



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Batna 2

Faculté de Technologie

Département d'Électrotechnique

THÈSE

En vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT ès SCIENCES en ELECTROTECHNIQUE

OPTION

Commande Électrique

Présentée Par

BELKHIRI YAMINA

*Chargée de Cours à l'Université de Batna
Magister en Electrotechnique de l'Université de Batna
Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université de Batna*

Thème

**Etudes des Phénomènes d'Induction Electromagnétiques Liés au
Voisinage des Ouvrages THT de Transport de l'Electricité**

Soutenue le 22-02-2018 devant le jury composé de :

Dr. CHIKHI Khaled	Prof.	Université Batna 2	Président
Dr. FETHA Cherif	Prof.	Université Batna 2	Rapporteur
Dr. BAHY Tahar	Prof.	Université Annaba	Examineur
Dr. LABED Djamel	Prof.	Université Constantine	Examineur
Dr. KHOHEMANE Lakhdar	Prof.	Université Skikda	Examineur
Dr. DEKHINET Abdelkamel	MCA.	Université Batna 2	Examineur

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur FETHA Cherif, Professeur à l'université Batna 2, pour avoir accepté la direction scientifique de ces travaux de recherche. Je lui exprime toute ma gratitude pour ses conseils ainsi que la confiance exprimée dans la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur Yousfi Nabil, Directeur du Transport de l'Électricité à la Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport de l'Électricité « GRTE Spa », pour avoir proposé ce sujet en me faisant ainsi profiter de ses grandes compétences dans le domaine du transport de l'énergie électrique et pour son aide et ses conseils dans l'élaboration de ce travail.

Je remercie vivement Monsieur CHIKHI Khaled, Professeur à l'université Batna 2 et doyen de la Faculté de technologie, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Aussi, j'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail, je cite messieurs :

BAHI Tahar	Professeur à l'université Badji Mokhtar, Annaba
LABED Djamel	Professeur à l'université de Constantine
KHOHEMANE Lakhdar	Professeur à l'université 20 Aout 1955, Skikda
DEKHINET Abdelkamel	Maître de Conférence à l'Université Batna 2

Sommaire

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Listes des Symboles et Abréviations

Introduction générale 1-5

Chapitre I Présentation des Champs Magnétiques et des Modèles Electromagnétiques

Introduction	06
I.1 champ électromagnétique	06
I.1.1 Champ électrique	07
I.1.2 Champ magnétique	08
I.2 Topographie du champ magnétique	08
I.3 Spectre électromagnétique	09
I.4 Sources de champs électromagnétiques	12
I.4.1 Sources naturelles	12
I.4.1.1 Les aimants	12
I.4.1.2 Champs magnétique terrestre	12
I.4.1.3 Champs magnétique solaire	14
I.4.1.4 Les Orages (éclairs)	14
I.4.2 Sources artificielles	15
I.4.2.1 Le courant électrique	15
I.4.2.2 Solénoïde	18
I.4.2.3 Champ magnétique crée par une ligne à haute tension	19
I.4.2.4 Trains, Métros et Tramways	20
I.4.2.5 Appareilles électroménagers	20
I.5 Mesure de champ magnétique	21
I.6 Caractéristique du champ magnétique électrique	22
I.7 Phénomènes électromagnétiques	23
I.7.1 Modèles électromagnétiques	23
I.7.1.1 Modèles électrostatique	23
I.7.1.2 Modèle électrocinétique	24
I.7.1.3 Modèle magnétostatique scalaire	25
I.7.1.4 Modèle magnétostatique vectoriel	25
I.7.1.5 Modèle magnétodynamique	26
Conclusion	28

Chapitre II Effets biologiques des champs Electromagnétiques

Introduction	29
II.1 Champs électromagnétiques et santé publique	32
II.2 Exposition aux champs électromagnétiques	32

II.2.1 Electrohypersensibilité	34
II.2.2 Maladies Neurodégénératives	34
II.2.3 Leucémies	34
II.3 Courants parasites et santé des animaux d'élevage	35
II.4 Réglementation sur les champs électromagnétiques	38
II.5 Communication du risque du aux champs électromagnétiques avec la population	40
II.5.1 Règles élémentaires de l'évaluation du risque	40
Conclusion	41

Chapitre III Lignes de Transport de l'Electricité

Introduction	43
III.1 Les Lignes électriques aériennes	44
III.1.1 Lignes de grand transport	45
III.1.2 Lignes d'interconnexion	45
III.1.3 Lignes de répartition	45
III.1.4 Lignes de distribution	45
III.2 Eléments constitutifs des lignes aériennes	45
III.2.1 Pylônes	47
III.2.1.1 Principaux termes et définitions	47
III.2.1.2 Familles des supports	47
III.2.1.2.1 La disposition de leur armement	49
III.2.1.2.2 Le type de fondation	51
III.2.1.3 Matériaux	52
III.2.1.4 Dimensionnement mécanique et charges appliquées au support	52
III.2.1.4.1 Charges permanentes du support	52
III.2.1.4.2 Charges dues aux conducteurs et aux câbles de garde	52
III.2.1.4.3 Charges climatiques sur le support	52
III.2.1.4.4 Charges apparaissant lors de la construction, l'entretien et l'exploitation de la ligne	52
III.2.1.5 Dimensionnement géométrique	53
III.2.1.5.1 Durabilité	53
III.2.2 Conducteurs	54
III.2.2.1 Rayon moyen géométrique des conducteurs toronnés	56
III.2.2.2 Rayon moyen géométrique des conducteurs en faisceaux	56
III.2.3 Isolateurs	57
III.2.4 Câbles de garde	57
III.2.5 Association conducteurs - câbles de garde	58

III.2.5.1 Exemples d'associations conducteurs – câbles de garde	58
III.2.5.1.1 Lignes 60-90 kV équipées de câbles Almélec 228 mm ² ou 366 mm ² ou de leurs équivalents électriques	59
III.2.5.1.2 Lignes 60-90 kV équipées d'un conducteur Almélec 570 mm ² ou de ses équivalents électriques	59
III.2.5.1.3 Lignes 220 kV équipées d'un conducteur Almélec 366 mm ² ou de ses équivalents électriques	60
III.2.5.1.4 Lignes 220 kV équipées d'un conducteur Almélec 570 mm ² ou de ses équivalents électrique	60
III.2.5.1.5 Lignes 220 kV ou 400 kV équipées d'un faisceau de deux câbles Almélec 570 mm ² ou de ses équivalents électriques	61
III.2.5.1.6 Lignes 400 kV équipées d'un faisceau de trois ou quatre câbles Almélec 570 mm ² ou de leurs équivalents	61
III.3 Avantages et inconvénients des lignes électriques aériennes	61
III.3.1 Avantages	61
III.3.2 Inconvénients	62
III.4 Tensions de fonctionnement	62
Conclusion	62

Chapitre IV Phénomènes liés aux voisinages des lignes HT/THT

Introduction	64
IV.1 Phénomène inductif	65
IV.2 Couplage capacitif	66
IV.2.1 Couplage capacitif en régime permanent entre ligne HT/THT et un ouvrage linéaire.	66
IV.2.2 Fils métalliques utilisés pour le palissage des vignes	67
IV.2.3 Mesures de prévention contre les décharges électrostatiques	67
IV.3 Phénomène de conduction à proximité d'un pylône en défaut	68
IV.4 Contraintes de proximité - induction magnétique et capacitive – conduction	68
IV.4.1 Proximité avec des réseaux MT/BT	68
IV.4.2 Proximité avec les réseaux de télécommunications	69
IV.4.2.1 Limites admissibles par CCITT	69
IV.4.2.2 Dispositions à adopter pour protéger les circuits de Télécommunications	70
IV.4.3 Proximité des ouvrages d'exploitation agricole et d'élevages	71
IV.4.4 Proximité des ouvrages linéaires de type clôture, glissière d'autoroutes	73
IV.4.5 Proximité des canalisations de transport de fluide	73
IV.4.5.1 Cas particulier des canalisations de transport d'eau	74
IV.4.6 Prévention des risques électriques vis-à-vis des personnes	74
IV.4.6.1 Zone de contrainte	75
IV.4.6.2 Zone d'évolution	75
IV.4.7 Prévention des risques électriques vis-à-vis des travailleurs	75
IV.4.8 Prévention des risques électriques vis-à-vis des équipements des tiers	77

IV.4.8.1 Transposition de phases (Permutation des conducteurs)	77
IV.5 Effet de peau	78
IV.6 Effet couronne bruits radioélectriques et acoustiques	79
VI.6.1 Perturbation causées par l'effet de Couronne	80
IV.6.1.1 Perturbations radioélectriques	80
IV.6.1.2 Bruits acoustiques	81
IV.6.1.3 Dégagement gazeux	81
IV.6.1.4 Vibrations mécaniques	82
IV.6.1.5 Pertes par effet Couronne	83
IV.6.1.6 Influence de la pluie	83
VI.6.2 Réduction de l'effet Couronne sur les lignes électriques	84
VI.6.2.1 Utilisation de conducteurs de gros diamètre	84
VI.6.2.2 Utilisation de faisceau de conducteurs	84
Conclusion	85

Chapitre V Simulation et mesure des champs magnétiques au voisinage des lignes HT/THT

Introduction	86
V.1 Simulation sous COMSOL	89
V.1.1 Présentation du logiciel	89
V.1.2 Etapes du processus de simulation sous COMSOL	89
V.2 Champ magnétique généré par les lignes de transport de l'électricité	90
V.3 Modèle électromagnétique	90
V.4 Modèles géométriques de la ligne 60 kV	92
V.4.1 Paramètres de la ligne triphasée 60 kV	94
V.4.2 Résultats de simulation pour la ligne triphasée simple terre 60 kV	94
V.5 Modèles géométriques de la ligne triphasée simple terre 220 kv	96
V.5.1 Paramètres de la ligne 220 kV	98
V.5.2 Résultats de simulation pour la ligne triphasée simple terre 220 kV	98
V.6 Modèles géométriques de la ligne 220 kV exploitée à pleine Charge	101
V.6.1 Paramètres de la ligne 220 kV exploité à pleine charge	102
V.6.2 Résultats de simulation pour la ligne 220 kV exploité à pleine charge	102
V.6.2.1 ligne triphasée 220 kV simple terre	102
V.6.2.2 ligne triphasée 220 kV double terre	107
V.7 Modèle géométrique de la ligne simple terre 400 kV SALEH Bey- Bir Ghalou	113
V.7.1 Paramètres de la ligne 400 kV	115
V.7.2 Résultats de simulation pour la ligne triphasée simple terre 400 kV OUED EL ATHMANIA- SALEH BEY	115
Conclusion	117
Conclusion générale	119

ANNEXES

Bibliographie

Liste des figures

Chapitre I Présentation des Champs Magnétiques et des Modèles Electromagnétiques

Figure I.1 Ligne de champ magnétique	9
Figure I.2 Eléments de limaille s'alignent le long des lignes de champ	9
Figure I.3 Décomposition du spectre électromagnétique avec quelques applications	10
Figure I.4 Aimant naturel	12
Figure I.5 Champ magnétique terrestre	13
Figure I.6 Champ magnétique solaire	14
Figure I.7 Les Orages	15
Figure I.8 Lignes de champ magnétique d'un fil rectiligne parcouru par un courant	17
Figure I.9 Lignes de champs créés par un solénoïde	18

Chapitre II Les Effets biologiques des champs Electromagnétiques

Figure II.1 Vivre à proximité des lignes très hautes tension	30
Figure II.2 Exposition à des champs électromagnétiques	33
Figure II.3 (a, b) Exposition des animaux aux champs magnétiques	36
Figure II.4 Evaluer, interpréter et édicter des règlements concernant les risques associés aux CEM	41

Chapitre III Lignes de Transport de l'Electricité

Figure III.1 Eléments constitutifs des lignes électriques aériennes	46
Figure III.2 Types de supports à phases étagées	49
Figure III.3 Pylônes ou portiques à armement nappe ou nappe-voute	50
Figure III.4 Configurations typiques des pylônes pour les lignes HT/THT	50
Figure III.5.1 Fondation mono-pode	51
Figure III.5.2 Fondation bipode	51
Figure III.6 Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite l'âme	54
Figure III.7 Conducteur en âme d'acier	55
Figure III.8 Conducteurs toronnés	56

Chapitre IV Phénomènes liés aux voisinages des lignes HT/THT

Figure VI.1 Couplage Inductif à proximité des ouvrages HT/THT	65
Figure IV.2 Couplage Capacitif à proximité des ouvrages HT/THT	66
Figure IV.3 Couplage capacitif en régime permanent avec un ouvrage linéaire	67
Figure IV.4 Distance minimale de séparation	71
Figure IV.5 Distances d'approches dans une exploitation agricole	72
Figure IV.6 Proximité des canalisations de transport de fluide	74
Figure IV.7 ligne consignée (hors tension) objet des travaux subit une induction électromagnétique de la part d'une autres ligne HT/THT	76
Figure IV.8 Transposition de phases	77
Figure IV.9 Effet de peau	78
Figure IV.10 Effet de couronne avec présence de petites saillies à la surface des conducteurs	80
Figure IV.11 Influence des gaz sur les isolateurs	82
Figure IV.12 Schéma explicatif du phénomène de vibration des conducteurs	82
Figure IV.13 Emission des charges positives et négatives	82
Figure IV.14 Pointes d'eau sur la surface d'un conducteur	83

Chapitre V Simulation et mesure des champs magnétiques au voisinage des lignes HT/THT

Figure V.1 Réseau 220 kV autour de la ville d'ORAN	87
Figure V.2 Réseau National 400 kV	88
Figure V.3 Lignes de champ magnétique d'un fil rectiligne infini parcouru par un courant I	90
Figure V.4 Courbe de charge Nationale pour la journée du 12/03/2015	91
Figure V.5 Courbe de charge Nationale pour la journée du 17/03/2015	92
Figure V.6 Ligne 60 kV disposition horizontale	92
Figure V.7 Ligne 60 kV HASSI AMER – PETIT LAC	92
Figure V.8 Ligne 60 kV disposition verticale	93
Figure V.9 Ligne 60 kV PETIT LAC- TRAMWAY	93
Figure V.10 Ligne 60 kV disposition triangulaire	93
Figure V.11 Ligne 60 kV PETIT LAC- SENIA	94
Figure V.12 Densité de flux magnétique pour la ligne 60 kV disposition horizontale	95
Figure V.13 Densité de flux magnétique pour la ligne 60 kV disposition verticale	95
Figure V.14 Densité de flux magnétique pour la ligne 60 kV disposition triangle	95
Figure V.15 Ligne 220 kV, disposition verticale avec un conducteur par phase	96
Figure V.16 Ligne 220 kV un seul conducteur par phase HASSI AMER – PETIT LAC	97
Figure V.17 Ligne 220 kV disposition verticale avec deux conducteurs par phase	97
Figure V.18 Ligne 220 kV deux conducteurs par phase HASSI AMER – KAHRAMA	97
Figure V.19 Induction magnétique pour la ligne 220 kV – 50 Hz $S = 570 \text{ mm}^2$	99
Figure V.20 Induction magnétique pour la ligne 220 kV – 50 Hz $S = 288 \text{ mm}^2$	99
Figure V.21 Induction magnétique pour la ligne 220 kV $S = 2 \times 288 \text{ mm}^2$	99
Figure V.22 Ligne 220 kV simple terne	101
Figure V.23 Ligne 220 kV double terne	101
Figure V.24 Densité de flux magnétique pour un seul conducteur de phase	103
Figure V.25 Induction magnétique un seul conducteur par phase $S = 570 \text{ mm}^2$	103
Figure V.26 Induction magnétique en 3D un seul conducteur par phase	103
Figure V.27 Densité de flux magnétique pour la ligne 220 kV en faisceau $S=2 \times 570 \text{ mm}^2$	104
Figure V.28 Induction magnétique pour la ligne 220kV en faisceau $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$	104
Figure V.29 Induction magnétique en 3D pour la ligne 220kV en faisceau $S=2 \times 570 \text{ mm}^2$	104
Figure V.30 Induction magnétique pour la ligne 220kV horizontale $S = 570 \text{ mm}^2$	105
Figure V.31 Densité de flux magnétique pour la ligne 220 kV horizontal $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$	105
Figure V.32 Densité de flux magnétique pour un seul conducteur équivalent de phase	105
Figure V.33 Induction magnétique pour la ligne 220kV en faisceau $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$	106
Figure V.34 Densité de flux magnétique pour un seul conducteur de phase	107
Figure V.35 Induction magnétique pour la ligne 220kV $S = 570 \text{ mm}^2$	108
Figure V.36 Densité de flux magnétique pour la ligne 220kV en faisceau	108
Figure V.37 Induction magnétique pour la ligne double terne 220kV $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$	109
Figure V.38 Induction magnétique en 3D pour la ligne 220 kV $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$	109
Figure V.39 Densité de flux magnétique pour la ligne 220kV $S = 2 \times 288 \text{ mm}^2$	109
Figure V.40 Induction magnétique pour la ligne 220kV $S = 2 \times 288 \text{ mm}^2$	110

Figure V.41 Induction magnétique en 3D pour la ligne 220kV $S = 2 \times 288\text{mm}^2$	110
Figure V.42 Ligne 400kV simple terre	113
Figure V.43 La mesure de l'induction magnétique B pour la ligne 400 kV	114
Figure V.44 La mesure de la hauteur entre le sol et le conducteur de phase	114
Figure V.45 L'induction magnétique de la ligne 400 kV pour des courant de charge variés et pour une longueur de 16.40 m entre le conducteur et le sol	115
Figure V.46 Induction magnétique de la ligne 400 kV pour des courants de charge variés et pour une longueur de 50 m entre le conducteur et le sol	116

Liste des Tableaux

Chapitre I Présentation des Champs Magnétiques et des Modèles Electromagnétiques

Tableau I.1 Caractéristiques des champs électriques et magnétiques	22
--	----

Chapitre II Effets biologiques des champs Electromagnétiques

Tableau II.1 Limites d'exposition aux CEM pour le public	39
--	----

Chapitre III Lignes de Transport de l'Electricité

Tableau III.1 Rayon moyen géométrique des conducteurs toronné	56
---	----

Tableau III.2 Rayon moyen géométrique des conducteurs en faisceau	57
---	----

Tableau III.3.a Section des lignes 60kV-90 kV	59
---	----

Tableau III.3.b Section des lignes 60kV-90 kV	59
---	----

Tableau III.4.a Section des lignes 220 kV	60
---	----

Tableau III.4.b Section des lignes 220 kV	60
---	----

Tableau III.5 Section des lignes 400kV-220 kV en faisceaux	61
--	----

Tableau III.6 Section des lignes 400 kV en faisceaux	61
--	----

Chapitre IV Phénomènes liés aux voisinages des lignes HT/THT

Tableau IV.1 Dispositions de protection des circuits de télécommunications	70
--	----

Chapitre V Simulation et mesure des champs magnétiques au voisinage des lignes HT/THT

Tableau V.1 Induction magnétique de la ligne 60 kV – 50 Hz pour différentes configurations et différent courant de charge à 2 m au-dessus du sol	96
--	----

Tableau V.2 Induction magnétique pour différentes sections de conducteur et différent courant de charge	100
---	-----

Tableau V.3 Induction magnétique pour un et deux conducteurs par phase	106
--	-----

Tableau V.4 Induction magnétique pour la ligne 220 kV double terre un et deux conducteurs par phase	111
---	-----

Tableau V.5 Induction magnétique pour la ligne simple et double terre avec un et deux conducteurs par phase	111
---	-----

Tableau V.6 Induction magnétique pour différent courant de charge et 16.40 m de distance entre les conducteurs de la ligne 400 kV et le sol	116
---	-----

Tableau V.7 Induction magnétique pour différent courant de charge et 50 m de distance entre les conducteurs de phases et le sol de la ligne 400 kV	117
--	-----

Liste des symboles et Abréviations

HT	haute tension
THT	très haute tension
E	champ électrique
H	champ magnétique
B	induction magnétique
F	fréquence
CEM	champ électromagnétique
CM	champ magnétique
CE	champ électrique
EBF	extrêmement basse fréquence
μ	perméabilité magnétique
μ_0	perméabilité magnétique du vide
μ_r	perméabilité relative
ρ	résistivité
ε	permittivité électrique
σ	conductivité électrique
ν	reluctance magnétique
EDP	équations aux dérivées partielles
OMS	Organisation mondiale de la santé
ICNIRP	Commission Internationale de Protection contre les Rayonnements Non-Ionisants
INRS	Institut national de recherche et de sécurité (International Commission on Non-Ionising Radiation Protection).
CIRC	Centre International de Recherche contre le Cancer
SCENHIR	Comité scientifique sur les risques émergents et nouvellement identifiés pour le Comité scientifique sur les risques émergents et nouvellement identifiés pour la santé de la commission européenne
OPECST	Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
OPGW	câble de garde à fibre optique (optical ground wire)
LASHED	technique de fibre optique autour du câble de garde
GRTE	société de Gestion du réseau de transport de l'électricité
ALMELEC	alliage d'aluminium (AAAC)
ACSR	ALU/ACIER
S	section des conducteurs
req	rayon géométrique équivalent
I	courant de charge
T	Tesla
μT	microtesla
VLA	valeurs limites d'approches
CT	transformateur de courant

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique est devenue un partenaire indispensable dans notre vie quotidienne, notre développement technologique et économique. Malgré tous les bénéfices liés à son utilisation, nous baignons constamment dans des champs électriques et magnétiques. Si le public reconnaît les avantages liés à son utilisation, il manifeste une inquiétude croissante quant aux effets induits par son utilisation. L'un des premiers à s'en préoccuper fut Thomas Edison.

C'est seulement en 1979, près d'un siècle après l'apparition des premières lignes électriques, que cette inquiétude refait surface. Tout a commencé par une étude épidémiologique réalisée par les américains Wertheimer et Leeper, ils ont observé une répercussion néfaste des lignes haute tension sur la population se trouvant à proximité. Selon cette analyse, le fait de résider à proximité d'une ligne électrique augmenterait le risque de développement de leucémies infantiles. A cette époque, le monde scientifique s'interroge à nouveau sur le fait de savoir si le champ magnétique et/ou électrique, généré par les lignes à haute tension, pourrait être l'origine probable de l'accroissement de certains cancers [1, 2, 3].

La production d'électricité est réalisée dans des centrales (hydroélectriques, thermiques, à vapeur, à gaz...) et doit être acheminée jusqu'aux industries, agglomérations, établissements, et logements. Un réseau de lignes, de transformateurs, de postes électriques permet cet acheminement. Les lignes à très haute tension sont les premiers maillons de ce réseau, elles permettent de transporter l'électricité des principaux centres de production jusqu'aux zones de consommation [4].

Le courant distribué est un courant alternatif de fréquence 50 Hz (extrêmement basse fréquence). Au voisinage immédiat d'une ligne à haute tension, aérienne ou souterraine, un champ électrique et un champ magnétique sont présents. À distance de la ligne, ces champs décroissent rapidement.

Dans le cas des lignes souterraines, le champ magnétique décroît plus rapidement avec la distance que dans le cas des lignes aériennes [4, 5]. Le champ électrique est très atténué par

l'enfouissement sous terre. Certaines technologies lors de la mise en place des lignes permettent de réduire les champs (configuration des câbles, gaines...) [6, 7, 8, 9].

En fonction de la demande en électricité, l'intensité du courant sur la ligne subit des variations quotidiennes et saisonnières. Proportionnellement à l'intensité, le champ magnétique aux alentours de la ligne sera plus ou moins élevé. D'autres éléments du réseau de transport et de distribution de l'électricité comme les transformateurs sont également à l'origine de champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence (EBF) ou « Extremely low frequency (ELF) ». L'éloignement est le moyen le plus efficace pour limiter l'exposition des populations aux champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence [1, 4].

Les lignes très haute tension permettent notamment de transporter l'électricité à l'échelle nationale, voir internationale.

Depuis ces dernières années les associations de recherche se sont engagées à mettre en œuvre des actions conjointes relative aux enjeux liés au transport d'électricité.

En effet, les lignes haute et très haute tension (HT et THT), indispensables à toute forme d'activité, peuvent être aujourd'hui source de questionnement dans l'opinion publique. Les interrogations sont le plus souvent liées au fait de vivre à proximité de ces lignes et à la crainte d'un éventuel impact sur la santé [10, 11].

Les champs électromagnétiques de très basse fréquence générés par les lignes de transport d'énergie électrique ont été largement étudiés par la communauté scientifique en raison des préoccupations posées par les agences gouvernementales, non gouvernementales et les services publics d'énergie électrique sur leurs effets biologiques possibles pour la santé et l'environnement [2, 5, 12].

Dans la présente contribution nous nous sommes intéressés à l'évaluation du champ magnétiques au voisinage des lignes HT et THT du réseau électrique national Algérien pour différentes configurations de lignes, différentes sections de conducteurs et pour des courants de charge différents afin d'avoir une idée sur l'ordre de grandeur des champs magnétiques et comparer ainsi les grandeurs trouvées avec les valeurs limites de sécurité données par la commission Internationale de Protection contre les Rayonnements Non-Ionisants "ICNIRP" (International Commission on Non-Ionising Radiation Protection).

Des recherches considérables ont été menées et principalement orientées vers l'évaluation du champ magnétique (EBF) à proximité des lignes de transport de l'électricité afin d'assurer la sécurité et la santé humaine [11, 13-15]. Selon ICNIRP les valeurs limites d'exposition tolérées sont de 100 μ T pour la population et 500 μ T pour les travailleurs [15- 18]. Aussi, il

devient intéressant pour le citoyen Algérien de connaître le niveau du champ magnétique engendré par les lignes THT 400kV [19, 20] introduites dans le réseau électrique national depuis le début de l'année 2005 et dont la longueur aujourd'hui dépasse les 3000 km et de comparer les résultats obtenus avec les valeurs des champs magnétiques générés par les lignes de transport classiques utilisées depuis longtemps dans le réseau électrique Algérien à savoir le réseau 60kV avec une longueur qui dépasse les 10000 km ainsi que les lignes de niveau de tension 220kV dont la longueur avoisine 15000 km [19, 20].

Le calcul numérique est fait pour différentes configurations de pylônes à savoir :

La disposition horizontale, verticale et triangulaire pour des niveaux de tension 60kV et 220kV à 50Hz avec un et deux conducteurs par phase. Le champ magnétique est simulé à 2m au dessus du sol. Aussi, dans ce travail nous allons évaluer l'influence des différentes configurations, les valeurs du courant de charge I (pendant des journées différentes) et la variation des sections des conducteurs sur la valeur de l'induction magnétique B [21, 22], en considérant les conducteurs les plus utilisés dans le réseau Algérien comme le câble 570mm² ALMELEC (AAAC) et 288mm² ALU/ACIER (ACSR).

Nous avons traité la ligne d'interconnexion 400kV, circuit simple terre avec deux conducteurs en faisceau qui représente la dorsale EST – NORD du système électrique national Algérien à partir des nœuds du réseau constitués par les sous stations 400/220kV SKIKDA, RAMDANE DJAMEL, OUED EL ATHMANIA, SALEH BEY, BIR GHBALOU, SI MUSTAPHA et EL AFFROUN. Pour le niveau 60kV et 220kV nous avons étudié les lignes d'interconnexion entre le poste 220/60kV HASSI AMEUR et le poste 220/60/30kV PETIT - LAC situées dans la région d'Oran à l'ouest de l'Algérie [19, 20].

Par ailleurs, et pour l'évaluation exacte de la hauteur des conducteurs des lignes par rapport au sol nous avons utilisé "Suparul Cable Height Meter" qui est un appareil numérique utilisant la technologie ultra son pour la mesure des distances [23].

Pour la simulation et le calcul du champ magnétique au voisinage des lignes de transport de l'électricité HT et THT du réseau Algérien à 2m de hauteur du sol, nous avons utilisé le modèle magnétostatique du logiciel COMSOL avec application des courants de charge mesurés à des moments différents pendant plusieurs journées. Les résultats obtenus par simulation sont comparés à ceux effectués par des mesures pratiques en utilisant un appareil numérique « C.A 40 Gaussmeter device » [24].

Les conducteurs de phases sont assimilés à des conducteurs infiniment longs parcourus par un courant dont les lignes de champs sont créées autour. L'induction magnétique \mathbf{B} créée par le courant traversant le conducteur infiniment long peut être calculée en utilisant la loi d'Ampère [25, 26].

La thèse est composée de cinq chapitres :

Le chapitre un présente tous les rappels nécessaires à la compréhension des champs électromagnétiques (CEM), les différentes sources responsables à leurs créations et la mesure de ces champs, à cet égard, nous nous efforçons dans ce chapitre à donner les différentes équations de J.C. Maxwell et les modèles électromagnétiques obtenus par le découplage de ces dernières de manière à les appliquer selon le domaine à étudier. Le modèle magnétostatique est prit en considération pour la simulation des champs magnétiques.

Le chapitre deux décrit les effets biologiques des champs magnétiques basses fréquence (50Hz) engendrés par les lignes haute et très haute tension de transport de l'électricité, aussi plusieurs résultats et conclusions des études épidémiologiques sont présentés ainsi que les recommandations des différents commissions et organismes internationaux à savoir :

- Organisation mondiale de la santé (OMS)
- la commission Internationale de Protection contre les Rayonnements Non-Ionisants "ICNIRP" (International Commission on Non-Ionising Radiation Protection).
- Institut national de recherche et de sécurité (INRS)
- Centre International de Recherche contre le Cancer (CIRC)
- le comité scientifique sur les risques émergents et nouvellement identifiés pour la santé (SCENHIR) de la commission européenne
- Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST)

Dans le troisième chapitre nous nous limiterons à donner un aperçu général sur les lignes aériennes HT et THT du point de vue de leurs constitutions, construction ainsi que les principaux paramètres liés à la matière et aux grandeurs et sections des conducteurs utilisés pour les différents niveaux de tension 60kV, 220kV et 400kV dans le réseau de transport de l'électricité Algérien.

Dans le quatrième chapitre les différents phénomènes liés au voisinage des lignes HT et THT seront présentés, ainsi que leurs effets et influences dans les ouvrages situés à leur proximité ceci pour la prise en compte des dispositions techniques particulières lors de la réalisation de ces ouvrages à savoir : les lignes électriques de moindre tensions, les conduites métalliques de fluides (pipe line, transfert d'eau, gaz), les circuits de télécommunication, les clôtures et constructions à charpentes métalliques, etc....

Le chapitre cinq sera consacré à la simulation sous logiciel COMSOL de l'induction magnétique B engendré par les lignes de transport de l'électricité HT et THT 60kV, 220kV pour des configurations variées horizontale, verticale et triangulaire avec un et deux conducteurs par phase et pour différents courants de charge et différentes sections des conducteurs, aussi, le cas de ligne exploitée à pleine charge sera étudié. Les lignes OUED EL ATHMANIA – SALEH BEY et SALEH BEY - BIR GHBALOU 400kV simple terne avec deux conducteurs par phase interconnectant l'Est avec le Nord Algérien est prise en considération pour l'évaluation de l'induction magnétique. La simulation est faite pour deux niveaux de hauteur des conducteurs de phase par rapport au sol 16.40 m et 50 m, les courants de charges variables ont été pris durant deux journées, et les résultats ainsi obtenus seront confrontés aux mesures pratiques effectuées.

Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale, où nous résumerons les différents aspects de notre contribution, et nous donnerons à cet égard, un ensemble de recommandations et avis dans la perspective de la poursuite de ces recherches scientifiques pluridisciplinaires dans le cadre de futurs travaux universitaires en étroite relation et collaboration avec le secteur de l'énergie concerné.

Chapitre I

Présentation des Champs Magnétiques et des Modèles Electromagnétiques

Chapitre I

Présentation des Champs Magnétiques et des Modèles Electromagnétiques

Introduction

Le champ électromagnétique est associé à l'existence simultanée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Dans le contexte de l'électromagnétisme, le terme champ désigne un phénomène susceptible de perturber des objets matériels dans un espace qui, théoriquement, peut être infini, mais qui, dans les faits, est évidemment plus restreint. Le concept de champ est général et permet de rendre compte de manière quantitative des forces qui peuvent s'exercer sur certains objets, particules, ions, atomes, molécules, etc. À l'action de ces forces est associé un échange d'énergie entre l'objet que l'on considère, par exemple la molécule, et son environnement.

Le concept de champ permet donc de rendre compte d'échanges d'énergie et de forces exercées à distance, conduisant à des mouvements induits sur un objet. Les champs sont des quantités vectorielles, qui se caractérisent par leur amplitude (l'intensité du champ), leur direction et leur sens. Un exemple de champ aisé à prendre en considération est le champ de gravitation terrestre, ou champ de pesanteur, qui traduit l'existence d'une force s'exerçant sur tout objet possédant une masse, dirigée vers le centre de la terre [27, 28].

I.1 Champ électromagnétique

Les champs électromagnétiques (CEM) sont tout aussi fondamentaux et présents dans la nature que le champ de gravitation. Sur terre, ces champs sont beaucoup plus intenses que le champ de gravitation car ce sont eux qui assurent la cohésion des atomes entre eux, ce qui permet de constituer des molécules et, de manière générale, la matière, dont celle qui nous compose. Ce sont donc eux qui évitent que chaque molécule dont nous sommes constitués ne tombe sur le sol en raison du champ de pesanteur.

Le champ électrique et le champ magnétique, qui sont les deux composantes du champ électromagnétique, sont d'une manière générale intimement liés et permettent par exemple la propagation des ondes électromagnétiques avec lesquelles nous pouvons communiquer à distance. Ils ont néanmoins des propriétés différentes, qui dépendent en particulier de leur fréquence, c'est-à-dire de la cadence à laquelle leur sens change en fonction du temps. Leur origine commune est la charge électrique. La matière est largement composée de particules qui possèdent une charge. Cette charge peut être négative, comme celle des électrons, ou positive, comme celle des protons. Par conséquent, des champs électriques et des champs magnétiques sont générés par la matière vivante [27, 29].

Toute utilisation de l'électricité génère un champ électrique et un champ magnétique. L'intensité du champ est grande à proximité de sa source et diminue rapidement à mesure qu'on s'éloigne de celle-ci. La notion de champ s'applique aussi à d'autres phénomènes physiques présents dans notre environnement habituel. Bien que l'analogie ne soit pas rigoureuse sur le plan scientifique, on pourrait dire qu'il existe un champ thermique autour d'un feu de camp. La température est très élevée à proximité du feu et elle diminue à mesure que nous nous éloignons de la source. Ainsi, à une distance plus ou moins grande du feu, selon l'intensité de celui-ci, nous ne percevons plus la chaleur [27, 28].

I.1.1 Champ électrique

Le champ électrique, associé à l'existence d'une charge électrique, exerce son action sur des particules chargées, en mouvement ou non. Un cas particulier de ce champ est le champ électrostatique, considéré pour les fréquences nulles. En toute rigueur, une charge crée un champ électrique en tout point de l'univers. Cependant, ce champ décroît comme l'inverse du carré de la distance r qui sépare la charge qui crée le champ de l'endroit où le champ est mesuré. Il est de plus proportionnel à la charge q qui le crée. Il s'exprime en volts / mètre (V/m)

$$\mathbf{E} = k q / r^2 \quad (\text{I.1})$$

Avec :

\mathbf{E} : champ électrique

q : charge électrique

r : distance

$k = 1 / 4\pi\epsilon_0$

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

Ce champ permet de quantifier les forces qui s'exercent sur les charges électriques, appelées forces électriques, ou forces de Coulomb.

Les effets des champs électriques peuvent être négligés à grande distance car leur intensité décroît rapidement avec la distance. Concrètement, le champ et la force électriques sont divisés par 100 si on augmente la distance d'un facteur 10 entre deux charges [28, 29].

Le champ électrique est lié à la tension électrique qui définit la quantité de ces charges électriques plus la tension d'alimentation d'un appareil électrique est grande plus le champ électrique qui en résulte est intense. Le cordon d'un appareil branché sur une prise de courant produit un champ électrique, même si l'appareil est éteint. L'intensité du champ électrique peut être considérablement réduite par la présence d'objets faisant écran : arbres, clôtures, bâtiments, etc. [30, 31].

I.1.2 Champ magnétique

Le champ magnétique (CM) exprime la force exercée par une charge électrique en mouvement sur une autre charge en mouvement. Il est lié au courant électrique qui définit la circulation des charges dans un élément conducteur. Ainsi, lorsqu'un appareil est allumé, il produit un champ magnétique. Lorsque l'appareil est éteint, le champ magnétique disparaît. Contrairement au champ électrique, le champ magnétique n'est pas atténué par les arbres, les clôtures ou les bâtiments, et celui-ci traverse assez facilement la matière. Le champ magnétique est noté \mathbf{H} Cependant, on utilise souvent la quantité \mathbf{B} , appelée induction magnétique ou densité de flux magnétique, pour le quantifier, qui ne diffère du champ \mathbf{H} que par une constante de proportionnalité notée souvent μ . \mathbf{B} s'exprime en teslas (T). Pour les mêmes raisons que pour le champ électrique, le champ magnétique décroît rapidement avec la distance et peut généralement être négligé à grande distance [28, 31].

I.2 Topographie du champ magnétique

Le champ magnétique est continuellement tangent à des courbes appelées lignes de champ qui sont orientées dans le sens du champ figure I.1. Comme pour le champ électrique, l'équation d'une ligne de champ magnétique est donnée par :

$$\overrightarrow{dM} \wedge \overrightarrow{B} = 0 \quad (I.2)$$

Avec :

dM : déplacement élémentaire le long d'une ligne de champ.

