

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : électrotechnique  
Spécialité : énergie et environnement

Présenté par : **NICHED Chahrazad**

Thème

**Élimination des agressions électro  
magnétiques par l'optimisation de la  
conception génie électrique**

Soutenu publiquement, le 02 / 07 / 2023, devant le jury composé de :

<b>Mme N. Benahmed</b>	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
<b>Mme Kherbouche djamila</b>	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
<b>M. DJEBBAR ABDELMALEK</b>	Professeur	CDS.Oran	Co- Directeur de mémoire
<b>M.A.K.Chedmidi</b>	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
<b>M. A.Chiali</b>	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2022 / 2023

## *Remerciement*

*Je remercie dieu de m'avoir aidé à franchir toutes les étapes de mon parcours, et par sa grâce j'ai pu atteindre le but dont j'ai toujours rêvé, et qui aujourd'hui s'est réalisé.*

*Je tiens également à remercier madame Kherbouche Djamilia de m'avoir encadrée, orientée, aidée et conseillée*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à, monsieur Djebbar Abdelmalek ingénieur en électrotechnique au centre de développement des satellites J'ai eu la chance et un grand plaisir à travailler avec lui. Tout au long de préparation de cette thèse, il m'a, non seulement donné les conseils scientifiques mais aussi beaucoup d'encouragements.*

*Je le remercie pour sa grande disponibilité et pour la qualité de ses conseils qui m'ont à chaque fois apportées la base et la motivation nécessaire à l'avancement de mes travaux de recherche.*

*Je tiens à remercier vivement les membres du jury de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et*

*leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer  
et de répondre à mes questions durant mes recherches.*

*Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi.*

*Je remercie mes sœurs et surtout ma sœur Sara, et mes frères, pour leur  
encouragement*



## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail avec tout mon profond respect :*

*À mes très chers parents :*

*AMINA ET MOHAMED*

*À mes très chers frères & Sœurs:*

*BOBAKER*

*NORDIN*

*SARA ET SAMAYA*

*A chercheur qui m'a véritablement apporté une aide précieuse pour*

*Accomplir Ce travail:*

*Rabhi Abd el Rahman*

*À tous ceux qui me sont chers.*

*À tous qui m'aidé de finaliser cette thèse,*

*À tous mes amis.*



## Résumé

Devant la complexité des conceptions génie électriques actuelles, le réseau électrique qui alimente les divers équipements des bâtiments technologique, informatique, télécommunication, constitue une toile polluante pour les équipements sensibles. Cette pollution perturbe le fonctionnement et même agresse parfois jusqu'à la détérioration de ces équipements. Ce travail a pour objectif de traiter la compréhension et l'analyse de ces phénomènes et proposer des solutions.

**Mots clés :** électromagnétisme, compatibilité électromagnétique, cohabitation courant forts courants faible, système de liaison à la terre, perturbation rayonnée, perturbation conduite, mode de couplage des perturbations.

## Abstract

Faced with the complexity of current electrical engineering designs, the electrical network that supplies the various equipment in technological, IT and telecommunications buildings constitutes a polluting web for sensitive equipment. This pollution disrupts the operation and sometimes even attacks the deterioration of this equipment. This work aims to deal with the understanding and analysis of these phenomena and to propose solutions.

**Key words:** electromagnetism, electromagnetic compatibility, high current low current cohabitation, earthling system, radiated disturbance, conducted disturbance, disturbance coupling mode.

## ملخص

في مواجهة تعقيد تصاميم الهندسة الكهربائية الحالية ، فإن الشبكة الكهربائية التي تزود المعدات المختلفة في المباني التكنولوجية وتكنولوجيا المعلومات والاتصالات السلكية واللاسلكية تشكل شبكة ملوثة للمعدات الحساسة. يؤدي فهم وتحليل هذا التلوث إلى تعطيل العملية وفي بعض الأحيان يهاجم تلف هذه المعدات. يهدف هذا العمل إلى التعامل مع هذه الظواهر واقتراح الحلول.

**الكلمات الأساسية:** الكهرومغناطيسية ، التوافق الكهرومغناطيسي ، التعايش مع التيار المنخفض للتيار العالي ، نظام التأريض ، الاضطراب المشع ، الاضطراب المنفذ ، وضع اقتران الاضطراب.

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I GENERALITES SUR L'ELECTROMAGNETIQUE.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1 Introduction : .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2 Équation de maxwell .....</b>	<b>4</b>
<b>I.3 Le régime variable :.....</b>	<b>5</b>
<b>I.3 .1 Le phénomène d'induction :.....</b>	<b>5</b>
<b>a) L'induction électromagnétique .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3 .2 Le phénomène de capacité.....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.3 Couplage électromagnétique en régime variable :.....</b>	<b>8</b>
<b>I.4 Régime électrostatique : .....</b>	<b>8</b>
<b>I.4.1 Le champ électrique.....</b>	<b>8</b>
<b>I.4.2 Propriétés du champ électrostatique .....</b>	<b>11</b>
<b>I.5 Régime magnétostatique :.....</b>	<b>13</b>
<b>I.5.1 Les équations de maxwell dans le régime magnétostatique :.....</b>	<b>14</b>
<b>I.5.2 Approximation en régime quasi-stationnaire magnétique : .....</b>	<b>15</b>
<b>I.6 Champ magnétique crée par un fil fini de longueur AB.....</b>	<b>16</b>
<b>I.7 Exemple d'une agression rayonnée :.....</b>	<b>18</b>
<b>CHAPITRE II_COHABITATION EQUIPEMENT PERTURBATEURS ET EQUIPEMENTS PERTURBES.....</b>	<b>20</b>
<b>II.1 Introduction :.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2 Compatibilité électromagnétique (CEM) : .....</b>	<b>21</b>
<b>II.3 Les sources de perturbation électromagnétique.....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.1 Sources naturelles.....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.1.1 La foudre :.....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.1.2 Les décharges électrostatiques (DES) :.....</b>	<b>24</b>
<b>II.3.2 Sources artificiel :.....</b>	<b>25</b>

II.3.2.1 Champs créé par les émetteurs radio : .....	25
II.3.2.2 Convertisseurs et générateurs HF : .....	26
II.3.3 Champ de fuite des transformateurs :.....	26
II.3.4 Les courts circuits : .....	27
II.3.5 Impulsion électromagnétique nucléaire (IEMN) :.....	27
<b>II.4 Sources intentionnelles et non intentionnelles .....</b>	<b>27</b>
II.4.1 Les sources intensionnelles : .....	27
II.4.2 Les sources non intentionnelles : .....	28
<b>II.5 Couplage électromagnétique [9] .....</b>	<b>28</b>
II.5.1 Le couplage par conduction.....	29
II.5.1.1 Couplage en mode différentiel.....	29
II.5.1.2 Couplage en mode commun.....	30
II.5.2 Le couplage par rayonnement (par champ).....	30
II.5.2.1 Le couplage par champ proche .....	30
II.5.2.2 Couplage champ lointain .....	32
<b>II.6 Système de liaison à la terre .....</b>	<b>33</b>
II.6.1 Classification des régimes de neutre .....	33
II.6.1.1 Régime de neutre TT.....	33
II.6.1.2 Régime de neutre IT.....	34
II.6.1.3 Régime de neutre TN .....	35
<b>II.7 Les SLT et les perturbations Basse Fréquence.....</b>	<b>38</b>
<b>II.8 Couplage par impédance commune .....</b>	<b>38</b>
II.8.1 Analyse des performances en régime TN.....	38
II.8.2 Analyse des performances en régime IT .....	39
II.8.3 Analyse des performances en régime TT .....	39
 <b>CHAPITRE III_ELIMINATION DES PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES PAR L'OPTIMISATION DE LA CONCEPTION ELECTRIQUE .....</b>	 <b>41</b>
<b>III.1 Introduction : .....</b>	<b>42</b>
<b>III.2 Perturbations électromagnétique diagnostiquées dans la zone d'étude :.....</b>	<b>43</b>
a) Couplage par diaphonie inductive .....	43
b) Couplage par impédance commune en mode différentiel : .....	45

c) Couplage per impédance commune en mode commun :.....	46
<b>III.3 Application numérique et résultats.....</b>	<b>47</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>54</b>
<b>Référence Bibliographie .....</b>	<b>56</b>

## Table de figure

---

FIGURE 1 LE THEOREME DE MAXWELL-AMPERE .....	6
FIGURE 2 LE CHAMP ELECTRIQUE .....	9
FIGURE 3 PRINCIPE DE SUPERPOSITION .....	9
FIGURE 4 CHAMP ELECTRIQUE CREE PAR UNE DISTRIBUTION LINEIQUE DE CHARGES ELECTRIQUES.....	10
FIGURE 5 CHAMP ELECTRIQUE CREE PAR UNE DISTRIBUTION SURFACIQUE DE CHARGES ELECTRIQUES.....	10
FIGURE 6 CHAMP ELECTRIQUE CREE PAR UNE DISTRIBUTION VOLUMIQUE DE CHARGES ELECTRIQUES.....	11
FIGURE 7 LE FLUX DU CHAMP ELECTROSTATIQUE .....	12
FIGURE 8 LE COURANT ELECTRIQUE QUI PARCOURT UNE SURFACE $S$ .....	14
FIGURE 9 CHAMP MAGNETIQUE CREE PAR UN FIL FINI AB .....	16
FIGURE 10 EXEMPLE D'UNE AGRESSION RAYONNEE.....	18
FIGURE 11 PHENOMENE DE LA COMPATIBILITE ÉLECTROMAGNETIQUE. ....	21
FIGURE 12 TRANSFERT DE PERTURBATION ENTRE SOURCE ET VICTIME.....	22
FIGURE 13 LES DIFFERENTES ORIGINES DES PERTURBATIONS.....	23
FIGURE 14 LE COURANT DE Foudre.....	24
FIGURE 15 LA DECHARGE ELECTROSTATIQUE .....	24
FIGURE 16 CARACTERISTIQUE D'UNE DECHARGE ELECTROSTATIQUE .....	25
FIGURE 17 CHAMP DE FUITE AU VOISINAGE D'UN TRANSFORMATEUR.....	27
FIGURE 18 PRESENTATION D'UNE SOURCE INTENTIONNELLE.....	28
FIGURE 19 PRESENTATION D'UNE SOURCE NON INTENTIONNELLE.....	28
FIGURE 20 LES MODES DE COUPLAGE ENTRE LA SOURCE DE PERTURBATION ET LA VICTIME. ....	29
FIGURE 21 COUPLAGE EN MODE DIFFERENTIEL.....	29
FIGURE 22 COUPLAGE EN MODE COMMUN .....	30
FIGURE 23 COUPLAGE PAR DIAPHONIE CAPACITIVE OU COUPLAGE PAR CHAMP ELECTRIQUE.....	31
FIGURE 24 COUPLAGE PAR DIAPHONIE INDUCTIVE. ....	32
FIGURE 25 SCHEMA TT.....	34
FIGURE 26 SCHEMA IT.....	35
FIGURE 27 SCHEMA TN-S.....	36
FIGURE 28 SCHEMA TN-C.....	37
FIGURE 29 COUPLAGE PAR IMPEDANCE COMMUNE .....	38
FIGURE 30 LE CABLAGE DE L'INSTALLATION ELECTRIQUE .....	43
FIGURE 31 COUPLAGE PAR IMPEDANCE COMMUNE EN MODE DIFFERENTIEL. ....	45
FIGURE 32 COUPLAGE PAR IMPEDANCE COMMUNE EN MODE COMMUN .....	46
FIGURE 33 SIMULATION DE CHAMP MAGNETIQUE EN FONCTION DE R .....	47
FIGURE 34 VARIATION DE CHAMP MAGNETIQUE EN FONCTION DE LA DISTANCE R.....	47
FIGURE 35 VARIATION DE DISTANCE R ET VISUALISATION VALEUR DE CHAMP MAGNETIQUE .....	48
FIGURE 36 VARIATION DE CHAMP MAGNETIQUE EN FONCTION DE LA DISTANCE D1.....	49
FIGURE 37 VARIATION DE CHAMP MAGNETIQUE EN FONCTION DE LA DISTANCE D.....	50
FIGURE 38 VARIATION DE DISTANCE D1 ET VISUALISATION VALEUR DE CHAMP MAGNETIQUE.....	50
FIGURE 39 VARIATION DE CHAMP MAGNETIQUE EN FONCTION DE LA DISTANCE D.....	51
FIGURE 40 VARIATION DE CHAMP MAGNETIQUE EN FONCTION DE LA DISTANCE D.....	52
FIGURE 41 VARIATION DE DISTANCE D ET VISUALISATION LA VALEUR DE CHAMP MAGNETIQUE.....	52

# **INTRODUCTION GENERALE**

L'électricité a changé le cours de l'humanité. Grâce à l'utilisation des équipements électriques et électroniques dans les domaines de la vie courante, industrielle, médical, militaire, politique, commercial, alimentaire, religieux, culture, confort, cela dit, l'électricité est devenue indispensable de tout ce qui fait notre vie.

L'électricité une énergie de civilisation par excellence, D'autant qu'il est vrai que son utilisation est notablement dangereuse et exige de la prudence. Il est donc nécessaire pour un électricien de connaître parfaitement le produit qu'il distribue.

Même une utilisation de l'énergie électrique qui semble sécurisée cache des effets qui peuvent être nuisant voire dangereux, pour la plupart imperceptibles, C'est une raison suffisante pour travailler à étendre, approfondir et divulguer la présence des champs électromagnétiques appelés souvent perturbation ou agression électromagnétique. Leurs effets sur l'environnement constituent des domaines d'étude très variés et très vastes du domaine de la santé ou militaire à l'industrie.

Dans notre travail nous nous focaliserons sur la conception génie électrique dans le bâtiment industriel et plus particulièrement sur l'acheminement des câbles électriques qui servent à la distribution de l'énergie électrique de la source aux récepteurs à travers les faux plancher, les faux plafonds, en apparent ou en encastré dans les murs, généralement parcourue par des courants élevés et sources de rayonnement électromagnétique perturbateur pour les équipements sensibles.

L'acheminement des câbles électriques doit obéir à une discipline normalisée souvent bafouée par les techniciens non avérés même avisé mais non sensibilisé des risques sur les équipements sensibles communiquant et non communiquant, ces risques qui sont généralement perçu après pertes couteuses qui nécessiterons forcément des frais considérables supplémentaires pour la correction et remise en état.

Ce travail qui relève de la CEM (Compatibilité Électromagnétique) peut être perçu comme étant un effort d'ingénierie pour la sensibilisation du personnel électricien sur les risques du rayonnement des câbles de puissance sur les équipements sensibles dans le bâtiment.

## **CHAPITRE I**

# **GENERALITES SUR L'ELECTROMAGNETIQUE**

### I.1 Introduction :

Le champ électromagnétique est une entité physique difficile à concevoir mais qui existe bel et bien et n'a rien d'un concept théorique utile pour faciliter l'interprétation des phénomènes relatifs à l'électromagnétisme. Cette difficulté apparaissait bien au début où on avait l'impression que l'électricité et le magnétisme étaient deux notions distinctes. En réalité, le cas statique et quasi-statique découple les deux effets de sorte que leurs affinités n'apparaissent pas. Il aura fallu des dizaines de travaux et d'expériences pour apercevoir les interrelations et décrire plus généralement le phénomène électromagnétique.

