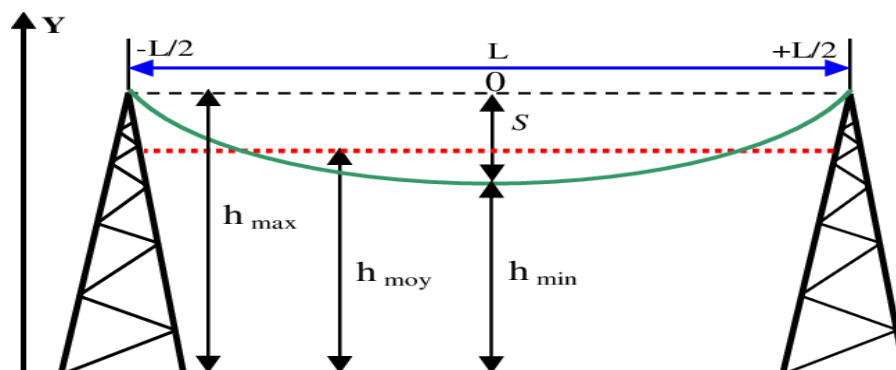
**Figure II-6:** Conducteurs des lignes aériennes entre pylônes.

Il est connu que le champ magnétique généré par une ligne électrique dans l'espace dépend de plusieurs paramètres. Parmi ces paramètres la hauteur des conducteurs par rapport au sol. L'effet de flèche désigne la distribution verticale du champ magnétique sous une ligne de transmission aérienne, en forme de flèche inversée.

Sous une ligne haute tension alimentée en courant alternatif, les conducteurs génèrent un champ magnétique dont l'intensité varie en fonction de la hauteur par rapport au sol. Le champ est généralement maximal à une certaine hauteur au-dessus du sol, puis diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers le haut ou vers le bas.

### II.6.2 Simplification de la géométrie de la ligne électrique aérienne

La forme géométrique la plus précise d'un conducteur suspendu entre deux pylônes peut être déterminée en fonction des paramètres clés tels que la distance entre les points de suspension, la flèche maximale  $S$ , la hauteur minimale  $m_{in}$  au milieu de la portée, et la hauteur maximale  $m_{ax}$  au niveau du pied du pylône. Le centre de gravité du conducteur se situe à la mi-portée entre les pylônes, comme illustré sur la Figure II.7.



**Figure II-7:** Les dimensions d'une ligne électrique aérienne.

où :

$S$  : la flèche de la ligne ;

$L$  : la longueur de la portée de la ligne ;

$h_{min}$  : la hauteur minimal (au niveau de la flèche) ;

$h_{max}$  : la hauteur maximal (au voisinage du pylône),

$h_{moy}$  : la hauteur moyenne.

Pour des questions de facilité, on suppose souvent que la courbe d'équilibre d'un conducteur est une parabole, l'équation de cette parabole est :

$$h = h_{min} + S \cdot \left( \frac{2 \cdot z}{L} \right)^2 \quad (\text{II.30})$$

Certains calculs supposent que les lignes sont horizontales, droites et parallèles à un sol plat, et le fléchissement dû au poids de la ligne est négligé. On introduit en tenant en compte une hauteur moyenne entre la hauteur maximale et la hauteur minimale de la ligne. La hauteur moyenne d'une ligne est définie par la relation suivante : [17]

$$h_{moy} = h_{max} = S - (2 / 3) \quad (\text{II.31})$$

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, un code de calcul a été développé afin d'estimer le champ magnétique au niveau du sol. En utilisant la méthode des images, il a été possible de déterminer les composantes verticale et horizontale du champ magnétique  $\vec{H}$ , puis d'en déduire les valeurs de l'induction magnétique  $\vec{B}$  aussi bien pour un conducteur isolé que pour une ligne triphasée THT. Les expressions obtenues montrent que le champ magnétique est directement proportionnel au courant de phase. Des observations complémentaires seront présentées dans le chapitre suivant à la suite de l'implémentation et de l'analyse des résultats sous MATLAB.

# **Chapitre III**

## **Applications et résultats**

### III.1 Introduction

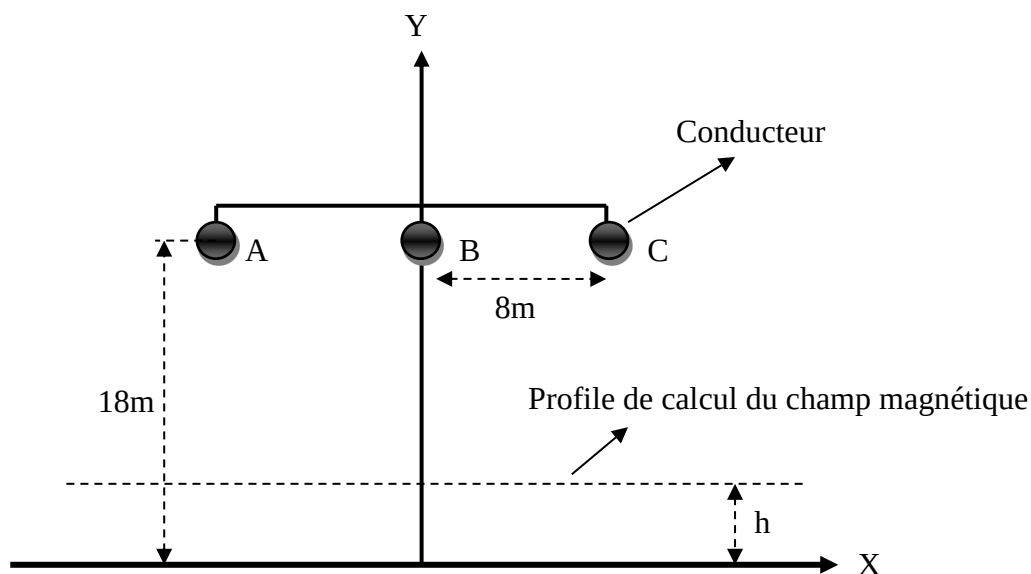
Il existe plusieurs méthodes numériques et analytiques pour la simulation du champ magnétique et plusieurs logiciels ont été développés à cet effet, afin de faciliter aux chercheurs la simulation et le calcul des champs magnétiques.

Dans ce chapitre, nous procéderons à la mesure et le calcul du champ magnétique aux voisinages des lignes de transport très haute tension (THT). Le calcul se fait à l'aide de méthode analytique et le mesure à l'aide d'un Teslametre.

### III.2 Champ magnétique au voisinage d'une ligne électrique à haute tension

On considère une ligne électrique aérienne triphasée à haute tension 220 kV. chaque phase de la ligne ( $L_A$ ,  $L_B$ ,  $L_C$ ) contient un seul conducteur, disposée en configuration horizontale à circuit simple, parallèle au sol plat. Le rayon d'un conducteur est de 1,16 cm. Les conducteurs de phase sont placés dans un même plan horizontal, c'est-à-dire à la même hauteur au-dessus du sol, configuration couramment utilisée pour le transport de l'énergie électrique à haute tension.

