



Faculté : SCIENCES DE L'INGENIORAT  
Département : ELECTROTECHNIQUE.  
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
Filière : ELECTROTECHNIQUE  
Spécialité : COMMANDE ELECTRIQUE

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

## Thème:

**ETUDE DES EFFETS DES ECRANS PASSIFS SUR LA  
REDUCTION DU CHAMP ELECTROMAGNETIQUE RAYONNE  
PAR UNE LIGNE HT**

Présenté par : ALIOUAT \_ HACENE

Encadrant :

Grade

Université

TOURAB \_ WAFA

MCB

BADJI MOKHTAR \_ ANNABA

## Jury de Soutenance :

AZZAG_ EL BAHI	PROF	UNIVERSITE BADJI MOKHTAR_ANNABA	Président
TOURAB_ WAFA	MCB	UNIVERSITE BADJI MOKHTAR_ANNABA	Encadrant
MESBAH_ TAREK	PROF	UNIVERSITE BADJI MOKHTAR_ANNABA	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

## Remerciements

*Nous rendons grâce à Dieu de nous avoir donné la force et la santé tout au long de ce cursus.*

*Des sincères remerciements sont adressés à Mme Tourab.W pour son encadrement et sa disponibilité remarquables tout au long de ce travail.*

*Nous ne pourrons jamais remercier, assez, nos parents qui nous ont accompagné et soutenu tout ce temps. Aujourd'hui nous leur devons cette réussite.*

*Nous remercions aussi nos professeurs, nos amis et camarades de classe, ainsi que tous ceux qui de près ou de loin, nous ont apporté leurs aides précieuses.*

*Merci à tous.*

## Dédicace

*Toute ma gratitude est envers Dieu Le Tout Miséricordieux à qui sans Lui je ne serai pas ici.*

*Je dédie ce travail à mes parents (mère et père) qui m'ont soutenu durant toute ma vie.*

*Une dédicace à tous mes proches qui ont toujours été là tant dans mes moments de joie ainsi que dans les difficiles.*

*Je m'en vais dédier ce travail à tous mes amis qui ont fait de ce cursus une période pleine de bonheur, de joie et de souvenirs.*

*Une dédicace aussi à mes professeurs qui m'ont permis d'écrire un nouveau chapitre de ma vie.*

# Resumer

Avec l'accroissement de la population et l'industrialisation rapide, la demande de l'énergie électrique a augmenté. Les lignes de transmission THT est une mesure pour faire face à cette problématique.

L'exposition publique et professionnelle aux champs électromagnétiques rayonnés pas ces lignes a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche afin d'évaluer et de remédier à leurs interactions possibles avec l'être humain et l'environnement.

Ce travail traite deux alternatives de déduction des champs électrique et magnétique aux voisinages d'un modèle de ligne 500 kV avec une conception en faisceaux de 3 conducteurs par phase disposés en nappe horizontale.

Un code de calcul analytique a été développé pour calculer les intensités des champs à un mètre au dessus du sol, par modification de la géométrie de la ligne avec blindage actif et passif. L'effet des différents paramètres des blindages sur les profils latéraux des champs électromagnétiques est aussi étudié, les résultats analytiques sont toujours comparés avec les normes internationales établies et révisées par l'ICNIRP.

**Les mots clés : câbles de blindage ; les champs électromagnétiques basse fréquence ; normes internationales.**

مع النمو السكاني والتصنيع السريع ، زاد الطلب على الطاقة الكهربائية. خطوط نقل

هي إجراء للتعامل مع هذه المشكلة. كان التعرض العام والمهني للمجالات الكهرومغناطيسية التي تشعها هذه THT الخطوط موضوع العديد من الدراسات البحثية من أجل تقييم ومعالجة تفاعلاتها المحتملة مع البشر والبيئة. يتناول هذا العمل بديلين لخصم المجالات الكهربائية والمغناطيسية بالقرب من نموذج خط 500 كيلو فولت مع تصميم شعاع من 3 موصلات لكل مرحلة مرتبة في طبقة أفقية. تم تطوير رمز حساب تحليلي لحساب شدة المجال على ارتفاع متر واحد فوق سطح الأرض ، عن طريق تعديل هندسة الخط باستخدام التدريع النشط والسلبي. كما تمت دراسة تأثير معاملات التدريع المختلفة على الملامح الجانبية للمجالات الكهرومغناطيسية ، والنتائج

## Liste des figures

Numéro	Titre des figures	page
	<b>Chapitre I : Champs électromagnétiques basse fréquence et environnement</b>	
01	<b>Figure I.1.</b> Ondes électromagnétiques basse fréquence	05
02	<b>Figure I.2 :</b> Spectre électromagnétique	06
03	<b>Figure I.3.</b> Propagation du champ électromagnétique en fonction de la longueur d'onde de la source	08
04	<b>Figure 1. 4.</b> Champ électromagnétique terrestre assimilable à celui d'un dipole	09
	<b>Chapitre II : Problématique des interférences des champs électromagnétiques des basses fréquences avec l'environnement</b>	
05	<b>Figure. II.1.</b> Modes de couplages électromagnétiques	23
06	<b>Figure .II.2.a</b> Mode différentiel	24
07	<b>Figure .II.2.b</b> Mode commun	24
08	<b>Figure. II.3</b> Couplage champ magnétique à câble en mode commun	25
09	<b>Figure. II.4</b> Couplage champ magnétique à câble en mode différentiel	25
10	<b>Figure. II.5</b> Couplage champ électrique à câble en mode commun	26
11	<b>Figure. II.6.</b> Couplage en champ proche	26

12	<b>Figure. II.7 :</b> Dipôles électrique et magnétique oscillants	28
13	<b>Figure. II.8.</b> Variation de l'impédance d'onde normalisée en fonction de la distance normalisée par rapport à la source	29
14	<b>Figure. II.9 :</b> variation de la distance correspondant la limite de champ proche en fonction de la fréquence	30

15	<b>Figure. II.10.</b> Mécanismes d'interaction champs électromagnétique et corps humain	31
16	<b>Figure. II.11.a</b> corps humain plongé dans un champ électrique	32
17	<b>Figure. II.11.b</b> corps humain plongé dans un champ magnétique	33
18	<b>Figure II.12</b> Méthodologie de recherche sur les effets des champs électromagnétiques 50 Hz	37
	<b>Chapitre III :</b> Analyse de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes de transmission	
19	<b>Figure III.1</b> modèle étudié de la ligne de transmission 500kV	45
20	<b>Figure. III.2</b> Algorithme de réduction du champ électrique au voisinage des lignes THT	47
21	<b>Figure III.3</b> Champ électrique pour les trois configurations de lignes	49
22	<b>Fig. III.4</b> Champ électrique pour différentes gardes au sol	50
23	<b>Figure.III.5</b> Effet de la distance entre phases sur le profil du champ électrique	51
24	<b>Figure.III.6.a</b> Zone de servitude du champ magnétique au voisinage des lignes haute tension 60KV et 220KV, pour une valeur limite du champ magnétique $B = 100 \mu T$	55
25	<b>Figure.III.6.b.</b> Zone de servitude du champ magnétique au voisinage des lignes haute tension 60KV et 220KV, pour une valeur limite du champ magnétique $B = 0.4 \mu T$	55

26	<b>Figure. III.7</b> Champ magnétique pour les trois configurations de lignes	57
27	<b>Figure. III.8</b> Champ magnétique calculé pour différentes hauteurs	57
28	<b>Figure. III.9</b> Champ magnétique calculé pour différents espacement entre phases	58
29	<b>Figure.III.10.</b> Effet de la variation de la charge	58
30	<b>Figure III.11</b> l'intensité du champ électrique correspondant aux différentes hauteurs de la ligne	60
31	<b>Figure III.12</b> modèle étudié de la ligne de transmission 500kV avec des fils de blindage passifs.	61
32	<b>Figure III.13</b> distributions de champ électrique à hauteur de 1 m au-dessus de la surface du sol pour la ligne de transport de 500	62

### *Liste des tableaux*

numéro	Titre des tableaux	page
	<b>Chapitre I :</b> Champs électromagnétiques basse fréquence et environnement	
01	<b>Tableau I. 1:</b> Niveaux de champs électromagnétiques rayonnés par les lignes aériennes	13
02	<b>Tableau 1. 2:</b> Niveaux de champs électromagnétiques rayonnés par des appareils domestiques	13
03	<b>Tableau I-3:</b> Limites d'exposition maximales (IEEE C95.1-1999)	17
04	<b>Tableau I. 4:</b> Restrictions de base	18
	<b>Chapitre II :</b> Problématique des interférences des champs électromagnétiques des basses fréquences avec l'environnement	
05	<b>Tableau II.1:</b> Le seuil de perception du champ magnétique	36

	<b>Chapitre III : Analyse de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes de transmission</b>	
06	Tableau III.1 : influence des paramètres géométriques sur les champs électrique et magnétique d'une ligne HT	44

## **Chapitre I : Champs électromagnétiques basse fréquence et environnement**

Introduction.....	5
<b>I.1.1 Champs électromagnétiques basses fréquences.....</b>	<b>5</b>
I.1.2 Le spectre électromagnétique .....	6
I.1.3 Propriétés des champs électromagnétiques .....	8
I.1.4 Sources de champs électromagnétiques .....	9
I.1.4.1 Sources des champs électromagnétiques naturelles .....	10
I.1.4.2 Sources des champs électromagnétiques artificielles .....	11
I.2 Champs électromagnétiques rayonnés par les lignes haute tension.....	12
I.2.1 Champs électriques.....	12
I.2.2 Champs magnétiques.....	13
<b>I.2.3 Niveaux des champs rayonnés.....</b>	<b>13</b>
I.3 Contexte normatif.....	15
<b>I.3.1 Normes sur les champs électromagnétiques de basses fréquences .....</b>	<b>15</b>
I.3.1.1 Restrictions de base .....	16
I.3.1.2 Niveaux de référence .....	17
I.3.2 Le standard IEEE C95.1-1999 .....	17
I.3.3 Les recommandations ICNIRP.....	18
I.4 Conclusion.....	20

## **Chapitre II : Problématique des interférences des champs électromagnétiques des basses fréquences avec l'environnement**

II.1. Introduction .....	22
II.2. Compatibilité électromagnétique .....	22
II.2.1. Mécanismes d'action des perturbations électromagnétiques .....	23
II.2.2. Modes de couplages .....	24
A. Le mode de couplage galvanique (ou par conduction) :.....	24
B. Le mode de couplage rayonné .....	25

II.2.3. Comportement des sources électromagnétiques .....	26
II.3.1 Mécanisme de couplage direct .....	31
II.3.1.1. Couplage avec un champ électrique.....	32
II.3.1 .2. Couplage avec un champ magnétique.....	32
II.3.2. Mécanismes de couplage indirect. ....	34
II.4.1. Les effets avérés :.....	35
II.4.2. Les effets potentiels.....	36
II.4.2.1. Etudes épidémiologiques.....	38
A. Les études épidémiologiques chez les enfants .....	38
B. Les études épidémiologiques chez l'adulte .....	39
II.5 Conclusion.....	41

### **Chapitre III : Analyse de l'environnement électromagnétique au voisinage des lignes de transmission**

Introduction.....	43
III.1 Effet de la géométrie de la ligne sur la réduction du champ électromagnétique rayonné	43
III.1.1 Modèle étudié.....	45
III.1.2 Réduction du champ électrique.....	46
II.1.2.1 Effets de changement de la géométrie de la ligne .....	46
<b>A. Effet de la configuration de la ligne .....</b>	<b>48</b>
<b>B. Effet de la hauteur .....</b>	<b>49</b>
<b>C. Effet de la distance entre phases .....</b>	<b>51</b>
<b>D. Effet du nombre de conducteurs par phase .....</b>	<b>52</b>
<b>E. Effets de la flèche et des câbles de garde .....</b>	<b>52</b>
<b>III.1.3 Réduction du champ magnétique .....</b>	<b>53</b>
III.1.3.1 Effets de changement de la géométrie de la ligne.....	56
Effet de la configuration de la ligne.....	56
B. Effet de la hauteur .....	56
C. Effet de la distance entre phases .....	59
D. Effet de la variation de la charge .....	59
III.2 Effet des écrans actifs et passifs sur la réduction du champ sous la ligne 500kV .....	60
III.2.1 Comportement du champ électrique .....	60
III.2.1.1. Profil du champ électrique sans câble de blindage .....	60
III.2.1.2 Profil du champ électrique avec câble de blindage.....	61
Conclusion Generale	

## INTRODUCTION GENERALE

Le développement des réseaux électriques hautes tensions fait apparaître des problèmes liés aux champs électromagnétiques élevés qui peuvent causer des dommages sur l'environnement notamment les objets situés à proximité de ces réseaux. Selon l'ICNIRP commission internationale de protection contre le rayonnement non ionisant, les seuls normatifs sont de 5kV/m pour le champ électrique et 100µT pour celui magnétique. Plusieurs études récentes ont montré une forte préoccupation de la société envers l'exposition à court et à long termes à des intensités de champ électromagnétique émanant des lignes de transmission de l'énergie électrique. Pour répondre à ces préoccupations il devient nécessaire de chercher des moyens et de proposer des techniques de réductions des champs électromagnétiques au voisinage de ces lignes.

Il existe en général plusieurs moyens pour réduire les champs électrique et magnétique sous les lignes de transport d'énergie électrique. Parmi ces moyens on peut citer :-le choix convenable des paramètres géométriques(hauteur des pylônes, distance entre phases, configuration des lignes électriques et ceux électriques (tension et courant).Un choix convenable de la hauteur des pylônes : déterminant la hauteur des conducteurs de phases au-dessus du sol, associée à la disposition la plus favorable des indices horaires des tensions des phases. Une autre alternative consiste à utiliser les conducteurs jouant le rôle d'écrans, placés entre les conducteurs phases et le sol. Les conducteurs écrans sont de même type que les câbles de garde.

Dans ce travail on se propose de calculer le champ électromagnétique au voisinage d'une ligne extrême haute tension (EHV) 500kV sans et avec réduction, utilisant un code de calcul analytique développé dans l'environnement matlab.

Le but étant d'évaluer l'efficacité des écrans installés sous la ligne.

Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux publiés et mis à jour par l'ICNIRP.

مقدمة عامة يكشف تطوير الشبكات الكهربائية عالية الجهد عن مشاكل تتعلق بالمجالات الكهرومغناطيسية العالية التي يمكن أن تسبب أضراراً ، فإن المعايير الوحيدة هي ICNIRP 5 للبيئة ، وخاصة الأشياء الموجودة بالقرب من هذه الشبكات وفقاً للجنة الدولية للإشعاع غير المؤين كيلو فولت / م للمجال الكهربائي و 100 ميكرو طن للمجال المغناطيسي. أظهرت العديد من الدراسات الحديثة قلقاً شديداً من المجتمع نحو التعرض على المدى القصير والطويل لشدة المجال الكهرومغناطيسي المنبثقة من خطوط نقل الطاقة الكهربائية. للرد على هذه المخاوف ، يصبح من الضروري البحث عن طرق واقتراح تقنيات لتقليل المجالات الكهرومغناطيسية بالقرب من هذه الخطوط. بشكل عام ، هناك عدة طرق لتقليل المجالات الكهربائية والمغناطيسية تحت خطوط نقل الطاقة الكهربائية. من بين هؤلاء موي ...

**Chapitre : 1**  
**Champs électromagnétiques**  
**basse fréquence et**  
**environnement**

**الفصل: 1 المجالات الكهرومغناطيسية منخفضة التردد  
والبيئة**

## **Introduction**

Les lignes électriques haute tension sont des sources d'énergie électromagnétique , elles génèrent un champ électrique et un champ magnétique qui se découplent à la fréquence 50Hz qui interagissent avec l'environnement, ces champs induisent des courants et des champs électriques à l'intérieur du corps humain situé au voisinage de ces lignes, les composantes du champ magnétique produites par une ligne haute tension sont plus néfastes pour la santé humaine que celles du champ électrique ceci est expliqué par le fait que le champ électrique ne pénètre pas à l'intérieur du corps humain et peut être atténué par des écrans électrostatiques, contrairement au champ magnétique , le champ magnétique ne peut pas être stoppé par les bâtis et pénètre à l'intérieur du corps humain, il existe deux situations d'exposition humaine a des champs électromagnétiques basse fréquence.

- système haute tension, faible courant : c'est le cas des lignes électriques aériennes hautes tension
- système basse tension, fort courant : c'est le cas de plupart des appareils électriques domestiques et industriels.

مقدمة خطوط الطاقة ذات الجهد العالي هي مصادر للطاقة الكهرومغناطيسية ، فهي تولد مجالا كهربائيا ومجالا مغناطيسيا ينفصلان عند تردد 50 هرتز يتفاعلان مع البيئة ، وتحفز هذه الحقول التيارات والمجالات الكهربائية داخل جسم الإنسان الموجود بالقرب من هذه الخطوط ، ومكونات المجال المغناطيسي التي ينتجها خط الجهد العالي أكثر ضررا على صحة الإنسان من تلك الموجودة في المجال ويفسر ذلك حقيقة أن المجال الكهربائي لا يخترق داخل جسم الإنسان ويمكن تخفيفه بواسطة الشاشات الكهروستاتيكية ، على عكس المجال المغناطيسي ، لا يمكن إيقاف المجال المغناطيسي بواسطة الإطارات ويخترق داخل جسم الإنسان ، هناك حالتان من تعرض الإنسان للمجالات الكهرومغناطيسية منخفضة التردد. نظام الجهد العالي ، التيار المنخفض: هذه هي حالة نظام خطوط الطاقة العلوية ذات الجهد العالي ...

## **I.1 Champs électromagnétiques basse fréquence et environnement**

Un champ électromagnétique est la représentation dans l'espace de la [force électromagnétique](#) qu'exercent des particules chargées. Concept important de l'[électromagnétisme](#), ce [champ](#) représente l'ensemble des composantes de la force électromagnétique s'appliquant sur une particule [chargées](#) déplaçant dans un [référentiel galiléen](#).

Une particule de charge  $q$  et de vitesse  $v$  subit une force qui s'exprime par :

المجالات الكهرومغناطيسية منخفضة التردد والبيئة المجال الكهرومغناطيسي هو تمثيل القوة الكهرومغناطيسية التي تمارسها الجسيمات المشحونة في الفضاء. يمثل هذا المجال ، وهو مفهوم مهم للكهرومغناطيسية ، جميع مكونات القوة الكهرومغناطيسية المطبقة على جسيم :لقوة يعبر عنها بواسطة  $v$  والسرعة  $q$  مشحون يتحرك في إطار مرجعي جاليلي. يخضع جسيم الشحنة

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

Où  $\vec{E}$  est le [champ électrique](#) et  $\vec{B}$  est le [champ magnétique](#). Le champ électromagnétique est l'ensemble  $(\vec{E}, \vec{B})$ .

### I.1.1 Champs électromagnétiques basses fréquences

Les champs électrique et magnétique font partie des rayonnements dits « non ionisants » : ils ne sont pas suffisamment énergétiques pour éjecter un électron d'un atome ou d'une molécule. Dès que des charges électriques sont en mouvement, apparaît un champ électromagnétique variable dans le temps. Ce phénomène est formé de 2 ondes liées (figure I.1) : une onde électrique (E) et une onde magnétique (H) qui se déplacent ensemble à la vitesse de la lumière et qui sont caractérisées par une fréquence et une longueur d'onde. La fréquence est le nombre d'oscillations de l'onde par unité de temps, mesuré en hertz (1 Hz = 1 cycle par seconde). La longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde, pendant la durée d'une oscillation (ou d'un cycle). Par définition, les champs de basse fréquence (CEM ELF), sont ceux dont la fréquence est égale ou inférieure à 300 Hz

A des fréquences aussi basses, la longueur d'onde dans l'air est très grande (6000 km à 50 Hz et 5000 km à 60 Hz). En pratique, les champs électriques et magnétiques agissent indépendamment l'un de l'autre et sont mesurés séparément.