Pour être bref c'est les lois de Maxwell au nombre de quatre qui définissent entièrement le comportement de l'électromagnétisme du cas statique au rayonnement par les antennes.

### I.2 Équation de Maxwell

Les équations de Maxwell relient les champs électrique  $E$  et magnétique  $B$  aux sources de champs, la densité de charge  $\rho$  et la densité de courant  $j$

$\text{div } E = \rho/\epsilon_0$	$\longrightarrow$	Equation de Maxwell Gauss.....1
$\text{rot } E = - \partial B/\partial t$	$\longrightarrow$	Equation de Maxwell Faraday.....2
$\text{div } B = 0$	$\longrightarrow$	Equation de Maxwell Thomson ou flux.....3
$\text{rot } B = \mu_0 j + \epsilon_0 \partial E/\partial t$	$\longrightarrow$	Equation de Maxwell Ampère.....4

$E$  : champ électrique (unité: Volt/mètre ou  $V \cdot m^{-1}$ ) - champ vectoriel

$B$  : champ magnétique (unité: Tesla ou T) - champ vectoriel

$j$  : densité volumique de courant électrique (unité: Ampère.  $m^{-2}$ ) - champ vectoriel

$\rho$  densité volumique de charge électrique (unité: Coulomb  $m^{-3}$ ) - champ scalaire

$\epsilon_0$  :est la permittivité du vide ( $1/4\pi\epsilon_0 = 9 \cdot 10^9$  Unités SI)

$\mu_0$  : est la perméabilité magnétique du vide ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  unités SI)

avec entre eux la relation  $\mu_0, \epsilon_0 C^2 = 1$  où  $C = 3 \cdot 10^8$  m est la vitesse de la lumière dans le vide.

On peut déduire directement des équations deux régimes distincts :

- Le régime variable où les charges  $\rho$  et le champ magnétique variable sont source de  $E$  (équations de Maxwell Gauss et Faraday), tandis que la densité de courant électrique  $j$  et le champ électrique variable sont source de  $B$  (Maxwell Ampère).
- Le régime stationnaire (électrostatique, magnétostatique), où les équations sont découplées. Les charges sont source de  $E$  et les courants sont source de  $B$ . **[1]**

### I.3 Le régime variable :

Le régime variable est caractérisé par des propriétés spécifiques liées à la dépendance des champs en fonction du temps. Ces particularités sont : [2]

#### I.3 .1 Le phénomène d'induction :

Un circuit filiforme au repos et parcouru par un courant invariable n'entraîne l'apparition d'aucune f.é.m. ou d'aucun courant dans un autre circuit filiforme au repos. Il n'en est pas de même si le courant varie ou si les circuits en présence se déplacent l'un par rapport à l'autre : la f.é.m. ou le courant qui apparaissent sont dus au phénomène d'induction. Ce phénomène entraîne l'apparition d'un champ électrique supplémentaire.

##### a) L'induction électromagnétique

###### ➤ Loi de Faraday

La loi de Faraday permet d'exprimer l'expression de la force électromotrice (f.é.m.) induite, notée "e", en fonction de la variation du flux magnétique total à travers une surface quelconque qui repose sur le circuit (C), pendant un intervalle de temps "dt". La variation du flux magnétique est représentée par "dφ".

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots 5$$

La loi de Faraday a été établie expérimentalement et est valable pour des variations relativement lentes du flux magnétique par rapport au temps. Cependant, elle reste applicable à tout régime variable et constitue la base de l'étude de l'électromagnétisme classique.

###### ➤ Équation de Maxwell-Faraday

Considérons un circuit (C) au repos soumis à un champ variable. Un champ électrique va prendre naissance dans tout l'espace où existe un champ magnétique variable. Le champ électrique induit joue un rôle de champ électromoteur et la f.é.m. apparaissant dans tout le circuit (C) peut s'écrire :

$$e = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \dots\dots\dots 6$$

Où (S) est une surface orientée s'appuyant sur le contour orienté (C). En permutant les opérateurs d'intégration et de dérivation on a :

$$\oint \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = - \iint \frac{\partial(\vec{B} \cdot d\vec{S})}{\partial t} = - \iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \dots\dots\dots 7$$

Cette égalité étant satisfaite quelle que soit (S) s'appuyant sur (C), il en résulte :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}_i = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots\dots\dots 8$$

Remarquons que s'il existe en plus du champ électrique induit un champ électrostatique  $\vec{E}_s$ , le champ total  $E$  est la somme du champ électrostatique  $\vec{E}_s$  et du champ électrique induit  $\vec{E}_i$  :

$$\vec{E} = \vec{E}_s + \vec{E}_i \dots\dots\dots 9$$

On peut aisément vérifier que  $E$  satisfait la relation de Maxwell-Faraday :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{\nabla} \times [\vec{E}_s + \vec{E}_i] = \vec{\nabla} \times \vec{E}_i = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots\dots\dots 10$$

Donc, on obtient

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}_s = 0 \dots\dots\dots 11$$

**Car :** En définitive, nous devons retenir de l'étude du phénomène d'induction électromagnétique le résultat fondamental suivant :

En chaque point de l'espace où existe un champ magnétique variable nous devons associer un champ électrique induit variable à circulation non conservative c'est-à-dire ne dérivant pas d'un potentiel. L'ensemble de ces deux champs ( $\vec{E}, \vec{B}$ ) constitue le champ électromagnétique.

### I.3 .2 Le phénomène de capacité

#### a) Le théorème de Maxwell-Ampère

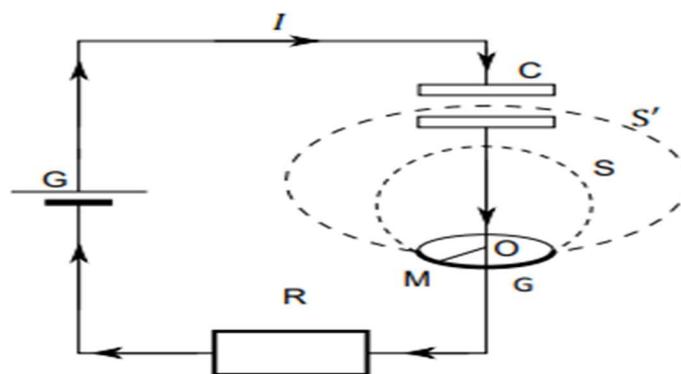


Figure 1 Le théorème de Maxwell-Ampère

Considérons l'exemple simple schématisé par la figure si dessus. Lorsqu'on relie le condensateur C au générateur G, il circule pendant un temps très court un courant variable  $I(t)$ . Ce courant crée un champ magnétique  $B$  que l'on pourrait calculer à l'aide du théorème d'Ampère. Pour calculer le champ magnétique en  $M$ , on considère le cercle  $\Gamma$  de rayon  $OM = r$ , et l'on a :

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 . I \dots\dots\dots 12$$

Cette équation exprime le fait que l'intégrale curviligne de  $\vec{B}$  sur une boucle fermée est égale à  $\mu_0$  fois le courant total qui traverse une surface quelconque limitée par la boucle fermée  $\Gamma$ . On peut calculer le champ magnétique en  $M$  en utilisant successivement deux surfaces différentes  $S$  et  $S'$  s'appuyant sur le contour  $\Gamma$  et en appliquant pour chacune d'entre-elles le théorème d'Ampère sous sa forme intégrale.

- Cas de la surface  $S$  : Le courant total traversant  $S$  est bien égal au courant  $I$  et on obtient :

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi r} \dots \dots \dots 13$$

Cas de la surface  $S'$  : Cette surface passant entre les plaques du condensateur n'est traversée par aucun courant puisque les charges électriques ne se déplacent pas entre les plaques du condensateur. Si on utilise le théorème d'Ampère, on obtient :  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 0 \dots \dots \dots 14$

Le résultat de ce calcul serait alors  $B = 0$ . Ce qui est en contradiction avec le résultat obtenu avec la surface  $S$

. Pour lever cette ambiguïté, il faut modifier le théorème d'Ampère. Dans le condensateur, il n'y a pas de charges mobiles, donc pas de courant de conduction. Par contre il y a un champ électrique variable durant la charge du condensateur et qui est égal à :

$$E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \dots \dots \dots 15$$

Le vecteur de densité de courant de déplacement

Le courant lié au mouvement des charges électriques sera noté dans la suite  $I$  et le courant de déplacement qui correspond à un champ électrique variable sera noté  $I_D$ . On appelle le courant total  $I_T = I + I_D$ . A ces courants on associe respectivement : **[3]**

- Le vecteur de densité de courant lié au mouvement des charges électriques  $j$
- Le vecteur de densité de courant de déplacement  $j_D$  défini par  $\vec{j}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \dots \dots \dots 16$

Le tableau ci-dessous est une correspondance des formes différentiel et intégrale.

	<b>Forme locale</b>	<b>Forme intégrale</b>
<b>Équation de Maxwell-Faraday</b>	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \dots 17$

Équation de Maxwell-  
Ampère  $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left[ \vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right]$   $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \iint \mu_0 \left[ \vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right] \cdot d\vec{S} \dots 18$

### I.3.3 Couplage électromagnétique en régime variable :

Le couplage entre champ électrique et magnétique se manifeste a une distance de la source de  $\frac{\lambda}{2\pi}$ . [4]

Dans ce qui va suivre nous considerons les equations de MAXWELL établis dans le vide :

➤  $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \dots 19$

➤  $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left[ \vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right] \dots 20$

A partir des équations de Maxwell , On établit

$Rot \ rot \ E = rot \left( -\frac{\partial B}{\partial t} \right) = -\frac{\partial(rotB)}{\partial t} = -\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \dots 21$

On a également

$Rot \ rot \ E = grad(divE) - \Delta E = -\Delta E \dots 22$

Car  $divE=0$  dans le vide. On en déduit que le champ électrique  $E(r, t)$  obéit à l'équation d'onde ou équation d'alembert :

$\Delta E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \dots 23$

Avec

$c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-\frac{1}{2}}$  La vitesse de la lumière dans le vide.

Le champ magnétique  $B(r, t)$  peut s'écrire comme suit :

$\Delta B - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = 0 \dots 24$

### I.4 Régime électrostatique :

#### I.4.1 Le champ électrique

La présence de la charge Q dans une région de l'espace crée dans cette région un champ électrique noté  $E_Q$  qui est mis en évidence par la force agissant sur la charge q ; ce qui peut se traduire par la relation : [2]

$$F_{Q \rightarrow q} = q\vec{E}_Q \dots \dots \dots 25$$

Tenant compte de la loi de Coulomb, le champ électrique créé par la charge Q, dans une direction donnée par le vecteur unitaire  $\vec{u}$  et à une distance r, est alors défini par :



Figure 2 Le champ électrique

$$\vec{E}_Q = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u} \dots \dots \dots 26$$

Dans le cas des phénomènes indépendants du temps ou stationnaires, le champ électrique est appelé champ *électrostatique*.

**a) Principe de superposition**

Le champ électrique résultant généré par la présence de plusieurs charges  $Q_i$  est obtenu en additionnant vectoriellement les champs électriques créés individuellement par chacune de ces charges.

$$E = \sum_i \vec{E}_{Q_i} = \sum_i \frac{Q_i}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\vec{r}_i}{r_i^3} \dots \dots \dots 27$$

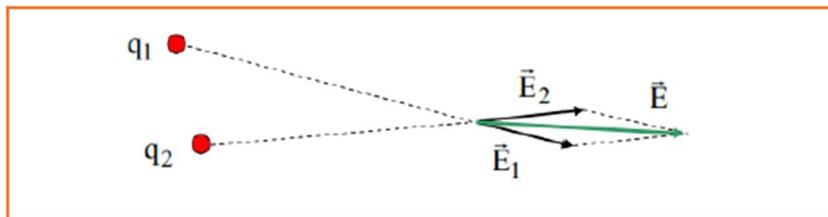


Figure 3 Principe de superposition

Le principe de superposition peut être étendu au cas d'une distribution continue de charges en considérant la région occupée par les charges comme étant composée d'un ensemble d'éléments chargés "petits". Dans ce cas, la sommation peut être exprimée sous forme d'une intégrale.

**a) Champ électrique créé par une distribution linéique de charges électriques**

En appliquant le principe de superposition, nous prenons en compte de petits éléments de la distribution de charges, d'une longueur  $d\ell_p$ , situés aux points P, chacun portant une charge  $dQ = \lambda d\ell_p$ , où  $\lambda$  est la densité linéique locale de charge électrique. Le champ électrique créé par une distribution linéique de charge de longueur est alors donné par :

$$\vec{E}(M) = \oint \lambda \frac{\lambda(P)}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3} dl_p \dots\dots\dots 28$$

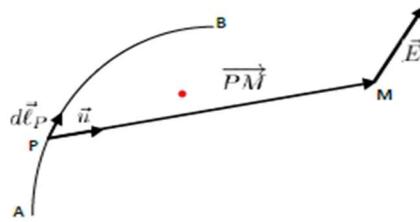


Figure 4 champ électrique crée par une distribution linéique de charges électriques

**a) Champ électrique créé par une distribution surfacique de charges électriques :**

Dans ce cas on considère de petits éléments de la distribution surfacique de charges de surface  $dS_P$ , situés aux points  $P$  et portant chacun une charge  $dQ = \sigma(P) dS_P$  où  $\sigma(P)$  est la densité surfacique locale de charge électrique. Le champ électrique créé par une distribution

surfaccique de charge de surface  $S$  est donné par :  $\vec{E}(M) = \oint \frac{\sigma(P)}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3} dS_p \dots \dots 29$

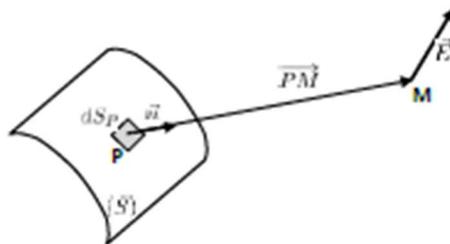


Figure 5 Champ électrique créé par une distribution surfaccique de charges électriques.

**a) Champ électrique créé par une distribution volumique de charges électriques :**

Dans le cas d'une distribution continue de charges électriques dans un volume ( $\tau$ ) avec une densité volumique de charge électrique  $\rho$ , on considère de petits éléments de la distribution volumique de charges de volume  $d\tau_P$ , situés aux points  $P$  et portant chacun une charge

$$dQ = \rho(P)d\tau_p. dQ \dots \dots\dots 30$$

Le champ électrique créé par cette distribution volumique de charge est donné par :

$$E(M) = \oint \frac{\tau(P)}{4\pi\epsilon_0} \frac{\overrightarrow{PM}}{\|\overrightarrow{PM}\|^3} d\tau p \dots\dots 31$$

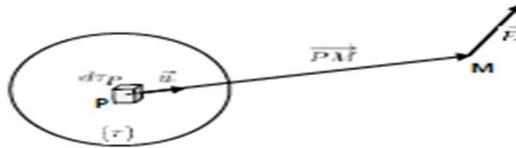


Figure 6 Champ électrique créé par une distribution volumique de charges électriques.

