

REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département Electromécanique*

## **Mémoire**

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

FILIERE : Electrotechnique

**Spécialité : Commande électrique**

Par

- **MEKHAISSI Nihed**
- **BELHOUL Amira**

*Intitulé*

**Etude du champ électromagnétique au voisinage des lignes  
transmission HVDC et HVAC**

*Soutenu le : ../06/2022*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Cherif Aida</i>	<i>Prof</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. AOUABED Fatiha</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. REFFAS Abderrahim</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. NACIB Leila</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2021/2022*



## 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.AOUABED FATIHA

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.



## DÉDICACES

*Je dédie ce modeste travail à :*

### **Mon père et ma mère**

*Puisse ce modeste travail constituer une légère compensation pour tous les nobles sacrifices que vous étés imposé pour assurer mon bien être et éducation.*

*Et sans vous, sans votre présence, et sans votre patience, ce travail aurait été impensable*

### **Ma sœur chérie chahinez**

*Pour vous précieux conseil, votre soutien inconditionnel que vous m'avais toujours apporté*

### **Mes chers frères**

*Abdellah et Abd el basset a qui je tiens énormément*

*Mon **fiance Amine** et **ma belle-famille**, mes **grands-pères** et **grands-mères***

*Mes **tantes** et **oncles***

*Mes **amies** : Nadia, Radia, Lwiza, Nihed, Lamia*

AMIRA BELHOUL



## DÉDICACES

*Je dédie ce modeste travail à :*

**Mon père et ma mère**

*Puisse ce modeste travail constituer une légère compensation pour tous les nobles sacrifices que vous étés imposé pour assurer mon bien être et éducation.*

*Et sans vous, sans votre présence, et sans votre patience, ce travail aurait été impensable*

*Rétablissement à mon père et longue vie à chère mère*

**Mon frère chéri Amine**

*Pour vous précieux conseil, votre soutien inconditionnel que vous m'avais toujours apporté a qui je tiens énormément*

*Mon **mari Houari** a qui je tiens énormément et **ma belle-famille**, mes **grands-pères** et **grands-mères***

*Mes **tantes** et **oncles***

*Mes **amies** : chère amie Amira, Yousra*

*Nihed Mekhaissi*

## ملخص:

مع تطور الاقتصاد وزيادة الطلب على الطاقة الكهربائية، من المحتم أن تكون خطوط نقل التيار المباشر عالي الجهد (HVDC) والتيار المتردد عالي الجهد (HVAC) في نفس الممر. ان هذه الدراسة عبارة عن وصف تحليلي للبيئة الكهرومغناطيسية حول دارة متكونة من خطين كهربائيين ذوي فلوطينية عالية ( $\pm 800$  كيلو فولت من التيار المستمر و750 كيلو فولت من التيار المتردد) تعمل بطريقة متوازية. يتم حساب عرض الممر بمسافة فصل مختلفة ويتم الحصول على الحد الأدنى لعرض الممر تحت هذه المجموعة من مستوى الجهد وفقاً لقيمة التحكم في المجال الكهربائي الهجين الموصي به للمنطقة غير السكنية. قد تؤدي زيادة ارتفاع خطوط التيار المستمر أو التيار المتردد إلى تقليل عرض الرواق. عند مسافة فصل ثابتة، يمكن الحصول على الحد الأدنى لارتفاع خط التيار المتردد عندما يكون ارتفاع خط التيار المستمر ثابتاً عند قيمة معينة. وفي الوقت نفسه، يتم تحليل تغيير عرض الممر بارتفاعات مختلفة لخطوط CC وخطوط التيار المتردد. في هذه الدراسة يتم استخدام الوحدات: الكهرباء الساكنة والمغناطيسية لبرنامج COMSOL MULTIPHYSICS

## Résumé :

Avec le développement de l'économie et l'augmentation de la demande d'énergie électrique, il est inévitable que les lignes de transmission à courant continu haute tension (HVDC) et à courant alternatif haute tension (HVAC) se trouvent dans le même corridor.

Cette étude a consisté en une caractérisation analytique de l'environnement électromagnétique au voisinage d'un circuit de deux lignes haute tension ( $\pm 800$  kV HVDC et 750 kV HVAC) fonctionnant dans des couloirs parallèles. La largeur du couloir avec une distance de séparation différente est calculée et la largeur minimale du couloir sous cette combinaison de niveau de tension est obtenue en fonction de la valeur de contrôle du champ électrique hybride recommander une zone non résidentielle. L'augmentation de la hauteur des lignes DC ou AC peut réduire la largeur du couloir. A une distance de séparation fixe, la hauteur minimale de la ligne AC peut être obtenue lorsque la hauteur de la ligne DC est fixée à une certaine valeur. Pendant ce temps, le changement de la largeur du couloir est analysé avec différentes hauteurs de lignes CC et de lignes CA. Dans Cette étude est utilisé les modules : électrostatique et magnétostatique du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS.

## Abstract:

With the development of economy and the increased demand of power energy, it is unavoidable that high-voltage direct current (HVDC) and high-voltage alternating current (HVAC) transmission lines are in the same corridor. This paper consists on an analytical characterization of the electromagnetic environment in the in the medium surrounding a circuit of two ( $\pm 800$  kV HVDC et 750 kV HVAC) power lines running in parallel. The width of the corridor with different separation distance is calculated and the minimum width of the corridor under this combination of voltage level is obtained according to the control value of the hybrid electric field recommended for a non-residential area. Increasing the height of the DC or AC lines may reduce the width of the hallway. At a fixed separation distance, the minimum height of the AC line can be obtained when the height of the DC line is fixed at a certain value. Meanwhile, the change of corridor width is analyzed with different heights of CC lines and AC lines. In this study is used the modules: electrostatic and magneto-static modules of the COMSOL MULTIPHYSICS software.

## Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre01 :GENERALITES SUR LES LIGNES A HAUTE TENSION</b> .....	2
1.1 Introduction .....	3
1.2 Lignes électriques .....	3
1.2.1 Les lignes aériennes.....	4
1.2.2 Les lignes souterraines .....	4
1.3 Grandeurs caractéristiques d'une ligne .....	5
1.3.1 Impédance de la ligne.....	5
1.3.2 Admittance de la ligne.....	6
1.4 Les principaux composants des lignes aériennes .....	6
1.4.1 Les Eclateurs .....	6
1.4.2 Isolateurs .....	6
1.4.3 Câble de garde.....	7
1.4.1 Prises de terre des pylônes.....	7
1.4.2 Les Pylônes .....	8
1.4.3 Conducteurs.....	8
1.5 Fonction des supports .....	9
1.6 Classification des pylônes.....	9
1.7 Les différents types de pylône .....	10
1.7.1 Pylône auto-stable (en treillis).....	10
1.7.2 Pylône haubané.....	11
1.7.3 Les pylônes monopèdes [12] .....	11
1.8 CHAMP ELECTROMAGNETIQUE.....	11
1.8.1 Champ électrique.....	11
1.8.2 Champ magnétique.....	12
1.9 Conclusion :.....	14
<b>Chapitre 02 : SYSTEMES DE TRANSMISSION : HVDC</b> .....	16
2.1 Introduction .....	16
2.2 Systèmes de transmission : HVAC vs HVDC .....	16
2.2.1 Système de transmission HVAC .....	16
2.2.2 Système de transmission HVDC .....	16
2.3 Développement de la technologie HVDC.....	17
2.4 Avantages du transport d'énergie en technique HVDC .....	18
2.5 Inconvénients du transport d'énergie en technique HVDC.....	20
2.6. Types des liaisons HVDC.....	20
2.6.1. Système HVDC monopolaire .....	20
2.6.2. Système HVDC bipolaire .....	20
2.6.3. Système HVDC homopolaire .....	21
2.6.4. Système HVDC dos à dos. ....	21
2.6.5. Système HVDC multi-terminal .....	22
2.7. Composition du système HVDC.....	22
2.8. Conclusion.....	22
<b>Chapitre 03 : APPLICATION DU CHAMPS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES SUR LA LIGNE</b> .....	24
3.1 Introduction .....	24
3.2 Modélisation en électromagnétique avec COMSOL 2D.....	24
3.2.1 Introduction sur le programme COMSOL MULTIPHYSIQUES .....	24
3.2.2 Etapes de la méthode des éléments finis.....	25
3.3 Calcul du champ électrique et magnétique .....	28
3.3.1 Effet de la distance entre les lignes HVDC et HVAC .....	28
3.3.2 Effet de hauteur au sol.....	30
3.4 Conclusion.....	41
<b>Conclusion générale</b> .....	46
<b>Référence</b>	

## Liste des figures

Figure 1.1. Ligne aérienne .....	4
Figure 1.2. Ligne souterraines.....	4
Figure 1.3. Vue en coupe souterraine U1000RGPF V.....	5
Figure 1.4. Schémas équivalents en $\pi$ et en T .....	6
Figure 1.5. Eclateurs.....	6
Figure 1.6. Chaîne d'isolateurs.....	7
Figure 1.7. Câble de garde .....	7
Figure 1.8. Conducteurs d'aériennes.....	9
Figure 1.9. Dimension des supports .....	9
Figure 1.10. Coupe transversale du champ électrique d'une ligne à haute tension 380 kV.....	12
Figure 1.11. Champ magnétique d'une ligne à haute tension typique de 380kV à deux terres .....	12
Figure 1.12. Répartition du champ magnétique et électrique .....	13
Figure 2.1. Disposition du système HVDC.....	17
Figure 2.2. Comparaison économique entre le transport en HVAC et HVDC.....	19
Figure 2.3. Comparaison de largeur du couloir requis par les deux lignes HVDC et HVAC .....	19
Figure 2.4. Lien HVDC monopolaire .....	20
Figure 2.5. Lien HVDC bipolaire.....	21
Figure 2.6. Lien HVDC homopolaire.....	21
Figure 2.7. Lien HVDC dos à dos .....	21
Figure 3.1. Configuration d'un corridor hybride .....	24
Figure 3.2. Diagramme de différentes étapes de résolution .....	25
Figure 3.3. Modèle des lignes de transmission DC et AC dans le même couloir.....	26
Figure 3.4. Le maillage .....	27
Figure 3.5. Champ électrique différentes distances de séparation par une ligne électrique hybride à 2 m du sol .....	29
Figure 3.6. Champ magnétique différentes distances de séparation par une ligne électrique hybride à 2 m du sol .....	30
Figure 3.7. Valeur de contrôle du champ électrique hybride à différentes hauteurs de ligne DC.....	32
Figure 3.8. Valeur de contrôle du champ magnétique hybride à différentes hauteurs de ligne DC.....	34
Figure 3.9. Profil du champ électrique pour des niveaux entre 1.75m et 2m et 12m .....	36
Figure 3.10. Profil du champ magnétique pour des niveaux entre 1.75m et 2m et 12m.....	38
Figure 3.11. Champ électrique à différents types de tension .....	39
Figure 3.12. Champ magnétique à différents types de tension .....	40
Figure 3.13. Répartition des lignes équipotielles, potentiel et les lignes du champ magnétique au voisinage du ligne .....	41

## *Liste des tableaux*

---

---

Tableau 1.1. Avantages et inconvénients des lignes.....	5
Tableau 1.2. Schéma de pylones triangle .....	10
Tableau 1.3. .Ordres de grandeur des champs életromagnétiques des lignes aériennes .....	14
Tableau 1.4. Champ magnétique moyen rayonné par certains appareils domestiques .....	14
Tableau 3.1.Paramètres structurels.....	26
Tableau 3.2. Caractéristique de la ligne électrique .....	26
Tableau 3.3. .Paramètres du modèle de simulation .....	28



## Acronymes

Abréviations	Signification
<b>HT</b>	Haute tension
<b>THT</b>	Très haute tension
<b>ACSR</b>	Aluminium Conductor Steel Reinforced
<b>AAAC</b>	All Aluminium Alloy Conductor
<b>ACAR</b>	Aluminium Conductor Alloy Reinforced
<b>HVDC</b>	Courant continu haute tension
<b>HVAC</b>	Courant alternatif haute tension
<b>DC, AC</b>	Courant continu, courant alternatif
<b>FEM</b>	La méthode des éléments finis

## Symboles

Abréviations	Signification
$\vec{F}$	Le vecteur de la force
<b>Q</b>	La charge électrique
$\overrightarrow{grad}$	Le gradient
<b>v</b>	La vitesse
<b>V/m</b>	Volte sur mètre
<b>T, <math>\mu</math>T</b>	Tesla, micro tesla
<b><math>Z_L</math></b>	Impédance linéique d'une phase de la ligne
<b><math>R_L</math></b>	La résistance de la ligne
<b><math>X_L</math></b>	La réactance inductive de la ligne.
<b><math>Y_L</math></b>	Admittance linéique d'une phase de la ligne
<b><math>V_{DC+}, V_{DC-}</math></b>	La tension de courant continu positive, la tension de courant continu négative
<b><math>\rho^+, \rho^-</math></b>	La densité de charge de la charge positive, la densité de charge de la charge négative
$\phi$	Potentiel électrique de l'espace
$\sigma$	Conductivité électrique
$\epsilon_0$	Le constant diélectrique de l'air
<b><math>k^+, k^-</math></b>	Les mobilités ioniques des charges positives, Les mobilités ioniques des charges négatives
<b>L</b>	La distance de séparation
<b><math>H_1, H_2</math></b>	La hauteur des lignes DC, La hauteur des lignes AC
<b><math>F_{AC}, F_{DC}</math></b>	Les filtres des alternatifs et continus
<b><math>S_1, S_2</math></b>	La distance d'espacement polaire des lignes DC bipolaires et la distance d'espacement de phase des lignes A sont respectivement
<b>2D</b>	2 Dimensions
<b><math>L_1, L_2</math></b>	Les inductances de lissage de cotés harmoniques

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

## **INTRODUCTION GENERALE**

La demande d'énergie électrique, qui est un facteur de production important aux côtés du travail et du capital, continue d'augmenter jour après jour dans le monde. Cette situation qui affecte l'économie révèle la nécessité pour les pays de combiner leurs politiques énergétiques avec des politiques économiques. Ces dernières années, on observe que les politiques des pays visant à réduire la dépendance extérieure et à augmenter leur capacité de production existante se sont accélérées pour chaque pays afin de répondre à la demande croissante. Lorsque le processus historique est analysé, on constate que la transmission et la distribution d'énergie électrique, qui sont largement utilisées, sont réalisées sous forme de courant alternatif (AC) et de courant continu (DC). Le développement du réseau au cours des différentes périodes varie en termes de classe de tension, de taille du réseau, de capacité de l'unité de production et d'aspects techniques et économiques en raison de l'évolution des technologies de transmission au fil du temps [1]. Avec le développement des systèmes de transmission d'énergie à haute tension (HT), l'échelle des réseaux de transmission continue de s'étendre tandis que les ressources des corridors de transmission deviennent de plus en plus rares, en particulier dans les régions du monde densément peuplées et économiquement développées [2,3]. Dans ces zones, la difficulté d'obtenir de nouveaux corridors de transmission pour transporter l'électricité en vrac est devenue un obstacle majeur au développement des réseaux électriques. Une solution consiste à partager le corridor entre les lignes de transmission à courant alternatif HT et à courant continu HT (HVAC/HVDC), appelé corridor hybride. L'utilisation de ce type de configuration de partage, qui vise à maximiser la capacité des infrastructures existantes et à améliorer l'efficacité du transport d'énergie, est plus nécessaire dans les projets de transmission d'énergie HVAC/HVDC [4,5].

L'objectif de notre travail est donc de calculer la distribution du champ électrique et magnétique au voisinage des lignes à haute tension (HVDC, HVAC et système hybride). Ainsi le travail présenté dans ce mémoire est articulé autour de trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à un rappel sur les généralités dans les lignes électriques.

Dans le second Chapitre, nous décrivons brièvement les systèmes HVDC, leurs avantages et inconvénients, ainsi que le principe de fonctionnement.

Dans le troisième chapitre, nous calculons la distribution du champ électrique et magnétique au voisinage des lignes HVAC et les lignes HVDC et systèmes hybrides.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

---

## Chapitre 01

---

# **GENERALITES SUR LES LIGNES A HAUTE TENSION**

## 1.1 Introduction

Les champs électromagnétiques de très basse fréquence générés par les lignes de transport d'énergie électrique ont été largement étudiés par la communauté scientifique en raison des préoccupations existantes par les agences gouvernementales, non gouvernementales et les services publics d'énergie électrique sur leurs effets biologiques possibles pour la santé et l'environnement [6],[7]. Les lignes électriques aériennes HT et THT génèrent des champs magnétiques qui peuvent atteindre une intensité de  $0.4 \mu T$  à une distance de 100 m (400 KV) ou à 30 m (225 KV). Afin de diminuer les effets négatifs du champ magnétique, une technique constructive peut permettre de réduire de manière significative le champ magnétique, en insérant un circuit auxiliaire de compensation.

Ce chapitre donne une description générale sur ces réseaux électriques et la constitution des lignes aériennes (conducteurs, support, isolateurs...etc.), câbles souterrains et effet des champs électromagnétiques.

## 1.2 Lignes électriques

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique. Les conducteurs sont en général en aluminium, en cuivre, en acier... etc. Les isolants ont une partie solide (porcelaine, verre, papier, etc..) combinée avec un gaz (air, SF6) ou un liquide (huile). Le transport de l'énergie électrique du producteur au consommateur se fait à l'aide de lignes électriques, qui constituent les artères d'un système d'énergie électrique. Ces lignes sont composées de trois (3) phases, qui constituent un système triphasé. 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 diminuer le champ électrique et magnétique quand on s'écarte des phases. Le transit de l'électricité par les lignes est toujours accompagné par la présence :

- ✓ D'un champ électrique qui est lié à :
  - La tension.
  - La proximité des autres phases, du (des) câble(s) de garde, de la terre ou tout objet à proximité.
  - La configuration de la ligne (220 KV, 400 kV, ...).
- ✓ D'un champ magnétique qui est lié à :
  - La valeur du courant circulant dans les conducteurs.

- La configuration de la ligne. Plus la tension (et donc le courant en régime normal d'utilisation), sera élevée, plus les champs électrique et magnétique seront importants. [8]

### 1.2.1 Les lignes aériennes

Elles sont composées de câbles conducteurs nus en cuivre posés sur des isolateurs fixés à des supports ainsi que des câbles de garde. [9]



Figure1.1. Ligne aérienne

### 1.2.2 Les lignes souterraines

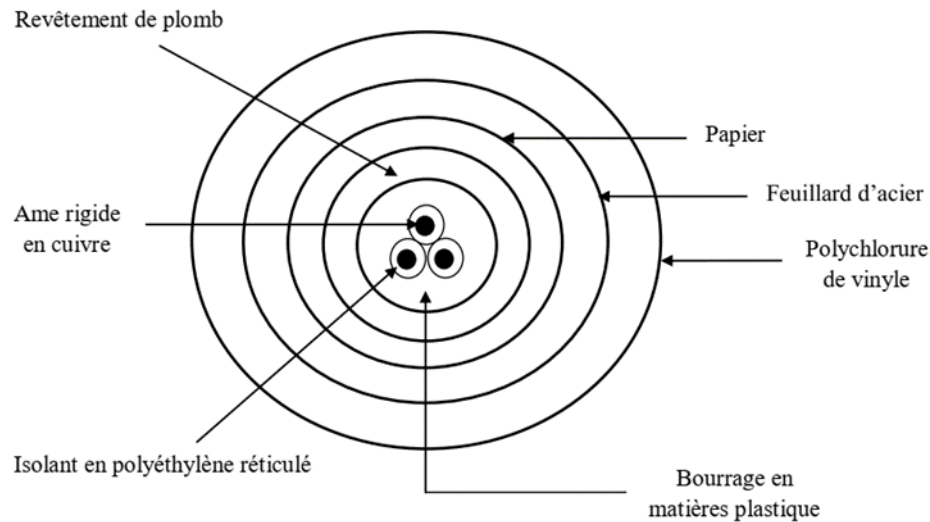
Elles sont constituées par un ou plusieurs câbles unipolaires ou par un câble multipolaire.