المجالات الكهرومغناطيسية منخفضة التردد المجالات الكهربائية والمغناطيسية هي جزء مما يسمى بالإشعاع "غير المؤين": فهي ليست نشطة بما يكفي لإخراج إلكترون من ذرة أو جزيء. بمجرد حركة الشحنات الكهربائية، يظهر مجال كهرومغناطيسي متغير زمنياً. تتحركان معا بسرعة الضوء وتتميز بتردد (H) وموجة مغناطيسية (E) موجة كهربائية: (I.1 الشكل) هذه الظاهرة من موجتين مرتبطتين وطول موجي. التردد هو عدد تذبذبات الموجة لكل وحدة زمنية، مقاسة بالهرتز (1 هرتز = دورة واحدة في الثانية). الطول الموجي هو، هي تلك التي (ELF EMF) المسافة التي تقطعها الموجة، خلال مدة التذبذب (أو الدورة). بحكم التعريف، مجالات التردد المنخفض (يساوي ترددها أو يقل عن 300 هرتز في مثل هذه الترددات المنخفضة، يكون الطول الموجي في الهواء كبيراً جداً

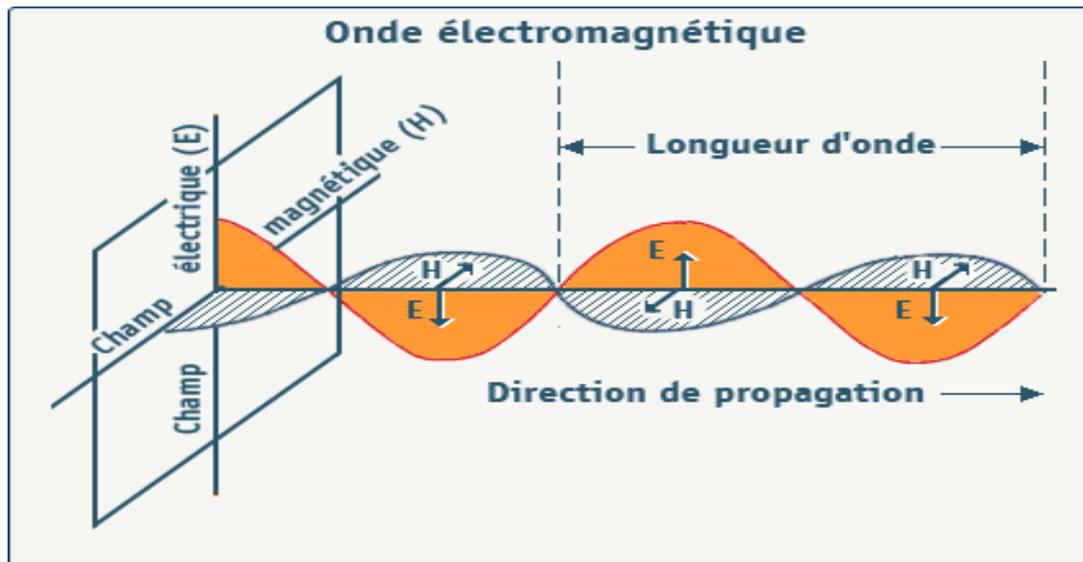


Figure I.1. Ondes électromagnétiques basse fréquence

### I.1.2 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique englobe les sources naturelles et artificielles des champs électromagnétiques. Ces champs sont classés en fonction de leurs fréquences, l'ensemble de ces fréquences forme le spectre électromagnétique. Dans la figure (I-2) la plupart des champs électriques ou magnétiques produits par l'homme varient de façon rapide et régulière. Ce sont des champs alternatifs, caractérisés par leurs intensités et leurs fréquences.

Les CEM de haute fréquence ou de radiofréquence se situent entre 10 MHz et 300 GHz. Dans cette partie du spectre électromagnétique, de larges plages de fréquences sont utilisées pour les applications de télécommunication, Les téléphones mobiles et les antennes relais émettent ainsi des champs dits de haute fréquence de 900 MHz ou 1,8 GHz.

Les champs de 0 à 300 Hz sont dits d'extrême basse fréquence (ELF), les lignes de transport de l'énergie électrique et tous les équipements qui consomment ou acheminent de l'électricité émettent des champs à 50 Hz. Toutefois, certains appareils électriques et installations industrielles transforment cette électricité à 50 Hz soit en courant continu, (comme dans les applications Industrielles de l'électrochimie par exemple), soit en fréquences plus élevées, comme dans (les applications industrielles et domestiques de chauffage par induction ou de four à micro-ondes).

الطيف الكهرومغناطيسي يشمل الطيف الكهرومغناطيسي كلا من المصادر الطبيعية والاصطناعية للمجالات الكهرومغناطيسية. يتم تصنيف ، تختلف معظم المجالات الكهربائية أو I-2 هذه المجالات وفقا لتردداتها ، كل هذه الترددات تشكل الطيف الكهرومغناطيسي. في الشكل المغناطيسية التي ينتجها الإنسان بسرعة وثبات. هذه هي الحقول المتناوبة ، تتميز بكثافتها وتردداتها. تتراوح المجالات الكهرومغناطيسية في هذا الجزء من الطيف الكهرومغناطيسي ، تستخدم نطاقات تردد واسعة. 300 GHz و 10 MHz عالية التردد أو الترددات الراديوية بين 1.8 MHz لتطبيقات الاتصالات والهواتف المحمولة وهوائيات الترحيل وبالتالي تنبعث منها ما يسمى بمجالات التردد العالي من 900 وخطوط نقل الطاقة الكهربائية وجميع المعدات التي تستهلك (ELF) تسمى الحقول من 0 إلى 300 هرتز التردد المنخفض للغاية. GHz. .. أو تحمل

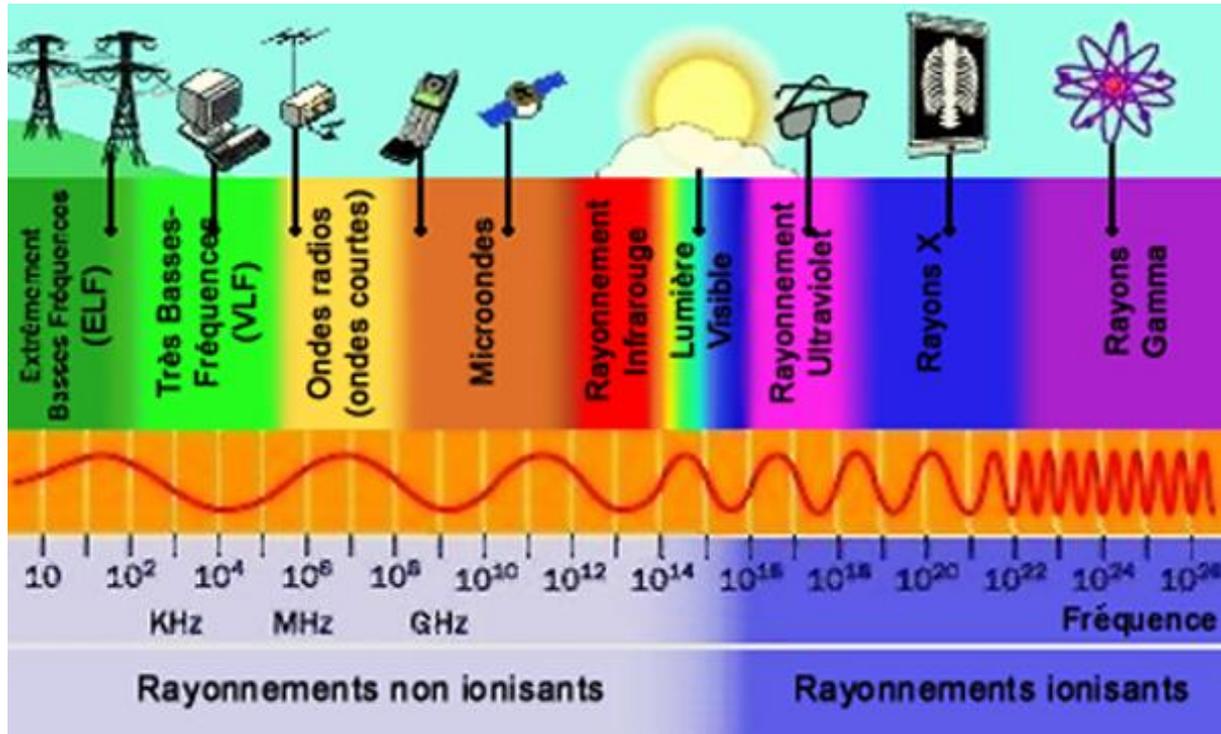


Figure I.2 : Spectre électromagnétique

### I.1.3 Propriétés des champs électromagnétiques

De façon générale, les propriétés du champ électromagnétique diffèrent beaucoup en fonction de la distance à la source de rayonnement, de la longueur d'onde, des caractéristiques de la structure rayonnante et de l'environnement. On distingue trois zones autour d'une source d'émission ou d'une structure rayonnante.

1.I خصائص المجالات الكهرومغناطيسية بشكل عام ، تختلف خصائص المجال الكهرومغناطيسي اختلافا كبيرا اعتمادا على المسافة من مصدر الإشعاع والطول الموجي وخصائص البنية المشعة والبيئة. هناك ثلاث مناطق حول مصدر الانبعاث أو الهيكل المشع.

#### ► La zone de champ très proche réactif

Située à une fraction de la longueur d'onde de la source, généralement entourant immédiatement la source ou la structure rayonnante, appelée aussi zone d'évanescence ou de Rayleigh. Les modules des champs  $y$  sont très simplement reliés par l'impédance de l'onde dans le vide  $Z_0$ , seules les composantes transverses dominant. Cette zone est aussi caractérisée par la prépondérance d'une puissance active rayonnée. Le seul cas de proximité en zone de champ très proche pour les personnes est le téléphone portable où l'antenne se trouve à très faible distance de la tête ou du corps. C'est un cas où la mesure du débit d'absorption spécifique est plus pertinente que la seule mesure du Champ électrique extérieur.

منطقة المجال التفاعلية القريبة جدا تقع عند جزء صغير من الطول الموجي للمصدر ، وعادة ما تحيط مباشرة بالمصدر أو البنية المشعة ، فقط المكونات Z0 وتسمى أيضا منطقة التلاشي أو رايلي. ترتبط وحدات الحقول بها ببساطة شديدة من خلال مقاومة الموجة في الفراغ المستعرضة تهيم. تتميز هذه المنطقة أيضا بغلبة القوة النشطة المشعة. الحالة الوحيدة للقرب في منطقة حقل قريبة جدا للناس هي الهاتف المحمول حيث يكون الهوائي على مسافة قصيرة جدا من الرأس أو الجسم. هذه هي الحالة التي يكون فيها قياس معدل الامتصاص المحدد أكثر أهمية من قياس المجال الكهربائي الخارجي وحده.

#### ► La zone de transition, ou région de Fresnel :

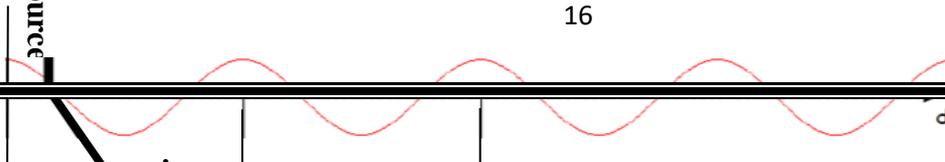
Qui assure la transition entre la zone de Rayleigh et la zone suivante, appelée zone de champ lointain. Dans cet espace, situé un peu plus loin autour de la structure rayonnante, le phénomène de propagation commence à apparaître mais on dit que l'onde n'est pas encore formée car les composantes radiales sont encore majoritaires.

المنطقة الانتقالية ، أو منطقة فريسنل: التي توفر الانتقال بين منطقة رايلي والمنطقة التالية ، والتي تسمى منطقة المجال البعيد. في هذا الفضاء ، الذي يقع بعيدا قليلا حول البنية المشعة ، تبدأ ظاهرة الانتشار في الظهور ولكن يقال إن الموجة لم تتشكل بعد لأن المكونات الشعاعية لا تزال في الأغلبية.

#### ► La zone de champ lointain :

Région de Fraunhofer, où les propriétés du champ électromagnétique sont bien établies et où apparaissent les phénomènes classiques de propagation des ondes électromagnétiques. Cette région se situe généralement à plusieurs longueurs d'onde du périmètre de la structure avec un champ électromagnétique dont l'amplitude du vecteur champ électrique et magnétique diminue lorsque la distance à l'antenne augmente, et s'annule à l'infini.

منطقة المجال البعيد: منطقة فراونهوفر ، حيث تكون خصائص المجال الكهرومغناطيسي راسخة وحيث تظهر الظواهر الكلاسيكية لانتشار الموجات الكهرومغناطيسية. تقع هذه المنطقة بشكل عام على بعد عدة أطوال موجية من محيط الهيكل مع مجال كهرومغناطيسي تقل سعة متجه المجال الكهربائي والمغناطيسي مع زيادة المسافة إلى الهوائي ، وتلغى إلى ما لا نهاية.



### Figure I.3. Propagation du champ électromagnétique en fonction de la longueur d'onde de la source

#### I.1.4 Sources de champs électromagnétiques

Les champs électromagnétiques ou rayonnements électromagnétiques sont d'une manière générale une forme de transport d'énergie sans support matériel. L'utilisation de ces rayonnements couvre de nombreuses applications dans une très large gamme de fréquence. On peut distinguer deux types de rayonnements électromagnétiques : rayonnements ionisants et non ionisants.

مصادر المجالات الكهرمغناطيسية المجالات الكهرمغناطيسية أو الإشعاع الكهرمغناطيسي هي عموما شكل من أشكال نقل الطاقة دون I.1. دعم مادي. يغطي استخدام هذا الإشعاع العديد من التطبيقات في نطاق تردد واسع جدا. يمكن تمييز نوعين من الإشعاع الكهرمغناطيسي: الإشعاع المؤين وغير المؤين.

Un rayonnement est ionisant s'il transporte une énergie suffisante pour arracher un électron à une molécule. Cette énergie est capable d'avoir des effets biologiques majeurs, car elle va par des mécanismes physiques et chimiques, léser les molécules d'ADN qui sont sa cible principale. Ce type de rayonnement est de très hautes fréquences plus de  $3 \cdot 10^{15}$ , ou de longueur d'onde inférieure de  $0,1\mu\text{m}$ . Pour les fréquences inférieures, les énergies mises en jeu sont trop faibles pour modifier les structures atomiques et on observe des effets thermiques et athermiques. Les effets thermiques sont la conséquence du chauffage diélectrique des tissus et sont connus et utilisés depuis plusieurs décennies dans le domaine de la thérapie.

Dans les radiofréquences ces effets thermiques sont importants. Par contre la partie basse fréquence (ELF) les effets thermiques est dans la plupart des cas négligeables pour les sources usuellement rencontrées et les effets observés sont dit athermiques. Ces effets athermiques sont très complexes à étudier et ne se traduisent pas par un échauffement des tissus mais sont liés à une modification du potentiel de membrane et au transfert d'ions au travers de la membrane cellulaire. Ces effets sont également présents dans la gamme des radiofréquences.

يكون الإشعاع مؤينا إذا كان يحمل طاقة كافية لتمزيق إلكترون من جزيء. هذه الطاقة قادرة على أن يكون لها تأثيرات بيولوجية كبيرة ، لأنها من خلال الآليات الفيزيائية والكيميائية ، تلحق الضرر بجزيئات الحمض النووي التي هي هدفها الرئيسي. هذا النوع من الإشعاع ذو طول موجي أقل. بالنسبة للترددات المنخفضة ، تكون الطاقات المعنية منخفضة جدا  $\mu\text{m}$  ترددات عالية جدا أكثر من 3. 1015 ، أو 0.1

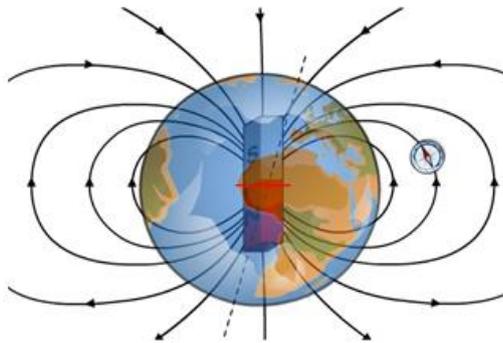
بحيث لا يمكن تعديل الهياكل الذرية وتلاحظ التأثيرات الحرارية والحرارية. التأثيرات الحرارية هي نتيجة التسخين العازل للانسجة وقد عرفت واستخدمت لعدة عقود في مجال العلاج. في الترددات الراديوية هذه التأثيرات الحرارية مهمة. من ناحية أخرى ، فإن جزء التردد تكون التأثيرات الحرارية في معظم الحالات ضئيلة بالنسبة للمصادر التي تتم مواجهتها عادة ويقال إن التأثيرات التي (ELF) المنخفضة لوحظت تكون حرارية. هذه الآثار

Dans notre étude nous nous intéressons au rayonnement non ionisant qui correspond aux fréquences étudiées (les basses fréquences). Les sources de champs statiques constituent un phénomène naturel et ont donc toujours été présents sur terre. L'exposition aux sources artificielles des champs électromagnétiques a toutefois fortement augmenté au cours du 20ème siècle en raison des besoins en électricité, des technologies sans fil (tout particulièrement pour les télécommunications), ainsi que des modifications des pratiques professionnelles et de notre comportement social et environnemental.

في دراستنا نحن مهتمون بالإشعاع غير المؤين الذي يتوافق مع الترددات المدروسة (الترددات المنخفضة). مصادر الحقول الثابتة هي ظاهرة طبيعية وبالتالي كانت موجودة دائما على الأرض. ومع ذلك ، زاد التعرض للمصادر الاصطناعية للمجالات الكهرومغناطيسية بشكل حاد خلال القرن 20 بسبب الحاجة إلى الكهرباء والتقنيات اللاسلكية (خاصة للاتصالات السلكية واللاسلكية) ، فضلا عن التغييرات في الممارسات المهنية وسلوكنا الاجتماعي والبيئي.

#### **I.1.4.1 Sources des champs électromagnétiques naturelles**

La plupart des champs électromagnétiques naturels ont une fréquence de 0 Hz : ce sont des champs statiques, tels que le champ magnétique terrestre qui oriente l'aiguille aimantée de la boussole, et le champ électrique atmosphérique, qui peut atteindre des valeurs très élevées sous les nuages orageux et aux niveaux des pôles terrestres. Toutefois, d'autres sources naturelles produisent, quant à elles, des champs électromagnétiques qui varient dans le temps et dont certains ont une fréquence très élevée. On peut citer : l'électricité statique, la foudre et les rayonnements électromagnétiques à très haute fréquence.



**Figure 1. 4. Champ électromagnétique terrestre assimilable à celui d'un dipôle**

#### **I.1.4.2 Sources des champs électromagnétiques artificielles**

Dans l'environnement électromagnétique de basse fréquence : Ce sont les réseaux de haute tension qui constituent la principale source de champ électrique, les appareils industriels et domestiques sont les principales sources des champs magnétiques.

##### **➤ Dans l'environnement général :**

L'énergie électrique en provenance des centrales est transportée jusqu'aux agglomérations par des lignes à haute tension. La tension est ensuite abaissée par des transformateurs auxquels se rattachent les lignes de distribution locale. Les champs électrique et magnétique au-dessous des lignes aériennes peuvent atteindre respectivement 12 kV/m et 30  $\mu$ T. A proximité des centrales et des sous-stations, les champs électriques peuvent atteindre 16 kV/m et les champs magnétiques 270  $\mu$ T.

##### **➤ Dans l'environnement domestique :**

Les intensités des champs électriques et magnétiques dans les habitations dépendent de nombreux facteurs ; de la distance aux lignes de transport, du nombre et du type d'appareils électriques utilisés, ou encore de la position et de la configuration des conducteurs électriques intérieurs. Les champs électriques au voisinage de la plupart des appareils domestiques ne dépassent pas 500 V/m et le champ magnétique est généralement inférieur à 150  $\mu$ T. Dans les deux cas, le champ peut être nettement plus élevé à proximité immédiate de l'appareil, mais il diminue rapidement avec la distance.

##### **➤ Dans l'environnement général Sur le lieu de travail :**

Les champs électriques et magnétiques existent autour du matériel électrique et des fils conducteurs dans tous les établissements industriels. Les travailleurs chargés de l'entretien des lignes de transport et de distribution de courant peuvent être exposés à des champs très importants. A l'intérieur des centrales et des sous-stations, les champs électriques peuvent dépasser 25 kV/m et les champs magnétiques 2 mT. Les soudeurs peuvent être exposés à des champs magnétiques atteignant 130 mT. Près des fours à induction et des cuves d'électrolyse, les champs magnétiques peuvent atteindre 50 mT. Les employés de bureau sont exposés à des champs beaucoup moins intenses lorsqu'ils utilisent des photocopieuses, des écrans vidéo ou d'autres matériels analogues.

#### **I.2 Champs électromagnétique rayonnés par les lignes haute tension**

Les lignes de transport d'énergie électrique haute tension sont des sources d'énergie électromagnétique, en général elles produisent de l'énergie rayonnante (radiations) et de l'énergie non rayonnante (champs). La fréquence des lignes à haute tension (50 ou 60 Hz) est si faible que l'élément rayonnant est presque négligeable. Par conséquent les lignes hautes tensions peuvent être considérées comme produisant des champs électrique et magnétique uniquement. Ces champs sont créés par le passage d'électricité dans les conducteurs, ils dépendent d'une part de la distance à la source et d'autre part du flux du courant dans la source.