### I.4.2 Propriétés du champ électrostatique

#### a) Le potentiel électrostatique

Calculons le rotationnel du champ électrique  $E(M)$  donné par la précédente équation.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(M) = \vec{\nabla} \times \iiint \frac{\rho(P)}{4\pi\epsilon_0} \frac{\overrightarrow{PM}}{\|\overrightarrow{PM}\|^3} d\tau p \dots\dots 32$$

Comme on calcule le rotationnel au voisinage du point  $M$ , les dérivées partielles se calculent par rapport aux coordonnées  $(x, y, z)$  du point  $M$ , tandis que l'intégration se fait pour des éléments de volume portant les charges et situés aux points  $P$ ; l'intégration de volume se fait donc par rapport aux coordonnées  $(x_P, y_P, z_P)$  du point  $P$ . De ce fait, l'opérateur  $\nabla \times$  peut être introduit dans l'intégrale et on obtient alors :

Les éléments  $\rho(P)$  et  $d\tau P$  sont indépendants de la position du point  $M$  et ne dépendent que de  $P$ , il s'en suit que l'équation précédente peut s'écrire :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(M) = \iiint \frac{\rho(P)}{4\pi\epsilon_0} \vec{\nabla} \times \left[ \frac{\overrightarrow{PM}}{\|\overrightarrow{PM}\|^3} d\tau p \right] \dots\dots 33$$

Or, on sait que :

$$\vec{\nabla} \times \left[ \frac{\overrightarrow{PM}}{\|\overrightarrow{PM}\|^3} d\tau p \right] = \vec{0} \dots\dots 34$$

Il s'en suit le résultat fondamental

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \dots\dots 35$$

Sachant que le rotationnel d'un gradient est nul, on en déduit qu'il existe un champ scalaire appelé potentiel électrostatique  $u$  tel que : **[2]**

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} u \dots\dots 36$$

À partir du résultat précédent on peut aisément montrer que :

$$du = -\vec{E} \cdot d\vec{l} \dots 37$$

Par intégration, on peut montrer que le potentiel électrostatique créé par une charge ponctuelle est :

$$u(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \dots 38$$

On dit que le champ électrostatique  $E$  dérive d'un potentiel.

### b) Le flux du champ électrostatique

Considérons une charge ponctuelle  $q > 0$  située en O, et M représente un point de l'espace.

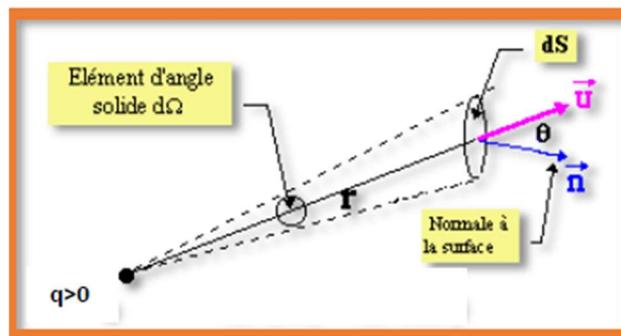


Figure 7 Le flux du champ électrostatique

Le champ  $E(M)$  créé par  $q$  en  $M$  est :

$$\vec{E}(M) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{u}}{r^2} \dots 39$$

Avec,  $\vec{u} = \frac{\vec{OM}}{\|\vec{OM}\|}$  et  $r = \|\vec{OM}\|$

Soit  $dS$  un élément de surface entourant le point M ; orientons la surface. Le flux élémentaire de  $E$  à travers la surface orientée est :

$$d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{u} \cdot d\vec{S}}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} d\Omega \dots 40$$

Avec  $d\Omega = \frac{\vec{u} \cdot d\vec{S}}{r^2} = \frac{\vec{u} \cdot \vec{n}}{r^2} dS$  : angle solide élémentaire sous lequel du point O on voit la surface élémentaire. Le signe de  $d\Omega$  dépend de l'orientation de la surface :

- $d\Omega > 0$  si  $\alpha = (u, n) < \pi/2$
- $d\Omega < 0$  si  $\alpha > \pi/2$

Cette relation constitue le théorème de Gauss pour le champ électrostatique qui, sous cette forme dite intégrale, s'écrit :

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} \dots\dots 41$$

Si la charge  $Q$  est répartie dans l'espace selon une densité volumique de charge  $\rho$ , nous avons

$$Q = \iiint \rho d\tau \dots\dots 42$$

Donc, on peut écrire le théorème de Gauss comme suite :

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint \rho d\tau \dots\dots 43$$

Où ( $S$ ) est une surface fermée quelconque orientée vers l'extérieur et ( $\tau$ ) est le volume intérieur à ( $S$ ). En utilisant le théorème de Gauss-Ostrogradski, on peut écrire :

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \iiint \vec{\nabla} \cdot E d\tau \dots\dots 44$$

Le théorème de Gauss étant vrai quel que soit le volume  $\tau$ , on obtient l'équation aux dérivées partielles suivante qui constitue la forme locale du théorème de Gauss : [2]

$$\vec{\nabla} \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \dots\dots 45$$

Cette équation relie  $E$  aux charges qui constituent les sources du champ électrostatique.

Les deux principales équations de l'électrostatique sont les suivantes :

	<b>Forme locale</b>	<b>Forme intégrale</b>
$\vec{E}$ conservatif	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0$	$\int \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$

### I.5 Régime magnétostatique :

L'étude du régime magnétostatique permet de comprendre et de prédire le comportement des champs magnétiques dans ces situations, ce qui est essentiel pour de nombreux domaines tels que l'ingénierie électrique.

Dans cette branche de l'électromagnétisme, les équations de Maxwell se simplifient considérablement, ce qui facilite l'analyse mathématique et la résolution des problèmes magnétostatiques. Les principales équations utilisées sont la loi de Biot-Savart, qui décrit le champ magnétique créé par des courants électriques, et la loi d'Ampère, qui relie le champ magnétique à la circulation du champ électrique le long d'un contour fermé.

L'étude du régime magnétostatique est donc fondamentale pour comprendre et manipuler les champs magnétiques dans un large éventail d'applications technologiques et scientifiques. [4]

### I.5.1 Les équations de maxwell dans le régime magnétostatique :

Le courant électrique qui parcourt une surface  $S$  est égal au flux du vecteur de densité surfacique de courant à travers une ligne. Où  $d\ell$  est l'élément de longueur de la ligne  $[AB]$  et  $n$  est un vecteur unitaire tangent à la surface  $S$  et normal à la ligne  $[AB]$  en tout point. [4]

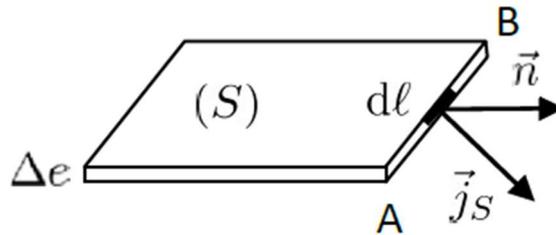


Figure 8 Le courant électrique qui parcourt une surface  $S$

Le champ magnétique  $B$  créé par un courant  $I$  est donné par le théorème d'Ampère :

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I \dots 46$$

$I$  est le courant qui traverse cette courbe ;

$\mu_0$  est la perméabilité magnétique dans le vide égale à  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$  ;

Si le courant  $I$  correspond à une distribution de charges électriques mobiles définissant un vecteur de densité de courant  $\vec{j}$ , alors le courant  $I$  encerclé par la boucle fermée est le flux de  $\vec{j}$  à travers une surface quelconque délimitée par la boucle :

Donc

$$I = \iint \vec{j} \cdot d\vec{S} \dots 47$$

Le théorème d'ampère s'écrit alors :

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \iint \vec{j} \cdot d\vec{S} \dots 48$$

En tenant compte de théorème de stockes :

$$\oint B \cdot dl = \iint \vec{\nabla} \times \vec{B} \cdot d\vec{S} \dots 49$$

On obtient

$$\iint \vec{\nabla} \times \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mu_0 \iint \vec{j} \cdot d\vec{S} \dots 50$$

Cette égalité étant vraie quelle que soit la surface S, on obtient la forme locale du théorème

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{j} \dots 51$$

Loi de Biot et Savart :

Loi de savart nous permet de définir le champ magnétique en fonction de courant et de distance est défini par l'équation :

$$d\vec{B}_P(M) = \frac{\mu_{0,I}}{4\pi} \cdot \frac{(dl \wedge \vec{PM})}{PM^3} \dots \dots 52$$

## I.5.2 Approximation en régime quasi-stationnaire magnétique :

### Introduction

L'ARQS est une approche qui néglige la propagation des champs électromagnétiques en ignorant le retard de propagation entre la source et le point d'observation. Dans un régime sinusoïdal, le retard de propagation doit être bien inférieur à la période de variation temporelle des sources. Cette approximation suppose que la distance entre la source et le point d'observation est bien inférieure à la longueur d'onde. Dans un régime général, la condition est que le retard de propagation, c'est-à-dire la dimension de l'espace d'étude divisée par c (la vitesse de la lumière), soit négligeable par rapport au temps caractéristique de variation des sources.

Les propriétés spécifiques liées à la dépendance des champs en fonction du temps sont :

- le phénomène d'induction,
- le phénomène de capacité,
- le phénomène de propagation.

Pourtant dans le cas de régimes variant assez lentement en fonction du temps, on fait des approximations qui permettent de négliger certains termes dans les équations de Maxwell. Cet ensemble d'approximations est appelé l'approximation du régime quasi-stationnaire (A.R.Q.S). [5]

#### Forme locale

équation de Maxwell  $\text{div} \vec{E}(M, t) = \frac{\rho(M, t)}{\epsilon_0} \dots 53$

Gauss (RQS électrostatique)

équation de Maxwell  $\text{rot} \vec{E}(M, t) = -\frac{\partial \vec{B}(M, t)}{\partial t} \dots 54$

**Faraday**

équation de Maxwell  $\text{div}\vec{B}(M,t) = 0 \dots 55$

**Thomson**

équation de Maxwell  $\text{rot}\vec{B}(M,t) = \mu_0 \cdot \vec{J}(M,t) \dots 56$

**Ampère**

**I.6 Champ magnétique créé par un fil fini de longueur AB**

Dans ce chapitre, nous avons choisi d'effectuer notre étude dans le régime quasi-stationnaire. Cette décision est basée sur le fait que la région d'étude que nous avons sélectionnée a une taille de 150 m, ce qui est beaucoup plus petit par rapport à la longueur de propagation d'onde  $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 6 \cdot 10^6 \text{ m}$  avec  $150 \text{ m} \ll 6 \cdot 10^6$ . Cela démontre que le régime dans lequel nous effectuons notre étude peut être considéré comme quasi-stationnaire. [6]

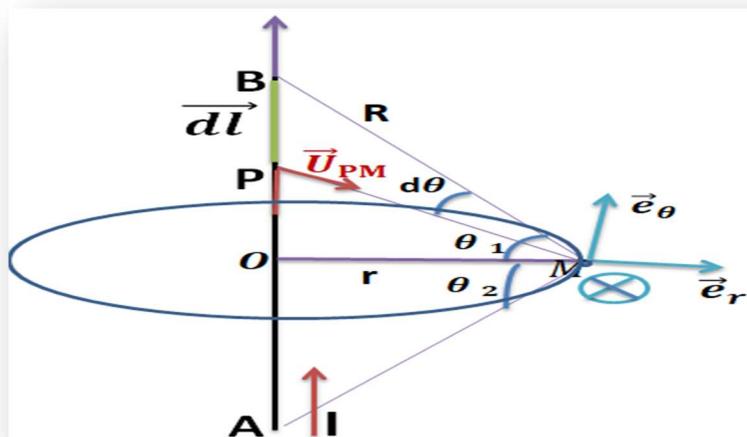


Figure 9 Champ magnétique créé par un fil fini AB

Lorsqu'on applique la relation de Biot et Savart, on obtient :

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{\vec{dl} \wedge \vec{PM}}{PM^3} ; \dots 57$$

Avec :

$$\vec{dl} = dl \cdot \vec{e}_z;$$

$$\vec{PM} = R \cdot \vec{U}_{PM};$$

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \left( \frac{dl \cdot R \cdot e_z}{R^3} \right) \wedge \vec{U}_{PM}$$

$$\vec{e}_z \wedge \vec{U}_{PM} = \|e_z\| \cdot \|U_{PM}\| \cdot \sin(\vec{e}_z, \vec{U}_{PM}) \cdot \vec{e}_\theta$$

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \cdot \frac{dl}{R^2} \cdot \sin(\pi - \alpha) \cdot \vec{e}_\theta$$

Avec  $\langle \sin(\pi - \alpha) = \sin(\alpha) \rangle$

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \cdot \frac{dl}{R^2} \cdot \sin(\alpha) \cdot \vec{e}_\theta$$

On a

$$\alpha + \theta = \frac{\pi}{2}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta$$

En remplace  $\alpha$  dans l'expression on obtient :

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \cdot \frac{dl}{R^2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \cdot \vec{e}_\theta$$

On a par définition

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \cos \theta$$

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \cdot \frac{dl}{R^2} \cdot \cos \theta \cdot \vec{e}_\theta$$

$L = OP$ ,  $OM = r$

$$\tan \theta = \frac{OP}{r} = \frac{l}{r} \text{ alors}$$

$$l = r \tan \theta \text{ alors } dl = r \frac{1}{\cos^2 \theta} d\theta$$

Donc

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \cdot \frac{r}{R^2} \cdot \frac{\cos \theta}{\cos^2 \theta} d\theta$$

$$\cos \theta = \frac{r}{R} \text{ donc } R^2 = \frac{r^2}{\cos^2 \theta}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \cdot \frac{r}{\frac{r^2}{\cos^2 \theta}} \cdot \cos \theta \, d\theta$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi r} \int \cos \theta \, d\theta$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi r} [\sin \theta]_{\theta_1}^{\theta_2}$$

$$\left[ \vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi r} [\sin \theta_2 - \sin \theta_1] \cdot \vec{e}_\theta \right] \dots 58$$

### I.7 Exemple d'une agression rayonnée :

Dans cet exemple, nous allons étudier un câble électrique de basse tension d'une longueur de 150 mètres. Ce câble est alimenté par un courant de 300 ampères provenant d'un tableau général basse tension (TGBT). Le câble de phase est situé à une distance de 0.1 mètre par rapport à une boucle de 300 mètres, constituée de deux câbles de mise à la terre (PE) qui sont séparés de 0.5 mètre. Notre objectif dans cette étude est de calculer l'induction magnétique émise par ce câble de phase dans la boucle.

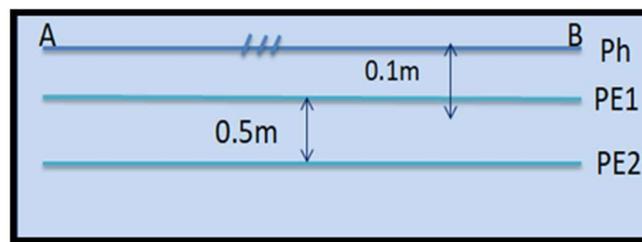


Figure10 : exemple d'une agression rayonnée

On utilise la loi de Biot et savart on trouve :

$$\left[ \vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} [\sin \theta_2 - \sin \theta_1] \cdot \vec{e}_\theta \right]$$

$$\left[ \vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi r} [\sin \theta_2 + \sin \theta_1] \cdot \vec{e}_\theta \right]$$

$$\left[ \vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi r} [2\sin \theta] \cdot \vec{e}_\theta \right] \dots 59$$

Dans cet exemple la région où nous réalisons notre étude est plus petit par rapport la longueur de câble, donc l'induction à l'extrémité de câble est presque négligeable alors on peut considérer ce câble est de longueur infinie.