Figure1.2. Lignes souterraines

- Un câble unipolaire** : comprend généralement un conducteur de phase centrale en cuivre ou en aluminium, entouré par un isolant (papier imprégné à l'huile, gaz sous pression, polyéthylène), des écrans semi-conducteurs, une gaine métallique, et une protection contre l'humidité et les agressions mécaniques et chimique.
- Un câble tripolaire** : il est composé de trois conducteurs de phase isolés et groupés sous une armure métallique commune. [10]

La figure ci-après illustre un exemple de câble souterrain :



**Figure1.3.** Vue en coupe d'un câble souterrain U 1000 RGPF V

**Tableau 1.1.** Avantages et inconvénients des lignes

	Avantages	Désavantages
<b>Lignes aériennes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Frais de construction et d'entretien acceptable</li> <li>-Surveillance facile,</li> <li>-Détection des défauts</li> <li>-Défauts souvent fugitifs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sujet aux atteintes extérieures (Vulnérables)</li> <li>-Exposées aux décharges</li> <li>-Environnement et esthétique</li> <li>-Atmosphériques (la foudre)</li> <li>-Difficultés de droit de passage</li> <li>-Dangers pour l'aviation et en cas de rupture de conducteurs</li> </ul>
<b>Lignes souterraines</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Protège des atteintes extérieures (décharges atmosphériques)</li> <li>-Respecte l'environnement et l'esthétique</li> <li>-Seule solution en ville et pour la traversée de cours d'eau</li> <li>-Perturbation radio faible</li> <li>Pas de champ extérieur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Frais de construction 5 à 20 fois chère que les lignes aériennes</li> <li>-Entretien difficile</li> <li>-Problème de surveillance</li> <li>-Localisation des défauts malaisée</li> <li>-Problème de corrosion</li> <li>-Longueur limitée des câbles</li> </ul>

### 1.3 Grandeurs caractéristiques d'une ligne

La présence d'un champ statique entre les conducteurs est la conséquence de la capacité entre ces conducteurs, quant au champ magnétique, il est dû à l'inductance propre des conducteurs formant la ligne. Nous aurons donc besoin d'inductances et de capacités pour notre modèle.

Les conducteurs eux-mêmes ont une résistance propre, cette résistance étant en série dans les conducteurs, dans notre modèle. [11]

#### 1.3.1 Impédance de la ligne

C'est une grandeur complexe dans laquelle interviennent la résistance et la réactance inductive de la ligne.

$$Zl = RL + jXL \quad (\Omega) \quad (1)$$

### 1.3.2 Admittance de la ligne

De la même façon c'est une grandeur complexe définie par :

$$yl = gl + jbl \quad (s) \quad (2)$$

Nous avons alors un circuit basé sur des composants simples (résistances, inductances et capacités), capable de reproduire fidèlement le comportement de la ligne

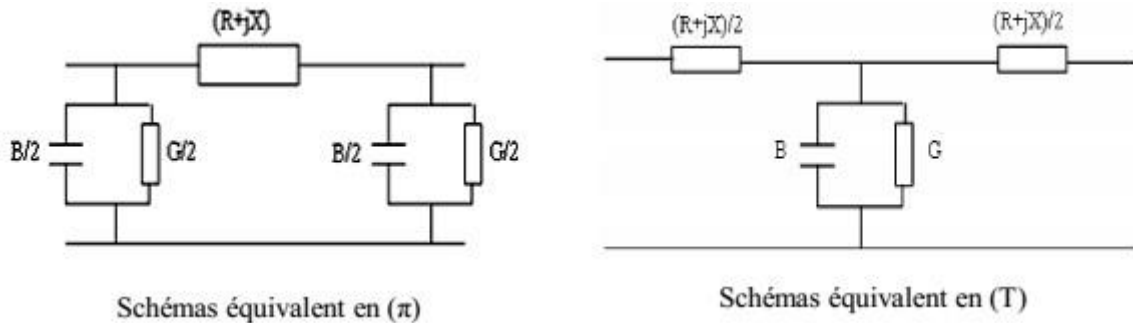


Figure 1.4. Schémas équivalents en  $\pi$  et en T

## 1.4 Les principaux composants des lignes aériennes

Composants d'une ligne aérienne Une ligne de transport se compose de conducteurs, d'isolateurs et de supports.

### 1.4.1 Les Eclateurs

L'éclateur est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger et l'autre à la terre. Leur distance est généralement réglable de façon à ajuster la tension d'amorçage. Son écartement est réglé pour provoquer l'amorçage si les surtensions des réseaux sont importantes [11]

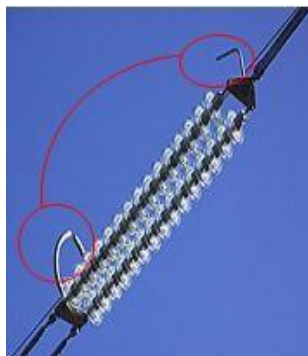


Figure 1.5. Eclateurs.

### 1.4.2 Isolateurs

Les isolateurs assurent l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports. Sur le réseau de transport, les isolateurs sont utilisés en chaîne, dont la longueur augmente avec le



niveau de tension. La chaîne d'isolateurs joue également un rôle mécanique, elle doit être capable de résister aux efforts dus aux conducteurs, qui subissent les effets du vent, de la neige. Les isolateurs ont deux fonctions principales :

- Ils empêchent le courant électrique qui circule dans les conducteurs de phase de passer dans les pylônes.
- Ils accrochent les conducteurs de phase au pylône [11]



**Figure1.6.** Chaîne d'isolateurs.

#### 1.4.3 Câble de garde

Les câbles de gardes ne conduisent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs de phase. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitent le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier. Au centre du câble d'acier on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. [11]



**Figure1.7.** Câble de garde

#### 1.4.1 Prises de terre des pylônes

Les pylônes des lignes de transport d'énergie sont reliés à des prises de terre conçues avec grande précaution afin de leur assurer une faible résistance effectivement. Il ne faut pas que la chute de tension dans la prise de terre provoquée par un courant de foudre qui frappe le pylône

dépasse la tension de contournement des isolateurs. Sinon les trois phases de la ligne se mettent en court-circuit entre elles et à la terre. [11]

### **1.4.2 Les Pylônes**

Le rôle des pylônes est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées aux voisinages des lignes. Le choix des pylônes se fait en fonction des lignes à réaliser, de leur environnement et des contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteur [11]

### **1.4.3 Conducteurs**

Le courant électrique est transporté dans des conducteurs, généralement sous forme triphasée, avec au moins trois conducteurs par ligne. Pour une phase, on peut aussi trouver un faisceau de conducteurs (de deux à quatre) à la place d'un simple conducteur afin de limiter les pertes par effet couronne et d'augmenter la puissance pouvant transiter [12].

Les conducteurs des lignes aériennes à haute tension sont toujours nus. Actuellement les câbles les plus couramment utilisés pour les lignes haute tension sont les conducteurs en aluminium avec âme en fils d'acier connus sous le diminutif de ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced), les conducteurs homogènes en alliage d'aluminium connus sous le diminutif de AAAC (All Aluminium Alloy Conductor) et, dans une moindre mesure les conducteurs en alliage d'aluminium avec âme en fils d'acier connus sous le diminutif de ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced).

Les conducteurs AAAC sont de plus en plus utilisés car ils offrent de nombreux avantages techniques sur les conducteurs ACSR [13] :

- Ils sont environ 25% plus légers,
- D'une manière générale à caractéristiques électriques équivalentes ils conduisent à des pylônes plus légers ou des portées plus longues, donc moins de pylônes,
- Du fait de leur nature homogène ils se comportent parfaitement vis à vis de la corrosion, les contraintes sont mieux réparties dans la section et par conséquent les joints et pinces d'ancrage sont plus simples et plus sûres,
- La dureté superficielle des fils d'alliage est double de celle des fils d'aluminium ce qui les rend moins sensibles aux blessures lors du déroulage donc réduit les pertes par effet couronne et le bruit audible.

Leurs autres caractéristiques comme le comportement au fluage et la résistance à la fatigue sont identiques à celles du conducteur ACSR. Le seul inconvénient provient de leur légèreté qui leur donne une tendance plus marquée au balancement dont il faut tenir compte dans le dimensionnement de la tête de pylône.



Figure 1.8. Conducteur de aériennes

### 1.5 Fonction des supports

Les supports ont pour but de maintenir les conducteurs des lignes aériennes à une certaine distance au-dessus du sol, ou au-dessus de certains obstacles (lignes électriques, lignes de télécommunications, etc...). [14]

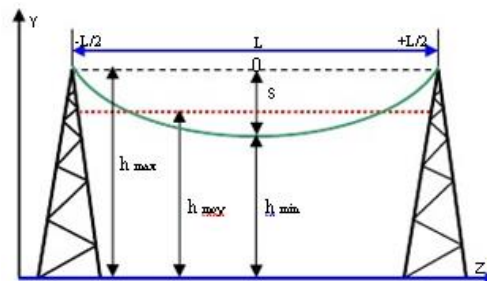


Figure 1.9. Dimensions des supports

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),  $h_{\text{moy}}$  : la hauteur moyenne.

Figure 1.9[15]

### 1.6 Classification des pylônes

Les pylônes à treillis sont constitués de deux ensembles principaux qui sont la tête et le fût.

La tête : la tête d'un pylône à treillis est une structure métallique qui supporte le câble de garde et les conducteurs de la ligne électrique. Elle est développée et calculée pour répondre à la fois - à des conditions de résistance basée sur les hypothèses de calcul de l'ouvrage,

- à des contraintes électriques dues à la tension de la ligne et aux distances minimales à respecter entre câble,
- à des contraintes géométriques dues à la configuration du câble de garde et des conducteurs et aux distances à la configuration du câble de garde et des conducteurs et aux distances à la masse à respecter dans les différentes hypothèses.

Le fût : le fût du pylône a pour but essentiel de maintenir la tête et les câbles à une certaine distance du sol pour respecter les hauteurs réglementaires et à transmettre au sol, par intermédiaire des fondations, les efforts dus aux charges horizontales et verticales appliquées sur le câble et le pylône.

La classification des pylônes peut se faire sous différentes formes. En effet on peut classer les pylônes :

- Par famille,
- D'après la disposition de leurs armements c'est-à-dire la disposition géométrique des conducteurs et le câble de garde,
- D'après leur aptitude à résister aux efforts longitudinaux [16]


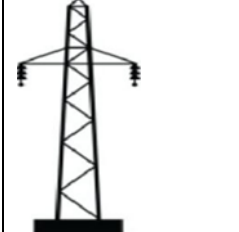
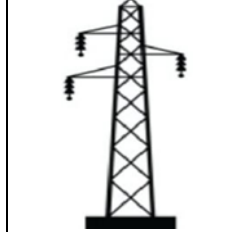
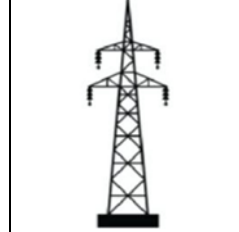
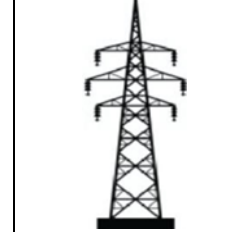
### **1.7 Les différents types de pylône**

Les pylônes sont des structures généralement réalisées avec des éléments métalliques pour des raisons de légèreté et de résistance et ils ne sont pas identiques, si bien qu'il en existe plusieurs sortes selon les contraintes engendrés, leurs formes, leurs matériaux constitutifs. Selon les matériaux, on distingue les pylônes métalliques, en béton, et en bois. Les pylônes électriques sont des supports verticaux portant les conducteurs d'une ligne à haute tension et peuvent se subdiviser en trois (03) grandes catégories selon les contraintes engendrées : Les pylônes monopodes, auto stable (en treillis) et haubanés [17].

#### **1.7.1 Pylône auto-stable (en treillis)**

C'est un pylône métallique constitué par un assemblage de membrures formant un treillis et destiné à la plupart des lignes de transport de l'électricité, sous forme de tension alternative ou de tension continue. Il comporte un fût quadrangulaire et des consoles ou des traverses. Les fondations sont généralement à pieds séparés. On les appelle des pylônes tétrapodes. Il existe plusieurs modèles de pylônes à treillis. [17]

Tableau1.2. Schéma de pylônes triangle

				
Pylône à un triangle	Pylône a deux triangles	Pylône a trois triangles	Pylône à quatre triangles	Pylône a six triangles

### 1.7.2 Pylône haubané

C'est un mât soutenu par des haubans ou câbles en acier, le mât se présente, en général, sous forme Triangulaire, il est constitué d'éléments tubulaires soudés avec des autres solides et angulaires formants un treillis. Ce type de pylône n'est pas assez rigide car la section transversale du treillis et les sections des barres qui le constituent sont faibles. En plus cette solution représente un i inconvénient majeur qui est l'encombrement des câbles. [17]

### 1.7.3 Les pylônes monopèdes

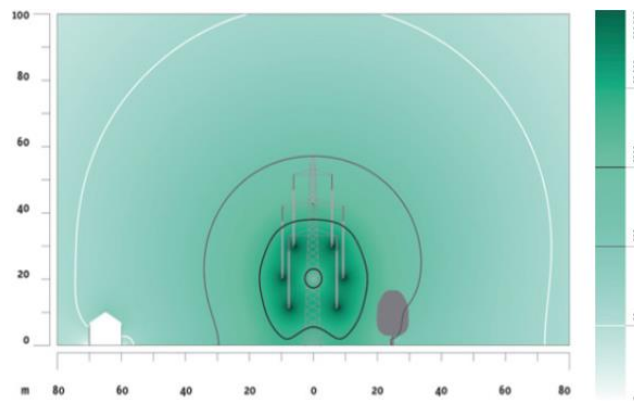
C'est un pylône constitué d'un ensemble de tronçons sous forme de tubes creux, fabriqués en acier Galvanisé, et assemblés par boulonnage au niveau des brides. Ce type de pylône est relativement cher compte tenu du procédé de fabrication mais il est facile à monter. Les pylônes mono tubulaires sont principalement utilisés dans les zones urbaines car ils offrent un encombrement réduit au niveau de leur base. [17]

## 1.8 CHAMP ELECTROMAGNETIQUE

Là où de l'électricité est générée, transportée et utilisée, il se produit aussi des phénomènes secondaires inévitables, comme les champs électriques et magnétiques. Ces champs sont d'autant plus forts que l'intensité du courant et la tension sont plus élevés et que la distance par rapport aux installations électriques est plus faible. Dans le domaine de la distribution d'électricité, les charges les plus importantes se manifestent à proximité immédiate des stations de transformation et des lignes à haute tension.

### 1.8.1 Champ électrique

Le champ électrique (figure 1.10) traduit l'effet d'attraction ou de répulsion qui est exercé par une charge sur une autre charge (en fonction de leurs signes respectifs). On peut dire de façon simplifiée que le champ électrique est lié à la tension. Plus la tension est grande, plus le champ électrique qui en résulte est grand. Un objet électrique sous tension génère toujours un champ électrique, même s'il n'est parcouru par aucun courant [18].



**Figure 1.10.** Coupe transversale du champ électrique d'une ligne à haute tension de 380 kV [18]

Le champ électrique est une grandeur physique qui exerce une force électrique sur une particule chargée. En un point donné, le vecteur champ électrique  $\vec{E}$  est défini comme étant la force par unité de charge placée en ce point :

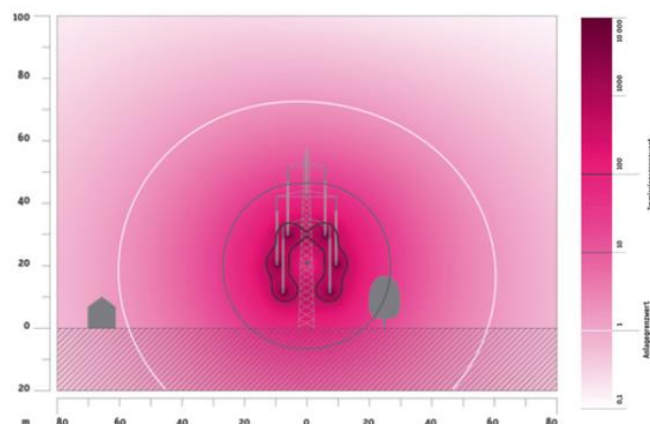
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (3)$$

En général on utilise une autre unité : Vu que  $E = -dV/dx$  : Alors  $[E] = V/m$

$$\vec{E} = -\text{grad } V \quad (4)$$

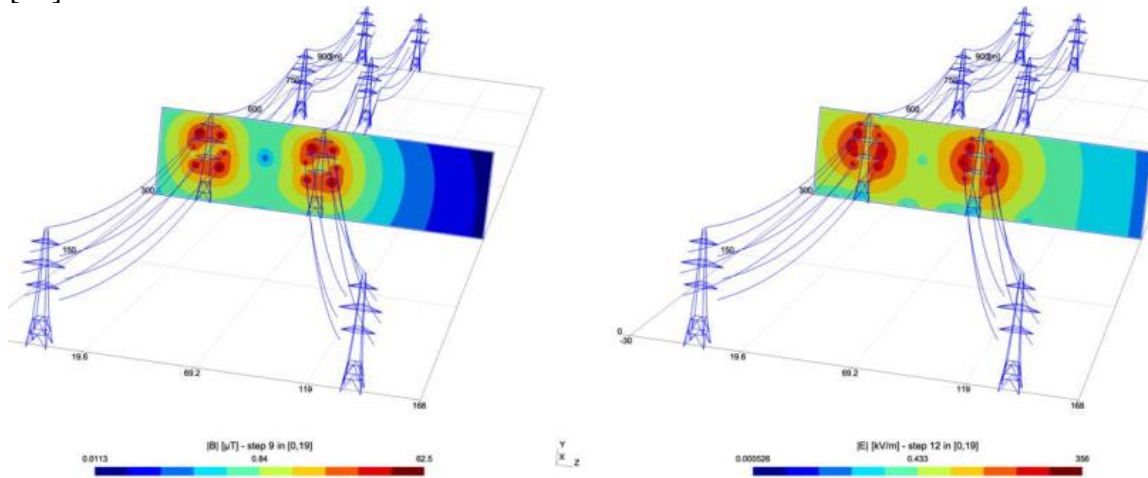
### 1.8.2 Champ magnétique

Le champ magnétique (figure 1.11) décrit la force exercée par une charge électrique en mouvement. Il se produit quand il y a déplacement de charge électrique, lorsque le courant circule. On peut dire de façon simplifiée que le champ magnétique est lié au courant. Pourtant on entend plus souvent parler de Tesla (T) ou plutôt de microtesla ( $\mu\text{T}$  – soit un million de fois moins qu'un T) comme unité du champ d'induction magnétique ; celui-ci traduit l'effet du champ magnétique dans un milieu donné [18].