Il est possible de visualiser les lignes de champ magnétiques en saupoudrant de la limaille de fer sur une plaque isolante (verre, plexiglas) située dans la zone de champ à étudier. Les grains de limaille, de forme allongée, se transforment en petits aimants sous l'action du champ magnétique figure I.2.

A l'instar de l'aiguille d'une boussole dans le champ magnétique terrestre, ces petits aimants s'orientent parallèlement à la direction du champ magnétique [29, 32].

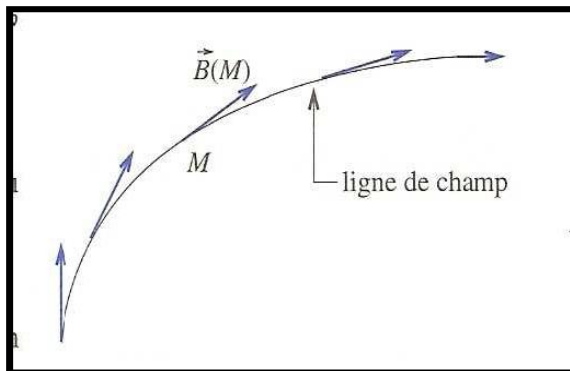


Figure I.1 Ligne de champ magnétique

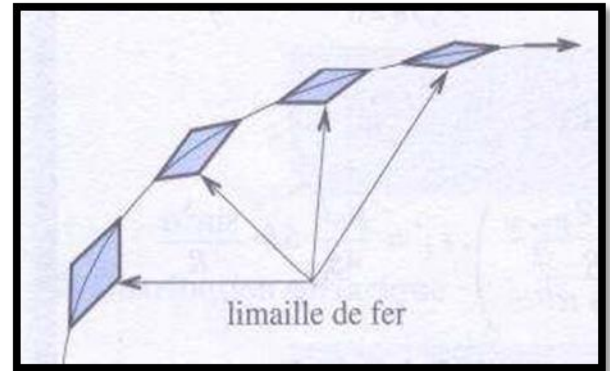


Figure I.2 Eléments de limaille s'alignent le long des lignes de champ

I.3 Spectre électromagnétique

Une des principales quantités physiques caractérisant les champs électrique et magnétique est la fréquence f à laquelle ces champs oscillent dans le temps. Ces champs peuvent en effet osciller dans le cas où les charges électriques oscillent elles-mêmes dans le circuit qui les transportent. C'est naturellement le cas lorsque les charges circulent par exemple dans une boucle fermée, si on observait le mouvement des charges à un endroit donné du circuit, on apercevrait alors un passage périodique des charges.

Ces phénomènes oscillants sont présents dans la nature, puisque les atomes sont constitués de noyaux autour desquels orbitent des électrons. Dans le cas général, les fréquences peuvent être très élevées, de l'ordre de 10^{14} Hz par exemple (100 000 milliards d'oscillations par seconde) pour la lumière visible, comme très faibles (par exemple, 0,01 Hz correspond à une oscillation toutes les 100 secondes) pour des phénomènes liés à l'activité de la terre [31, 33].

La Figure I.3 illustre les différentes bandes de fréquences du spectre électromagnétique associées à quelques applications typiques.

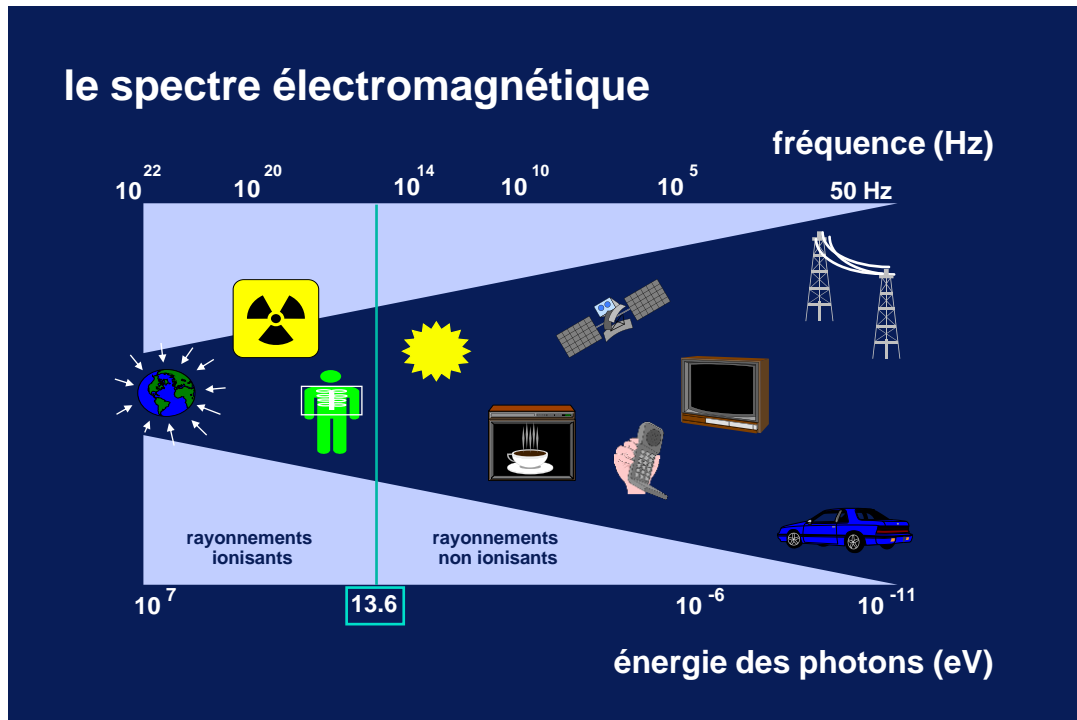


Figure I. 3 Décomposition du spectre électromagnétique avec quelques applications

Les champs électromagnétiques changent constamment de direction, ils passent d'une charge positive à une charge négative. Ils oscillent ou alternent. La fréquence reflète la vitesse à laquelle le champ oscille, c'est-à-dire se renouvelle. L'unité de fréquence est l'hertz (Hz). Une oscillation par seconde représente un hertz.

Une particularité des champs extrêmement basses fréquences (EBF), par rapport aux autres domaines du spectre des champs électromagnétiques, est que le champ électrique ou le champ magnétique peuvent exister sous forme isolée l'un de l'autre, à la différence des champs haute fréquence où ils sont liés, justifiant leur qualificatif d'électromagnétiques. Un câble sous tension dont l'intensité du courant qui le parcourt est nulle ou une armature d'un condensateur chargé ne produisent qu'un champ électrique. [27,30, 31].

Les appareils électriques sont alimentés par un courant alternatif. Les champs électriques et magnétiques générés sont donc des champs alternatifs qui alternent avec la même fréquence que le courant 50 vibrations par seconde ou 50Hz [27, 31].

Dès lors, tout appareil ou équipement produisant, transportant, ou consommant de l'électricité, produit dans son voisinage des champs électriques et magnétiques dont l'intensité, la fréquence et la répartition dans l'espace sont directement liées à la source elle-même.

La fréquence la plus répandue est évidemment le 50Hz, fréquence de fonctionnement des réseaux électriques. Notre civilisation est technologiquement développée et, en conséquence, nous baignons en permanence dans un environnement électromagnétique très complexe, résultant de l'ensemble de ces utilisations de l'électricité figure I.3. L'exposition nulle n'y existe donc pas.

La partie haute du spectre électromagnétique est celle des rayonnements très énergétiques de type rayon X ou gamma. Ces rayonnements sont dits ionisants car suffisamment énergétiques pour pouvoir arracher des électrons aux atomes et/ou casser des molécules (et créer ainsi des ions, d'où la qualificatif ionisants). C'est ce mécanisme d'altération moléculaire qui explique le caractère cancérogène de ces rayonnements.

La partie basse du spectre est celle des rayonnements non ionisants : ils ne sont pas suffisamment énergétiques pour créer des ions ; ils peuvent néanmoins apporter de l'énergie, comme en témoignent les micro-ondes utilisées pour la cuisson. Bien évidemment, plus on descend en fréquence et plus l'énergie est faible

La frontière entre ces deux domaines est constituée par la gamme des rayonnements lumineux : en partie haute du spectre lumineux, on trouve les rayonnements ultraviolets dont la cancérogénicité est avérée, en partie basse, les rayonnements infrarouges qui sont associés à l'idée d'un rayonnement thermique [27, 33, 34].

Les ondes radio, la lumière infrarouge, la lumière visible, les rayons ultraviolets, les rayons X, les rayons gamma, etc. sont tous des ondes électromagnétiques. Seule leur fréquence varie, plus les ondes se succèdent rapidement, plus la fréquence est élevée.

La fréquence détermine le type, les caractéristiques spécifiques et l'application des ondes électromagnétiques. Notre corps réagit différemment aux ondes de fréquences différentes.

Une onde électromagnétique transporte de l'énergie en petit groupements que l'on appelle les photons. Plus la fréquence est élevée, plus l'énergie photonique est grande.

L'ensemble des ondes électromagnétiques s'appelle le spectre électromagnétique. Ce spectre reprend tant le rayonnement ionisant que non ionisant, suivant la fréquence et donc l'énergie photonique. Les photons riches en énergie sont capables de chasser les électrons des atomes et des molécules qu'ils rencontrent. Les atomes et les molécules sont alors chargés électriquement c'est ce qu'on appelle l'ionisation.

Le rayonnement non ionisant reprend les ondes électromagnétiques dont l'énergie photonique est trop faible pour entraîner une ionisation [27, 31, 35].

I.4 Sources de champs électromagnétiques

Nous sommes exposés en permanence dans notre quotidien à de multiples champs électriques et magnétiques. Certains sont d'origine naturelle, d'autres sont créés par les activités humaines, par exemple par le transport et la distribution de l'électricité, mais aussi par toutes les applications consommatrices d'électricité [36].

Les sources de champ électromagnétique sont diverses et nombreuses. Elles peuvent être naturelles ou artificielles.

I.4.1 Sources naturelles

I.4.1.1 Les aimants

Un aimant est un corps qui attire le fer. Des matériaux comme le fer, le cobalt, le nickel et les oxydes de fer constituent les aimants. Une aiguille de boussole est un aimant. L'oxyde de fer magnétique (Fe_3O_4) est le constituant le plus répandu.

Un aimant droit ou en « U » comporte deux pôles appelés pôle Nord et pôle Sud. Certains aimants comme les aimants « circulaires » comportent plusieurs pôles Nord et Sud [28, 29, 32].



Figure I.4 Aimant naturel

I.4.1.2 Champs magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre, aussi appelé bouclier terrestre, est un immense champ magnétique qui entoure la terre, de manière non uniforme du fait de son interaction avec le vent solaire, il nous protège également des effets nocifs du vent solaire grâce à la magnétosphère située à très haute altitude. Cependant, de nombreux phénomènes magnétiques naturels sont perceptibles sur terre, comme celui, spectaculaire, des aurores boréales.

Le champ magnétique de la terre est engendré par les mouvements du noyau métallique liquide des couches profondes de la terre. Selon les études de John

Tarduno de l'université de Rochester (États-Unis), la terre possédait déjà un champ magnétique il y a 3,45 milliards d'années [29, 37].

Le champ magnétique terrestre est approximativement assimilable à celui d'un aimant droit (ou d'un dipôle magnétique, ou d'une bobine plate parcourue par un courant) placé au centre de la terre et dont l'axe est incliné d'un faible angle par rapport à l'axe de rotation, il s'en trouve à quelques centaines de kilomètres.

Le pôle magnétique Sud se trouve à proximité du pôle géographique Nord. De même le pôle magnétique Nord se trouve près du pôle géographique Sud. On peut détecter ce champ à l'aide d'une boussole, sa valeur est de 30 à 60 μT à la surface de la terre [32, 33].

Cette approximation ne doit pas faire oublier que le champ a des composantes multipolaires dont l'intensité, bien que beaucoup plus faible que la composante dipolaire, n'est pas négligeable, notamment lors d'une inversion du champ magnétique terrestre qui voit l'affaiblissement de l'intensité du dipôle si bien que les composantes non dipolaires deviennent prédominantes.

La théorie du potentiel décrit, à partir de l'équation de Laplace, qu'à cet aimant droit se superposent en second ordre un quadripôle, au troisième ordre un octo-pôle, etc., jusqu'à l'infini. Cette décomposition dite en harmoniques sphériques admet des coefficients qui pondèrent l'importance à attribuer à chaque aimant. Le premier à avoir mesuré leur valeur est Gauss à partir d'un maillage d'observatoires magnétiques répartis autour de la terre, puis d'en tirer des études statistiques [28, 29, 32].

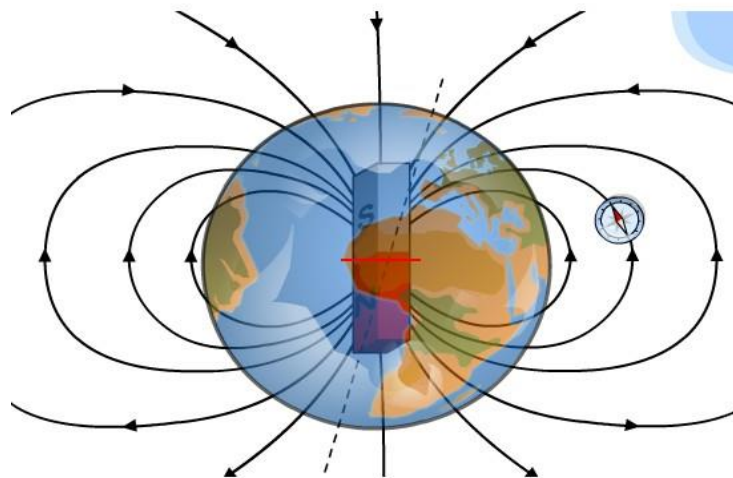


Figure I.5 Champ magnétique terrestre

I.4.1.3 Champs magnétique solaire

La source naturelle la plus intense est le soleil, qui produit une onde électromagnétique ayant des fréquences dans l'ensemble du spectre avec un maximum d'intensité dans le domaine visible (dans le jaune puisque le soleil est jaune). L'atmosphère bloque les rayonnements les plus énergétiques (rayons X et γ) dangereux pour la vie, mais aussi, avec l'ionosphère, une partie des rayonnements dans le domaine des ondes radio [28, 35, 36].

Le champ magnétique solaire est beaucoup plus complexe que celui de la terre. Il varie énormément. Globalement, il existe un champ magnétique de type dipolaire, mais sa polarité (position des pôles Nord et Sud) s'inverse tous les onze ans. A ce champ dipolaire se superposent d'autres champs magnétiques, des formes variables, beaucoup plus intenses, mais localisés en des régions assez restreintes du soleil. Ces champs magnétiques locaux sont observables pendant quelques jours ou quelques semaines. Ils sont associés à d'autres phénomènes, en particulier aux taches solaires.

Le champ magnétique d'origine solaire ne diminue pas très vite à mesure que l'on s'éloigne. Au niveau de l'orbite terrestre (mais hors de la zone d'influence de la terre, c'est à dire hors de la magnétosphère), on est capable de mesurer le champ magnétique d'origine solaire. Ces mesures sont faites à bord de sondes spatiales. [28, 30, 32]

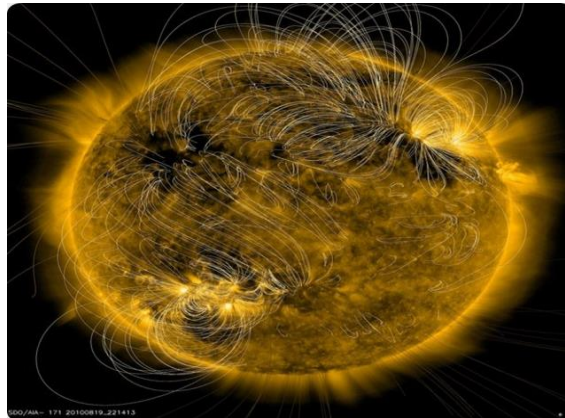


Figure I.6 Champ magnétique solaire

I.4.1.4 Les Orages (éclairs)

De plus, de nombreux orages recouvrent en permanence la surface du globe, ce qui en fait un système dynamique dans lequel les variations du champ magnétique et du champ électrique dus aux éclairs sont permanentes et variées.

Les gammes de fréquences des différents phénomènes couvrent l'ensemble du spectre radioélectrique. Les intensités dépendent des phénomènes physiques sous-jacents.

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive qui se produit lorsque l'électricité statique s'accumule entre des nuages d'orage, ou entre un tel nuage et la terre. La différence de potentiel électrique entre les deux points peut aller jusqu'à 100 millions de volts et produit un plasma lors de la décharge, causant une expansion explosive de l'air par dégagement de chaleur. En se dissipant, ce plasma crée un éclair de lumière et le tonnerre [29, 30, 37, 38].

Elle présente de nombreux dangers : électrocution, déclenchement d'incendie, interférences électromagnétiques nuisibles à l'aviation et à la navigation, etc. C'est pourquoi, plusieurs techniques ont été développées pour la détecter et la canaliser afin de protéger les êtres vivants et les équipements.

Les effets indirects (électromagnétiques), le courant de foudre engendre une tension induite et un champ électromagnétique d'une intensité exceptionnelle. Il s'ensuit la génération d'impulsions électriques parasites très puissantes, qui sont majoritairement en cause dans les dégâts d'après les statistiques [28, 30, 35]. Ces parasites suffisent en effet à dégrader des matériels électroniques sensibles (téléviseurs, ordinateurs, etc.) même si l'éclair est éloigné. Si l'éclair est plus proche, le parasite peut aussi détruire des matériels plus résistants (lampes, moteurs, fours...) [30].



Figure I.7 Les Orages

Les gammes de fréquences des différents phénomènes couvrent l'ensemble du spectre radioélectrique [30, 33].

I.4.2 Sources artificielles

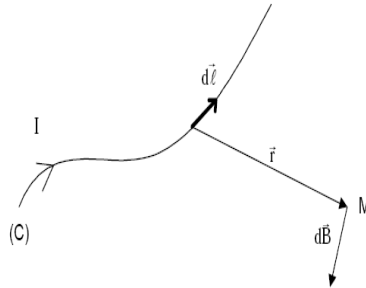
I.4.2.1 Courant électrique

Nous savons que les aimants sont des sources de champ magnétique.

L'expérience d'Oersted en 1820 a montré que les courants électriques peuvent également créer des champs magnétiques [28, 29].

- **Loi de Biot et Savart**

Soit un circuit filiforme (c) dans le vide, parcouru par un courant électrique I



Une portion de fil de longueur dl crée en un point M de l'espace un champ magnétique élémentaire dB tel que :

$$d\mathbf{B} = \mu_0 \frac{I \, d\mathbf{l} \wedge \mathbf{r}}{4\pi r^3} \quad (\text{I.3})$$

Avec:

$$\mu_0 : 4 \times \pi \times 10^{-7} \text{H/m}$$

Globalement, le circuit filiforme (C) crée en M un champ magnétique :

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{l} \wedge \mathbf{r}}{r^3} \quad (\text{I.4})$$

- Tout circuit électrique parcouru par un courant crée un champ magnétique.
- L'intensité du champ magnétique décroît rapidement avec la distance et s'annule à l'infini.
- En un point considéré, \mathbf{B} est proportionnel au courant I

Les résultats précédents restent valables dans l'air [39].

- **Conducteur rectiligne infiniment long**

Un fil rectiligne parcouru par un courant est une source de champ magnétique. L'orientation de grains de fer placés dans un plan perpendiculaire au fil électrique le montre. Plus l'intensité du courant électrique est grande, plus le champ créé est important, les lignes de champ sont circulaires [32, 33, 37, 40].

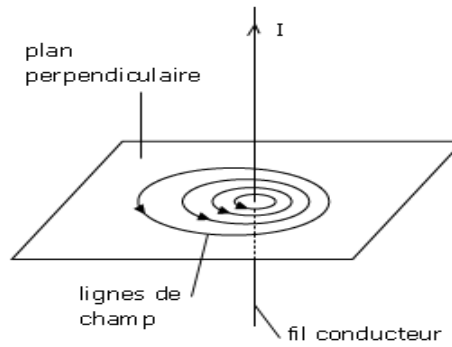


Figure I.8 Lignes de champ magnétique d'un fil rectiligne parcouru par un courant

- Le sens du champ magnétique est donné, par exemple, par la règle de la main droite.
- Les lignes de champ magnétique sont des lignes fermées.
- L'ensemble des lignes de champ magnétique constitue le spectre magnétique.
- L'intensité du champ magnétique augmente avec le resserrement des lignes de champ.

La loi de Biot et Savart permet de calculer le champ magnétique créé en un point quelconque de l'espace par un circuit filiforme quelconque parcouru par un courant électrique.

Reprenons le conducteur rectiligne infiniment long.

La loi de Biot et Savart donne non seulement le sens du champ magnétique mais surtout son intensité :

La portion de fil $d\mathbf{l}$ crée en M le champ magnétique élémentaire donné par l'équation (I.2) :

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \mathbf{r}}{r^3} \quad (\text{I.3})$$

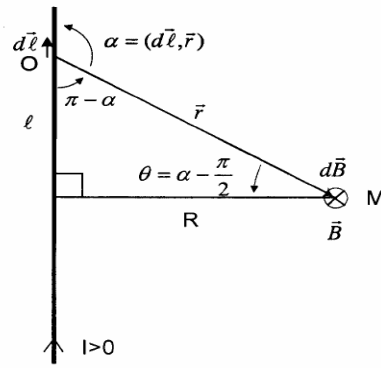
En intensité :

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl r}{r^3} \sin(\mathbf{dl}, \mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{r^2} \sin\alpha \quad (\text{I.5})$$

$$\text{Avec: } \sin\alpha = \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) = \cos\theta \quad \text{et} \quad \cos\theta = \frac{R}{r} \quad (\text{I.6})$$

d'où:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{R^2} \cos^3\theta \quad (\text{I.7})$$



d' autre part $l = R \tan\theta$

$$\text{soit : } \frac{dl}{d\theta} = R \frac{d\tan\theta}{d\theta} = \frac{R}{\cos^2\theta} \quad (\text{I.8})$$

$$\text{Finalement : } d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} \cos\theta \, d\theta \quad (\text{I.9})$$

Il reste à intégrer sur l'ensemble du fil :

$$\mathbf{B} = \sum d\mathbf{B} = \int d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\theta \, d\theta \quad (\text{I.10})$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{R} \quad (\text{I.11})$$

R : distance du point M au fil parcouru par un courant électrique.

I.4.2.2 Solénoïde

Un solénoïde est un enroulement cylindrique de fil électrique. Il est formé de plusieurs spires jointives ou non, Il devient une source de champ magnétique, lorsqu'il est parcouru par un courant [28, 39].

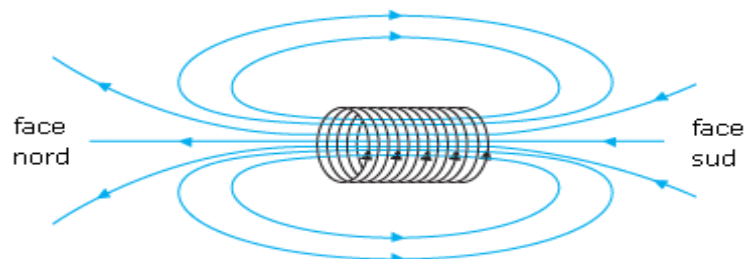


Figure I.9 Lignes de champs créés par un solénoïde

I.4.2.3 Champ magnétique créé par une ligne à haute tension

On se propose de calculer le champ d'induction magnétique créé par une ligne à haute tension alimentée en triphasé équilibré. Les courants dans les conducteurs des trois phases sont donc :

$$I_1 = I_m \cos(\omega t) \quad (\text{I.12})$$

$$I_2 = I_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (\text{I.13})$$

$$I_3 = I_m \cos(\omega t - 4\pi/3) \quad (\text{I.14})$$

Pour faire le calcul, on considère des fils rectilignes infinis. A cause de leur poids, les fils ont en fait la forme d'une chaînette entre les pylônes. En un point A situé dans un plan normal au fil à la distance r de celui-ci la norme de l'induction produite par un courant d'intensité I est égale à :

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r} \quad (\text{I.15})$$

L'induction magnétique en un point du plan de figure est la somme vectorielle des contributions de chaque conducteur en ce point [41- 43]. Au voisinage des conducteurs, la carte du champ dépend de la configuration géométrique de la ligne.

Le champ magnétique généré par les lignes de transport hautes tension et les lignes de distribution moyenne tension est proportionnel au courant qui subit de fortes variations quotidiennes et saisonnières. En général, le courant transporté par les lignes croît avec la tension. Le champ décroît avec la distance.

Le champ créé par les lignes enterrées est plus intense au niveau de la ligne, mais décroît plus rapidement avec la distance. Selon les pays, les configurations différentes des lignes de transport de l'électricité peut conduire à des champs magnétiques sensiblement différents pour un même courant [44, 45].

À une distance de l'ordre de 50 à 1 00 mètres, le champ magnétique créé par les lignes à haute tension sont proches du bruit de fond, ce qui explique que l'exposition due aux lignes ne concerne qu'une très faible fraction de la population, [28, 34, 39, 46].

I.4.2.4 Trains, Métros et Tramways

Les trains des grandes lignes disposent d'une ou de plusieurs motrices qui sont séparées des voitures de voyageurs. L'exposition des voyageurs est principalement due à l'alimentation électrique du train. Dans les voitures de voyageurs des trains de grandes lignes, le champ magnétique au niveau du plancher peut atteindre plusieurs centaines de microteslas, la valeur étant plus faible (quelques dizaines de microteslas) dans le reste du compartiment. L'intensité du champ électrique peut atteindre 300 V/m. Les personnes qui résident à proximité des lignes de chemin de fer peuvent se trouver en présence de champs magnétiques générés par le câble aérien d'alimentation qui, selon les pays, sont susceptibles d'atteindre l'intensité de ceux que produisent les lignes à haute tension.

Les moteurs et les dispositifs de traction des trains et des trams sont en principe logés sous le plancher des voitures. Au niveau du plancher, juste au dessus du moteur, l'intensité du champ magnétique peut atteindre plusieurs dizaines de μT . L'intensité baisse rapidement à distance du plancher de sorte que l'exposition des voyageurs est beaucoup plus faible au niveau du buste [34, 39, 46].

I.4.2.5 Appareils et équipements électroménagers

Les écrans d'ordinateurs et les téléviseurs fonctionnent selon des principes analogues. Ils produisent les uns comme les autres un champ électrique statique et des champs électrique et magnétique alternatifs de diverses fréquences. Toutefois, les écrans à cristaux liquides qui équipent certains ordinateurs portables ou ordinateurs de bureau ne produisent pas de champs électriques ou magnétiques importants. Les ordinateurs modernes sont dotés d'écrans conducteurs qui réduisent le champ électrostatique à une valeur proche de celle du champ de fond qui règne normalement dans la maison ou sur le lieu de travail. Compte tenu de la position normale de l'opérateur par rapport à l'écran (distance de 30 à 50 cm), le champ magnétique alternatif a une densité de flux généralement inférieure à $0,7 \mu\text{T}$ (à la fréquence du secteur). Dans ces positions, le champ électrique alternatif va de 1 V/m à 10 V/m. L'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des fours à micro-ondes à usage domestique est très élevée. Un blindage efficace permet néanmoins de ramener les fuites de rayonnement à un niveau pratiquement indétectable à l'extérieur de l'appareil. De plus, le rayonnement hyperfréquence dû aux fuites diminue très rapidement à mesure que l'on s'éloigne du four. De nombreux pays imposent des normes de fabrication qui spécifient le niveau maximum tolérable pour les fuites de rayonnement dans le cas d'un appareil neuf ; un four qui répond à ces normes ne présente aucun danger pour le consommateur [34, 39, 46].

I.5 Mesure du champ magnétique

La mesure des champs électriques et magnétiques est une opération souvent complexe, qui nécessite un matériel de mesure approprié.

L'appareil de mesure doit être adapté au type de champ que l'on entend quantifier : champ électrique statique, champ magnétique, émissions électromagnétiques générées par une antenne de téléphonie mobile, ...etc. [10, 47].

La fiabilité des valeurs obtenues en dépendra. Suivant les cas, l'appareil mesurera la composante électrique du champ et délivrera une valeur en volts par mètre (V/m), ou bien sa composante magnétique et affichera un résultat en microteslas (μT).

La consommation électrique et le champ magnétique associés à un appareil fluctuent suivant de nombreux paramètres, parmi lesquels le fonctionnement de celui-ci (vitesse pour un moteur électrique, par exemple). De même, le champ magnétique d'une ligne électrique dépend du courant qu'elle transporte, lui-même fonction de la consommation des territoires qu'elle alimente en électricité. Pour ces raisons, des écarts, parfois importants, peuvent être observés entre deux mesures.

Pour effectuer une mesure fiable des champs électromagnétiques, il y a lieu d'appliquer les protocoles de la norme UTE C 99-132 qui tient compte des autres sources de champs magnétiques à 50 Hz possiblement présentes dans l'environnement de la zone de mesures (et donc susceptibles d'influencer le résultat des mesures), ces autres sources peuvent être :

- le réseau de distribution d'électricité, constitué des lignes à moyenne (typiquement 30 kV) et basse tension.
- les réseaux électriques de transports en commun : métro, tramway, train,
- les sources électriques présentes dans l'environnement résidentiel, tertiaire ou industriel, (appareils électriques, câblages, colonnes d'alimentation, réseaux d'éclairage public, ... etc.).

Le protocole contient des recommandations qui permettent de minimiser l'influence de ces sources sur le résultat de la mesure [47, 48].

I.6 Caractéristique du champ magnétique et électrique

La comparaison entre les caractéristiques des deux champs électrique et magnétique est résumée par le tableau suivant [32] :

Champ magnétique	Champ électrique
<ul style="list-style-type: none"> - Il s'exprime en Ampères par mètre (A/m), Tesla (T), en Gauss (G). - La valeur du champ magnétique est en fonction de l'intensité du courant électrique circulant dans un conducteur. Plus l'ampérage est fort plus le champ magnétique est important : $\int \vec{H} d\vec{l} = I.$ - Le champ magnétique, nécessite de faire appel à des matériaux ferromagnétique tels que le mu métal (alliage de nickel), le fer doux ou l'aluminium pour réduire sa valeur. - Les champs magnétiques diminuent avec l'éloignement de la source émettrice. - Le champ magnétique favorise le courant dans une bobine métallique. - Les gens ne peuvent pas sentir la présence d'un champ magnétique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Il s'exprime en Volt par mètre (V/m). - La valeur du champ électrique est en fonction du voltage de la source électrique considérée ; plus le voltage est élevé, plus l'environnement est fort. $\int \vec{E} d\vec{l} = v.$ - Le champ électrique est facilement arrêté par les matériaux classiques de construction (briques, béton,...). - Les champs électriques diminuent avec l'éloignement de la source émettrice. - Le champ électrique favorise une charge sur les objets métallique non mis à la terre dans le champ. - Les gens peuvent détecter la présence de quelque champ électrique par la sensation établi par les petites poiles du corps humain.

Tableau I.1 Caractéristiques des champs électriques et magnétiques

I.7 Phénomènes électromagnétiques

L'effet du champ électrique ou magnétique (ou de leur combinaison) détermine le fonctionnement des machines tournantes des transformateurs et de l'appareillage de coupure haute ou basse tension.

La connaissance de ces champs permet dans tout appareil électromagnétique, d'avoir accès au calcul de ses performances globales et au détail des conditions de son fonctionnement, soit en régime permanent, soit en régime transitoire. Ceci est aussi valable pour l'étude des effets des champs électromagnétiques au voisinage des lignes THT de transport de l'électricité dans les grands réseaux électriques.

En effet, on peut déduire du champ magnétique les valeurs des flux des forces électromotrices (dans les générateurs) des couples d'entraînement (dans les moteurs), les forces d'attraction ou de répulsion (dans les contacteurs), les pertes occasionnées par effet Joule (par les courants sources ou par les courants induits), etc.

La complexité croissante des matériels, la sévérité des contraintes qui leur sont imposées, l'optimisation de plus en plus poussée des appareils rendent délicat l'emploi d'hypothèses simplificatrices. Le choix d'un modèle approprié devient donc difficile. Nous allons essayer d'éclairer ce choix en présentant les modèles les plus utilisés et leur domaine de validité [29, 49, 50].

I.7.1 Modèles électromagnétiques

Les équations qui décrivent le couplage électromagnétique entre effets magnétiques et les effets électriques peuvent être dans certains cas découplés en donnant naissance à des modèles plus simples [28, 29, 50].

I.7.1.1 Modèles électrostatique

La source du champ électrostatique est constituée par des charges fixes dans le référentiel d'étude. La conception d'isolateur, l'étude de la tenue des diélectriques sont les problèmes les plus caractéristiques modélisés par ces équations qui s'expriment par :

$$\overline{\text{Rot}} \vec{E} = \vec{0} \quad \text{car} \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{I. 16})$$

$$\text{Div} (\vec{D}) = \rho \quad (\text{I. 17})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{I. 18})$$

ρ : résistivité

ε : Permittivité électrique

La relation (I.16) permet de définir une fonction potentiel scalaire électrique V , ou tension électrique, telle que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{Grad}} V \quad (\text{I. 19})$$

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\text{Div} (\varepsilon \overrightarrow{\text{Grad}} V) + \rho = 0 \quad (\text{I. 20})$$

On peut dire que les techniques actuelles apportent une solution à ce problème dans la plupart des cas. En effet, l'inconnue est un scalaire V , ce qui impose donc une seule valeur à calculer en chaque point, de plus on est assuré de l'existence et de l'unicité de la solution lorsque les conditions aux limites du problème à étudier s'expriment en fonction de V ou de sa dérivée normale [28, 29, 50].

I.7.1.2 Modèle électrocinétique

On suppose maintenant que les charges électriques qu'on étudie sont mobiles. Ce modèle est utilisable lorsqu'on veut étudier la répartition du courant électrique dans des conducteurs isolés soumis à des différences de potentiel continues.

Dans ce cas le modèle est défini par les équations suivantes :

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \vec{E} = \vec{0} \quad \text{car} \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{I. 21})$$

$$\text{Div} (\vec{J}) = 0 \quad \text{conservation du courant} \quad (\text{I. 22})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{I. 23})$$

Avec :

σ : conductivité électrique

L'équation (I.21) implique qu'il existe un potentiel électrique scalaire V telle que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{Grad}} V \quad (\text{I. 24})$$

Ce potentiel est appelé la tension électrique, on aura donc à résoudre :

$$\text{Div} (\sigma \overrightarrow{\text{Grad}} V) = 0 \quad (\text{I. 25})$$

Dans le cas où le conducteur n'est plus soumis à des différences de potentiel continue, ce modèle n'est plus valable, car la variation du champ magnétique crée des courants induits qui modifient la répartition du courant global dans le conducteur [29, 49, 50].

I.7.1.3 Modèle magnétostatique scalaire

Dans ce modèle, on suppose que les courants électriques sont nuls dans la pièce à étudier et que les champs magnétiques ne dépendent pas du temps, autrement dit l'existence de courant stationnaires (indépendant du temps) entraîne l'apparition de champs magnétiques eux même indépendants du temps, dont l'étude constitue la magnétostatique. On obtient alors les relations suivantes [28, 29, 50] :

$$\overline{\text{Rot}} \vec{H} = 0 \quad \text{car les courants sont nuls} \quad (\text{I.26})$$

$$\text{Div}(\vec{B}) = 0 \quad \text{conservation du champ} \quad (\text{I.27})$$

C'est le cas des dispositifs pour lesquels les champs sont créés par des forces magnétomotrices extérieures et indépendantes du dispositif étudié, ou bien par l'effet d'aimants permanents pour lesquels on a la loi de constitution des matériaux :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{I.28})$$

La relation (I.26), implique qu'il existe une fonction Φ , potentiel scalaire magnétique telle que :

$$\text{Div}(\mu \overline{\text{Grad}} \phi) = \text{Div}(\vec{B}_r) \quad (\text{I.29})$$

On obtient alors :

$$\vec{H} = -\overline{\text{Grad}} \phi \quad (\text{I.30})$$

I.7.1.4 Modèle magnétostatique vectoriel

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps, le terme $\partial B/\partial t$ est nul et les champs électriques \vec{E} et magnétique \vec{B} sont découplés, par contre on désire modéliser un objet parcouru par des courants non nuls, on obtient alors les équations suivantes :

$$\overline{\text{Rot}} \vec{H} = \vec{J} \quad \text{car les courants traversent les zones étudiées} \quad (\text{I.31})$$

$$\text{Div}(\vec{B}) = 0 \quad \text{conservation du champ} \quad (\text{I.32})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B} \quad \text{loi de constitution des matériaux} \quad (\text{I.33})$$

Avec :

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

μ_0 : perméabilité du vide ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$)

μ_r : perméabilité relative

L'équation (I.32), permet de définir une fonction vectorielle \vec{A} appelée potentiel vecteur magnétique telle que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A} \quad (\text{I.34})$$

Pour que \vec{A} soit totalement défini, il faut fixer sa divergence en utilisant la jauge de coulomb :

$$\text{Div}(\vec{A}) = 0 \quad (\text{I.35})$$

On obtient donc le système d'équations suivant :

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A} \right) = \vec{J} + \overrightarrow{\text{Rot}} \left(\frac{1}{\mu} \vec{B}_r \right) \quad (\text{I.36})$$

Dans les problèmes bidimensionnels, système suffisamment long ou à symétrie axiale, le potentiel vecteur magnétique se réduit à une seule composante, ce qui rend ce modèle attrayant pour la résolution de tels problèmes [6, 29,49, 50].