Donc la loi de Biot et savart devient :

$$\left[ \vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \cdot e\theta \right]$$

Avec  $I_{\text{eff}}=300\text{A}$ ;  $r=0.1\text{m}$

$$\left[ \vec{\mathbf{B}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 300 \cdot \sqrt{2}}{4\pi \cdot 0.1} \right]$$

$$\vec{\mathbf{B}} = 4,24 \cdot 10^{-4} \text{T}$$

$$\vec{\mathbf{B}} = 424 \cdot \mu\text{T}$$

### Conclusion :

Cette composante magnétique est susceptibles de crée des perturbations pour les boucles mitoyen au câbles rayonnants, une boucle de conducteur de protection incluant des connexions vers un capteur communicant avec un équipement.

## **CHAPITRE II**

# **COHABITATION EQUIPEMENT PERTURBATEURS ET EQUIPEMENTS PERTURBES**

### II.1 Introduction :

Dans le premier chapitre on a mis en évidence le rayonnement magnétique d'un conducteur parcouru par le courant d'un équipement perturbateur ou pollueur dans son fonctionnement nominal, ce même champ constitue une perturbation par couplage électromagnétique pour les équipements de régulation et de communication mitoyens, c'est un problème de compatibilité électromagnétique entre ces deux types d'équipement.

Dans un cadre général on va développer dans ce chapitre la notion de Compatibilité Électromagnétique, CEM et sa relation avec les régimes du neutre ou Système de Liaison à la Terre, SLT.

### II.2 Compatibilité électromagnétique (CEM) :

La compatibilité électromagnétique est définie par la norme CEI 61000 du CISPR2 comme : « L'aptitude d'un appareil ou d'un système (électrique/électronique) à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante, sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout composant qui se trouve dans son environnement ». [7]

Pour qu'un système soit électromagnétiquement compatible il doit respecter les trois critères suivants :

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

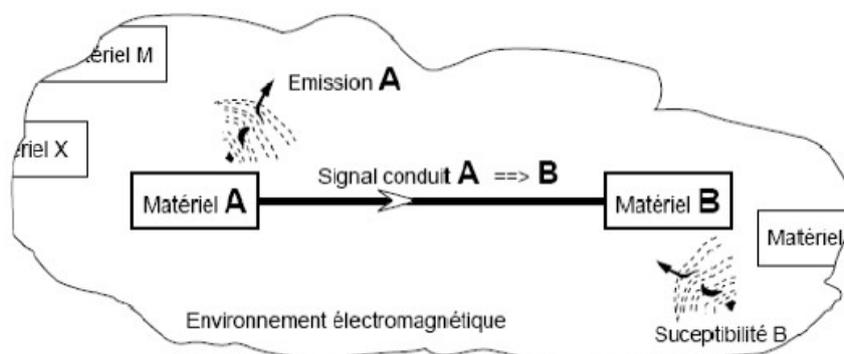


Figure 11 : Phénomène de la Compatibilité Électromagnétique.

La CEM traite la problématique d'interférence EM entre les composants de deux façons différentes : l'émission électromagnétique et l'immunité électromagnétique.

- Pour l'émission EM, la CEM s'intéresse à analyser puis à limiter le niveau de perturbation produit par un système ou un composant afin que les autres composants dans son environnement ne soient pas perturbés ni s'auto-perturbent.
- Pour l'immunité, la CEM analyse la susceptibilité électromagnétique d'un composant vis-à-vis des perturbations EM provenant de son environnement ou de lui-même. Puis apporte des solutions afin de limiter ces perturbations électromagnétiques.

Ainsi, l'immunité en CEM consiste à analyser puis à augmenter la capacité d'un composant à résister aux perturbations EM provenant de son environnement.

**On peut donc délimiter trois principaux centres d'étude :**

- Les sources de perturbation ;
- Leur mode de couplage et de propagation ;
- Les effets des perturbations sur les victimes, qui correspondent au concept de susceptibilité électromagnétique.



Figure 12 Transfert de perturbation entre source et victime.

### II.3 Les sources de perturbation électromagnétique

Tout d'abord, une interférence électromagnétique est un signal électromagnétique non désiré, courant, tension ou champ électromagnétique, qui altère le fonctionnement normal d'une pièce. Les sources perturbatrices sont nombreuses, elles sont d'origines naturelles ou artificielles. [8]

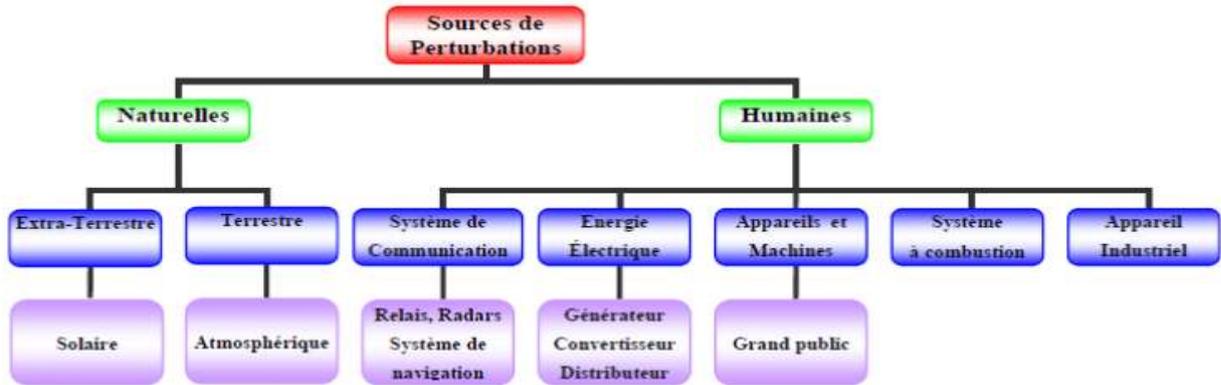


Figure 13 : Les différentes origines des perturbations

### II.3.1 Sources naturelles

- Sources d'origine naturelles: sont des phénomènes naturels (foudre, décharge électrostatique...). Les perturbations produites par ce type de sources sont des perturbations non intentionnelles.

#### II.3.1.1 La foudre :

La foudre est une décharge électrique qui se produit entre un nuage chargé et la Terre. La foudre est équivalente à un générateur de courant. Le courant est constitué par les charges du sol remonte le canal ionisé du traceur, on observe alors une forte réalité lumineuse progressant depuis la direction du nuage, à une vitesse estimée calculée en m/s, c'est « l'arc en retour » ou « return stroke ».

La foudre est généralement constituée de plusieurs décharges circulant dans le même canal ionisé. Lorsque la décharge primaire est terminée, après une période de 100 ms, une ou plusieurs décharges secondaires se produiront.

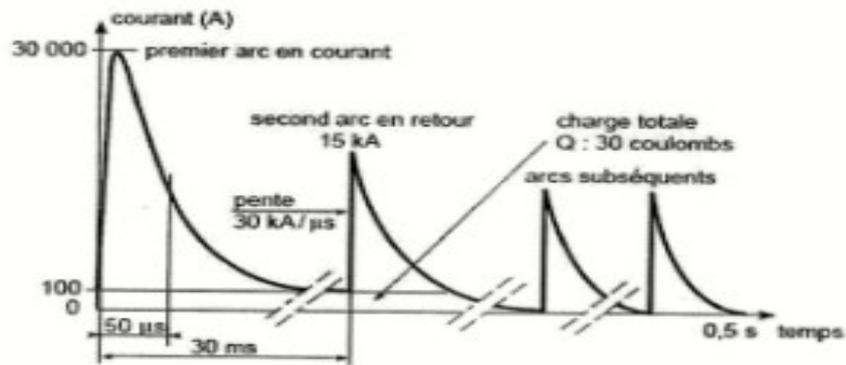


Figure 14 : Le courant de foudre

### II.3.1.2 Les décharges électrostatiques (DES) :

Lors du contact de cet objet relié à la masse, avec un autre objet présentant un potentiel élevé par rapport à cette masse, alors on désigne par le terme "décharge électrostatique" les impulsions de courant traversant un objet quelconque.

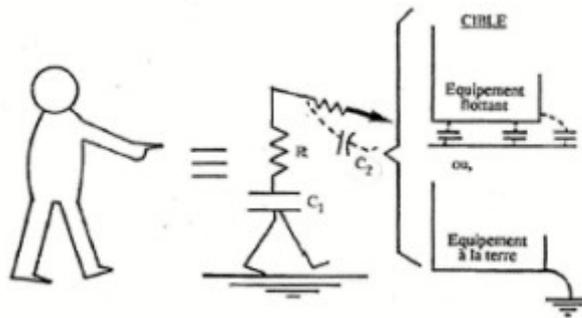


Figure 15 : La décharge électrostatique

$C_1$  : (personne-sol) de 100 à 80 pF

$C_2$  : (main-victime) quelque pF

$R$  : 300 à 10  $K\Omega$

Ce phénomène est favorisé par la combinaison de matériaux synthétiques (plastiques, tissu ...) et une atmosphère sèche et les charges électrostatiques résultent de l'échange d'électricité entre les matériaux ou entre le corps humain et les matériaux.

#### II.3.1.2.1 Caractéristiques des décharges électrostatiques :

Les facteurs importants de ces perturbations sont :

La très faible durée du temps de montée de l'impulsion (0.7 à 1 ns).

La durée de l'impulsion 60 ns

Le caractère isolé du phénomène : 1 décharge.

La tension très élevée à l'origine de la décharge (2 à 15 kV).

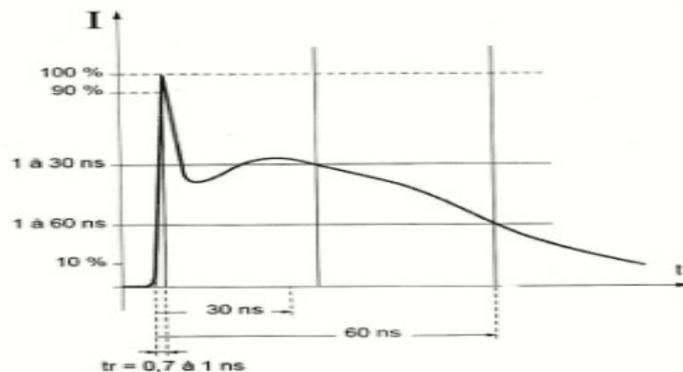


Figure 16 Caractéristique d'une décharge électrostatique

Les perturbations de type décharge électrostatique est un bruit haute fréquence de type « HF » que l'on retrouve sous forme comportementale, mais qui se couple facilement avec d'autres conducteurs par rayonnement.

### II.3.2 Sources artificiel :

Sont, en générale, les équipements et installations électroniques ou électriques (secteur d'alimentation, convertisseurs à hautes fréquences...).

Les perturbations produites par ces sources peuvent être intentionnel ou non intentionnel.

#### II.3.2.1 Champs créé par les émetteurs radio :

Pour éviter les phénomènes dans la zone proche, suffisamment loin de l'antenne, le champ rayonné par un émetteur quelconque Vaut :

$$E \left( \frac{v}{m} \right) = \frac{1}{d} \sqrt{30 \cdot P \cdot G}$$

Avec :

d = distance à laquelle se trouve l'antenne émettrice, en mètres.

P = puissance réelle en sortie de l'émetteur, en Watts.

G = gain de l'antenne, comparé à une antenne théorique isotrope (rayonnement constant du 360°).

Le produit  $P \times G$  est appelé « puissance équivalente (ou apparente) rayonnée ».

### II.3.2.2 Convertisseurs et générateurs HF :

Plusieurs équipements de puissance utilisent des convertisseurs fréquences :

- Pour la conversion d'énergie
  - Régulateurs de tension à découpage (fréquence de découpage 20 KHz à plusieurs centaines de KHz) ;
  - convertisseurs de fréquence pour entraînements à vitesse variable ;
  - convertisseurs/onduleurs statiques. b)

Pour utiliser les propriétés de la haute fréquence dans l'industrie (chauffage, découpage, collage, ultrasons, Ets.) ou scientifiques et médicales, ces appareils peuvent appliquer des puissances très élevées (la dizaine de KW jusqu'à plusieurs MW) à des fréquences qui leur ont été allouées par des règlements internationaux, comme : 618 MHz, 13,56 MHz, 27,2 MHz, 40 MHz, 68 MHz, 915 MHz, 2 450 MHz.

Tous ces appareils superposent en permanence des courants hautes fréquences sur le réseau d'alimentation. Ils peuvent également rayonner à travers leurs câbles et leurs capots car ils ressemblent à des émetteurs. À proximité, on peut trouver des champs magnétiques importants (une dizaine d'A/m à une distance de l'ordre du mètre).

### II.3.3 Champ de fuite des transformateurs :

Les transformateurs d'alimentation fonctionnent toujours près de leur saturation.

L'induction crête dans le fer dépasse 1.5 T (tesla) et peut même dans certain cas atteindre 2 T. Avec de tels niveaux d'induction, le fer sature (fig. II-10) et le champ magnétique dans l'air dépasse 100 A/m (et peut atteindre 1000 A/m) au voisinage du transformateur.

L'effet le plus fréquent du champ de fuite est la déformation des images de tubes cathodiques. Un tube cathodique classique supporte à peine 5 A/m en basse fréquence. Les autres effets de ce champ sont: l'induction de bruit dans les têtes de lectures (magnétophones, dérouleurs de bande, lecteurs de disquettes...) et dans les boucles de câblage. Le champ magnétique rayonné par un transformateur, et de manière générale par toute source localisée, décroît rapidement avec la distance.

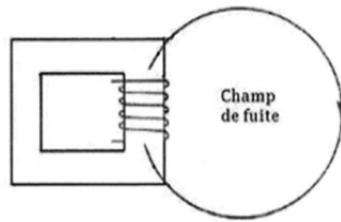


Figure 17 : champ de fuite au voisinage d'un transformateur

L'effet le plus fréquent du champ de fuite est la déformation des images de tubes cathodiques. Un tube cathodique classique supporte à peine  $5 \text{ A/m}$  en basse fréquence. Les autres effets de ce champ sont: l'induction de bruit dans les têtes de lectures (magnétophones, dérouleurs de bande, lecteurs de disquettes...) et dans les boucles de câblage.

### II.3.4 Les courts circuits :

Les courts circuits sur les lignes d'alimentation sont créés par :

- La d.d.p. de la ligne qui chute à zéro.
- Le courant de court-circuit génère un champ transitoire intense. Sur un réseau électrique, le courant de court-circuit au voisinage d'un transformateur d'alimentation est de 5 à 50 fois supérieures au courant nominal.

Le champ magnétique rayonné durant un court-circuit n'est gênant que pour les électroniques sensibles à bas niveau.

### II.3.5 Impulsion électromagnétique nucléaire (IEMN) :

L'IEMN est une impulsion de champ électromagnétique intense causée par l'interaction entre les rayonnements (X, gamma, neutrons) émis par l'explosion d'une bombe atomique, et le champ magnétique terrestre.