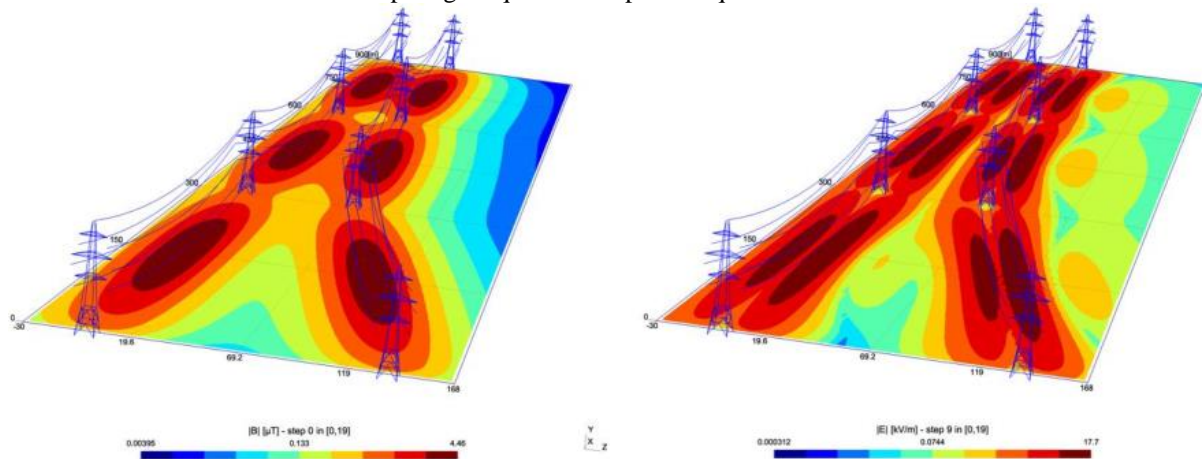


**Figure 1.11.** Champ magnétique d'une ligne à haute tension typique de 380 kV à deux têtes, à pleine charge (1920 A). [18]

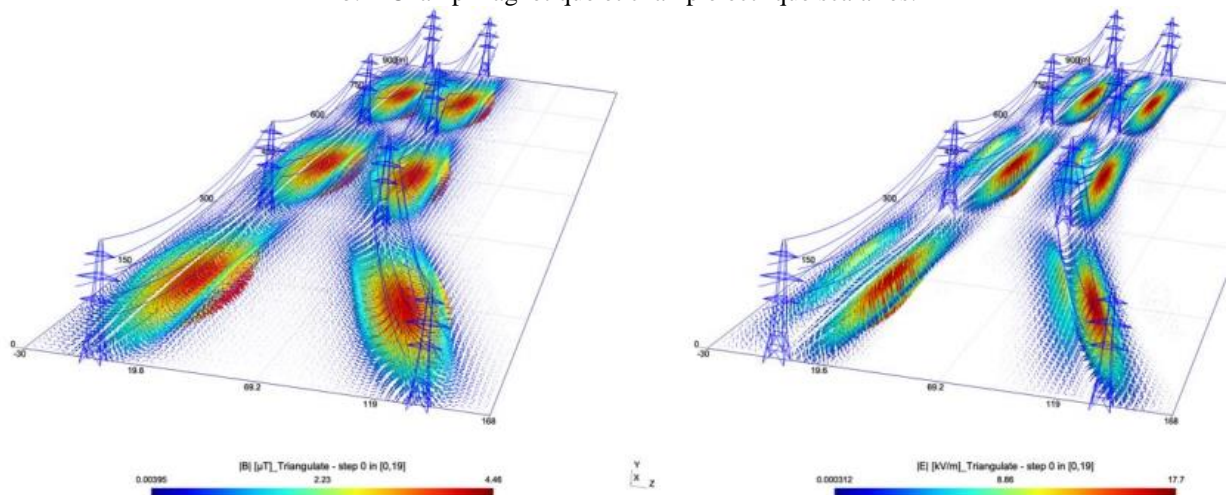
Les figures (1.11) montrent la répartition du champ magnétique et électrique d'une ligne à haute tension de 380 kV, pour trois position (scalaires selon un axe, scalaires et vectoriels) [18]



a. Champ magnétique et champ électrique scalaires selon un axe.



b. Champ magnétique et champ électrique scalaires.



c. Champ magnétique et champ électrique vectoriels.

**Figure 1. 12.** répartition du champ magnétique et électrique [18]

Les tableaux 1.3 et 1.4 donnent les ordres des grandeurs du champ électrique et du champ magnétique [EDF].

**Tableau 1.3.** Ordres de grandeur des champs électromagnétiques des lignes aériennes [EDF].

(1) – sous la ligne ; (2) – à 30 m de l'axe ; (3) – à 100 m de l'axe

Champs lignes aériennes	Champs électriques (V/m)	Induction magnétiques ( $\mu\text{T}$ )
<b>400 KV</b>	(1) -5000 (3) -200	(1) -30 (2) -12 (3) -1,2
<b>225 KV</b>	(1) -3000 (2) -400 (3) -40	(1) -20 (2) -3 (3) -0,3
<b>90 KV</b>	(1) -1000 (2) -100 (3) -10	(1) -10 (2) -1 (3) -0,1
<b>20 KV</b>	(1) -250 (2) -10 (3) Négligeable	(1) -6 (2) -0,2 (3) Négligeable
<b>230 KV</b>	(1) -9 (2) -0,3 (3) Négligeable	(1) -0,4 (2) - Négligeable (3) – Négligeable

**Tableau 1.4.** Champ magnétique moyen rayonné par certains appareils domestiques.

Source de champs magnétique	Induction magnétique
<b>Téléviseurs</b>	0,2 $\mu\text{T}$ à 60 cm 0,7 $\mu\text{T}$ à 30 cm
<b>Sèche – cheveux</b>	0,1 $\mu\text{T}$ à 30 cm 30 $\mu\text{T}$ à 15 cm
<b>Fer à repasser</b>	0,1 $\mu\text{T}$ à 30 cm 0,8 $\mu\text{T}$ à 15 cm
<b>Ecran de micro – ordinateur</b>	0,5 $\mu\text{T}$ à 30 cm 1,4 $\mu\text{T}$ à 15 cm

## 1.9 Conclusion :

Le réseau électrique est un système complexe comprenant la production, la transmission, la distribution et la consommation d'énergie électrique. Ce chapitre est consacré à un rappel sur les généralités des lignes électriques. Les lignes aériennes sont composées de pylônes (fondations, supports, de câble conducteurs et d'isolateurs) et des champs électromagnétiques au voisinage des lignes.



---

## Chapitre 02

---

# **SYSTEMES DE TRANSMISSION : HVDC**

## 2.1 Introduction

La demande d'énergie électrique, qui est un facteur de production important aux côtés du travail et du capital, continue d'augmenter jour après jour dans le monde. Surtout dans les pays en développement [1], La plupart du temps, l'énergie électrique est transmise dans le monde entier au moyen de courant alternatif. Cependant, il existe certaines applications pour lesquelles la transmission en continu offre des avantages distincts en termes d'économie et / ou de performances. Aujourd'hui, les lignes HVDC sont utilisées dans le monde entier transmettre de plus en plus d'énergie sur de longues distances. Typiquement, dans un système HVDC, la tension alternative est rectifiée et une ligne de transmission en courant continu transmet l'énergie. Un onduleur situé à l'extrémité de la ligne de transmission en courant continu convertit la tension en courant alternatif [19].

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps expliquer les raisons pour lesquelles la considération des systèmes HVDC apporte un intérêt dans la transmission de puissance et ce par rapport à un transport alternatif, classiquement utilisé [20] [21].

Nous présenterons ensuite les différentes configurations que nous pouvons rencontrer pour ces systèmes.

## 2.2 Systèmes de transmission : HVAC vs HVDC

### 2.2.1 Système de transmission HVAC

Dans le système de transmission HVAC, l'énergie électrique est générée et transmise à l'aide de signaux de tension et de courant alternatifs. À partir de la centrale de production, la tension est augmentée par un transformateur triphasé, qui permet la transmission de l'énergie avec des pertes de puissance moindres, puis redescendue du côté de la distribution à l'aide d'un transformateur triphasé pour les consommateurs moyenne ou basse tension. [22]

### 2.2.2 Système de transmission HVDC

#### *Qu'est-ce qu'un(HVDC) ?*

La technologie à courant continu haute tension (HVDC), dans sa forme la plus élémentaire, est la transmission ponctuelle de puissance en convertissant d'abord le courant alternatif en courant continu au poste de redresseur-convertisseur.

Transmission en DC à l'onduleur, puis conversion en AC au niveau de l'onduleur.

Dans une sous-station HVDC ou une sous-station de conversion, des redresseurs et des onduleurs sont placés aux deux extrémités de la ligne de transmission, comme illustré à la Figure 2.1. La section redresseuse convertit la tension alternative en tension continue, tandis que la section onduleur convertit la tension continue. Tension à une tension alternative. La

transmission DC est utilisée sur de longues distances car elle diminue les pertes et améliore l'efficacité globale du système [23].

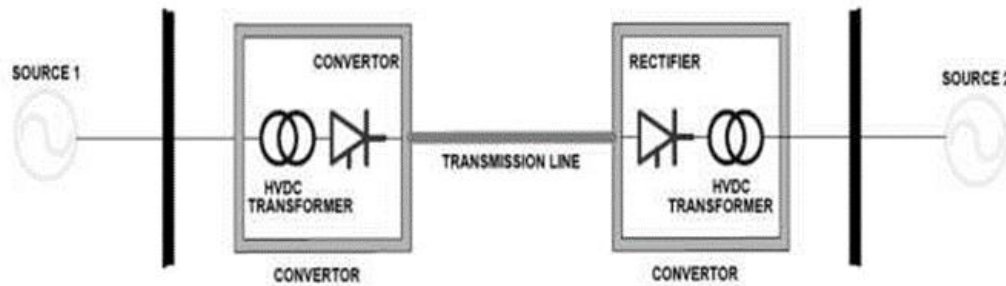


Figure 2.1. Disposition du système HVDC.

### 2.3 Développement de la technologie HVDC

À la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, les premiers générateurs et le transport de l'énergie électrique s'effectuèrent en courant continu. Les découvertes fondamentales de Galvani, Volta, Oersted, Ohm, et Ampère ont été dans le domaine du courant continu. Le premier réseau électrique était mis en service en 1882 grâce à la découverte de Thomas Edison [24] à ce moment, le système électrique devient complet qui va de la production jusqu'à la consommation.

Malgré leurs premières utilisations massives, les systèmes DC ont été très vite dépassés par les systèmes alternatifs. Leurs limitations étaient devenues de plus en plus apparentes. Les générateurs alternatifs, de par leur souplesse d'adaptation aux niveaux de tension, remplacèrent rapidement les générateurs à courant continu dans le domaine de la production et du transport de l'énergie électrique [27].

La première installation industrielle pour transporter l'énergie électrique en courant continu était en 1906 sur une distance de 200 km (MOUTIER – LYON) d'une puissance de 20 MW, le courant était produit par des génératrices à courant continu mises en série.

Dès 1950, l'évolution de l'électronique de puissance permet d'envisager à nouveau la solution du courant continu pour le transport de l'énergie électrique. Le courant alternatif des réseaux de production est transformé par les stations de conversion en courant continu pour le transport [20].

Depuis la première liaison, en 1954 (reliant l'île du Gotland et le Suède par un seul câble sous-marin à 100 KV de 96 km, permettant un échange de puissance de 20MW).

- En 2005, nous totalisons 75 liaisons d'interconnexion HVDC en service dans le monde représentant une puissance échangée de 65500 MW (65,5GW). Ces 75 liaisons HVDC se décomposent ainsi :

- ✚ 28 liaisons en câbles sous-marins ou souterrains (38%)
  - ✚ 18 liaisons en lignes aériennes (24%)
  - ✚ 29 stations de conversion simples (sans câble ni ligne, juste l'interconnexion HVDC de 2 réseaux avec 2 convertisseurs dos à dos).
- En 2009 projet de 2500 MW (500 kV) reliant : Ballia-Bhiwadi (Inde) sur une distance de 780 km ;
  - En 2010 projet de 6400 MW (800 kV) reliant : Xianjiaba - Shanghai (Chine) sur une distance de 2071 km.

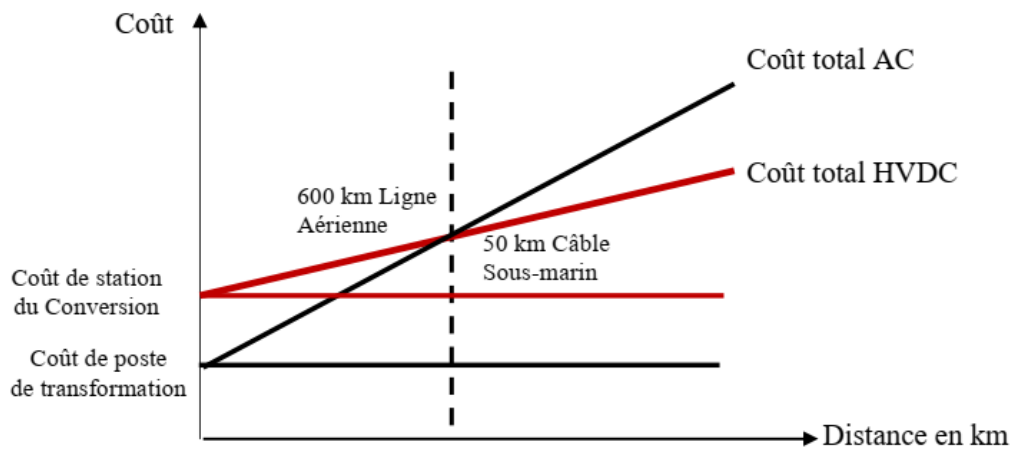
#### 2.4 Avantages du transport d'énergie en technique HVDC

Lors de l'interconnexion de différentes sources, certains problèmes techniques apparaissent, tels que : le problème de synchronisme, de déphasage et de stabilité. Une transmission HVDC permet d'éviter certaines limitations et inconvénients des transmissions en courant alternatif. En effet, les principaux avantages des systèmes HVDC peuvent être répertoriés de la manière suivante :

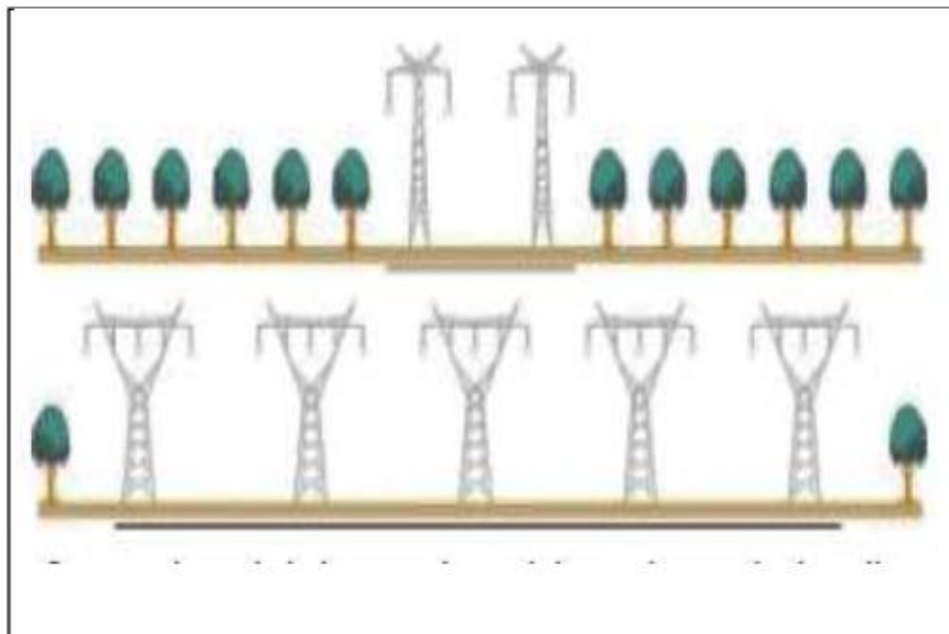
- Interconnexion des réseaux asynchrones ;
- La transmission HVDC est plus efficace économiquement et techniquement pour le transport électrique sur de longues liaisons. Le coût d'une transmission HVDC est plus faible que celui d'une transmission AC pour des distances supérieures à 600 km pour les lignes aériennes et 50 km pour les liaisons par câble (voir figure 2.2) [20].
- Commande très rapide du flux de puissance, qui implique des améliorations de stabilité, non seulement pour les liaisons de HVDC mais également pour le système HVAC [26] ;
- Pas de limite technique à la longueur de la ligne ou de câble relativement à une ligne à courant alternatif ;
- Retour à la terre peut être utilisé ;
- Pas d'effet de peau ;
- Limitation de la propagation des perturbations entre les réseaux ;
- Aucune exigence de fonctionnement en synchronisme des systèmes HVDC ;
- Réduction du couloir de servitude et donc minimisation des droits de passage ;
- Préserve la gestion indépendante de la fréquence et du contrôle du générateur ;
- La direction du flux de puissance peut être changée très rapidement (Bidirectionnalité) ;
- L'échange de puissance en courant alternatif est imposé par la réactance de la ligne et le déphasage des tensions, par contre ces derniers n'interviennent pas dans le transport HVDC,

seule la résistance et les tensions des deux extrémités déterminent la puissance transitée [25].

- Nombre de conducteur réduit ;
- La faisabilité de modulation rapide de la puissance peut être exploitée pour amortir les oscillations de réseau alternatif [27].
- Le transport d'énergie en continu HVDC peut porter plus de puissance pour une taille indiquée de conducteur, sa capacité est en effet 2 à 5 fois celle d'une ligne AC de même niveau de tension [28].
- Limitation des courants de défauts par blocage des valves ;
- Suppression du problème de puissance réactive ;



**Figure 2. 2.** Comparaison économique entre le transport en HVAC et HVDC [20].



**Figure 2. 3.** Comparaison de la largeur du couloir requis par les deux lignes HVDC 500 kV Three Gorges - Shanghai et par les lignes HVAC ayant la même capacité de transport [28].

## 2.5 Inconvénients du transport d'énergie en technique HVDC

A leur premier stade d'application le transport d'énergie en DC a été limité par les facteurs suivants :

- La difficulté d'interrompre les courants continus à haute tension exigeant des disjoncteurs à courant continu coûteux.

L'utilisation des transformateurs pour changer les niveaux de tension en courant continu est impossible.

- Le coût élevé des équipements dans les postes de conversion.
- Génération d'harmoniques qui exigent des filtres à AC et à DC, ceux-ci seront ajoutés au coût des postes de conversion.
- La complexité de contrôle.

## 2.6. Types des liaisons HVDC

Plusieurs types de liaison HVDC sont développés dans les différentes applications de la transmission HVDC :

- Liaison monopolaire ;
- Liaison bipolaire ;
- Liaison homopolaire ;
- Liaison dos à dos "back-to-back" ;
- Liaisons multi terminaux.