### **I.2.1 Champs électriques**

Le champ électrique apparaît dans les lignes de transmissions s'il y a des tensions dans les phases des lignes, et il ne dépend pas du courant électrique qui les traverse. Si il y a des courants dans les conducteurs, en plus du champ électrique, un champ magnétique est formé autour de la ligne de transmission. L'intensité du champ électrique dépend de la disposition géométrique des conducteurs et de la valeur de la tension appliquée, elle diminue avec l'éloignement à la source. Tenant compte que le potentiel électrique à la surface du sol est nul, il est préférable de mesurer le champ électrique à une hauteur aussi élevée que possible par rapport au sol.

L'intensité du champ électrique produite par les lignes hautes tensions dépend des facteurs suivants :

- La distance entre les conducteurs et le sol
- L'espacement entre les phases si nous avons deux circuits l'un à côté de l'autre ainsi que la configuration géométrique des conducteurs.
- Par le milieu environnant (si nous avons grand objet à proximité comme les arbres, clôtures, etc.)
- La distance tangentielle à l'axe de la ligne de transmission.
- L'altitude du point de mesure par rapport à la terre et la tension de la ligne.

### **I. 2.2 champs magnétiques**

Le champ magnétique dépend aussi des positions géométriques du point de mesure, de la distance qui sépare les phases des lignes et de leurs hauteurs géométriques par rapport au sol ; il ne dépend pas du niveau de tension mais il est directement proportionnel au courant transporté par la ligne. Le champ magnétique varie beaucoup plus avec la variation de la charge de la ligne et il est affecté par plusieurs facteurs :

- Les intensités des courants qui circulent dans les conducteurs (généralement les lignes haute tension transportent un courant moyen de 700 A).
- La garde au sol de la ligne ; nous pouvons remarquer que l'intensité du champ magnétique est maximale sous les conducteurs et diminue rapidement avec l'éloignement de la distance à l'axe du pylône.
- L'espacement des conducteurs par rapport à l'axe du pylône ainsi que la transposition des Phases diminuent le champ magnétique. Par exemple, pour une ligne "non transposée" si les phases des deux côtés de la ligne sont dans le même ordre de haut en bas, nous avons un champ magnétique qui diminue avec l'inverse du carré de la distance de la ligne. Alors que pour les lignes "transposée" les permutations des phases des deux côtés de la ligne donnent une réduction du champ magnétique qui est inversement proportionnelle au cube de la distance.

### **I.2.3 Niveaux des champs rayonnés**

Le champ magnétique 50/60 Hz des réseaux électriques est proportionnel au courant parcourant les conducteurs, en s'éloignant des conducteurs il décroît rapidement de manière inversement proportionnelle

avec la distance. En ce qui concerne les appareils électroménagers, leurs champs décroissent de manière similaire. Le champ électrique des réseaux électriques décroît aussi rapidement lorsque l'on s'éloigne des câbles.

Les tableaux (I-1 et I-2) donnent les ordres des grandeurs des intensités de champs rayonnés par les lignes hautes tension et certains appareils domestiques.

<b>Ordres de grandeur des champs électromagnétiques des lignes aériennes</b>		
<b>Champs Lignes aériennes</b>	<b>Champ électrique (V/m)</b>	<b>Champ magnétique (<math>\mu\text{T}</math>)</b>
<b>400 Kv</b>	<b>(1) – 5000</b>	<b>(1) – 30</b>
	<b>(2) – 2000</b>	<b>(2) – 12</b>
	<b>(3) – 200</b>	<b>(3) – 1.5</b>
<b>225 kV</b>	<b>(1) – 3000</b>	<b>(1) – 20</b>
	<b>(2) – 400</b>	<b>(2) – 03</b>
	<b>(3) – 40</b>	<b>(3) – 0.3</b>
<b>90 kV</b>	<b>(1) – 1000</b>	<b>(1) – 10</b>
	<b>(2) – 100</b>	<b>(2) – 01</b>
	<b>(3) – 10</b>	<b>(3) – 0.1</b>
<b>20 kV</b>	<b>(1) – 250</b>	<b>(1) – 06</b>
	<b>(2) – 10</b>	<b>(2) – 0.2</b>
	<b>(3) négligeable</b>	<b>(3) – négligeable</b>
<b>230 kV</b>	<b>(1) – 09</b>	<b>(1) – 0.4</b>
	<b>(2) – 0.3</b>	<b>(2) – négligeable</b>
	<b>(3) négligeable</b>	<b>(3) – négligeable</b>

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

**Tableau I. 1 :** Niveaux de champs électromagnétiques rayonnés par les lignes aériennes

<b>Champ magnétique moyen rayonnés par certains appareils domestiques</b>	
<b>Source de champ magnétique</b>	<b>Induction magnétique</b>
<b>Téléviseurs</b>	<b>0.2 <math>\mu\text{T}</math> à 60 cm</b>
	<b>0.7<math>\mu\text{T}</math> à 30 cm</b>
<b>Sèche-cheveux</b>	<b>0.1 <math>\mu\text{T}</math> à 30 cm</b>
	<b>30 <math>\mu\text{T}</math> à 615 cm</b>
<b>Fer à repasser</b>	<b>0.1 <math>\mu\text{T}</math> à 30 cm</b>
	<b>0.8 <math>\mu\text{T}</math> à 15 cm</b>
<b>Ecran de micro-ordinateur</b>	<b>0.5 <math>\mu\text{T}</math> à 30 cm</b>
	<b>1.4 <math>\mu\text{T}</math> à 15 cm</b>

**Tableau 1. 2 :** Niveaux de champs électromagnétiques rayonnés par des appareils domestiques.

### **I.3 Contexte normatif**

Les premières recommandations pour limiter l'exposition humaine aux radiations électromagnétiques non ionisantes remontent aux années 50. Exactement en 1953 aux Etats-Unis une limitation de la densité de puissance du champ électromagnétique à  $10 \text{ mW/cm}^2$ . Cette limitation concernant la bande HF (10MHz - 10GHz). Dans la même période, l'URSS a établi des normes beaucoup plus restrictives, la limite de la densité de puissance du champ électromagnétique est de  $10 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ . Les normes américaines et russes étaient basées sur deux approches opposées (modèle thermique pour les américains et modèle non thermique pour les soviétiques).

En 1966, le premier standard ANSI C95.1-1966 a été formalisé par l'U.S.Navy et l'IEEE à partir des recommandations de 1953. Des limitations sur  $\|\vec{E}\|^2$  et  $\|\vec{H}\|^2$  ont été introduites en 1971 et le taux d'absorption spécifique (SAR) en 1982. La quatrième édition du standard (IEEE C95.1-1991) introduit des limitations sur les courants induits. Les éditions de 1999 et 2002 de ce standard sont : IEEE C95.1-1999 des limitations pour la bande 3KHz- 300GHz, et IEEE C95.6-2002 pour la bande 0-3KHz. Le dernier standard IEEE C95.1-2005 porte sur les limites d'expositions humaines au champ électromagnétique de radiofréquences de 3KHz-300GHz.

En Europe, les premières recommandations datent de 1974 par un groupe de travail sur les radiations non ionisantes (NIR) de la part de l'Association internationale pour la protection contre les radiations (IRPA), rebaptisée INIRC en 1977, puis l'International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) en 1992. Ce groupe a publié des recommandations en 1988, 1990 et 1998 [ICN98] concernant l'exposition à des champs variables dans le temps et en 1994 concernant les champs statiques. On peut citer aussi des autres organismes européens : (COST 244 bis), le Bureau National de Protection contre les radiations (NRPB, United Kingdom) et le programme de recherche sur les champs électromagnétiques de l'Organisation Mondiale pour la santé (OMS).

#### **I.3.1 Normes sur les champs électromagnétiques de basses fréquences**

Les valeurs limites d'exposition adoptées par le Conseil de l'Union européenne en 1999 résultent d'un long processus qui prend son origine dans le travail de groupes d'experts. Des recommandations ont été établies par des comités de scientifiques et d'ingénieurs d'origine universitaire, industrielle et gouvernementale. Les plus connues sont celles de l'OMS, l'IEEE de 1991 et de l'ICNIRP en 1998.

Les risques de l'exposition aux champs électromagnétiques en général et plus particulièrement les basses fréquences (50-60 HZ) sont évaluées à partir d'une revue exhaustive de la littérature sur leurs effets avérés à court terme. Sur cette base scientifique, l'établissement de valeurs limites d'exposition par des effets considérés, à un moment donné, comme les plus sensibles (c'est-à-dire qui apparaissent au plus bas niveau d'exposition testé, et qui sont jugés pertinents d'un point de vue sanitaire). À cette valeur est appliqué un ensemble de coefficients d'abattement destinés à prendre en compte les incertitudes et à disposer d'une

certaine 'marge de sécurité'. Des réévaluations de ce corps de connaissances, et des recommandations des valeurs limitent d'exposition qui en découle, sont régulièrement pratiquées.

### **I.3.1.1 Restrictions de base**

Les restrictions d'exposition sont fondées sur les effets avérés sur la santé et sont dénommées restrictions de base. Selon la fréquence du champ, les grandeurs physiques utilisées pour spécifier les restrictions de base à l'exposition aux champs électromagnétiques sont la densité de courant (J), le (DAS) et le (SAR).

Pour que la protection contre les effets défavorables sur la santé soit assurée, il faut que ces restrictions de base ne soient pas dépassées. A la fréquence de 50 Hz, l'ICNIRP a établi des restrictions de base sur la densité induite dans le corps humain. Pour des niveaux de densité de courant induit supérieurs à 100 mA. m<sup>-2</sup>, il y a dépassement des seuils d'altération aiguë de l'excitabilité du système nerveux central et d'autres effets aigus tels que l'inversion du potentiel évoqué visuel.

Compte tenu des principes de sécurité rappelés ci-dessus, il a été décidé que, pour les fréquences du domaine compris entre 4 Hz et 1 kHz, il convient de limiter l'exposition professionnelle à des champs induisant des densités de courant inférieures à 10 mA. m<sup>-2</sup>, autrement dit de prendre un facteur de sécurité de 10. Pour la population générale, on applique un facteur supplémentaire de 5, ce qui donne une restriction de base à l'exposition de 2 mA. m<sup>-2</sup>. Au-dessous de 4 Hz et au-dessus de 1 kHz, la restriction de base à la densité de courant induit augmente progressivement, ce qui correspond à l'élévation du seuil de stimulation nerveuse dans ces domaines de fréquences.

### **I.3.1.2 Niveaux de référence**

Les niveaux de référence sont obtenus à partir des restrictions de base par modélisation mathématique et extrapolation des résultats de recherches en laboratoire pour des fréquences spécifiques. Ces niveaux sont donnés pour les conditions de couplage maximal du champ à la personne exposée, assurant ainsi une protection maximale. Dans ce but plusieurs formulations ont été développées dans le régime quasi-statique pour la modélisation des mécanismes de perception des champs électromagnétiques par le corps humain et le calcul des densités de courant induites dans ce dernier.

Le respect des niveaux de référence assure normalement la conformité aux restrictions de base. Si les valeurs mesurées sont supérieures aux niveaux de référence, il ne s'ensuit pas nécessairement qu'il y ait dépassement des restrictions de base une analyse détaillée est nécessaire pour savoir si les restrictions de base sont respectées ou non. Dans ce but il convient d'envisager séparément et non de façon cumulative les niveaux de référence pour les champs électriques et les champs magnétiques.

En effet, du point de vue de la prévention, les courants induits par les champs électriques et les champs magnétiques ne se cumulent pas. Dans ce cas il est prévu que les niveaux de référence soient des valeurs moyennées dans l'espace pour l'ensemble du corps de la personne exposée simultanément à des champs électriques ou magnétiques, sous la réserve expresse que les restrictions de base pour l'exposition locale ne soient pas dépassées.

### I.3.2 Le standard IEEE C95.1-1999

L'édition de 1999 du standard américain porte sur la bande de fréquence 3KHz-300GHz. La discussion qui suit est limitée à la bande qui nous concerne (basses fréquences), 3KHz-1M. Ce standard fait la distinction entre environnements contrôlés, et non contrôlés. C'est-à-dire l'exposition à des rayonnements élevés notamment dans les lieux de travail.

Tous les autres endroits sont considérés non contrôlés. Les grandeurs électriques prises en considération sont:

- Le champ électrique  $\|\vec{E}\|$
- Le champ magnétique  $\|\vec{H}\|$
- Le courant  $I$ , mesuré à travers chaque pied
- La densité de courant  $\|\vec{J}\|$
- La puissance rayonnée  $P$
- Le taux d'absorption spécifique  $SAR$

Le tableau I-3 présente les limites d'exposition maximales pour le champ électrique, le champ magnétique, et le courant électrique.

Fréquence [MHz]	Champ électrique [Vm <sup>-1</sup> ]	Champ magnétique [Am <sup>-1</sup> ]
0.003-0.1	614	163
0.1-3.0	614	16.3/ f
Courant [mA]		
0.003-0.1	1000 f	
0.1-100	100	

**Tableau I-3: Limites d'exposition maximales (IEEE C95.1-1999)**

### I.3.3 Les recommandations ICNIRP

Les recommandations du comité international de protection contre les rayonnements non ionisants portent sur la bande de fréquence 1Hz-300GHz. Une distinction est faite entre l'exposition dans un cadre professionnel et le grand public..

Les valeurs limites reportées dans le Tab (I-4), sont à comparer avec des grandeurs moyennées. Dans le cas du SAR, il faut considérer la valeur moyennée dans le temps sur 6 min, et dans l'espace sur une masse de 10g de tissu. Pour la densité de courant, il faut d'abord moyenner sur une surface de 1 cm<sup>3</sup> normale à la densité et ensuite considérer la valeur quadratique moyenne sur un temps de 6 min.

Fréquence [Hz]	SAR [Wkg <sup>-1</sup> ]	Densité de courant [mAm <sup>-2</sup> ]
0-1 Hz	-	40
1-4 Hz	-	40/ f
4 Hz - 1kHz	-	10
1-100 kHz	-	f/100
0.4 Globale		
0.1 – 10 MHz	10 tête, thorax et ventre	f/100
	20 bras, jambes	

**Tableau I. 4:** Restrictions de base

#### I.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons évoqué l'état de l'art dans le domaine des champs électromagnétiques basse fréquence. Une étude bibliographique sur les effets des champs électromagnétiques basse fréquence sur la santé a été réalisée, Il a permis de nous éclairer sur les différents types de rayonnement électromagnétiques basse fréquence d'origine naturelle et artificielle et d'évoquer le contexte normatif relatif. Nous avons passé en revue la bibliographie existante sur le thème "champs électromagnétiques basse fréquence et environnement.

**Chapitre : 2**

**Problématique des interférences des  
champs électromagnétiques des  
basse fréquence avec  
environnement**

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons des différents paramètres qui interviennent directement dans ces interférences, ainsi, nous citerons : au 1<sup>er</sup> paragraphe nous aborderons la problématique des interférences des champs basse fréquence avec le milieu environnant qui relève d'un problème typique de compatibilité électromagnétique (CEM), puis nous abordons les règles générales de la CEM, basées sur l'explication des différents mécanismes de transfert entre les sources de ces champs et les paramètres environnementaux pris en considération (victime).

Les aspects relatifs aux effets des champs électromagnétiques sur la santé seront évoqués.

## II.2. Compatibilité électromagnétique

La compatibilité électromagnétique (CEM) : Est une science relativement récente en tant que telle. Elle représente une technique qui permet de rendre compatible deux appareils fonctionnant ensemble dans un milieu donné. Ainsi, la directive (CEM 89-336-CEE), définit la Cem comme étant : « L'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans son environnement ». Ainsi la CEM repose sur deux concepts :

### ➤ L'Emissivité :

L'EMI (électromagnétique interférence) caractérise les émissions produites par un équipement électrique ou électronique et qui pourraient, en fonction de leur intensité, perturber d'autres équipements.

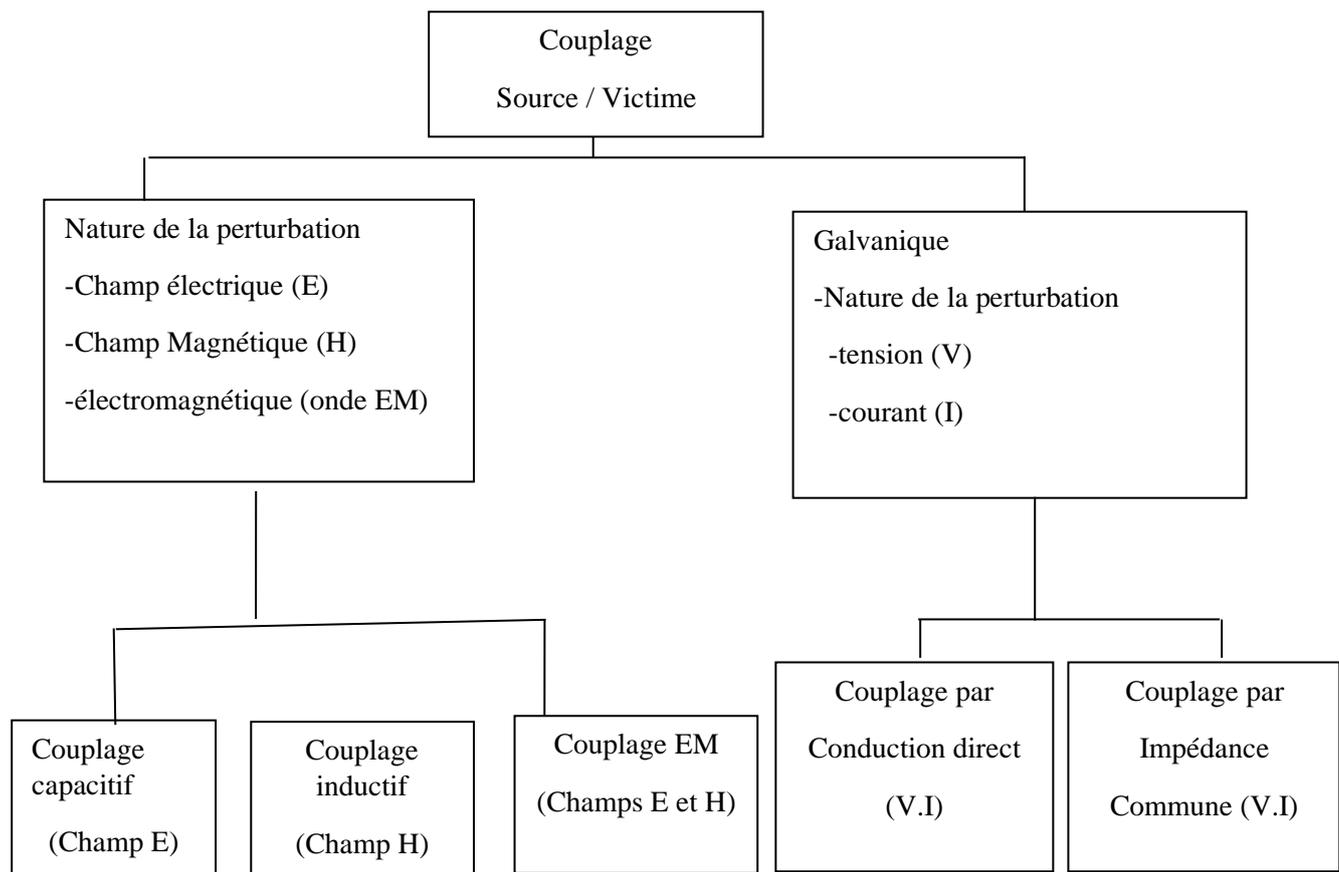
### ➤ L'immunité :

Elle représente l'aptitude d'un appareil à fonctionner correctement malgré l'influence des perturbations extérieures. Elle se caractérise par la susceptibilité électromagnétique (EMS) qui traduit l'inaptitude d'un dispositif à fonctionner dans cet environnement électromagnétique.

La compatibilité électromagnétique couvre les thèmes qui participent à la compréhension des mécanismes de transfert d'énergie entre une source électromagnétique et un équipement donné, et à l'évaluation des effets sur les dispositifs cibles appelés aussi « victimes » dans le jargon de la Cem. Dans le domaine de basse fréquence les lignes haute tension sont des sources d'énergie électromagnétique et demeurent le principal centre d'intérêt de notre étude.

### II.2.1. Mécanismes d'action des perturbations électromagnétiques

Le principe d'action des perturbations électromagnétique est schématisé par le diagramme de la figure (I.1). Pour que se produise un phénomène de perturbation électromagnétique, trois éléments doivent être présents : une source de perturbations, un milieu de couplage et une victime des perturbations.