Ce champ est sans effet sur l'être humain et sur les équipements électriques simples, mais toute l'électronique moderne risque d'être détruite. Si l'explosion a lieu à haute altitude, par exemple entre 40 et 300Km, un territoire immense, sur un rayon de 800 à 2000 km environ est illuminé par ce champ bref, mais très intense.

## II.4 Sources intentionnelles et non intentionnelles

### II.4.1 Les sources intentionnelles :

Tout appareil qui a pour objectif l'émission d'ondes électromagnétiques (radiocommunication, radar, etc...). Dans la plupart des cas, ces sources sont de type harmonique (Figure 2.8).

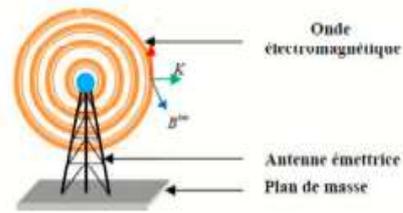


Figure 18 : Présentation d'une source intentionnelle.

### II.4.2 Les sources non intentionnelles :

Les sources non intentionnelles sont produites par des appareils qui ne sont pas destinés à l'émission radiofréquence (Figure 2.9). Dans la plupart des cas, ces sources sont de type transitoire.

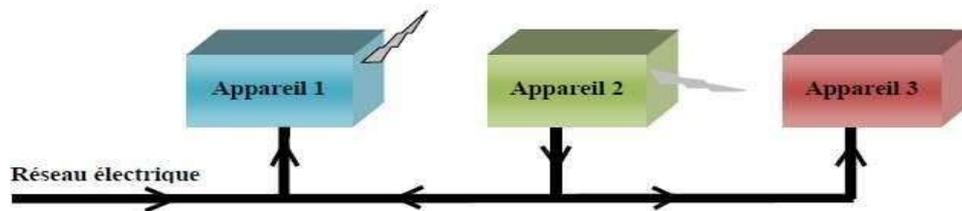


Figure 19 : Présentation d'une source non intentionnelle.

### Résumé :

La diversité des sources de perturbation électromagnétique engendre une importante pollution invisible et imprévisible qui peut être permanente ou transitoire et surtout néfaste pour les équipements sensibles nous aborderons dans ce qui va suivre l'étude de l'effet et le mode de couplage de ses perturbations car la compréhension du mode de fonctionnement de ces perturbations est le seul moyen pour pouvoir se prémunir de ces vicieuses agressions.

### II.5 Couplage électromagnétique [9]

Un couplage est le mode de propagation des perturbations qui se produit entre la source et la victime. Les modes de couplage peuvent être classés selon le type de perturbation, et le support de propagation, par conduction (caractérisé par les courants et différences de potentiel), ou par rayonnement (caractérisé par les champs électriques, et magnétique).

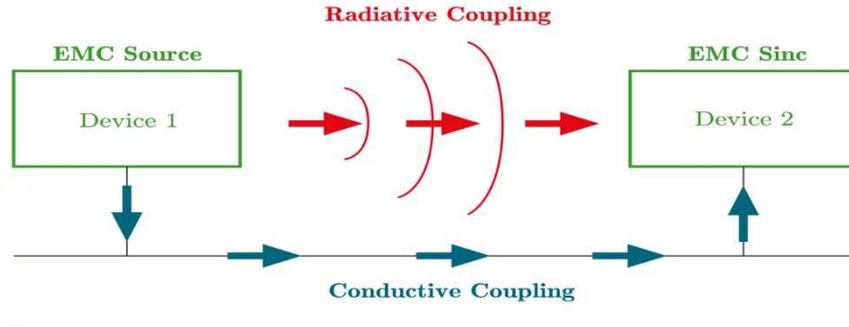


Figure 20 : Les modes de couplage entre la source de perturbation et la victime.

### II.5.1 Le couplage par conduction

Une interférence est dite en mode conduit lorsqu'elle traverse la liaison physique reliant la source à la victime. Les perturbations en mode conduite sont caractérisées par une variation rapide de courant ou de tension parasite ( $\frac{di}{dt}$  ou  $\frac{dv}{dt}$ ) au niveau de la victime.

En fonction du mode de connexion du circuit, on distingue deux types de couplages possibles en perturbation conduit : Le couplage en mode différentiel et le couplage en mode commune.

#### II.5.1.1 Couplage en mode différentiel

Les signaux utiles sont généralement transmis en mode différentiel appelle aussi mode normal ou symétrique. Les signaux sont transmis sur deux conducteurs actifs reliant deux équipements, le courant ( $I_{md}$ ) entre dans le récepteur par l'un des conducteurs et revient vers la source par l'autre. La tension parasite ( $U_{md}$ ) se manifeste entre l'un et l'autre conducteurs et elle peut être mesurée par une sonde différentielle.

Les perturbations EM induit en ce mode sont faible et souvent négligeable si les deux conducteurs sont proche et loin de la source.

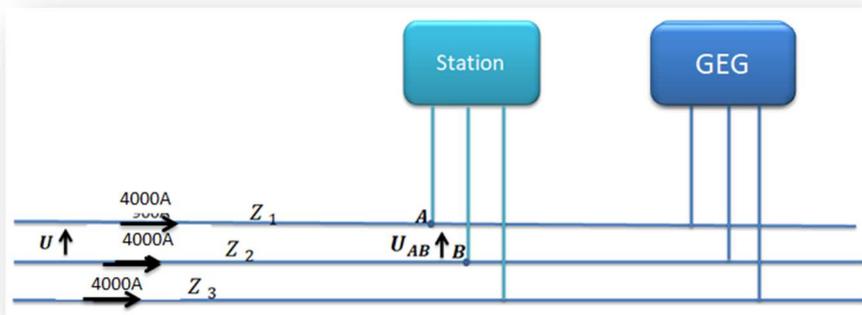


Figure 21 : Couplage en mode différentiel

### II.5.1.2 Couplage en mode commun

Dans ce mode le courant se propage sur les deux conducteurs dans le même sens et revient par la référence de potentiel commune à travers des capacités parasites. Il est appelé aussi mode "parallèle", "longitudinal", ou mode "asymétrique" et il se caractérise par la création d'une différence de potentiel entre les conducteurs et la masse qui facilite la circulation du courant perturbateur dans le circuit.

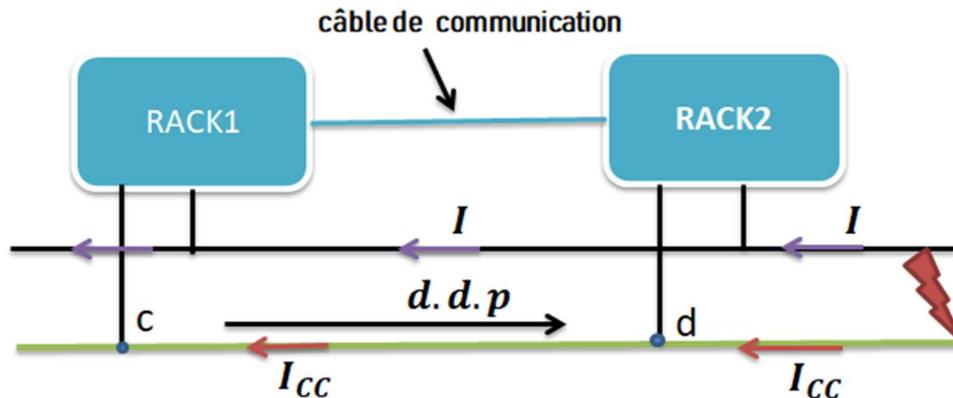


Figure 22 : Couplage en mode commun

On considère deux systèmes reliés par des fils, tous reliés à un potentiel de référence

Les courants  $I_{MC}/2$  représente les courants parasites en mode commun, se propageant à travers les deux conducteurs actifs (même sens et même amplitude) et le retour se fait par la masse ou la terre.

La tension de mode commun (UMC) nécessite une référence de potentiel extérieure aux deux conducteurs actifs.

Donc la tension de mode commun se caractérise par deux potentiels identiques rapportés à chaque conducteur du support et possédant cette référence de potentiel commune.

### II.5.2 Le couplage par rayonnement (par champ)

On dit que le couplage est par rayonnement (champ), si le support de propagation d'une perturbation transmise de la source vers le récepteur est l'espace. Le niveau de champ électromagnétique rayonné par une source de radiation est varié de la distance entre la source de radiation et le lieu d'observation du champ. Donc on trouve deux types de couplage par champ :

#### II.5.2.1 Le couplage par champ proche

On parle de couplage champ proche quand la source et la victime se trouve dans une zone proche, donc on parle d'une perturbation ou une interférence mutuelle.

Lorsque la source de courant est à basse impédance, le courant produit est élevé en comparaison avec la tension, et au voisinage du conducteur le champ magnétique est prépondérant devant le champ électrique et si la source de courant est à haute impédance, le courant produit est faible devant la tension et le champ électrique est plus important. On distingue deux cas de couplages en champ proche :

### II.5.2.1.1 Couplage par diaphonie capacitive ou couplage par champ électrique :

c'est une perturbation électromagnétique créée essentiellement par le champ rayonné par un conducteur qui va perturber un autre conducteur voisin. La source d'interférence est couplée au signal utile par une liaison capacitive dans ces conditions, il se rajoute au signal utile un autre signal qui est le signal parasite.

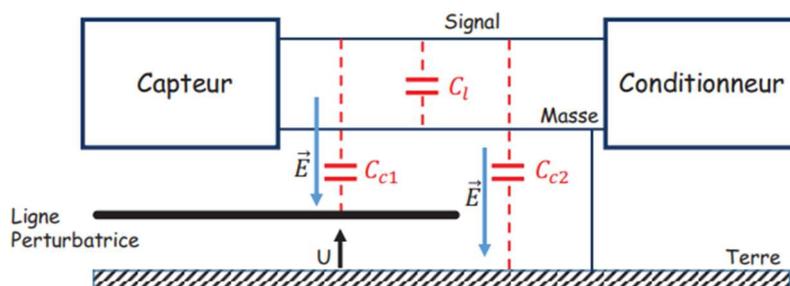


Figure 23 : Couplage par diaphonie capacitive ou couplage par champ électrique

$C_{c1}$ : Couplage entre le signal et la ligne perturbatrice.

$C_{c2}$ : Couplage entre le signal et la terre.

$C_l$ : Couplage entre les lignes.

### II.5.2.1.2 Couplage par diaphonie inductive :

Correspond à une perturbation électromagnétique qui se crée par un champ magnétique variable rayonné par une source qui va venir perturber une autre victime se comportant comme une boucle. Le couplage par diaphonie inductive est caractérisé par l'effet d'une tension parasite variable aux bornes de la victime.

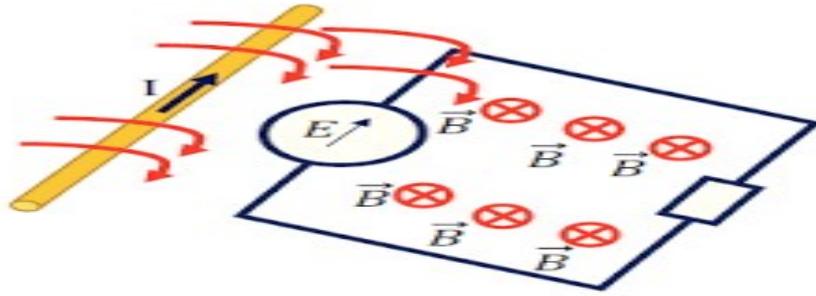


Figure 24 : Couplage par diaphonie inductive.

### II.5.2.2 Couplage champ lointain

Au-delà de la zone de rayonnement en champ proche, la zone de rayonnement dit en champ lointain. Dans cette région, les caractéristiques du champ électromagnétique rayonné ne dépendent que des propriétés du milieu dans lequel le champ se propage, et nous disons que l'on a affaire à un couplage par champ électromagnétique ou par onde plane, donc il faut employer les équations de Maxwell pour calculer l'amplitude des perturbations électromagnétiques. Ce qui signifie que les composantes du champ électromagnétique ne peuvent être séparées.

**II.5.2.2.1 Couplage champ à fil ou champ :** à câble : Lorsqu'un conducteur est soumis à un champ électrique variable, il se crée dans ce conducteur un signal électrique parasite. Le champ électrique variable génère aux bornes du conducteur une tension parasite variable (de même fréquence) qui se superpose au signal utile. Le couplage champ à fil est caractérisé par l'augmentation de l'amplitude du signal utile dans le circuit.

**II.5.2.2.2 Couplage champ à boucle :** c'est un type de perturbation EM qui est dû à l'effet d'un champ magnétique variable dans une boucle. À travers la surface de la boucle constituée par exemple par un conducteur, on observe un champ magnétique variable. Les variations de ce champ induit une force électromotrice.

#### Remarque :

Pour pouvoir solutionner les différentes perturbations dans ces différents modes de couplage on doit nécessairement faire le point sur les systèmes de liaison à la terre d'autant que leurs choix n'est pas neutre vis-à-vis des équipements électroniques, particulièrement lorsqu'ils utilisent des liaisons numériques (bus) pour communiquer.

### II.6 Système de liaison à la terre

Tous les schémas des liaisons à la terre (SLT) sont équivalents pour la protection des personnes et des biens.

Par l'évolution de besoin industriel et tertiaire, il devient important de choisir le bon choix du schéma de liaison à la terre, dans la stricte application des règles de l'art, pour assurer la coexistence "courant forts/courant faible" et la satisfaction de l'exploitant. Les trois types de liaison de terre sont définis par les normes CEI 364 et NF C 15-100 et appelé aussi régime de neutre ils sont pour le but d'assurer la protection contre les surtensions et les perturbations électromagnétiques.

Ces trois schémas ont une même finalité en termes de protection des personnes et des biens : la maîtrise des effets des défauts d'isolement. Ils sont considérés comme équivalents sur le plan de la sécurité des personnes. [4], [5]

#### On définit ces trois types de schémas des liaisons de terre par deux lettres :

- ✓ Le premier est pour le raccordement du neutre du transformateur :
- T pour le raccordement à la terre.
- I pour isoler de la terre
- ✓ La deuxième pour le type de raccordement des masses d'utilisation.
  - pour raccordement directement à la terre.
  - N pour raccorder au neutre à l'origine de l'installation, lequel est raccordé à la terre.

#### La combinaison de ces deux lettres donne trois configurations possibles

- TT «le neutre du transformateur raccordé à la terre et la masse raccordé directement à la terre »
- TN «le neutre du transformateur raccordé à la terre et la masse raccordé au neutre à l'origine de l'installation »
- IT «le neutre du transformateur isolé à la terre et la masse raccordé directement à la terre »

### II.6.1 Classification des régimes de neutre

#### II.6.1.1 Régime de neutre TT

T : Neutre relié à la terre.

T : Masses reliées à la terre

Le régime de distribution TT est le régime employé par EDF pour toute distribution d'énergie publique basse tension.