### 2.6.1. Système HVDC monopolaire

Dans une liaison monopolaire, les deux stations sont connectées par un seul conducteur, le retour est assuré par la terre ou la mer ce qui réduit le coût total de la transmission HVDC.

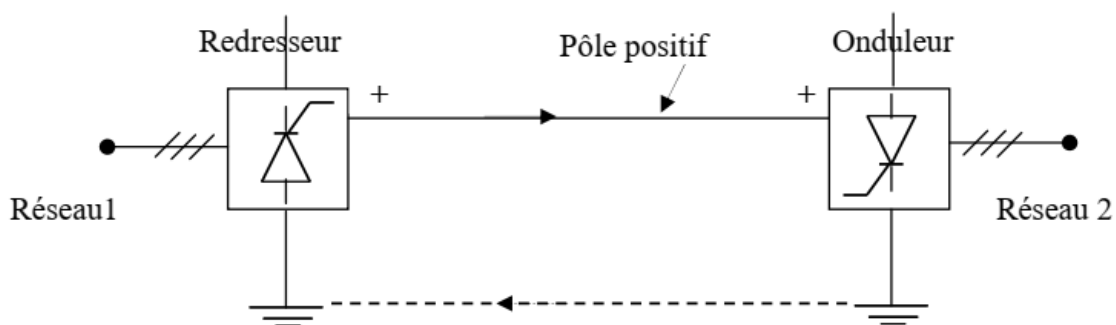


Figure 2.4. Lien HVDC monopolaire

### 2.6.2. Système HVDC bipolaire

Dans la transmission bipolaire, deux conducteurs sont utilisés. Étant donné que ces conducteurs doivent être dimensionnés pour la pleine tension, les coûts de ligne de transmission sont plus

élevés qu'un monopôle avec un conducteur de retour. Cependant, des avantages tels qu'un courant de terre négligeable, un fonctionnement en cas de défaut et des coûts de conducteur inférieurs en raison d'un courant plus faible, peuvent en faire une option intéressante. La configuration bipolaire est la configuration la plus couramment utilisée des systèmes de transmission d'énergie HVDC [29]. La liaison de circuit bipolaire est illustrée à la figure 2.5.

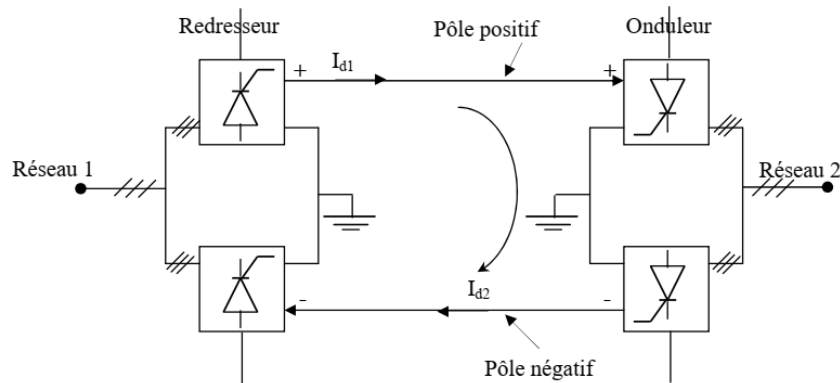


Figure 2.5. Lien HVDC bipolaire.

### 2.6.3. Système HVDC homopolaire

Dans ce type de liaison, deux conducteurs ayant la même polarité (généralement négative) peuvent être utilisés avec le retour à la terre ou la mer. Chaque conducteur est parcouru par un courant venant du poste de conversion correspondant. Un lien homopolaire a l'avantage de réduire le coût d'isolation. En cas de défaut, un pôle fonctionnera en mode monopolaire avec la moitié de la puissance nominale [26].

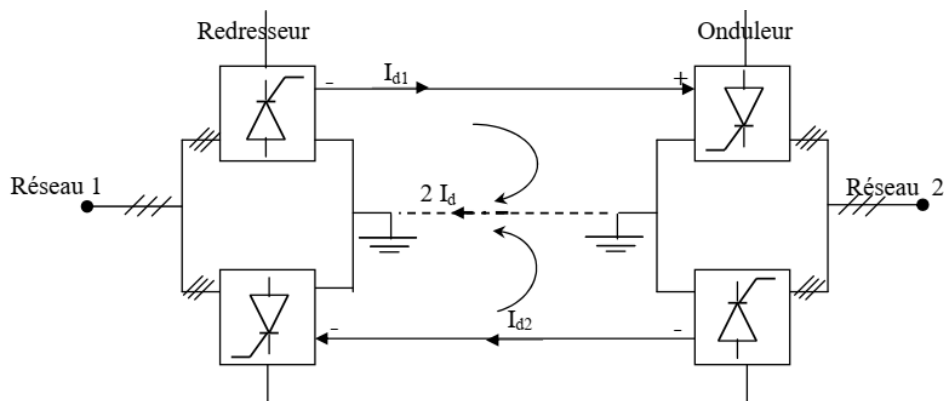


Figure 2.6. Lien HVDC homopolaire

### 2.6.4. Système HVDC dos à dos.

Dans une configuration dos à dos, les deux stations de conversion sont situées dans la même zone et généralement dans le même bâtiment. Cela ne nécessite aucune ligne de transmission ou câble entre les stations de conversion. Ils peuvent être connectés soit en monopôle, soit en bipolaire.

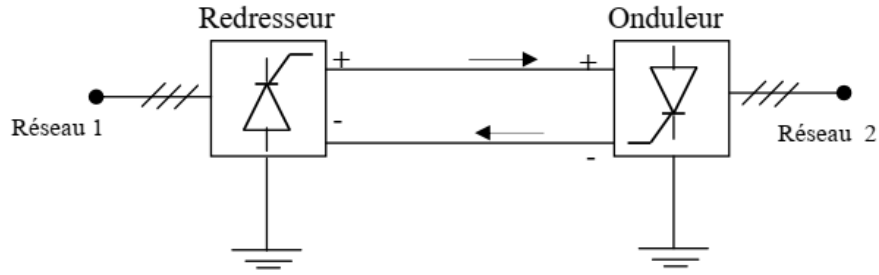


Figure 2.7. Lien HVDC dos à dos

### 2.6.5. Système HVDC multi-terminal

Les transmissions DC entre deux terminaux peuvent être bipolaires ou monopolaires. Pour une transmission par ligne aérienne, le mode bipolaire est privilégié, alors pour des transmissions par câble, une configuration monopolaire est adoptée

### 2.7. Composition du système HVDC

Un système HVDC est un équipement d'électronique de puissance utilisé pour la transmission de l'électricité en courant continu en haute tension. Les éléments essentiels constituant un système HVDC sont :

- ✚ Les stations de conversion (redresseur et onduleur) ;
- ✚ Ligne HVDC ;
- ✚ Les inductances de lissage  $L_1$  et  $L_2$  ;
- ✚ Les filtres des harmoniques de cotés alternatifs et continus  $F_{AC}$  et  $F_{DC}$  ;
- ✚ Les transformateurs ;
- ✚ Les sources de puissance réactives ;
- ✚ Les électrodes de la mise à la terre ;
- ✚ Une liaison par fibres optiques ou micro-ondes entre les postes de conversions ;
- ✚ Systèmes de contrôle et de protection ;
- ✚ Services auxiliaires.

### 2.8. Conclusion

Dans cette étude, nous avons présenté brièvement les systèmes HVDC, leurs avantages et inconvénients, ainsi que le principe de fonctionnement. Le développement rapide et le succès des transmissions HVDC ont offert une nouvelle stratégie de fonctionnement des réseaux électriques très compétitive, flexible et efficace pour la transmission de l'énergie électrique.



---

## Chapitre 03

---

# **APPLICATION DU CHAMPS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES SUR LA LIGNE**

### 3.1 Introduction

Dans les zones où l'espace est étroit, ce sera un problème difficile pour la construction d'une nouvelle ligne de transmission d'ouvrir un nouveau corridor. Ainsi, une solution efficace à ce problème est l'érection parallèle de lignes HVAC et HVDC, appelé corridor hybride (Figure 3.1.). [30] Cependant, La composante de champ électrique AC et DC formeront une distribution spéciale du champ électrique hybride, résultant en un nouvel effet de champ électrique hybride.

Le champ électrique hybride est le résultat des lignes DC et AC. Il est important de prêter attention à la distribution des composantes de champ électrique AC et DC, respectivement, et aux caractéristiques de superposition du champ électrique hybride. Cela déterminera la conception optimale des lignes de transmission.

Dans ce chapitre, en raison des avantages de calcul de la méthode des éléments finis (FEM), ces méthodes sont utilisées dans le calcul, en utilisant un logiciel COMSOL MULTIPHYSICS (COMSOL 5.6). L'objectif du travail est le calcul de l'intensité du flux magnétique et champ électrique au voisinage de la ligne aérienne  $\pm 800$  kV HVDC et 750 kV HVAC dans le même corridor.

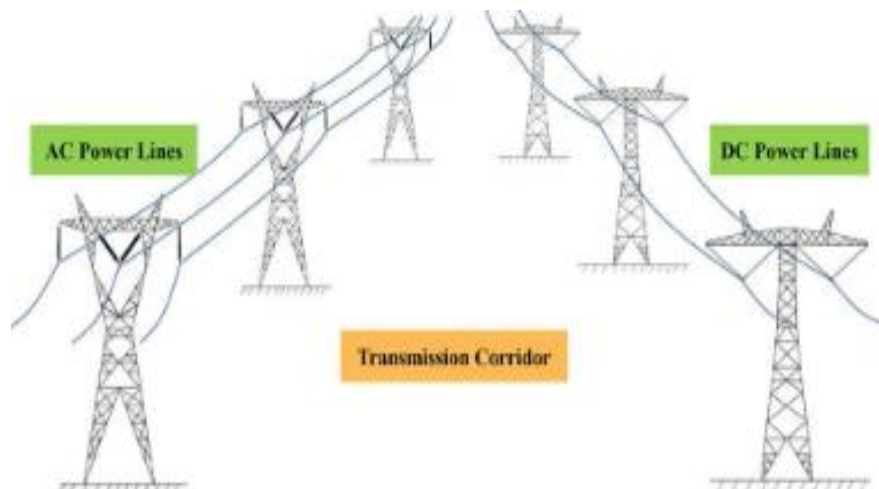


Figure3.1. Configuration d'un corridor hybride [29].

### 3.2 Modélisation en électromagnétique avec COMSOL 2D

#### 3.2.1 Introduction sur le programme COMSOL MULTIPHYSIQUES

Les simulations bidimensionnelles ont été réalisées avec le logiciel COMSOL MULTIPHYSIQUES. V.5.6, qu'est un logiciel commercial utilisé pour les simulations bidimensionnelles et tridimensionnelles. Il offre les mêmes possibilités de modélisation et aussi basé sur la formulation indirecte de la Méthode d'Elément Finis. Ce logiciel permet de simuler des nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

### 3.2.2 Etapes de la méthode des éléments finis

C'est la méthode la plus utilisée vue sa généralisation et sa capacité de résoudre les problèmes les plus complexes, le système d'équations algébriques est obtenu en appliquant la méthode des résidus pondérés, ou la méthode variationnelle, la résolution du système permet d'obtenir la solution du problème original [4]. La méthode des éléments finis peut être résumée [5] dans les étapes suivantes :

- Discrétisation du domaine ;
- Formulation intégrale des équations différentielles partielles ;
- Choix des fonctions d'interpolation ;
- Formation des matrices et vecteurs élémentaires ;
- Assemblage ;
- Résolution du système algébrique globale.

Actuellement, il existe différents logiciels qui utilisent cette méthode comme le FEMLab, Maxwell, Flux2D et FEMM. Dans la suite de ce travail, nous avons utilisé le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS version 5.6. Les étapes de résolution peuvent être résumées selon l'organigramme montré dans la figure 3.2.

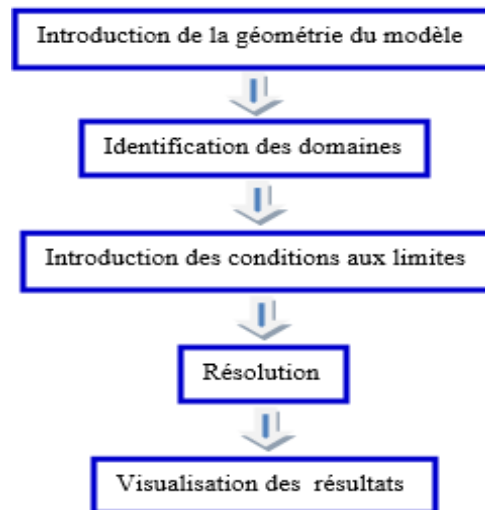


Figure 3.2. Diagramme de différentes étapes de résolution.

#### a. Première étape

La première étape consiste à définir la géométrie entière de la ligne électrique (figure 3.3.).

La hauteur des lignes DC est  $H_1$  et celle des lignes AC est  $H_2$ . La distance d'espacement polaire des lignes DC bipolaires et la distance d'espacement de phase des lignes AC sont respectivement  $S_1$  et  $S_2$ . Afin de décrire la distance entre les lignes DC et AC, la distance de séparation  $L$  est définie, comme illustré à la Figure 3.3.  $L$  est la distance horizontale entre les lignes polaires

négatives (N) et les lignes de phase A (A), qui est la distance la plus proche entre les lignes DC et AC. D'autres paramètres structurels des lignes de transmission DC et AC sont indiqués dans le tableau 3.1.

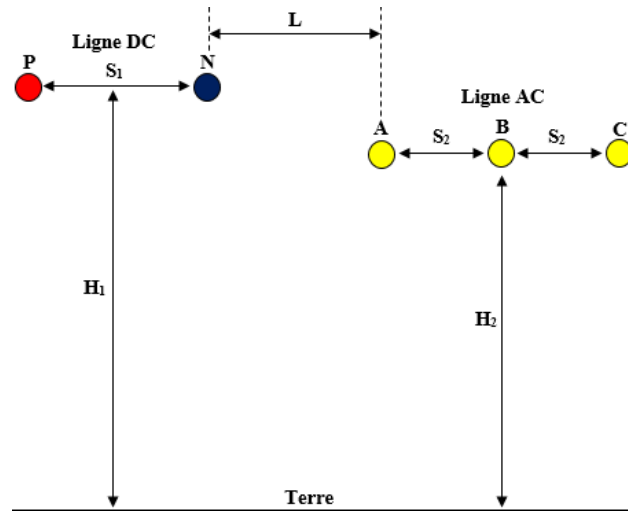


Figure 3.3. Modèle des lignes de transmission DC et AC dans le même couloir [31]

Tableaux 3.1. Paramètres structurels [31]

Lignes de transmissions	DC	AC
hauteur des lignes, m	20	18
distance d'espacement, m	22	16
distance fractionnée, m	0.45	0.4

### b. Deuxième étape (définir les matériaux)

La deuxième étape porte sur la définition des propriétés électriques des matériaux présents. Cela consiste à définir les permittivités relatives ordinaires et les conductivités volumiques. Une fois que les données nécessaires aux modèles de la ligne électrique sont résumées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.12. Caractéristique de la ligne électrique.

Domaine	Constante diélectrique relative $\epsilon_r$	Conductivité $\sigma$ . [S/m]
Conducteur (Aluminium)	1	3.774e7
Air	1	0

### c. Troisième étape (maillage et l'étude)

La troisième étape porte sur la définition du maillage qui consiste à discrétiser les différentes interfaces entre les matériaux en éléments finis. Le maillage se fait automatiquement ou manuellement comme montre dans la figure 3.4.

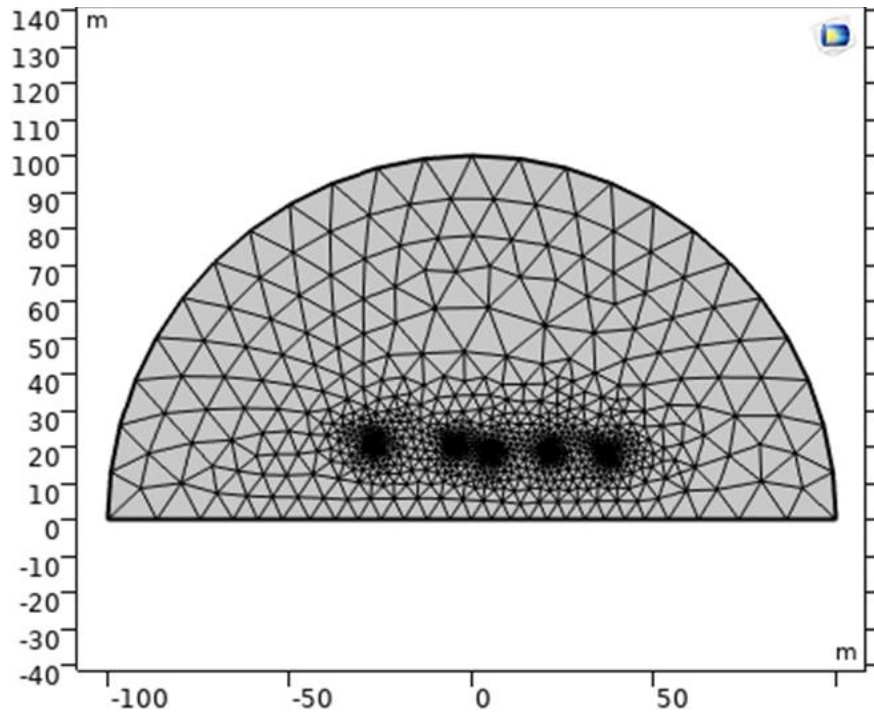


Figure 3.4. Le maillage.

#### d. La quatrième étape

La quatrième étape consiste à la résolution du problème par l'application de la méthode numérique et par la construction du système d'équations [32].

Suivant la taille du problème, on peut choisir de résoudre le système d'équations soit directement pour un faible nombre d'inconnues ou soit itérativement pour des problèmes de grande taille.

#### ✚ Modèle de simulation d'une ligne hybride AC/DC dans l'espace 2D

Le modèle numérique par éléments finis a été utilisé dans COMSOL Multiphasiques pour calculer le champ électrique. Les équations de Maxwell1 suivantes ont été utilisées pour les simulations [19]. Les paramètres spécifiques du modèle de simulation sont résumés dans le tableau 3.3.

$$E = -\nabla V \quad (5)$$

$$\nabla \cdot J = -Q \quad (6)$$

$$J = \sigma E + \frac{dD}{dt} + J_e \quad (7)$$

Tableau 3.3. Paramètres du modèle de simulation

Système HVDC	$V_{DC+}=800\text{kV}$ $V_{DCN}=0\text{V}$ $V_{DC-}=-800\text{kV}$
Système -HVAC-750-kV	$V_{L1}=750\text{kV} \cdot \sin(314 \cdot t)$ $V_{L2}=750\text{kV} \cdot \sin(314 \cdot t + 2\pi/3)$ $V_{L3}=750\text{kV} \cdot \sin(314 \cdot t - 4\pi/3)$

### ✚ Équations gouvernantes

Lorsque les lignes DC et AC sont proches l'une de l'autre, il y a une ondulation AC du champ électrique à la surface des lignes DC. De même, il y a une polarisation continue du champ électrique à la surface des lignes AC. Le champ électrique dépendant du temps change tout le temps car la tension alternative varie dans le temps. Les équations mathématiques de ces problèmes sont exprimées comme suit :

$$\nabla^2 \phi = (-\rho^+ - \rho^-) / \epsilon_0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho^+}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^+ k^+ E) = -R \rho^+ \rho^- / e \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho^-}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho^- k^- E) = -R \rho^+ \rho^- / e \quad (10)$$

Où  $\phi$  est le potentiel électrique de l'espace,  $\rho^+$  est la densité de charge positive,  $\rho^-$  est la densité de charge négative,  $\epsilon_0$  est la constante diélectrique de l'air,  $k^+$  et  $k^-$  sont les mobilités ioniques des charges positives et négatives respectivement,  $e$  est la charge d'un électron ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ),  $R$  est le taux de recombinaison ionique des charges positives et négatives, et  $E$  est l'intensité du champ électrique.