I.7.1.5 Modèle magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs électromagnétiques dans lesquels les sources de courant ou de tension varient en fonction du temps. Le terme $\partial \vec{B} / \partial t$ n'est pas nul, les champs électriques et magnétiques sont alors couplés par la présence des courants induits.

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \vec{E} = - \partial \vec{B} / \partial t \quad (\text{I.37})$$

$$\text{Div}(\vec{B}) = 0 \quad (\text{I.38})$$

La deuxième équation montre que \vec{B} est un champ de rotationnel. Ceci implique qu'il existe un vecteur \vec{A} telle que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A} \quad (\text{I.39})$$

Ce vecteur \vec{A} est appelé le potentiel vecteur magnétique.

La substitution de (I.39) dans (I.37) donne:

$$\overline{\text{Rot}} (\vec{E} + \partial \vec{A} / \partial t) = 0 \quad (\text{I.40})$$

La relation (I.40) permet de définir un potentiel électrique scalaire V du champ électromagnétique telle que :

$$(\vec{E} + \partial \vec{A} / \partial t) = -\overline{\text{Grad}} V \quad (\text{I.41})$$

$$\vec{E} = -\partial \vec{A} / \partial t - \overline{\text{Grad}} V \quad (\text{I.42})$$

Alors en régime variable, l'expression de \vec{E} dépend à la fois de V et de \vec{A} .

A partir de l'équation:

$$\overline{\text{Rot}} \vec{H} = \vec{J}_t \quad (\text{I.43})$$

avec :

$$\vec{J}_t = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) \quad (\text{I.44})$$

σ : conductivité électrique

$\vec{J} = \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B})$: courant induit (loi de Laplace)

u : vitesse du dispositif en mouvement

$$\overline{\text{Rot}} \vec{H} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) \quad (\text{I.45})$$

Pour que la solution soit unique, on doit fixer la divergence de \vec{A} .

$$\overline{\text{Rot}} (\mu \overline{\text{Rot}} \vec{A}) = -\frac{v}{\partial t} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \overline{\text{Grad}} V - \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) + \vec{J}_s \quad (\text{I.46})$$

$$\text{Div} (\vec{A}) = 0 \quad (\text{I.47})$$

v : reluctace magnétique

Dans le cas où les courant induits par mouvement sont nuls et aussi le $\overline{\text{Grad}} V$ en axisymétrique est nul l'équation du système devient:

$$\overline{\text{Rot}} (\mu \overline{\text{Rot}} \vec{A}) + \frac{v}{\partial t} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (\text{I.48})$$

L'utilisation de ce modèle est très répandue dans l'étude des machines électriques des dispositifs de chauffage par induction, des transformateurs,...etc. [28, 48, 49].

Le choix d'un modèle par rapport à un autre dépend des particularités et spécificités des domaines étudiés ainsi que la nature et forme des grandeurs y afférentes.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une façon générale la théorie relative aux champs électromagnétiques, ainsi que les différentes sources naturelles et artificielles dont ils proviennent, aussi les différents modèles électromagnétiques ont été abordés.

Cependant, l'existence des interactions des champs électriques et magnétiques avec les tissus biologiques des êtres vivants a engendré plusieurs inquiétudes et questionnements sur les effets biologiques et sanitaires de ces champs en fonction de leur fréquence et de leur intensité vis-à-vis de la matière vivante et des tissus qui la constituent car les tissus biologiques, en tant qu'éléments matériels, sont soumis aux lois de la physique et de la chimie et les actions des champs sur la « matière vivante » ne peuvent être expliquées que par l'application stricte des lois établies dans les sciences de la matière.

A cet égard, nous allons consacrer le prochain chapitre aux effets biologiques et sanitaires des champs électromagnétiques à basse fréquence générés par les lignes THT de transport de l'électricité.

Chapitre II

Effets Biologiques des Champs Electromagnétiques

Chapitre II

Effets Biologiques des Champs Electromagnétiques

Introduction

Les effets biologiques des champs électromagnétiques sur l'être humain, les animaux et les plantes sont devenus un sujet intéressant pour les chercheurs scientifiques et la population pour les risques significatifs de leucémies ou de tumeurs cérébrales. Les lignes de transmission haute et très haute tension à proximité des maisons, des usines et des écoles sont source de champs électromagnétiques [4, 5, 51].

La question de l'impact sanitaire des champs électromagnétiques basses fréquences a été étudiée depuis plusieurs décennies, notamment après la publication en 1979 d'une étude épidémiologique qui a fait date sur le sujet [Wertheimer et Leeper, 1979]. Wertheimer et Leeper ont noté la présence, dans le Colorado (États-Unis) entre 1976 et 1977, de réseaux électriques qui pouvaient impliquer de forts champs magnétiques dans l'environnement d'habitations dans lesquelles des enfants avaient développé des cancers. Les deux chercheurs ont donc avancé l'hypothèse d'une relation de cause à effet entre un indicateur de l'exposition aux champs magnétiques extrêmement basses fréquences (EBF) et l'excès de risque de cancer. Par la suite, de nombreux travaux ont été publiés dans le monde, aussi bien dans les domaines de l'épidémiologie que des recherches d'effets de ces champs *in vitro* et *in vivo*, ou encore de mécanismes d'action biologique [1]. Ces travaux ont donné lieu à des revues d'études, des méta-analyses, et de nombreux rapports d'expertise nationaux ou internationaux. Si la recherche est encore active sur le sujet, elle l'est manifestement moins qu'il y a quelques années, en raison probablement des nombreux résultats négatifs enregistrés. Néanmoins, l'incertitude qui entoure encore cette question des effets sanitaires des champs EBF, nourrie notamment par la publication régulière d'études dont les résultats sont parfois difficilement

interprétables, alimente les questions et les préoccupations du public, focalisée notamment autour des ouvrages de transport d'électricité.

En Algérie la société de Gestion du réseau de transport de l'électricité GRTE assure le transport de l'électricité à l'échelle nationale par un réseau électrique maillé et interconnecté constitué principalement de ligne 60 kV et 220 kV ainsi que le palier 400 kV récemment introduit en Algérie.

A cet égard, la longueur du réseau de transport de l'électricité en Algérie avoisine les 30 000 km toute tension confondue [19, 20, 32]. Or, si les lignes sont souvent éloignées des habitations, ce n'est pas toujours le cas : certains tronçons passent à seulement quelques mètres des riverains figure II.1.



Figure II.1 Vivre à proximité des lignes très haute tension

Aussi, cette problématique pose des inquiétudes et alimente des sujets de discussions et constitue des craintes pour la population qui manifeste à tort ou à raison une opposition accrue à tout nouveau projet de construction de lignes de transport de l'électricité. En Algérie cette attitude a été amplifiée du fait de la rareté de travaux de recherches scientifiques en relation avec le domaine des effets sanitaires liés aux champs électromagnétiques induits par les lignes de transport de l'électricité.

Le risque pour la santé des personnes exposées aux champs électriques et magnétiques EBF a été largement étudié car tous les pays développés sont concernés. Depuis plus de trente ans, les recherches n'ont pu établir aucun effet biologique et aucun mécanisme par lequel ces champs pourraient être dangereux n'a été mis en évidence. Cependant, la communauté scientifique reste divisée et la méfiance de la population ne désarme pas. Mystérieux,

invisibles, impalpables et d'autant plus menaçants, ces champs magnétiques EBF seraient ainsi responsables, pour 75 % des Européens, de plus de stress, de nervosité, d'irritabilité et d'insomnies, mais surtout de l'augmentation du nombre des cancers, notamment des leucémies infantiles [27].

Les champs magnétiques EBF n'ont pas une énergie suffisante pour endommager les chromosomes. Ils ne peuvent donc pas déclencher la première étape de l'évolution d'une cellule normale vers une cellule cancéreuse. Sur des cultures biologiques, aux niveaux d'exposition rencontrés, les études n'ont jamais montré de manière reproductible d'effet de promotion, c'est-à-dire de prolifération de cellules précancéreuses. De nombreuses hypothèses ont été testées ; aucune n'a été confirmée [3, 51].

Selon le Centre International de Recherche contre le Cancer de l'OMS (CIRC), ce n'est pas l'exposition aux lignes à haute tension qui serait possiblement cancérogène, mais le champ magnétique, quelle qu'en soit l'origine, et dans des circonstances aussi précises que rarement rencontrées.

A ce titre, les lignes de transport de l'électricité ne représentent que 20 % des expositions les plus élevées aux champs magnétiques d'extrêmement basse fréquence. Les autres expositions proviennent notamment des transports et des applications domestiques de l'électricité [52].

Selon des publications scientifiques internationales effectuées par le comité scientifique sur les risques émergents et nouvellement identifiés pour la santé (SCENHIR) de la commission européenne, s'il existe une association, dans certaines études épidémiologiques, entre les CEM émis par les lignes et une forme rare de leucémie chez l'enfant, aucun élément nouveau n'est intervenu et l'éventuelle relation de cause à effet reste indéterminée.

Depuis 30 ans, la plupart des travaux a écarté l'hypothèse de risques pour la santé, même si les cas de leucémie lymphoïde aigue (LLA) chez l'enfant doivent faire l'objet de recherches supplémentaires.

Au final, l'organisation mondiale de la santé (OMS 2007, aide mémoire 322) considère comme insuffisantes les preuves scientifiques d'un possible effet sanitaire à long terme.

Depuis 2008, la société gestionnaire du réseau de transport d'électricité en France (RTE) et des associations se sont engagés à mettre en œuvre des actions conjointes relatives aux enjeux liés au transport d'électricité.

En effet, les lignes haute et très haute tension, indispensables à toute forme d'activité, peuvent être aujourd'hui source de questionnement dans l'opinion publique.

Les interrogations sont le plus souvent liées au fait de vivre à proximité de ces lignes et à la crainte d'un éventuel impact sur la santé [1, 27, 51, 52].

II.1 Champs électromagnétiques et santé publique

Les champs électromagnétiques (CEM) existent à l'état naturel et ont donc toujours été présents sur terre. Toutefois, au cours du vingtième siècle, l'exposition environnementale à des sources de CEM fabriquées par l'homme a progressivement augmenté du fait de la demande en électricité, des technologies sans fil toujours plus pointues et des changements survenus dans le monde de travail et le comportement social. Tout le monde est exposé à un mélange complexe de champs électriques et magnétiques de différentes fréquences, à la maison comme au travail [53].

Les CEM peuvent en gros être divisés en champs électriques et magnétiques statiques et de basse fréquence, dont les sources courantes sont constituées par les lignes électriques, les appareils domestiques électriques et les ordinateurs, et en champs de haute fréquence ou de radiofréquence, dont les principales sources sont constituées par les radars, les installations de diffusion radiophonique et télévisée, les téléphones mobiles et leurs stations de base, les systèmes de chauffage à induction et les dispositifs antivol. Contrairement aux rayonnements ionisants, comme les rayons gamma émis par les matières radioactives, les rayons cosmiques et les rayons X qui se situent dans la partie supérieure du spectre électromagnétique figure I.3, les CEM sont beaucoup trop faibles pour casser les liaisons qui relient les molécules entre elles dans les cellules et ne peuvent par conséquent produire d'ionisation [41, 51, 52]. C'est pourquoi les CEM basses fréquences sont appelés rayonnements non ionisants.

II.2 Exposition aux champs électromagnétiques

À l'état naturel, des courants électriques existent dans l'organisme humain et constituent une partie essentielle des fonctions organiques normales.

Tous les nerfs transmettent leurs signaux par des impulsions électriques. La plupart des réactions biochimiques, depuis celles associées à la digestion jusqu'à celles impliquées dans l'activité cérébrale, font intervenir des phénomènes électriques [1, 51].

Aux basses fréquences, les CEM passent à travers l'organisme alors qu'aux fréquences radio les champs sont partiellement absorbés et ne pénètrent que très peu dans les tissus [2, 5, 27]. Les champs électriques ne pénètrent pas beaucoup dans l'organisme mais accumulent une

charge sur sa surface, tandis que l'exposition à des champs magnétiques provoque la circulation de courant dans l'organisme (Figure II.2). Le niveau de ce dernier dépend de l'intensité du champ magnétique extérieur et de la taille de la boucle à travers laquelle le courant circule. Lorsqu'ils sont suffisamment importants, ces courants peuvent provoquer une stimulation nerveuse et musculaire [51, 54].

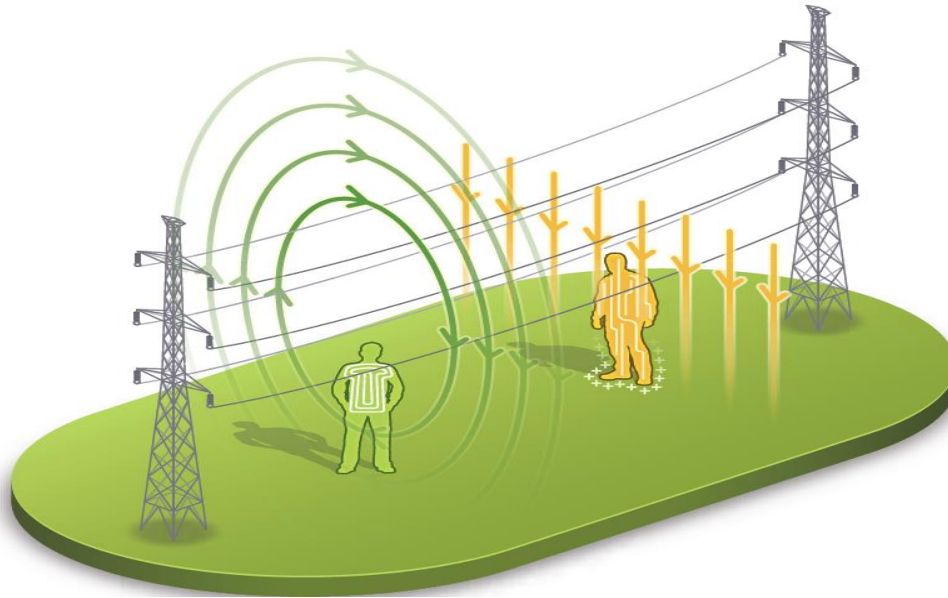


Figure II.2 Exposition à des champs électromagnétiques

Les connaissances scientifiques concernant les effets des CEM sur la santé sont substantielles et basées sur un grand nombre d'études épidémiologiques, ainsi que d'études sur l'animal et sur la cellule en culture [52, 55].

Selon un inventaire de l'ensemble des publications scientifiques internationales effectué par le Comité scientifique sur les risques émergents et nouvellement identifiés pour la santé (SCENHIR) de la commission européenne, s'il existe une association, dans certaines études épidémiologiques, entre les CEM émis par les lignes et une forme rare de leucémie chez l'enfant, aucun élément nouveau n'est intervenu et l'éventuelle relation de cause à effet reste indéterminée.

La publication par le centre international de recherche sur le cancer (CIRC), en 2002, du classement des champs magnétiques extrêmement basses fréquences dans la catégorie 2B (cancérogènes possibles pour l'homme), en raison des incertitudes persistantes liées aux études épidémiologiques ayant associé l'exposition à ces champs avec un excès de risque de

leucémies infantiles, a marqué un tournant dans l'expertise des risques sur ce sujet [27, 52, 55]. Cependant trois cas font débat :

l'électrohypersensibilité, certaines maladies neurodégénératives et les leucémies infantiles.

II.2.1 Electrohypersensibilité

Les symptômes d'hyper-sensibilité électromagnétique regroupent divers troubles : maux de tête, irritabilité, vertiges, état dépressif, sommeil perturbé, perte de mémoire, perturbations auditives, visuelles,...etc. Officiellement, ces troubles n'ont pas de lien causal démontré et pourraient relever d'un effet nocebo, c'est à dire d'une nuisance imaginée mais qui peut avoir de véritables effets sur la santé.

Une anecdote témoigne de cet effet nocebo. Plusieurs médias ont relayé cette plainte collective à Saint-Cloud en avril 2009 suite à l'installation de deux antennes relais à proximité de logements. Les symptômes étaient inquiétants : saignement de nez, maux de tête, sensations désagréables,...etc. Et pourtant, les antennes n'étaient ni branchées, ni en fonctionnement. Ainsi, l'électrohypersensibilité demeure un syndrome auto-déclaré et non diagnostiqué [52].

II.2.2 Maladies Neurodégénératives

Selon le rapport de l'office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), des études ont mis en avant un lien avec certaines maladies neurodégénératives, notamment Alzheimer chez les conducteurs de train en Suisse. Il s'agit d'une hypothèse. C'est pourquoi, le rapport recommande de conduire les recherches appropriées et notamment de mener une étude épidémiologique auprès des conducteurs de train de la société de gestion ferroviaire. Cette dernière étude a été négative [52].

II.2.3 Leucémies

Selon le rapport de l'office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), ces maladies touchent essentiellement les enfants de 0 à 6 ans. Elles sont multifactorielles et rares (470 cas/an en France). Les champs magnétiques, en général, n'en expliqueraient qu'entre 3 et 12, et ceux émis par les lignes à haute et très haute tension que 0,5 à 3.

Le risque est donc très faible mais l'inquiétude n'est pas illégitime. Par conséquent, le rapport a proposé une nouvelle évaluation par l'agence Française de sécurité sanitaire de

l'environnement et du travail (AFSSET) en 2015 et de relancer les recherches et d'éviter d'augmenter le nombre d'enfants exposés [52].

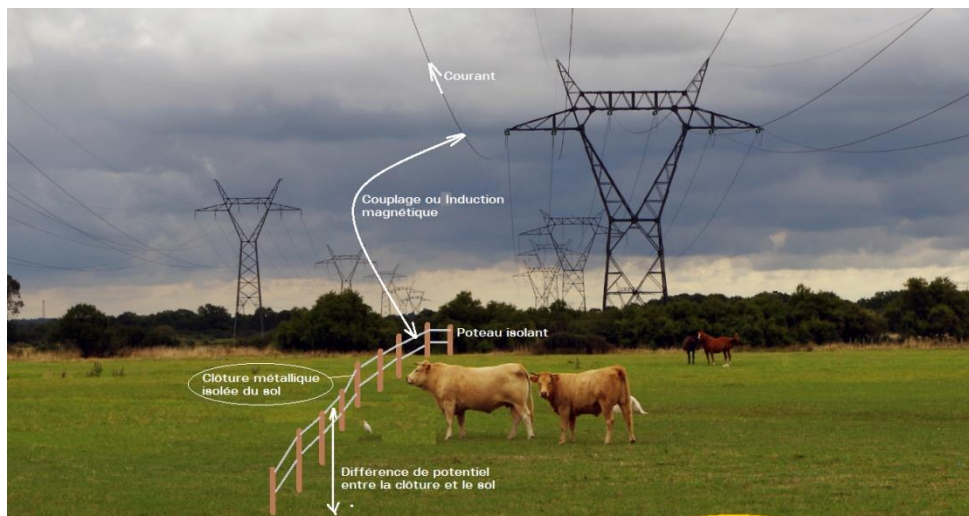
En 30 ans de recherches biomédicales en laboratoire, et sur des populations réelles, aucun lien de causalité entre l'exposition aux champs électriques et magnétiques générés par les lignes à haute tension et des effets sur la santé n'a été établi. Les études expérimentales (menées en laboratoire), n'ont pas mis en évidence, de manière reproductible, un mécanisme d'action des champs électromagnétiques même à des niveaux d'exposition très supérieurs aux niveaux habituels.

Les études épidémiologiques (études de populations exposées aux champs) ont conduit les autorités scientifiques et médicales à conclure à l'absence de preuve de relation causale entre les champs et la santé. On peut rajouter qu'aucune étude n'a pu apporter la preuve d'un effet sur la santé aux niveaux d'exposition que l'on rencontre au voisinage d'une ligne à haute tension [1, 51, 52, 54, 55].

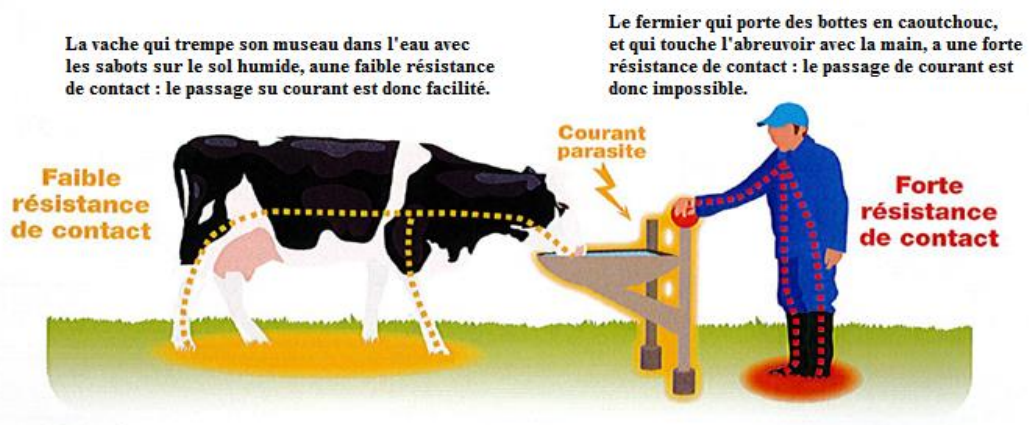
II.3 Courants parasites et santé des animaux d'élevage

Aucune étude n'a permis de mettre en évidence un effet des champs électriques et magnétiques extrêmement basse fréquence sur la santé des animaux d'élevage. En revanche, des courants électriques parasites peuvent apparaître dans les installations agricoles et les champs électriques et magnétiques constituent une des sources possibles. En tout état de cause, si les courants parasites (ou vagabonds) peuvent avoir un effet sur les animaux, ce ne peut donc être qu'un effet indirect des champs [55].

Les courants électriques parasites apparaissent sur les éléments métalliques de l'installation et peuvent avoir plusieurs origines. Souvent il s'agit d'une déficience de l'installation électrique et/ou des équipements de l'exploitation agricole. Au fil des ans, humidité et vieillissement des gaines des câbles électriques sont à l'origine de défauts d'isolation. Une autre cause d'apparition de courants parasites peut être la présence de lignes à haute tension à proximité. Dans ce cas, ils se manifestent essentiellement sur les structures métalliques présentant des dimensions importantes comme une toiture, une clôture, voire une mangeoire ou un abreuvoir.



(a)



(b)

Figure II.3 (a, b) Exposition des animaux aux champs magnétiques

Les courants parasites ne sont pas immédiatement détectables par l'exploitant agricole, car ses bottes en caoutchouc l'isolent du sol, raisons pour laquelle le problème est méconnu de nombreux exploitants. Mais il est assez simple de les éradiquer : une vérification de l'installation électrique de l'exploitation, puis une simple mise à la terre de ses structures métalliques doit suffire à les éliminer.

Le Groupe permanent de sécurité électrique (GPSE) exclu tout lien avec les CEM émis par les lignes HT et THT.

En effet, de nombreuses données scientifiques internationales excluent tout effet direct des champs sur les animaux. "En revanche, ils peuvent provoquer des courants induits ou de fuite

qui ont, s'ils sont suffisamment importants, des conséquences négatives sur les élevages", souligne le rapport de l'OPECST.

Cependant, chez les bovins laitiers la plupart des études en milieu expérimental contrôlé, montre que les courants parasites (dans la gamme des niveaux d'intensité testés) n'ont pas d'impact sur les performances laitières des animaux. En ce qui concerne les effets des CEM, les résultats des quelques études conduites en milieu contrôlé rapportent des effets potentiels sur les performances des animaux (augmentation de l'ingéré et impact variable sur la production laitière), chez des vaches en production exposées sur une durée n'excédant pas 30 jours à des CE et/ou CM de 10 kV/m et/ou 30 μ T. Dans toutes ces études, les conditions sont extrêmement bien contrôlées et donc loin de refléter celles rencontrées en élevage, ce qui explique sans doute les effets différents observés sur les performances zootechniques entre des essais expérimentaux et les observations faites en élevage.

L'immense majorité des résultats des essais de terrain, conduits à proximité de lignes HT/THT ne montre pas d'effet détectable des CEM sur les performances et la santé des bovins, à l'exception d'une enquête sur la fertilité dans deux troupeaux Suédois. Ces résultats sont toutefois à considérer avec les réserves suivantes : l'intensité du CEM et la durée d'exposition des animaux sont variables d'un essai à l'autre ; les CE et CM n'ont pas été précisément mesurés et les valeurs moyennes données sont seulement des estimations ; dans certains essais, les animaux pourraient n'avoir jamais été exposés pendant certaines parties de la journée, voire pendant plusieurs jours consécutifs parce que le courant circulant dans les lignes HT/THT varie, tout comme la distance entre les animaux et la ligne (les animaux dans des enclos se déplacent et ne sont pas en permanence à la valeur de champ la plus élevée).

Ces variations de courant dans les lignes ainsi que les déplacements des animaux peuvent affecter l'intensité du CEM auquel les animaux sont exposés et en conséquence leurs réponses comportementale, zootechnique et physiologique.

Dans le cas des volailles, il apparaît un effet tératogène des CEM mais avec un effet fenêtre (Un effet fenêtre correspond à une réponse non linéaire, c'est à dire un effet négatif moins important pour les intensités de champ les plus fortes ou les plus faibles).

Dans tous les cas, les données de la littérature disponibles sur les animaux de rente ne permettent pas de conclure sur un effet majeur et spécifique des CEM sur les performances et la santé des animaux, en particulier dans des intensités d'exposition inférieure à 100 μ T.

Notons que les champs électromagnétiques provenant des lignes à haute tension peuvent changer le comportement des abeilles qui y sont sensibles car ils ont de petits cristaux abdominaux qui contiennent de la magnétite (BEES, BIRDS AND MANKIND Destroying Nature by 'Electrosmog' ; Ulrich Warnke ; 2007).

Outre les effets éventuels des CEM sur les animaux, des études datant de fin 2011 montrent que dans la région Afrique-Eurasie, de l'ordre de 10 000 oiseaux meurent chaque année par électrocution et 100 000 par collision avec les lignes électriques. En général, les oiseaux de grande taille semblent les plus touchés [52].

II.4 La réglementation sur les champs électromagnétiques

Des dispositions réglementaires au niveau européen, fixent des seuils d'exposition aux champs électromagnétiques. Ceux-ci sont très largement supérieurs aux moyennes généralement constatées dans notre vie quotidienne. Ils sont aussi très inférieurs aux niveaux d'exposition pour lesquels certaines études en laboratoire ont pu mettre en évidence un effet avéré, c'est à dire détectable et reproductible. Ainsi, les seuils de la réglementation ont été élaborés pour garantir un niveau élevé de protection par rapport aux effets avérés sur la santé qui peuvent résulter de l'exposition à des champs électromagnétiques [55, 56].

En matière de champs électriques et magnétiques extrêmement basse fréquence, la recommandation européenne fixe les seuils de 5 kV/m pour le champ électrique et de 100 μ T pour le champ magnétique (valeurs limites d'exposition donnés par ICNIRP, 1998). Ces valeurs ont été aussi adoptées par l'état Algérien.

Il existe plusieurs types de normes en CEM établies par des organismes, comme le Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (CENELEC), l'Institut Européen de Normalisation en Télécommunication 24 (ETSI), pour choisir des normes concernant les limites admissibles de perturbation, à savoir les limites de susceptibilité des équipements électriques et de télécommunication [41, 54, 57, 58]. Ces normes ont été définies et caractérisées vis-à-vis de l'environnement du public. Deux grandes organisations internationales proposent des limites d'exposition aux CEM pour le public (Tableau II.1) : l'ICNIRP et l'IEEE. Puisque des facteurs de sécurité (pour l'exposition de la population générale, le niveau de restriction de base contient un facteur de sécurité d'au moins cinq pour l'ICNIRP et de trois pour l'IEEE par rapport au seuil à partir duquel un effet sur la santé est observable. En pratique, l'utilisation d'hypothèses et de modèles prudents dans le calcul des niveaux de référence ajoute un élément de sécurité additionnel. Par exemple, le niveau de

référence de l'ICNIRP pour le CM à 50/60 Hz est environ 25 fois plus faible que le seuil d'apparition des phosphènes est inclu dans les restrictions de base, les limites d'exposition proposées par ces organisations se situent à des niveaux significativement inférieurs aux seuils d'exposition entraînant des effets par stimulation des tissus électriquement excitables. Le niveau de référence (Les niveaux de référence sont dérivés à partir des restrictions de base de manière à fournir aux utilisateurs des limites d'exposition qui sont plus faciles à mesurer en pratique. Le respect des niveaux de référence assure le respect de la restriction de base) pour le CM à 50/60 Hz recommandée par l'ICNIRP (2010) est de 200 μT , tandis que l'IEEE (2002) propose un niveau de référence de 904 μT . Cette différence s'explique par le fait que ces deux organisations ont utilisé des restrictions de base similaires (Les restrictions de base sont fixées à partir du champ magnétique interne qui détermine le seuil d'effets néfastes à la santé, auquel s'ajoute un facteur de sécurité), mais des modèles du corps humain différents pour le calcul de leurs niveaux de référence (ICNIRP, 2010; INRS, 2011). C'est d'ailleurs l'évolution de la précision de ces modèles qui a permis à l'ICNIRP d'augmenter le niveau de référence de 100 μT recommandée en 1998 à 200 μT en 2010 tout en maintenant le facteur de sécurité entre la restriction de base et le seuil d'exposition nécessaire pour produire un effet chez l'humain.

La limite de 200 μT de l'ICNIRP est une valeur d'exposition « instantanée ». L'ICNIRP a dérivé cette valeur limite à partir d'effets aigus liés à l'induction de courants électriques dans le corps. En raison des preuves scientifiques trop faibles concernant des effets de l'exposition chronique à des niveaux plus faibles que 200 μT , aucune recommandation liée à l'exposition à long terme n'est proposée pour les champs magnétiques extrêmement basse fréquence.

Par ailleurs, on ne trouve aucune norme établissant les limites d'émission et de susceptibilité entre un équipement et un autre, car il est impossible d'établir des règles et de proposer des solutions fiables et faciles aux problèmes de CEM [59].

Organisation	Champs magnétiques de 50/60 Hz
ICNIRP, 1998	100 μT
ICNIRP, 2010	200 μT
IEEE, 2002	904 μT

Tableau II.1 Limites d'exposition aux CEM pour le public

La recommandation européenne, qui préconise les mêmes limites que l'ICNIRP, 1998 répond à l'objectif déclaré d'offrir à tous les citoyens de la communauté un niveau élevé de protection. En fixant, pour les extrêmement basses fréquences, les limites d'exposition à un niveau 50 fois inférieur au seuil d'apparition des premiers effets, la recommandation européenne couvre implicitement les effets éventuels à long terme.

II.5 Communication du risque du aux champs électromagnétiques avec la population

Le progrès technologique dans son sens le plus large a toujours été associé à des dangers et à des risques, qu'ils soient perçus ou réels. Les applications industrielles, commerciales et domestiques des CEM n'y font pas exception.

De par le monde, certains éléments de la population se sont inquiétés par le fait que l'exposition aux CEM provenant des lignes à haute tension, des radars, des téléphones mobiles et de leurs stations de base pourrait avoir des conséquences nocives pour la santé, en particulier chez l'enfant. Les préoccupations du public concernant les nouvelles technologies naissent souvent de la méconnaissance de ces dernières et de la perception d'un danger lié à des forces qui ne sont pas palpables, on peut dire aussi que les sources particulières de CEM génèrent souvent une grande angoisse dans la population. Cette angoisse peut conduire les gens à s'opposer fortement à l'établissement de ces installations. Lorsque l'opposition de la communauté monte, c'est souvent parce que la communication ne s'est pas établie suffisamment tôt pour pouvoir s'assurer de la compréhension et de la confiance du public. C'est pour cette raison que la perception du risque et que la communication en matière de risque sont des aspects importants de la question des CEM [41, 56, 57, 58].

II.5.1 Règles élémentaires de l'évaluation du risque

L'évaluation du risque est un processus organisé utilisé pour décrire et estimer la probabilité qu'une exposition environnementale à un agent puisse avoir des conséquences indésirables pour la santé. Les quatre étapes de ce processus sont les suivantes [51] :

- 1- reconnaissance de l'existence d'un agent ou d'une exposition potentiellement dangereux (p. ex., une substance ou une source d'énergie particulière).
- 2- estimation du rapport qui existe entre la dose ou l'exposition à un agent ou à une situation donnés et l'incidence et/ou la gravité de l'effet qui en résulte.

- 3- évaluation de l'importance de l'exposition ou de l'exposition potentielle en situation réelle.
- 4- synthèse de l'information disponible concernant une situation potentiellement dangereuse sous une forme utile pour les décideurs et les parties prenantes.

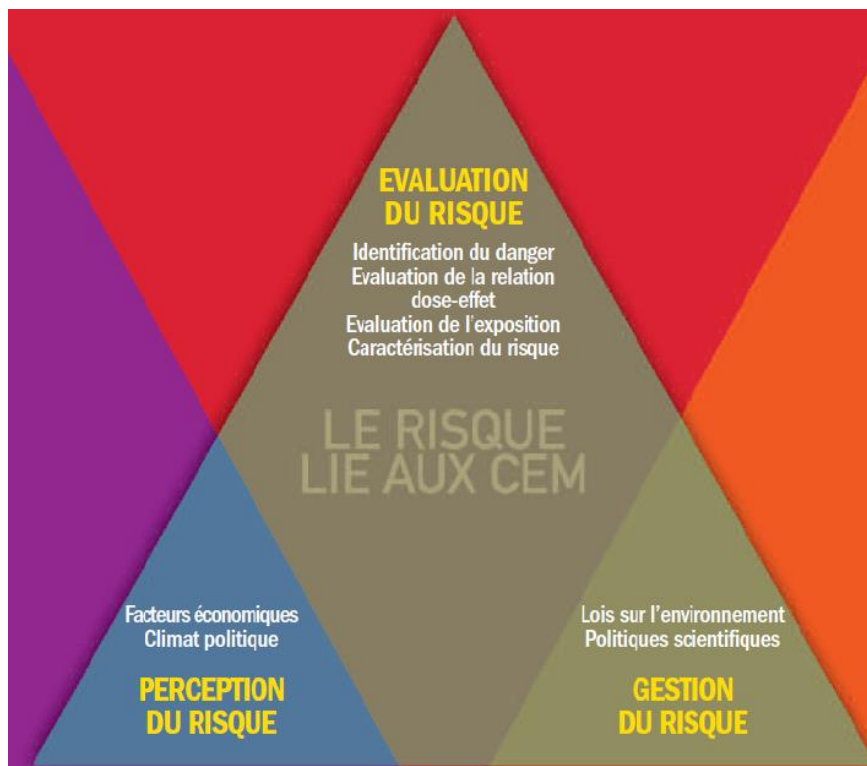


Figure II.4 Evaluer, interpréter et édicter des règlements concernant les risques associés aux CEM

Les scientifiques estiment le risque sanitaire en pondérant et en évaluant de façon critique toutes les données scientifiques disponibles afin de mettre au point une évaluation du risque valable.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu modeste sur les recherches scientifiques des différents centres et organisations internationaux de santé des effets sanitaires des champs électromagnétiques et qu'un collectif d'associations mobilisé contre la construction d'une ligne à très haute tension a commandé une étude sur les risques sanitaires associés.

Les premiers résultats montrent que les personnes vivant à proximité d'une ligne à très haute tension auraient plus de problèmes de santé (maux de tête, troubles du sommeil, irritabilité, etc.), voire plus de maladies graves que les autres.

Toutefois, l'OMS (Organisation mondiale de la santé) note que jusqu'ici, aucun effet sanitaire indésirable résultant d'une exposition prolongée à des radiofréquences ou aux fréquences correspondant au transport d'énergie électrique n'a été confirmé.

Aussi, une très grande diversité d'expérimentations et de résultats, est observée avec un manque de standardisation de protocoles de référence et de méta-analyses. De ce fait, les conclusions sont très difficiles à tirer.

Les études sur les animaux d'élevage restent peu nombreuses. Les études épidémiologiques à grande échelle, qui permettraient de mettre en évidence les effets éventuels des CEM-EBF d'origine externe (lignes THT par exemple) et internes (équipements électriques) sur les caractères de production, de santé et de bien-être des animaux d'élevage, sont inexistantes. Il en est de même pour les courants parasites en général et ceux éventuellement générés par les CEM-EBF en particulier.

A ce titre, concernant la population, les lignes de transport de l'électricité ne représentent que 20 % des expositions les plus élevées aux champs magnétiques d'extrêmement basse fréquence. Les autres expositions proviennent notamment des transports et des applications domestiques de l'électricité.

Par ailleurs, l'évaluation des champs électromagnétiques engendrés par les lignes THT d'interconnexion et de transport de l'électricité nécessite impérativement une connaissance approfondie de la théorie de construction des lignes ainsi que tous les éléments constitutifs y compris la forme et les dimensions des pylônes, la nature, les caractéristiques et composantes des câbles conducteurs ainsi que les charges et puissances transitées.

A ce titre, la théorie et les concepts de construction des lignes constituant le réseau de transport de l'électricité Algérien feront l'objet du prochain chapitre.