**Figure. II.1. Modes de couplages électromagnétiques**

## II.2.2. Modes de couplages

La compréhension du mécanisme d'interaction des champs électromagnétiques avec son environnement, repose sur une identification parfaite des modes de transfert de l'énergie entre la source et la victime. Ces modes, que l'on appelle aussi « couplages » sont d'une manière générale l'expression des lois fondamentales de l'électromagnétisme et de la propagation. En termes de Cem, on distingue principalement deux types de couplages :

### A. Le mode de couplage galvanique (ou par conduction) :

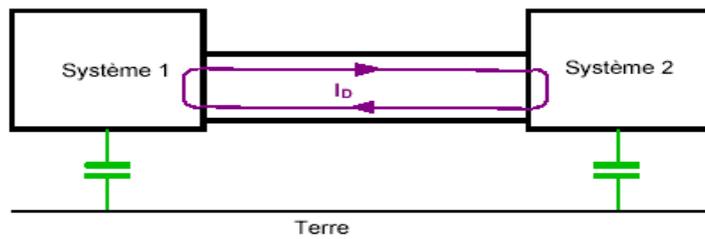
Ce mode de couplage se caractérise par le fait, que le signal perturbateur se propage de la source vers la victime par une liaison physique. Dans cette catégorie on distingue encore les perturbations conduites induites par couplage par impédance commune. Le signal est soit une tension soit un courant. Ce mode de couplage se fait soit par liaison direct soit impédance commune

#### A.1. Les couplages par liaison directe :

Les couplages par liaison directe permettent la propagation de la source à la victime par l'intermédiaire d'un canal de transmission d'information ou d'énergie.

Ces perturbations passent de la source à la victime en mode commun et en mode différentiel.

- **Mode différentiel** : dans ce mode le courant passe à travers l'un des conducteurs et revient en opposition de phase par l'autre



- **Mode commun** : Le courant se propage sur les deux conducteurs dans le même sens et revient par la liaison équipotentielle.

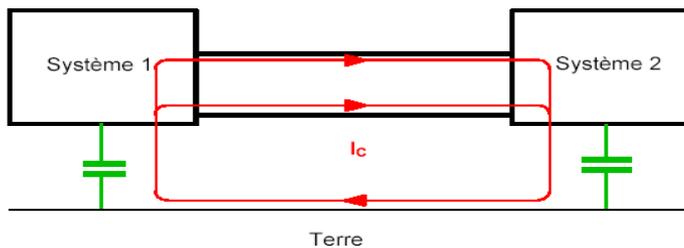


Figure.III.2.b Mode commun

### A.2 Les couplage par impédance commune :

Le couplage par impédance commune survient lorsqu'un circuit comporte une partie commune avec la source de perturbations, l'impédance commune peut être n'importe quel élément du circuit, résistance, capacité, inductance, retour des masses.....

### B. Le mode de couplage rayonné

Dans ce cas il n'existe aucune liaison physique entre la source et la victime. Le transfert d'énergie s'effectue par couplage capacitif, inductif ou par rayonnement. Selon la nature du couplage le signal perturbateur peut être un champ électrique, un champ magnétique ou une onde électromagnétique. On peut distinguer deux types de couplage dans ce mode le couplage en champ lointain et le couplage en champ proche.

#### B.1 Le couplage en champ lointain

Un champ électromagnétique peut se coupler sur toute structure filaire, donc tout câble, et générer sur ces structures des tensions soit en mode commun (par rapport à la masse), soit en mode différentiel (entre fils) (figure. II.3, 4,5) soit et d'ailleurs plus généralement les deux couplages sont appelés champ à câble, c'est l'effet d'antenne, des pistes de circuits imprimés...etc.

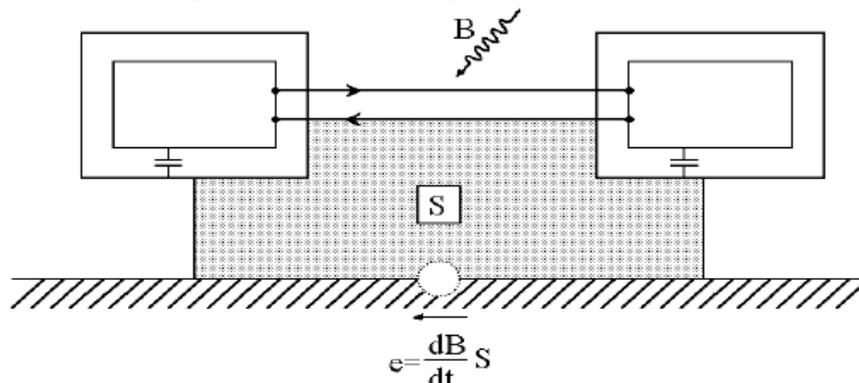
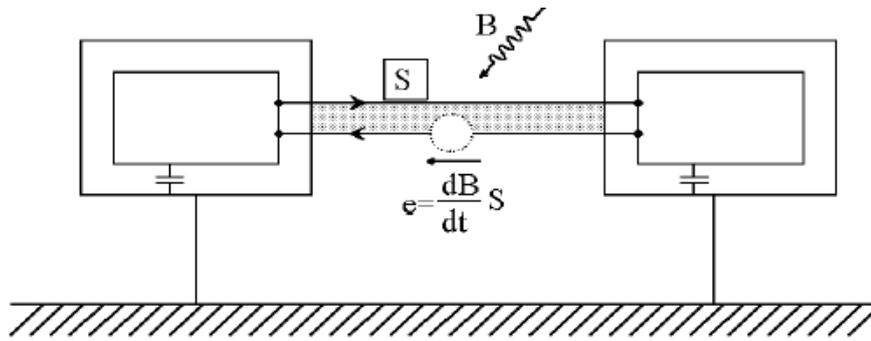
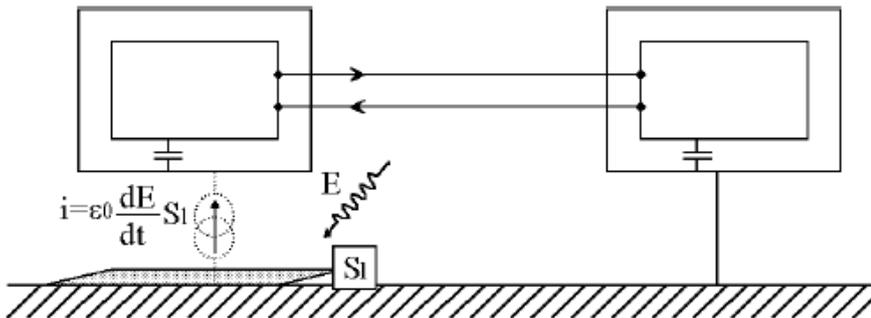


Figure. II.3 Couplage champ magnétique à câble en mode commun



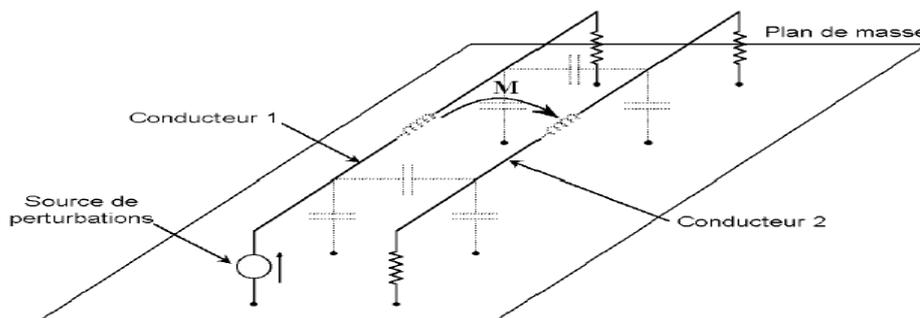
**Figure. II.4** Couplage champ magnétique à câble en mode différentiel



**Figure. II.5** Couplage champ électrique à câble en mode commun

### B.2 Le couplage en champ proche :

Ces couplages en champ électrique ou magnétique peuvent être représentés respectivement par des liaisons capacitives ou des mutuelles inductances. Quand ces couplages interviennent sur des connexions électriques, on parle alors de couplage câble à câble ou de phénomènes de diaphonie capacitive ou inductive (figure. II.6).



**Figure. II.6.** Couplage en champ proche

### II.2.3. Comportement des sources électromagnétiques

D'une manière générale, la caractérisation d'une source relève de deux aspects :

- Le premier concerne les paramètres électriques tels que l'impédance d'entrée de la structure ou la fréquence de résonance, le rapport S/B. Ces paramètres sont importants dans le cas de la conception de structures dédiées à des applications précises (sondes de mesures, antennes radiofréquences...) et permettent une optimisation de la structure par rapport aux dispositifs se situant en amont de la structure.

- Le second aspect concerne l'étude du comportement électromagnétique de la structure qui consiste en la caractérisation du champ électromagnétique généré par cette dernière.

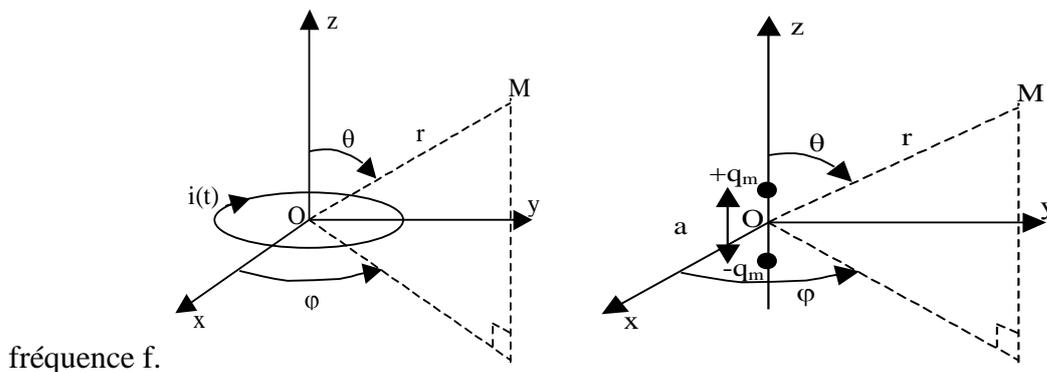
Cet aspect est directement lié à l'évaluation des effets des interactions de la source avec le milieu victime.

Le comportement électromagnétique d'une source de rayonnement est principalement lié à la fréquence et à la distance d'observation de la source de rayonnement, relativement à la longueur d'onde, ce dernier paramètre étant également lié à la fréquence de l'onde. Ainsi, la nature des champs d'exposition, et donc la nature des couplages entre une source et une victime sont variables selon la fréquence du signal source.

D'une manière générale, la détermination du champ électromagnétique produit par une source quelconque relève d'un problème relativement complexe. On peut cependant retenir un comportement commun à toutes les sources, en fonction de la distance (relativement à la longueur d'onde) entre la source électromagnétique et le milieu « cible ». Cette similitude se caractérise par le fait que le champ électromagnétique généré est la somme de trois contributions dont les amplitudes varient, en fonction de la distance  $r$  d'observation, proportionnellement à  $\frac{1}{r}$ ,  $\frac{1}{r^2}$  et  $\frac{1}{r^3}$ . Ces différentes contributions traduisent des échanges d'énergies différents entre la source et la cible.

- Le terme en  $\frac{1}{r}$  est le terme dit de rayonnement et correspond à un transfert d'énergie depuis la source.
- Le terme en  $\frac{1}{r^2}$  est le terme d'induction et correspond à des échanges d'énergie réactive entre la source et le milieu environnant.
- Le terme en  $\frac{1}{r^3}$  est le terme quasi-stationnaire et correspond à une accumulation de charges.

Ces contributions peuvent facilement être mises en évidence dans le cas des sources élémentaires qui constituent le dipôle électrique et le dipôle magnétique (figure II. 2). Le modèle du dipôle électrique élémentaire est constitué de deux charges ponctuelles  $+q$  et  $-q$  distantes d'une longueur «  $a$  ». La charge  $q$  varie en fonction du temps selon une loi sinusoïdale de fréquence  $f$ . Le modèle du dipôle magnétique oscillant est un circuit de forme circulaire, de rayon «  $a$  » et parcouru par un courant sinusoïdale de



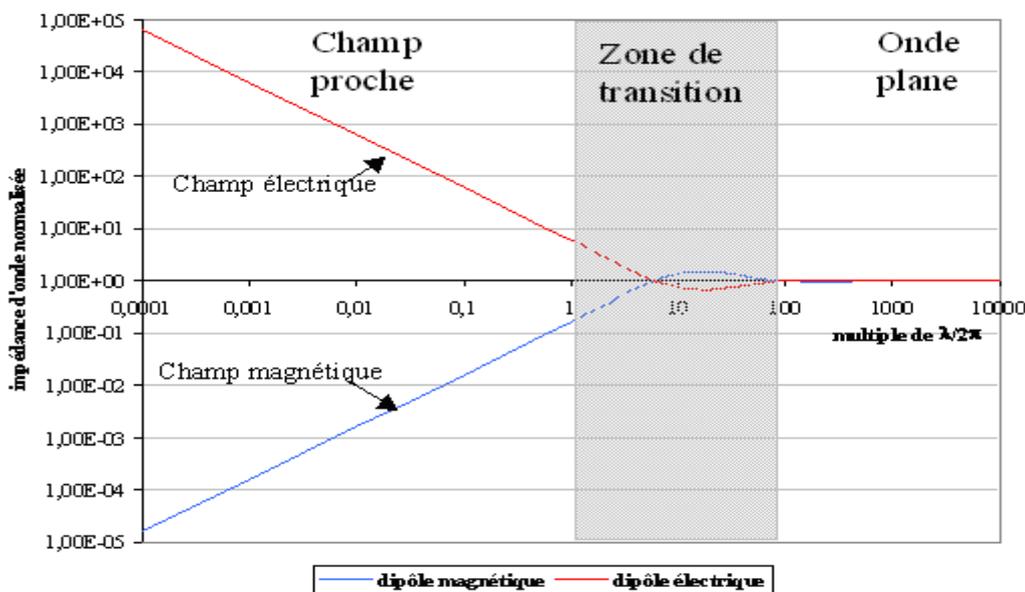
**Figure. II.7 :** Dipôles électrique et magnétique oscillants

Très proche de la source, le champ généré est essentiellement dû à sa composante quasi- stationnaire et la nature des interactions (électrique et/ou magnétique) est essentiellement liée à la forme et aux dimensions de la source et de la cible.

La (figure II. 8) montre les variations normalisées de l'impédance d'onde en fonction de la distance pour les deux sources élémentaires de la (figure II.7) .A grande distance de la source (relativement à la longueur d'onde), cette impédance tend vers l'impédance d'onde du milieu de propagation indépendamment de la nature électrique ou magnétique de la source. Dans la zone de champ proche ( $r = \frac{\lambda}{2\pi}$  ), l'impédance d'onde varie en fonction de la distance et de la nature de la source.

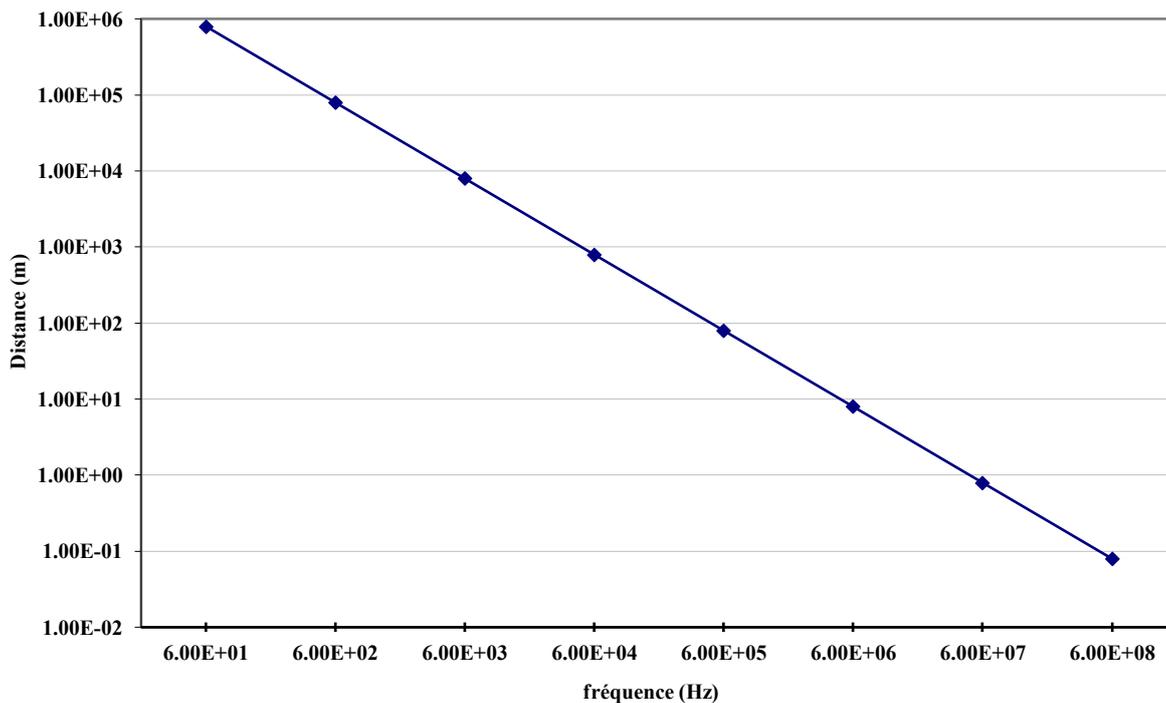
- Pour le dipôle magnétique cette impédance est très faible au voisinage de la source et augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source, jusqu'à la limite de champ proche. Cette diminution de l'impédance d'onde au voisinage de la source est caractéristique d'un champ magnétique intense, et d'un champ électrique faible, et les interactions à attendre seront essentiellement dues à un phénomène de couplage inductif avec la cible.

- Pour le dipôle électrique, l'impédance d'onde est très élevée au voisinage de la source. Elle diminue avec la distance jusqu'à la valeur asymptotique correspondant à  $Z_0$ . La valeur élevée de l'impédance d'onde au voisinage de la source est caractéristique cette fois d'un champ électrique élevé et d'un champ magnétique faible. Ainsi, dans ce cas, les effets prépondérants dans l'interaction entre la source et la cible, seront essentiellement dus à un couplage capacitif.



**Figure. II.8.** Variation de l'impédance d'onde normalisée en fonction de la distance normalisée par rapport à la source

Les différents aspects que nous venons d'évoquer, concernant le comportement général des sources électromagnétiques, entraînent plusieurs conséquences quant à la nature de leurs interactions avec l'environnement. La (figure II.9) montre les variations de la distance correspondant à l'a zone de champ proche, en fonction de la fréquence de la source. Dans l'air, cette distance est de l'ordre de 6000 km pour des fréquences correspondant au réseau de distribution de l'énergie (50 Hz et 60 Hz) et diminue jusqu'à quelques dizaines de centimètres pour les radiofréquences (~50 cm à 100 MHz).



**Figure. II.9** : variation de la distance correspondant la limite de champ proche en fonction de la fréquence

Dans la gamme de fréquence qui nous intéresse, les longueurs d'ondes sont très grandes devant les distances mises en jeu, et les interactions ont lieu essentiellement dans la zone de champ quasi stationnaire. Ainsi les interactions prépondérantes seront dues à un champ électrique ou à un champ magnétique.

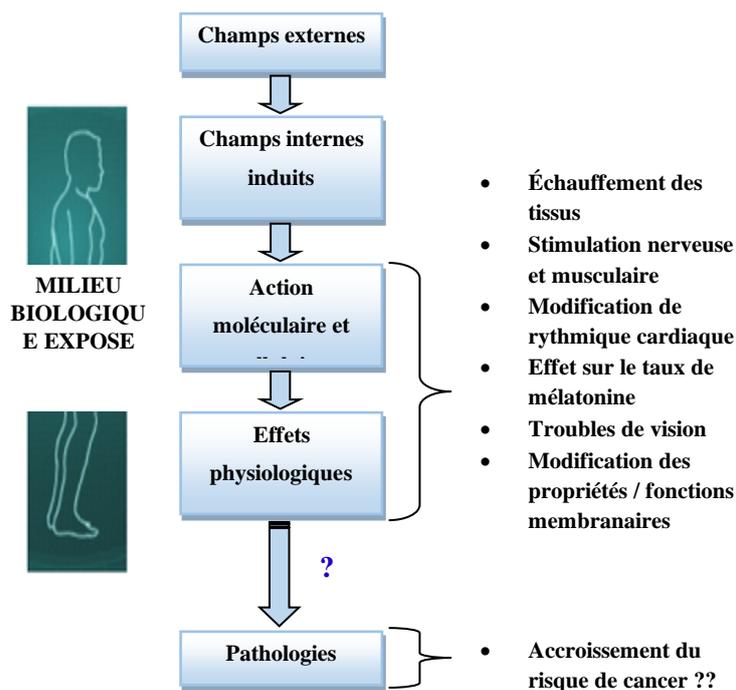
### **II.3. Mécanismes d'interaction champs électromagnétiques basse fréquence corps humain**

Les diverses études publiées à ce jour montrent que les champs électromagnétiques ont un effet physiologique sur les milieux biologiques. Lorsqu'un milieu biologique est soumis à des champs électromagnétiques, une interaction se produit avec les charges électriques du tissu ou de la cellule. Le résultat de l'interaction peut produire un effet biologique. L'être vivant peut être considéré globalement comme un ensemble de processus électriques en interaction avec des mécanismes biochimiques (figure II.10). Il résulte de l'exposition a des champs électromagnétiques, une induction de champ électriques associés à des courants induits qui interfèrent avec ceux qui existent naturellement dans l'organisme.