#### e. La cinquième étape

La dernière étape consiste à l'affichage des résultats comme le champ électrique, et champ magnétique suivant que l'on travaille en statique ou quasi-statique, leur module, leur partie réelle ou imaginaire ainsi que les composantes normales et tangentielles du champ électrique [32,33].

### 3.3 Calcul du champ électrique et magnétique

Quelques changements dans la conception de la ligne peuvent affecter les intensités du champ électromagnétique à son voisinage différemment de ceux sous les conducteurs.

Les principaux paramètres considérés sont : le type de la ligne, la hauteur et l'espacement des phases.

Les intensités de champs maximales sont déterminées en fonction des paramètres géométriques non dimensionnels.

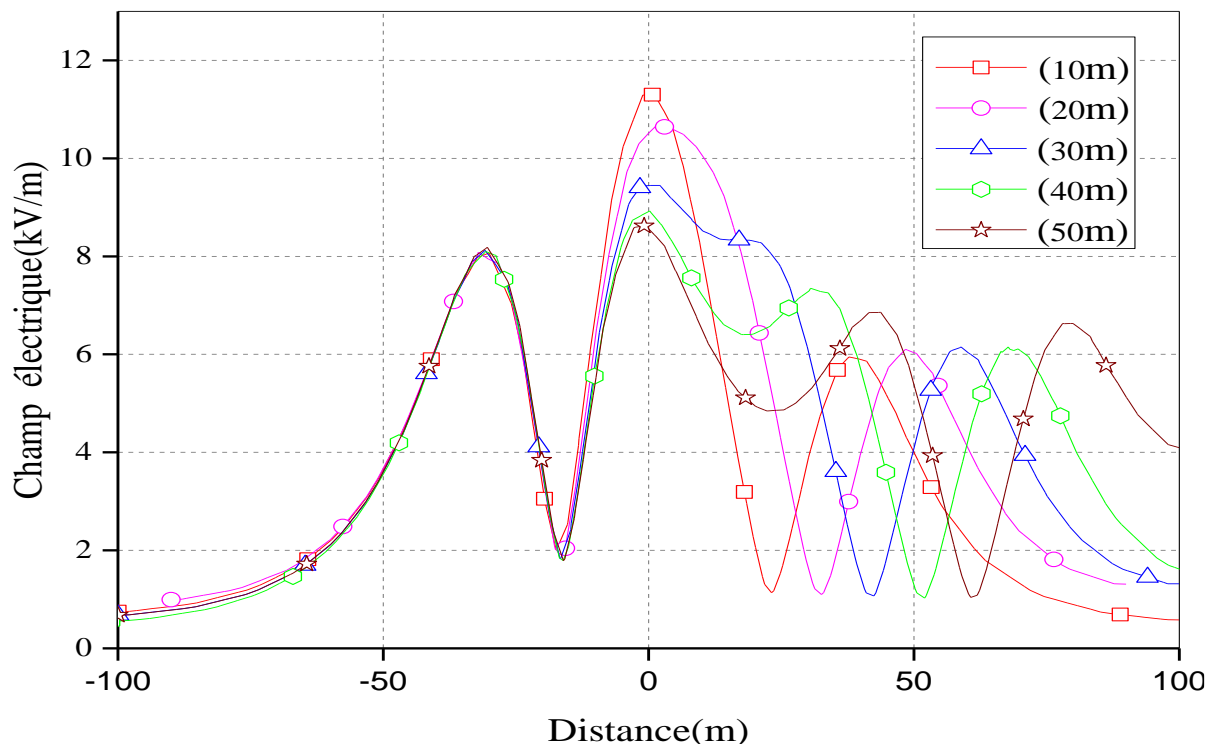
#### 3.3.1 Effet de la distance entre les lignes HVDC et HVAC

Lorsque les lignes DC et AC se trouvent dans le même couloir, les hauteurs des lignes de transmission DC et AC doivent satisfaire aux exigences de hauteur des lignes DC ou AC circulant seules. La figure 3.5 illustre la variation du champ électrique d'une ligne hybride pour plusieurs distances entre les lignes HVDC et HVAC différentes : 10, 20,30,40 et 50 m.

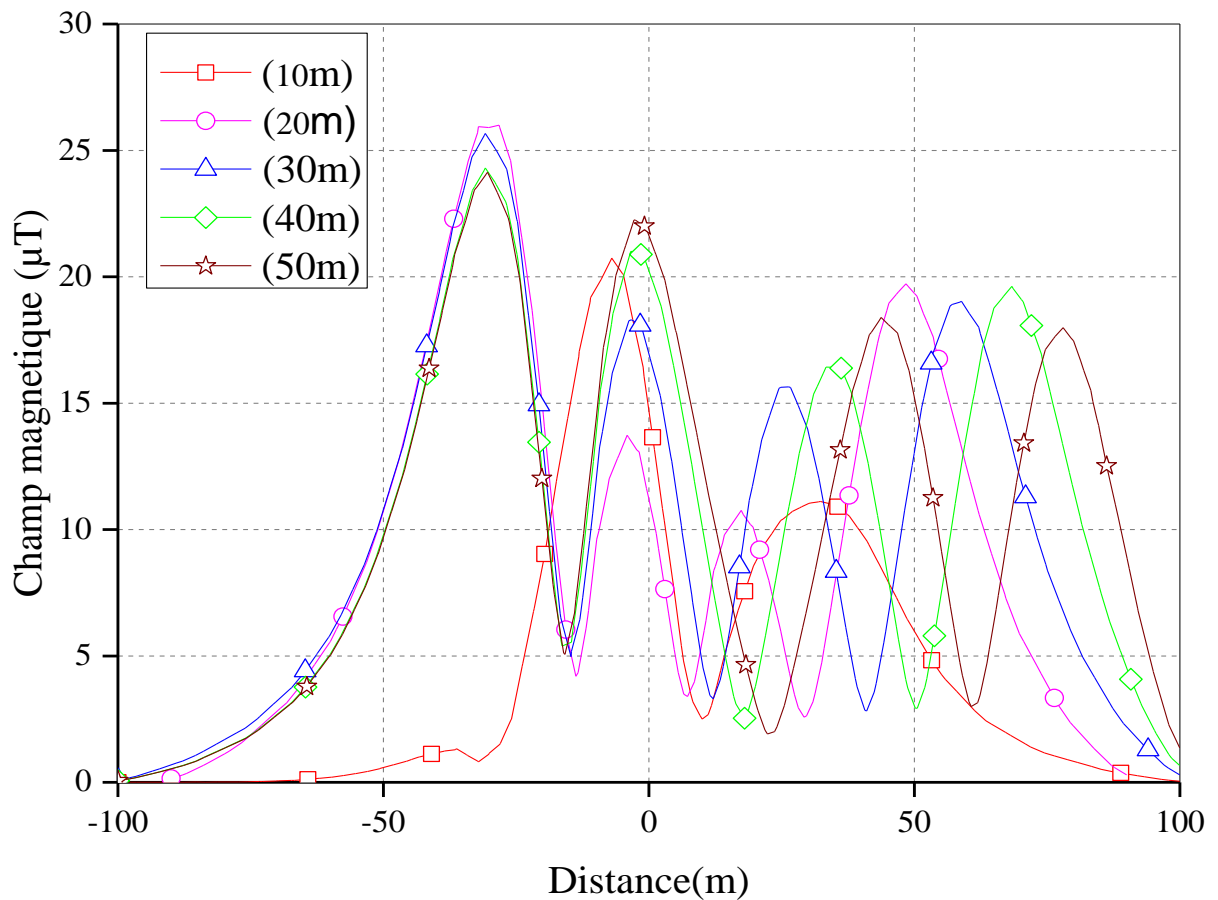
D'après la figure ci-dessous on peut constater que si la distance de séparation est plus petite, les parties supérieures des composantes de champ électrique AC et DC se chevaucheront, créant un champ électrique hybride plus grand près du centre du couloir. De plus, la valeur de contrôle hybride est fondamentalement égale à la composante de valeur de contrôle AC ou DC à proximité de leurs lignes respectives lorsqu'elle est éloignée du centre du couloir.

À partir des figure 3.5, Nous remarquons que lorsque la distance de séparation est plus petite (par exemple  $L = 10\text{ m}$ ), il y a un effet de couplage entre les composantes de champ électrique AC et DC, en particulier la ligne DC a un effet de blindage sur la valeur de crête du champ électrique AC sous la phase C qui est plus proche des lignes DC, et la valeur de champ électrique hybride peut être considérée comme la composante de champ électrique AC ou DC à proximité leurs lignes respectives.

L'espace des types de la ligne agit sur l'intensité du champ magnétique génère par la ligne de la même façon que pour le champ électrique. On peut voir sur la figure (3.6), que l'intensité du champ magnétique généré par notre modèle de ligne choisit augmentent à proximité des conducteurs des lignes entre temps les couplages inductifs entre les deux circuits de lignes diminuent au-delà de 10m.



**Figure 3.5.** Champ électrique à différentes distances de séparation par une ligne électrique hybride à 2m du sol.



**Figure 3.6** Champ magnétique à différentes distances de séparation par une ligne électrique hybride à 2m du sol.

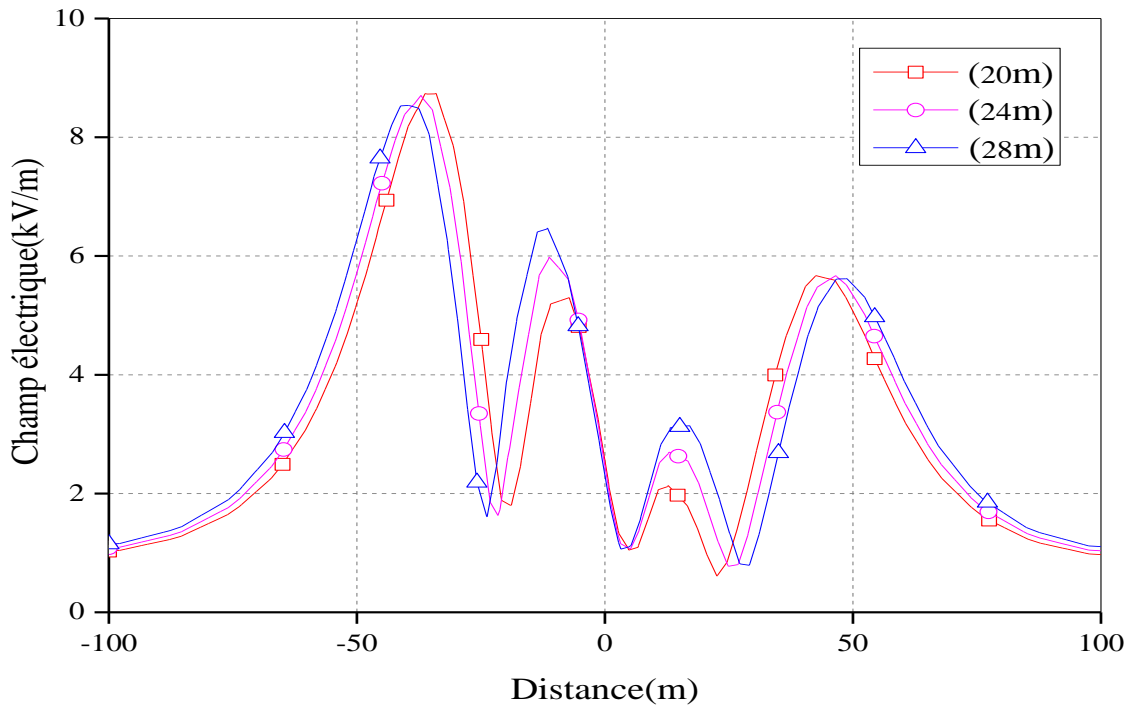
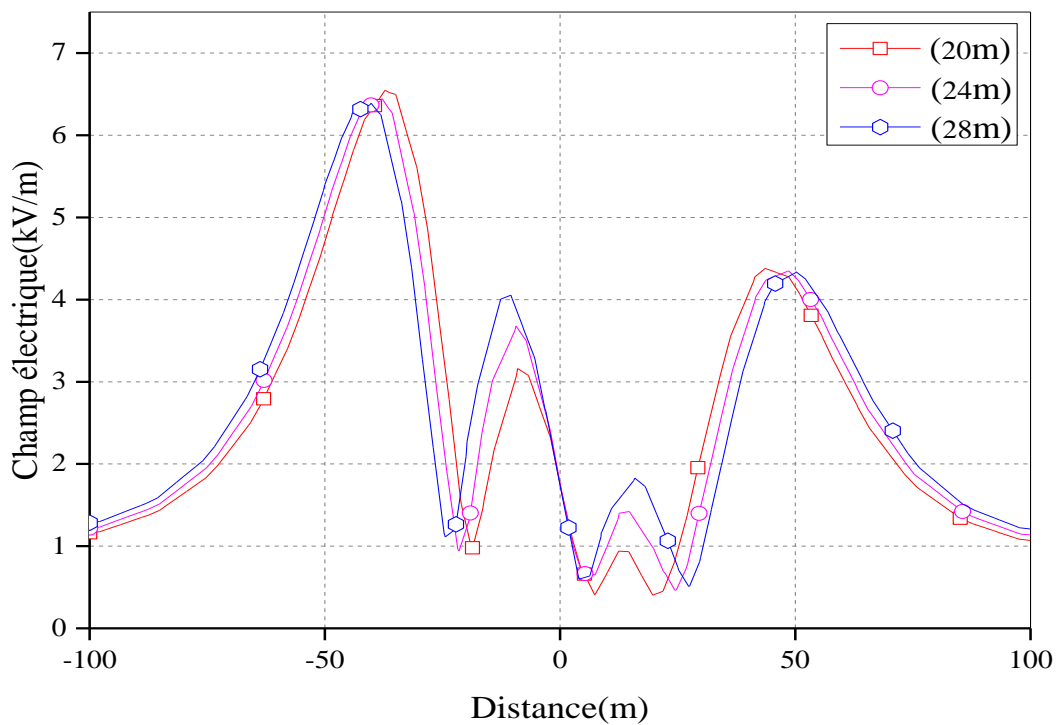
### 3.3.2 Effet de hauteur au sol

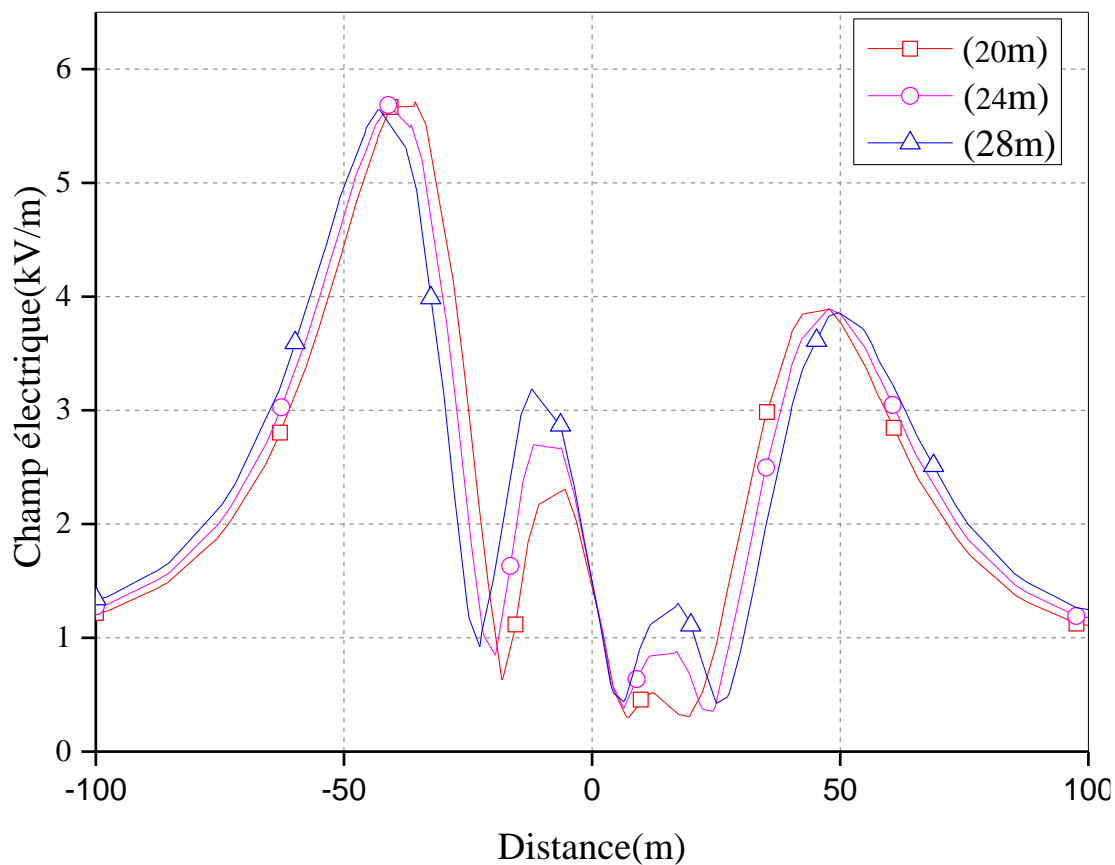
D'après le figure 3.7, on peut constater que si la distance de séparation est  $< 20$  m, les hauteurs des lignes DC et AC doivent être considérablement augmentées pour répondre à l'exigence de la valeur limite du champ électrique. Sur la figure 3.7, les valeurs de contrôle du champ électrique hybride sont répertoriées à différentes hauteurs de lignes DC, la hauteur des lignes AC passant de 20, 24 et 28 m. de plus, à mesure que la hauteur de la ligne augmente, le gradient de la valeur de contrôle maximale du champ électrique diminue, c'est-à-dire que l'effet de l'augmentation de la hauteur des lignes pour réduire le champ électrique diminue, comme le montre la Fig. 3.7. De plus, la largeur du couloir dépend principalement de la taille de la distance de séparation lorsque la hauteur minimale peut répondre aux exigences de valeur limite du champ électrique hybride. Lorsque la hauteur de la ligne DC augmente jusqu'à une certaine valeur, la hauteur minimale de la ligne AC requise pour respecter la valeur limite est fondamentalement la même.