Le principe de la liaison consiste à relier le neutre à la terre en tête de l'installation BT ainsi que toutes les masses directement à la terre locale. Ainsi dès qu'un d'isolement apparait, il se caractérise par un court-circuit phase-terre qui doit être interrompu, on dit que alors il y a « Coupure au premier défaut »

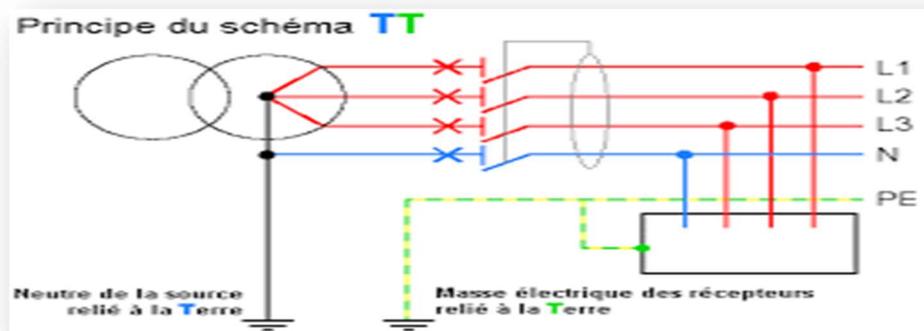


Figure 25 : Schéma TT

### ✓ Les avantages

- Coupure au premier défaut
- Peu de calculs pour la mise en œuvre.
- Ne nécessite aucune personne qualifiée.
- Idéal pour les mauvaises valeurs de prises de terre.
- Extension d'installation simple à réaliser.

### ✓ Les inconvénients

- Pas de continuité de service lors d'un défaut d'isolement.
- Dispositif différentiel parfois coûteux (surtout les Hautes Sensibilités).
- Limité aux installations ayant peu de courant de fuites (phase-terre)

### II.6.1.2 Régime de neutre IT

I : Neutre isolé de la terre.

T : Masses reliées à la terre.

C'est un régime très utilisé dans l'industrie car il assure la meilleure continuité de service.

Le neutre du transformateur est isolé de la terre à travers une grande impédance  $Z_n$  (de 500 à 2500 Ohms).

- Les masses sont reliées à la terre à travers une prise de terre de résistance  $R_u$ . Un Contrôleur Permanent d'Isolement (CPI) mesure le courant de fuite résiduel et signale tout défaut d'isolement trop important (alarme sonore et visuelle). Un limiteur de surtension (ou éclateur) est toujours installé pour écouler à la terre les surtensions atmosphériques. Dans le cas de câbles longs, une protection différentielle doit être posée pour assurer la protection des personnes, car la résistance des câbles limiterait l'existence du courant de court-circuit

Le schéma du régime IT est représenté par la figure suivante

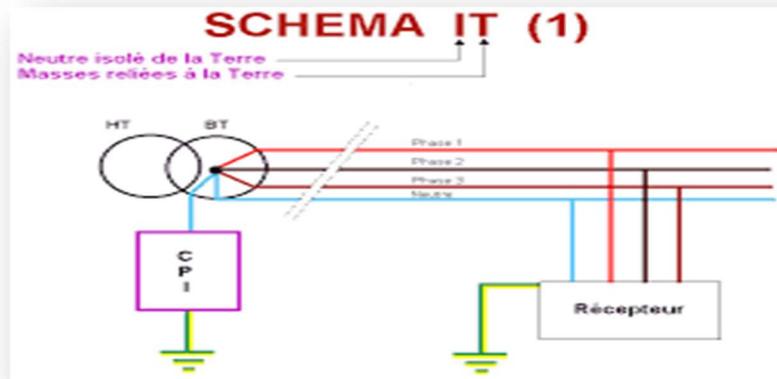


Figure 26 : Schéma IT

### ✓ Les Avantages

- pas de coupure au premier défaut
- Schéma IT utilisé dans les installations de très courte dimensions, et les transformateurs d'isolement dans les ateliers, les salles de bains (prises rasoirs), etc.

### ✓ Les Inconvénients

- nécessité d'avoir un spécialiste en dépannage pour supprimer ce défaut très rapidement, avant l'apparition d'un deuxième défaut qui va déclencher les protections.
- ce schéma oblige la mise en place d'un Contrôleur Permanent d'Isolement (CPI) signalant par alarmes sonores et visuelles tout défaut dans l'installation.

### II.6.1.3 Régime de neutre TN

T : Neutre relié à la terre

N : Masses reliées au neutre.

Ce schéma n'est pas autorisé en installations domestiques, il est réservé aux entreprises propriétaires de leur transformateur.

Les masses sont reliées au conducteur PE ou PEN et mis à la terre en différents endroits de l'installation. Lors d'un défaut d'isolement, la coupure se fait par surintensité ou court-circuit donc par la protection magnétothermique (disjoncteur ou fusibles). Mais alors, la présence de forts courants de défauts entraîne une augmentation des risques d'incendie.

Il existe deux types de schéma TN suivant la disposition du conducteur neutre et du conducteur de protection :

### a) Schéma TN-S

(S = Neutre et PE Séparés)

Dans le TN -S, le conducteur de protection et le conducteur neutre sont reliés uniquement au poste de distribution.

- Le TN - S est obligatoire pour les réseaux ayant des conducteurs avec une section inférieure à 10 mm<sup>2</sup> en Cuivre ou une section inférieure à 16 mm<sup>2</sup> en Aluminium

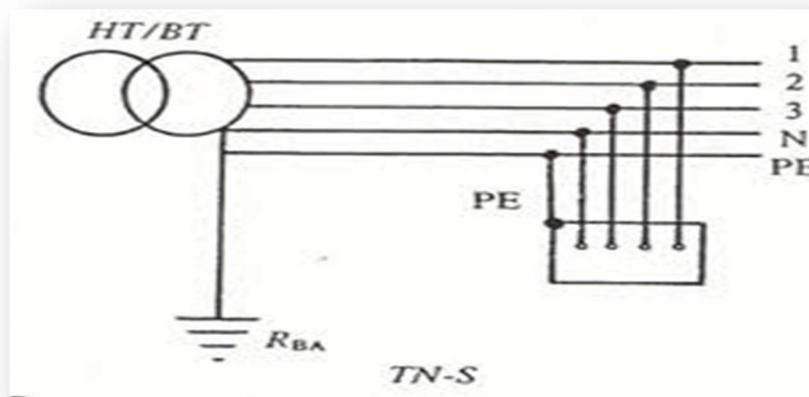


Figure 27 : Schéma TN-S

### b) Schema TN-C:

(C = Neutre et PE Confondus ou Communs).

Conducteur de protection et conducteur neutre combinés en un seul conducteur dans l'ensemble du schéma.

Le conducteur de protection (PE) et le neutre (N) sont confondus du transformateur jusqu'au point de distribution, et ensuite séparés sur les circuits terminaux et section de conducteur < 10 mm<sup>2</sup> en cuivre.

- On peut aussi trouver une résistance qui relie le neutre à la terre, Cela permet de limiter le courant de court-circuit d'une centaine d'ampères. Donc  $I_d$  (Courant de Défaut) sera fonction de la résistance (Si  $R$  élevée....  $I_d$  faible)

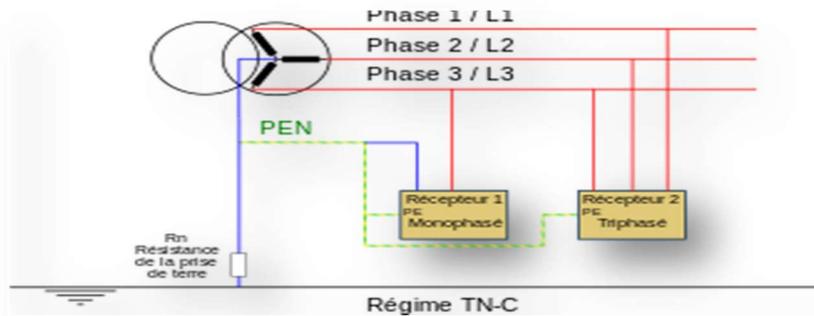


Figure 28 : Schéma TN-C

### ✓ Avantages

- Coupure au premier défaut
- Employé avec succès dans les installations électriques dont les récepteurs ont naturellement des défauts d'isolement très élevés comme les radars, installations de calcul et d'acquisition de données qui utilisent des filtres capacitifs de forte puissance entre chaque phase et la masse.
- Également dans certaines installations très particulières (aéronefs) lorsque l'un des conducteurs est composé de la masse du récepteur, ou lorsque plusieurs réseaux mixtes (tensions ou fréquences différentes, continu et alternatif) cohabitent.

### ✓ Inconvénients

- Les installations doivent être calculées et essayées avec le plus grand soin en ce qui concerne la protection de surintensité de courant (relais électromagnétiques) avant toute mise en service normale.
- Toute modification relative à l'alimentation d'un récepteur donnera lieu à une étude comparable à celle effectuée lors de la mise en service initiale.
- Ces installations alimentent des récepteurs sans protection différentielle; en cas de défaut d'isolement, c'est la protection magnétique qui déclenchera la coupure de l'alimentation électrique.

- Afin de parer à une défaillance des connexions du conducteur de terre depuis l'origine de l'installation jusqu'aux récepteurs terminaux lorsque le réseau est étendu, les schémas TN nécessitent la mise à la terre du conducteur de protection en plusieurs points tout au long de ce réseau.

### II.7 Les SLT et les perturbations Basse Fréquence

Dans ce qui va suivre on s'intéresse précisément aux perturbations générées par les équipements perturbateurs dans les bâtiments alimentés par le réseau 50hz basses fréquences. Et les solutions envisageables. [10]

### II.8 Couplage par impédance commune

Selon le schéma de la figure lorsqu'un défaut d'isolement provoque la circulation d'un courant dans le PE, entre les points de raccordement d'un appareil (1) et de son capteur (2), une chute de tension apparaît entre C et D. Cette tension ( $u$ ) se retrouve entre (1) et (2) et peut perturber la transmission des signaux.

Si, par exemple, le câble est coaxial, la tension imposée à la gaine va se retrouver en mode différentiel dans la liaison ! Ce phénomène existe plus ou moins selon le type de câble employé, il dépend de leur « impédance de transfert » dans le domaine de fréquence considéré.

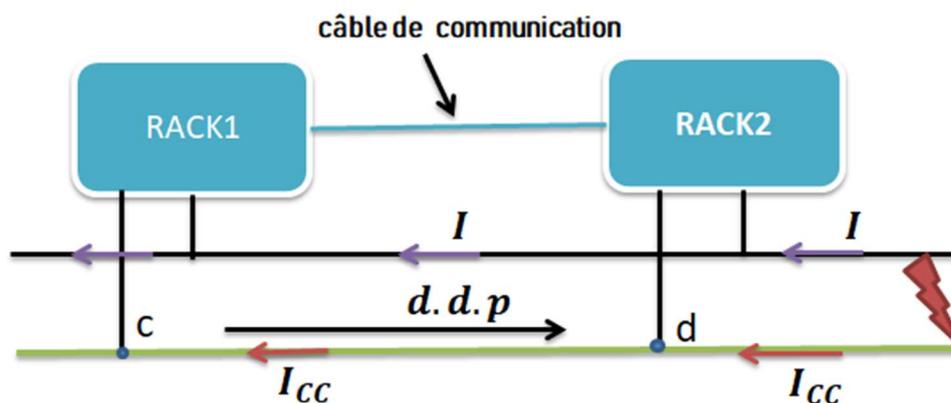


Figure 29 : Couplage par impédance commune

#### II.8.1 Analyse des performances en régime TN

Les courants qui circulent dans le neutre, donc dans le PEN (régime TN-C) font varier fortement la référence de potentiel des différents appareils du SEC. Ce SLT ne convient pas, a fortiori si des courants harmoniques circulent dans le neutre, à moins de séparer totalement le système de masses fonctionnelles du système de terres ; ce qui n'est pas souhaitable pour l'équipotentialités de l'installation.

En TN-S mais aussi en TN-C, les défauts d'isolement entraînent la circulation de courants de court-circuit (à fort  $di/dt$ ) dans le PE qui modifie la référence de potentiel des SEC et peuvent provoquer la circulation de courants perturbateurs dans les structures métalliques du bâtiment (d'où l'intérêt de relier les structures à la borne principale de terre plutôt qu'au réseau de terre, en divers points).

### **II.8.2 Analyse des performances en régime IT**

Au premier défaut, les courants de défaut sont généralement inférieurs à 1 A donc non gênants. En cas de défaut double, si le premier défaut n'a pas été recherché et éliminé, la situation est la même qu'en TN-S.

### **II.8.3 Analyse des performances en régime TT**

Il est bien évident que si les systèmes communicants sont reliés à des prises de terre différentes, les problèmes d'équipotentialités sont aussi importants qu'en TN ; donc la présence d'un système communicant implique une seule prise de terre des utilisations. Dans ce cas, les défauts d'isolement entraînent la circulation, dans le PE, de courants de défaut de 20 A environ, peu perturbateurs (20 kA en TN !).

### **Les solutions**

pour éviter l'apparition de ces perturbations entre appareils communicants, consistent à éviter les SLT qui font circuler un fort courant dans le PE et isoler les 0 Volt électroniques (masses fonctionnelles) des masses électriques (donc transformateur d'isolement si nécessaire) sans oublier que les matériels de traitement de l'information doivent comporter un transformateur d'isolement (CEI 60950) et que la NF C 15-100 § 707.545-2-1 exige que les masses fonctionnelles des matériels de traitement de l'information soient raccordées directement à la borne principale de terre aussi utiliser des matériels de classe II, ce qui supprime les liaisons au PE et éviter les prises de terre multiples (en TT et en IT) s'il y a des risques de courants vagabonds dans la terre.

### **Analyse des perturbations par diaphonie inductive:**

Rappelons que, selon les lois de l'électromagnétisme, tout courant qui circule dans un conducteur génère un champ magnétique. Si ce champ est variable il entraîne une variation de flux et donc, une tension parasite dans une boucle proche. Pour éviter l'apparition de champ magnétique, les conducteurs actifs et le PE doivent être dans

un même câble (les champs rayonnés par les divers conducteurs s'annulent). Rappelons que les courants de défaut d'isolement en TN peuvent être caractérisés par  $di = 50 \text{ kA}$  avec un  $dt = 5 \text{ ms}$ , il est déconseillé de permettre aux structures de participer au circuit de retour ; sinon la somme vectorielle des courants dans le câble n'est pas nulle.

Pour limiter les couplages il faut éviter tout parcours parallèle et proche d'un conducteur à fort  $di/dt$  (descente de paratonnerre, conducteur de protection) et d'une liaison « courant faible » et utiliser pour les courants faibles des liaisons à paires torsadées (les tensions développées dans les boucles successives s'annulent).

## **CHAPITRE III**

### **ELIMINATION DES PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES PAR L'OPTIMISATION DE LA CONCEPTION ELECTRIQUE**

### **III.1 Introduction :**

Ce chapitre est la partie pratique de ce mémoire établie à un important centre technologique situé à ORAN. La majorité des équipements de fonctionnement de son activité est classée sensible est communicante et à faible consommation. En même temp, des équipements à grande consommation utiles à son activité sont classés perturbateurs. Notre étude concerne une zone où se réunis les conditions défavorables aux équipements sensibles mais quand même favorable à l'objet de notre étude.

Cette zone se situe à la terrasse d'un bâtiment de 5 étages ou une station de communication abrite deux racks communiquant les câbles d'alimentation électrique ainsi que les câbles de communication des deux racks sont acheminés au niveau du faux plancher juste au-dessous de ces racks.