L'ampleur et la répartition spatiale de ces champs varient selon que le champ extérieur est électrique ou magnétique, ses caractéristiques (fréquence, amplitude, d'orientation et de forme d'onde) et la taille, la forme et les propriétés électriques du corps exposé.

### II.3.1 Mécanisme de couplage direct

C'est le mécanisme physique de base pour l'interaction des champs magnétiques ELF avec des tissus. Le champ électrique induit augmente avec la fréquence du champ extérieur et la taille de l'objet. L'effet des champs induits au-dessus d'un seuil bien établi est la stimulation de tissus excitables (systèmes nerveux et muscles).



**Figure. II.10.** Mécanismes d'interaction champs électromagnétique et corps humain

Il existe trois mécanismes fondamentaux de couplage, par lesquels les champs électrique ou magnétique de fréquence variable dans le temps interagissent avec la matière vivante :

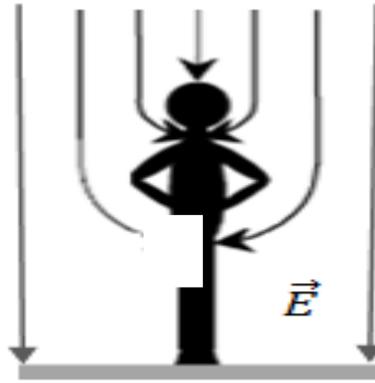
- Couplage avec les champs électriques de basses fréquences
- Couplage avec les champs magnétiques de basses fréquences
- Absorption d'énergie provenant des champs électromagnétiques

#### II.3.1.1. Couplage avec un champ électrique

En basse fréquence le corps humain se comporte comme un bon conducteur et son interaction avec les champs électriques de fréquence variable provoque :

- un écoulement de charges électriques (courant électrique),
- la polarisation des charges liées (formation de dipôles électriques)
- la réorientation des dipôles électriques déjà présents dans les tissus.

L'importance relative de ces différents effets dépend des propriétés électriques du corps, c'est-à-dire de sa conductivité électrique qui détermine l'écoulement du courant électrique et de sa permittivité qui détermine l'ampleur des phénomènes de polarisation. La conductivité et la permittivité varient selon le type de tissu biologique et dépendent également de la fréquence du champ. Les champs électriques externes induisent, à la surface du corps exposé, une charge superficielle qui provoque, à l'intérieur du corps, l'apparition de courants dont la distribution dépend des conditions d'exposition, de la taille et de la forme du corps, ainsi que de la position du corps dans le champ (figure II.11.a).



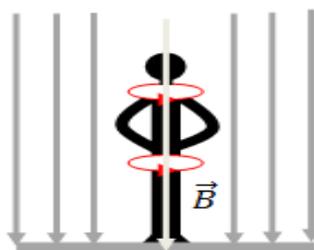
**Figure. II.11.a** corps humain plongé dans un champ électrique

### **II.3.1 .2. Couplage avec un champ magnétique**

L'interaction physique champs magnétiques de fréquence variable avec le corps humain crée des champs électriques induits et provoque la circulation de courants électriques. L'intensité du champ induit et la densité de courant sont proportionnelles:

- au rayon d'une boucle de courant dans le corps humain,
- à la conductivité électrique du tissu, ainsi qu'à la densité de flux magnétique
- et à la vitesse de variation de cette grandeur. Pour un champ magnétique d'intensité et de fréquence donnée, les champs électriques les plus intenses sont induits lorsque les dimensions de la boucle sont maximales. Le trajet exact et l'intensité du courant induit dans une partie du corps donnée dépendent de la conductivité électrique du tissu considéré.

Le corps humain n'est pas électriquement homogène ; cependant, les densités de courant induites peuvent être calculées en utilisant des modèles électriques et anatomiques réalistes du corps humain (figure II.11.b).



**Figure. II.11.b** corps humain plongé dans un champ magnétique

### **II.3.1 .3. Absorption de l'énergie électrique**

L'exposition du corps humain aux champs électriques ou magnétiques basses fréquences n'entraîne généralement qu'une absorption d'énergie négligeable et aucune élévation de température mesurable. L'exposition à des champs électromagnétiques de fréquence supérieure à 100 kHz peut toutefois entraîner une absorption d'énergie et une élévation de température significatives. De façon générale, l'exposition à un champ électromagnétique uniforme (onde plane) entraîne une distribution de densité de courant fortement inhomogène à l'intérieur du corps, qui est à l'origine des effets biologiques. Ce dépôt et cette distribution doivent être évalués par la mesure et le calcul dosimétrique. Dans les tissus biologiques, le débit d'absorption spécifique (DAS) défini comme étant le Débit d'énergie thermique déposée sur une masse de matière biologique (poids corporel) du fait de l'atténuation de l'énergie électromagnétique lorsqu'elle traverse les tissus. Le Débit d'Absorption Spécifique (DAS), est exprimé en watts par kilo (W/kg) et il est proportionnel au carré de l'intensité du champ électrique interne. La distribution et la valeur moyenne du DAS peuvent être calculées ou estimés à partir de mesures faites en laboratoire et peuvent être influencées par les facteurs suivants :

- Paramètres du champ incident, à savoir fréquence, intensité, polarisation, configuration source-objet (champ proche ou lointain).
- Caractéristiques du corps exposé, à savoir taille, géométrie interne et externe, propriétés diélectriques des différents tissus.
- Effets du sol et des autres objets réfléchissants dans le champ proche du corps exposé.

### **II.3.2. Mécanismes de couplage indirect.**

Il existe deux mécanismes de couplage indirect :

- Les courants de contact résultant du contact du corps humain avec un objet se trouvant à un potentiel électrique différent (c'est-à-dire lorsque soit le corps soit l'objet est chargé électriquement par un champ électromagnétique) ;
- Le couplage de champs électromagnétiques à des appareillages médicaux portés par, ou implantés sur, une personne (les prothèses auditive et les pacemakers etc ...).

Lorsqu'un champ électromagnétique charge électriquement un objet conducteur, cela provoque le passage de courants électriques à travers le corps de la personne en contact avec cet objet. L'amplitude et la distribution spatiale de ces courants dépendent de la fréquence, de la dimension de l'objet considéré, de la taille de la personne et de la surface de contact ; des décharges transitoires et des étincelles peuvent se produire lorsqu'une personne et un objet conducteur exposé à un champ intense se rapprochent l'un de l'autre.

## **II.4. Effets des champs électromagnétiques basse fréquence sur la santé humaine**

Les mécanismes d'interaction des champs électrique et magnétique avec la matière peuvent être groupés en deux catégories : les champs et les courants induits d'une part, les autres effets directs et indirects d'autre part. Certains mécanismes pourraient être spécifiques pour certaines parties du corps, par exemple les cellules nerveuses sont plus sensibles aux champs induits que les autres cellules. A ce jour, en dehors des effets dus aux champs et aux courants induits servant de base à la réglementation, aucun mécanisme d'action de ces champs sur le vivant n'a été démontré.

### **II.4.1. Les effets avérés :**

Les effets avérés dépendent de l'intensité locale du courant induit dans chaque tissu suite à une exposition à un champ électromagnétique 50Hz; Leur grandeur de référence est la densité de courant induit exprimée en millièmpère par mètre au carré (mA/m<sup>2</sup>).

Lorsque le corps humain est exposé à des champs électriques 50Hz, les champs électriques externes induisent à la surface du corps exposé une charge superficielle. Ce phénomène se traduit par l'apparition de courants, nécessaires pour déplacer les charges électriques à la surface du corps. Lorsque le corps humain est exposé aux champs magnétiques alternatifs, l'interaction physique champs magnétiques 50Hz avec le corps humain crée des champs électriques induits, et des courants induits à l'intérieur du corps humain.

L'exposition à un champ électrique peut amener les sujets exposés à percevoir ce champ, du fait de la vibration des poils provoquée par la charge électrique alternative induite, à la surface du corps. Ces caractéristiques rendent le champ électrique plus ou moins perceptible selon les individus, les seuils de perception du champ électrique varient donc d'un individu à l'autre. La plupart des gens sont capables de percevoir des champs électriques de 50/60 Hz d'intensité supérieure à 20 kV.m<sup>-1</sup> et seule une minorité peut percevoir des champs d'intensité inférieure à 5 kV.m<sup>-1</sup>.

Contrairement au cas du champ électrique, le corps humain n'est pas sensible au champ magnétique. Cependant, comme il est conducteur, son exposition à un champ magnétique y induit des courants mais ceux-ci sont de faible intensité.

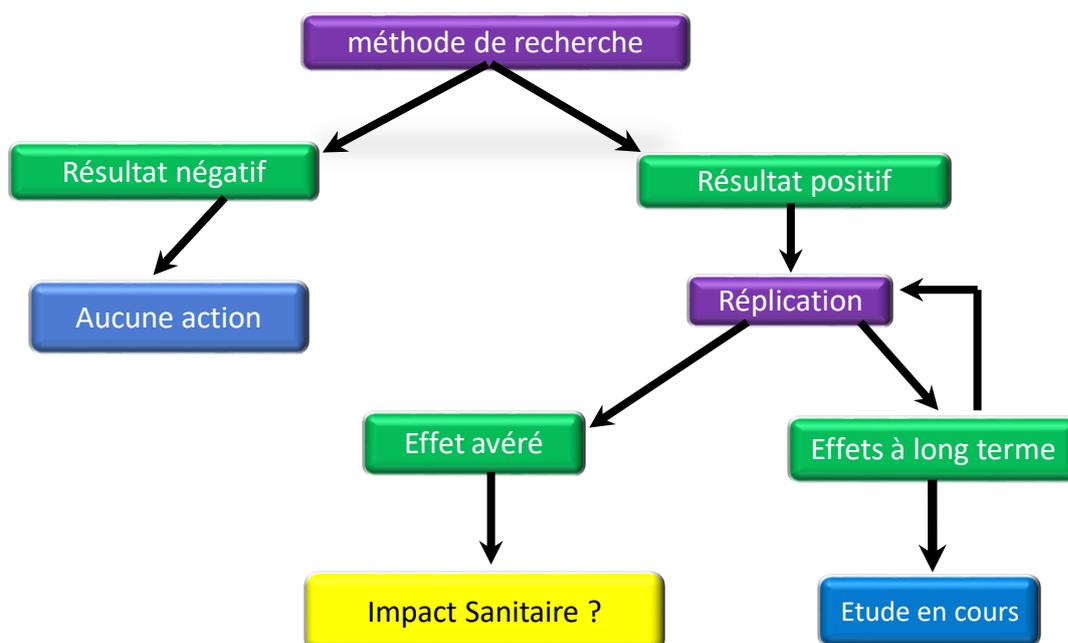
L'exposition à des champs magnétiques intenses peut provoquer des perceptions immédiates. Les seuils retenus par l'Organisation Mondiale de la Santé sont indiqués dans le (tableau II.1). À partir de 100 mA/m<sup>2</sup>, les courants induits par l'exposition aux champs sont supérieurs aux courants endogènes et entraînent donc une stimulation électrique des tissus excitables, comme par exemple le muscle cardiaque.

Champ magnétique (50/60 Hz)(m T)	Densité de courant induit (mA/m <sup>2</sup> )	Le seuil de perception
<b>0.5-5</b>	<b>1 - 10</b>	Effet de biologique mineurs
<b>5 - 50</b>	<b>10-100</b>	Effet bien établis sur le système nerveux et la vision
<b>50-500</b>	<b>100-1000</b>	Simulation des tissus excitables et des dommages possibles sur la santé
<b>&gt;500</b>	<b>&gt;1000</b>	Fibrillation ventriculaire et des extrasystoles-effets aigus.

**Tableau II.1:** Le seuil de perception du champ magnétique

#### II.4.2. Les effets potentiels

La plupart des travaux de recherches s'intéressent aux risques qu'entraîne l'exposition à long terme aux champs électromagnétique 50Hz. Ces études intéressent aussi bien les biologistes que les physiciens. En 2002 une monographie dans laquelle les champs magnétiques ELF ont été classés comme « peut-être cancérogènes pour l'homme » a été publié. La (figure II.12) représente la méthodologie suivie dans la recherche des effets de ces champs sur la santé :



## **Figure II.12 Méthodologie de recherche sur les effets des champs électromagnétiques 50 Hz**

Ces méthodes de recherche émanent des études épidémiologiques et expérimentales et de modèles théoriques par ordinateurs :

- C. L'épidémiologie** : Science qui recherche des corrélations entre l'exposition et l'apparition de maladies.
- D. Expérimentations biologiques sur l'animal** : Etude in vivo ou sur des cultures de cellules (étude in vitro) qui cherchent à identifier un effet, à en confirmer l'existence et à identifier un mécanisme d'action.
- E. Expérimentation chez l'homme** : Expositions contrôlées de volontaires humains à des champs électriques et/ou magnétiques 50 Hz pendant des périodes relativement brèves. De multiples fonctions sont analysées, comme par exemple : la mémoire, la concentration, la vitesse de réaction, l'activité électrique cérébrale.

### **II.4.2.1. Etudes épidémiologiques**

Les études épidémiologiques établissent des associations statistiques qui sont interprétées en tenant compte des autres facteurs environnementaux parfois difficiles à séparer du facteur étudié. Elles sont réalisées en prenant compte des expositions professionnelles qui sont les plus importantes et les plus durables, des expositions résidentielles chez les adultes et des expositions résidentielles chez les enfants.

Dans les premières études épidémiologiques, c'est d'abord le risque de cancer qui a été analysé, et notamment des leucémies et de tumeur cérébrale chez les enfants. D'autres risques ont également été étudiés tels que les maladies cardio-vasculaires, les dépressions, les suicides, et les maladies neuro-dégénératives. En revanche, dans ce type d'étude, il est impossible de maîtriser l'exposition aux champs électromagnétiques sur une longue période. Ces études sont basés sur le facteur risque relatif (RR) qui représente le rapport entre le taux

d'incidence de la maladie au sein d'un groupe exposé à un facteur de risque donné et le taux d'incidence pour la même maladie dans le groupe non exposé et l'intervalle de confiance (IC) qui représente la plage de valeurs où la vraie valeur de l'indice mesuré à 95 % de chance de se trouver. C'est un indicateur du degré de précision de la mesure.

Les études de longue durée en laboratoire sont effectuées sur des animaux et offrent l'avantage de concentrer la recherche sur le seul agent physique étudié, en contrôlant les autres facteurs environnementaux. Elles sont donc complémentaires des études épidémiologiques, dont elles peuvent

indirectement confirmer les résultats en précisant les mécanismes et la cause d'une association statistique observée. Elles ont notamment porté sur la cancérogenèse et le risque de malformations.

### **A. Les études épidémiologiques chez les enfants**

La première étude épidémiologique qui a posé pour la première fois la question d'un risque possible lié à l'exposition au champ magnétique a été conduite en 1979 aux Etats-Unis. Cette étude observait une plus grande fréquence de cancers, notamment de leucémies, parmi les enfants habitant près d'ouvrages électriques. Depuis de très importants travaux de recherches internationales ont été impulsés et se poursuivent encore. Pour mettre en évidence cette corrélation la plus part des études récentes ont utilisé des approches qui consistent à comparer directement les niveaux de champs mesurés dans les habitations et à considérer la densité et les caractéristiques des lignes électriques à leur voisinage.

Vue la diversité des expositions aux champs électromagnétiques résidentiels, il parvient plus fiable de calculer les facteurs de risque sur la base de mesure de champs, que de les calculer en fonction de la densité des lignes électriques au voisinage des habitations. Dans les recherches réalisées aux Etats-Unis sous la direction de Martha Linet de l'institut National de Cancer. Aucune association entre la densité des lignes électriques autour des habitations, et une augmentation du risque de leucémie n'était confirmée, le risque relatif était (RR=0,88).

Les recherches réalisées indépendamment au Canada, en Angleterre et en Grande-Bretagne avec des puissances statistiques plus importantes, ont donné des résultats similaires à ceux des études américaines et ont pu démontrer que le risque relatif de développer la leucémie infantile n'augmente pas avec l'augmentation du niveau de champ magnétique. Pour la catégorie des enfants exposés à plus de 0,2  $\mu\text{T}$ , les chercheurs trouvent une faible augmentation des cas de leucémie, le risque relatif étant de 1,24 (mais l'intervalle de confiance IC = 0,86 – 1,79). Une augmentation du risque relatif est également observée à des niveaux d'exposition plus élevés (0,4-5  $\mu\text{T}$ ), mais pour des niveaux d'exposition supérieure le risque relatif diminue.

En ce qui concerne les effets de l'exposition aux champs sur le risque de cancer du cerveau chez l'enfant, les résultats des études faites par **N. Wertheimer et E. Leeper** et qui ont mis en évidence cette hypothèse avec un facteur de risque (RR=2,4) ; ont été controversés par les études épidémiologiques basées sur de vraies mesures de champs dans les habitations qui n'ont pas pu établir aucune relation entre le cancer du cerveau chez l'enfant et les champs magnétiques basse fréquence.

### **B. Les études épidémiologiques chez l'adulte**

Les études faites sur l'exposition résidentielle des adultes n'ont pas démontré une association avec le risque de cancer, par contre celles sur l'exposition professionnelle où les niveaux d'exposition aux champs magnétiques pour certains métiers sont 10 à 15 fois supérieurs par rapport à ceux que l'on trouve en milieu résidentiel, ont connu de notables progrès. Certaines études suggèrent que les travailleurs les plus exposés aux champs sont soumis à un risque accru de leucémie et de cancer de cerveau, La plus part d'entre elles

établisent le niveau d'exposition aux champs en fonction du titre d'emploi des travailleurs, d'autres ont amélioré l'évaluation individuelle de l'exposition professionnelle, en tenant compte des facteurs professionnels reconnus comme possibles cancérogènes.

Une analyse conjointe réalisée par Kheifets à partir des trois plus importantes études en exposition professionnelle étude Ontario – hydro , Sahl 1993 , Thériault 1994 : étude franco-canadienne pour la partie EDF et Hydro-Québec, Savitz 1995 , a permis de regrouper près de 400 000 travailleurs des compagnies d'électricité, suivis tout au long de leur carrière professionnelle et même au-delà pour une grande partie d'entre eux.

Sur la base de l'analyse combinée des données de ces études, le risque relatif était (RR= 1,2) pour les cancers du cerveau et (RR= 1,09) pour les leucémies. Ces résultats ne sont donc pas statistiquement significatifs. La possibilité que l'exposition aux champs électromagnétiques puisse être responsable d'une augmentation du nombre de maladies cardio-vasculaires, de dépressions, ou de suicides a fait l'objet d'études épidémiologiques portant sur de larges effectifs sans montrer d'augmentation du risque.

## **II.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons examiné la problématique de l'interférence des champs électromagnétiques basses fréquences avec l'environnement. Nous avons réalisé une étude bibliographique sur les effets des champs électromagnétiques basse fréquence sur la santé, avec une attention particulière aux effets biologiques.

En pratique l'exposition à des champs électromagnétiques basse fréquence a lieu en condition de champ proche, le champ électrique se découple donc de celui magnétique et les phénomènes physiques mis en jeu sont complètement différents. Nous avons vu que les effets des champs sur la santé ne sont pas établis .Les organisations mondiales de protection contre le rayonnement non ionisant ont établi des restrictions de base et des niveaux de référence sur les valeurs de champs électrique et magnétique à ne pas dépasser lors de l'exposition a des champs électromagnétiques basse fréquence.