La figure 3.8 illustre la variation du champ magnétique le long d'un profilé situé à 2 m au-dessus d'une ligne du système hybride traversé par un courant de 2000 A pour trois valeurs de

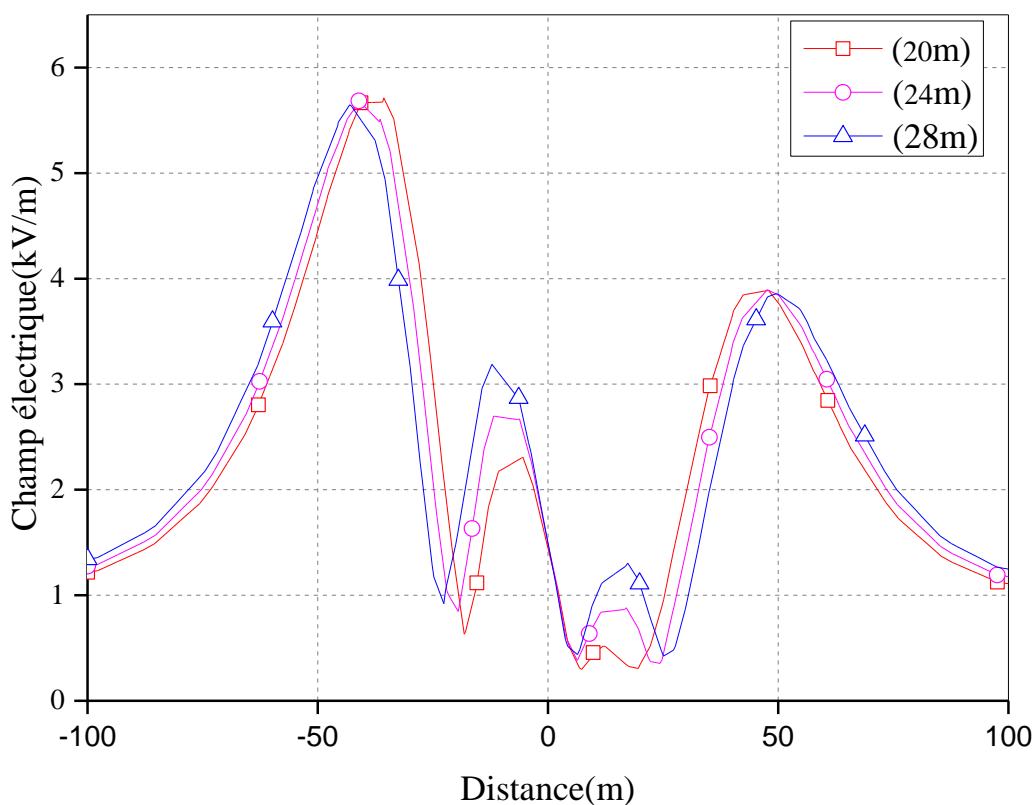


la hauteur des lignes au sol : 20, 24 et 28 m. Nous remarquons que l'espacement des phases agit sur l'intensité du champ magnétique de la même façon que pour le champ électrique : l'intensité du champ magnétique augmente avec l'augmentation des distances entre phases. Nous constatons une nette diminution du champ magnétique lorsque la hauteur de la ligne augmente car le champ magnétique est inversement proportionnel au rayon d'observation.

a.  $H = 20$  mb.  $H = 22$  m

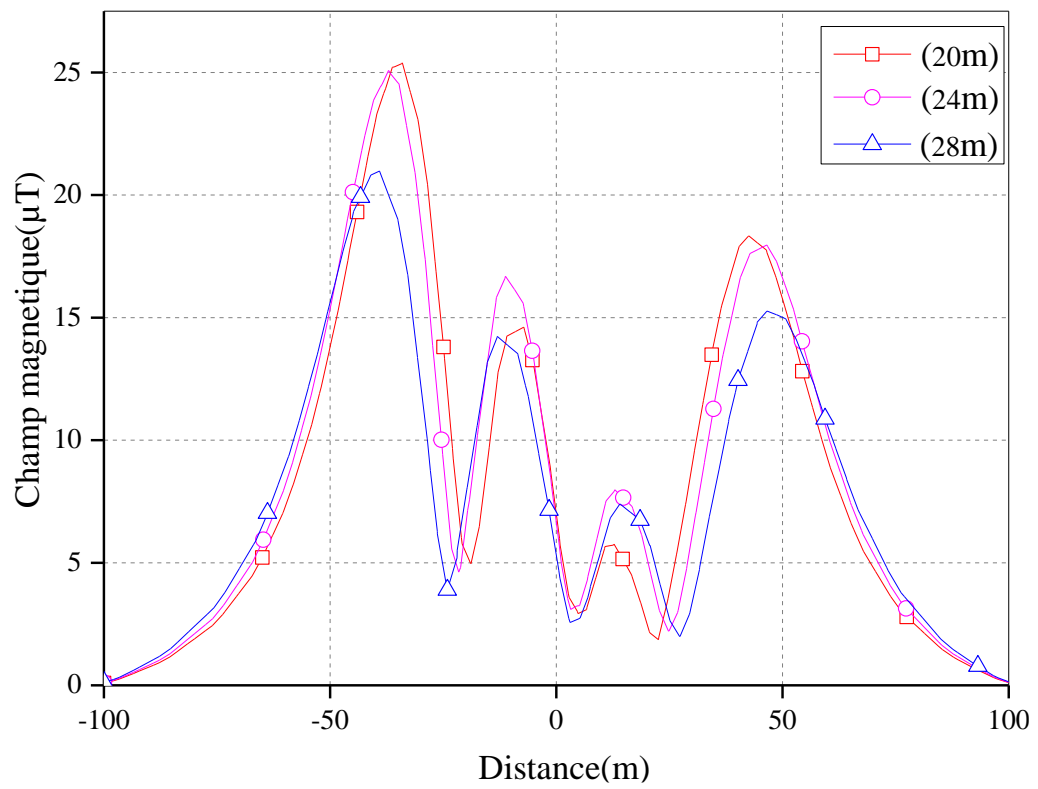


c. H = 24 m

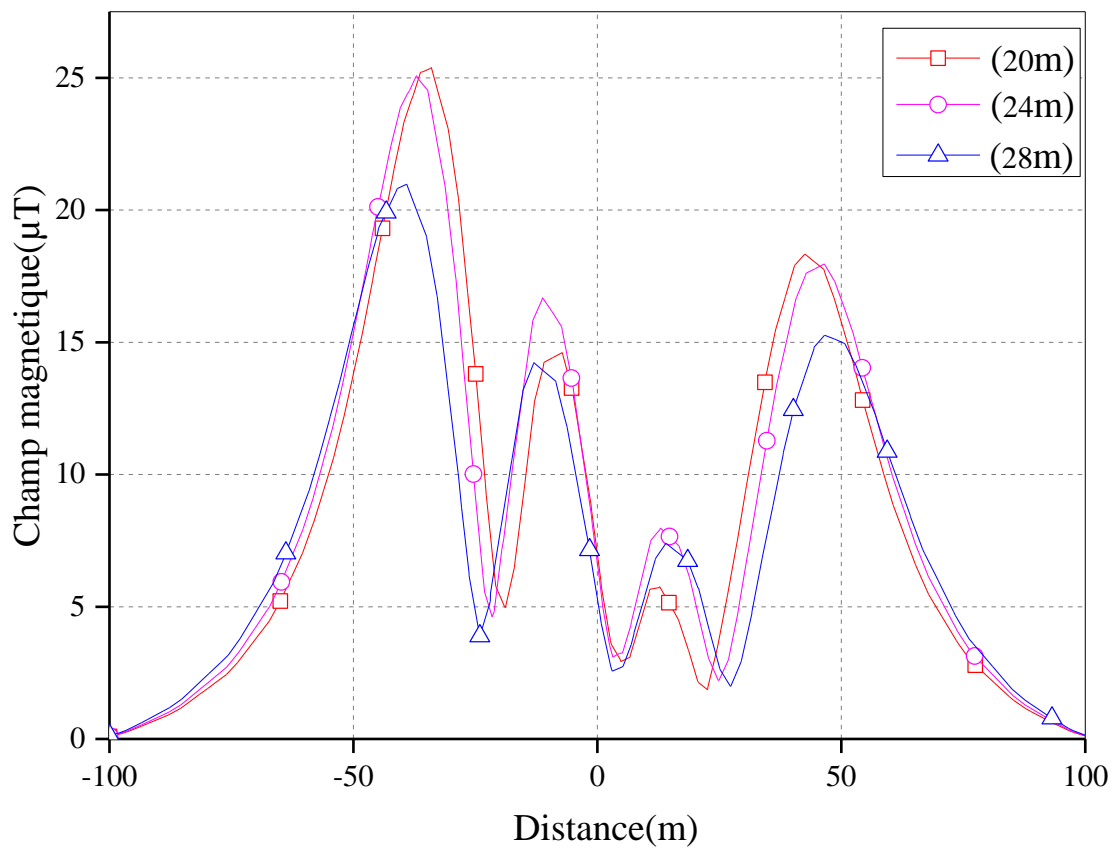


d. H = 26 m

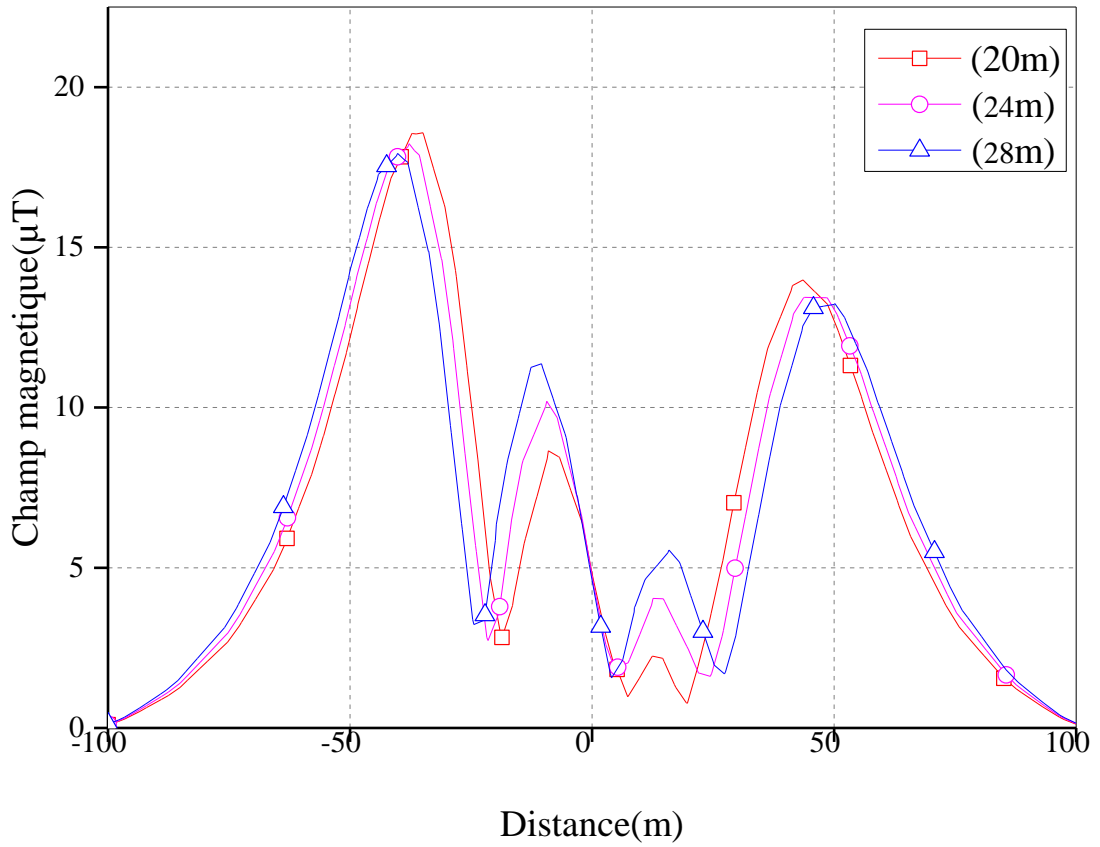
Figure 3.7. Valeur de contrôle du champ électrique hybride à différentes hauteurs de lignes DC



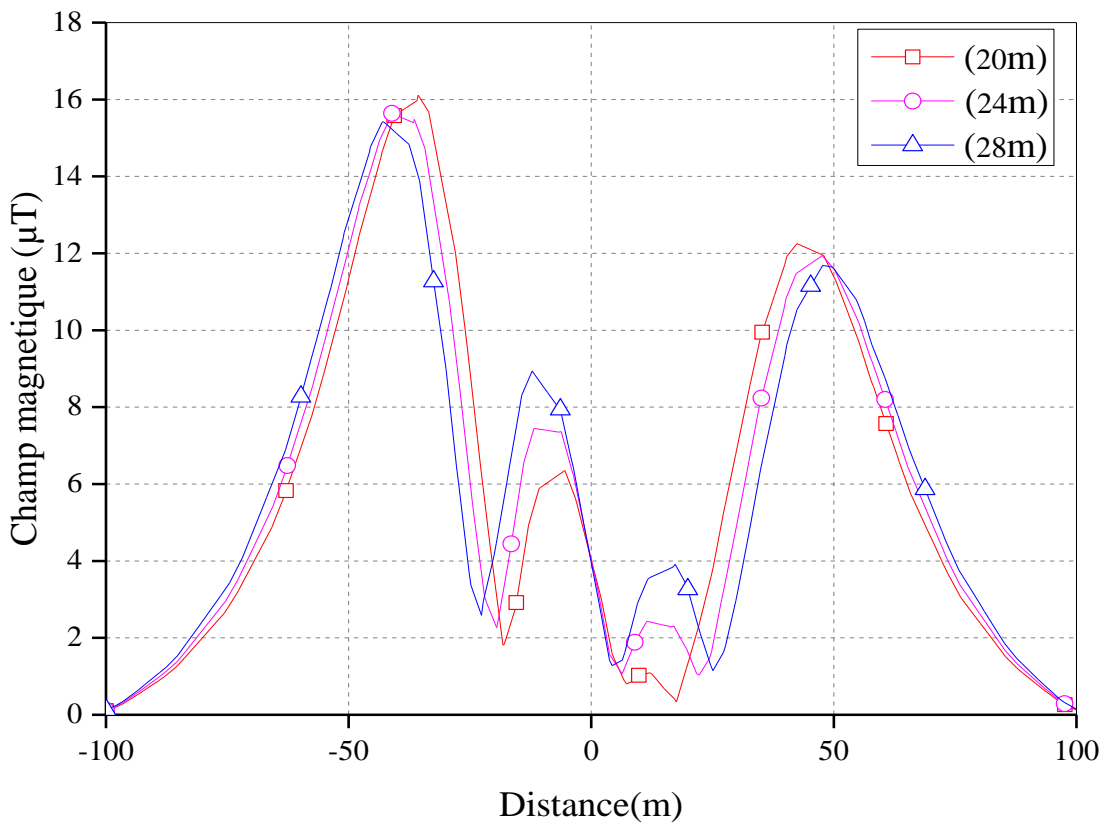
a.  $H = 20\text{ m}$



b.  $H = 22\text{ m}$



c. H = 24 m



d. H = 26 m

**Figure3.8.** Valeur de contrôle du champ magnétique hybride à différentes hauteurs de lignes DC.

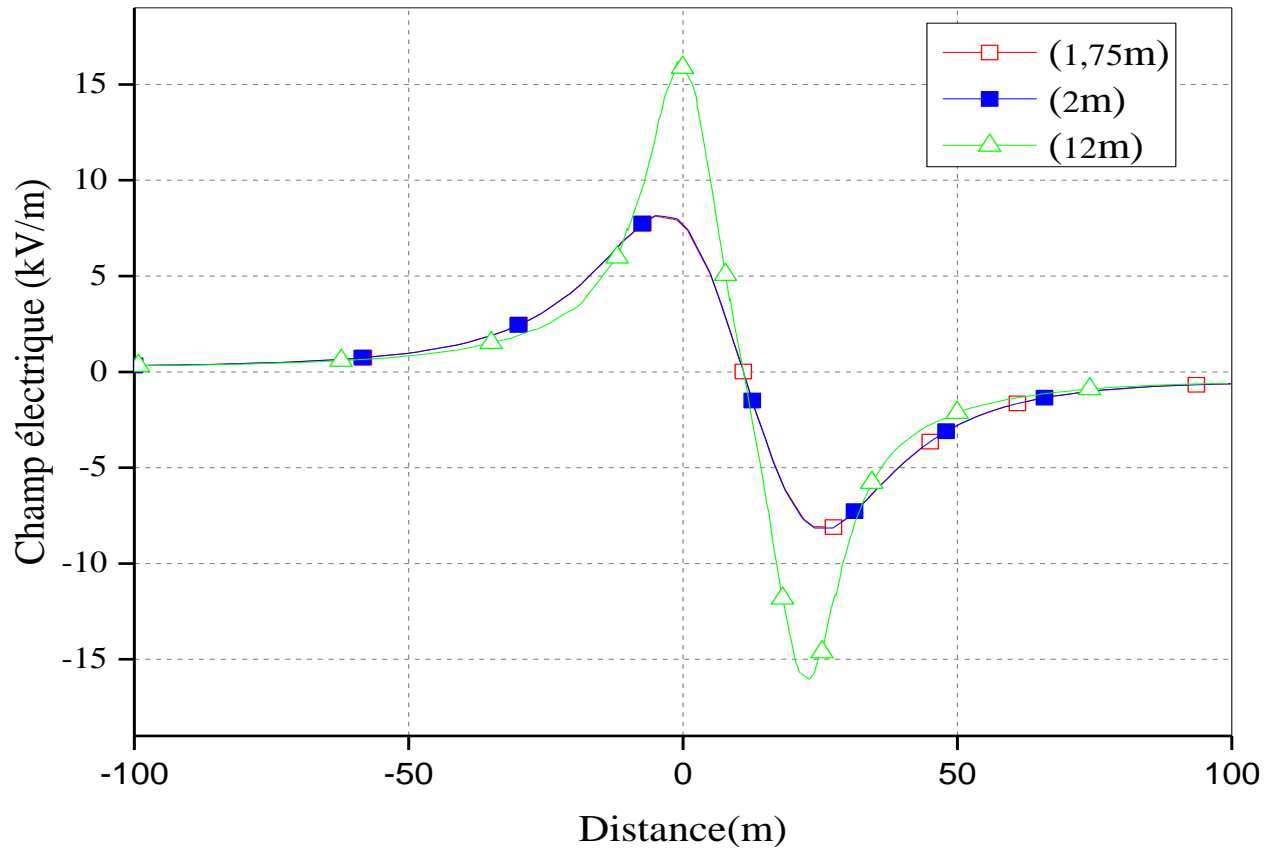
### 3.3.3 Variation du champ électrique et magnétique à 1.75, 2 & 12 m au-dessus du sol.