La station est alimentée à travers une armoire située au 4<sup>em</sup> étage au-dessous de la station. Cette même armoire alimente aussi des équipements de traitement d'air installés sur la terrasse et qui consomme un courant d'appel d'une valeur moyenne de 4000A efficace triphasé et équilibré, ce courant d'appel est sollicité par le cycle de démarrage avec une fréquence considérable (fonctionnement des compresseurs frigorifique), lorsque la fréquence de cycle d'arrêt démarrage du groupe d'eau glacé peut atteindre peut atteint une fréquence maximal. Trois regroupements de câbles alimentent l'armoire et traversent le local au-dessous de la station au niveau du plafond de sorte que la distance verticale entre les trois phases d'alimentation de l'armoire électrique et le faux plancher de la station est de 0.5 m. la longueur des câbles depuis la source (TGBT) à l'armoire est de 150 m.

Suivant les résultats des deux premiers chapitres nous mettrons en évidence les différentes perturbations diagnostiquées dans cette zone. Puis on va calculer les valeurs des perturbations électromagnétiques dans les cas les plus défavorables.

Finalement, en déduira par simulation et on variant les paramètres clés de la conception, les dispositions optimales à établir pour éliminer les agressions électromagnétique constatées. La figure ci-dessous représente un schéma simplifié de l'installation électrique de centre.

### III.2 Perturbations électromagnétique diagnostiquées dans la zone d'étude :

#### a) Couplage par diaphonie inductive

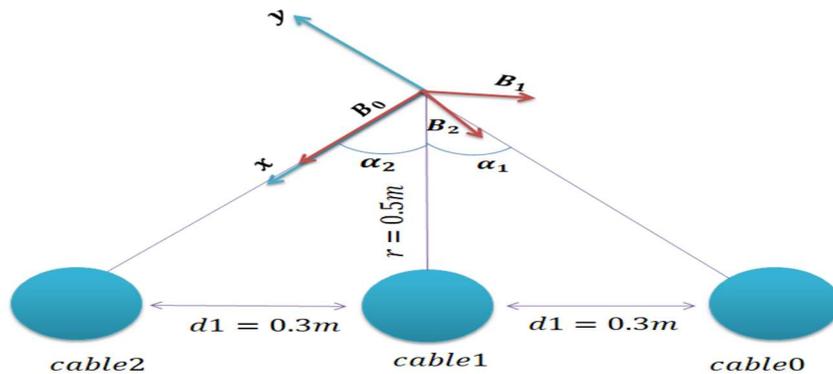


Figure 30 : le câblage de l'installation électrique

Par projection sur l'axe des x et de y on obtient

$$B_x = B_0 + B_1 \cos \alpha_1 + B_2 \cos \alpha_2$$

$$B_y = B_1 \sin \alpha_1 + B_2 \sin \alpha_2$$

On suppose  $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$  est le point défavorable ou laquelle le champ B est atteint leur valeur maximal ou on peut visualiser leur effet sur les équipements. Alors

$$B_x = B_0 + B_1 \cos \alpha + B_2 \cos \alpha$$

$$B_y = B_1 \sin \alpha + B_2 \sin \alpha$$

Dans le chapitre 1 on a trouvé que :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi r} [2\sin \theta] \cdot \vec{e}_\theta$$

On remplace  $B_x, B_y$  on trouve :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi r} [2\sin \theta] \cdot \vec{e}_\theta$$

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot I_0}{4\pi r} [2\sin \theta] + \frac{\mu_0 \cdot I_1}{4\pi r'} [2\sin \theta] * \cos \alpha + \frac{\mu_0 \cdot I_2}{4\pi r'} [2\sin \theta] * \cos \alpha$$

### Chapitre III : Élimination des perturbations électromagnétiques par l'optimisation de la conception électrique.

$$B_y = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi r'} [2 \sin \theta] * \sin \alpha + \frac{\mu_0 I_2}{4\pi r'} [2 \sin \theta] \sin \alpha$$

$$\tan \alpha = \frac{d_1}{r} = \frac{30 \cdot 10^{-2}}{0.5} = 0.6 \text{ donc } \alpha = 30.96$$

$$\tan \theta = \frac{d}{r} = \frac{2.5}{0.5} = 5 \text{ donc } \theta = 78.69$$

On a  $I = I_0 \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi)$

À  $t=0$

$$I_0 = 900\sqrt{2} = 1272.79 \text{ A}$$

$$I_1 = 900\sqrt{2} * \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -636.39$$

$$I_2 = 900\sqrt{2} * \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) = -636.39 \text{ A}$$

$$r = 0.5 \text{ m}$$

$$r' = \sqrt{0.50^2 + 0.3^2} = 0.58 \text{ m}$$

On remplace dans  $B_x$  et  $B_y$ , on obtient

➤  $B_x =$

$$\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 424.26}{4\pi \cdot 0.5} [2 \sin 78,69] - \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (-21.13)}{4\pi \cdot 0,5} [2 \sin 78,69] \cdot \cos 30,96 - \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (-212.13)}{4\pi \cdot 0,5} [2 \sin 78,69] \cos 30,96$$

$$B_x = 1.285 \cdot 10^{-6} \text{ T} = 1.285 \mu\text{T}$$

➤  $B_y = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 426,36}{4\pi \cdot 0,58} [2 \sin 78,69] * \sin 30,96 + \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 428,45}{4\pi \cdot 0,58} [2 \sin 78,69] \sin 30,96$

$$B_y = -1.645 \cdot 10^{-5} \text{ T} = -16.45 \mu\text{T}$$

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \text{ Donc } 1.65 \cdot 10^{-5} \text{ T} = 16.5 \mu\text{T}$$

$$e = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{B \cdot S}{dt}$$

$$dt = \frac{T}{4} = \frac{1}{\frac{50}{4}} = \frac{0.02}{4} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$\text{Alors } e = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{B \cdot S}{dt} = \frac{11880}{5 \cdot 10^{-3}} = 2376 \cdot 10^3 \text{ V}$$

**b) Couplage par impédance commune en mode différentiel :**

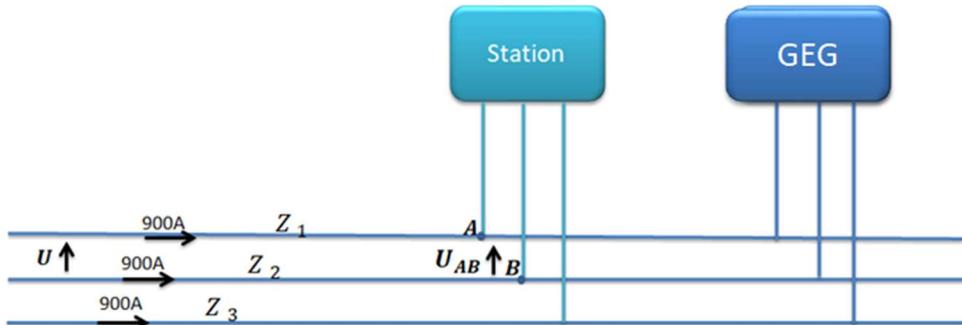


Figure 31 : couplage par impédance commune en mode différentiel.

On a  $U = 400V$  ,  $I = 900A$   $Z_T = Z_1 + Z_2$  avec  $Z_1 = Z_2$

$$U_{AB} = U + (I * Z_T)$$

$$U_{AB} = U + (I * Z_T)$$

$$Z = r$$

$$Z = r = \frac{\rho L}{s} = \frac{1.75 * 10^{-8} * 150}{240 * 10^{-6}} = 0.011 \Omega$$

$$U_{AB} = 400 + (4000 * 2 * 0.011)$$

$$U_{AB} = 312 V$$

**Commentaire :**

Cette chute de tension peut causer des dégâts suivant la susceptibilité de l'équipement. Au niveau de la zone d'étude, les équipements sensibles sont protégés par un UPS qui assure la stabilité de la tension d'alimentation mais la plage de tension acceptable pour le bon fonctionnement d'UPS est entre 470V et 310V. Notant qu'on a une fréquence importante du courant d'appel qui induit un fonctionnement aux limites de l'acceptable pour UPS

c) Couplage per impédance commune en mode commun :

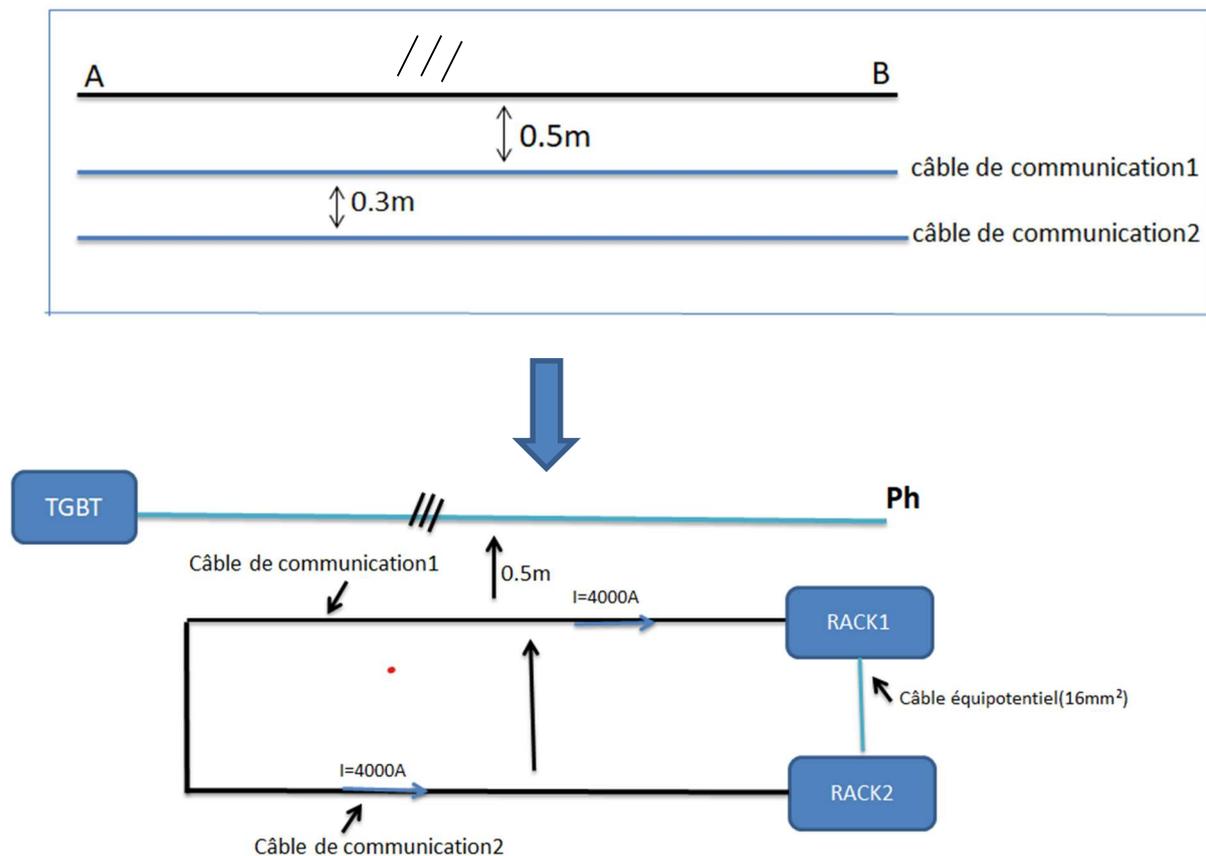


Figure 32 : couplage par impédance commune en mode commun

$$\varphi = B.S$$

$$\varphi = 1.65 \cdot 10^{-5} * (3 * 240)$$

$$\varphi = 16.5 * (3 * 240) = 0.012Wb$$

$$e = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{B.S}{dt}$$

$$dt = \frac{T}{4} = \frac{1}{\frac{50}{4}} = \frac{0.02}{4} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$\text{Alors } e = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{B.S}{dt} = \frac{0.012}{5 \cdot 10^{-3}} = 2.4V$$

Cette tension est destructrice pour les racks de la station de ce fait il est établi au niveau de la station un seul point de raccordement pour éliminer les d.d.p entre les câbles de mise à la terre.

### III.3 Application numérique et résultats

#### III.3.1 1ere manipulation : Variation de champ magnétique en fonction de distance r

a) On tracer sur Simulink ce blocs de notre simulation

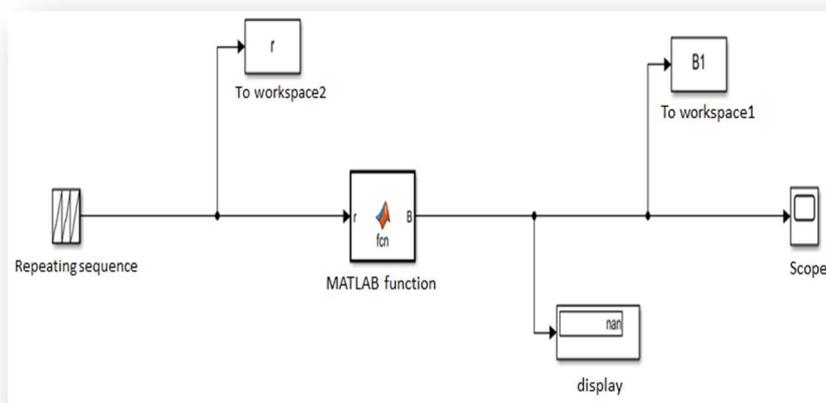


Figure 33 : simulation de champ magnétique en fonction de r

b) Après avoir simulé sur Simulink MATLAB, on obtient cette figure :

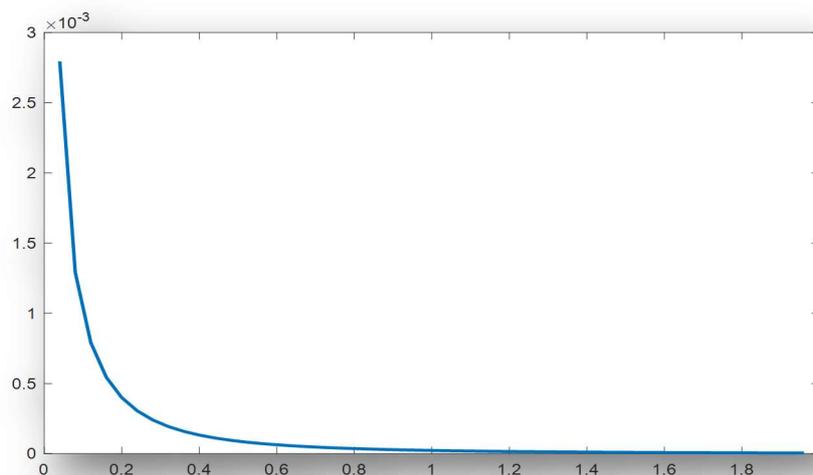


Figure 34 : variation de champ magnétique en fonction de la distance r

**Commentaire :**

Cette figure illustre comment le champ magnétique varie en fonction de la distance r entre les câbles électriques et le point considéré pour l'étude.

On remarque que la variation de champ magnétique est décroissante par rapport à la distance r. lorsque la distance r augmente, le champ magnétique devient plus faible.