## Sommaire

II.1. Introduction .....	22
II.2. Compatibilité électromagnétique .....	22
II.2.1. Mécanismes d'action des perturbations électromagnétiques .....	23
II.2.2. Modes de couplages .....	24
A. Le mode de couplage galvanique (ou par conduction) :.....	24
B. Le mode de couplage rayonné .....	25
II.2.3. Comportement des sources électromagnétiques .....	26
II.3.1 Mécanisme de couplage direct .....	31
II.3.1.1. Couplage avec un champ électrique.....	32
II.3.1 .2. Couplage avec un champ magnetique.....	32
II.3.2. Mécanismes de couplage indirect. ....	34
II.4.1. Les effets avérés :.....	35
II.4.2. Les effets potentiels .....	36
II.4.2.1. Etudes épidémiologiques .....	38
A. Les études épidémiologiques chez les enfants.....	38
B. Les études épidémiologiques chez l'adulte.....	39
II.5 Conclusion .....	41

**Chapitre : 3**

**Analyse de l'environnement  
electromagnetique au voisinage des  
lignes de transmission**

## Introduction

Dans ce chapitre une analyse progressive des moyens de réduction du champ électrique aux voisinages d'une ligne THT 500 kV est réalisée.

Dans un premier lieu on a commencé par étudier le comportement des champs électrique et magnétique rayonnés par la ligne 500 kV sous l'effet d'une variation de sa configuration, de ses paramètres géométriques et électriques.

Dans une seconde étape pour le même modèle de ligne proposé on a analysé la réduction du champ électromagnétique généré, en utilisant des câbles de blindage actifs et passifs sous les conducteurs des lignes et de voir l'effet de variation de leurs caractéristique géométrique sur la nouvelle distribution du champ électromagnétique.

### **III.1 Effet de la géométrie de la ligne sur la réduction du champ électromagnétique rayonné**

Les influences du champ électromagnétique des lignes électriques HT sur l'environnement sont bien connues et analysées dans plusieurs travaux de spécialité. Un intérêt particulier présente les effets négatifs du champ magnétique et celui électrique engendrés par les réseaux électriques à haute tension sur la santé humaine. Pour diminuer ces effets, on minimise les valeurs du champ électromagnétique au voisinage des lignes par optimisation de leur structure et par réglage de leurs grandeurs électriques. Ces techniques permettent de contrôler la pollution électromagnétique au voisinage des lignes haute tension, et influent beaucoup sur leur qualité de service ; le tableau.III.1 nous donne une idée générale sur l'influence des paramètres géométriques sur les intensités de champs rayonnés par les lignes aériennes.

<b>Paramètres</b>	<b>CE</b>	<b>CM</b>	<b>RI</b>	<b>AN</b>
Espacement entre phases <b>↑</b>	<b>↑</b>	<b>↑</b>	<b>↘</b>	<b>↓</b>
Hauteur de la phase /au sol <b>↑</b>	<b>↓</b>	<b>↓</b>	<b>↘</b>	<b>↘</b>
Nombre de conducteurs du faisceau <b>↑</b>	<b>↑</b>	<b>=</b>	<b>↓</b>	<b>↓</b>
Espacement entre les conducteurs subdivisés <b>↑</b>	<b>↗</b>	<b>=</b>	<b>↗</b>	<b>↗</b>
Section des conducteurs équivalents <b>↑</b>	<b>↗</b>	<b>=</b>	<b>↘</b>	<b>↘</b>

T

ie

### III.1.1 Modèle étudié

On considère une ligne électrique aérienne triphasée à haute tension ayant l'arrangement et les coordonnées géométriques, rapportées au pylône de suspension, modéliser à la figure (III.2) chaque phase de la ligne (L1,L2,L3) est constituée d'un faisceau de trois conducteurs séparés par 45 cm, le rayon d'un conducteur est de 0,0153 m, le câble et sol sont indiqués sur la figure, la tension est 500 kV ( phase-terre) de fréquence égale à 50 Hz, le système de tension des phase est considéré symétrique et de succès Sion directe (positive).Les espacements de sous-conducteurs, D1, D2 et D3 sont 0.47,0.45, 0.45 m, respectivement. Avec une hauteur de pylône est égale à 19.1 m, et distance entre phases est 12m. Les charges de simulation sont disposées autour d'un cylindre de rayon 0,05 rc

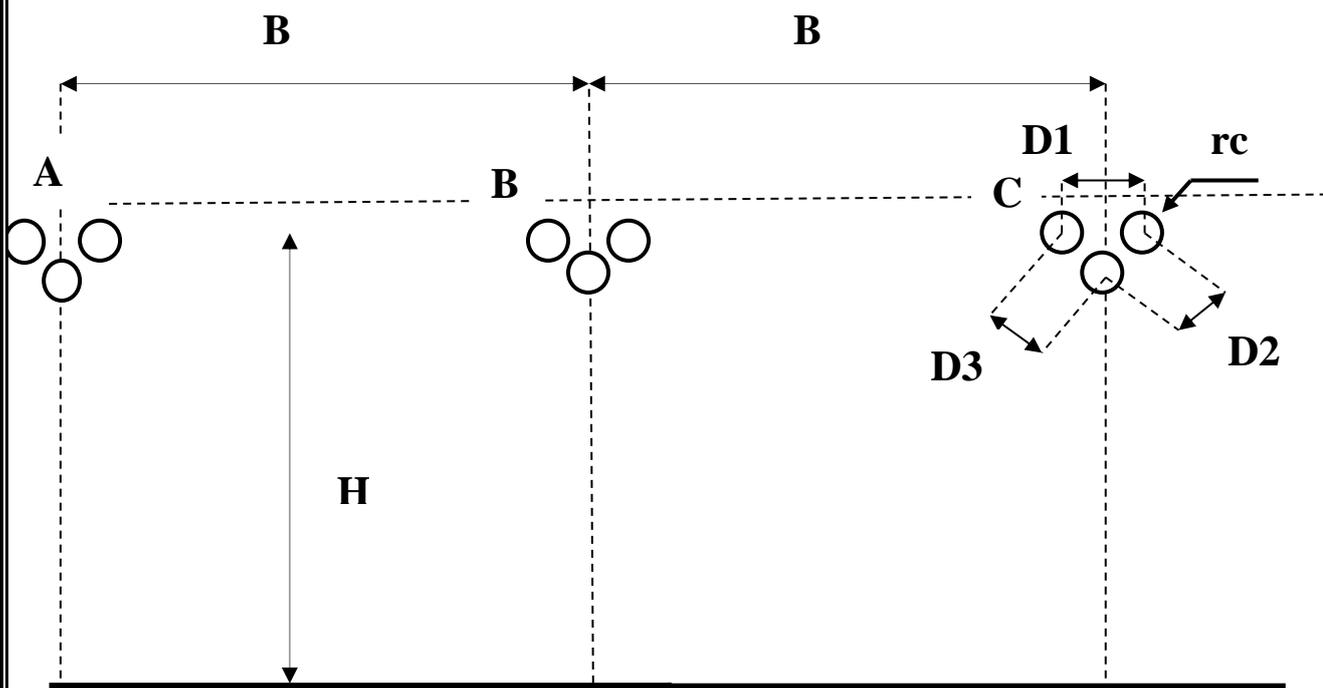


Figure III.1 modèle étudié de la ligne de transmission 500kV

### III.1.2 Réduction du champ électrique

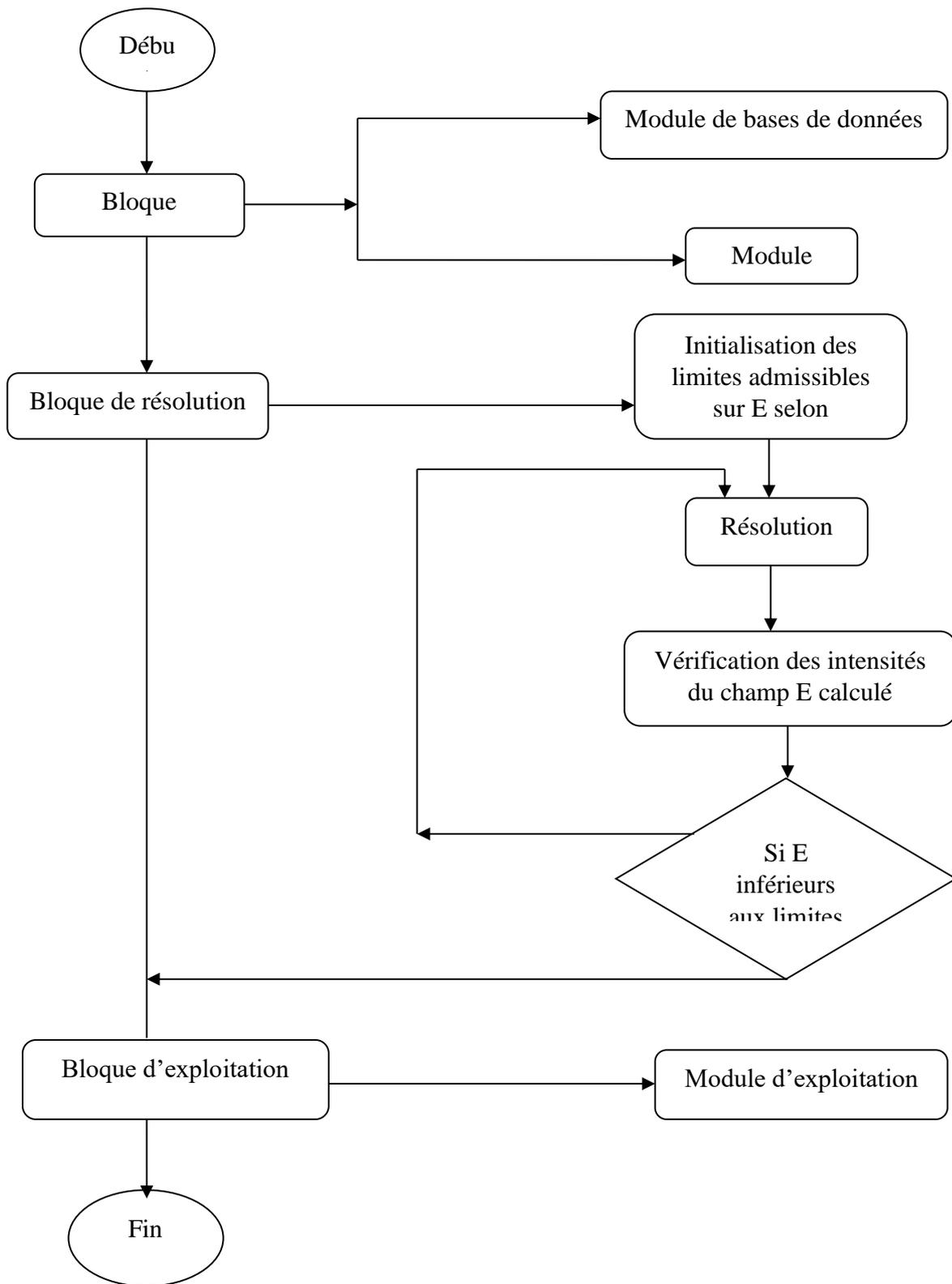
Le champ électrique au voisinage d'une ligne haute tension dépend de ses paramètres géométriques. Cependant les effets du champ électrique peuvent être réduits par certaines conceptions appropriées des lignes.

#### II.1.2.1 Effets de changement de la géométrie de la ligne

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

Les principaux paramètres considérés sont : la configuration de la ligne, la hauteur, la flèche, les dimensions des conducteurs, le blindage et l'espacement des phases. Les intensités de champs maximales sont déterminées en fonction des paramètres géométriques non dimensionnels.

Dans ce paragraphe un programme de calcul a été élaboré sous l'environnement MATLAB pour l'analyse des différentes options de réduction du champ électrique figure (III.2).



**Figure. III.2** Algorithme de réduction du champ électrique au voisinage des lignes THT

### A. Effet de la configuration de la ligne

L'effet de la configuration géométrique de la ligne sur la distribution des quantités de charges électrique et magnétique est illustrée par une application a un circuit de ligne simple 500kV avec un faisceau de 3 conducteurs par phase de rayon 3.3 cm et distant de 45cm , dont on va calculer l'intensité du champ électrique pour trois configurations différentes : horizontale, verticale et triangle, la distance entre phase est  $S=10m$  et la hauteur des conducteurs par rapport au sol est  $H= 10.6m$  .

La figure (III.3) représente le profil du champ électrique pour les trois configurations de ligne obtenues à partir du code de calcul développé précédemment. Les caractéristiques électriques et géométriques des trois configurations sont identiques.

D'après la figure ci-dessous on peut constater que l'intensité maximale du champ électrique donné par la configuration triangle est moins importante que celle donné par les deux autres configurations horizontales et verticales. En s'éloignant des conducteurs l'effet de la configuration de la ligne agit différemment sur le profil du champ électrique devient plus faible dans le cas de la configuration verticale par rapport à celle horizontale. Ceci peut être expliqué par l'utilisation des pylônes avec des gardes au sol plus importante dans le cas des lignes en nappe verticale.

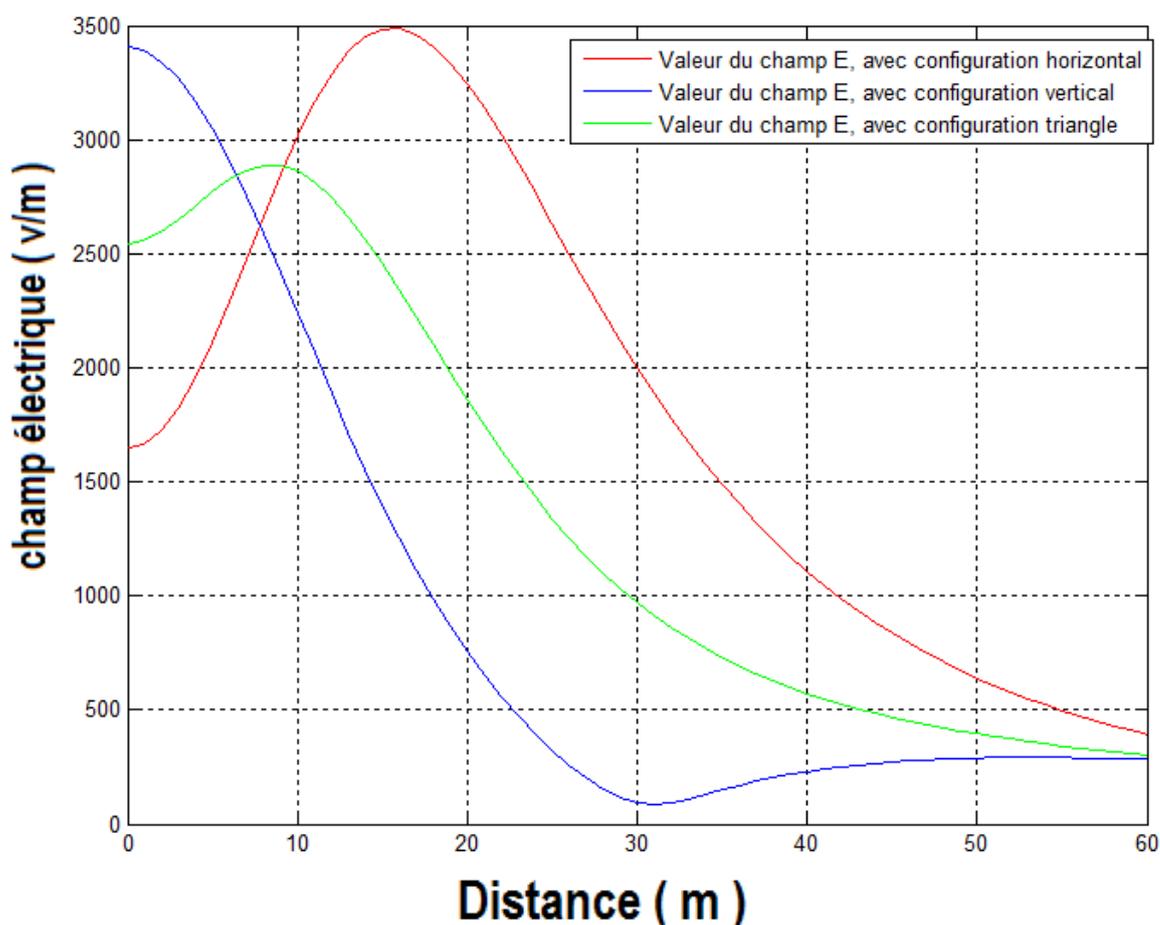


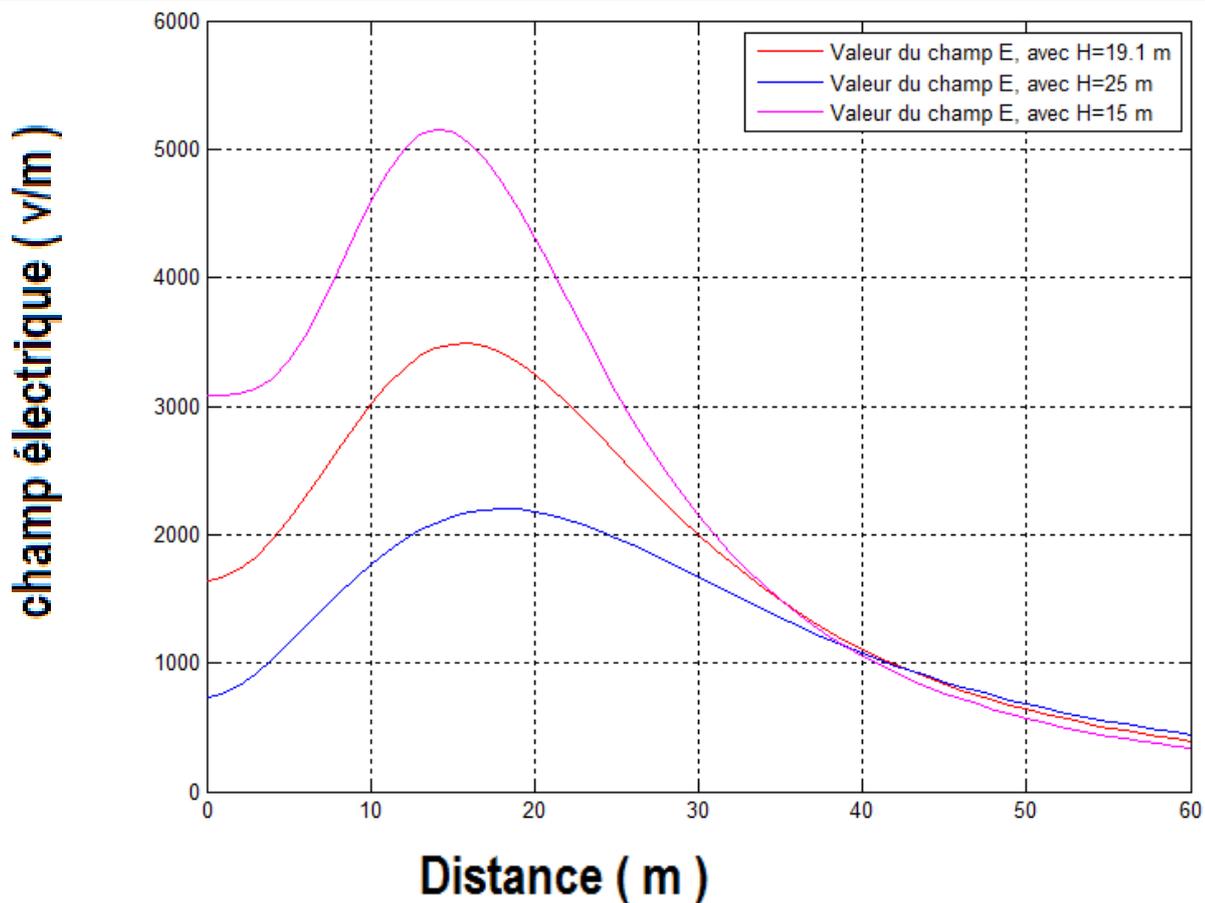
Figure III.3 Champ électrique pour les trois configurations de lignes

### B. Effet de la hauteur

Augmenter la hauteur de la ligne est le changement de sa configuration le plus efficace pour la réduction du champ électrique à son voisinage. La dépendance entre la hauteur de la ligne  $H$  et l'intensité de champ maximale  $E$  est exprimée par une relation empirique :

$$\left(\frac{E_1}{E_2}\right) = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^m \dots\dots\dots (III.1)$$