Chapitre III

Lignes de Transport de l'Electricité

Chapitre III

Lignes de Transport de l'Electricité

Introduction

Habituellement, le transport de l'énergie électrique n'a pas le même intérêt que sa production et son utilisation, de sorte qu'on a souvent tendance à négliger l'étude de ce sujet important. Pourtant, les investissements humains et matériels affectés au transport dépassent largement les investissements consacrés au secteur de la production.

Un réseau de transport d'électricité connecte les lieux de production aux centres de consommations. Pratiquement dès la naissance de l'industrie électrique, à la fin du XIXe siècle, très tôt et très vite, les réseaux électriques se sont développés en s'interconnectant : construire une infrastructure de réseau maillée permet à la fois de rendre une meilleure qualité de fourniture et de limiter considérablement les ressources nécessaires pour produire l'électricité. Cette infrastructure de réseau électrique – comme tout autre type de réseau – est en cela d'autant plus efficace qu'elle interconnecte davantage d'utilisateurs. Ainsi le réseau constitue-t-il une réponse à trois types de préoccupations : la sécurité d'approvisionnement, l'économie, la desserte du territoire.

Le réseau permet de marier un mix énergétique, qui tire le meilleur parti de chaque filière et organise la complémentarité de ces moyens de production, du moins cher au plus cher. Ainsi le réseau permet-il de limiter à la fois le coût des investissements et d'exploitation du système électrique dans son ensemble et la consommation des ressources naturelles.

Grâce au réseau, les utilisateurs peuvent s'installer sur tout le territoire, et pas seulement à proximité des centres de production, sans se soucier de leur alimentation électrique. Réciproquement, il est possible de tirer parti de ressources éloignées des centres de consommation (par exemple hydraulique de montagne, énergies en mer, etc.) pour produire l'électricité dont les utilisateurs ont besoin. Le réseau est ainsi l'outil-clé dans la composition d'un bouquet énergétique optimal.

L'énergie électrique est la seule à ne pas pouvoir être stockée sous sa forme naturelle.

Un grand réseau doit donc être structuré en forme de maillage afin de constamment adapter la disponibilité aux besoins en détournant et déversant la puissance électrique d'un réseau à l'autre. Statistiquement, les variations individuelles sont noyées dans un ensemble qui varie lentement en suivant les tendances de la consommation du moment. Chaque nœud est un grand poste où convergent plusieurs lignes du réseau exploitées à différents niveaux de tension. L'interconnexion permet au gestionnaire de gérer la demande et d'optimiser en tout temps la sécurité des approvisionnements et le rendement économique du parc de production.

Les lignes de transport et les postes d'énergie électrique haute et très haute tension (HT/THT) constituent une partie essentielle d'un réseau électrique.

Au début de l'année 2005 et avec le développement national et les nouvelles demandes de la clientèle, le palier 400 kV a été introduit dans le réseau électrique Algérien qui était constitué auparavant des niveaux de tension 220 kV, 150 kV, 90 kV et 60 kV [32].

III.1 Lignes électriques aériennes

La ligne à haute tension est l'une des principales formes d'infrastructures énergétiques, et le composant principal des grands réseaux de transport d'électricité. Elle transporte l'énergie par l'intermédiaire de l'électricité des centrales électriques au consommateur. Ces lignes sont aériennes, souterraines ou sous-marines, quoique les professionnels réservent plutôt ce terme aux liaisons aériennes.

Les lignes haute tension aériennes sont constituées principalement d'un ensemble de conducteurs assurant avant tout la continuité électrique et réalisant une connexion entre deux nœuds d'un réseau électrique, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes ou poteaux. [60, 61].

Aujourd'hui, certaines lignes sont régulièrement exploitées à des tensions supérieures à 400 kV.

Les lignes aériennes peuvent être classées suivant les fonctions qu'elles assurent dans le réseau à savoir [32] :

III.1.1 Lignes de grand transport

Elles servent au transport sur des longues distances de l'électricité produite par un centre de production vers un centre de consommation ou vers les grands postes d'interconnexion des réseaux électriques.

III.1.2 Lignes d'interconnexion

Elles assurent la mise en commun des ressources de production de plusieurs régions ou pays et facilitent ainsi le secours mutuel lors de situations particulières affectant la consommation et la disponibilité des équipements, etc. Les lignes d'interconnexion constituent un réseau maillé.

III.1.3 Lignes de répartition

Elles dirigent l'énergie depuis les grands postes d'interconnexion vers les postes alimentant les réseaux de distribution ou ceux des grands clients nationaux.

III.1.4 Lignes de distribution

Elles acheminent l'énergie aux différents consommateurs ; ces lignes se décomposent en lignes d'ossature à forte section de conducteur et en lignes d'écarts, essentiellement radiales, généralement plus légères.

III.2 Eléments constitutifs des lignes aériennes

Les lignes électriques assurent la fonction transport de l'énergie sur les longues distances. Elles sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en lignes, différentes des pertes Joule. L'ensemble de ces trois phases électriques constitue un terne.

Aussi, la nature, la silhouette, le dimensionnement ainsi que le choix du type des pylônes à utiliser lors de la construction des lignes de transmission de l'électricité sont des paramètres primordiaux qui impactent directement les valeurs des champs électromagnétiques qui seront engendrés par ces lignes une fois en exploitation, car le choix des autres constituants est imposé de facto par les règles techniques d'usage, c'est pourquoi nous allons détailler le volet théorique relatif aux pylônes.

Les pylônes sont tous soigneusement reliés à la terre par un réseau de terre efficace. Les pylônes supportent les conducteurs par des isolateurs en verre ou en porcelaine qui résistent aux tensions élevées des lignes électriques. Généralement la longueur d'un isolateur dépend directement de la tension de la ligne électrique qu'il supporte. Les isolateurs sont toujours munis d'éclateurs qui sont constitués de deux pointes métalliques se faisant face. Leur distance est suffisante pour qu'en régime normal la tenue de tension puisse être garantie. Leur utilité apparaît lorsque la foudre frappe la ligne électrique : un arc électrique va alors s'établir au niveau de l'éclateur qui contournera l'isolateur. S'il n'y avait pas d'éclateur, la surtension entre le pylône et la ligne électrique foudroyée détruirait systématiquement l'isolateur [20, 59, 60].

Une ligne aérienne est composée principalement de :

- Câbles conducteurs,
- Pylônes (supports),
- Des isolateurs,
- Fil de garde.

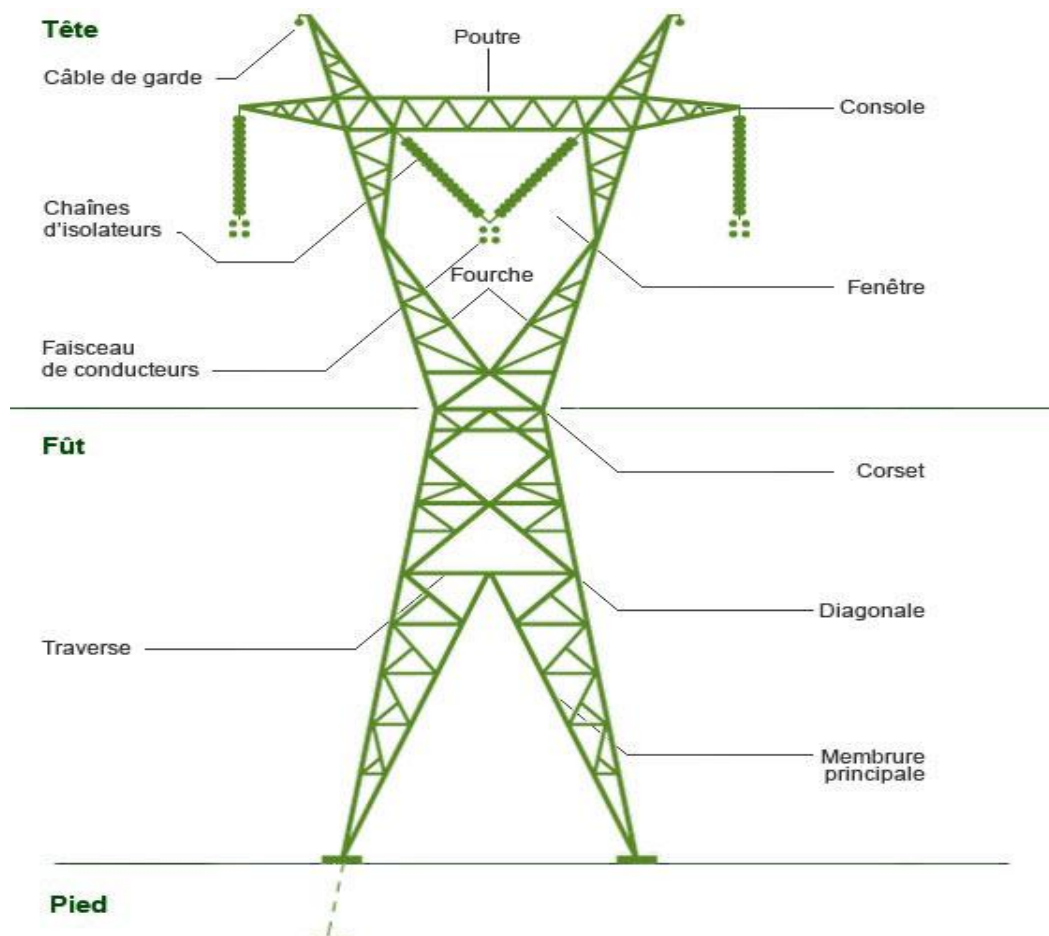


Figure III.1 Eléments constitutifs des lignes électriques aériennes

III.2.1 Pylônes

Pour acheminer l'électricité produite vers les utilisateurs, les conducteurs ont besoin de différents supports. Leur rôle est de maintenir les conducteurs (câbles) à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes.

Le choix des pylônes se fait en fonction :

- des lignes à réaliser,
- de leur environnement,
- des contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone.

Pour les lignes à très haute tension, on a recours à des pylônes métalliques en treillis à chaînette ou tubulaire. Plus la tension est élevée, plus l'envergure est grande et plus les poteaux sont élevés. On utilise pour le transport les pylônes et pour la distribution les poteaux [62, 63].

III.2.1.1 Principaux termes et définitions

Le terme de support regroupe des structures variées, qu'il s'agisse de pylônes, portiques ou poteaux.

Le terme de pylônes est plus particulièrement destiné aux structures multipodes, celui de poteaux aux supports monopodes.

Un support est conçu en plusieurs éléments assemblés, chacun de ces éléments porte une appellation spécifique. Les principales appellations sont les suivantes :

- le fût constitue l'élément principal du support ; il est subdivisé en tronçons successifs,
- les consoles permettent l'accrochage des conducteurs ; elles sont généralement fixées au fût,
- les chevalets permettent l'accrochage des câbles de garde,
- les embases assurent la liaison entre le support et les fondations.

III.2.1.2 Familles des supports

Afin de rationaliser leur fabrication, les supports sont classés pour former un catalogue de pylônes, comprenant les différentes familles de supports.

Une famille regroupe un ensemble de supports ayant des silhouettes voisines, mais présentant des résistances mécaniques et des hauteurs différentes. Ces différentes hauteurs peuvent être obtenues par prolongement d'un fût d'une hauteur de base, ces prolongements ayant une hauteur déterminée afin de rationaliser et normaliser la production.

On distingue essentiellement les familles de supports suivantes :

- les supports métalliques treillis,
- les supports monopodes métalliques, utilisables pour tous les niveaux de tension,
- les supports monopodes en béton, réservés aux lignes 60 kV.

Les supports aérosouterrains constituent une variante sur la base d'un support appartenant à l'une des trois familles précitées.

Les supports (ou pylônes) treillis consistent en un ensemble structuré de profilés (ou cornières) en acier, laminés à chaud, assemblés par boulonnage, soit directement, soit par l'intermédiaire de plaques (ou goussets) en acier. Le formage à froid n'est toléré que pour certains goussets, dont les formes ne peuvent être obtenues par laminage à chaud [32].

Les supports monopodes métalliques sont quant à eux constitués d'un fût et de consoles, réalisés en tubes en acier. Les fûts peuvent être composés de plusieurs tronçons emboîtés.

Les supports en béton sont constitués pour leur part d'un fût réalisé en béton (armé ou précontraint) et de consoles réalisées en béton (armé ou précontraint) ou en acier.

Tous les ouvrages du réseau doivent utiliser des familles de supports approuvées.

La géométrie d'un support résulte d'une optimisation à trouver entre son empattement au sol, la disposition des accrochages des conducteurs et sa tenue mécanique. Le rapport empattement / hauteur des supports ne doit pas dépasser une valeur qui est définie en tant qu'exigence particulière pour l'étude de conception d'une nouvelle famille de supports.

Des critères esthétiques sont également à prendre en compte et amènent parfois à la création de supports monopodes.

Les principales géométries d'accrochage des conducteurs sur les têtes des pylônes sont les suivantes :

- **Chat :** Pour ces supports, simple ou double circuit, la nappe de conducteurs se trouve sensiblement sur le même plan horizontal, au détriment d'un certain étalement en largeur. La disposition des conducteurs évite toutes les difficultés liées à la superposition ou au croisement des phases. Ces pylônes ne permettent pas d'opérations de déroulage des conducteurs par hélicoptère [32].

- **Double drapeau** : Pour ces pylônes double circuit, la nappe de conducteurs à une largeur moindre, au détriment d'une hauteur supérieure, et au prix d'un risque supérieur de télescopage des câbles de garde et de phases situés les uns au-dessus des autres.
- **Type Triangle** : Cette géométrie combine les avantages des deux précédentes, mais interdit toute disposition à deux circuits.

Les supports peuvent être classés selon:

III.2.1.2.1 La disposition de leur armement

C'est la disposition géométrique des conducteurs, accessoirement des câbles de garde. Les armements utilisés couramment se partagent en deux grandes classes [60,61, 62]:

- **Conducteur disposé à des étages différents**

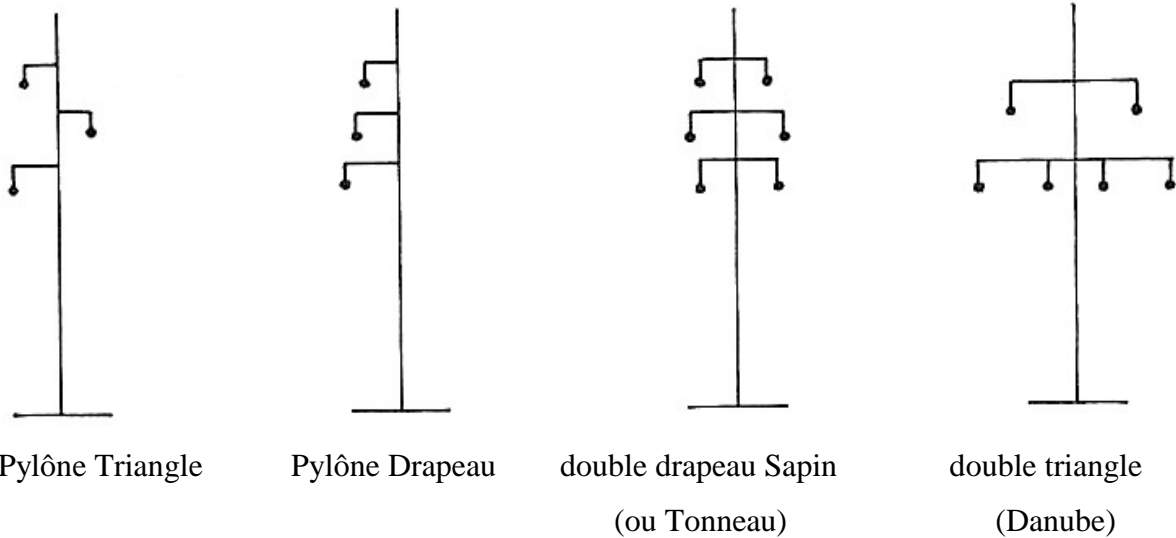
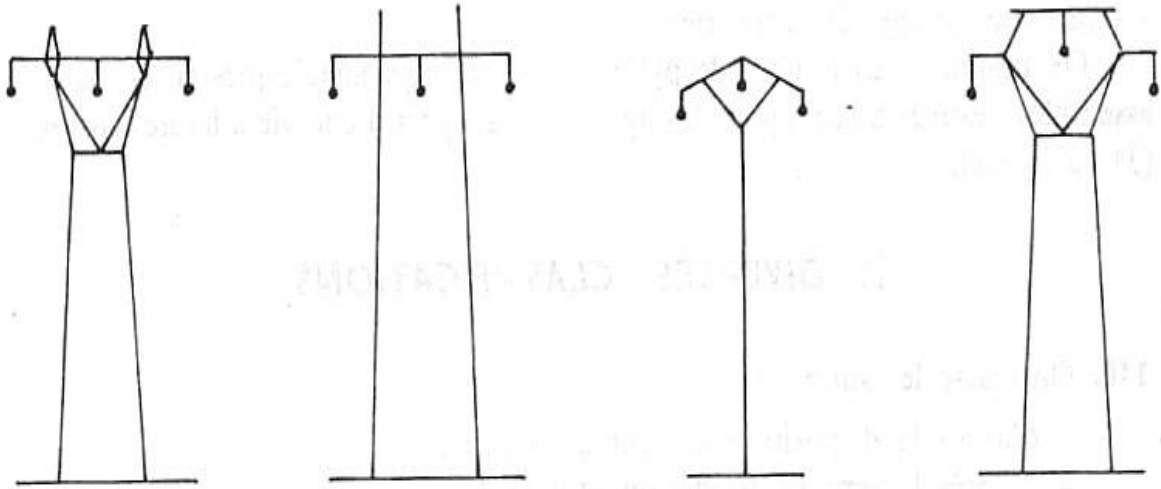


Figure III.2 Types de supports à phases étagées

- **Conducteurs disposés au même niveau ou à des niveaux peu différents**



Pylônes a nappe horizontale

Pylônes Voute ou Chat

Figure III.3 Pylônes ou portiques à armement nappe ou nappe-voute

Pour les lignes haute et extra haute tension, des configurations variées sont conçues selon le nombre de circuit alternatifs et les conditions locales [63].

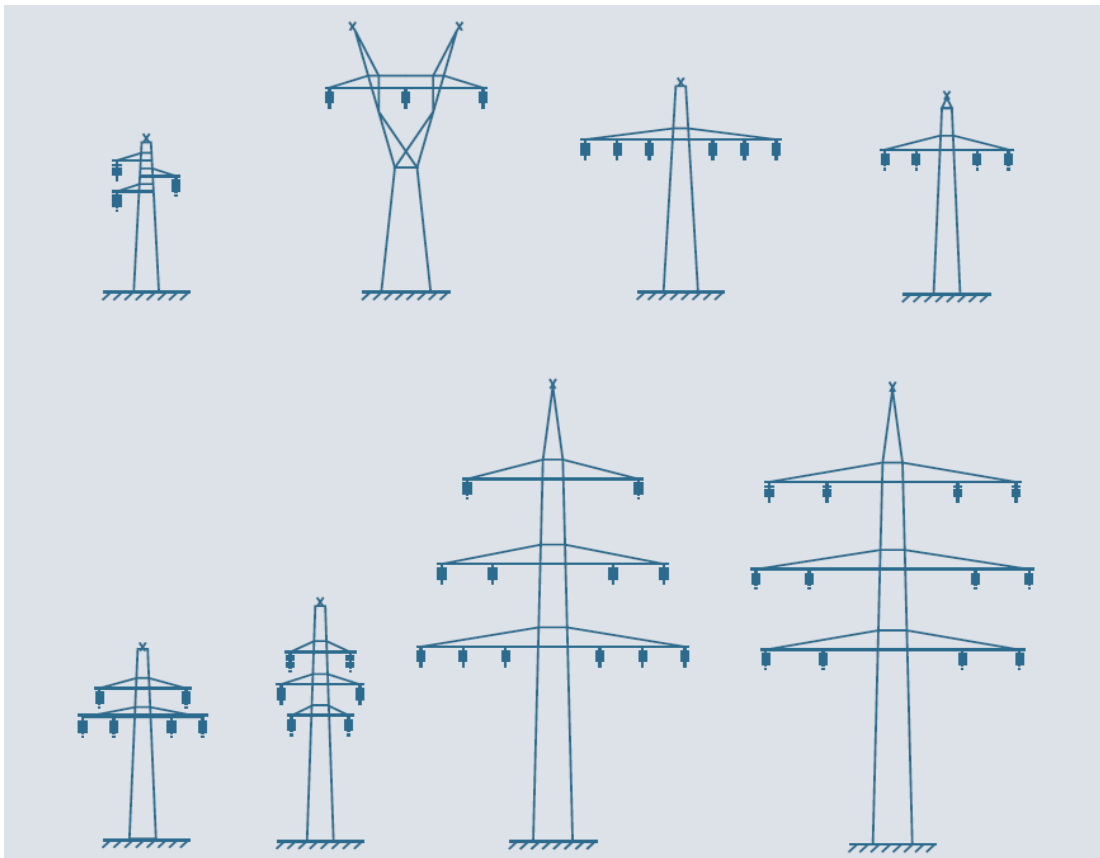
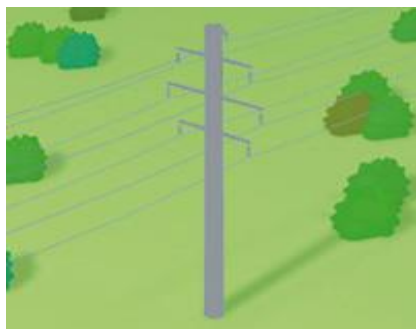


Figure III.4 Configurations typiques des pylônes pour les lignes HT/THT

III.2.1.2.2 Le type de fondation

On appelle fondation, la partie d'un ouvrage qui se trouve en contact direct avec le terrain d'assise et qui a pour fonction de transmettre à celui-ci le poids et les différentes surcharges appliquées à la structure [64].

Une fondation peut être unique (mono-pode) ou à raison d'un massif par pied (multi-pode) leur nature dépend du type de pylône.



Muguet Métal



Muguet Béton

Figure III.5.1 Fondation mono-pode



Fougère



Roseau

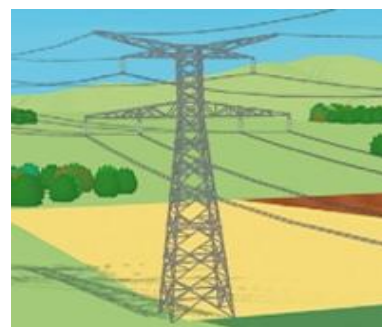
Figure III.5.2 Fondation bipode



Trianon



Chat



Triangle

Figure III.5.3 Fondation multi-pode

III.2.1.3 Matériaux

Les matériaux utilisés doivent être en mesure de :

- respecter les contraintes imposées par l'exploitation de l'ouvrage,
- satisfaire aux contraintes environnementales conformément aux dispositions réglementaires.

Les aciers de construction (en particulier ceux formés à froid), les boulons, écrous et rondelles doivent être conformes aux exigences de la norme EN 50341.

D'une manière générale, les aciers utilisés doivent présenter de bonnes aptitudes à la galvanisation conformément à la norme NF A 35-503 (Produits sidérurgiques - Aciers pour galvanisation par immersion à chaud) [65, 66].

III.2.1.4 Dimensionnement mécanique et charges appliquées au support

Les supports doivent être dimensionnés conformément aux cahiers des charges et règlement technique en vigueur à GRTE. Les charges appliquées au support sont de quatre natures [65, 66] :

III.2.1.4.1 Charges permanentes du support

On désigne par ces termes les charges dues au poids de tous les éléments constitutifs du support, une fois isolé du reste de l'ouvrage (c'est-à-dire hors charges conducteurs et câbles de garde).

III.2.1.4.2 Charges dues aux conducteurs et aux câbles de garde

Ces efforts dépendent du domaine d'utilisation du support et sont liés aux hypothèses climatiques prises en compte. Ils sont appliqués aux points d'accrochage des câbles, définis pour chaque support.

III.2.1.4.3 Charges climatiques sur le support

Elles correspondent à la prise en compte des effets induits par les hypothèses climatiques sur le support.

III.2.1.4.4 Charges apparaissant lors de la construction, l'entretien et l'exploitation de la ligne

Elles correspondent notamment à la prise en compte des efforts induits par :

- le poids des monteurs travaillant sur le support (100 daN si monteur seul, 300 daN si monteur sur échelle),

- le levage du support (haubanage éventuel des consoles, ...),
- le déroulage des câbles,
- la rupture d'un câble ou d'un faisceau de câbles.

Elles doivent être calculées suivant les prescriptions des parties 1 et 3 de la norme EN 50341 [65].

III.2.1.5 Dimensionnement géométrique

Le dimensionnement d'un support doit respecter les contraintes géométriques imposées par la tenue diélectrique des supports (application pratique des règles d'isolement) d'une part, et les possibilités d'intervention sur les ouvrages en exploitation d'autre part.

Ces contraintes définissent [60, 62, 67]:

- les distances à la masse,
- les distances entre câbles,
- les distances de travail à respecter sur les ouvrages.

III.2.1.5.1 Durabilité

La durabilité d'un support ou d'une partie de celui-ci dans son environnement doit être telle qu'il reste opérationnel pendant la durée de vie de l'ouvrage moyennant un entretien adéquat.

Les conditions environnementales doivent être évaluées au stade de la conception afin d'estimer leur influence sur la durabilité et de permettre de prendre les dispositions adéquates pour la protection des matériaux.

La durée de vie des supports est de 50 ans. Aucune altération des caractéristiques mécaniques ou esthétiques ne doit apparaître durant cette période, en considérant des opérations d'entretien des matériaux et des revêtements dont la périodicité est de l'ordre de 10 ans.

Les ouvrages doivent satisfaire aux conditions du cahier des charges, qui stipule que leur position par rapport aux lieux normalement accessibles aux tiers doit être telle que le champ électrique résultant en ces lieux n'excède pas 5 kV/m et que le champ magnétique associé n'excède pas 100 μ T dans les conditions de fonctionnement en régime de service permanent.

Les terrains en très forte pente ou falaises ne seront pas considérés comme étant des lieux normalement accessibles aux tiers.

La température des conducteurs à considérer pour respecter le niveau de référence du champ magnétique doit être prise à 50°C et non à la répartition. Cette température correspond à la température des conducteurs atteinte en régime de service permanent [32, 64].

A cet égard, seuls les ouvrages 400 kV sont concernés et exclusivement vis à vis du champ électrique généré, l'évaluation des champs magnétiques par rapport à la silhouette des pylônes utilisés est une opération plus complexe et nécessite en plus des distances par rapport au sol, une connaissance approfondie de la constitution de la ligne considérée ainsi que son rôle et sa position dans le système électrique (interconnexion, transport, répartition, évacuation centrale etc.) et les puissances transitées au moment de l'évaluation.

III.2.2 Conducteurs

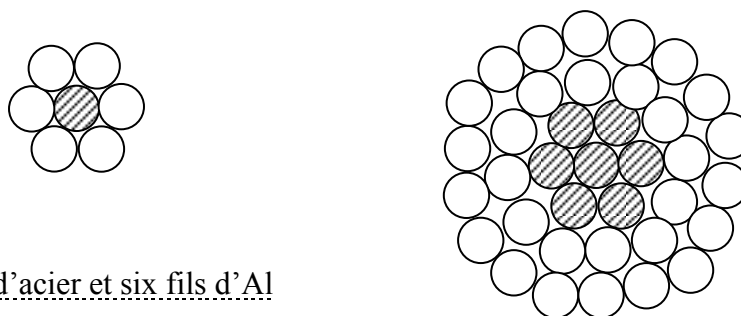
On trouve au moins trois conducteurs par ligne, en général les conducteurs sont conçus avec un alliage d'aluminium, ou en combinaison aluminium-acier pour les câbles plus anciens ; ce sont des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium. Les conducteurs sont nus, c'est-à-dire non revêtus d'un isolant [26].

La capacité de transport d'une ligne aérienne dépend du type de conducteur et des conditions météorologiques. Il faut éviter que la chaînette formée par le conducteur ne se rapproche trop du sol ou de la végétation à cause de la dilatation thermique provoquée par l'effet Joule. Les conducteurs hautes tensions sont aériens ou souterrains et parfois sous-marins [41].



Figure III.6 Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite

L'âme au centre assure les propriétés mécaniques, l'aluminium à l'extérieur assure les propriétés électriques du conducteur.



conducteurs à fils d'acier et six fils d'Al

conducteur à 7 fils d'acier et 30 fils d'Al

Figure III.7 Conducteur en âme d'acier

Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, verglas etc. Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute-tension : type de conducteur électrique (matériaux et géométrie), hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximum sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante, etc. Le choix de ces paramètres a une grande influence sur les coûts de construction et d'entretien d'une ligne de transmission, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité voir Annexe 1. Toutes choses égales par ailleurs la position des conducteurs influe sur l'intensité et la disposition du champ magnétique [26, 27].

Les conducteurs choisis pour les lignes aériennes doivent répondre aux qualités suivantes :

- avoir une résistance électrique faible = conductivité bonne avec moins de pertes de la transmission ;
- avoir une résistance mécanique élevée pour résister aux efforts mécanique dans leur mode de pose ;
- être légers pour limiter leur poids et celui de leurs supports ;
- avoir une bonne garantie de sécurité et de durée de vie.

Le calcul de la résistance des conducteurs est soumis aux réglementations internationales.

Les conditions climatiques doivent être connues (givre, température, intensité du vent, ...) [32, 62]. Le rayon du conducteur est remplacé par le rayon moyen géométrique RMG car le conducteur n'est pas plein, il est constitué de torons. Le RMG pour les conducteurs en faisceau est un rayon fictif équivalent au point de vu électrique.

III.2.2.1 Rayon moyen géométrique des conducteurs toronnés

Pour les conducteurs constitués de brins toronnés, les valeurs du RMG peuvent être calculées à partir de la section utile (S) du conducteur et du nombre de brins [60].

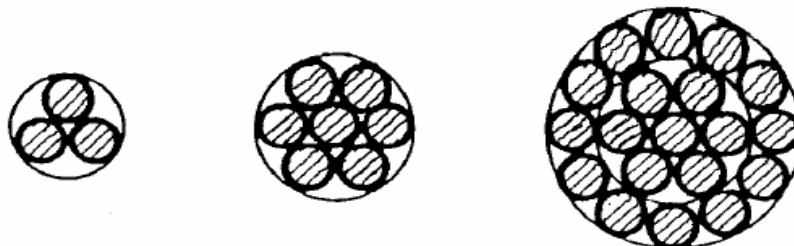


Figure III.8 Conducteurs toronnés.

Désignation	Rayon moyen géométrique RMG g11
Conducteur de section circulaire pleine	$0.4394S^{1/2}$
Corde circulaire à 7 brins	$0.4642S^{1/2}$
Corde à 3 brins sans âme centrale	$0.4750S^{1/2}$
Corde circulaire à 19 brins	$0.4902S^{1/2}$
Corde circulaire à 37 brins	$0.4982S^{1/2}$
Corde circulaire à 61 brins	$0.5020S^{1/2}$
Corde circulaire à 91 brins	$0.5038S^{1/2}$
Corde circulaire à 127 brins	$0.5046S^{1/2}$

Tableau III.1 Rayon moyen géométrique des conducteurs toronnés

III.2.2.2 Rayon moyen géométrique des conducteurs en faisceaux

Un conducteur de phase peut être constitué d'un faisceau de deux ou de plusieurs conducteurs d'un même diamètre, disposé symétriquement les uns par rapport aux autres comme il est montré dans le tableau suivant [59, 62] :

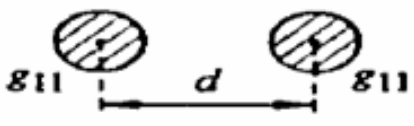
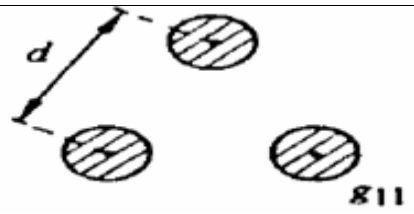
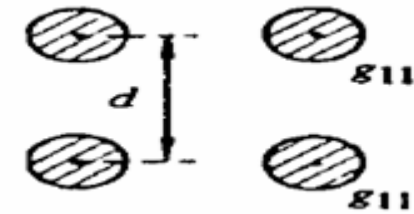
Disposition des conducteurs de phases	Rayon moyen géométrique G_{11}
	$G_{11} = (g_{11} \cdot d)^{1/2}$
	$G_{11} = g_{11}^{1/3} \cdot d^{2/3}$
	$G_{11} = 2^{1/8} \cdot g_{11}^{1/4} \cdot d^{3/4}$

Tableau III.2 Rayon moyen géométrique des conducteurs en faisceaux

III.2.3 Isolateurs

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs. Les isolateurs servent à retenir mécaniquement les conducteurs aux supports et assurent l'isolation électrique entre les deux éléments.

Les qualités électriques et mécaniques des isolateurs ne devront pas être détruites par aucune des contraintes de toute nature qu'ils devront subir pendant plusieurs dizaines d'années. Au point de vue électrique, les isolateurs doivent offrir une grande résistance d'isolement afin qu'ils ne soient ni contournés en surface, ni perforés à travers leur masse par les tensions élevées qu'ils ont à supporter normalement. A fin d'augmenter leur distance de contournement, on leur donne une forme de jupe.

Ils sont composés de verre de porcelaine et de la céramique, en général sous forme d'assiette, leur association donne une chaîne d'isolateurs [32,60-62].

III.2.4 Câbles de garde

Les câbles de garde ne transportent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs, attachés directement aux pylônes, reliés au réseau de terre et ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre pour éviter une

éventuelle surtension au niveau des conducteurs ou des "creux de tension" perturbant les clients.

Ils sont en général réalisés en almélec-acier. Au centre du câble de garde on place parfois un câble en fibre qui sert à la communication de l'exploitant; on parle alors de câble de garde à fibre optique (OPGW: optical ground wire). Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde classique déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale de la fibre optique autour du câble de garde (LASHED).

III.2.5 Association conducteurs - câbles de garde

Il convient de s'assurer que les comportements des deux types de câbles sont suffisamment proches dans les différentes hypothèses administratives et en exploitation pour permettre un fonctionnement correct de l'ouvrage [32, 64, 66].

Les principaux points à examiner sont :

- la variation des distances entre câbles en fonction des variations des hypothèses,
- la capacité du câble de garde à évacuer les courants de court-circuit amenés par les conducteurs,
- la résistance mécanique des supports pour les types de câbles envisagés.

III.2.5.1 Exemples d'associations conducteurs – câbles de garde

A titre indicatif, des associations câble de garde - conducteur garantissant la tenue des câbles de garde aux courants de défaut, sont présentées dans les paragraphes suivants en fonction des tensions et capacités de transit.

Dans les tableaux ci-dessous, l'Almélec correspond à l'alliage d'aluminium AL4 selon la définition des normes EN 50 182 et 50 183 [32, 65].

III.2.5.1.1 Lignes 60-90 kV équipées de câbles Almélec 228 mm² ou 366 mm² ou de leurs équivalents électriques

Sections des conducteurs [mm ²]	Sections câbles de garde associés [mm ²]	
	Classiques	à Fibres Optiques incorporées
Almélec 228 ou 366	Almélec - Acier 94,1	Almélec - Acier 107 ou Almélec - Acier 157
Almélec – Acier 299 ou 412	Almélec - Acier 181,6	Almélec - Acier 268
Alu – Acier 288	Alu – Acier 181,6	Almélec - Acier 107 ou Almélec - Acier 157

Tableau III.3.a Sections des lignes 60kV- 90 kV

III.2.5.1.2 Lignes 60-90 kV équipées d'un conducteur Almélec 570 mm² ou de ses équivalents électriques

Sections des conducteurs [mm ²]	Sections câbles de garde associés [mm ²]	
	Classiques	à Fibres Optiques incorporées
Almélec 570	Almélec - Acier 116,2	Almélec - Acier 107 ou Almélec - Acier 157
Almélec – Acier 612	Almélec - Acier 228	Almélec - Acier 268
Alu – Acier 617	Alu – Acier 228	Almélec - Acier 107 ou Almélec - Acier 157

Tableau III.3.b Sections des lignes 60kV- 90 kV

III.2.5.1.3 Lignes 220 kV équipées d'un conducteur Almélec 366 mm² ou de ses équivalents électriques

Sections des conducteurs [mm ²]	Sections câbles de garde associés [mm ²]	
	Classiques	à Fibres Optiques incorporées
Almélec 366	Almélec - Acier 116,2 ou 147,1 ou Alu – Acier 147,1	Almélec - Acier 157
Almélec - Acier 412	Almélec - Acier 288	Almélec – Acier 268
Alu – Acier 412	Alu – Acier 288	Almélec - Acier 157

Tableau III.4.a Sections des lignes 220 kV

III.2.5.1.4 Lignes 220 kV équipées d'un conducteur Almélec 570 mm² ou de ses équivalents électriques

Sections des conducteurs [mm ²]	Sections câbles de garde associés [mm ²]	
	Classiques	à Fibres Optiques incorporées
Almélec 570	Almélec - Acier 147,1 ou Alu – Acier 147,1	Almélec - Acier 157
Almélec – Acier 612	Almélec - Acier 288	Almélec - Acier 268
Alu – Acier 617	Alu – Acier 288	Almélec - Acier 157

Tableau III.4.b Sections des lignes 220 kV

III.2.5.1.5 Lignes 220 kV ou 400 kV équipées d'un faisceau de deux câbles**Almélec 570 mm² ou de ses équivalents électriques**

Sections des conducteurs [mm ²]	Sections câbles de garde associés [mm ²]	
	Classiques	à Fibres Optiques incorporées
2 × Almélec 570	Almélec - Acier 147,1 ou Alu – Acier 147,1	Almélec - Acier 157
2 × Almélec – Acier 612	Almélec - Acier 288	Almélec - Acier 268
2 x Alu – Acier 617	Alu – Acier 288	Almélec - Acier 157

Tableau III.5 Sections des lignes 400kV- 220 kV en faisceaux

III.2.5.1.6 Lignes 400 kV équipées d'un faisceau de trois ou quatre câbles**Almélec 570 mm² ou de leurs équivalents électriques**

Sections des conducteurs [mm ²]	Sections câbles de garde associés [mm ²]	
	Classiques	à Fibres Optiques incorporées
3 ou 4 × Almélec 570	Almélec - Acier 228	Almélec - Acier 157
3 ou 4 × Alu – Acier 617	Alu – Acier 288	Almélec - Acier 157

Tableau III.6 Sections des lignes 400 kV en faisceaux

III.3 Avantages et inconvénients des lignes électriques aériennes**III.3.1 Avantages**

- Sont moins coûteuses que les lignes souterraines au point de vue des frais d'installation et de réparation;
- Permettent une surveillance aisée de leur état et un repérage facile des incidents et défauts;
- Peuvent être réparées très rapidement en cas d'incident ou de défaut ;
- Peuvent être surchargées en intensité de courant sans trop de danger [60, 62].