Les conducteurs de phase sont situés à une hauteur de 18 mètres par rapport au sol, avec un espacement de 5 mètres entre chaque phase, comme illustrées dans la Figure III.1.



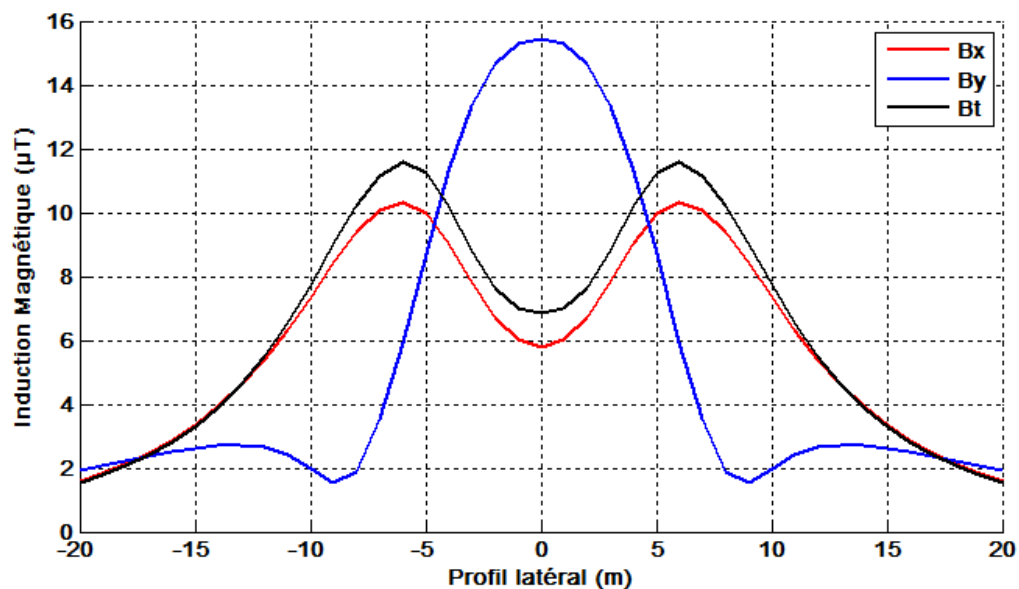
**Figure III-1:** Disposition des conducteurs de ligne de transmission

Pour le cas étudié de la ligne électrique, on considère un système équilibré, dans lequel les courants circulant dans les conducteurs de phase sont symétriques et déphasés régulièrement de  $120^\circ$ . L'intensité du courant dans chaque phase est fixée à  $I = 1500 \text{ A}$ , tandis que le courant dans le câble de garde est nul ( $I_g = 0$ ). La résistivité du sol est supposée constante, avec une valeur de  $100 \Omega \cdot \text{m}$ , et la fréquence de  $50 \text{ Hz}$ . Ces paramètres sont utilisés pour le calcul numérique de la densité de flux magnétique. Dans cette étude, les courants dans les conducteurs de phase sont considérés symétriques sont :

$$I_A = 79 \text{ A}, I_B = I_A \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}, I_C = I_A \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

La distribution latérale du champ magnétique dépend fortement de la configuration spatiale des phases. Sous la ligne de transmission, certaines configurations de phases peuvent produire un champ magnétique maximal. Il est toutefois possible de réduire l'intensité du champ magnétique, que ce soit directement sous la ligne ou à proximité, en modifiant l'ordre ou la disposition des phases.

Dans ce cas, la simulation de l'intensité du champ magnétique a permis d'obtenir les résultats présentés ci-dessous.



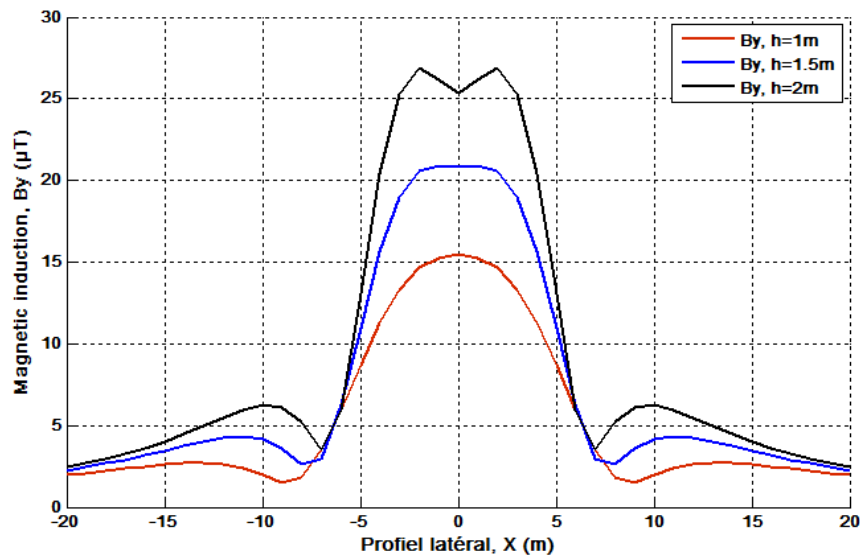
**Figure III-2:** Profil latéral de la distribution de l'induction magnétique à 1 mètre au-dessus du sol sous une ligne de transmission aérienne 220kV.

La Figure III.2 illustre la courbe du profil latéral de la répartition des composantes horizontale, verticale et totale du champ magnétique ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_t$ ) à une hauteur  $h=1$  mètre au-dessus du sol, à proximité d'une ligne électrique aérienne triphasée à haute tension. Ces composantes sont

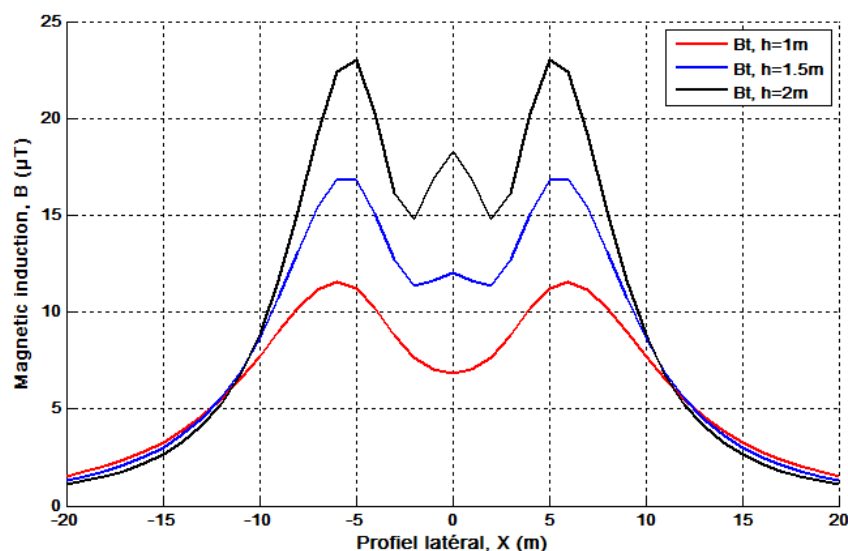


représentées en fonction de la distance latérale par rapport à l'axe de la ligne, selon les résultats de la simulation numérique.