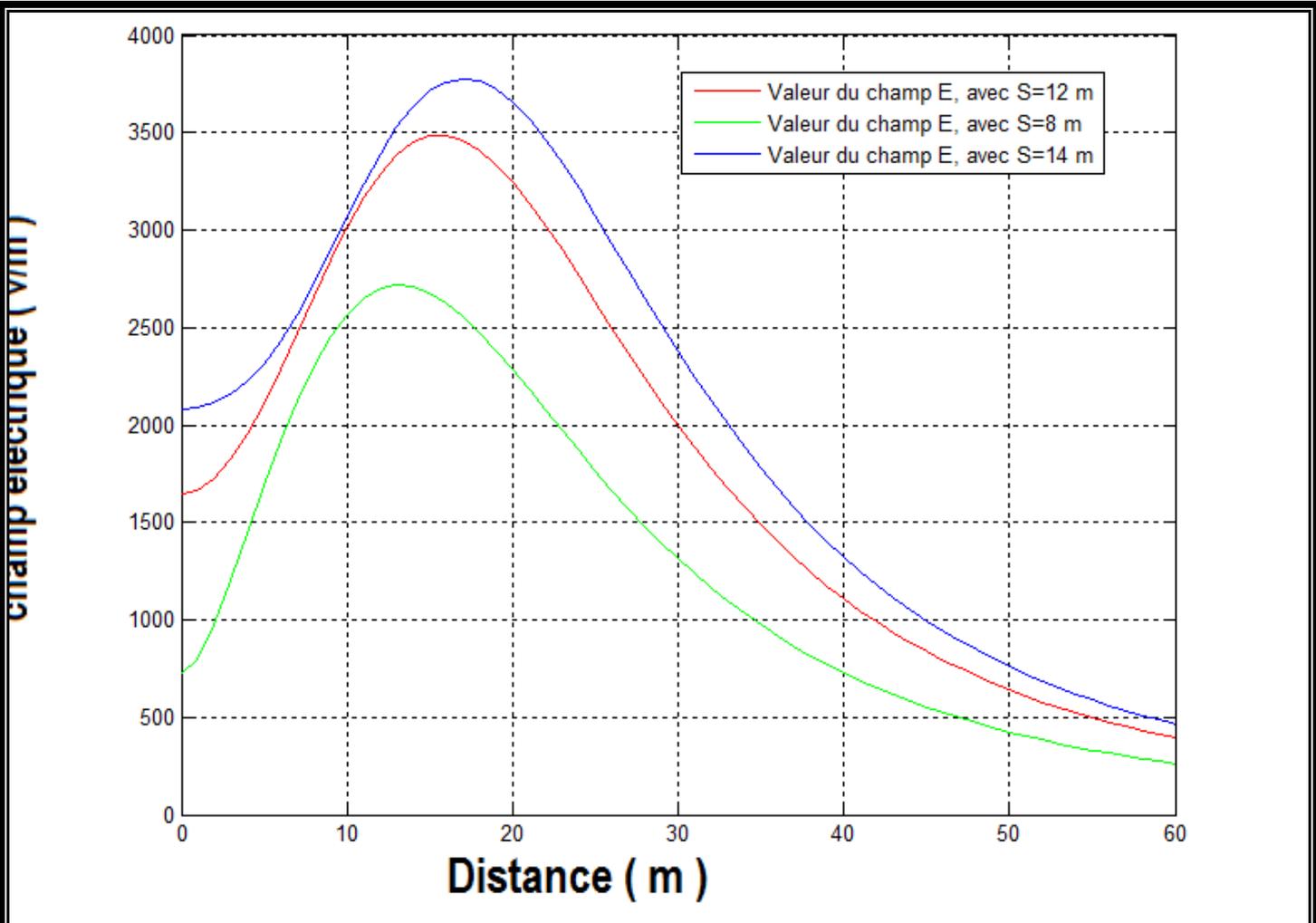
Avec  $E_1$  et  $E_2$  représentent les intensités de champ maximales pour deux hauteurs respectives  $H_1$  et  $H_2$ , le coefficient  $m$  dépend de la géométrie de la ligne, dans le cas d'une configuration horizontale on prend  $m = -1.4$ . La figure (III.4) représente le profil latéral du champ électrique de notre modèle de ligne étudié considéré avec trois hauteurs différentes  $H_1, H_2, H_3$ . On peut voir sur cette figure que l'augmentation de la hauteur de la ligne permet une diminution du champ électrique jusqu'à une longueur critique (LC) à partir du centre de la ligne, au-delà de cette distance l'intensité du champ électrique est influencé de manière différente par l'augmentation de la hauteur de la ligne. La distance critique (LC) pour laquelle l'augmentation de la hauteur de la ligne n'influe pas sur le champ électrique au voisinage de la ligne est exprimée en fonction de ses paramètres géométriques à partir de la figure (III.4).



**Fig. III.4** Champ électrique pour différentes gardes au sol

### C. Effet de la distance entre phases

L'effet de l'espacement des phases dit aussi compaction des lignes, sur l'intensité du champ maximal, est une option très utilisée dans la réduction du champ électrique au voisinage des lignes. La majorité des lignes compactées génèrent un champ électrique faible. Cet effet apparait clairement sur la figure (III.5), qui représente le comportement du champ électrique de notre ligne 500kV avec une configuration en nappe horizontale et pour trois distances entre phases différentes 8,12 et 14 m. Ainsi la compaction des lignes reste une option très attractive pour la réduction du champ électrique, et nécessite l'utilisation des conducteurs de grande section pour minimiser le bruit acoustique.



**Figure.III.5** Effet de la distance entre phases sur le profil du champ électrique

#### D. Effet du nombre de conducteurs par phase

L'effet des dimensions du conducteur (D) peut être évalué en utilisant dans la conception faisceaux, le diamètre équivalent des conducteurs exprimé par la relation suivante :

$$d_{eq} = D \cdot \sqrt[n]{\frac{nd}{D}} \dots\dots\dots(III.2)$$

Par définition c'est le diamètre du conducteur unique qui doit avoir la même quantité de charge électrique par unité de longueur que celui en faisceaux et génère ainsi la même intensité de champ électrique. De façon générale on peut voir que les dimensions du conducteurs agissent de la même façon sur la répartition du champ électrique sous et à l'extérieur des conducteurs, et en tout point l'intensité du champ varie proportionnellement à la charge des conducteurs et peut être exprimé par la relation suivante :

$$\frac{E1}{E2} = \ln\left(\frac{2S}{D2}\right) / \ln\left(\frac{2S}{D1}\right) \dots\dots\dots(III.3)$$

Avec  $E_1$  et  $E_2$  sont les champs électriques générés par les lignes avec espacement entre phase S et les diamètres respectifs des conducteurs  $D_1$  et  $D_2$ . Les changements radicaux des dimensions des conducteurs affectent de façon appréciable la répartition du champ électrique, cette option ne pas être utilisée souvent pour des raisons techniques et économiques.

### **E. Effets de la flèche et des câbles de garde**

L'effet de la flèche est normalement négligeable si on prend l'intensité du champ électrique par rapport au point le plus bas par rapport aux conducteurs de la ligne, dans ce cas l'écart dans le calcul du champ électrique avec ou sans la flèche est inférieure à 1%, cette différence exprimée en pourcentage du champ, augmentent en valeur absolue avec la distance à la ligne et restent négligeable.

Les câbles de gardes qui assurent la protection contre la foudre n'influent pas sur le champ électrique à la terre, ces derniers sont placés à une certaine hauteur par rapport aux conducteurs de la ligne et mis à la terre à leurs extrémités, leur présence réduit le champ électrique d'environ 2%.

### **III.1.3 Réduction du champ magnétique**

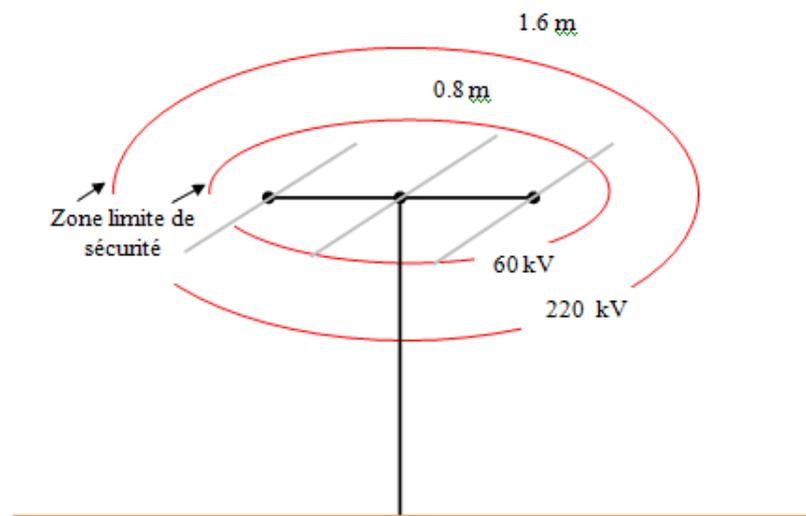
Pour réduire le champ magnétique au voisinage d'une ligne haute tension on peut procéder de la manière suivante :

- 1- En augmentant la distance entre les lignes électriques et la population. La distance autorisée pour la construction et l'exploration des aires des lignes aériennes haute tension est fixée sur des couloirs de largeur maximale 45 m. Dans ces couloirs, il est conditionné une autorisation préalable pour la construction de bâtiments et d'autres structures, Cette mesure ne réduit pas les champs magnétiques, mais permet de réduire son effet sur les humains. Dans son travail Carlos Lemnos a développé un logiciel CEM\_ELF.LAT pour la détermination de la zone de sécurité du champ magnétique pour deux circuits de lignes 60 kV et 220kV figure. III (6.a et b) conformément aux valeurs inférieures à celles limites imposées par l'organisation internationale de protection contre le rayonnement non ionisant l'ICNIRP.
- 2- En diminuant le courant dans la source. Cela se fait en augmentant la tension. Cette diminution du courant donne une réduction du champ magnétique et peut être réalisée comme suite :
  - Par le blindage de la source de champ ou de la personne qui est près d'elle. Cette procédure consiste à ajouter entre le circuit d'alimentation et les couloirs de passage des lignes, des conducteurs légèrement isolée des conducteurs aériens. Ces conducteurs sont croisés connectés à chaque extrémité afin de former une boucle. Une tension est induite par le champ magnétique formé par cette boucle qui a son tour, induit un courant qui crée un champ magnétique qui annule partiellement le champ de la ligne de transmission.

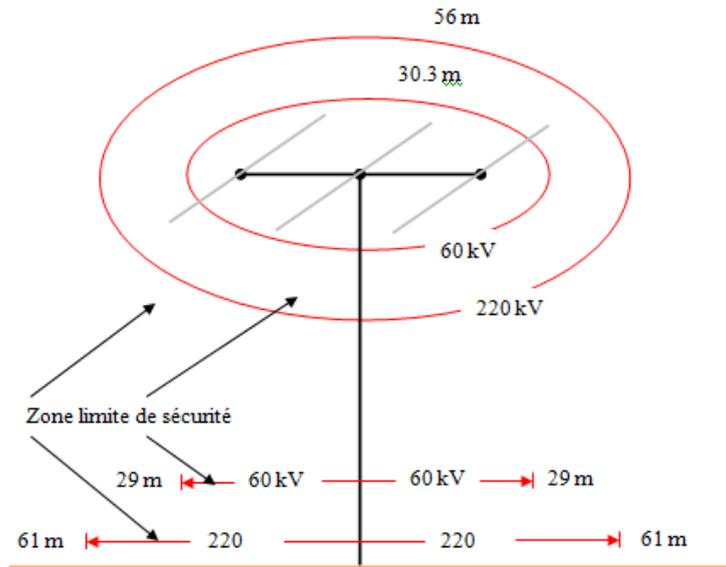
- En faisant l'annulation de phase. L'annulation de phase consiste à avoir deux champs égaux de sens opposé qui s'annulent les uns des autres. Cette procédure est possible car nous avons d'une part la fréquence de 50 Hz et que les champs sont alternatifs et inversent leur direction 50 fois par seconde.

- En mettant en œuvre de nouvelles conceptions qui ciblent principalement la géométrie du pylône et la hauteur des conducteurs au-dessus du sol on peut utiliser l'un des modèles suivants:

- **Compaction** : Le compactage consiste à réduire la distance des phases des lignes électriques ainsi que d'accroître la garde au sol des deux phases extérieures. Cela se fait avec des isolateurs en interphase. Il en résulte une diminution du champ magnétique. L'avantage du compactage est qu'il peut être utilisé pour les lignes existantes d'un autre côté, l'inconvénient de cette méthode c'est l'augmentation de l'effet couronne et qu'elle n'est pas applicable pour toutes les configurations des lignes.
- **Split phase line**: consiste en un fractionnement des phases des lignes en sous phases, qui donnent une réduction du champ magnétique proportionnelle au cube de la distance. Comme pour la compaction, la subdivision des phases des lignes en sous phases s'accompagne par un bruit audible produit par l'effet couronne.



**Figure.III.6.a** Zone de servitude du champ magnétique au voisinage des lignes haute tension 60KV et 220KV, pour une valeur limite du champ magnétique  $B = 100 \mu T$



**Figure.III.6.b.** Zone de servitude du champ magnétique au voisinage des lignes haute tension 60KV et 220KV, pour une valeur limite du champ magnétique  $B = 0.4 \mu T$

### III.1.3.1 Effets de changement de la géométrie de la ligne

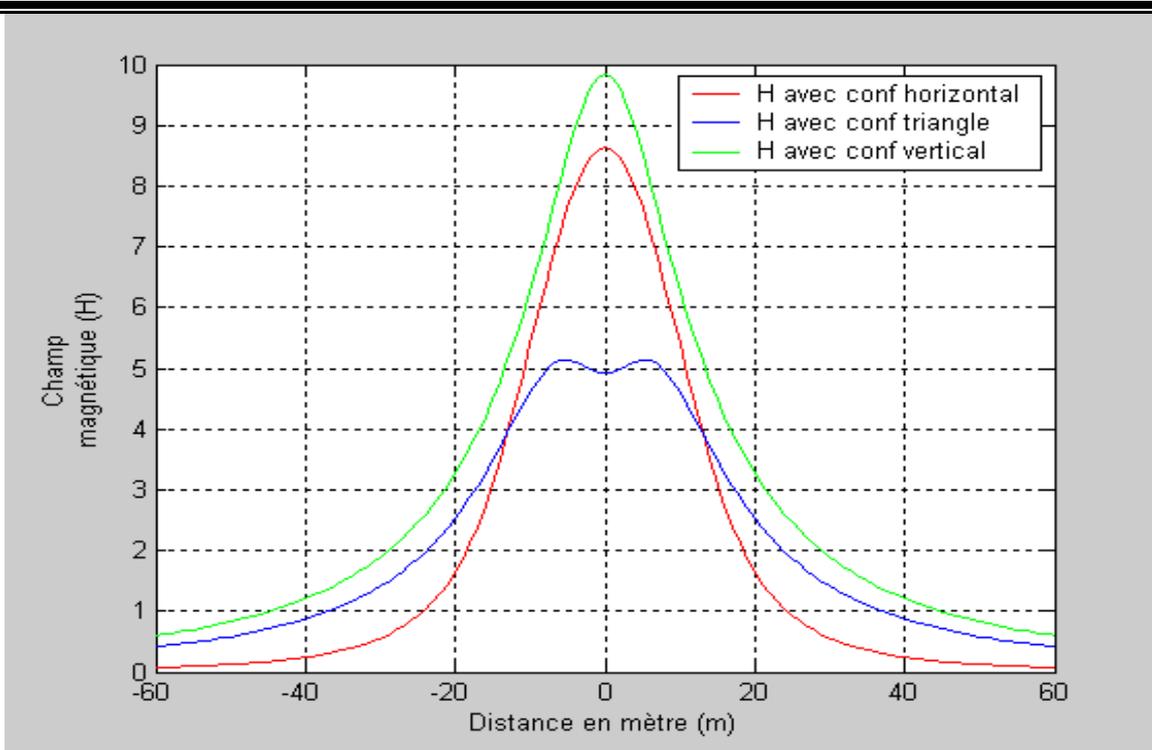
#### A. Effet de la configuration de la ligne

Le profil du champ magnétique tracé pour le modèle de ligne 500kV proposé précédemment avec trois configurations : horizontale, verticale et triangle, est illustré par le figure (III.7).

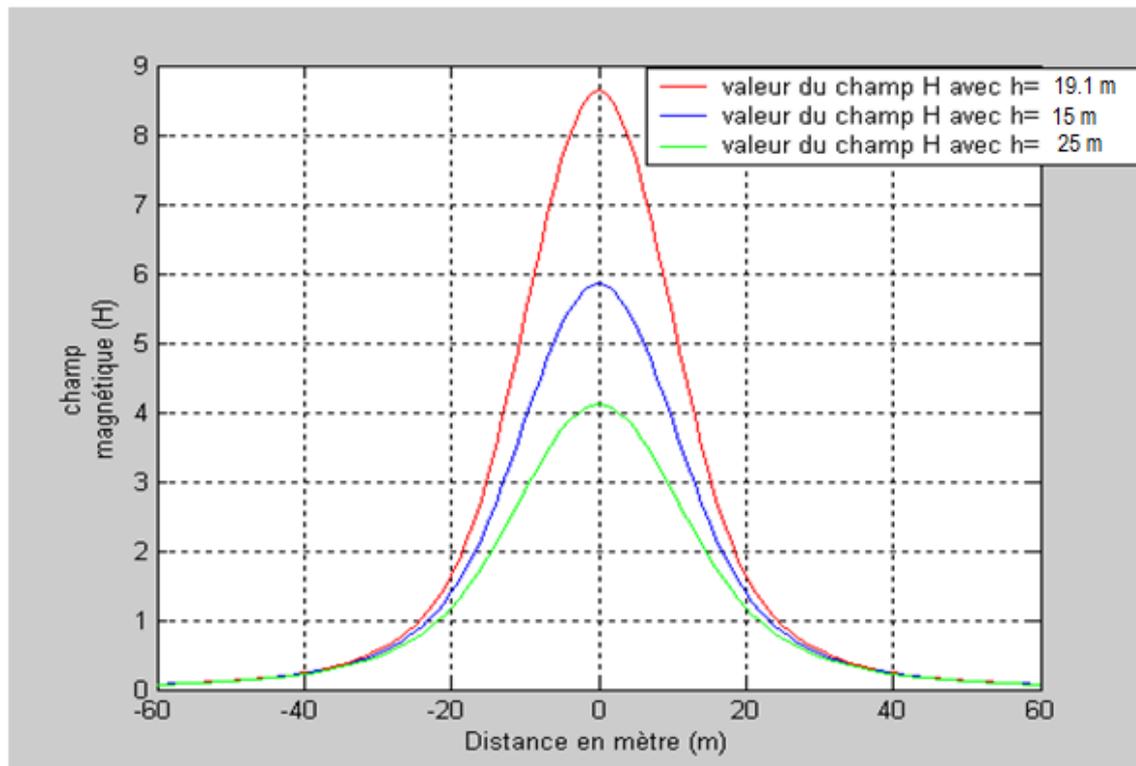
D'après cette figure on peut constater que l'intensité maximale du champ magnétique donné par la configuration verticale est plus importante que celle donnée par les deux autres configurations horizontale et triangle ceci à n'importe quelle distance de la ligne ceci peut être expliqué par l'utilisation des pylônes avec des gardes au sol plus importante dans le cas des lignes en nappe verticale. En s'éloignant des conducteurs l'effet de la configuration de la ligne agit différemment sur le profil du champ magnétique, ce dernier devient plus faible dans le cas de la configuration horizontale par rapport à celle de triangle.