III.3.2 Inconvénients

- Sont exposées aux surtensions d'origine atmosphérique;
- Leur installation donne lieu à de difficiles discussions avec les propriétaires des terrains surplombés;
- Soulèvent des problèmes d'esthétique et de respect des sites et engendre une gêne visuelle;
- Sont susceptibles d'induire des forces électromotrices perturbatrices ou dangereuses dans les circuits de télécommunication;
- Sont susceptibles de produire des perturbations radioélectriques gênant les réceptions de radiodiffusion et de télévision;
- La rupture de leurs conducteurs est susceptible de présenter des dangers.

III.4 Tensions de fonctionnement

En Algérie les niveaux de tension utilisés sont:

- Basse tension: 220 V et 380 V, utilisée pour la connexion vers un immeuble d'habitation ou de petits clients commerciaux et de l'utilitaire.
- Moyenne tension : 10 kV et 30 kV, utilisée pour la distribution dans les zones urbaines et rurales.
- Haute tension : 60 kV, 90kV utilisée pour le transport et la répartition de grandes quantités d'énergie électrique.
- Très haute tension : 150 kV, 220 kV et 400 kV utilisée pour le transport et l'interconnexion de très grandes quantités d'énergie électrique sur de longues distances [32]

Conclusion

Les lignes électriques ne jouissent pas aujourd'hui d'une grande faveur dans le public et souvent ceux qui prennent part dans leur construction doivent résister à des assauts et faire face à des oppositions fermes de la part de riverains peu sensibles à apprécier l'utilité, la valeur technique et l'esthétique industrielle de ces ouvrages.

L'attitude spontanée de rejet de l'homme à l'égard d'un nouvel objet qui vient modifier l'harmonie de ses paysages familiers, est rapidement dissipée lorsque les bienfaits de l'existence dudit objet lui sont directement perceptibles.

La raison d'être d'un grand réseau assurant des fonctions de transport et d'interconnexion, l'impérative nécessité de son développement permettant seul de faire face économiquement à

l'accroissement de la consommation d'énergie électrique constituent des atouts convaincants à mettre en exergue.

Plus difficile est de convaincre les opposants de l'impossibilité technique de remplacer les ouvrages lignes aériennes par des câbles souterrains enterrés et pourtant si l'on construit encore aujourd'hui des grandes lignes aériennes, c'est bien parce qu'il n'y a pas d'alternative et la situation n'évoluera pas dans un avenir proche, malgré les efforts de recherches engagés dans les pays industrialisés en vue de développer de nouvelles techniques de transport en souterrain.

L'apparente simplicité d'une ligne aérienne incite le non spécialiste à sous estimer les difficultés que représentent l'étude et la réalisation. Il a tendance à considérer qu'après tout il s'agit seulement de suspendre des fils métalliques à une hauteur suffisante au dessus du sol en les accrochant à des pylônes.

Or l'importance des éléments mis en cause et la sévérité des contraintes de toutes natures, électriques, thermiques, mécaniques, environnementales, d'origine fonctionnelle et climatiques auxquelles sont soumises les lignes aériennes impliquent une parfaite connaissance des phénomènes physiques inhérents à leurs constructions ainsi que les effets engendrés à proximité de ces ouvrages.

Aussi, nous allons aborder dans le chapitre qui suit, les différents phénomènes liés au voisinage des lignes aériennes THT de transport de l'électricité.

Chapitre IV

**Phénomènes liés aux voisinages des
lignes HT/THT**

Chapitre IV

Phénomènes liés aux voisinages des lignes HT/THT

Introduction

Il existe beaucoup de conséquences indésirables résultant du transport de l'énergie électrique à haute tension, aussi la proximité des lignes de transmission HT/THT engendre de multitudes de phénomènes vis-à-vis de leur voisinage telle que le couplage magnétique et capacitif, l'apparition de l'effet couronne, effet de peau, ionisation de l'air entourant les conducteurs engendrant des contournements au niveau des parties isolantes. Ces phénomènes se manifestent sous plusieurs formes qui apparaissent autour des conducteurs de la ligne ainsi qu'au voisinage immédiat.

En outre, l'ensemble des phénomènes liés au voisinage des lignes HT/THT doit être pris en considération lors de l'élaboration de tracé d'un nouvel ouvrage et qui doit être déterminé de manière à conserver des distances suffisantes entre les ouvrages "voisins" dans les conditions suivantes :

- respect des valeurs minimales en cas de balancement des câbles,
- respect des distances de travail,
- respect des distances par rapport aux limites du couloir de servitude,
- respect des règles en matière de couloir de ligne d'évacuation de sites importants ou sensibles, le cas échéant.

La réglementation précise en outre que les calculs doivent être effectués pour les cas les plus défavorables et en tenant compte des conditions dans lesquelles il est prévu que la ligne sera exploitée dans l'avenir [66, 67].

Les directives de l'Union Internationale des Télécommunications (ITU) fixent les limites admissibles de la valeur efficace de la tension induite en régime de défaut à 650 Volts pour les lignes électriques "à grande sécurité de service". Au sens de l'ITU; les lignes HT/THT sont en général considérées comme telles. Dans le cas contraire la limite est fixée à 430 Volts.

IV.1 Phénomène inductif

Le phénomène d'induction est lié à la circulation des courants dans les conducteurs de l'ouvrage perturbateur créant ainsi un champ d'induction magnétique qui génère une force électromotrice induite dans l'ouvrage perturbé. Le phénomène d'induction magnétique est permanent dès lors qu'il y a circulation de courant dans l'ouvrage inducteur. L'induction magnétique se comporte comme un "générateur de tension".

Le conducteur électrique induit se comporte comme l'enroulement secondaire d'un transformateur dont l'enroulement primaire serait la ligne inductrice voir figure VI.1 [67, 68, 69].

La pose d'une mise à la terre en un point du conducteur soumis à cette induction magnétique fixe le potentiel terre au niveau de ce point. Cette mise à la terre est alors parcourue par un courant permanent du au couplage inductif. Une tension électrique croît à partir de ce point le long du conducteur (d'autant plus élevée qu'on s'éloigne de la mise à la terre).

La pose d'une deuxième mise à la terre sur ce conducteur crée une boucle qui est parcourue par un courant issu de l'induction magnétique et fait circuler un courant dans le circuit ainsi créé. Chaque mise à la terre supplémentaire modifie la tension par rapport à la terre le long du conducteur induit.

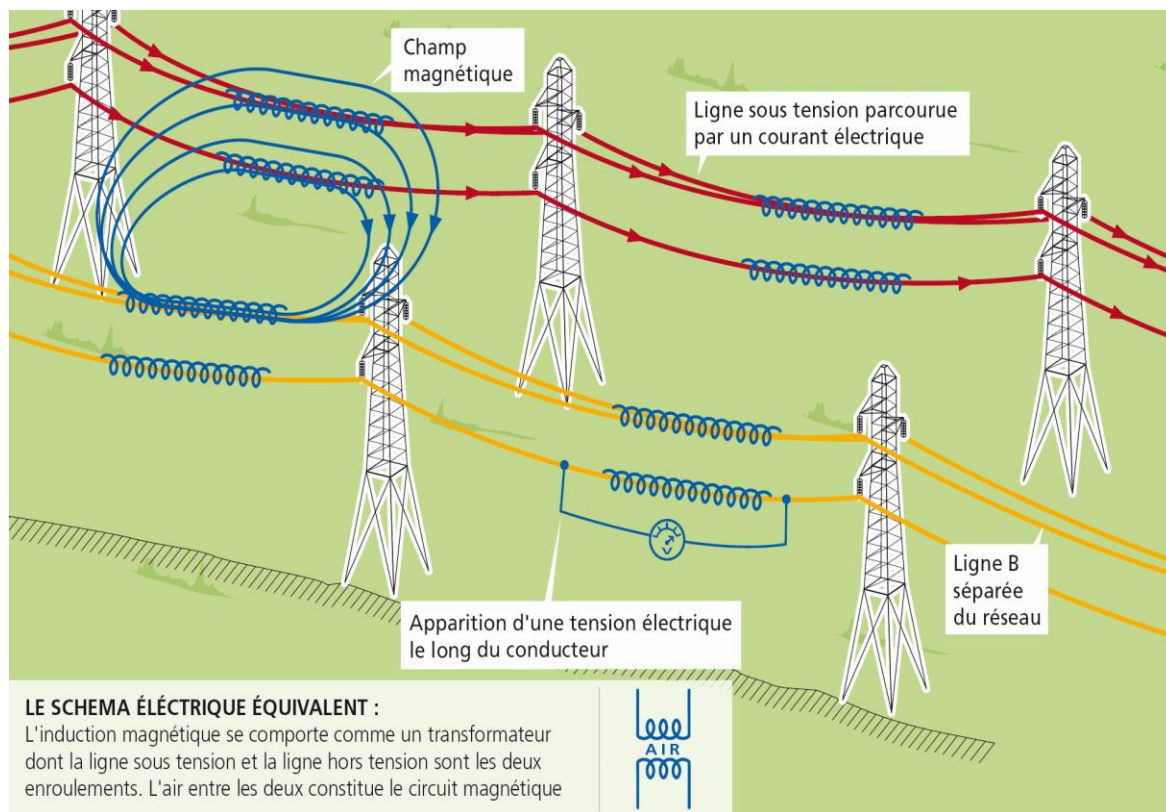


Figure VI.1 Couplage Inductif à proximité des ouvrages HT/THT

IV.2 Couplage capacitif

Le couplage capacitif fait apparaître une tension électrique entre un conducteur électrique et les masses (pylônes, outillages, engins, terres) ou entre deux conducteurs par la seule présence à proximité d'un ou plusieurs autre(s) ouvrage(s) électrique(s) sous tension nominale. Cette tension est uniforme le long du conducteur qui subit le couplage.

Le phénomène de couplage capacitif est permanent tant que l'ouvrage est séparé électriquement du réseau et que les ouvrages à proximité sont sous tension. Le couplage capacitif se comporte comme un "générateur de courant" [67, 68, 69].

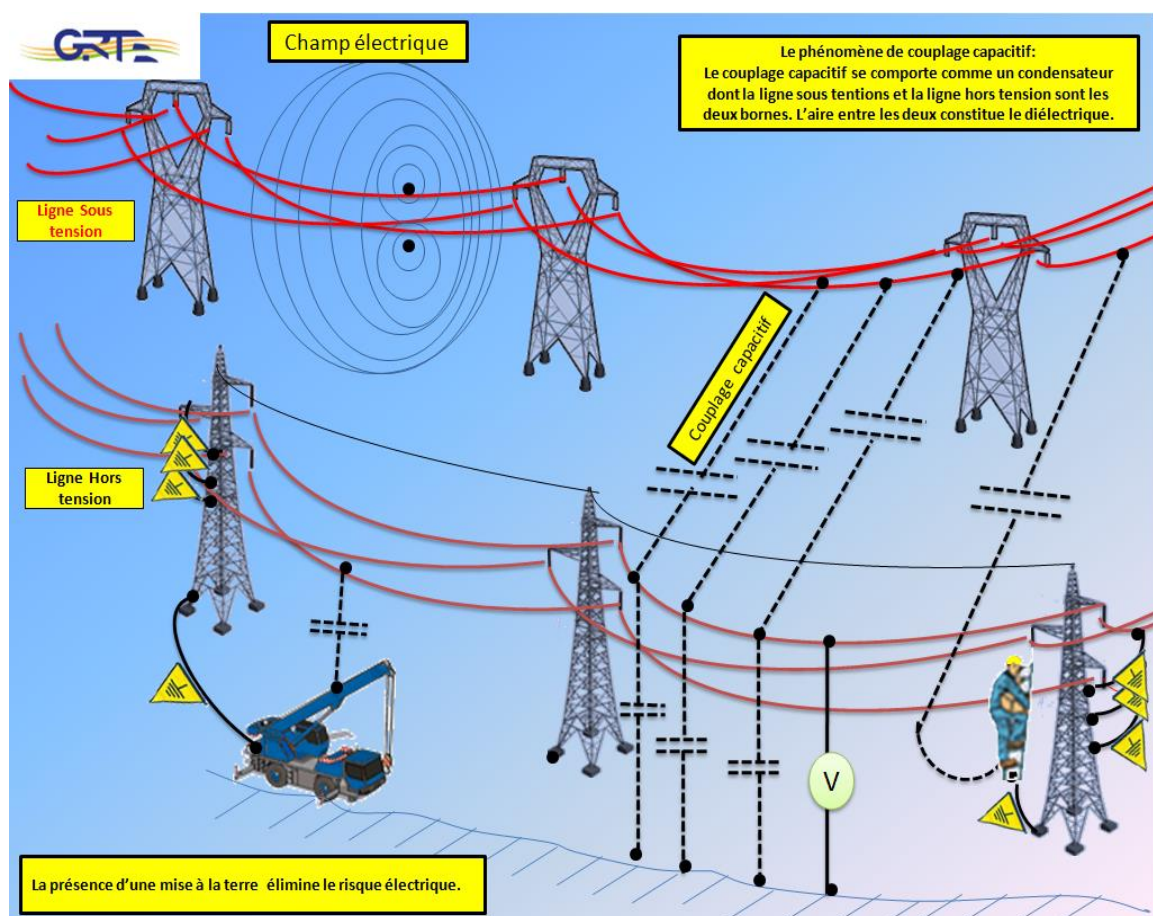


Figure IV.2 Couplage Capacitif à proximité des ouvrages HT/THT

IV.2.1 Couplage capacitif en régime permanent entre ligne HT/THT et un ouvrage linéaire

Un ouvrage linéaire parallèle à une ligne aérienne HT peut être porté à un potentiel par rapport au sol par couplage capacitif [68].

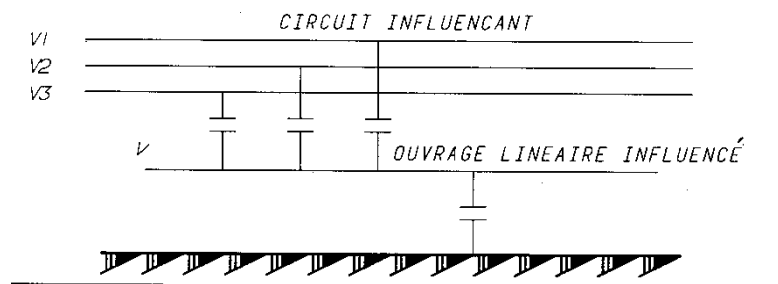


Figure IV.3 Couplage capacitif en régime permanent avec un ouvrage linéaire

On ne considère que les parties de clôture comprises dans une bande de :

- 50 m en 220/400 kV
- 20 m en 60/90 kV

de part et d'autre de la ligne.

Un piquet métallique sera installé tous les 75 m environ, avec un minimum de deux piquets métalliques, en dessous de 75 m de parallélisme, on peut se dispenser d'installer des piquets métalliques.

IV.2.2 Fils métalliques utilisés pour le palissage des vignes et autres cultures

Pour éviter, au toucher, toute sensation désagréable et pour empêcher les brûlures des pousses végétales maintenues par les fils métalliques, il est recommandé de mettre ces fils à la terre tous les 100 m environ et de créer une prise de terre à chaque extrémité de chaque fil métallique de palissage ou de clôture. Il convient de ne pas réaliser ces mises à la terre à proximité des pylônes et a fortiori de ne pas utiliser les membrures pour fixer des fils de palissage.

IV.2.3 Mesures de prévention contre les décharges électrostatiques

Sous l'influence du champ électrique produit par une ligne, les objets strictement isolés du sol sont portés à un potentiel flottant dont la valeur dépend d'une part de la valeur du champ électrique, et d'autre part des dimensions de l'objet. Une personne entrant en contact avec cet objet perçoit une sensation désagréable (gênante) qui résulte de la décharge de cet objet. Pour les objets usuels, tels que les clôtures ou les véhicules, la charge électrique est inférieure au seuil de douleur.

Il conviendra d'informer les riverains de ce type de gêne en pratiquant, en tant que de besoin, la mise à la terre des objets isolés du sol.

IV.3 Phénomène de conduction à proximité d'un pylône en défaut

Le phénomène de conduction correspond à l'élévation de potentiel du sol à proximité du support en défaut, lorsqu'un courant de défaut s'écoule dans le sol. L'élévation du potentiel qui en résulte peut affecter les ouvrages linéaires situés à proximité [67, 68, 69].

IV.4 Contraintes de proximité - induction magnétique et capacitive – conduction

Les contraintes de conduction et d'induction sont à prendre en considération dans les cas suivants :

- proximité de réseaux électriques de tension inférieure ;
- proximité de réseaux de télécommunications ;
- proximité d'un réseau de chemin de fer ;
- proximité de canalisations de transport de fluide (eau, gaz, pipe line etc.) ;
- proximité de dépôts de produits inflammables liquides ou gazeux ;
- proximité d'ouvrages linéaires de type clôture, glissière d'autoroutes ;
- proximité de téléphériques et remonte-pentes ;
- prévention des risques électriques vis-à-vis des personnes et des équipements des tiers.

Il est nécessaire d'étudier les problèmes de voisinage entre les différents réseaux en respectant la législation en vigueur et les éventuelles conventions. Il est également nécessaire d'informer les différentes parties des perturbations occasionnées par leur voisinage et obtenir leur accord sur les dispositions constructives étudiées qui minimisent ces perturbations.

IV.4.1 Proximité avec des réseaux MT/BT

En cas de rapprochement d'un pylône d'une ligne HT/THT avec un support de ligne MT/BT sur lequel la mise à la terre est réalisée, des dispositions doivent être prises afin qu'en cas de défaut à la terre sur la ligne HT/THT, la montée en potentiel du neutre MT/BT soit inférieure à 1500 V [66, 67].

Lorsqu'une ligne aérienne MT/BT est établie sur les mêmes supports qu'une ligne HT/THT, ou bien si les deux lignes ont un support commun, l'ouvrage doit être conforme aux dispositions définies par le Règlement Technique [67].

IV.4.2 Proximité avec les réseaux de télécommunications

Les lignes de télécommunications sont des lignes servant uniquement à des transmissions de signaux ou d'informations. Il s'agit notamment des lignes téléphoniques, télégraphiques ou de transmission de données, des lignes de télédistribution et des lignes de télécommande à courant faible. Ces lignes sont exploitées soit par les opérateurs de télécommunications, soit par la société nationale du transport ferroviaire (SNTF), les gestionnaires des ouvrages d'énergie, les sociétés d'autoroutes et des industriels, etc. [66, 67]

Les conditions de voisinage d'une ligne électrique et d'une ligne de télécommunications doivent être déterminées de manière que les phénomènes d'induction électromagnétique, d'influence électrique et d'élévation de potentiel accidentels ou permanents, causés par la ligne électrique, n'entraînent sur l'ouvrage de télécommunications voisin aucun danger pour les personnes ni aucune dégradation de l'ouvrage lui-même. Les signaux qu'il véhicule ne doivent pas être perturbés en régime de fonctionnement normal de la ligne électrique.

Pour les calculs d'interférence et pour les mesures à prendre afin d'éliminer ces effets ou les réduire à des niveaux acceptables, les dispositions du Règlement Technique (Section IV relative au « Voisinage de lignes aériennes de télécommunications »), les directives du Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique (CCITT) édition 1989 complétées par les recommandations de l'Union Internationale des Télécommunications – Secteur de la normalisation des télécommunications (UIT-T) et les éventuelles conventions entre les parties concernées doivent être appliquées.

IV.4.2.1 Limites admissibles par CCITT

En matière de danger dû aux effets de l'induction électromagnétique et de l'influence électrique, les directives de l'Union Internationale des Télécommunications – Secteur de la normalisation des télécommunications (UIT-T) et du Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique (CCITT) fixent actuellement les limites admissibles de la valeur efficace de la tension induite sur les circuits de télécommunications à :

- 650 V en cas de défaut ;
- 60 V en régime normal.

Concernant les effets des élévations de potentiel du sol susceptibles de nuire aux autres réseaux, les accords éventuels avec les services concernés doivent être respectés.

Les calculs d'élévation de potentiel doivent être effectués en tenant compte du niveau de tension de conception de la ligne électrique.

IV.4.2.2 Dispositions à adopter pour protéger les circuits de télécommunications

Au moment de l'étude d'un projet de ligne, il convient dans la mesure du possible d'éloigner suffisamment le tracé de celle-ci par rapport aux circuits de télécommunications, de manière à ne pas dépasser les valeurs maximales admissibles de la tension induite

Lorsque cette condition ne peut être respectée, des dispositions particulières peuvent être proposées afin d'adapter les installations de télécommunications aux contraintes électriques susceptibles d'apparaître.

Les dispositions pouvant être appliquées sont les suivantes:

- 1- installation de parasurtenseurs assurant la mise à la terre des circuits de télécommunications lors d'un défaut ou installation d'autres dispositifs de protection : ces dispositions sont satisfaisantes et peu onéreuses lorsque la tension induite dépasse la valeur maximale de 650 V, mais doivent être soumises à l'agrément de l'autorité responsable des circuits.

Tension induite [V]	Mesures techniques à prendre
$650 < V < 1300$	Un parasurtenseur à chaque extrémité de la zone de rapprochement.
$V > 1300$	Autant de parasurtenseurs que nécessaire pour que la tension longitudinale induite entre deux parasurtenseurs consécutifs ne soit pas supérieure à 1300 Volts, les tensions circuit-terre induites dans les tronçons extrêmes ainsi constitués ne dépassant pas 650 Volts.

Tableau IV.1 Dispositions de protection des circuits de télécommunications

- 2- pose de conducteurs d'écran enterrés, disposés parallèlement à l'ouvrage perturbé afin de diminuer la valeur de la tension induite ;
- 3- pose en câbles souterrains, sous enveloppe métallique, des circuits de télécommunications. Cette solution est très onéreuse ;
- 4- réalisation d'une séparation galvanique destinée à tronçonner les circuits et limiter ainsi la valeur de la tension induite à une limite acceptable.

Remarque

Quel que soit le niveau de tension, aucune installation de télécommunication ne doit être placée à moins de 10 m du périmètre du rectangle formé par les pieds des pylônes, sauf accord explicite entre les parties.

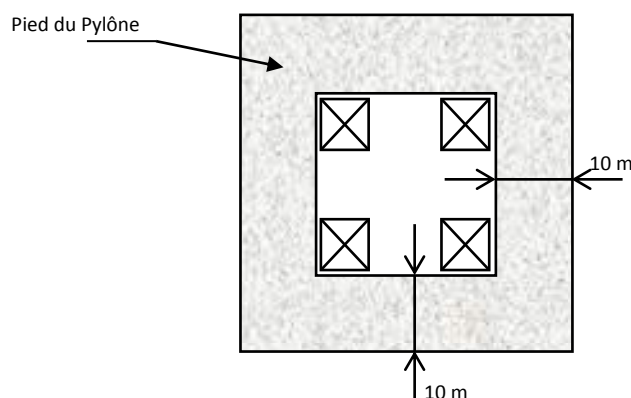


Figure IV.4 Distance minimale de séparation

Le principe à appliquer, pour permettre la coexistence des ouvrages consiste :

- 1- soit à éloigner les ouvrages de manière à ce que les installations de télécommunications se trouvent placées en dehors de la zone de contrainte ;
- 2- soit lorsqu'il est impossible ou trop onéreux de les déplacer, à « durcir » les installations de télécommunications de manière à ce qu'elles supportent les contraintes électriques susceptibles d'apparaître à l'endroit où elles sont placées [66].

IV.4.3 Proximité des exploitations agricoles et d'élevages

De nombreuses cultures peuvent se pratiquer sous les lignes HT/THT il suffit pour cela de choisir les mieux adaptées en tenant compte de l'installation des pylônes qui engendre la formation d'enclaves improductives, le mode d'irrigation à adopter (éviter les méthodes par

aspersion) et surtout prendre en considération les distances limites d'approches lors de la manipulation des engins et équipements agricoles divers.

Pour ce qui est des exploitations d'élevage d'animaux il y a lieu de tenir compte des distances requises pour l'implantation des bâtiments et dépendances d'élevage ainsi que les dispositions techniques normatives relatives à la mise en œuvre des liaisons équipotentielles avec une bonne mise à la terre ceci pour l'ensemble des structures métalliques.

Enfin on pourra considérer que le préjudice résultant de l'implantation de supports de lignes électriques en terrain agricole se décompose pour l'essentiel en :

- des pertes de temps liées aux manœuvres ;
- des pertes de récolte ;
- des frais de nettoyage des mauvaises herbes.

Le poids respectif de ces trois éléments est fonction essentiellement de la taille des supports, de leur positionnement sur la parcelle, et de la nature des cultures pratiquées.

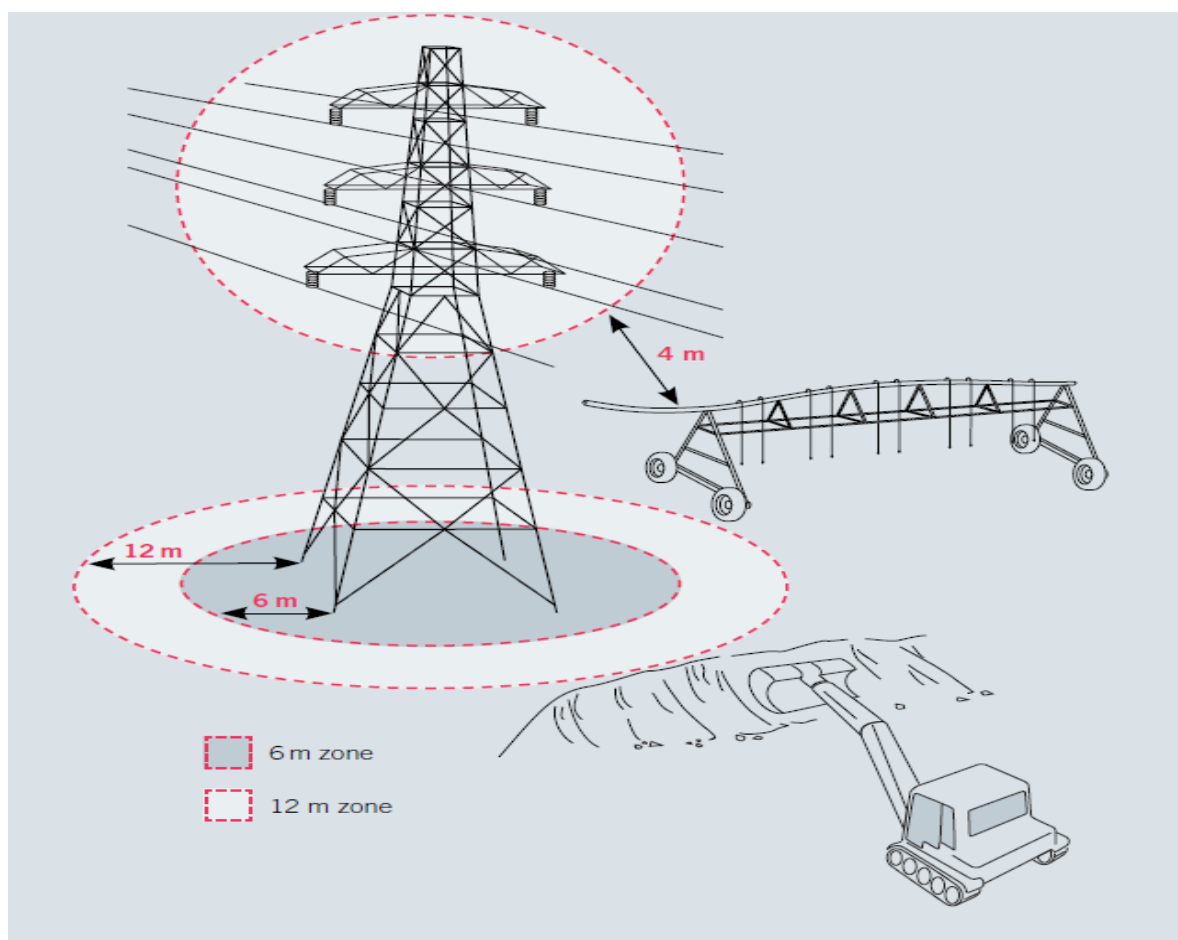


Figure IV.5 Distances d'approches dans une exploitation agricole

IV.4.4 Proximité des ouvrages linéaires de type clôture, glissière d'autoroutes

Les structures métalliques linéaires qui sont connectées électriquement avec le sol en un ou quelques points et qui sont parallèles à une ligne HT/THT doivent être raccordées au sol à intervalles adéquats et/ou séparées par des éléments isolants afin de réduire la taille des boucles [67, 68]. Une étude particulière dont la finalité est de garantir la sécurité des personnes est exigée.

IV.4.5 Proximité des canalisations de transport de fluide

Conformément à l'Arrêté Technique des dispositions doivent être prises en cas de voisinage d'une ligne électrique HT/THT et d'une canalisation de transport de fluide pour éviter le claquage du revêtement protecteur de la canalisation et le franchissement électrique des joints isolants, lorsqu'il se produit un court-circuit monophasé à la terre sur la ligne électrique. Une distance minimale de 2 m doit être respectée entre la canalisation et la prise de terre du pylône (y compris les éléments destinés à l'amélioration de la prise de terre).

Il s'agit de vérifier que lors d'un défaut, le cumul de la contrainte électrique appliquée à la canalisation par la suite du passage du courant de court circuit et celle du phénomène d'induction, est inférieur à 4000 ou 5000 V. La valeur à prendre en compte de 4000 ou 5000 V est à vérifier avec le propriétaire de la canalisation.

On admet qu'un majorant de la contrainte appliquée à l'isolant d'une conduite est égal à la somme arithmétique des valeurs efficaces des tensions provenant des phénomènes suivants :

- induction magnétique provoquant une élévation du potentiel de la canalisation par rapport au sol ;
- conduction due à l'écoulement du courant de défaut par la prise de terre d'un pylône et provoquant une élévation du potentiel du sol voisin de la canalisation par rapport au potentiel du métal.

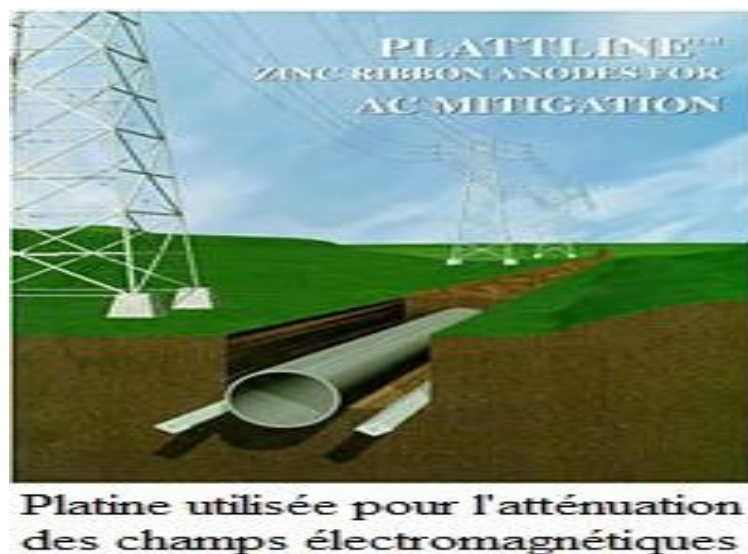


Figure IV.6 Proximité des canalisations de transport de fluide

IV.4.5.1 Cas particulier des canalisations de transport d'eau

Les effets de proximité peuvent, en cas de court-circuit, entraîner une dégradation de ces canalisations. Ils sont à prendre en compte pour les canalisations de transport d'eau d'un diamètre supérieur ou égal à 300 mm.

Trois types de canalisations sont distingués :

- C1 : canalisations métalliques avec un revêtement isolant,
- C2 : canalisations métalliques non isolées du sol,
- C3 : canalisations non métalliques (béton, PVC, PE, ...).

IV.4.6 Prévention des risques électriques vis-à-vis des personnes

Au voisinage des ouvrages HT/THT, il est impératif de garantir la sécurité des personnes vis-à-vis de la montée en potentiel des installations de mise à la terre apparaissant lors de l'écoulement d'un défaut d'isolement à la terre. Le risque d'électrocution est lié non à la valeur de l'élévation du potentiel de terre, mais au courant traversant le corps humain. Il est donc nécessaire de limiter le courant traversant une personne à une valeur n'entraînant normalement aucun risque organique, lorsque cette personne est placée dans une position caractéristique (debout, couchée, en contact avec le support) qui dépend du lieu. La valeur maximale de ce courant en fonction de la durée du défaut est définie dans la norme CEI 60479-1[65, 67].

La condition à respecter consiste à ce que la zone de contrainte de l'ouvrage HT/THT n'empiète pas sur la zone d'évolution des personnes :

IV.4.6.1 Zone de contrainte

La zone de contrainte est la zone au sein de laquelle le courant admissible est susceptible d'être dépassé. Elle est délimitée par un cercle centré sur l'axe du circuit de terre du pylône et de rayon égal à la somme du rayon du cercle englobant la totalité du circuit de terre et d'une distance d'éloignement (d_{mini}) dépendant du lieu et des caractéristiques électriques de l'ouvrage voir figure IV.5.

IV.4.6.2 Zone d'évolution

La zone d'évolution des personnes est la zone où la probabilité de présence prolongée d'une personne au voisinage du pylône est très forte y compris dans des conditions climatiques dégradées (orage, fortes pluies, vent fort ou brouillard), qui sont les causes principales du défaut. Cette zone est à apprécier au cas par cas. Elle peut être confondue avec les limites de l'installation considérée (cas des maisons d'habitation où l'on peut considérer que la probabilité de présence d'une personne dans un jardin est faible en cas d'intempérie). Mais, elle peut être étendue à l'ensemble de la zone d'activité (cas des campings par exemple).

Il faut donc respecter une distance minimale (d_{mini}) entre le périmètre du cercle englobant la prise de terre du support et la zone d'évolution des personnes voir figure IV.5. La distance (d_{mini}) est généralement à calculer au cas par cas car elle dépend du lieu et des caractéristiques électriques de l'ouvrage.

Dans le cas où l'implantation du support conduit à ce que la zone de contrainte empiète sur la zone d'évolution des personnes, il faut procéder à des aménagements de la ligne ou du voisinage de l'ouvrage afin de limiter les risques vis à vis des personnes.

Ces aménagements peuvent consister par exemple en la construction d'une clôture destinée à éloigner le public des abords du support considéré, ou à recouvrir le sol d'un revêtement moins conducteur que le terrain naturel (bitume, ...) [65, 66, 67].

IV.4.7 Prévention des risques électriques vis-à-vis des travailleurs

Pour le personnel de la société Algérienne de gestion du réseau de transport de l'électricité GRTE les actes d'intervention, rentrant dans le cadre de l'exploitation et de la maintenance du réseau HT/THT national, sont réglementés et réservés exclusivement aux travailleurs dûment habilités en fonction des aptitudes et connaissances requises pour chaque type d'opération avec les niveaux d'habilitation y afférent à savoir : personnel exécutant, électricien manœuvrier, chef de travaux, chef de consignation, chef d'essai, chef de réquisition, chef d'exploitation, etc.[66, 67, 68]

Aussi, l'aspect relatif aux règles et prescription de sécurité lors des interventions sur les lignes HT/THT revêt un caractère hautement stratégique et important dans l'entreprise GRTE et soumis à des directives strictes régies par le carnet de prescription (CDP) [66], code des manœuvres (CM) ainsi que les consignes générales et particulières d'exploitation (CGE et CPE).

A cet égard, le meilleur exemple pour illustrer les phénomènes d'induction pour les travailleurs spécialistes de la société GRTE demeure les interventions sur les lignes HT/THT consignées donc hors tension, lesquelles interventions nécessitent obligatoirement des dispositions particulières liées au fait que la ligne consignée (hors tension) objet des travaux subit une induction électromagnétique de la part d'une autres ligne HT/THT qui elle est en exploitation normale et qui dans un lieu géographique déterminé emprunte le même couloir que la ligne consignée, ce qui peut être invisible à l'endroit des travaux.