On observe très clairement que l'intensité du champ magnétique augmente de manière symétrique et continue de part et d'autre de la ligne de transmission, en configuration horizontale simple à circuit unique. Au-delà d'une certaine distance latérale, le champ magnétique décroît rapidement, ce qui met en évidence la forte dépendance spatiale du champ magnétique vis-à-vis de la position par rapport à la ligne.



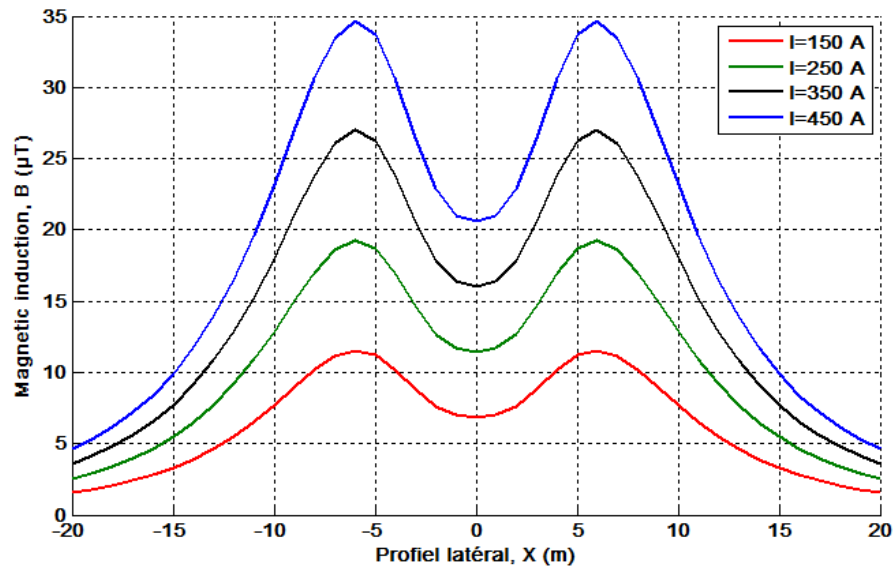
**Figure III-3:** Variation de la composante  $B_y$  du champ magnétique.



**Figure III-4:** Variation du champ magnétique  $B_t$ .

Les deux figures III.3 et III.4 illustrent les variations du champ magnétique mesuré à des hauteurs  $h=1$  m,  $1.5$  m et  $2$  m au-dessus du sol pour une ligne de transport d'électricité haute tension

de 220 kV. On observe que l'intensité du champ magnétique augmente avec la hauteur, atteignant un maximum à proximité des conducteurs de phase. Lorsque l'on s'éloigne latéralement de l'axe de la ligne, à une distance supérieure à  $\pm 20$  m, le champ devient très faible, voire négligeable. Ces résultats confirment que le champ magnétique est principalement concentré autour des conducteurs.

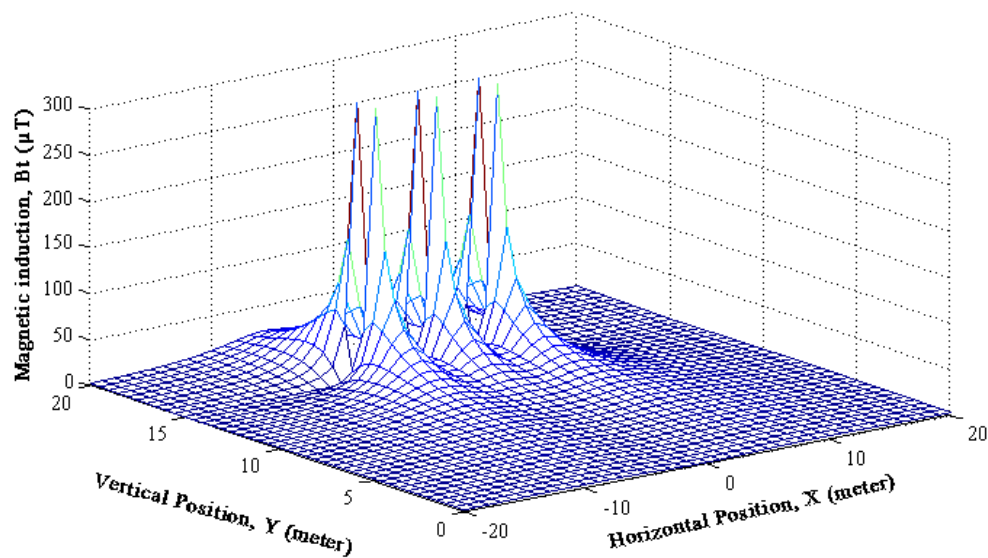


**Figure III-5:** Intensité du champ magnétique en fonction des différentes valeurs du courant de charge circulant dans les conducteurs de phase.

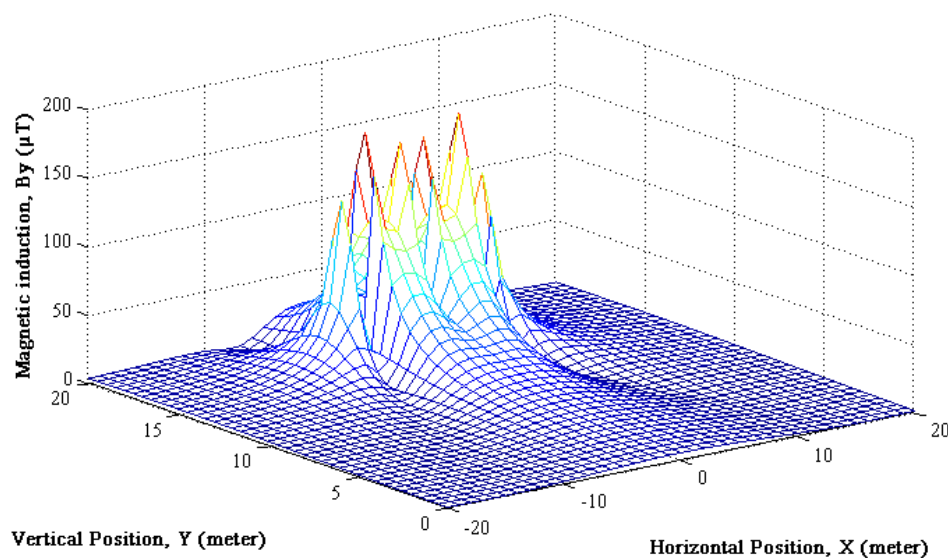
La Figure III-5 illustre la relation entre l'intensité du champ magnétique et le courant électrique circulant dans les conducteurs de phase. Elle présente le profil latéral de la distribution de l'induction magnétique à une hauteur de 1 m au-dessus du sol, pour différentes valeurs de courant de charge :  $I = 150, 250, 350$  et  $450$  A.