Les figures (3.9.a, b et c) montrent la variation du champ électrique en fonction de la distance, où on remarque que y'a deux valeurs maximales ( $E = 6.221\text{kV/m}$  pour 1.75m,  $6.3574\text{kV/m}$  à 2m et  $12.9\text{kV/m}$  à 12 m) pour une tension appliquée égale à 750kV (figure 3.9.b). On dispose des profils de champ électrique dans une bande de terrain de 100m centrée sur l'axe de la ligne. Au-delà de 10m de l'axe de la ligne, on observe une décroissance rapidement si on s'éloigne de la ligne, a une distance de 50 mètres, la valeur est environ cinq fois plus faible que la valeur maximale rencontrée sous la ligne. Si la hauteur des conducteurs par rapport au sol augmente ces deux maximums se déplacent plus à l'extérieur. Ce phénomène est dû à l'augmentation des capacités entre phases par rapport à la capacité-terre,

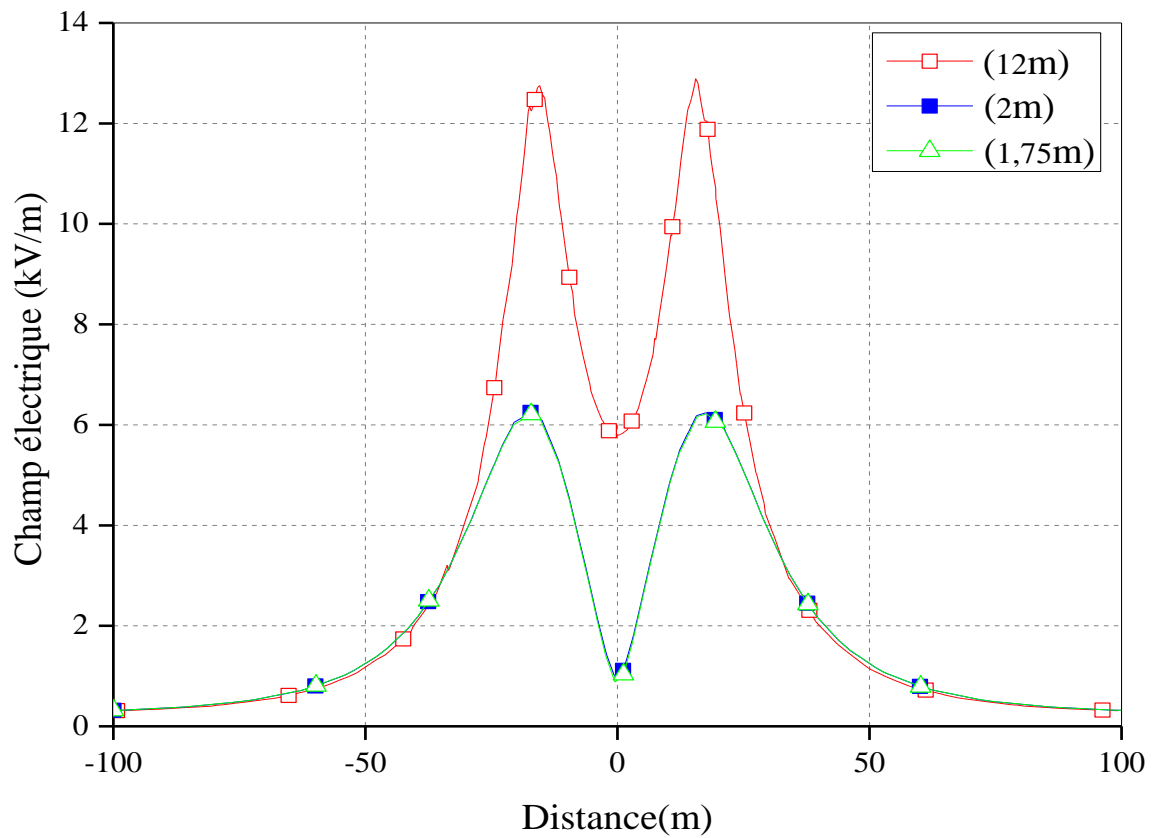
La figure 3.9.a montré le champ électrique total au niveau du sol autour des lignes de transmission à deux croisements  $\pm 800\text{ kV}$  avec des fils de terre. On peut voir que la distribution régulière du champ électrique dans la direction x et la direction y est conforme à la distribution régulière des deux lignes fonctionnantes séparément. Où on remarque que y'a deux valeurs du champ électrique maximale et minimale pour une tension appliquée égale à  $\pm 800\text{kV}$  et le champ électrique au niveau de la flèche moyenne du conducteur qui est égale à 12 m augmente aux distances de 1.75et 2 m au-dessus du sol.

Le champ électrique au niveau de la flèche moyenne du conducteur qui est égale à 12 m et à 1.75& 2 m au-dessus du sol pour le système hybride, sont montrées dans les figures (3.9.c)

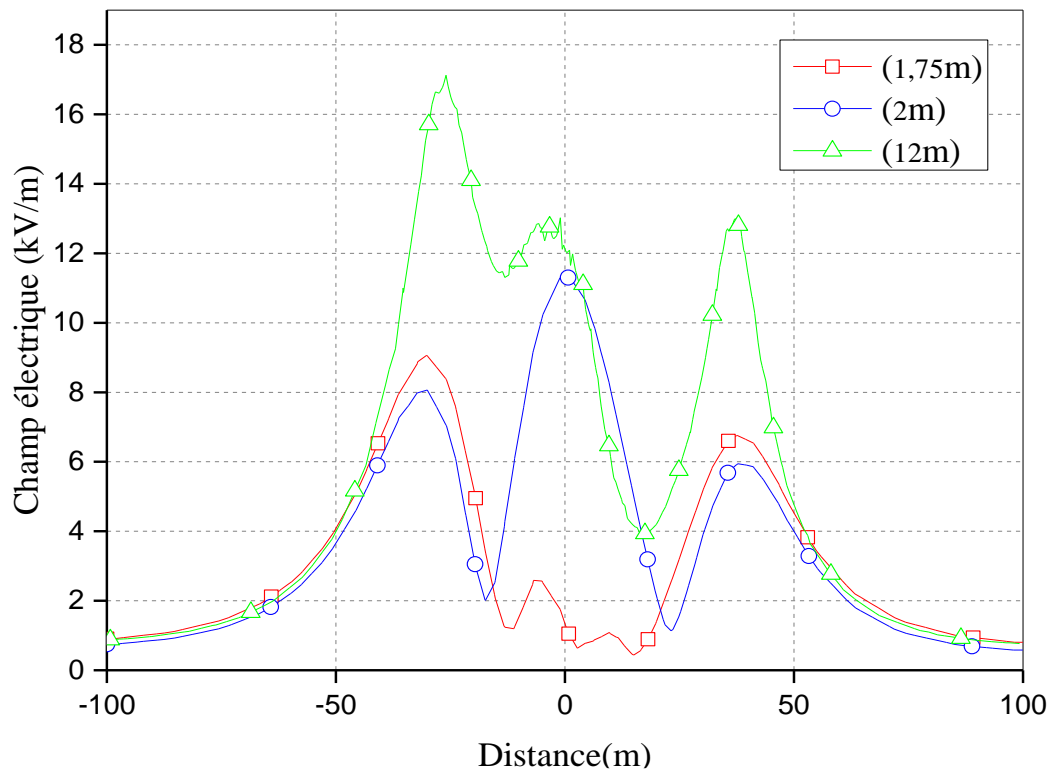
D'après ces courbes nous pouvons remarquer que le champ électrique augmente au fur et à mesure qu'on s'approche des conducteurs de la ligne et diminuer lorsqu'on s'éloigne de ces derniers. Les valeurs du champ au voisinage du sol sont suffisamment inférieures aux limites établies, par contre et pour les autres niveaux au-dessus de sol, les intensités des champs sont très importantes.



a. DC



b. AC



c. Hybride

**Figure 3.9.** Profil du champ électrique pour des niveaux entre 1.75 m et 2 m et 12 m.

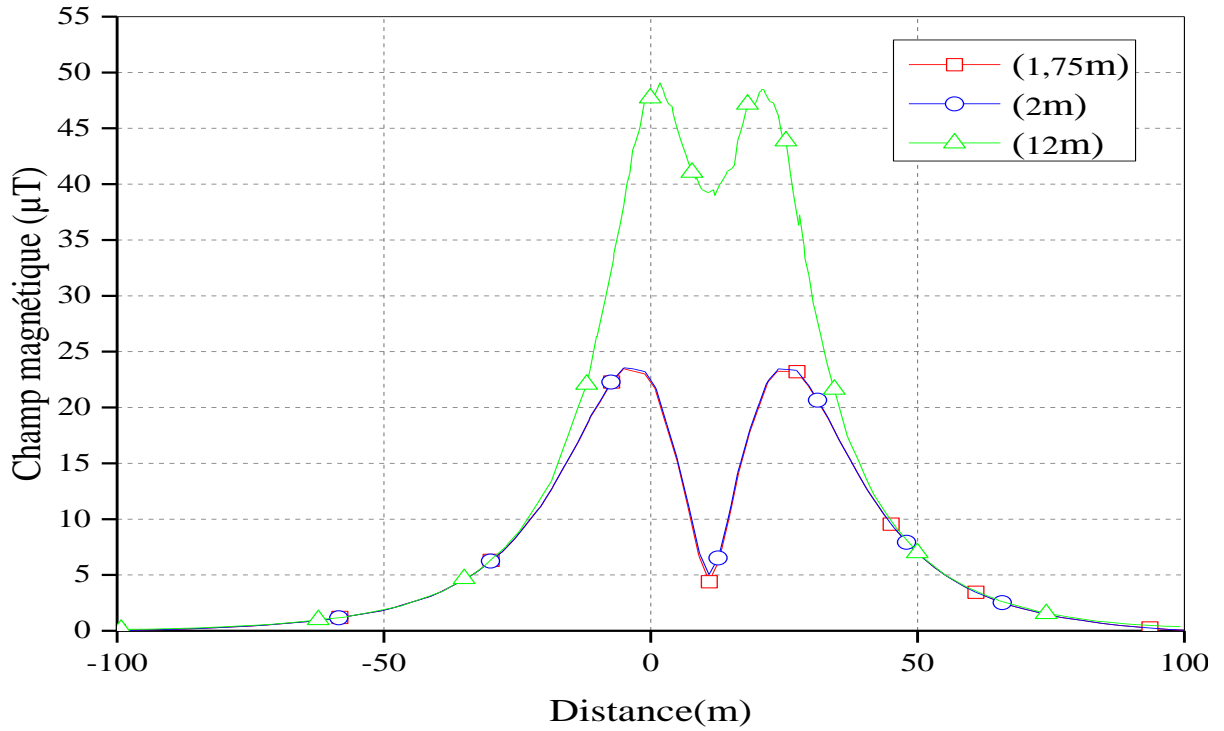
Les résultats sont présentés sous forme des courbes de variation du champ d'induction magnétique en fonction de la distance à l'axe de la ligne, les valeurs de l'induction sont calculées pour un même point de mesures par le niveau de la flèche de la ligne (12 m), à l'en-tête humain (1,75 m) et à 2 m au-dessus du sol.

Les figures (3.10.a., b et c) montrent la variation du champ magnétique en fonction de la distance, où on remarque que y'a deux valeurs maximales  $B_{\max} = 24.721 \mu\text{T}$  pour 1.75m,  $B_{\max} = 24.821 \mu\text{T}$  à 2m et  $B = 49.61 \mu\text{T}$  à 12 m) pour une tension appliquée égale à  $\pm 800 \text{ kV HVDC}$ . Pour la valeur appliquée du potentiel électrique est  $V = 750 \text{ kV}$  avec un courant de  $I = 2000 \text{ A}$ . Pour cette ligne la courbe  $B = f(x)$  présente un extrémum situé au-dessous de la phase centrale. Nous remarquons que cette courbe a une symétrie par rapport à l'axe de la ligne d'induction maximale du champ magnétique  $B_{\max} = 29.67 \mu\text{T}$  pour 1.75m et  $B_{\max} = 29.84 \mu\text{T}$  pour 2m, (figure 3.10.b) et le champ magnétique augmente au niveau de la flèche, et atteint un maximum  $B_{\max} = 33.4 \mu\text{T}$  a une distance située entre le conducteur latéral et la centrale, et il se réduit lentement jusqu'au point de symétrie d'où il croit de nouveau.

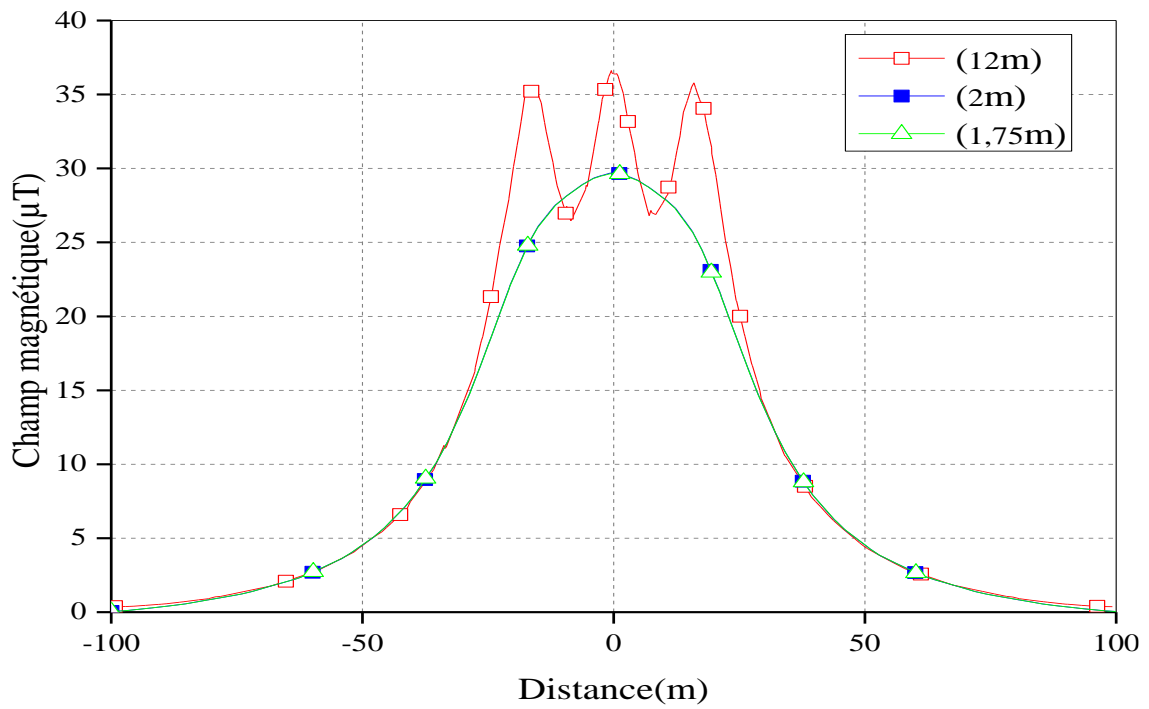
Pour le système hybride le champ magnétique et au niveau des conducteurs de ligne qui est égale à 12 m à niveau de la flèche, à l'en-tête humain (1,75 m) et à 2 m au-dessus du sol pour la même courant électrique de 2000A, est montré dans le figure (3.10.c). On remarque que la

valeur maximale du champ magnétique est égale  $24.67\mu\text{T}$  pour  $1.75\text{m}$  et  $B_{\text{max}} = 21.84\mu\text{T}$  pour  $2\text{m}$  et  $B_{\text{max}} = 50\mu\text{T}$  à  $12\text{m}$ .

Les valeurs du champ magnétique augmentent aussi lorsqu'on s'approche aux conducteurs de la ligne. Les intensités de champ magnétique (pour un courant  $I=2000\text{A}$ ) auprès de sol sont presque négligeables par rapport aux limites établies.

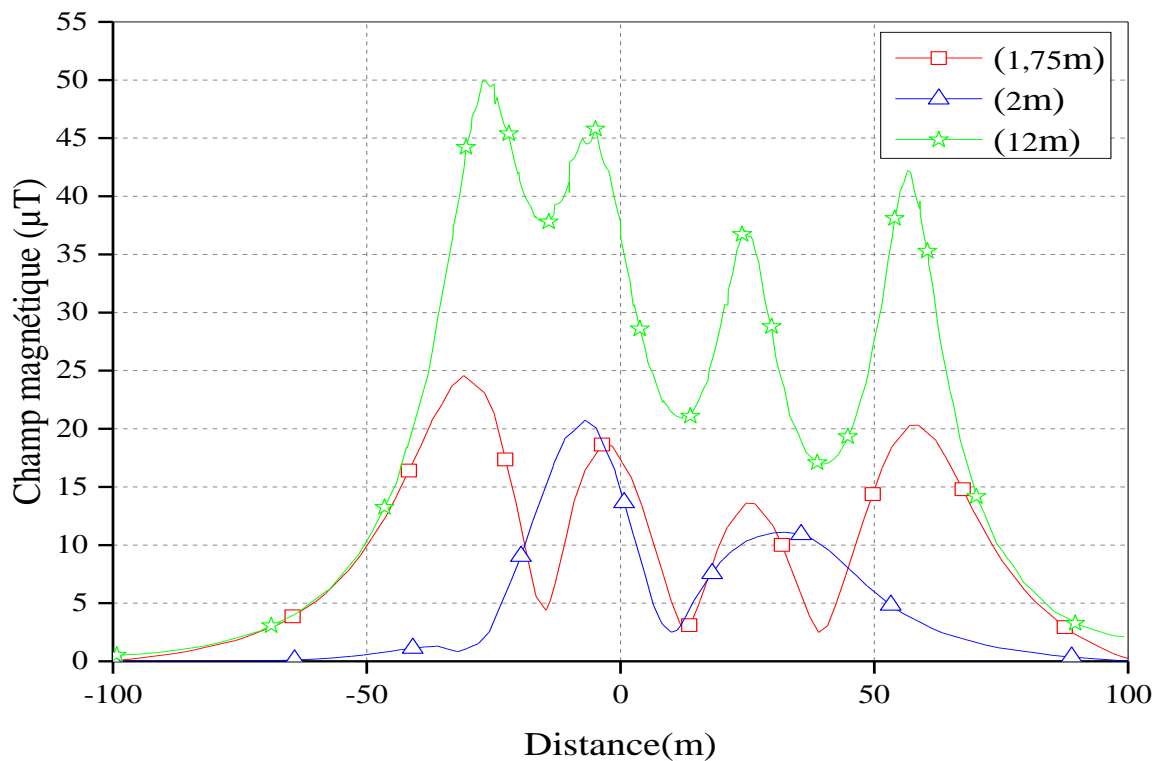


a. DC



b. AC





c. Hybride

**Figure3.10.** Profil du champ magnétique pour des niveaux entre 1.75 m et 2m et 12m.

### 3.3.4 Impact de la tension sur la distribution de champ électrique et magnétique

Nous avons gardé la même géométrie de la ligne étudiée précédemment (figure 3.3) en variant le type de la tension. Les figures 3.12 et 3.13 montrent les profils de champ électrique et magnétique respectivement au niveau du sol pour trois différents types de tension (HVDC, HVAC et hybride). A partir de ces résultats, On remarque que le champ électrique pour le système hybride est plus grand par rapport les autres systèmes (DC et AC). Contrairement au champ électrique, le champ magnétique est élevé par rapport DC et Hybride.

### 3.3.5 Lignes équipotentielle et les lignes du champ magnétique

L'intensité d'un champ électrique statique s'exprime en volts par mètre (V/m). L'intensité du champ électrique naturel dans l'atmosphère varie d'environ 100 V/m par beau temps à plusieurs milliers de V/m sous des nuages orageux. La force d'une densité de flux magnétique statique est exprimée en tesla (T) ou en gauss (G) dans certains autres pays. L'intensité du champ géomagnétique naturel varie d'environ 30 à 70  $\mu\text{T}$  (1  $\mu\text{T}$  équivaut à  $10^{-6}$  T).

Le champ électrique et champ magnétique continue est un champ constant qui ne change ni d'intensité ni de direction dans le temps, contrairement aux champs alternatifs basse et haute fréquence. Par conséquent, les champs statiques ont une fréquence de 0 Hz. Ils déploient une force sur les particules chargées.