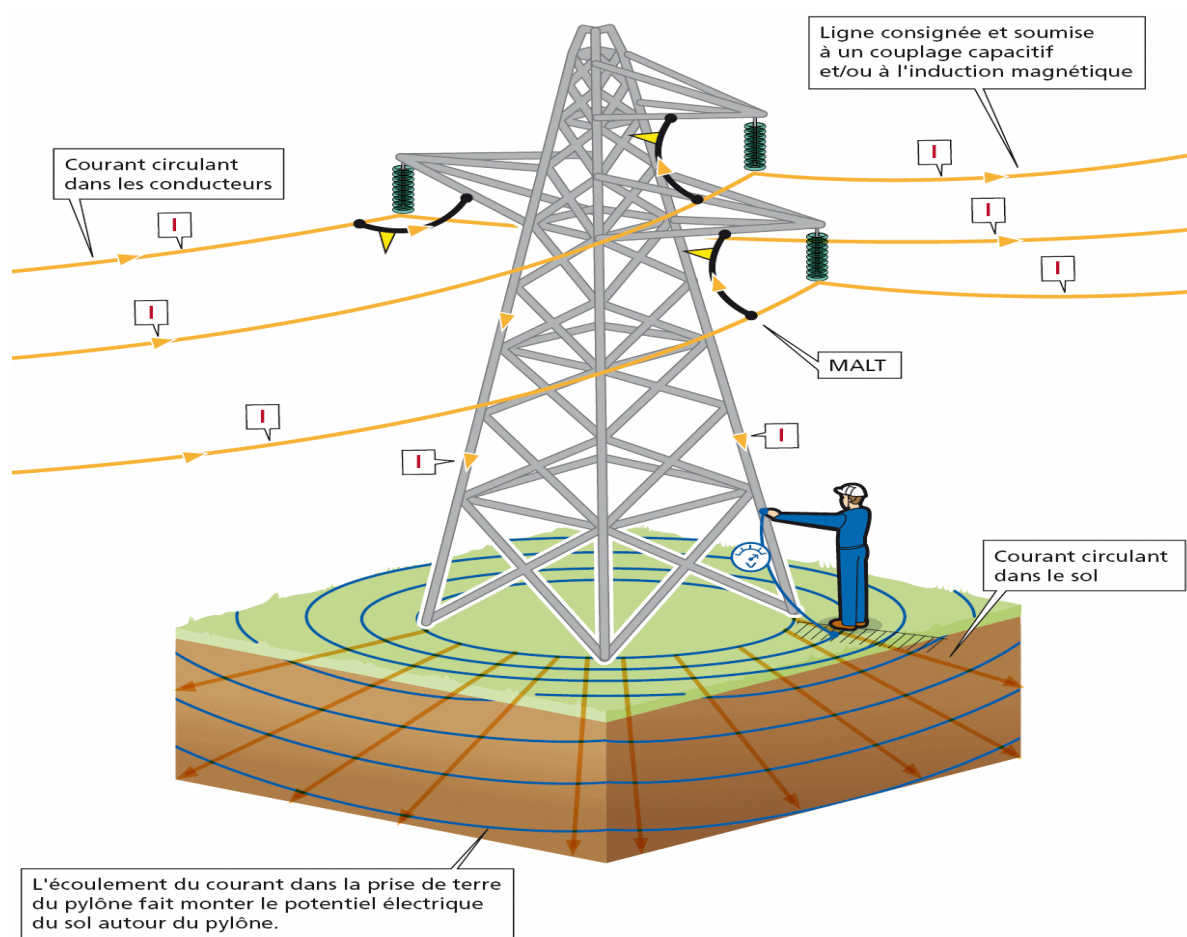


Figure IV.7 ligne consignée (hors tension) objet des travaux subit une induction électromagnétique de la part d'une autres ligne HT/THT

IV.4.8 Prévention des risques électriques vis-à-vis des équipements des tiers

L'élévation de potentiel de la prise de terre d'un support HT suite à un défaut est susceptible d'être transférée en partie à la prise de terre des masses des bâtiments situés au voisinage. Cette montée en potentiel risque de compromettre la tenue diélectrique des équipements électriques installés chez les tiers. Il est impératif de prendre des dispositions constructives telles que la différence de potentiel entre les masses de l'installation des tiers et la prise de terre des masses lointaines ramenées sur l'installation par les réseaux de distribution (neutre du réseau de distribution BT, par exemple) n'excède pas 1500 V.

Ces aménagements peuvent consister par exemple, en des améliorations de terre du support considéré, orientées à l'opposé des équipements que l'on souhaite protéger des élévations de potentiel.

IV.4.8.1 Transposition de phases (Permutation des conducteurs)

Des permutations peuvent être nécessaires sur les ouvrages de grande longueur pour réaliser l'équilibrage des transits sur les trois phases de chaque circuit et/ou limiter l'induction sur les ouvrages tiers présentant un long parallélisme avec l'ouvrage.

Dans le cas d'un risque de perturbation d'installations de tiers, un calcul d'induction doit être réalisé. Si le résultat du calcul l'indique, des permutations de conducteurs sont à réaliser.

Vis à vis de l'équilibrage des transits, seuls les ouvrages 400 kV sont concernés. Une permutation de conducteurs est à réaliser dès que la longueur de l'ouvrage dépasse 100 km.

Dans les deux cas, toute permutation est faite selon la règle des tiers de la longueur [65, 66].

Un exemple édifiant est illustré dans la figure IV.8, montrant un pylône spécial de transposition sur la ligne 400kV double ternes, reliant le poste source 400/220 kV de HASSI AMEUR à la centrale 1200 MW de TERGA et vers le poste source 400/220 kV de SIDI ALI BOUSSIDI dont sont issues les deux lignes 400kV d'interconnexion internationales à savoir la ligne 400kV Double ternes SIDI ALI BOUSSIDI – BOURDIM1 & BOURDIM2, ce pylône est situé dans la localité d'EL MALEH dans la Wilaya de AIN TEMOUCHENT.



Figure IV.8 Transposition de phases

IV.5 Effet de peau

L'effet de peau ou effet pelliculaire est un phénomène électromagnétique qui fait qu'à fréquence élevée, le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs.

Ce phénomène d'origine électromagnétique existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs, il provoque la décroissance de la densité de courant à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie du conducteur. Il en résulte une augmentation de la résistance du conducteur, ce qui conduit à des pertes par effet joule plus importantes [49, 70, 71].

Cet effet peut être utilisé pour alléger le poids des lignes de transmission à haute fréquence en utilisant des conducteurs tubulaires, ou même des tuyaux, sans perte de courant. Il sert aussi dans le blindage électromagnétique des fils coaxiaux en les entourant d'un mince étui métallique qui garde les courants induits par les hautes fréquences ambiantes sur l'extérieur du câble [70]. L'effet de peau consiste en une circulation du champ électromagnétique, qu'au voisinage de la surface du conducteur, sur une épaisseur :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (\text{VI.1})$$

Avec :

ω : pulsation [rad/s]

μ : perméabilité magnétique

σ : conductivité électrique.

En hautes fréquences, le courant tend à être confiné en surface du conducteur.

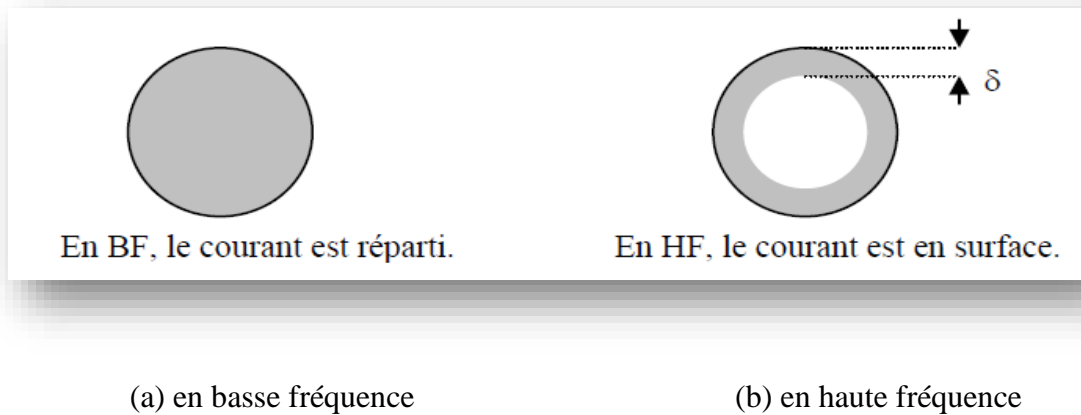


Figure IV.9 Effet de peau

IV.6 Effet Couronne bruits radioélectriques et acoustiques

L'effet de couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une très haute tension ; c'est l'importance du champ électrique à proximité de ce conducteur qui est à l'origine de l'ionisation du gaz.

En effet, dès que le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand c'est-à-dire supérieur au champ d'ionisation de l'air, $\approx 30 \text{ kV/cm}$, l'air s'ionise et il se produit des crépitements avec formation d'effluves bleutés et d'aigrettes lumineuse visible la nuit.

La lumière de la décharge couronne n'est visible que sur les lignes THT ($U \geq 400\text{kV}$), lorsqu'il fait sombre. Les inconvénients de cet effet se résume par les pertes couronne qui croissent avec la tension électrique, interférence avec les ondes radio, bruit et vibrations des conducteurs, l'effet couronne a aussi des avantages dans plusieurs applications industrielles : Filtres électrostatiques, séparateurs électrostatiques, photocopie....

L'effet couronne se produit principalement sur les conducteurs de ligne mais aussi sur les parties métalliques constituant les ossatures du pylône (bras de fixation des conducteurs ainsi que sur l'isolateur surtout par temps humide [48,70, 71].

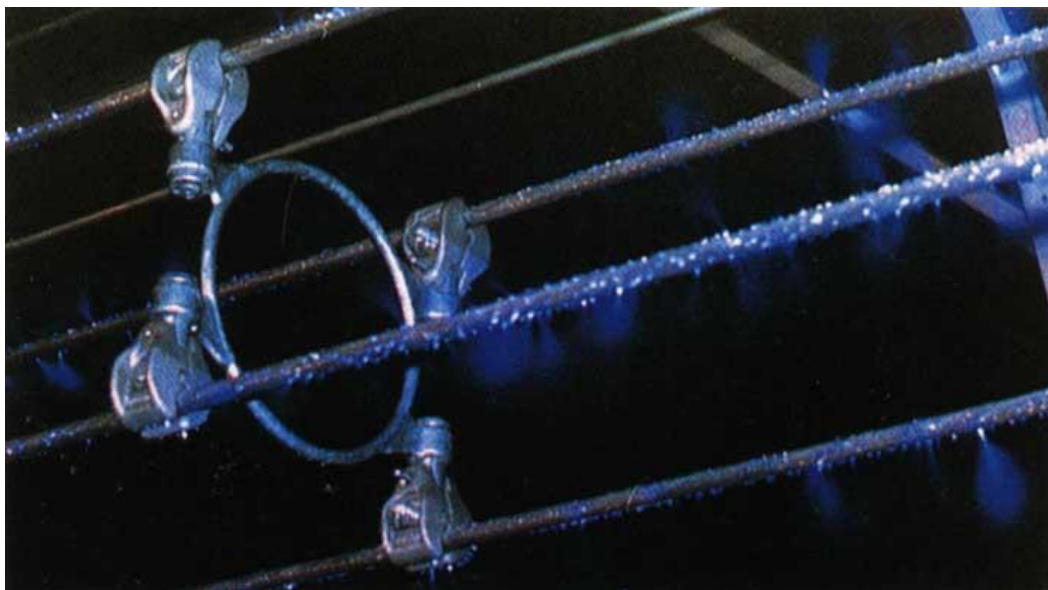


Figure IV. 10 Effet de couronne avec présence de petites saillies à la surface des conducteurs

VI.6.1 Perturbation causées par l'effet de Couronne

L'effet couronne est à l'origine des perturbations électromagnétiques des ondes radio, car les fréquences du courant de couronne sont du même ordre de grandeur que celles des ondes radio. Les charges créées par ionisation sont brusquement mises en mouvement par le champ superficiel. Le courant qui en résulte crée un champ électromagnétique variable qui se propage dans l'air et provoque la perturbation des ondes radio.

L'effet couronne génère trois types de perturbations :

- perturbations radioélectriques,
- bruits acoustiques,
- pertes.

IV.6.1.1 Perturbations radioélectriques

Les perturbations radioélectriques dues aux lignes aériennes HT/THT peuvent être provoquées sur une large bande de fréquence par :

- les décharges dues à l'effet Couronne dans l'air à la surface des conducteurs et des matériels d'équipement ;
- les décharges et amorçages sur des parties des isolateurs suite à de fortes contraintes électriques ;
- l'amorçage sur de mauvais contacts.

L'effet nuisible des lignes électriques, et plus généralement de toutes sources perturbatrices, sur la qualité des réceptions radioélectriques [72] est dû à la superposition d'un bruit radioélectrique et de l'onde porteuse du signal utile.

Généralement, le niveau de perturbations dû à l'effet couronne ne devient un élément de conception déterminant que pour les lignes de tension égale ou supérieure à 220 kV.

Le champ perturbateur engendré par l'effet couronne des conducteurs est alors prépondérant. Pour tous les niveaux de tension, le niveau perturbateur du matériel équipant une portée de ligne aérienne doit rester négligeable devant le niveau perturbateur produit par les conducteurs de cette portée.

A partir de l'échelon de tension 220 kV, il convient d'utiliser des conducteurs de diamètre suffisant pour éviter l'apparition d'effluves dues à l'effet de couronne, générateur de pertes, de tensions parasites, et de perturbations radioélectriques.

Pour minimiser l'effet de couronne, il en découle les principes suivants :

- en 220 kV, les câbles de section inférieure à 570 mm^2 présentent un diamètre trop faible. Le câble de section 288 mm^2 peut néanmoins être toléré sur de faibles longueurs.
- en 400 kV, il est fortement recommandé de disposer les câbles par 2 (ou plus) en faisceau.

IV.6.1.2 Bruits acoustiques

L'effet couronne produit un bruit, ressemblant au bourdonnement d'abeilles. Le déplacement brusque des ions par le champ superficiel produit une variation locale de la pression de l'air qui se transforme en ondes sonores.

Les perturbations acoustiques apparaissent fréquemment pendant les périodes de mauvais temps et de brouillard. Par beau temps, elles se manifestent le plus souvent pour des lignes soumises à une forte pollution.

Le bruit est un facteur nuisible qui peut avoir des conséquences nuisibles sur le tissu biologique. Le bruit est tellement gênant pour l'environnement qu'il devient le paramètre principal à prendre en considération lors de la réalisation de réseaux THT.

Les éventuelles mesures de bruits doivent être effectuées conformément à la norme NFS 31 010.

IV.6.1.3 Dégagement gazeux

L'ionisation de l'air provoquée par l'effet couronne entraîne la création de gaz nocifs (oxydes d'azote NO - NO₂, de radicaux HO - HO₂ ainsi que l'ozone O₃) responsables d'une

corrosion des matériaux. Sur des lignes extérieures les conséquences sont moins importantes mais une corrosion notamment des isolants est tout de même remarquable [72, 73].



Corrosion d'un isolant



Fissure dans le ciment d'une Porcelaine

Figure IV.11 Influence des gaz sur les isolateurs

IV.6.1.4 Vibrations mécaniques

Ce phénomène intervient lorsqu'une pellicule d'eau se dépose sur le conducteur. La pluie, en présence d'un champ électrique va engendrer une vibration des conducteurs de l'ordre de 10 cm avec une fréquence de 1 à 10 Hz. Celle-ci est due au comportement des gouttes d'eau en présence d'un champ magnétique comme est montré par la figure VI.8 [74].

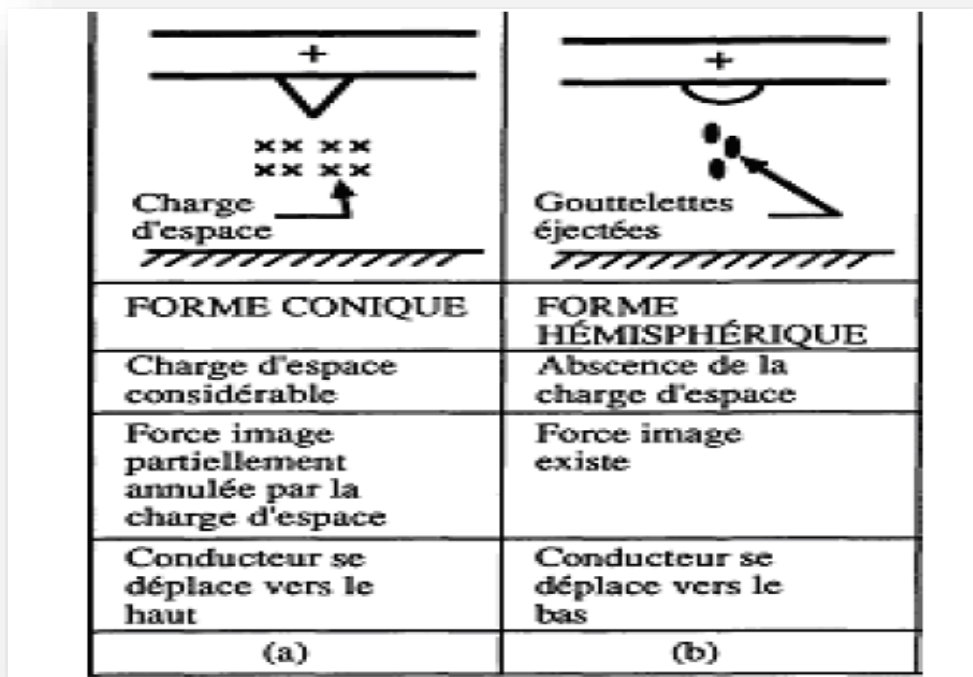


Figure IV.12 Schéma explicatif du phénomène de vibration des conducteurs

IV.6.1.5 Pertes par effet Couronne

Soit un conducteur HT alimenté en courant alternatif.

- Alternance positive : le conducteur attire les charges négatives et repousse les charges positives.
- Alternance négative : le conducteur attire les charges positives et repousse les charges négatives.

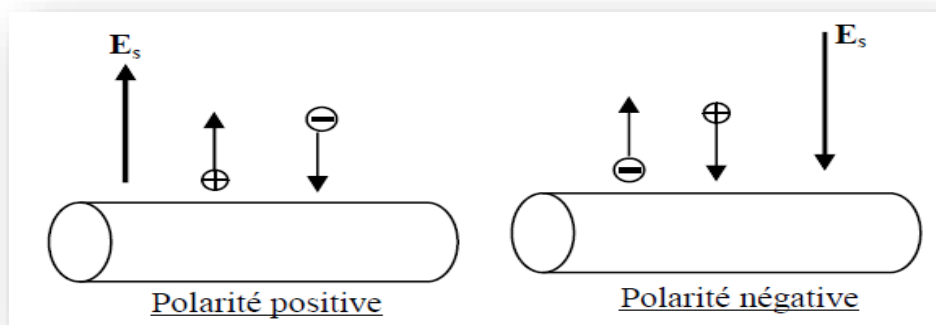


Figure IV.13 Emission des charges positives et négatives

Le mouvement des ions provoque une dissipation d'énergie par échauffement suite au frottement avec les atomes de l'air. Cette énergie qui est prélevée du réseau représente les pertes couronnes. Les pertes sont dues à un courant dans le plasma formant la couronne autour du conducteur, dont l'ordre de grandeur est environ $\Delta P=100 \text{ kW}$ [69, 70].

IV.6.1.6 Influence de la pluie

Les gouttes sur la surface du conducteur forment de véritables pointes qui rendent l'effet couronne beaucoup plus intense et des pertes considérables.

- Les lignes haute tension sont conçues de telle façon que l'effet couronne ne devrait pas poser de problèmes par temps sec ; c'est lorsque le temps est pluvieux qu'il devient vraiment gênant.
- Lorsque la pluie est forte, elle provoque au contraire le lavage de conducteur.
- Le temps améliore l'état de surface du conducteur, car une bonne partie des aspérités est brûlée au fur et à mesure par la décharge elle-même.
- Les pertes sont plus grandes pour un conducteur neuf car la graisse favorise l'accumulation des différentes particules.

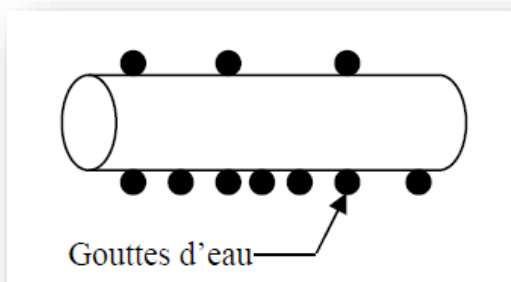


Figure IV.14 des pointes d'eau sur la surface d'un conducteur

VI.6.2 Réduction de l'effet Couronne sur les lignes électriques

La réduction de l'effet corona sur les lignes à haute tension n'est en général nécessaire que pour les lignes THT, c'est-à-dire à partir du pallier 400 kV. Au delà de la réduction des nuisances aux populations, le coût économique des pertes en ligne par effet corona peut justifier à lui seul de prendre des mesures correctives, ces mesures sont de deux types :

VI.6.2.1 Utilisation de conducteurs de gros diamètre

Pour limiter le champ électrique, à la surface, cette mesure est souvent inefficace et économiquement non justifiée, car l'effet de peau rend souvent inefficace le choix des conducteurs de grosse section.

VI.6.2.2 Utilisation de faisceau de conducteurs

Une technique permettant de limiter l'effet corona, consiste à remplacer un conducteur par plusieurs conducteurs maintenus à une distance fixe (par entretoises) dont la section totale est égale à celle du conducteur unique.

Deux conducteurs sont utilisés pour une tension de 400kV, trois conducteurs pour 500kV.

Cette technique trouve son application dans les lignes à très haute tension, supérieur à 220kV, par conséquent cet arrangement permet aussi de maintenir les champs superficiels des conducteurs à de valeurs admissibles de l'ordre de 17 kV/cm.

Le choix du nombre de conducteurs d'une ligne électrique se fait donc en fonction du courant à transiter, des conditions climatiques, des effets de peau et corona, et bien sur des aspects économiques.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents phénomènes liés au voisinage des lignes électriques de transmission de l'énergie.

Aussi, les lignes de transmission de l'électricité HT/THT ont plusieurs effets sur leurs entourages immédiats et de ce fait nécessite des mesures et dispositions particulières afin de minimiser leurs influences et ramener ainsi les valeurs dans la fourchette admises et tolérées par les règles techniques et les directives en vigueur.

En outre, la connaissance des principaux constituants des lignes HT/THT, ayant une incidence directe sur les champs électromagnétiques en général et le champ magnétique en particulier, à savoir la forme et silhouette des pylônes, la nature et composition des conducteurs ainsi que les tensions de service et le courant y afférent, nous permet de procéder à une évaluation des champs magnétiques engendrés par les lignes HT/THT avec application réelle sur des lignes de transmission de l'électricité 60kV, 220kV et 400 kV du réseau de transport de l'électricité national Algérien.

Ces modèles, applications et calcul concrets feront l'objet du dernier chapitre.

Chapitre V

**Simulation
et Mesure des Champs
Magnétiques au Voisinage
des Lignes HT/ THT**

Chapitre V

Simulation et Mesure des Champs Magnétiques au Voisinage des Lignes HT/ THT

Introduction

Il existe plusieurs méthodes numériques pour la simulation du champ magnétique et plusieurs logiciels ont été développés à cet effet, afin de faciliter aux chercheurs la simulation et le calcul des champs magnétiques. Pour notre part nous procéderons à la simulation et le calcul du champ magnétique au voisinage des lignes de transport haute et très haute tension à l'aide du logiciel COMSOL. Aussi, par la même occasion nous allons examiner et évaluer l'influence des différentes configurations relatives aux silhouettes des pylônes, ainsi que les différentes dispositions des conducteurs à savoir : horizontale, verticale et triangulaire [75], ainsi que l'impact des sections des conducteurs sur la valeur de l'induction magnétique \mathbf{B} et ceci pour les niveaux de tension 60 kV et 220 kV avec un et deux conducteurs par phase, en prenant en considération les conducteurs les plus utilisés dans le réseau Algérien comme, 570mm² ALMELEC (AAAC) et 288mm² ALU/ACIER (ACSR) [76] voir Annexe 2.

Pour le pallier 220 kV nous considérerons les lignes d'interconnexion entre le poste 220/60 kV HASSI AMEUR et le poste 220/60 kV PETIT LAC, cependant, pour le niveau de tension 60 kV nous allons prendre les lignes de répartition issues du poste source de PETIT LAC et alimentant le client HT TRAMWAY, le poste de distribution HT/MT de SENIA ainsi que la ligne 60 kV servant d'inter appui entre les postes de PETIT LAC et HASSI AMEUR situées à Oran à l'ouest de l'Algérie (figure V.1).

Aussi, nous allons traiter le cas de la ligne exploitée à pleine charge (courant nominal des transformateurs de courant (TC)), il reste entendu que cette valeur du courant ne sera jamais atteinte, mais ce cas a été pris à titre illustratif afin d'évaluer l'ordre de grandeur ainsi que les valeurs maximales limites des champs magnétiques générés par les lignes exploitées à pleine charge.

Enfin, nous traiterons le cas de la ligne 400 kV avec deux conducteurs en faisceau SALEH BEY - BIR GHBALOU (figure V.2) qui assure l'interconnexion entre l'Est et le Nord Algérien, La carte du Réseau National 220 kV / 400 kV est représentée dans l'Annexe 3.

Les points utilisés pour la simulation du champ magnétique au voisinage des lignes de transport de l'électricité HT/ THT du réseau Algérien ont été pris à une hauteur de deux mètres (2 m) au dessus du sol.

Les résultats obtenus par simulation sont comparés à ceux donnés par des mesures pratiques effectuées à l'aide d'un appareil CHAUVIN ARNOUX C.A 40 Gaussmeter device [24].

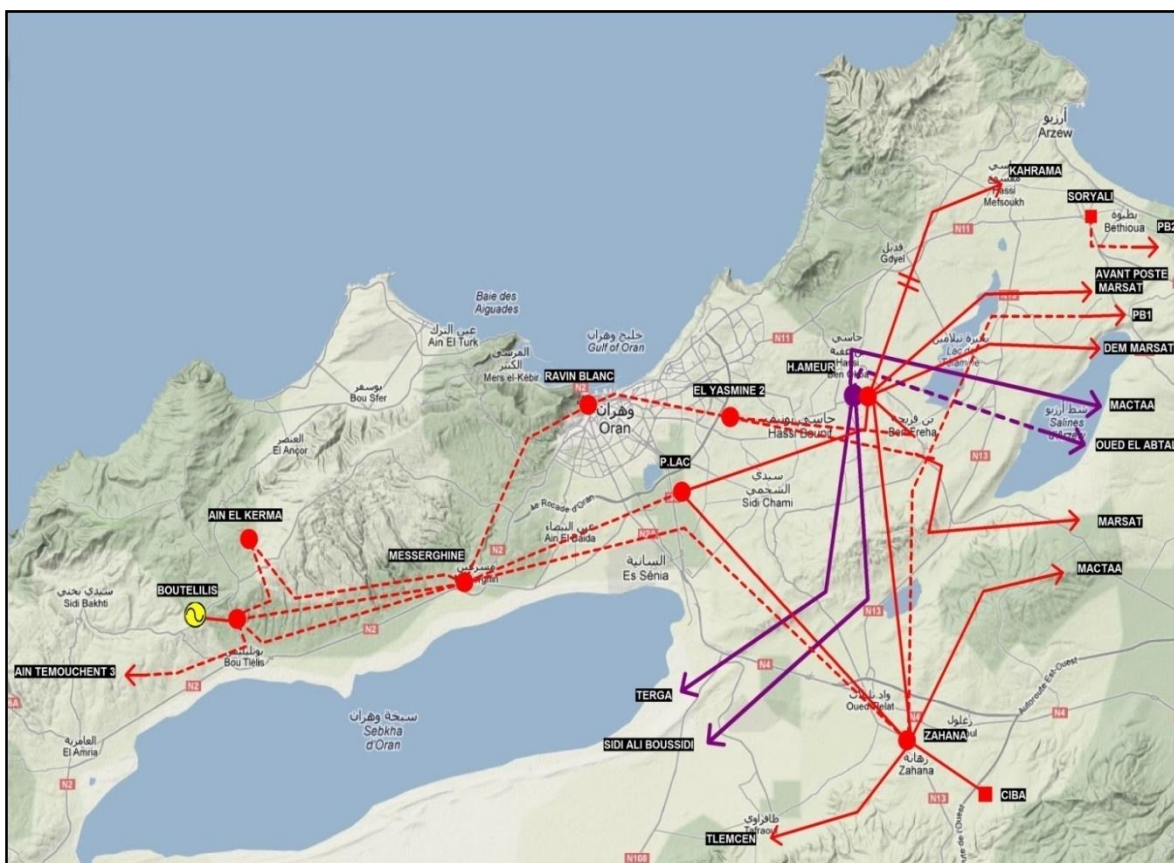


Figure V.1 Réseau 220 kV autour de la ville d'ORAN

V.1 Simulation sous COMSOL

V .1.1 Présentation du logiciel



COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses relations physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non-linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et MATLAB.

Ce logiciel est multiplateforme (Windows, Mac, Linux). En plus des physiques précitées, COMSOL Multiphysics autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible.

Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algèbro-différentiels (EAD) sont également possibles.

V.1.2 Etapes du processus de simulation sous COMSOL

La résolution d'un problème à l'aide du logiciel COMSOL suit une succession de calcul, qui se décompose suivant les quatre étapes de la résolution par la méthode des éléments finis :

- Création de la géométrie ;
- Définition des propriétés physiques des matériaux du système à étudier ;
- Définition des conditions aux limites ;
- Etablissement du maillage ;
- Résolution numérique ;
- Visualisation des Résultats.

Ces étapes de calcul s'effectuent indépendamment, ce qui permet une grande souplesse d'utilisation et une diminution du temps de calcul.

V.2 Champ magnétique généré par les lignes de transport de l'électricité

Les conducteurs de phases sont assimilés à des conducteurs infiniment longs parcourus par des courants qui créent à leurs tours des lignes de champ tout autour avec comme axe magnétique le conducteur de phase.

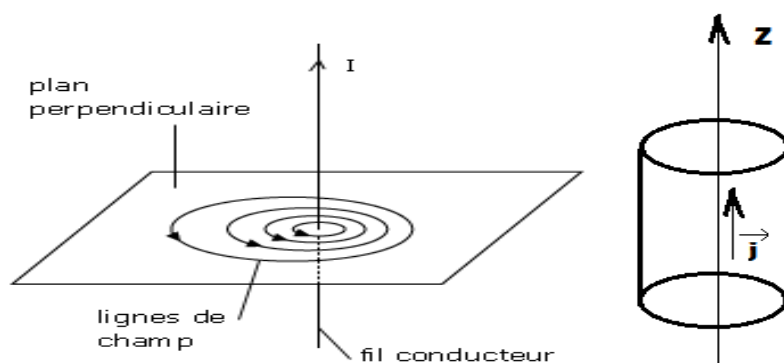


Figure V.3 Lignes de champ magnétique d'un fil rectiligne infini parcouru par un courant I

L'induction magnétique \mathbf{B} créée par le courant traversant le conducteur infini peut être calculée par la loi d'Ampère [18, 77, 78].

$$\mathbf{H} = \frac{I}{2\pi r} \quad (\text{V.1})$$

L'induction magnétique \mathbf{B} est liée au champ magnétique par la relation :

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (\text{V.2})$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (\text{V.3})$$

Où I est le courant traversant le conducteur et r la distance entre le conducteur et le point de mesure P .

V.3 Modèle électromagnétique

Les phénomènes électromagnétiques sont décrits par les équations de J.C Maxwell, selon le domaine d'étude, certains phénomènes sont négligés, les lois sont alors découplées et donnent naissance à des modèles plus simples pour l'utilisation [21, 29].

Dans notre travail nous allons opter pour le modèle magnétostatique, le courant source est quasi statique, l'induction magnétique est créée par les courants sources.

La connaissance du vecteur potentiel \vec{A} donne connaissance de tous les paramètres physiques (\vec{B} , \vec{H}) où :

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{V.4})$$

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A} \quad (\text{V.5})$$

L'évolution spatiale du phénomène électromagnétique est donnée par la loi magnétostatique:

$$\overrightarrow{\text{Rot}} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{Rot}} \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (\text{V.6})$$

L'équation (V.6) décrit le comportement magnétostatique d'un conducteur infiniment long parcouru par un courant [21,25].

Cependant, dans ce travail nous essayerons de simuler le champ magnétique au voisinage des lignes de transport de l'électricité 60 kV, 220 kV et 400 kV pour différentes silhouettes de pylônes et pour des valeurs de courant de charge variées [77, 78, 79], ces valeurs ont été prises au courant des journées du 12 et 17 Mars 2015 (ligne 400kV) dont les courbes de charges nationales sont indiquées par les figures ci-dessous, aussi nous allons examiner l'influence des sections des conducteurs sur les valeurs de l'induction magnétique \vec{B} .

Nous terminerons par une simulation du champ magnétique de la ligne 220 kV exploitée à pleine charge ($I=1200\text{A}$) pour les modèles géométriques proposés.

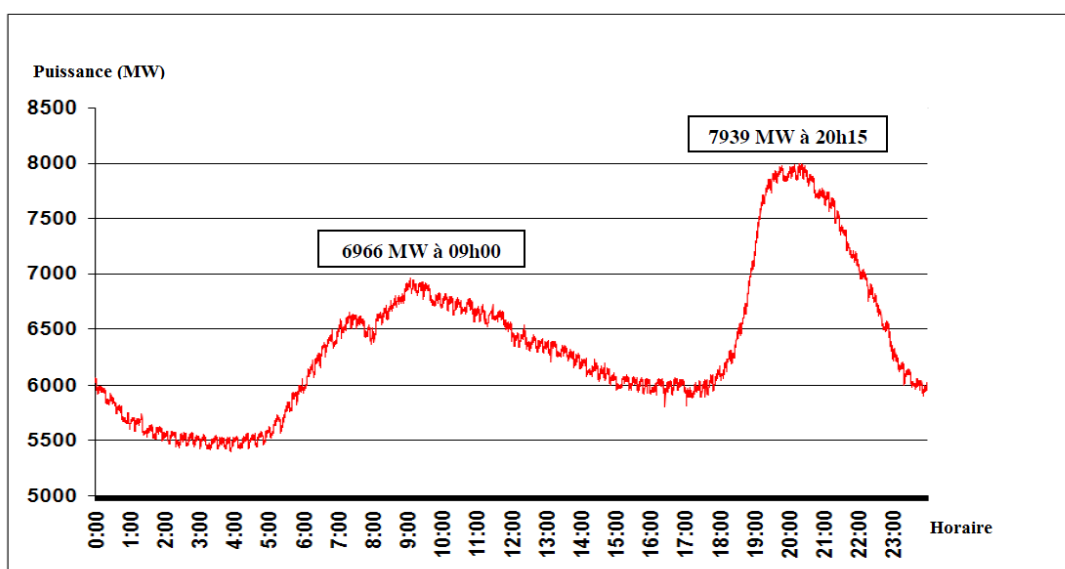


Figure V.4 Courbe de charge Nationale pour la journée du 12/03/2015

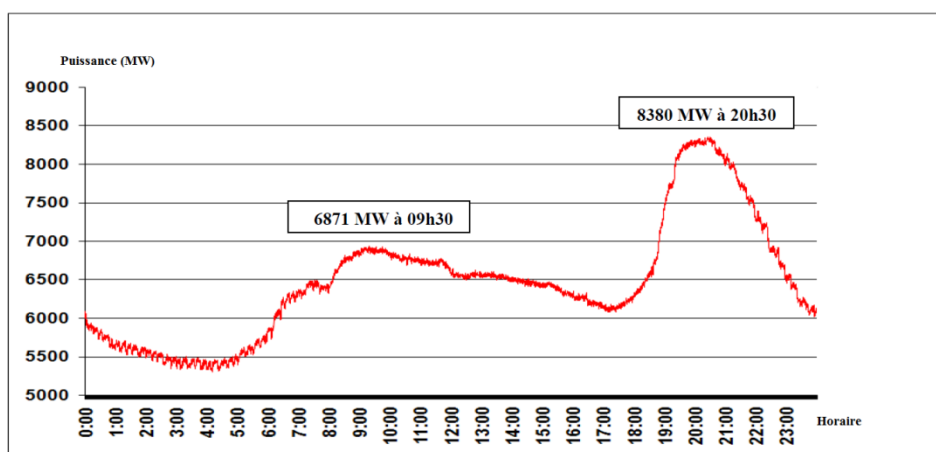


Figure V.5 Courbe de charge Nationale pour la journée du 17/03/2015

V.4 Modèles géométriques de la ligne 60 kV

Les modèles géométriques des lignes 60 kV avec un seul conducteur par phase pour les différentes configurations horizontale, verticale et triangulaire sont présentées ci-dessous :

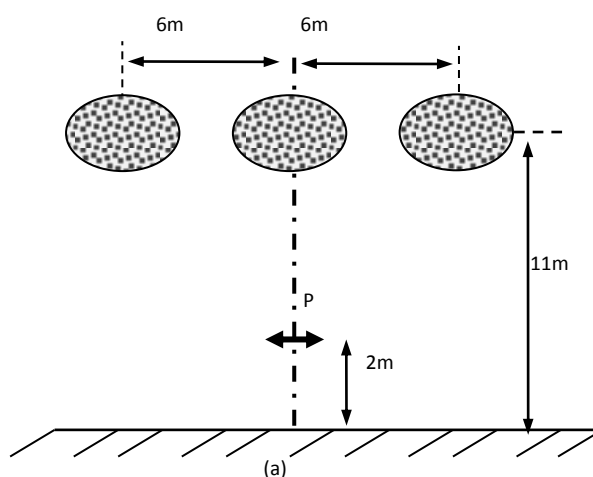


Figure V.6 Ligne 60 kV disposition horizontale



Figure V.7 Ligne 60 kV HASSI AMEUR – PETIT LAC

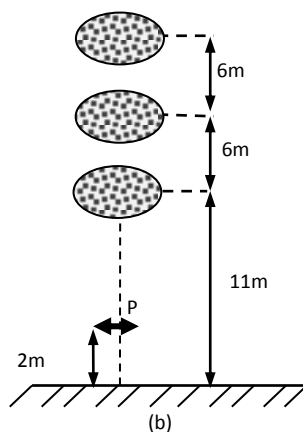


Figure V.8 Ligne 60 kV disposition verticale



Figure V.9 Ligne 60 kV PETIT LAC – TRAMWAY

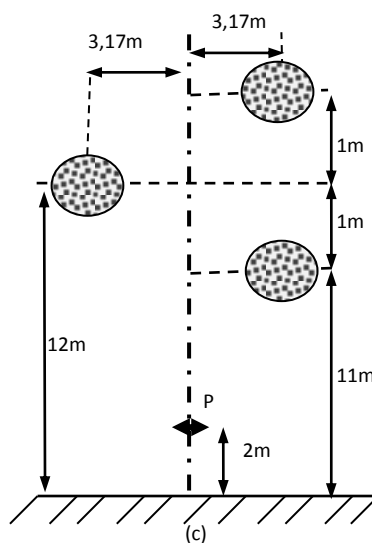


Figure V.10 Ligne 60 kV disposition triangulaire



Figure V.11 Ligne 60 kV PETIT LAC - SENIA

V.4.1 Paramètres de la ligne triphasée 60 kV

Le conducteur de la ligne triphasée 60 kV est en ALU/ACIER (ACSR), de section et de rayon géométrique équivalent :

- $S = 288 \text{ mm}^2$, $req = 0.0084 \text{ m}$.