Il apparaît clairement que les valeurs maximales de l'induction magnétique correspondant à ces intensités de courant sont respectivement de  $11.57 \mu\text{T}$ ,  $19.28 \mu\text{T}$ ,  $26.99 \mu\text{T}$  et  $34.71 \mu\text{T}$ . On remarque également que la courbe est symétrique de part et d'autre de la ligne à simple circuit. À mesure que l'intensité du courant augmente, le champ magnétique s'intensifie, atteignant une valeur maximale sous le conducteur de phase central, puis décroît rapidement avec l'augmentation de la distance latérale, atteignant des valeurs minimales loin du centre de la ligne.

Ainsi, l'induction magnétique maximale, de  $34.71 \mu\text{T}$ , est observée pour un courant de 450 A, tandis que la valeur minimale, de  $11.57 \mu\text{T}$ , correspond à un courant de 150 A, dans toute la zone de passage de la ligne de transport. Ces résultats mettent en évidence une relation linéaire significative entre l'induction magnétique et l'intensité du courant circulant dans les conducteurs.

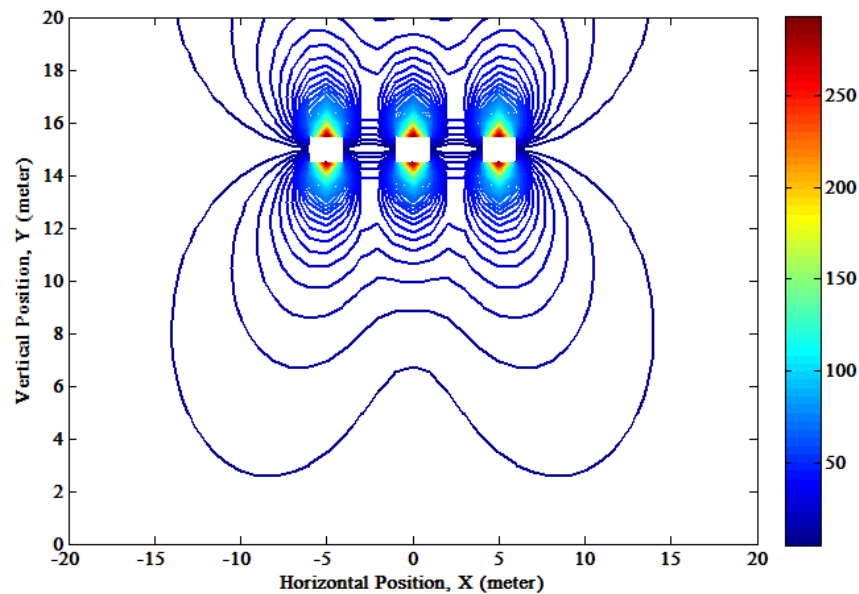


**Figure III-6:** Variation spatiale en 3D de la composante  $B_y$  du champ magnétique



**Figure III-7:** Variation spatiale en 3D du champ magnétique total et de sa composante  $B_y$

La figure III.6 et III.7 présente la variation tridimensionnelle du champ magnétique total  $B_t$  ainsi que de sa composante  $B_y$  le long d'un profil situé à une hauteur de 1 mètre au-dessus du sol, pour une ligne de transmission de longueur  $L=200$  m. On y observe que le champ magnétique atteint sa valeur maximale au centre, au niveau de la flèche, avec un pic de  $B_{\max}=250 \mu\text{T}$ , puis décroît progressivement à mesure que l'on s'éloigne des conducteurs.



**Figure III-8:** Champ magnétique autour des trois conducteurs de phase

La figure III.8 représente les lignes de champ magnétique générées autour des conducteurs d'un réseau triphasé. Il est clairement visible que l'intensité du champ magnétique devient plus élevée à proximité immédiate des conducteurs.

### III.3 Mesures expérimentales du champ magnétique autour des lignes électriques

Les mesures expérimentales du champ magnétique autour des lignes électriques ont pour objectif d'évaluer l'intensité du magnétique générés par les lignes à haute tension, afin de vérifier leur conformité avec les normes d'exposition et d'analyser les éventuels impacts sur la santé et l'environnement. Ces mesures sont généralement réalisées à différentes distances latérales par rapport à la ligne et à une hauteur d'environ 1 à 2 mètre du sol. La mesure du champ magnétique, se fait à l'aide d'un **Gaussmètre / Teslamètre 8030** avec une sonde 3D externe a été utilisé. Cet instrument permet de mesurer les champs magnétiques sur une large plage de valeurs, en fonction de la sonde connectée.

#### III.3.1 Description de l'appareil de mesure du champ magnétique

Les essais expérimentaux ont été réalisés à l'aide d'un appareil de mesure du champ magnétique de type Teslamètre PHYWE, adapté aussi bien aux champs magnétiques alternatifs que continus. L'appareil est équipé d'une sonde à effet Hall tangentielle, permettant une détection précise de l'intensité du champ. La sonde utilisée porte la référence 13610.93 et le numéro de série 220500173701, avec une sensibilité de 10  $\mu\text{T}$ , garantissant une bonne résolution des mesures même à faibles intensités. Une illustration de cet appareil est présentée à la figure III.10.

Lors de la mesure, la **sonde 3D Z0A83-3208-10-T** a été utilisée. Elle permet la mesure de l'induction magnétique dans la plage de 0 à 1 T. Le capteur fonctionne selon le principe de l'effet Hall, ce qui implique certaines spécificités à prendre en compte pendant la mesure.