La répartition des lignes équipotentielle, la variation du potentiel et les lignes du champ magnétiques est donnée dans la figure 3.13. Pour les trois systèmes étudiés (HVDC, HVAC et système hybride)

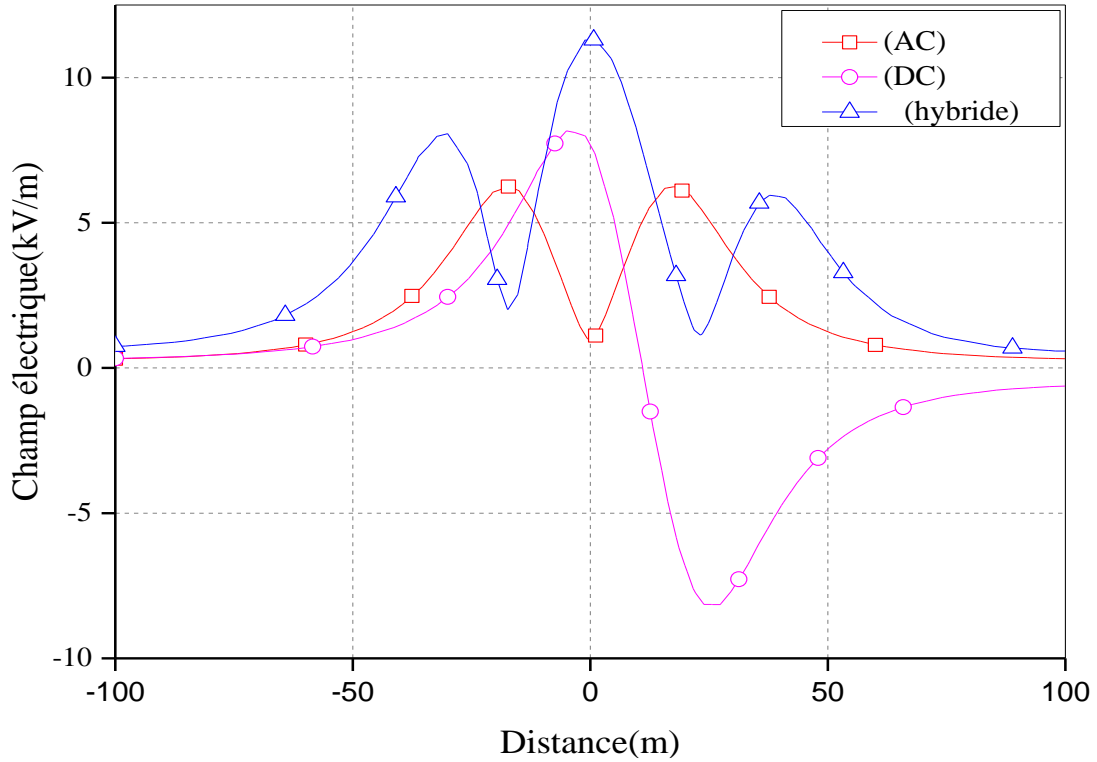


Figure 3.11. Champ électrique à différents types de tension

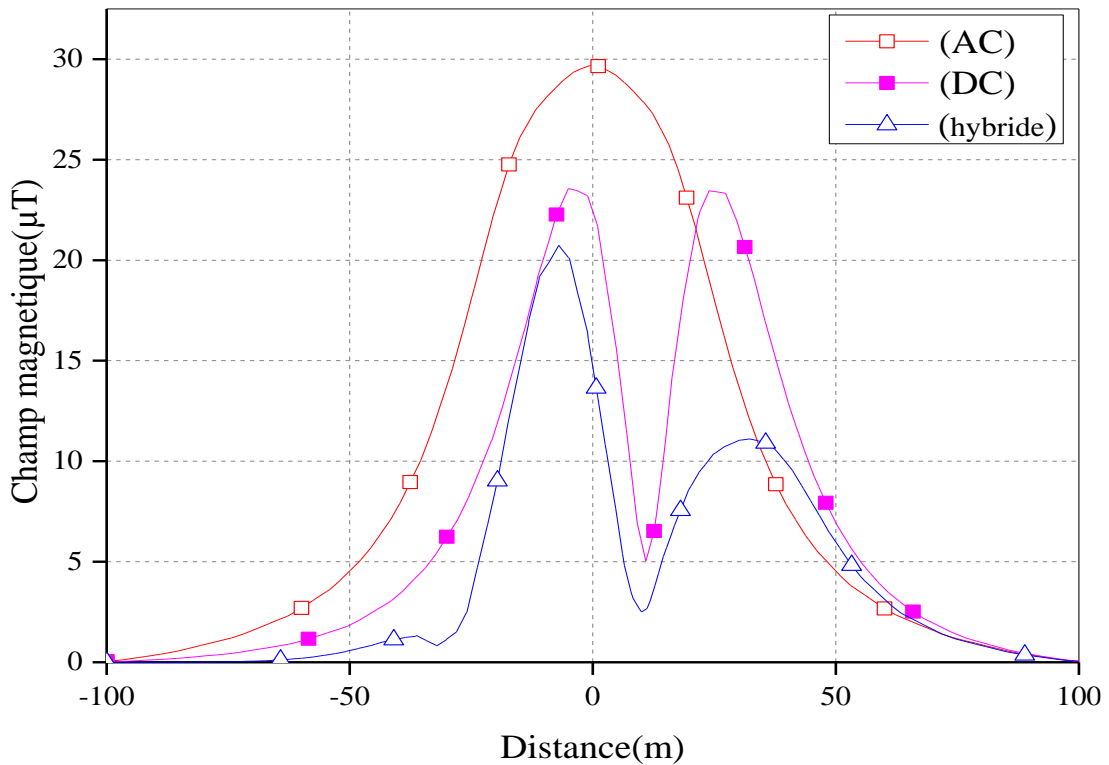
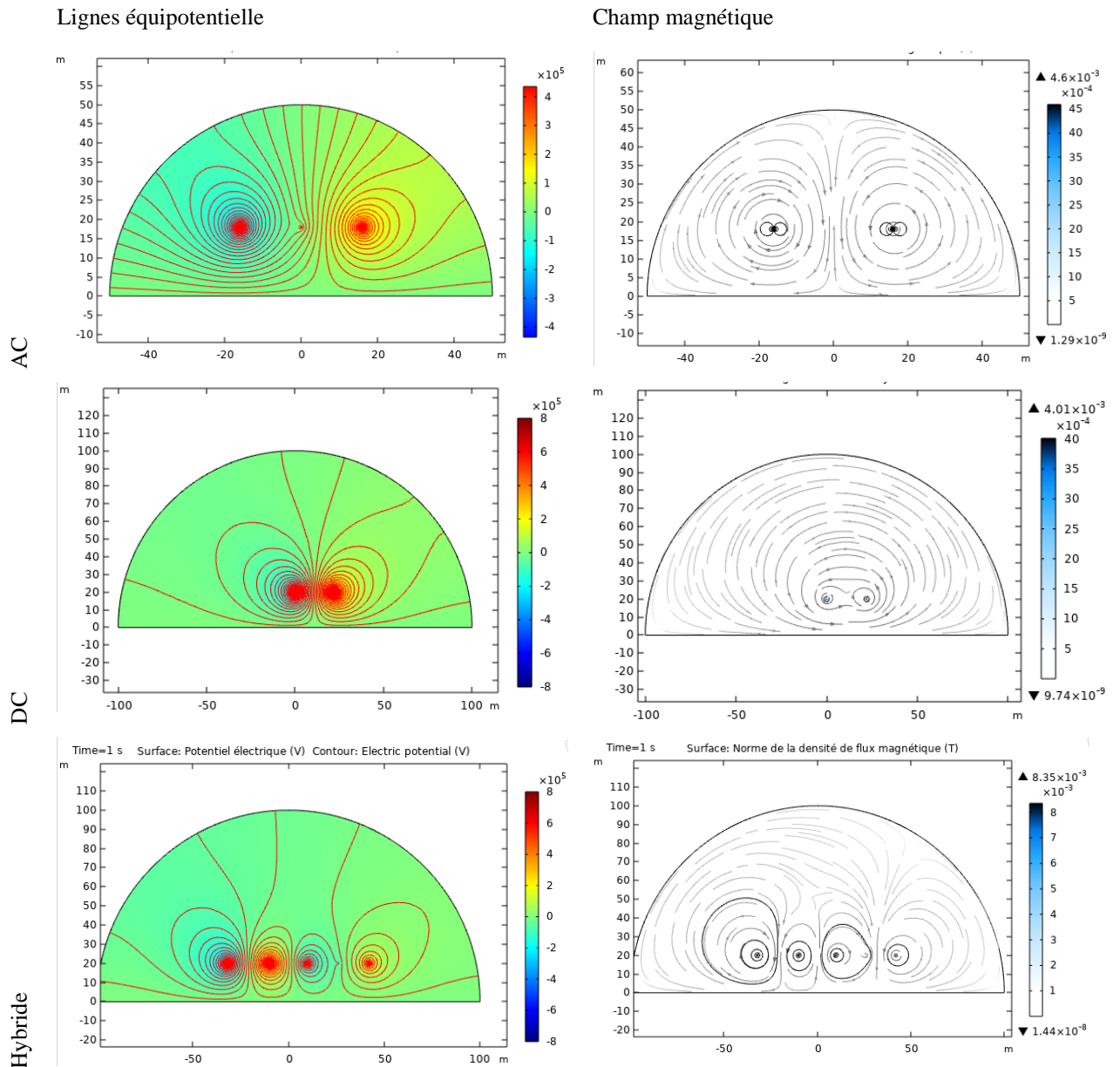


Figure 3.12. Champ magnétique à différents types de tension



**Figure 3. 13.** Répartition des lignes équipotentielle, Potentiel et les lignes du champ magnétique au voisinage d'une ligne.

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la problématique de la compatibilité électromagnétique a été posée : les phénomènes de perturbations du champ électrique et magnétique émises par les lignes électriques aériennes à HT ont été étudiés. Pour cela avec la méthode FEM à l'aide du logiciel COMSOL MULTIPHYSIQUE, les caractéristiques de distribution du champ électrique et magnétique de  $\pm 800$  kV HVDC et 750 kV HVAC dans le même couloir sont analysées. Nous avons montré l'effet de variation des caractéristiques électriques et géométriques sur les profils latéraux de ces champs. On a pu conclure dans cette partie du travail que :

- ✓ Lorsque la distance de séparation entre DC et AC est  $<40$  m, il y a un effet de couplage entre les composants du champ électrique AC et DC, en particulier la ligne DC a un effet de blindage sur la valeur de crête du champ électrique AC, et plus la séparation est petite, plus l'effet de blindage sera évident ;
- ✓ À mesure que les hauteurs des lignes DC et AC augmentent, les composantes du champ électrique et magnétique DC et AC diminuent ; cependant, le gradient de la valeur de contrôle maximale diminue avec l'augmentation de la hauteur ;
- ✓ De plus, la largeur du couloir est principalement influencée par la distance de séparation entre les lignes AC et DC,

---

## CONCLUSION GENERALE

---

### Conclusion générale

L'objectif principal visé à travers ce travail est étude des aspects de compatibilité électromagnétique liées aux lignes hybride haute tension ( $\pm 800$  kV HVDC et 750 kV HVAC) fonctionnant dans des couloirs parallèles.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une étude bibliographique sur les généralités des lignes électriques à haute Dans le cadre de cette thèse, nous avons étudié l'environnement électromagnétique à la fréquence industrielle 50 Hz, au voisinage des lignes haute tension.

Dans un deuxième temps, nous avons expliqué les raisons pour lesquelles la considération des systèmes HVDC apporte un intérêt dans la transmission de puissance et ce par rapport à un transport alternatif, classiquement utilisé et nous présenterons ensuite les différentes configurations que nous pouvons rencontrer pour ces systèmes.

La troisième partie concerne l'étude de la simulation est utilisée pour l'objectif de l'analyse électromagnétique au voisinage d'un circuit de deux lignes haute tension ( $\pm 800$  kV HVDC et 750 kV HVAC) fonctionnant dans des couloirs parallèles, en utilisant la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel COMSOL MULTIPHASIQUES

Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- ✓ Lorsque la distance de séparation entre DC et AC est  $< 40$  m, il y a un effet de couplage entre les composants du champ électrique AC et DC, en particulier la ligne DC a un effet de blindage sur la valeur de crête du champ électrique AC, et plus la séparation est petite, plus l'effet de blindage sera évident ;
- ✓ À mesure que les hauteurs des lignes DC et AC augmentent, les composantes du champ électrique et magnétique DC et AC diminuent ; cependant, le gradient de la valeur de contrôle maximale diminue avec l'augmentation de la hauteur ;
- ✓ De plus, la largeur du couloir est principalement influencée par la distance de séparation entre les lignes AC et DC ;
- ✓ Le calcul du champ électrique et magnétique à 1.75m au-dessus du sol, nous à donner une idée sur l'intensité de ces grandeurs qui affectent le corps humain.

En perspectives, il serait intéressant d'étudier et de développer des modèles 3D et d'étudier les effets du champ électromagnétique sur un modèle simulant les Caractéristiques diélectriques des tissus biologiques. En outre, il est intéressant d'étudier les effets du champ électromagnétique pour des situations plus complexes tel que les champs créés par une ligne de transport en régime transitoire.

---

## RÉFÉRENCE

---

RÉFÉRENCE

- [1] Liu Z. "Ultra-High Voltage AC/DC Grids", 1st ed., Waltham, USA, Academic Press, 2014.
- [2] Zhen, Y., Cui, X., Lu, T., et al.: "Ion flow field analysis considering the finite conductivity of the building near HVDC transmission lines", *IEEE Trans. Magn*, 51, (3), pp. 1–4, 2015.
- [3] Sun, H., Cui, X., Du, L.: "Electromagnetic interference prediction of  $\pm 800$  kV UHVDC converter station", *IEEE Trans. Magn*, 52, (3), pp. 1–4, 2016.
- [4] Pfeiffer, M., Hedtke, S., Franck, C.M.: "Corona current coupling in bipolar HVDC and hybrid HVAC/HVDC overhead lines", *IEEE Trans. Power Deliv.* 33, (1), pp. 393–402, 2018.
- [5] Yin, H., He, J., Zhang, B., et al.: "Finite volume-based approach for the hybrid Ion-flow field of UHVAC and UHVDC transmission lines in parallel", *IEEE Trans. Power Deliv*, 26, (4), pp. 2809–2820, 2011.
- [6] Saul Pasara, "calcul du champ magnétique d'une ligne électrique aérienne à haute tension," *Annales of the University of Craiova, Electric al Engineering séries*, No.32,2008.
- [7] Cigre Wg 36-01, "Electric and magnetic fields produced by transmission systems," *Description of phenomena, practical guide for calculations*, Paris 1980.
- [8] Limane Ismail Choayb et Djahme Aymen, "Calcul des champs électriques et magnétiques proches des lignes très haute tension", *Université 8 Mai 1945 – Guelma, Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique*, 44pp, Octobre 2020.
- [9] M elle Chibane Samira, "Calcul de la coupure de la ligne Tf 220kv Jijel -Ain M'Lila au poste haute tension d'el Milia", *Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique*, 109pp, 2012.
- [10] P-A. Chamorel, "énergie électrique," école d'ingénieurs du Cantonade Vaud, département E+I, 1997.
- [11] Support de Cours Réseaux Electrique, Centre Universitaire Nour El Bachir El Bayadh, 95pp, 2017/2018.
- [12] Larba Dpama, "étude du système de comptage de l'énergie électrique consommée par le système de câble de garde isole", *master spécialise en génie électrique énergétique Burkina Faso*.
- [13] Soumanou Wade D. Yacoubou, "Contribution au dimensionnement de pylône de transport d'énergie électrique (Haute Tension HT) selon la norme Euro code : Cas d'un pylône d'angle", *Master en Ingénierie de L'eau Et De L'environnement*, 2013.
- [14] Cahier technique RTE.
- [15] R. Amiri, H Hadi, M. Marich, "The influence of sag in the Electric Field calculation around High Voltage Overhead transmission lines," *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2006.
- [16] Michel BOUGUE, "Lignes électriques aériennes à très haute tension," tome 2, édition Ineo, septembre 2002.
- [17] HADI Samia et Mezhoud Naïma, "Analyse de la stabilité des pylônes à treillis," *mémoire de mastère en Genie Civil, université Badji Mokhtar-Annaba*, 79pp, 2006.
- [18] Véronique Beauvois, Yves Beckers, Frédéric Rollin "Effets potentiellement gênères par l'exploitions d'une ligne électrique aérienne à haute tension sur les exploitations agricoles situées à proximité," *Rapport Université de Liège*, juillet 2020.
- [19] <https://crushtymks.com/fr/high-voltage/>.
- [20] J.Q. Eric, "Transport d'énergie en courant continu à haute tension ", *Technique de l'ingénieur D 4761*.
- [21] René beaussier" Les interconnexion en courant continu : pourquoi ? Les liaisons dans le monde et Celle d'IFA " . Chef de laboratoire d'essais spécieux pour HVDC, 2000.
- [22] Hingorani, N. G. " Flexible Ac Transmission. *Ieee Spectrum* ", pp. 40-45, 1993.
- [23] Long, W., Nilsson, S. "HVDC Transmission: Yesterday and Today", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, No. 2, pp. 22-31, 2007.
- [24] R. Moran, *Executioner's current Thomas Edison, George Westinghouse, and the invention of the electric chair*, New York: Vintage Books, 2003
- [25] MESSALTI SABIR « ANALYSE DE LA STABILITE TRANSITOIRE DES RESEAUX DE TRANSPORT A COURANT CONTINU EN HAUTE TENSION (HVDC-FACTS) » *Thèse Doctorat Sétif* 2011.
- [26] T. Wildi, G. Sybille, *Électrotechnique*, 4 eme édition, de boeck, Bruxelles, 2005.
- [27] L. Teppoz, " Commande d'un système de conversion de type VSC-HVDC stabilité-contrôle des perturbations", *thèse docteur de l'INPG* 2005.
- [28] B. Cova, G. Pirovano, S. Meregalli, " Audit des alternatives à la réalisation d'une ligne à très haute tension entre le Cotentin et le Maine" *CESI Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano* ,2005.
- [29] Kim, C.-K., Sood, V. K., Jang, G.-S., Lim, S.-J. & Lee, S.-J. " Hvdc Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems, John Wiley & Sons", 2009.
- [30] Yong Cui, Xiao Song, Chen Wang, Luxing Zhao, Guifang Wu « Ground-level DC electric field sensor for overhead HVDC/HVAC transmission lines in hybrid corridors», *ET Gener. Transm Distrib*, 14 Iss. 19, pp 4173-4178, 2020.



## REFERENCE

---

- [31] Qian Zhang<sup>1</sup>, Yinfei Li<sup>1</sup>, Xuebao Li<sup>1</sup>, " Tiebing Lu<sup>1</sup> <sup>1</sup>State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, " North China Electric Power University, Bejaia 102206, Peoples Republic of China.
- [32] C. Volât, " Modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735kv recouvert de glace", Canada : université du Québec, juin 2002.
- [33] Nisrine Mhaguen "développement de modèles dynamiques de prédiction de la tension critique de contournement des isolateurs recouverts de glace basés sur la méthode des éléments finis" Canada université du Québec, juin 2011.