Le courant de charge pour les différentes configurations à des moments et à des journées différentes :

- $I = 15 \text{ A}$, 20 A et 26 A .

V.4.2 Résultats de simulation pour la ligne triphasée simple terre 60 kV

Les figures V.12, V.13 et V.14 illustrent les variations de l'induction magnétique à 2 m au dessus du sol pour des courants de charge variés, ceci pour différentes configurations des pylônes.

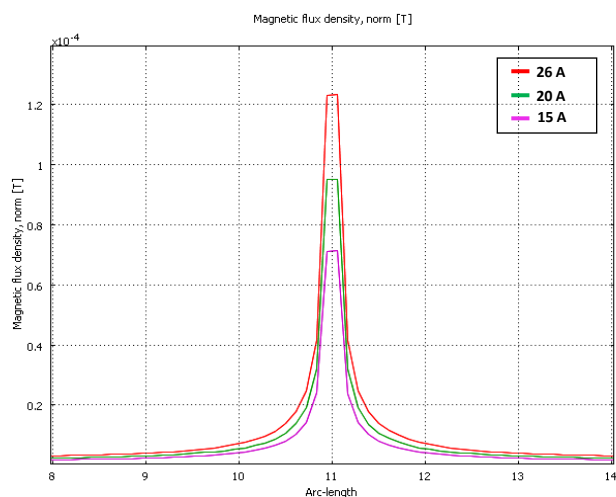


Figure V.12 Induction magnétique pour la ligne 60 kV – 50 Hz disposition horizontale

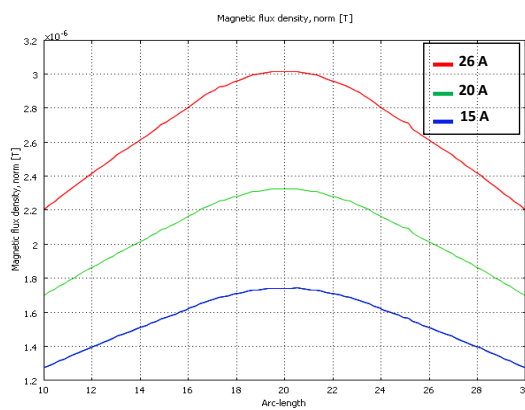


Figure V.13 Induction magnétique pour la ligne 60 kV – 50 Hz disposition verticale

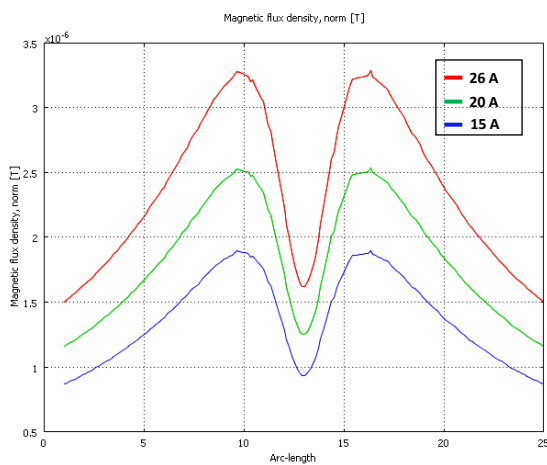


Figure V.14 Induction magnétique pour la ligne 60 kV – 50 Hz disposition triangulaire

- Les résultats de simulation pour la ligne 60 kV sont consignés dans le tableau suivant :

Configurations	Courant de charge I [A]	Induction magnétique calculée B [μ T]	Induction magnétique mesurée B [μ T]
Horizontale	26	1.56	1.75
	20	1.20	1.48
	15	0.90	1.05
Triangulaire	26	1.62	1.85
	20	1.26	1.45
	15	0.94	1.11
Verticale	26	3.00	3.29
	20	2.32	2.60
	15	1.74	1.95

Tableau V.1 Induction magnétique de la ligne 60 kV – 50 Hz à 2 m au-dessus du sol pour différentes configurations et différent courant de charge

Les figures V.12, V.13 et V.14 montrent que l'induction magnétique **B** pour la ligne 60kV à 2 m au dessus du sol augmente avec les valeurs du courant de charge. D'après les résultats du tableau V.1, on Remarque que l'induction magnétique générée par la configuration verticale est grande par rapport à celle générée par les configurations horizontale et triangulaire. Aussi l'induction magnétique générée par la disposition triangle est supérieure à celle générée par la disposition horizontale.

V.5 Modèles géométriques de la ligne triphasée simple terne 220 kV

Les modèles géométriques des lignes triphasées 220 kV avec un seul et deux conducteurs par phase sont représentés par les figures suivantes :

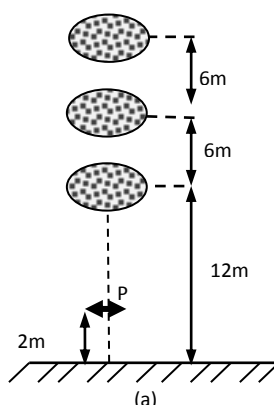


Figure V.15 Ligne 220 kV, disposition verticale avec un conducteur par phase



Figure V.16 Ligne 220 kV HASSI AMEUR – PETIT LAC un seul conducteur par phase

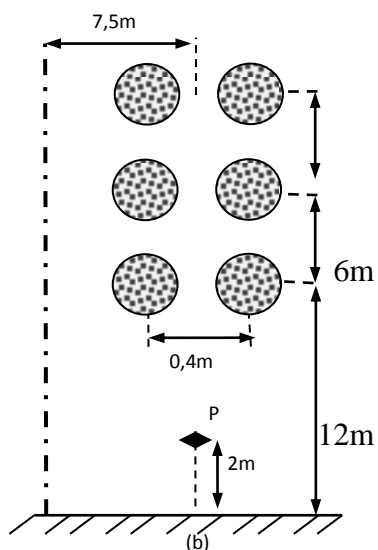


Figure V.17 Ligne 220 kV disposition verticale avec deux conducteurs par phase



Figure V.18 Ligne 220 kV deux conducteurs par phase HASSI AMEUR – KAHRAMA

V.5.1 Paramètres de la ligne 220 kV

a- Ligne 220 kV triphasé simple terne en nappe vertical avec un seul conducteur par phase

Le conducteur de la ligne est en (ALU/ACIER, ALMELEC) de section et de rayon géométrique équivalent :

$$S = 288\text{mm}^2, \text{req} = 0.0084\text{m};$$

$$S = 570\text{mm}^2, \text{req} = 0.012\text{m}.$$

b- Ligne 220kV triphasé simple terne en nappe vertical avec deux conducteurs par phase

Le conducteur de la ligne est en ALU/ACIER de section et de rayon géométrique équivalent :

$$S = 2 \times 288\text{mm}^2, \text{req} = 0.058\text{m}.$$

Le courant de charge pour les deux cas :

$$I = 311\text{A}, 398\text{A et } 500\text{A}.$$

V.5.2 Résultats de simulation pour la ligne triphasée simple terne 220 kV,

Les figures suivantes V.19, V.20 et V.21 illustrent les variations de l'induction magnétique à 2m au dessus du sol engendré par les lignes 220 kV simple terne, équipés d'un conducteur et de deux conducteurs en faisceaux par phase pour les câbles 570mm² ALMELEC, 288mm² ALU/ACIER et 2X288mm² ALU/ACIER, pour différentes charges.

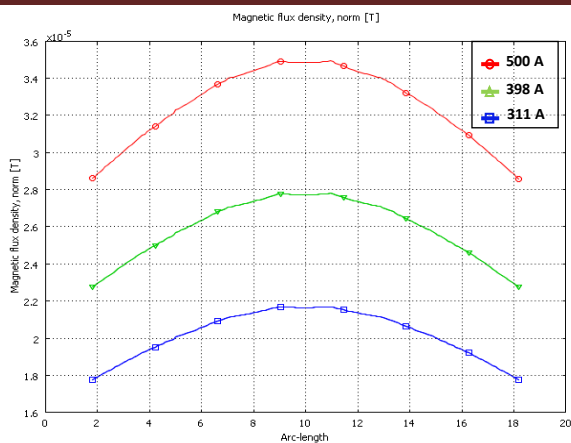


Figure V.19 Induction magnétique pour la ligne 220 kV – 50 Hz disposition verticale

$$S = 570 \text{ mm}^2$$

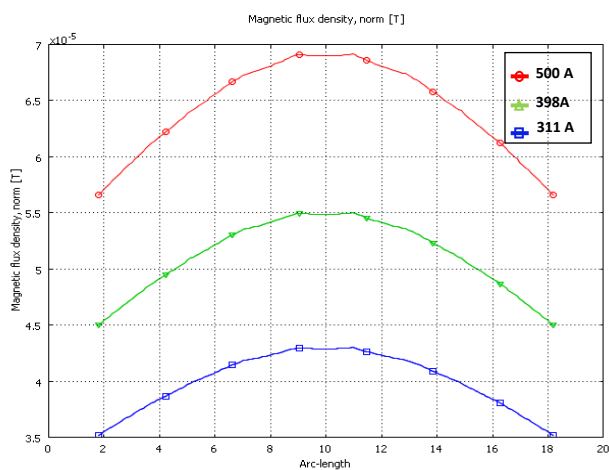


Figure V.20 Induction magnétique pour la ligne 220 kV – 50 Hz disposition verticale

$$S = 288 \text{ mm}^2$$

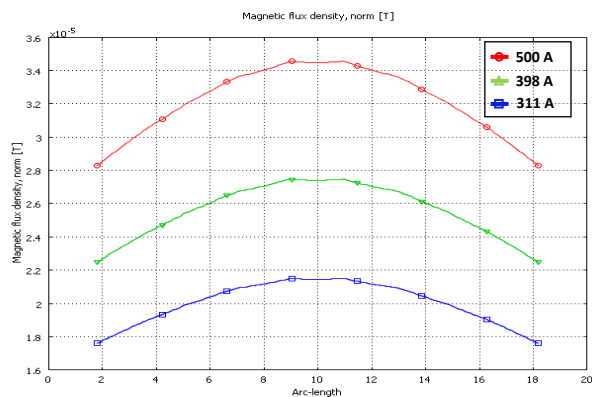


Figure V.21 Induction magnétique pour la ligne 220 kV en faisceau $S = 2 \times 288 \text{ mm}^2$

Les résultats de simulation pour la ligne 220 kV sont indiqués dans le tableau suivant :

Sections des conducteurs S [mm ²]	Courant de charge I [A]	Induction magnetic B [μT]
2x288	500	34.46
	398	27.40
	311	21.44
570	500	34.82
	398	27.72
	311	21.64
288	500	68.94
	398	54.84
	311	42.89

Tableau V.2 Induction magnétique à 2m au dessus du sol pour différente section de conducteur et différent courant de charge

Les figures V.19, V.20 et V.21 montrent que pour la ligne simple terne 220 kV, un conducteur par phase et deux conducteurs par phase, l'induction magnétique augmente avec l'augmentation du niveau du courant de charge. Le tableau V.2 indique les valeurs de l'induction magnétique à 2m au dessus du sol pour la ligne 220 kV avec différente sections des conducteurs de phases et différent courant de charge. Il est bien clair que l'induction magnétique générée par la ligne simple terne 220 kV avec deux conducteurs par phase 2x288 mm² est inférieure à celle générée par la ligne simple terne 220 kV avec un conducteur par phase section 288 mm² c'est similaire avec la section 570 mm² parce que la densité de courant J diminue avec l'augmentation de la section des conducteurs pour un même courant de charge. On remarque aussi que **B** augmente avec l'augmentation du courant de charge pour les différent cas de sections prises. Nous voyons bien que les valeurs de l'induction magnétique pour la ligne 220 kV ne dépasse pas la valeur limite d'exposition 100 μT donnée par (ICNIRP) [16].

V.6 Modèles géométriques d'une ligne 220 kV exploitée à pleine charge

Les modèles géométriques d'une ligne 220 kV simple et double terre avec un et deux conducteurs par phase sont présentées par les figures suivantes :

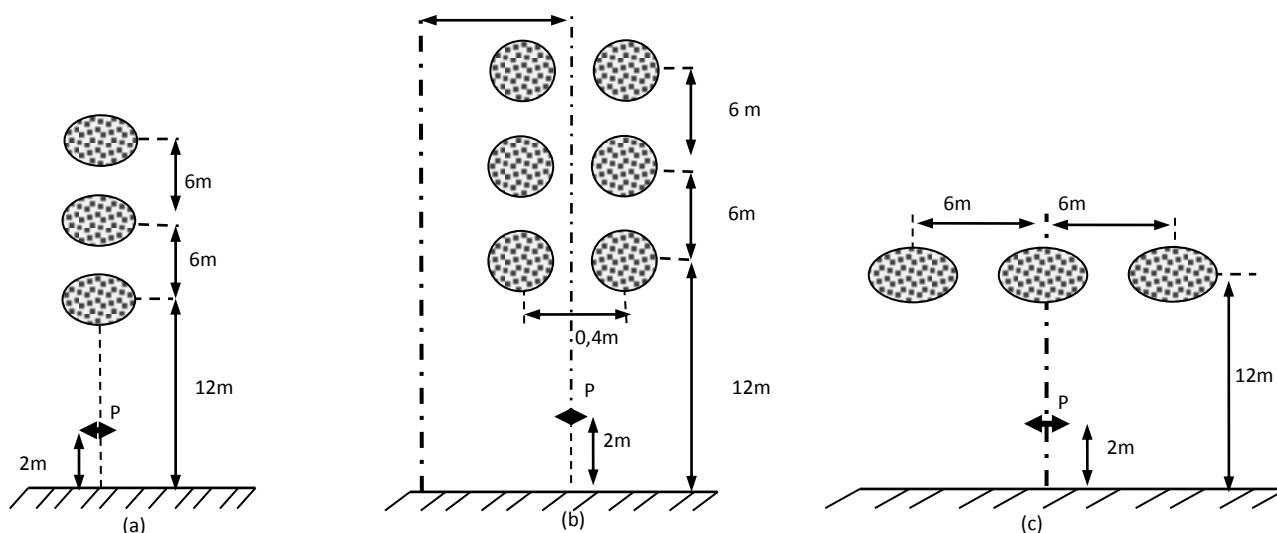


Figure V.22 Ligne 220 kV simple terre

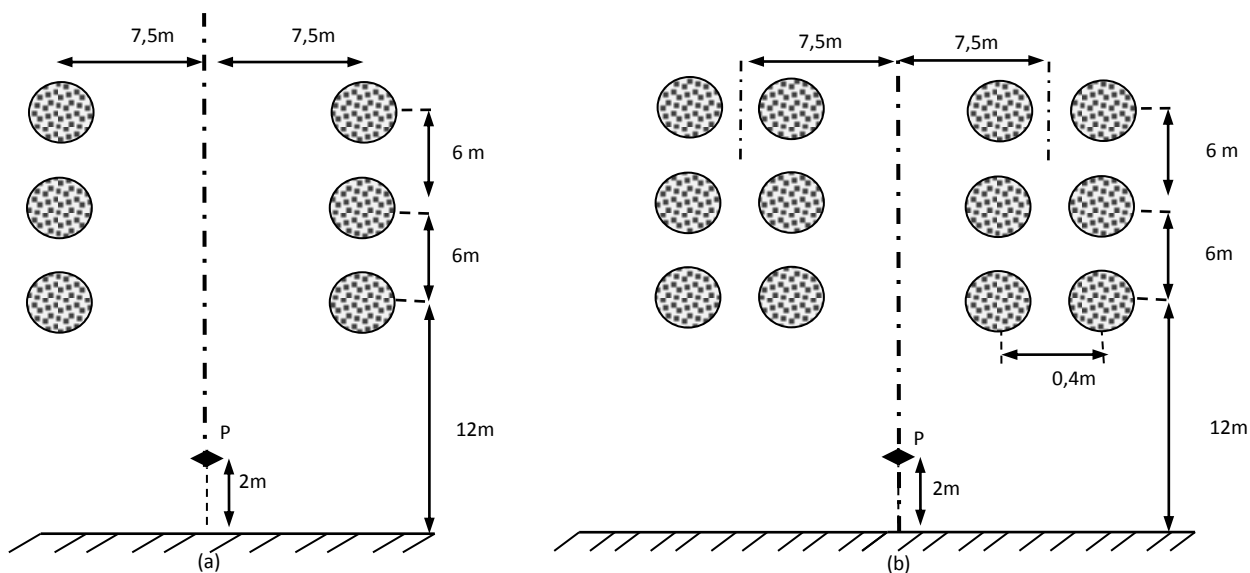


Figure V.23 Ligne 220 kV double terre

V.6.1 Paramètres de la ligne 220 kV exploitée à pleine charge

a- Ligne 220 kV triphasé simple terne

Le conducteur de la ligne est en (ALMELEC) de section et de rayon géométrique équivalent :

$$S = 570\text{mm}^2, \text{req} = 0.012\text{m}$$

$$S = 2 \times 570\text{mm}^2, \text{req} = 0.07\text{m}$$

b- Ligne 220kV triphasé double terne

Le conducteur de la ligne est en (ALU/ACIER, ALMELEC) de section et de rayon géométrique équivalent :

$$S = 570\text{mm}^2, \text{req} = 0.012\text{m}$$

$$S = 2 \times 288\text{mm}^2, \text{req} = 0.058\text{m}$$

Le courant de charge pour les deux cas :

$$I = 1200\text{A} \text{ (courant en pleine charge)}$$

V.6.2 Résultats de simulation pour la ligne 220 kV exploitée à pleine charge

Pour cette étape nous allons faire des calculs de simulation de l'induction magnétique B pour une ligne 220 kV exploitée en pleine charge, cette démarche permet de généraliser les résultats obtenus ainsi que les conclusions y afférentes à l'ensemble des lignes de transport et d'interconnexion 220 kV du réseau national dont les caractéristiques techniques des conducteurs et configurations des pylônes sont similaires à celles des lignes 220 kV :

Hassi Aneur – Petit Lac et Hassi Aneur – Kahrama selon le cas.

V.6.2.1 ligne triphasée 220 kV simple terne

Les figures ci-dessous illustrent les variations de l'induction magnétique à 2 m au dessus du sol pour un courant de pleine charge, ceci pour un et deux conducteurs par phases, aussi la densité de flux magnétique est présentée, ainsi que le profil en 3D de l'induction magnétique.

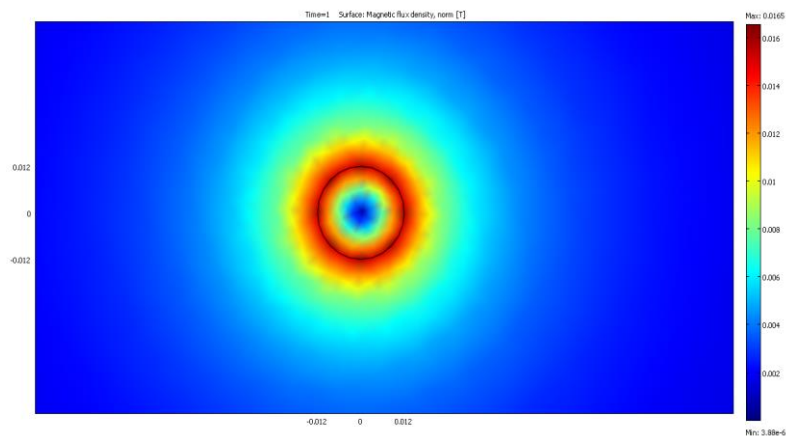


Figure V.24 Densité de flux magnétique pour un seul conducteur de phase

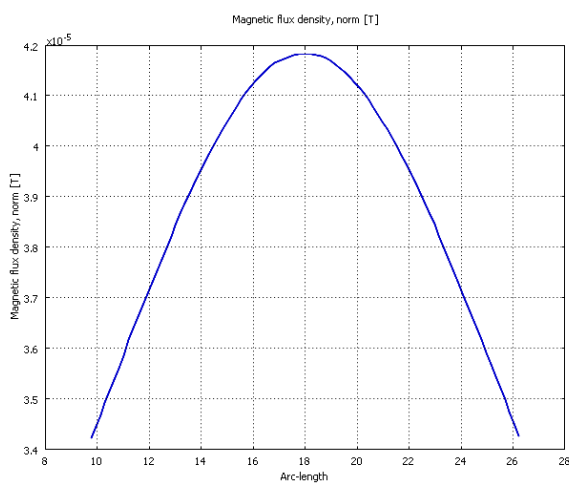


Figure V.25 Induction magnétique un seul conducteur par phase $S = 570\text{mm}^2$

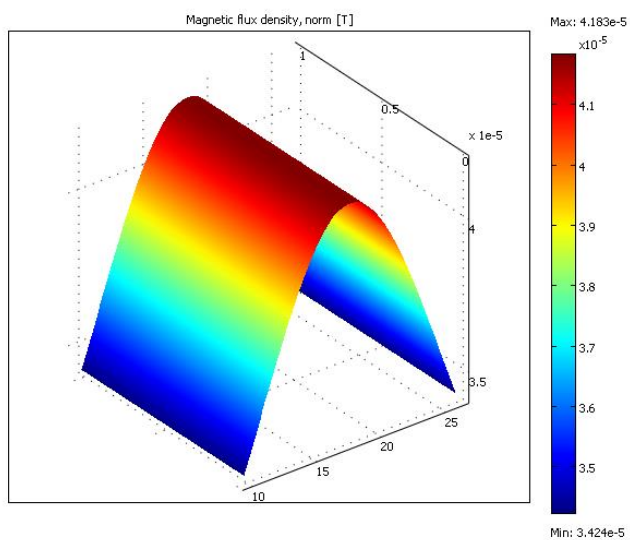


Figure V.26 Induction magnétique en 3D un seul conducteur par phase

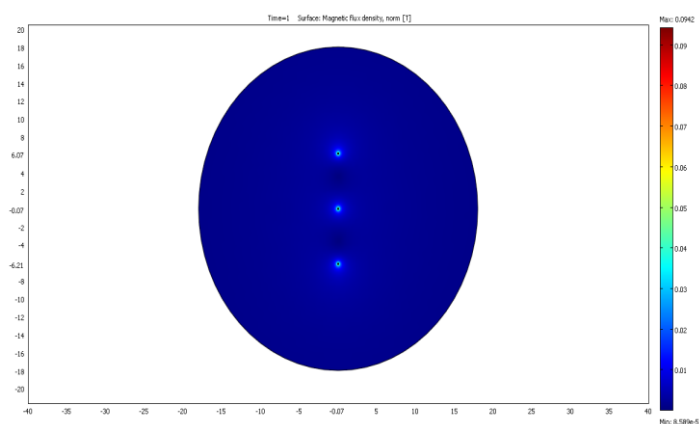


Figure V.27 Densité de flux magnétique pour la ligne 220 kV en faisceau $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$

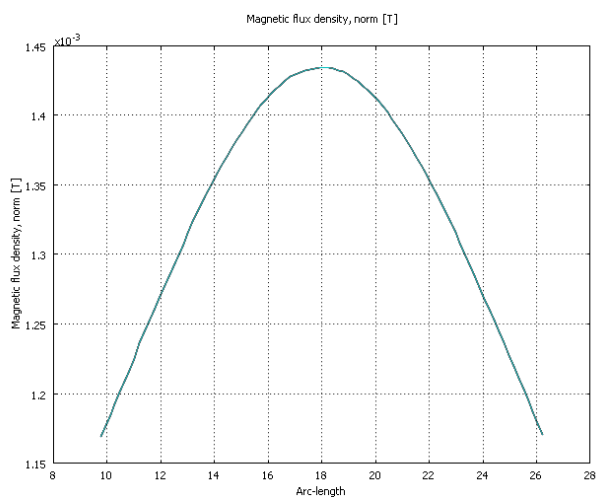


Figure V.28 Induction magnétique pour la ligne 220kV en faisceau $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$

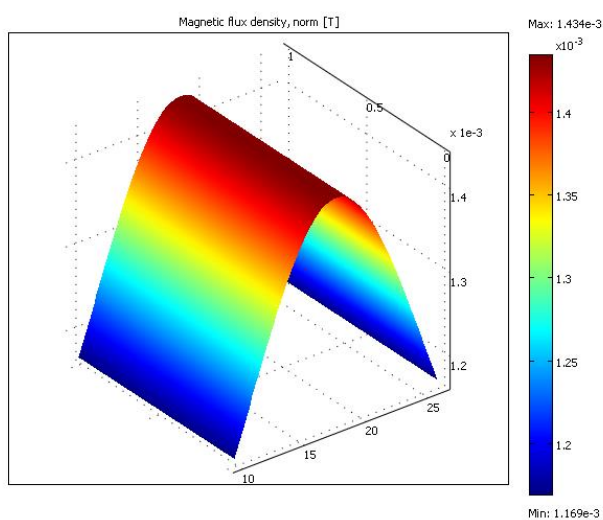


Figure V.29 Induction magnétique en 3D pour la ligne 220kV en faisceau $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$

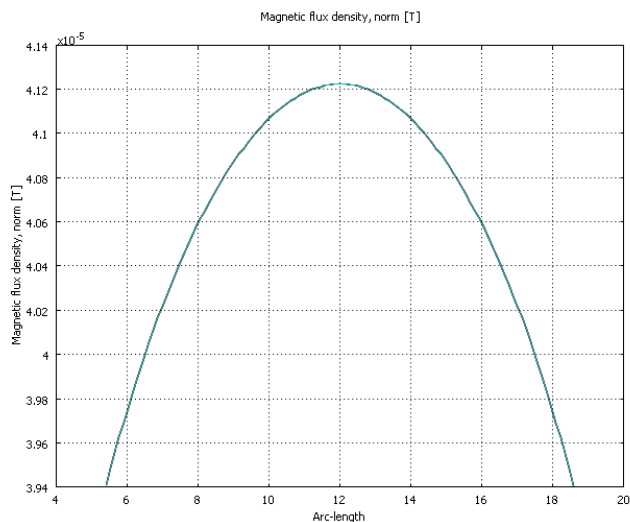


Figure V.30 Induction magnétique pour la ligne 220kV horizontale $S = 570 \text{ mm}^2$

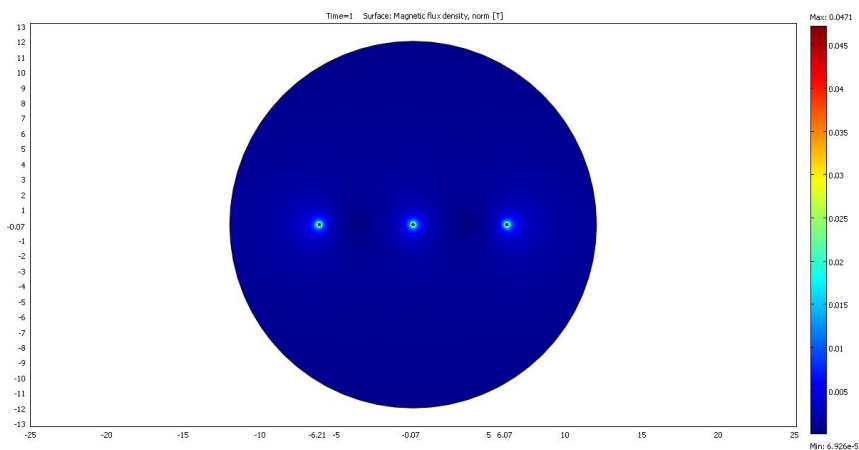


Figure V.31 Densité de flux magnétique pour la ligne 220 kV horizontal $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$

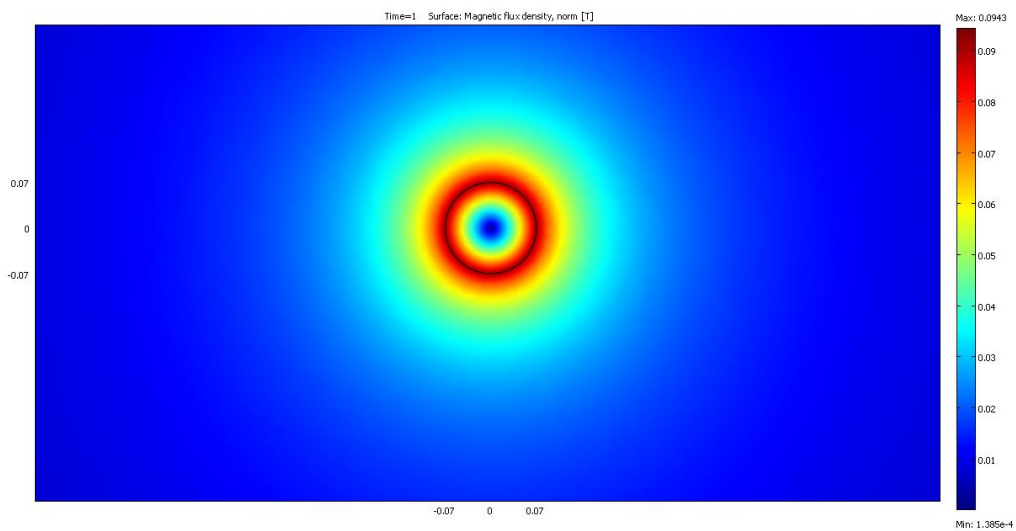


Figure V.32 Densité de flux magnétique pour un seul conducteur équivalent de phase

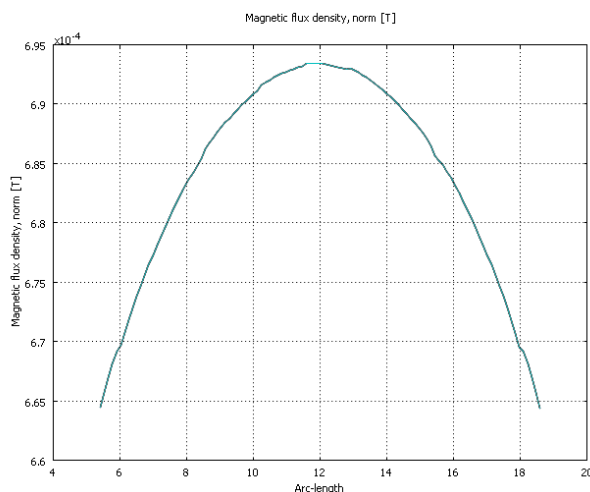


Figure V.33 Induction magnétique pour la ligne 220kV en faisceau $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$

Les résultats de simulation pour la ligne 220 kV **simple terne** sont indiqués dans le tableau suivant :

Configuration et nombre de conducteur par phase	Induction magnétique B [μT] au point $\mathbf{P}(x, y)$ à 2m au dessus du sol
Ligne verticale 1 cond/ph $S = 570 \text{ mm}^2$	41.58 ($x=0, y=-16$) axe des phases 35.10 ($x=7.5, y=-16$) axe du pylône
Ligne verticale 2 cond/ph $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$	712.84 ($x=0, y=-16$) axe des phases 599.62 ($x=7.5, y=-16$) axe du pylône
Ligne horizontale 1 cond/ph $S = 570 \text{ mm}^2$	41.20 ($x=0, y=-10$) phase du milieu 39.71 ($x=6, y=-10$) phases extérieures
Ligne horizontale 2 cond/ph $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$	693.8 ($x=0, y=-10$) phase du milieu 669.35 ($x=6, y=-10$) phases extérieures

Tableau V.3 Induction magnétique pour un et deux conducteur par phase

D'après les résultats consignés dans le tableau V.3, nous constatons que les valeurs de l'induction magnétique \mathbf{B} engendrée par les lignes à configuration verticale sont supérieures à celles engendrées par les lignes à configuration horizontale. Nous

remarquons aussi que l'induction magnétique \mathbf{B} est importante sous l'axe des phases des conducteurs.

Aussi, nous constatons que l'induction magnétique \mathbf{B} générée par la ligne simple terne 220 kV en faisceau $2 \times 570 \text{ mm}^2$ (ALMELEC) est supérieure à celle générée par la ligne simple terne 220 kV 570 mm^2 (ALMELEC) avec un seul conducteur par phase, ceci s'explique par le fait que le cas étudié est un cas extrême c'est-à-dire la ligne transitant un courant de pleine charge. Il reste entendu que ce cas de figure n'arrive jamais en pratique car pour un certain niveau de puissance on préfère toujours passer à une tension supérieure pour éviter ces phénomènes.

Enfin nous remarquons que les valeurs de l'induction magnétique \mathbf{B} engendrée par la ligne 220 kV en faisceau exploitée à pleine charge dépasse la valeur limite d'exposition $100 \mu\text{T}$ fixée par (ICNIRP) [16].

V.6.2.2 ligne triphasée 220 kV double terne

Les figures ci-dessous illustrent les variations de l'induction magnétique à 2 m au dessus du sol pour un courant de pleine charge $I = 1200\text{A}$, ceci pour des sections variées et pour les cas un seul et deux conducteurs par phases. Aussi la densité de flux magnétique est présentée.