**Figure III-9:** PHYWE Teslameter, digital

### III.3.2 Objectif et caractéristiques

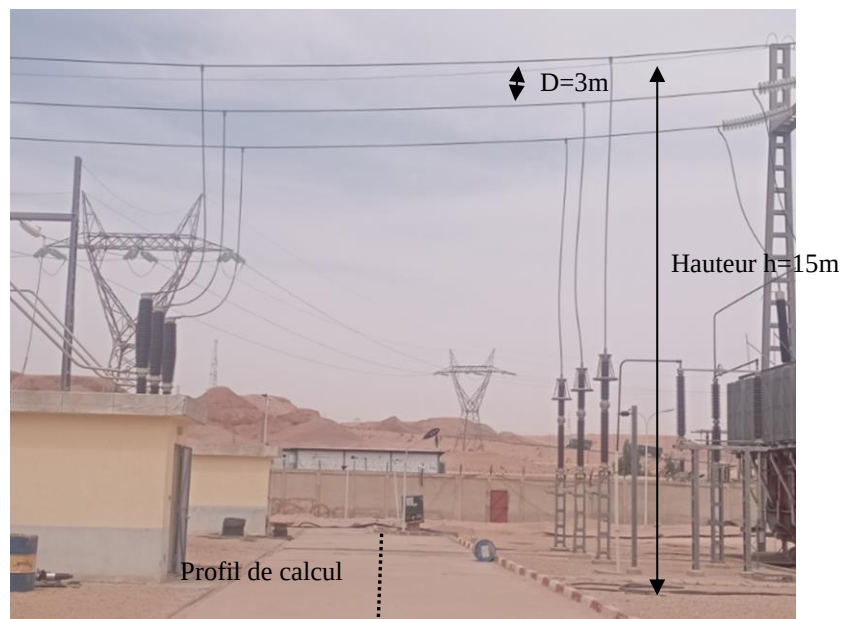
Le Teslamètre est un appareil conçu pour mesurer avec précision la densité de flux magnétique, également appelée induction magnétique  $B$ . Pour son fonctionnement, il nécessite l'utilisation d'au moins une sonde à effet Hall, disponible séparément. Deux types de sondes sont proposés. La première, la **sonde axiale** (réf. 13610-01), est spécialement conçue pour mesurer les champs magnétiques orientés selon l'axe de sa tige. Grâce à sa longueur de 30 cm, elle est particulièrement adaptée aux mesures à l'intérieur des bobines, même au centre de structures longues. La seconde, la **sonde tangentielle** (réf. 13610-02), est conçue pour détecter les champs perpendiculaires à l'axe de la tige. Elle se distingue par sa forme fine et plate, idéale pour les mesures dans des zones étroites telles que des entrefers allant jusqu'à environ 1 mm [].

### III.3.3 Etude expérimentaux du champ magnétique

Dans cette partie, notre objectif est d'évaluer la densité de flux magnétique à proximité d'une ligne électrique aérienne haute tension 220 kV sur site, nous avons mené une étude expérimentale pour surveiller les courants électriques et quantifier le champ magnétique à l'aide d'un Teslamètre. L'étude a été menée au sein du centre régional de la GRTE (Société Algérienne de Gestion du Réseau de

Transport de l'Électricité), situé sur la route nationale RN n°49, entre Ouargla et Ghardaïa, à proximité de la cité Ennasr.

La figure III.1 illustre également un tronçon de ligne à haute tension 220 kV situé à l'entrée du transformateur de puissance 220/63/10 kV, au voisinage duquel les mesures du champ magnétique ont été réalisées.



**Figure III-10:** Tronçon de ligne à haute tension 220 kV

La figures III.10 présentent les résultats expérimentaux des mesures du champ magnétique à proximité de lignes électriques aériennes haut tension 220 kV, effectuées à l'aide d'un teslamètre pour différentes intensités de courant circulant dans les conducteurs. Les relevés ont été réalisés en plusieurs points spécifiques, choisis en fonction de variations notables du courant électrique. Par exemple, pour des intensités de 78 A et 79 A, les valeurs mesurées de l'induction magnétique sont respectivement de 0,31 mT et 0,48 mT. Ces données mettent en évidence une relation directe et proportionnelle entre l'intensité du courant et la valeur du champ magnétique généré.





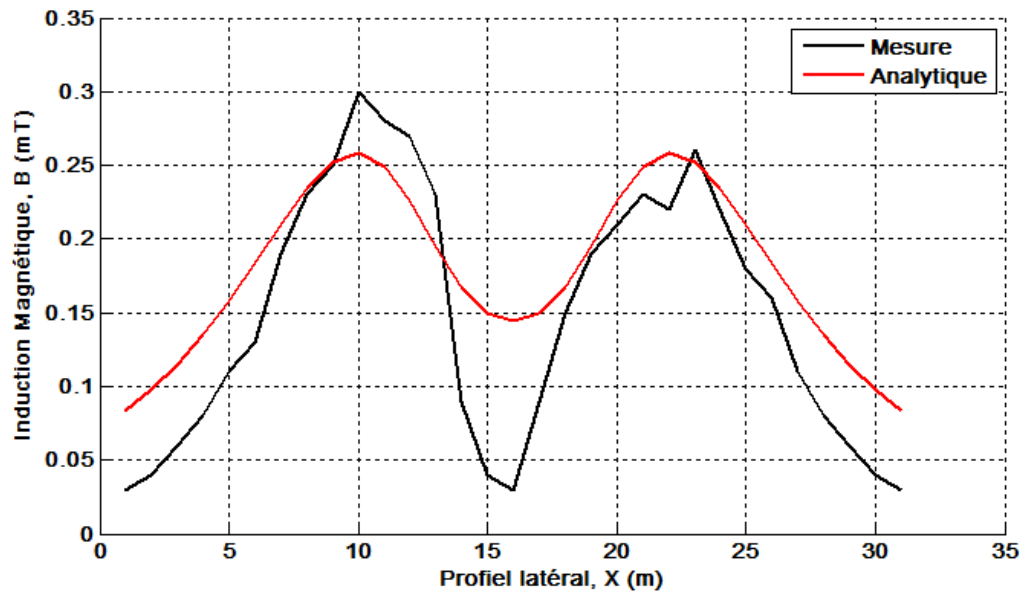
a- Un courant électrique 77A

b- Un courant électrique 91A

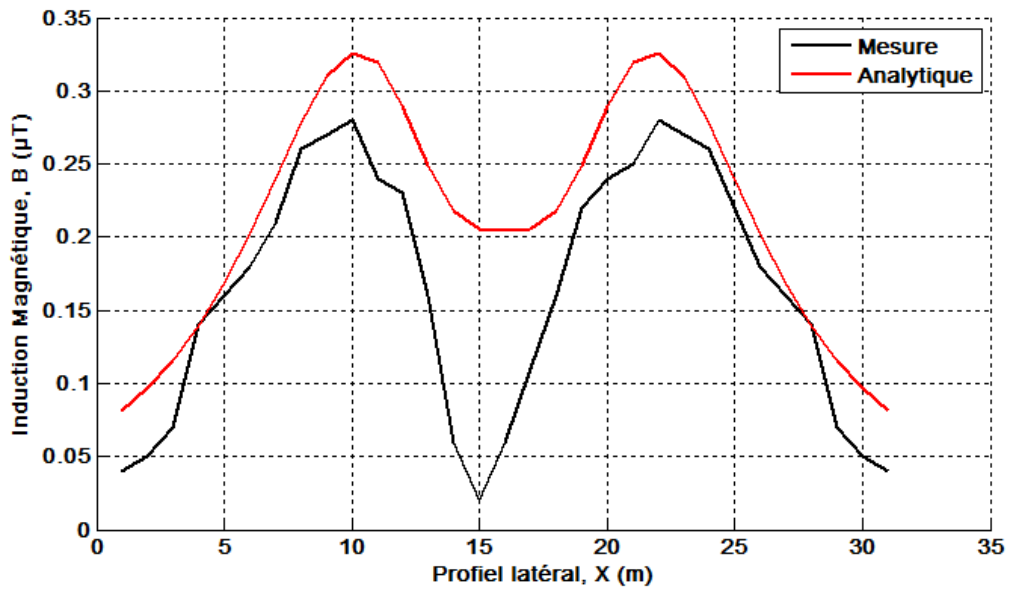
**Figure III-11:** Mesure du champ magnétique au voisinage des lignes électriques. aériennes 220kV à l'aide d'un Teslamètre.