Cela signifie que, la relation entre le champ magnétique et la variation de r est inversement proportionnelle.

c) **On varie les valeurs de distance r et on discute sur la variation de champ magnétique :**

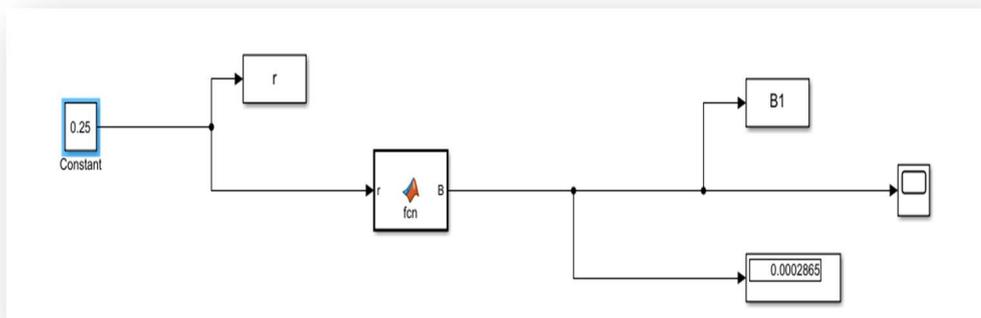


Figure 35 : variation de distance r et visualisation valeur de champ magnétique

La valeur de distance r(m)	Valeur de champ magnétique(T)
0.25	$2865. 10^{-7}$
0.5	$8, 88. 10^{-5}$
0.75	$4, 09. 10^{-5}$
1	$2, 28. 10^{-5}$
2	$4, 92. 10^{-6}$

**Tableau III.1 : variation de champ magnétique en fonction de distance r**

**Discussion :**

On remarque une forte décroissance de champ magnétique par rapport à la distance, cela explique que les distances normaliser entre les câbles de puissances et les câbles de communications ne dépassent pas 30cm et cela suffit pour protéger les câbles de communication. On revanche si cette distance n'est pas respecter on peut voir qu'une petite approche vers la source peut considérablement augmenter le champ perturbateur et ses effets.

**III.4 Deuxième manipulation : Simulation de champ magnétique en fonction de distance entre câble :**

a) On tracer sur Simulink ce blocs de notre simulation :

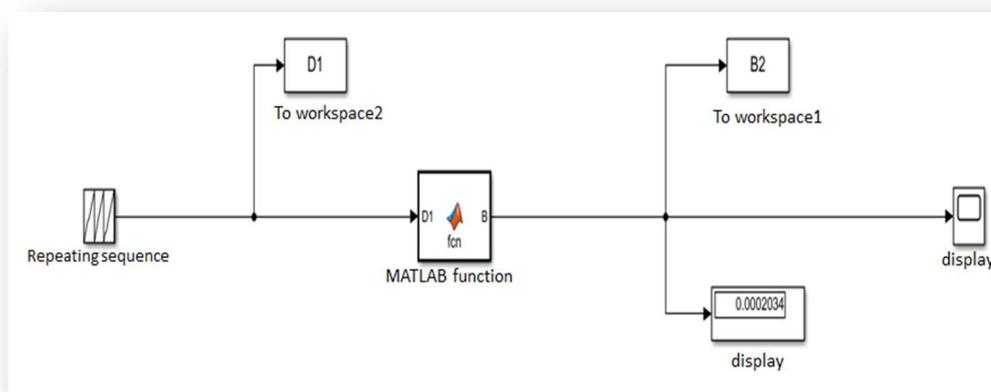


Figure 36 : variation de champ magnétique en fonction de la distance D1.

b) Après avoir simulé sur Simulink MATLAB, on obtient cette figure :

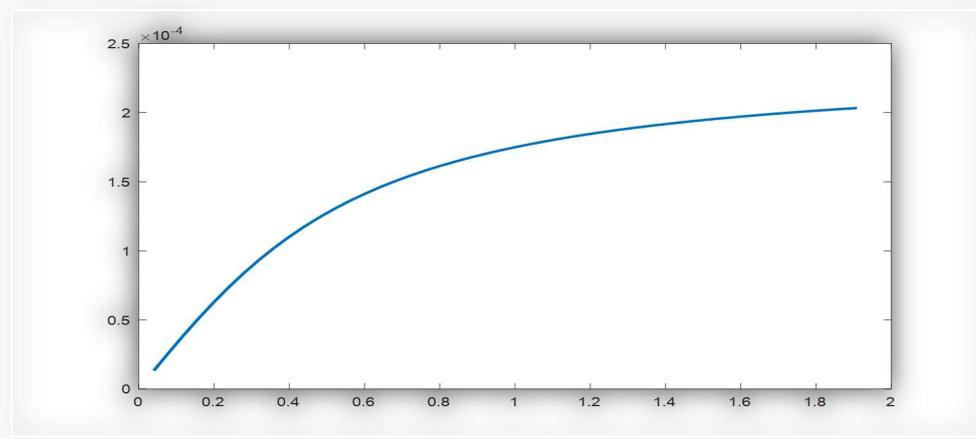


Figure 37 : variation de champ magnétique en fonction de la distance D.

### Commentaire :

La figure illustre comment le champ magnétique varie en fonction de la distance  $D1$  entre les câbles. On observe clairement une allure croissante, ce qui indique une relation proportionnel entre le champ magnétique et la distance entre les câbles. En d'autres termes, lorsque la distance entre les câbles augmente, le champ magnétique devient plus grand. Ainsi, une augmentation de la distance  $D1$  conduit à une augmentation correspondante du champ magnétique.

On varie les valeurs de distance  $r$  et on discute sur la variation de champ magnétique :

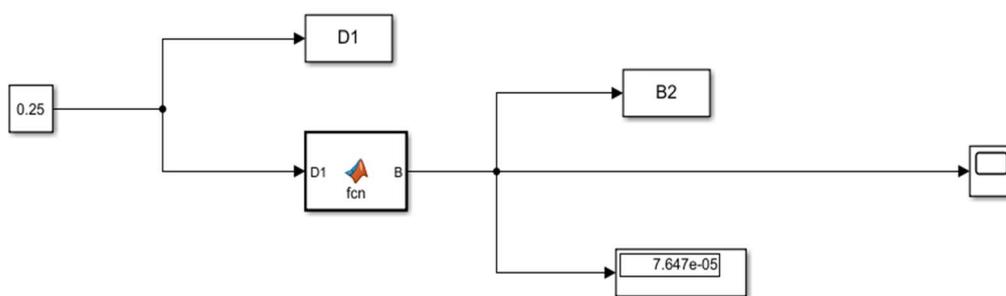


Figure 38 : variation de distance  $D1$  et visualisation valeur de champ magnétique

## Chapitre III : Élimination des perturbations électromagnétiques par l'optimisation de la conception électrique.

La valeur de distance D1(m)	Valeur de champ magnétique(T)
0.25	$7.65 \cdot 10^{-5}$
0.5	$1247 \cdot 10^{-7}$
0.75	$157 \cdot 10^{-6}$
1	$175 \cdot 10^{-6}$
2	$2048 \cdot 10^{-7}$

Tableau 3.2 : variation de champ magnétique en fonction de distance D1

### Discussion :

La valeur de champ rayonné au niveau de faux plancher peut être éliminé juste on élimine la distance entre les câbles cela implique qu'une installation peut être agressive n'ont pas à cause de sa contenance on équipements perturbateur mais juste par une pose de câble subtile.

### III.5 Troisième manipulation : Simulation de longueur de câble

#### a) On tracer sur Simulink ce bloque de notre simulation :

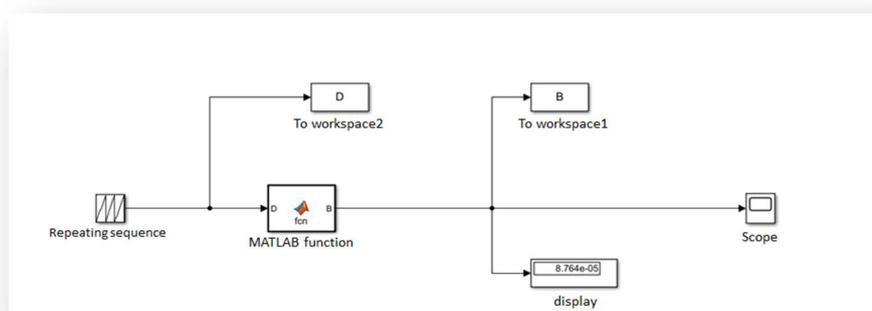


Figure 39 : variation de champ magnétique en fonction de la distance D.

Après avoir simulé sur Simulink MATLEB, on obtient cette figure :

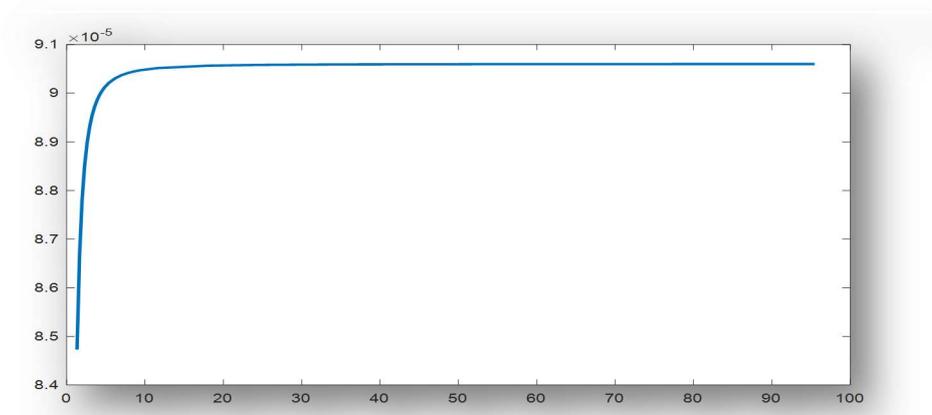


Figure 40 : variation de champ magnétique en fonction de la distance D.

### Commentaire

La figure présente la variation du champ magnétique en fonction de la longueur du câble. On constate que lorsque la longueur du câble augmente, le champ magnétique créé par ce câble augmente également jusqu'à une distance proche puis il se stabilise à une valeur fixe.

### b) On varie les valeurs de distance r et on discute sur la variation de champ magnétique :

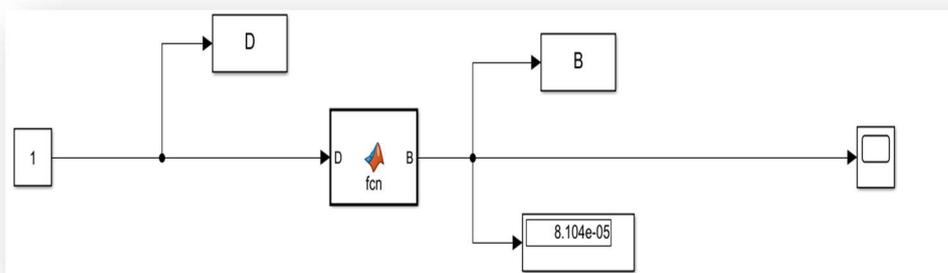


Figure 41 : variation de distance D et visualisation la valeur de champ magnétique

### Chapitre III : Élimination des perturbations électromagnétiques par l'optimisation de la conception électrique.

---

---

La valeur de distance D(m)	Valeur de champ magnétique(T)
1	$8,104.10^{-5}$
3	$8,937.10^{-5}$
5	$9.05.10^{-5}$
10	$9,05.10^{-5}$
100	$9,06.10^{-5}$

**Tableau 3.3 : variation de champ magnétique en fonction de distance D.**

#### **Discussion :**

Pour un équipement sensible qui peut être considéré comme ponctuel mitoyen à une installation électrique de puissance, la longueur des câbles qui achemine le courant de puissance n'a pas d'effets sur l'intensité de la perturbation, et ce n'est pas le cas pour une installation sensible à grand dimensions.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

---

Ce travail a mis en évidence une face cachée de l'électricité qui échappe malheureusement même aux professionnels de la construction du bâtiment ou l'électricité est considérée comme un corps de construction secondaire permettant un standard de construction électrique officieux et pénalisant pour les équipements sensibles.

Nous avons donc établi la relation entre les équipements perturbateurs et leurs victimes par différents modes de couplage pour nous permettre ensuite de diagnostiquer une installation prise comme modèle pratique de notre travail qu'on l'a nommée zone d'étude.

En application des résultats du deuxième chapitre on a établi trois types de perturbation relative à la conception électrique actuelle de la zone d'étude et les solutions envisageables.

- La première perturbation en mode diaphonie inductive présente plusieurs variantes en fonction de la fréquence et de l'intensité du courant. D'après nos calculs le niveau de perturbation ne constitue pas un risque de dégradation pour les équipements sensibles mais peut compromettre la qualité de leurs fonctionnements. Cela dit à 0,5m et suivant le résultat de la première simulation, on peut définir le point de 0,5m comme limite pour le bon fonctionnement de la station. Au-dessous de 0,5m le niveau de la perturbation peut atteindre un degré inquiétant. Enfin, Pour garantir un fonctionnement de qualité on peut envisager l'éloignement des câbles de puissance Au-dessus de 0,5m. puisque l'installation est fonctionnelle cette solution peut être pénalisante côté génie civil. Suivant la deuxième simulation le rapprochement entre les phases est une solution plus simple à envisager
- La deuxième perturbation en mode différentiel montre que les câbles d'alimentation de la station forment une impédance commune avec les équipements de traitement d'air ce qui entraîne une chute de tension considérable aux bornes de l'alimentation de la station. Cette perturbation doit être éliminée par une alimentation électrique dédiée à la station.
- La troisième éventuelle perturbation en mode commun suite à un défaut phase terre au niveau des équipements de traitement d'air induira de forte d.d.p entre les masses des deux racks. Dans ce cas la dégradation est inévitable. Cette d.d.p peut être éliminée en appliquant un point de raccordement en étoile unique pour tous les câbles de mise à la terre de la station.

## Référence Bibliographie

## Références bibliographie

---

- [1] : Matthieu Rigaut, Électromagnétisme, lycée Fabert, 28 déc. 2013, pédagogique
- [2] : sidi Mohammed Remaoun, polycopié d'Électromagnétisme, université des sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed Boudiaf », 2014-2015, pédagogique
- [3] M. Walid Adli, électricité et Magnétisme, école Nationale Polytechnique d'Oran (MA), 2016/2017 pédagogique
- [4] Michel Fioc, l'électromagnétisme, LU2PY021, 2019/2020, pédagogique.
- [5] Jean Le Hir, théorie électromagnétique de maxwell, lycée de kerichen Brest, 3septembre 2005, pédagogique
- [6] site internet, [https://www.youtube.com/watch?v=Hu\\_2KusaD1k](https://www.youtube.com/watch?v=Hu_2KusaD1k)
- [7] : BENBIGA Ahmed Caractérisation CEM dédiée aux perturbations d'origine naturelle en vue d'un meilleur dimensionnement des réseaux de puissance, thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf 2021 / 2022
- [8] : Mlle. SLIMANI Helima, thèse de doctorat, « Estimation des perturbations conduites et rayonnées dans les câbles de puissance» p6 université de Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès 28juin 2016
- [9] : AMIROUCHE Nadia « La compatibilité électromagnétique en électronique» Université MOULOUD MAMMERI de TIZI OUZOU 2017/2018
- [10] : BOUABA Sabrina, MAKOUDI Hamid, MEZAGUER Fatiha étude de la compatibilité électromagnétique des circuits électronique université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou Faculté de Génie électrique et d'informatique 2012.