#### B. Effet de la hauteur

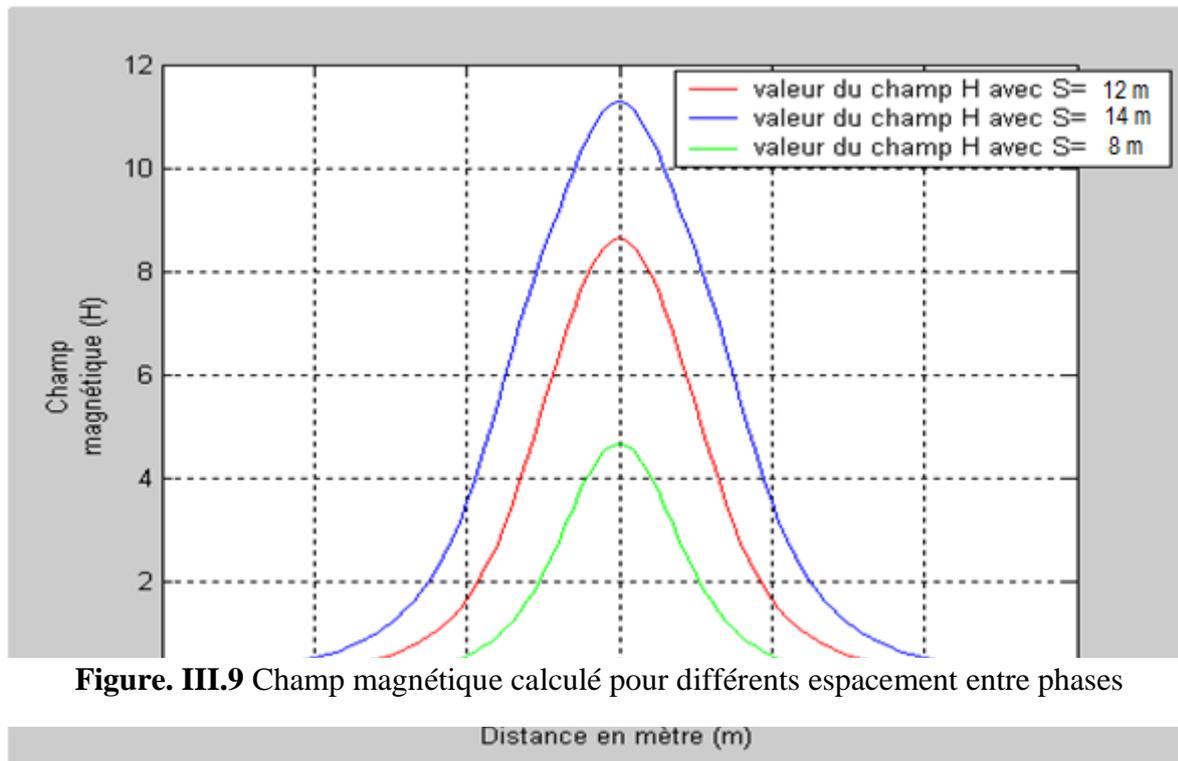
La figure (III.8) représente la densité de champ magnétique calculée pour la configuration horizontale du modèle de ligne choisi. Cette figure montre que la densité du champ magnétique générée par la ligne augmente avec la diminution de la garde au sol. On peut toujours voir sur cette figure que l'intensité maximale du champ magnétique est relevée sous l'axe du pylône, sa variation est inversement proportionnelle au cube de la hauteur géométrique des conducteurs par rapport au sol.



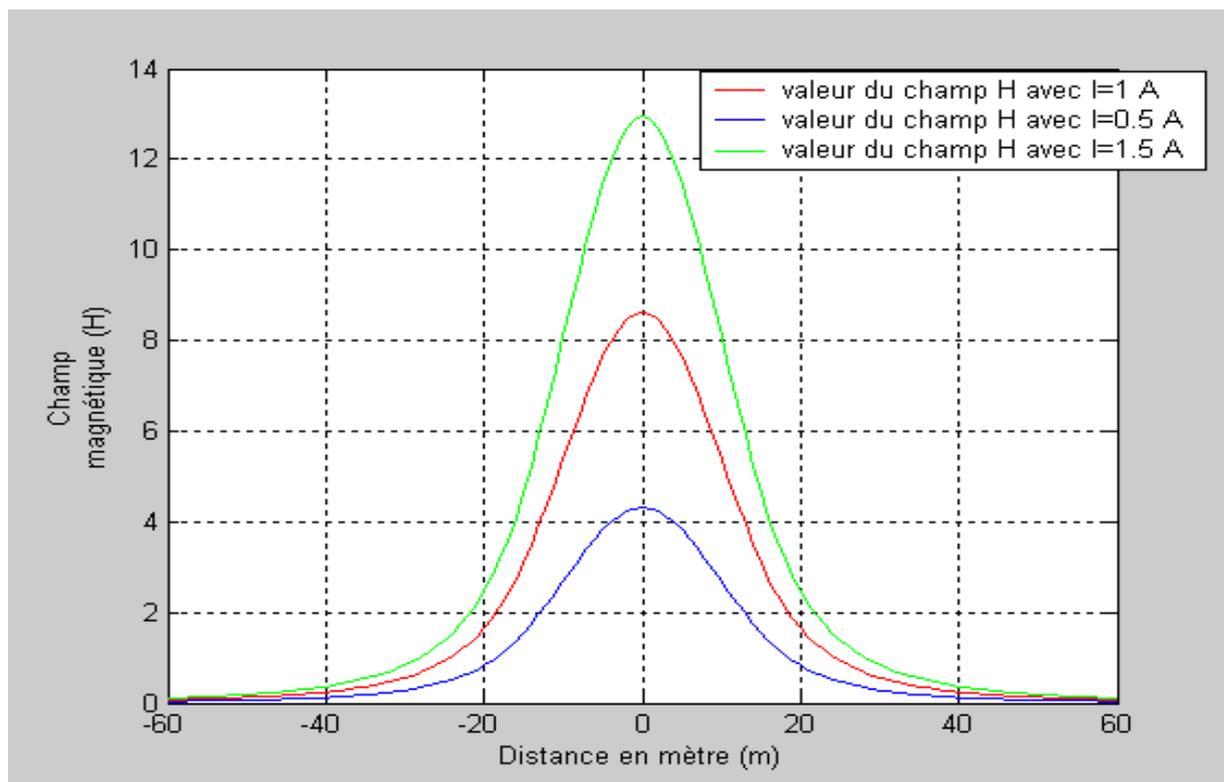
**Figure. III.7** Champ magnétique pour les trois configurations de lignes



**Figure. III.8** Champ magnétique calculé pour différentes hauteurs



**Figure. III.9** Champ magnétique calculé pour différents espacement entre phases



**Figure.III.10.** Effet de la variation de la charge

### C. Effet de la distance entre phases

L'espacement des phases 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 (III.9), que l'intensité du champ magnétique généré

par notre modèle de ligne choisi augmente avec l'augmentation des distances entre phases. L'intensité maximale du champ est toujours relevée sous l'axe du pylône. La compaction des lignes reste l'une des options les plus fréquemment utilisée dans la réduction des quantités de charges magnétiques rayonnées au voisinage des lignes haute tension.

#### D. Effet de la variation de la charge

Le champ magnétique généré par une ligne haute tension varie indépendamment des tensions de ses phases, il est proportionnelle aux intensités de courants qui les traversent.

La figure (III.10) montre les profils du champ magnétique tracés pour le modèle de ligne proposé pour les régimes de charge : minimal, moyen et maximal estimés dans l'intervalle [20%,40% ,60%,80%,100% et 120%] de sa charge. On peut voir sur cette figure que les intensités du champ magnétique atteignent leur valeurs maximales sous les axes des pylônes et décroissent rapidement de manière inversement proportionnelle à la distance des conducteurs.

### III.2 Effet des écrans passifs sur la réduction du champ sous la ligne 500kV

#### III.2.1 Comportement du champ électrique

##### III.2.1.1. Profil du champ électrique sans câble de blindage

Pour le modèle de la ligne 500 KV étudié la distribution des quantités de charges capacitatives est déterminé avec un code de calcul analytique développé dans l'environnement Matlab, ceci pour différentes hauteurs de la ligne 10,12, 15 ,19.1 et 25 m.

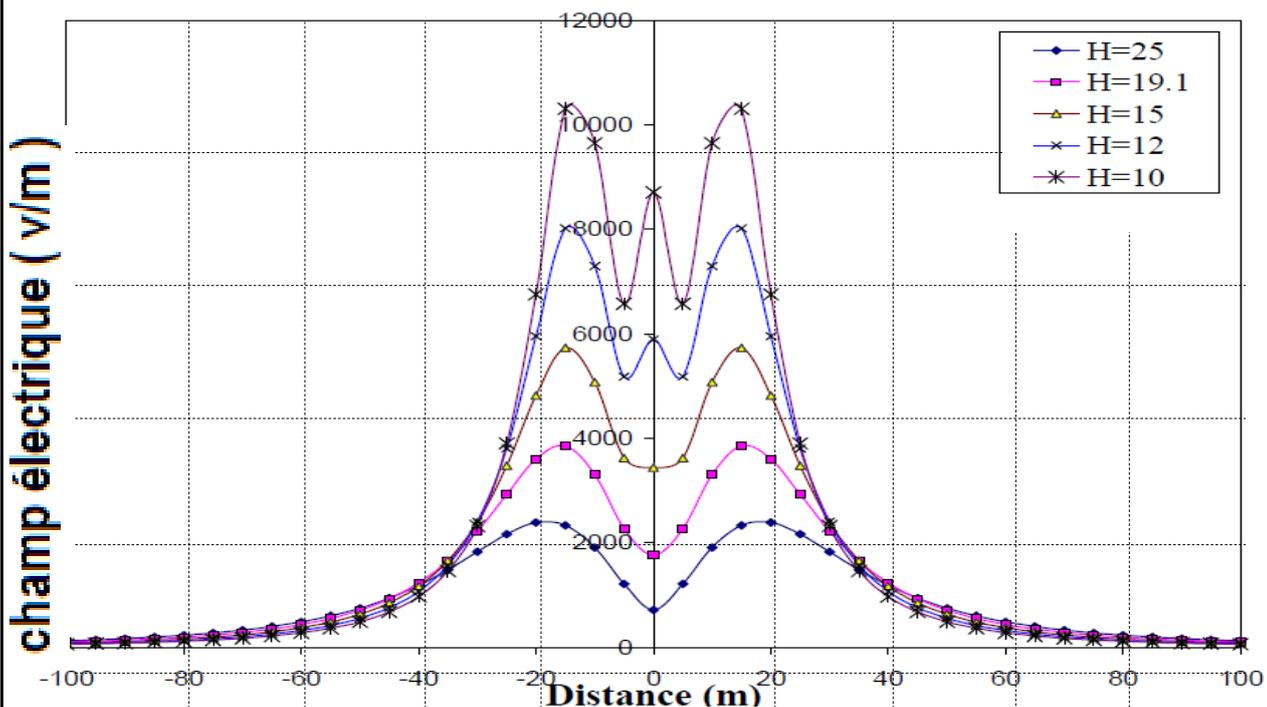


Figure III.11 l'intensité du champ électrique pour différentes hauteurs de la ligne

### III.2.1.2 Profil du champ électrique avec câble de blindage

L'utilisation des conducteurs jouent le rôle d'écran, placé entre les conducteurs des phases et le sol. La configuration de la ligne de transmission est la même de celle de la figure.III.12mais avec des fils de blindage passif disposés sous les conducteurs des phases. Les rayons de ces fils sont de 0,0039 mètres. Leur espacement  $S$  et leurs hauteurs géométrique par rapport au sol  $H$ .

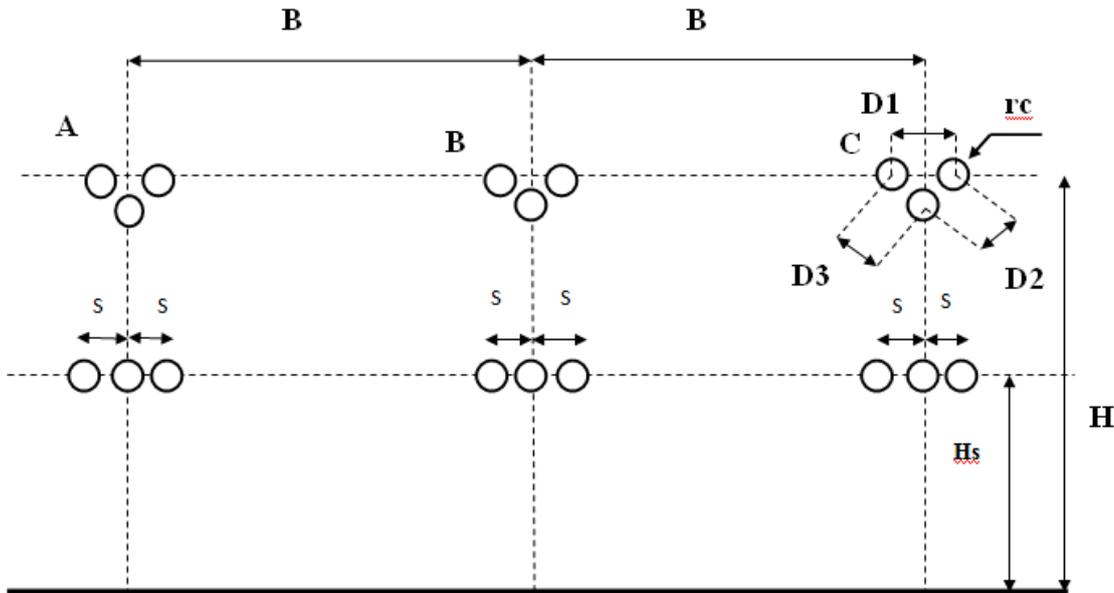
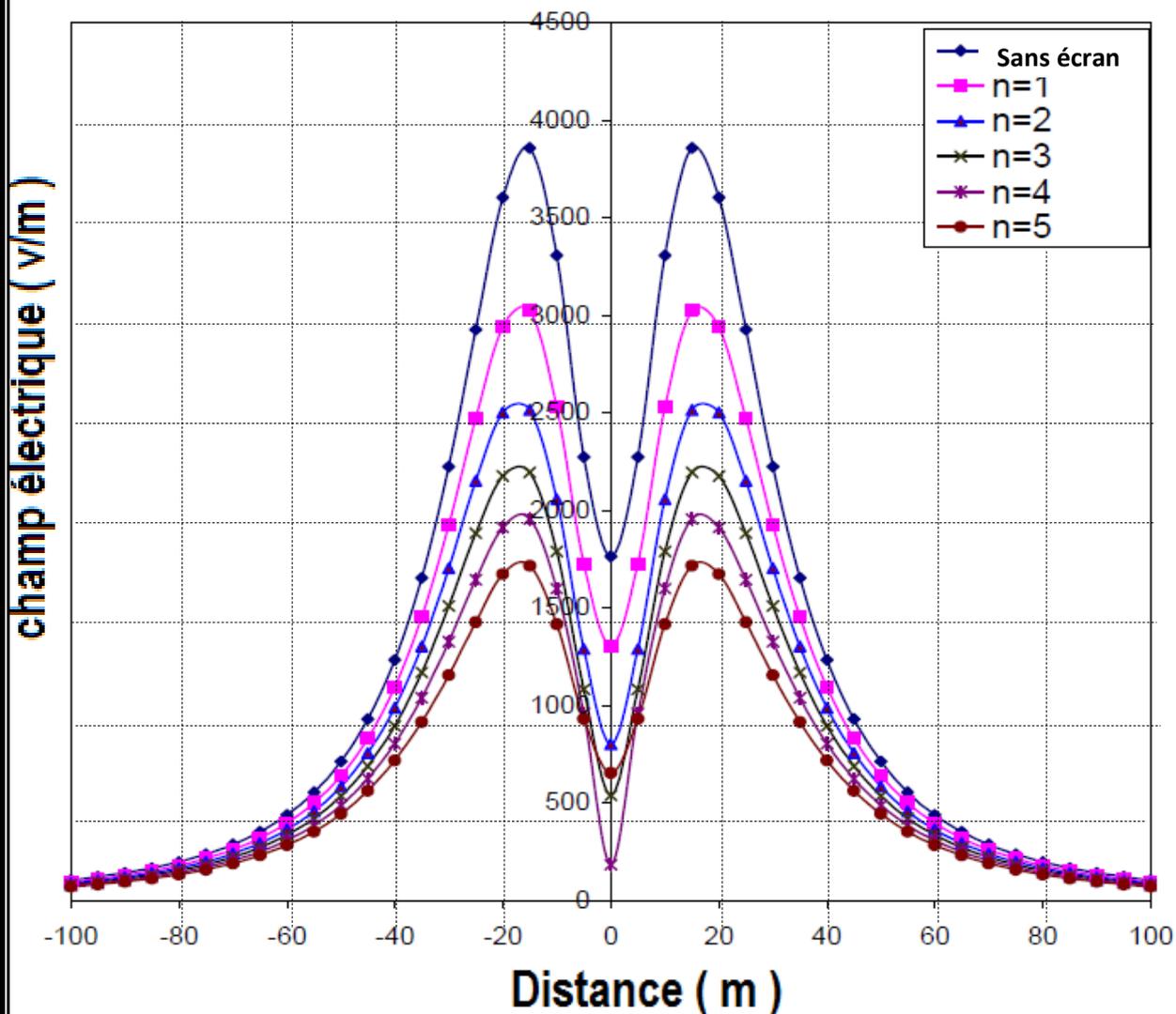


Figure III.12 modèle étudié de la ligne de transmission 500kV avec des fils de blindage passifs.

La figure (III.13) montre le profil du champ électrique relevé à une hauteur de 1 mètre par rapport au sol pour une hauteur  $H=15$  mètres un espacement entre les câbles de blindage égale 5 mètre et pour différents nombres de câble de blindage. D'après cette figure il est claire que le champ électrique maximale diminue avec l'augmentation de nombre d'écrans passif cette réduction atteint 55% pour  $S=5$  mètres et  $n_s=5$  écrans par phase.



**Figure III.13** distributions de champ électrique à hauteur de 1 m au-dessus de la surface du sol pour la ligne de transport de 500

### Conclusion Générale

Dans le cadre de ce travail concernant le premier chapitre, nous avons évoqué l'état de l'art dans le domaine des champs électromagnétiques basse fréquence. Une étude bibliographique sur les effets des champs électromagnétiques basse fréquence sur la santé a été réalisée, Il a permis de nous éclairer sur les différents types de rayonnement électromagnétiques basse fréquence d'origine naturelle et artificielle et d'évoquer le contexte normatif relatif. Nous avons passé en revue la bibliographie existante sur le thème "champs électromagnétiques basse fréquence et environnement.

Et dans le deuxième chapitre, nous avons examiné la problématique de l'interférence des champs électromagnétiques basses fréquences avec l'environnement. Nous avons réalisé une étude bibliographique sur les effets des champs électromagnétiques basse fréquence sur la santé, avec une attention particulière aux effets biologiques.

En pratique l'exposition à des champs électromagnétiques basse fréquence a lieu en condition de champ proche, le champ électrique se découple donc de celui magnétique et les phénomènes physiques mis en jeu sont complètement différents. Nous avons vu que les effets des champs sur la santé ne sont pas établis. Les organisations mondiales de protection contre le rayonnement non ionisant ont établi des restrictions de base et des niveaux de référence sur les valeurs de champs électrique et magnétique à ne pas dépasser lors de l'exposition a des champs électromagnétiques basse fréquence.

Enfin, à partir de ce chapitre on peut juger utile de réduire le champ électrique sous les lignes THT afin de diminuer leurs interférences avec le milieu environnement pour cela il existe plusieurs façons d'agir telles que :

-La modification des caractéristiques géométriques et électriques de la ligne, garde de sol, conception des faisceaux, compaction de la ligne, charge etc. qui affectent énormément la répartition de ces champs aux voisinages des lignes électriques THT.

-L'emplacement de câble de blindage de nature capacitive ou inductive sous les phases de la ligne et variation de leurs caractéristiques : espacement, hauteurs, nombre d'écrans.

D'après les résultats analytiques obtenus on conclure que le champ électrique diminue avec l'augmentation de nombre de conducteurs écrans ayant la même séquence que les phases des lignes.

## *Bibliographie*

- 1- **David. Andrew, M.c Namee, Alexander. G. Legros. Daniel. R . Krewski.** The cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields .International Archives of Occupational and Environmental Health Volume: 82
- 2- **Mohamad Nor.N, R. Rajab and K. Ramar,** “Validation of the Calculation and Measurement Techniques of Earth Resistance Values”. Am. J. Applied Sci., 4: 42-48. DOI: 10.3844/.1313.1317, 2008.
- 3- **Salma Abu Izzeddin, Kamal Berbari, Hiba Obeid** “ Electromagnetic Fields from Power Transmission Lines”,
- 4- **W. Tourab, A. Babouri, M. Nemamcha.** “Experimental Study of Electromagnetic Environment in the Vicinity of High Voltage Lines”. American journal of Engineering and Applied Science. Vol.4 (2),p. 209, 2011.
- 5- **W.Tourab, A. Babouri and M. Nemamcha.** Characterization of the electromagnetic Environment at the vicinity of power lines.Proceeding of the 21st International Conference Exhibition on Electricity Distribution. CIRED11, 6-9 June 2011 Frankfurt , 2011.
- 6- SONALGAZ ‘ Documentation propre a l’entreprise ‘
- 7- **User’s Manual PMM 8053B.** System for the Electromagnetic Fields Measurement. Document 8053 BEN-80805-3.03; NARDA 2007.

## *Webographie*

- 1- **OMS** (Organisation mondiale de la santé) *Que sont les champs électromagnétiques ?*  
<http://www.who.int/peh-emd/edf-fr/about/WhatisEMF/fr/>
- 2- Environnemental Heath Citerai 238, Extremely low frequency fields  
[http://www.doc-clic.com/reduction-du-champ-de-vision-et désorientation](http://www.doc-clic.com/reduction-du-champ-de-vision-et-désorientation)
- 3- **ICNIRP** (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)  
[www.icnirp.de/PubEMF.htm](http://www.icnirp.de/PubEMF.htm)