Une série de 30 points de mesure, espacés régulièrement de 1 mètre, a été disposée le long de l'axe horizontal (axe des x), à proximité d'un tronçon de ligne à haute tension de 220 kV, comme indiqué dans la Figure 3. Cette analyse permettra ainsi d'évaluer l'exposition au champ magnétique pour toute personne se déplaçant à proximité des lignes électriques aériennes.

- Des relevés du champ magnétique ont été réalisés à trois instants distincts : à 10h00, 12h00 et 13h00. Les intensités de courant mesurées dans la ligne à ces moments étaient respectivement de 77 A, 82 A et 91 A. Chaque point de mesure se trouve à une hauteur de 1 mètre par rapport au sol.

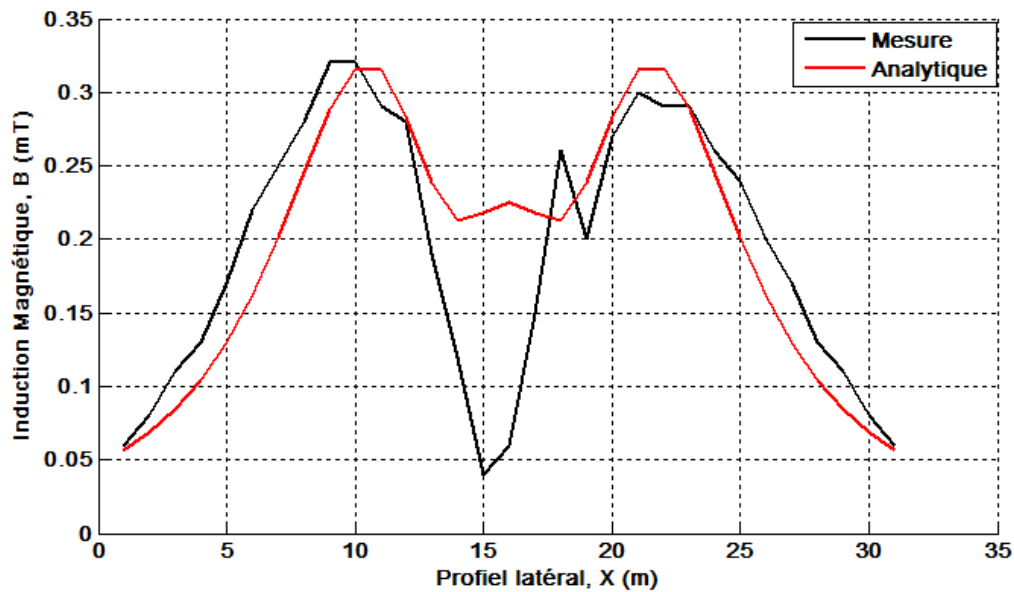


**Figure III-12:** Induction magnétique en fonction de l'intensité du courant 77A



**Figure III-13:** Induction magnétique en fonction de l'intensité du courant 82A

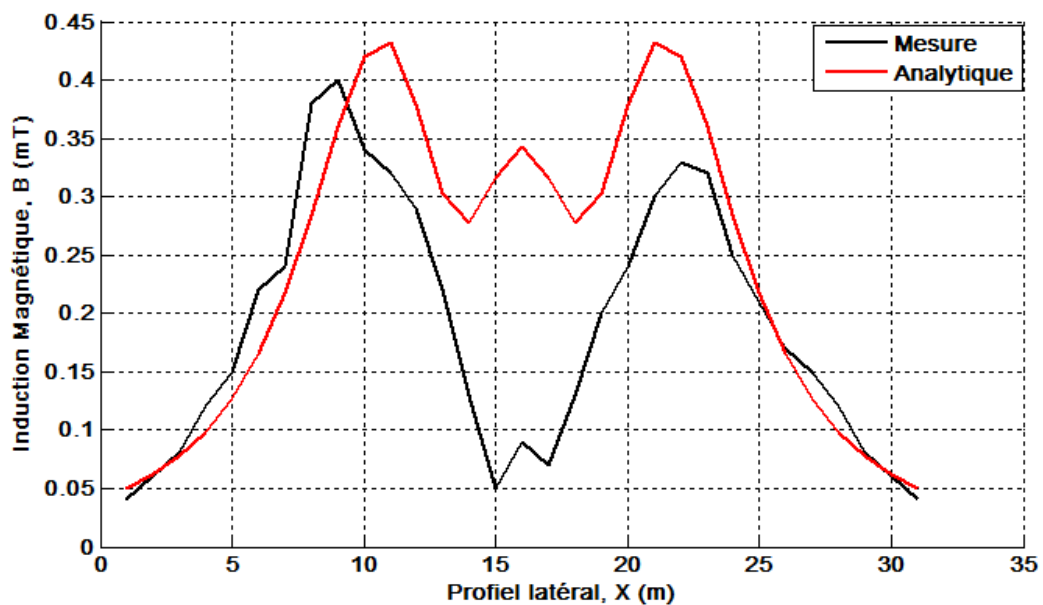




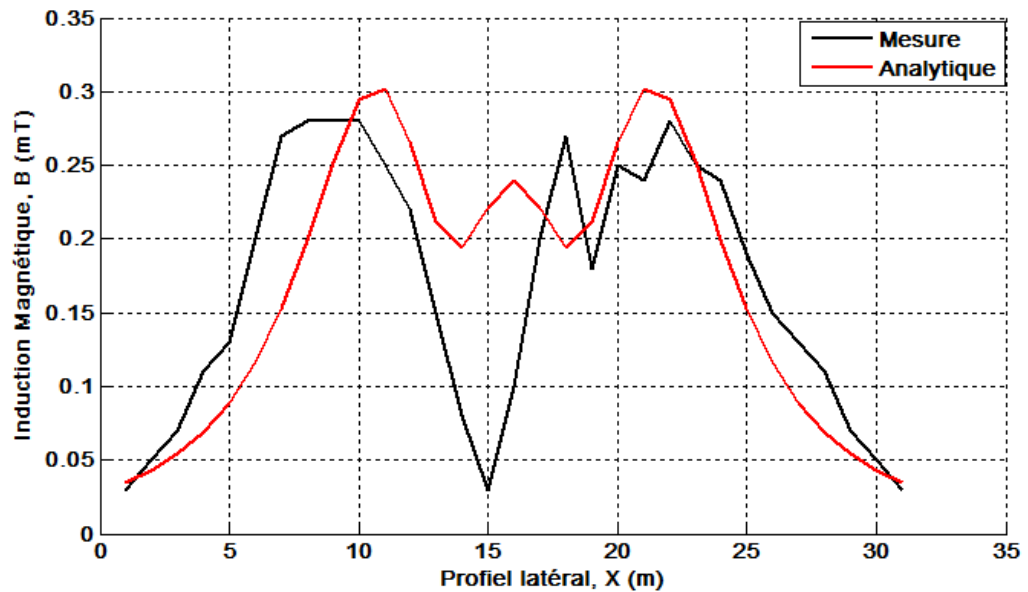
**Figure III-14:** Induction magnétique en fonction de l'intensité du courant 91A

Les Figures, III.12 , III.13 et III.11 illustrent la distribution du champ magnétique (flux magnétique), mesurée expérimentalement et calculée analytiquement, le long d'un profil latéral de 30 mètres situé à 1 mètre au-dessus du sol, à différents instants, à proximité d'une ligne haute tension de 220 kV.

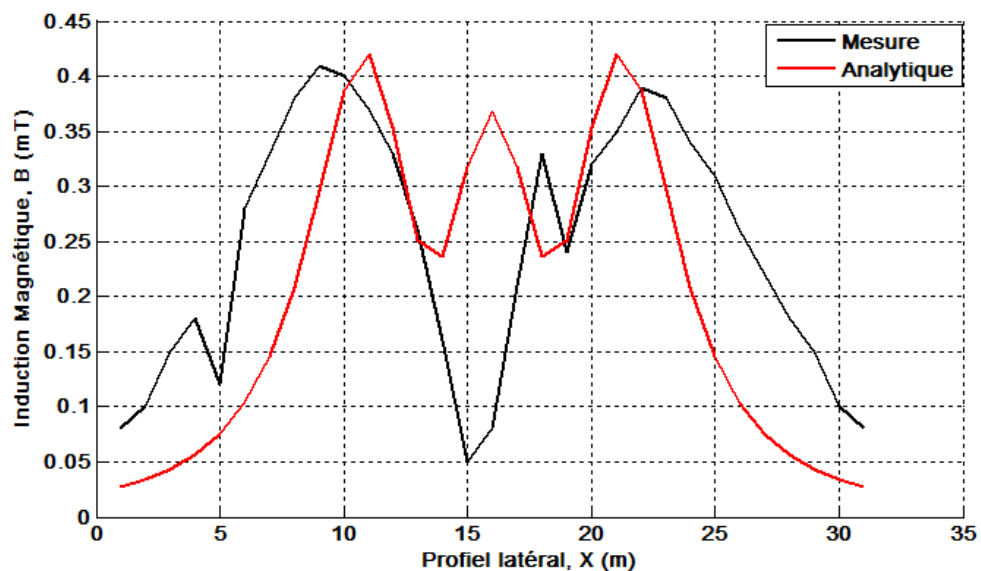
- Des relevés du champ magnétique ont été réalisés à trois instants distincts : à 10h30, 12h30 et 13h30. Les intensités de courant mesurées dans la ligne à ces moments étaient respectivement de 77 A, 82 A et 93A



**Figure III-15:** Induction magnétique en fonction de l'intensité du courant 77A

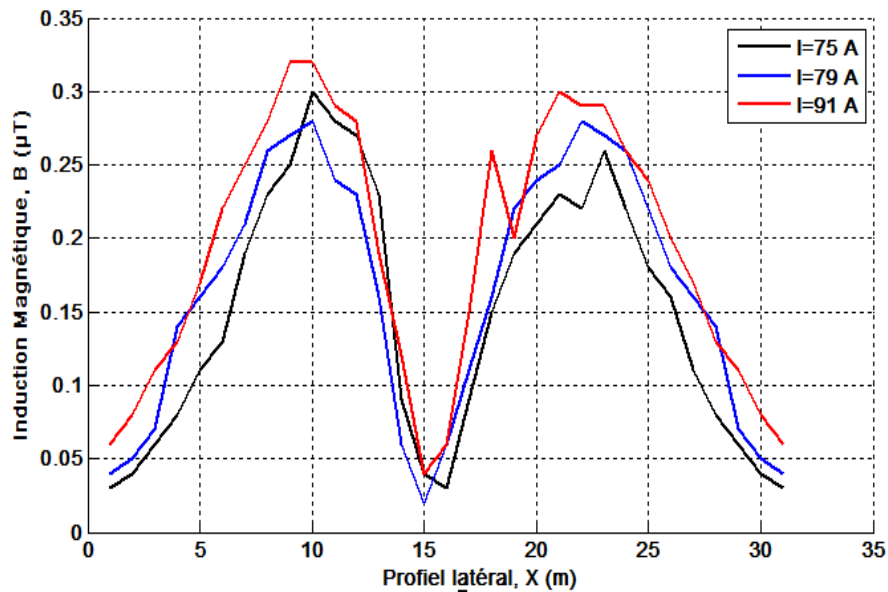


**Figure III-16:** Induction magnétique en fonction de l'intensité du courant 82A

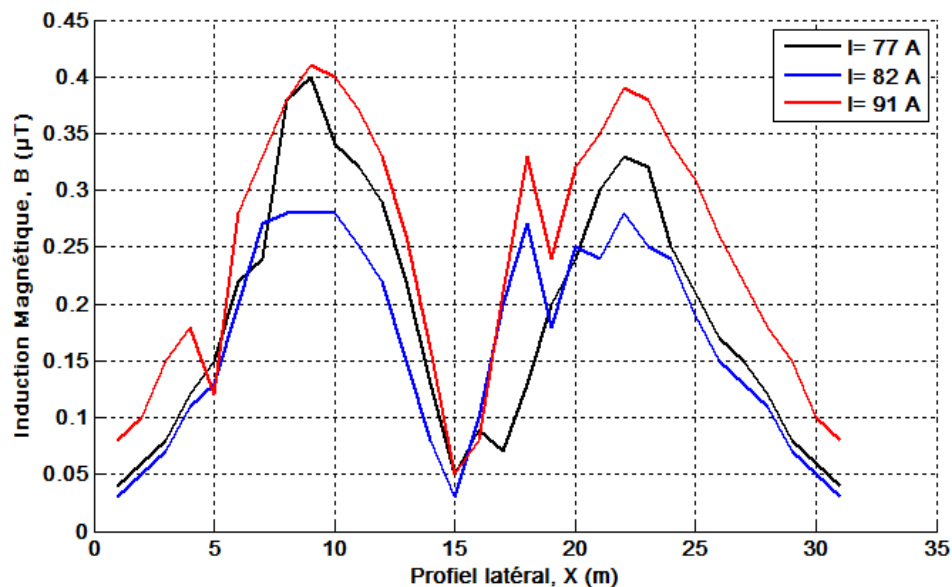


**Figure III-17:** Induction magnétique en fonction de l'intensité du courant 93A

Les Figures III.15, III.16 et III.17 illustrent la distribution du champ magnétique (flux magnétique), mesurée expérimentalement et calculée analytiquement, le long d'un profil latéral de 30 mètres situé à 2 mètre au-dessus du sol, à différents instants, à proximité d'une ligne haute tension de 220 kV.



**Figure III-18:** Induction magnétique pour  $h=1\text{m}$ .



**Figure III-19:** Induction magnétique pour  $h=2\text{m}$

Les Figures III.18 et III.19 illustrent la distribution du champ magnétique (flux magnétique), mesurée expérimentalement le long d'un profil latéral de 30 mètres situé à une hauteur  $h=1\text{m}$  et  $h=2\text{m}$  au-dessus du sol, à différents instants, à proximité d'une ligne haut tension de 220 kV.

### Interprétation des résultats

On observe une légère différence (environ 6 %) entre les valeurs expérimentales et les valeurs analytiques des champs. Cette différence n'est pas due au modèle de calcul lui-même, mais plutôt aux hypothèses simplificatrices et aux spécificités des méthodes utilisées. Une petite différence (par exemple  $\leq 5-10$  %) est généralement acceptable et s'explique par :

- Les hypothèses simplificatrices dans le modèle analytique (ex. : sol parfaitement plan, conducteurs idéalisés).
- Les incertitudes de mesure (erreurs de capteurs, conditions extérieures variables).

En conclusion les résultats expérimentaux montrent une bonne concordance avec les calculs analytiques, avec un écart moyen de 6 %. Cette différence reste acceptable compte tenu des simplifications du modèle et des incertitudes inhérentes aux mesures sur le terrain.

Sur la base des valeurs mesurées, on peut conclure que le champ magnétique sous la ligne électrique est réparti de manière relativement homogène. Toutefois, comme on pouvait le prévoir, la valeur de l'induction magnétique diminue en se rapprochant du centre virtuel de la ligne électrique. En effet, à ce point, les conducteurs de la ligne influencent mutuellement leurs champs, ce qui conduit à une quasi-compensation du champ magnétique.

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons calculé le champ magnétique au voisinage des lignes électriques aériennes. D'après les résultats, il est clair que l'intensité du champ magnétique est moins intense sous les conducteurs de phase et augmente jusqu'au pic près du conducteur de phase; puis diminue avec l'augmentation de la distance latérale. Il a également été constaté que le champ magnétique dépend de plusieurs facteurs, tels que l'espacement entre deux conducteurs adjacents et la hauteur des conducteurs au dessus du sol, le type des lignes, simple ou double circuit et type d'exposition des lignes.

Au final, nous avons fait une comparaison entre les résultats appliqués et les résultats théoriques. Nous avons obtenu de bons résultats pour le champ magnétique par rapport aux normes internationales qui déterminent la valeur du champ magnétique.



REFERENCES

- [1] Brahmia Tareq et Kouadria Faris, “Modélisation des paramètres des lignes électriques,” 2020.
- [2] “Réseaux électriques.pdf.” Accessed: May 07, 2025. [Online]. Available: [https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/pluginfile.php/10816/mod\\_resource/content/1/R%C3%A9seaux%20%C3%A9lectriques.pdf](https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/pluginfile.php/10816/mod_resource/content/1/R%C3%A9seaux%20%C3%A9lectriques.pdf)
- [3] “Les lignes électriques sous très haute tension,” ConsoGlobe. Accessed: May 11, 2025. [Online]. Available: <https://www.consoglobe.com/lignes-electriques-tres-haute-tension-cg>
- [4] Bellamouchi Abdelhai, Bekkouche Moussa, Bekkouche ELhadi., “lignes électriques à haute tension,” Conception et simulation, 2021.
- [5] “BERRDJEM-CHAMSIDDINE.pdf.” Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2017/12/BERRDJEM-CHAMSIDDINE.pdf>
- [6] P. Dessard, “Lignes à haute tension et ondes électromagnétiques,” Canopea. Accessed: May 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.canopea.be/lignes-a-haute-tension-et-ondes-electromagnetiques/>
- [7] “La question du risque sur la santé : Normes, recherche et analyse de l’exposition,” BBEMG - Belgian BioElectroMagnetics Group. Accessed: May 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.bbemg.uliege.be/fr/la-question-du-risque-sur-la-sante-normes-recherche-et-analyse-de-lexposition/>
- [8] BERRDJEM CHAMSIDDINE , BOUDJERADA LAHCEN, Modélisation analytique des champs électromagnétiques rayonnés par une ligne électriques HT 400 KV, UNIVERSITE Annaba BADJI MOKHTAR, MEMOIRE DE MASTER, juin 2017
- [9] Haoyang Tian<sup>1</sup>, Haozheng Zhu<sup>2</sup>, Chenhao Gao<sup>2</sup>, Mingxia Shi<sup>2</sup>, Dekun Yang<sup>2</sup>, Mingyu Jin<sup>3</sup>, Fenghua Wang<sup>4\*</sup> and Xiaohong Sui, “System-level biological effects of extremely low-frequency electromagnetic fields: an in vivo experimental review » Frontiers in Neuroscience, 06 October 2023 DOI 10.3389/fnins.2023.1247021
- [10] Bahareh Gholipour Hamedani, Bahram Goliaei , Seyed Peyman Shariatpanahi, Maryamsadat Nezamtaheri, An overview of the biological effects of extremely low frequency electromagnetic fields combined with ionizing radiation, Progress in Biophysics and Molecular Biology
- [11] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). (2010). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Physics, 99(6), 818–836. <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86>
- [12] ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz),” Health Physics, vol. 99, no. 6, pp. 818–836, 2010.

- [13] GUETTAI MOHAMED ABD ELHAMID, ABIA WAIL, Etude de la distribution du champ magnétique à proximité des lignes de transmission à haute tension, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Département de Génie Electrique, le 08/06/2024
- [14] Saul, PASARE, Calcul du champ magnétique d'une ligne électrique aérienne à haute Tension, Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 32.
- [15] Jordi-Roger Riba Ruiz, Antonio Garcia Espinosa, Magnetic field generated by sagging conductors of overhead power lines, Computer Applications in Engineering Education, MAY 2009.
- [16] Djekidel Rabah, Mahi Djillali, Aissa Ameer, Ali Ouchar Electrical Engineering Department AMAR TELIDJI University of LAGHOUAT, ALGERIA, Calcul et atténuation du champ magnétique d'une ligne aérienne HT au moyen d'une boucle passive. January 2013
- [17] Rezzag Bara Ilies, Etude de la pollution électromagnétique des câbles électriques, Doctorat LMD, Génie Electrique. Réseaux électrique, université ouargla, 2023/2024.