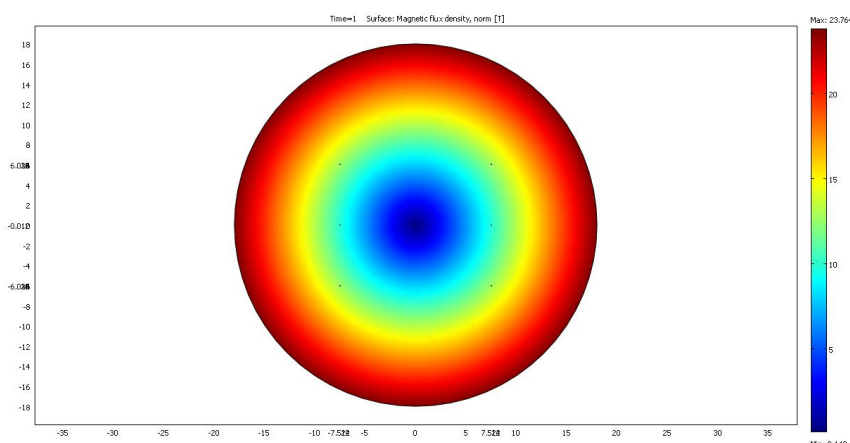


Figure V.34 Densité de flux magnétique pour un seul conducteur de phase

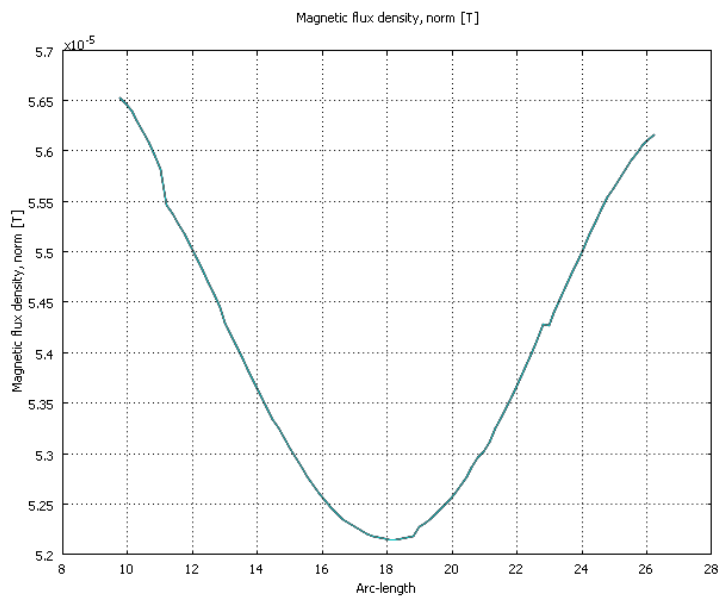


Figure V.35 Induction magnétique pour la ligne 220 kV $S = 570 \text{ mm}^2$

- **Ligne 220kV verticale double terre en faisceau $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$**

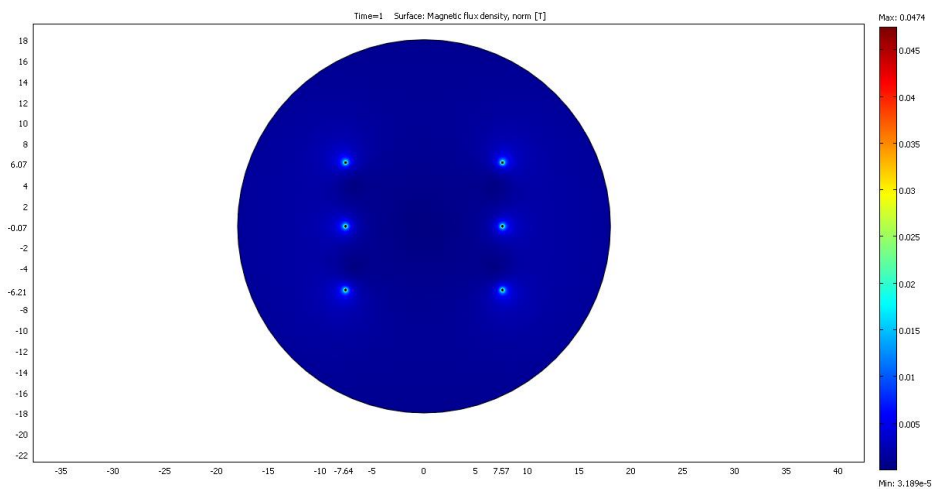


Figure V.36 Densité de flux magnétique pour la ligne 220 kV en faisceau

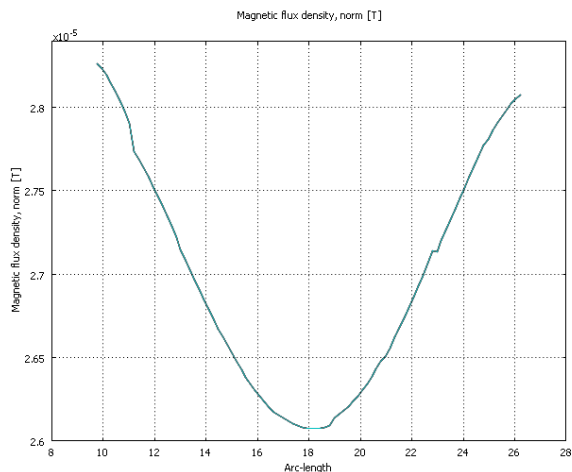


Figure V.37 Induction magnétique pour la ligne 220 kV $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$

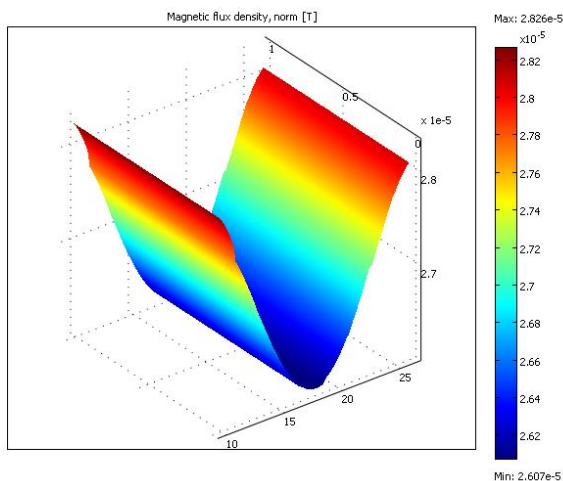


Figure V.38 Induction magnétique en 3D pour la ligne 220 kV $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$

- **Ligne 220kV verticale double terne en faisceau $S = 2 \times 288 \text{ mm}^2$**

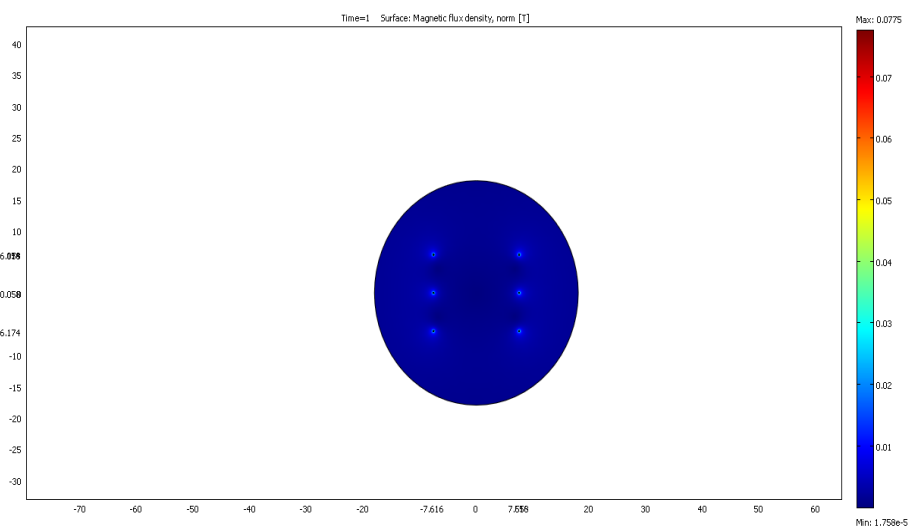


Figure V.39 Densité de flux magnétique pour la ligne 220 kV $S = 2 \times 288 \text{ mm}^2$

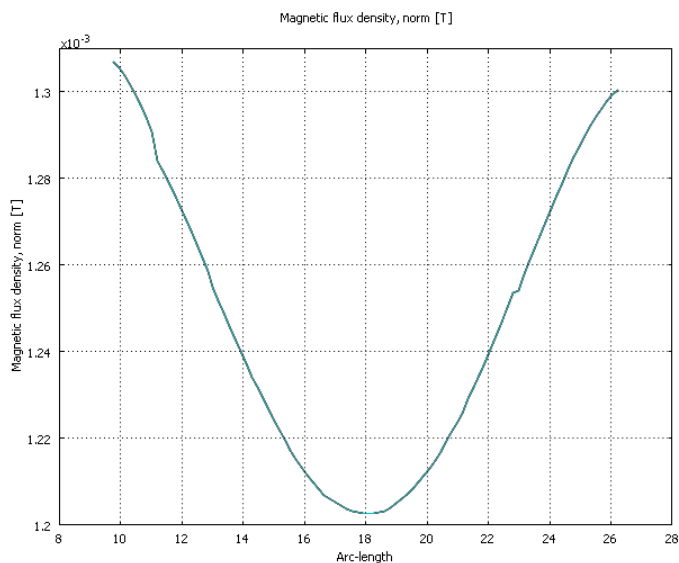


Figure V.40 Induction magnétique pour la ligne 220 kV $S = 2 \times 288\text{mm}^2$

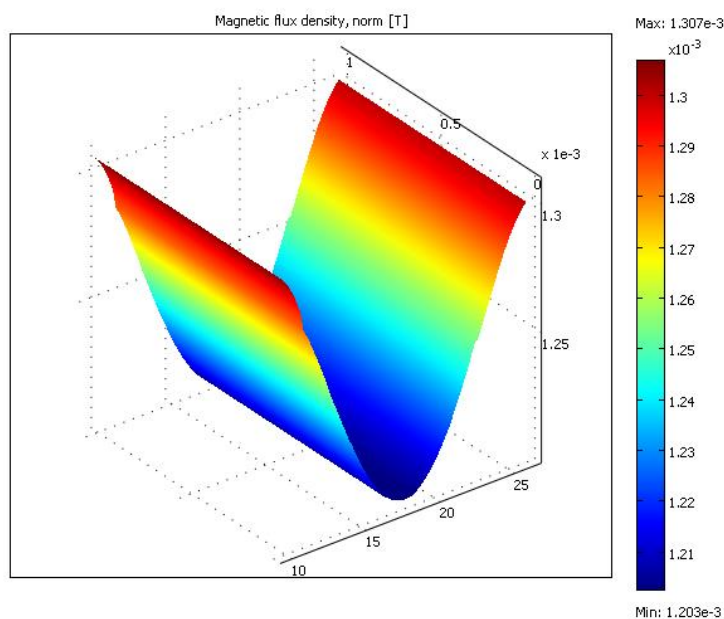


Figure V. 41 Induction magnétique en 3D pour la ligne 220 kV $S = 2 \times 288\text{mm}^2$

Les résultats de simulation pour la ligne 220 kV double terne un et deux conducteurs par phase et pour les sections : 570 mm^2 , $2 \times 570 \text{ mm}^2$, $2 \times 288 \text{ mm}^2$ sont indiqués dans le tableau V.4.

Le tableau V.5 résume les résultats de la ligne 220kV verticale simple et double terne pour les cas : un et deux conducteurs par phase

Configuration et nombre de conducteur par Phase	Induction magnétique B [μ T] Au point $\mathbf{P(x, y)}$ à 2m au dessus du sol
Ligne verticale un conducteur par phase $S = 570 \text{ mm}^2$	55.93 (x=7.5, y= -16) axe des phases 52.20 (x=0, y=-16) axe du pylône
Ligne verticale deux conducteurs par phase $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$	952.61 (x=7.5, y= -16) axe des phases 884.04(x=0, y=-16) axe du pylône
Ligne verticale deux conducteurs par phase $S = 2 \times 288 \text{ mm}^2$	1295.6 (x=7.558, y= -16) axe des phases 1203.7(x=0, y=-16) axe du pylône

Tableau V.4 Induction magnétique pour la ligne 220 kV double terne un et deux conducteur par phase

Type de la ligne 220kV	Induction magnétique B [μ T] à 2m au dessus du sol
Simple terne 1cond/ph $S = 570 \text{ mm}^2$	41.58
Double terne 1cond/ph $S = 570 \text{ mm}^2$	55.93
Simple terne en faisceau $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$	712.84
Double terne en faisceau $S = 2 \times 570 \text{ mm}^2$	952.61
Double terne en faisceau $S = 2 \times 288 \text{ mm}^2$	1295.6

Tableau V.5 Induction magnétique pour la ligne simple et double terne avec un et deux conducteurs par phase

Les résultats consignés dans le tableau V.4 prouvent que l'induction magnétique **B** engendrée par la ligne dont les conducteurs sont en faisceau est supérieure à la valeur de l'induction magnétique **B** engendrée par la ligne à un seul conducteur par phase, on remarque aussi que les lignes équipées de conducteurs en faisceau 2x288mm² (ALU/ACIER) développent en leur voisinage une induction magnétique **B** supérieure à celle développée par les lignes équipées de conducteurs en faisceau 2x570mm² (ALMELEC) car la densité de courant **J** augmente avec la diminution de la section des conducteurs pour un même courant de charge, aussi la valeur de l'induction magnétique **B** est maximale sous l'axe des conducteurs de phases de la ligne.

Aussi, nous remarquons que les valeurs de l'induction magnétique **B**, engendrée au voisinage des lignes 220 kV simple et double ternes équipées d'un conducteur par phase, ne dépassent pas la valeur limite d'exposition 100 μ T fixée par (ICNIRP) [16]. Par contre les valeurs de l'induction magnétique **B**, engendrée au voisinage des lignes 220kV simple et double ternes dont les conducteurs sont en faisceau, dépassent largement la valeur limite d'exposition, ceci nous amène à conclure qu'au lieu d'exploiter les lignes à pleine charge dans le pallier 220kV il serait plus judicieux de passer au pallier 400kV ou bien d'opter pour la multiplication des lignes 220kV interconnectées ceci afin de faire baisser la charge donc l'induction magnétique **B** pour la ramener dans la fourchette de la valeur limite d'exposition 100 μ T fixée par (ICNIRP) [16].

V.7 Modèle géométrique des lignes simples terre 400 kV OUED EL ATHMANIA- SALEH BEY et SALEH BEY- BIR GHBALOU

Les lignes 400 kV Oued el Athmania- Saleh Bey et Saleh Bey- Bir Ghbalou, issues de la coupure de l'ancienne ligne 400 kV Oued el Athmania - Bir Ghbalou, sont des lignes d'interconnexion importantes dans la mesure où elles permettent des échanges de puissances entre l'Est et le Nord de l'Algérie [80].

Pour la ligne triphasé simple terre 400 kV en faisceau nous avons simulé le champ magnétique pour deux niveaux de hauteur des conducteurs de phase par rapport au sol.

Premier cas : conducteur de phase est à 16.40 m du sol

Deuxième cas : conducteur de phase est à 50 m du sol

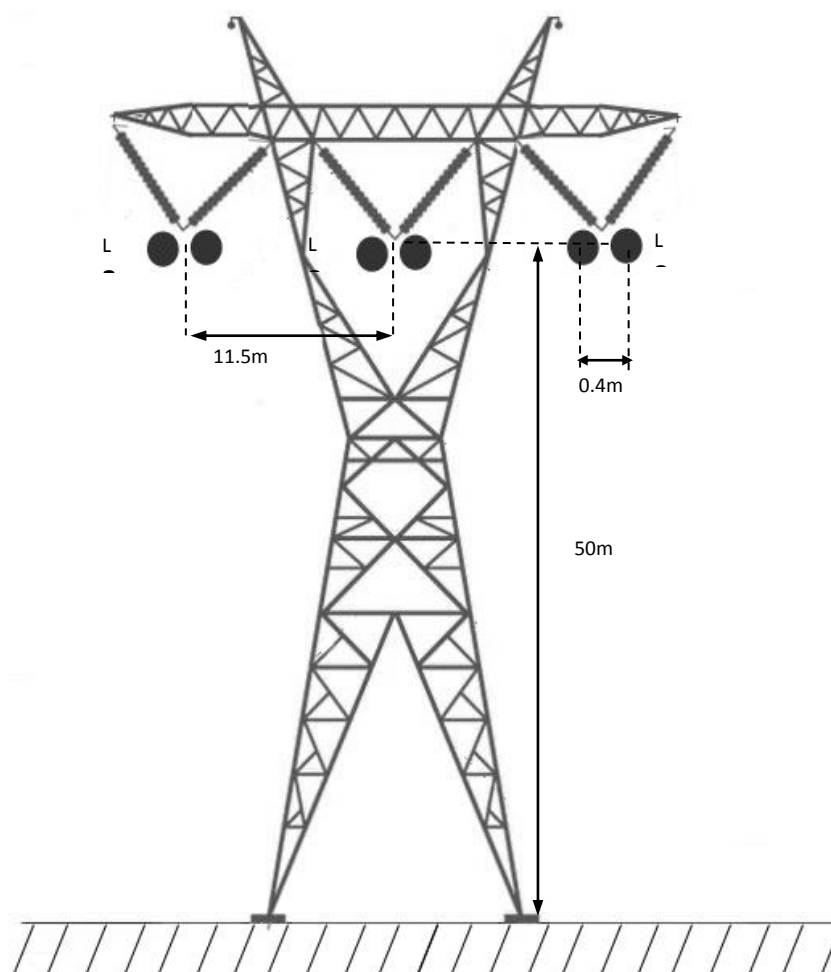


Figure V.42 Ligne 400kV simple terre



Figure V.43 Mesure de l'induction magnétique \mathbf{B} pour la ligne 400 kV



Figure V.44 Mesure de la hauteur entre le sol et le conducteur de phase

V.7.1 Paramètres de la ligne 400 kV

La ligne 400 kV simple terre triphasé en nappe horizontale avec deux conducteurs par phase Le conducteur de la ligne est en ALMELEC de section et de rayon géométrique équivalent :

$$S = 2 \times 570 \text{ mm}^2, r_{eq} = 0.07 \text{ mm}^2.$$

Le courant de charge à des moments et à des journées différentes:

200A, 272A, 320A, 420A, 500A.

V.7.2 Résultats de simulation pour la ligne triphasée simple terre 400 kV

OUED EL ATHMANIA- SALEH BEY

L'induction magnétique pour la ligne triphasée simple terre 400 kV à 2 m du sol pour différentes valeurs du courant de charge, de 16.40 m et de 50 m de hauteur entre le conducteur de phase et le sol est présentée sur la figure (V.45) et la figure (V.46).

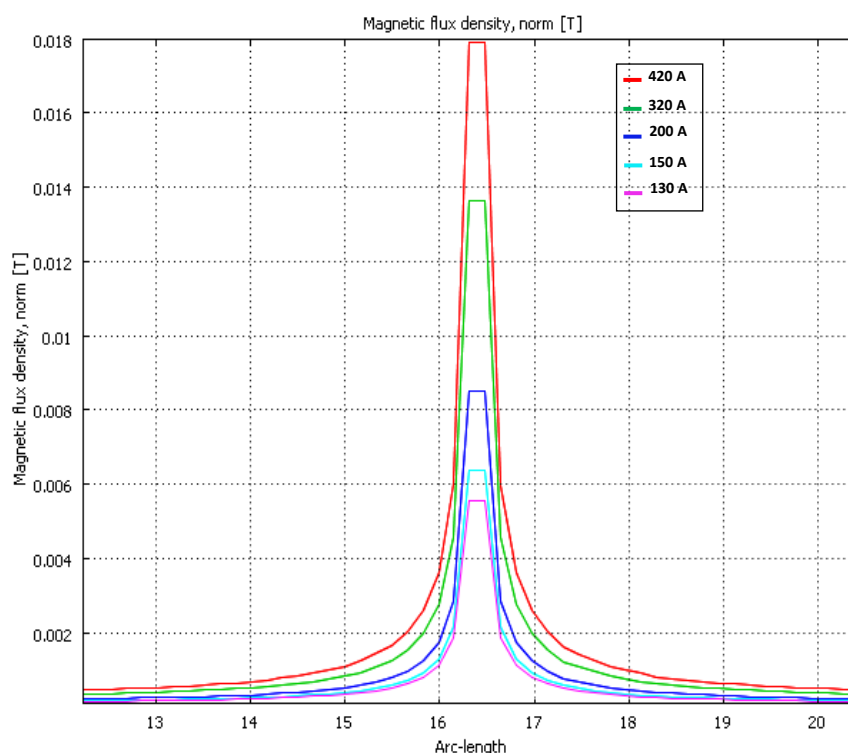


Figure V.45 Induction magnétique de la ligne 400 kV pour des courant de charge variés et pour une longueur de 16.40 m entre le conducteur et le sol

Courant de charge I [A]	Induction magnétique calculée B [μ T]	Magnetic induction measured B [μ T]
420	275.3	277.1
320	209.46	211.3
200	131	133
150	98	100.3
130	85.28	87.2

Tableau V.6 Induction magnétique pour différent courant de charge et 16.40 m de distance entre le conducteur e t le sol

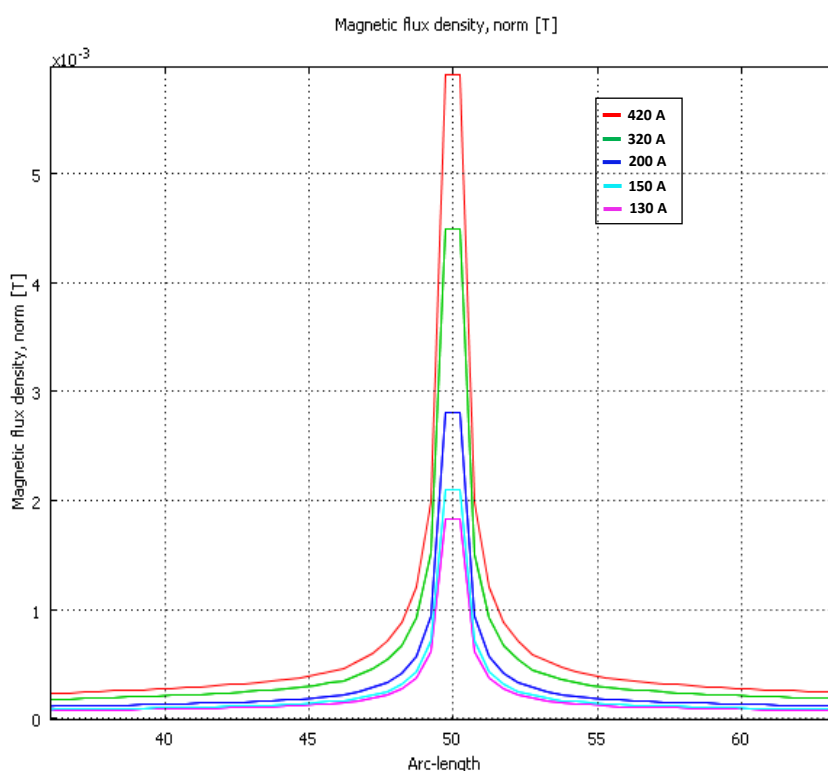


Figure V.46 Induction magnétique de la ligne 400 kV pour des courants de charge variés et pour une longueur de 50 m entre le conducteur et le sol

Courant de charge I [A]	Induction magnétique calculée B [μ T]	Magnetic induction measured B [μ T]
420	86.37	87.55
320	65.71	67.25
200	41.07	42.25
150	30.74	31.85
130	26.75	27.90

Tableau V.7 Induction magnétique pour différent courants de charge et 50 m de distance entre les conducteurs de phases et le sol de la ligne 400 kV

D'après les figures V.44, V.45, les valeurs de l'induction magnétique sont importantes pour les grandes valeurs du courant de charge, aussi d'après les valeurs du tableau V.6 nous constatons que la valeur limite de sécurité 100 μ T est atteinte pour un courant de 150 A, ceci pour une distance de 16.40 m entre les conducteurs de phase et le sol, mais heureusement que ce type de pylônes traversent les haut plateaux et les zones d'agriculture, donc le publique n'est pas exposés aux champs magnétiques.

D'après les résultats du tableau V.7, la valeur limite de sécurité pour le champ magnétique n'est pas atteinte même pour le courant de charge de pointe 420 A, ceci pour une distance de 50 m entre les conducteurs de phase et le sol. On peut dire que plus la ligne se rapproche au sol plus est la densité du flux magnétique car le champ magnétique diminue autant qu'on s'éloigne de la source de sa création qu'est le courant traversant les conducteurs.

Conclusion

L'utilisation du logiciel COMSOL pour le modèle magnétostatique offre de nombreux avantages et constitue une meilleure opportunité en termes d'efficacité et de souplesse pour le calcul des champs magnétiques à proximité des lignes hautes et très haute tension de transport de l'électricité. Cette approche nous a permis d'étudier plusieurs cas avec applications réelles et les résultats et calcul ainsi obtenus par simulation ont été comparés à ceux mesurés à l'aide de CA 40 Gaussmeter.

Les résultats du calcul par simulation sont conformes avec les résultats pratiques de mesure.

Aussi, dans les conditions d'opérations normales, la densité de flux magnétique varie selon l'éloignement du conducteur de phase et selon le courant de charge et les sections des conducteurs, aussi la diminution de la charge diminue la densité de flux magnétique **B**.

Dans ce travail nous remarquons que l'induction magnétique générée par les lignes de transport 400 kV est plus importante que celle générée par les lignes 220 kV et 60 kV, ces résultats sont sans rapport avec le niveau élevé de la tension, mais sont dus au fait que les lignes d'interconnexion 400 kV constituent des artères importantes d'interconnexion entre les différentes régions du pays et permettent l'évacuation de la production des méga centrales électriques vers le reste du réseau national donc transitent des courants importants en comparaison avec les lignes 220 kV et 60 kV.

Généralement pour le public vivant à proximité des lignes HT/THT, les limites de sécurité à l'exposition aux champs magnétiques dépendent du niveau d'exposition, de l'éloignement des conducteurs et aux valeurs du courant de charge, les valeurs trouvées restent acceptables et rentrent dans la fourchette des valeurs limites d'approches (VLA) réglementaires fixées par les différentes organisations internationales, hormis pour quelques lignes 400 kV qui elles sont construites dans des zones éloignées des habitations donc non accessibles au grand public.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les lignes HT/THT, indispensables à toute forme d'activité et incontournables pour le développement et la satisfaction de la demande toujours croissante en énergie de notre pays, peuvent être aujourd'hui source de questionnement dans l'opinion publique.

Les interrogations sont le plus souvent liées au fait de vivre à proximité de ces lignes et à la crainte d'un éventuel impact sur la santé.

La réglementation sur les champs magnétiques 50 Hz ne prévoit pas, pour l'exposition du public, de distance limite par rapport aux lignes, mais un seuil de référence fixé à 100 μ T (100 microteslas).

Le champ magnétique 50 Hz à l'aplomb d'une ligne HT dépend de nombreux paramètres et, en premier lieu, du courant transitant dans cette ligne, lui-même fonction de la consommation des clients.

Toutefois, la capacité de transit que peut assurer la ligne n'est jamais atteinte : les valeurs couramment mesurées sont donc sensiblement plus faibles.

L'entreprise GRTE doit donc être consultée sur tout projet de construction au voisinage immédiat des lignes HT/THT afin de vérifier la conformité du projet par rapport aux distances réglementaires

En matière de sécurité électrique, la présence de lignes électriques requiert certaines précautions pour les activités menées dans leur voisinage. Aussi, GRTE, société Algérienne de gestion du réseau de transport de l'électricité, doit informer le public régulièrement de ces dangers.

Concernant l'effet éventuel sur la santé des champs magnétiques 50 Hz – tels que ceux générés par les réseaux électriques. L'ensemble des expertises scientifiques conduites sous l'égide d'autorités sanitaires nationales et internationales affirme qu'il n'y a aucun danger avéré pour la santé en deçà des seuils recommandés (soit 100 μ T).

C'est, par exemple, la conclusion de l'OMS (Organisation mondiale de la santé) dans son rapport n° 322 de juin 2007.

La réglementation en vigueur usitée en Algérie s'est alignée sur les textes et règlements internationaux et conforme aux positions de l'OMS.

Nous avons tentés à travers notre modeste contribution de traiter tous les aspects liés à cette problématique, en commençant par montrer que les champs électromagnétiques d'une manière générale et les champs magnétiques d'une façon particulière sont omniprésents dans notre environnement à l'état naturel et l'ensemble des outils et équipements de base nécessaires et présent dans notre vie quotidienne sont générateurs de champs magnétiques basse et haute fréquence.

A cet égard, les inquiétudes et craintes développées par le large public relèvent plutôt d'une méconnaissance des phénomènes, conjuguée à une absence de dialogue et communication sur le sujet.

Aussi, à l'issue de ce travail et en tenant compte des résultats y afférents nous confirmons que les valeurs des champs magnétiques obtenues pour différentes charges sont conformes aux valeurs limites. Néanmoins, pour les lignes 400 kV qui constituent des artères d'évacuation stratégiques des méga centrales 1200 MW et donc transitant des charges importantes, s'il y a des dépassements des seuils tolérés il faudra envisager de recourir aux choix de types de pylônes 400 kV adéquat afin de ramener les valeurs aux limites permises par les directives, normes et règlements en vigueur en Algérie quoi que ces valeurs ont été revues à la hausse par les principaux organismes ICNIRP et IEEE et ceci suite aux différents travaux de recherches et progrès enregistrés dans ce domaine ces dernières années.

En conclusion nous disons qu'il est temps de développer une communication et d'instaurer un dialogue permanent sur ce sujet à travers l'implication de toutes les parties concernées à savoir : pouvoirs publics, professionnels de l'électricité et de la santé, communauté universitaire, associations et organismes ; ceci afin d'éclaircir les concepts et lever ainsi les ambiguïtés répandues sans justification aucune. Pour le volet technique il y a lieu de se conformer à l'application stricte de dispositions normatives claires, simples mais ô combien importantes à savoir :

- Respect des distances et couloirs de servitudes des lignes HT/THT,
- Réaliser des mises à la terre de toute les masses métalliques présentes dans une installation située à proximité des lignes HT/THT en s'assurant en permanence de leur équipotentialité.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. P. Barbier, "Etude et Justification des Courants de Contact Induits par les Lignes à Haute Tension dans le Parc Résidentiel Belge et leurs Incidences sur la Population", Thèse de Doctorat, Université de Liège, 2014.
- [2] A. Marincu, M. Greconici, S. Muşuroi, "The Electromagnetic Field Around a High Voltage 400 kV Electrical Overhead Lines and the Influence on the Biological Systems", Politehnica University of Timisoara, Romania, April 2005.
- [3] Golder Associates Inc. "Induced Voltage and Current Report", February 2013.
- [4] Environnement et santé Guide pratique" Champs Electromagnétiques d'Extrêmement Basse Fréquence Les effets sur la Santé".
- [5] V. C. Motrescu, U. van Rienen, "Computation of Currents Induced by ELF Electric Fields in Anisotropic Human Tissues Using the Finite Integration Technique (FIT) ", *Advances in Radio Science*, 3, 227- 231, 2005.
- [6] S. Tupsie, A. Isaramongkolrak, P. Pao-la-or, "Analysis of Electromagnetic Field Effects Using FEM for Transmission Lines Transposition", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 53, 2009.
- [7] O. Bottauscio, M. Chiampi, R. Conti, "Some Considerations About Environmental ELF Magnetic Field Reduction", *EMC Europe 2000*, Brugge, Sept. 11-15, 2000.
- [8] R. Djekidel, D. Mahdi, A. Ameer, "Calcul et Atténuation du Champ Magnétique d'une Ligne Aérienne HT au Moyen d'une Boucle Passive", *Mediamira Science Publisher*, 2013.
- [9] D. Azizi, H. Heydari, A. Gholami, A. Gholami, " Analysis of the Effect of HV Transmission Lines on the Control Room and its Proposed Shielding", *World Academy of Science, Engineering and Technology* 71, 2010.
- [10] "Ligne Electrique HT et THT et Champs Magnétiques de Très Basse Fréquence", mesures, CEM, RTE « α MF ».
- [11] O. E. Gouda, G. M. Amer, W. A. Salem, "Computational Aspects of Electromagnetic Fields Near H. V. Transmission Lines", *Energy and Power Engineering Journal*, November, 2009.
- [12] R. Djekidel, D. Mahi, "Calcul et Atténuation du Champ Magnétique d'une Ligne Aérienne HT au Moyen d'une Boucle Passive", *Acta Electrotechnica Journal*, Volume 54, Number 2, 2013.
- [13] K. Hameyer, R. Mertens, R. Belmans, "Numerical Methods to Evaluate the Electromagnetic Fields Below Overhead Transmission Lines and Their Measurement", *Proc. 6th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering*, Graz, Austria, pp. 264-269, September 1994.
- [14] J. M. Bakhshwain, M. H. Shwehdi, U. M. Johar, A. A. AL-Naim, "Magnetic Fields Measurement and Evaluation of EHV Transmission Lines in Saudi Arabia", *Proceeding of the International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN*, October 2003.

Bibliographie

- [15] C. A. Belhadj, S. EL-Ferik, "Electric and Magnetic Fields Estimation For Live Transmission Line Right of Way Worker Using Artificial Neural Network",
- [16] ICNIRP Guidelines, "Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, up to 300GHz", ICNIRP, 1998.
- [17] R. G. Olsen and P. S. Wong, "Characteristics of Low Frequency Electric and Magnetic Fields in the Vicinity of Electric Power Lines", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 7, No. 4, pp.2046-2055, 1992.
- [18] Adel Z El Dein. "Magnetic Field Calculation Under EHV Transmission Lines for Mor Realistic Cases", IEEE Transactions on Power Deliver. 2009; 24(4): 2214-2222.
- [19] "Technical report of Algerian Electricity Company", Year 2014.
- [20] "Plan as Built Overhead Power Transmission Lines", Algerian Electricity Transmission Company.
- [21] J.C Sabonnadière et J.L Coulomb, "Calcul des Champs Electromagnétiques", Technique de l'Ingénieur, D3020, Décembre 1988, pp1-20.
- [22] Angot "Complément de Mathématiques à l'usage des Ingénieurs", Masson 1972.
- [23] "Guide for Suparul Cable Height Meter", Models 190, 300, 300DT, 300E, 600, 600E, DT80.
- [24] "Guide for Low Frequency Magnetic Field Measurements", C.A 40 Gaussmeter, CHAUVIN ARNOUX.
- [25] F .POLLACZEK "Sur le Champ Produit par un Conducteur Simple Infiniment Long Parcouru par un Courant Alternatif", Rev.Gen .d'Electr, 1931,29 pp851- 867.
- [26] M. Mohammedi T. Bahi Y. Soufi, "finite Element Modeling Under stress by the Nolinearity of a Material Ferromagnetic", Journal of Electrical Engineering JEE, volume 12 / 2012 – Edition: 3.
- [27] Effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences Saisine n°« 2008/006 », Rapport d'Expertise Collective.
- [28] J.P. Perez, R. Charles and R. Flecking, " Electromagnétisme, Fondements et Applications", 3ème édition, Paris, 1997.
- [29] J.C. Maxwell, " A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1865.
- [30] P. Lorrain et D. R. Corson, "Champs et Ondes Electromagnétiques", Armand COLIN.
- [31] "Les Champs Electromagnétiques dans les Réseaux de Distribution", Brochure d'information, la Fédération des Gestionnaire de Réseaux Electricité et Gaz en, Belgique, Synergrid.

Bibliographie

- [32] Cahier de charge de la Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport de l'Electricité (GRTE), "Câbles, matériels de ligne", Décembre, 2010.
- [33] D.Cordier, Cours de physique, Electromagnétisme, 2. Phénomènes d'induction et Ondes électromagnétiques", Editions Dunod, Paris 2007.
- [34] François Deschamps, "l'Environnement Electromagnétique à Basse Fréquence", Janvier- Février, 2006.
- [35] "Les Champs Electromagnétiques Générés par les Lignes à Haute Tension", RTE- Direction de la Communication Tour Initiale -1, Terrasse Bellini - TSA 41000, Juillet, 2012.
- [36] K. Hameyer, R. Belmans, J. Driesen, P. Berghmans, "Field Simulations for High Voltage Applications", Conférnce Publication No. 467, IEE, August 1999.
- [37] J.L. Lilien, "Effets indirects des champs EM", 27 novembre 2012.
- [38] J. A. Stratton, "Electromagnetic Theory", Mc Graw- Hill, New York, 1941.
- [39] R. E. Collin, "Field Theory of Guided Waves", McGraw-Hill, New York, p.68, 1960.
- [40] D.Cordier, "Cours de physique, électromagnétisme, 1.Electrostatique et magnétostatique", Editions Dunod, Paris 2007.
- [41] G. Said, "Etude de la Compatibilité Electromagnétique du Réseau GSM avec le Réseau Electrique", Thèse de Doctorat, Tunis, 2010.
- [42] S. Pasare, "Calcul du Champ Magnétique d'une Ligne Electrique Aérienne à Haute Tension", Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series, No. 32, 2008, ISSN 1842-4805.
- [43] S. S. Seker, F. Can, O. Çerezci, "Theoretical and Experimental Study of EM Fields and Shielding Effectiveness Due to High Voltage Transmission Lines", Proceedings- 23rd Annual Conference – IEEE/EMBS October, 2001, Turkey.
- [44] O. E. Gouda, A. Z. EL Dein, "Mitigation of Magnetic Field under Double- Circuit Overhead Transmission Line", TELKOMNIKA, Vol.10, No.8, December 2012, pp. 2272- 2284.
- [45] Nagat. M. K. Abdel-Gawad, Adel Z. El Dein, M. Magdy, "Magnetic Field Calculation under Normal and Abnormal Conditions of Overhead Transmission Lines", TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, Vol. 12, No.5, May 2014, pp.3381- 3391.
- [46] Y. Belkhiri, "Magnetic Field Induced by Overhead Power Transmission Lines in Algerian Network", Journal of Electrical Engineering jee.ro, no.3, volume 15, October 2015.
- [47] Protocole UTE C 99-132 Traitant les Procédures de Mesure des CM 50 Hz Sous les Lignes THT.
- [48] Théodore wildi, Gilbert Sybille " ELECROTECHNIQUE ", 4ème édition, Juin 2005.

Bibliographie

- [49] M. Hulin, N. Hulin, D. Perrin, "Equation de Maxwell Onde Electromagnétique" DEUG SCIENCES DUNOD.
- [50] Y. Belkhiri, "Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques et Mécaniques Couplés par la Méthode des Volumes Finis, Thèse de Magister, Université de Batna, 2006.
- [51] Rayonnements et Hygiène du Milieu Protection de l'Environnement Humain, "Instauration d'un Dialogue sur les Risques dus aux Champs Electromagnétiques", Organisation Mondiale de la Santé (OMS), GENEVE, SUISSE, 2003.
- [52] "Les lignes à haute et très haute tension : risques pour la santé", [http://www. notre-planete. Info](http://www.notre-planete.info), Mars 2008.
- [53] Bonneville Power Administration, "Living and Working Safely around High- Voltage Power Lines, October 2007.
- [54] "Est-il dangereux d'habiter près d'une ligne à haute tension ?", [http://www. sante. lefigaro.fr](http://www.sante.lefigaro.fr)- santé, Novembre 2013.
- [55] "Champ- électromagnétique-des lignes", [http://www. clef- des champs.info](http://www.clef-deschamps.info).
- [56] "Vivre à proximité d'une ligne électrique à très haute tension", [http://www. les effets sur la santé](http://www.leseffetsurlasante.com), Avril-mai 2008.
- [57] M. Hichem, "Etude des Problèmes de Compatibilité Electromagnétique Liés au Passage en 400kV des Lignes de Transport d'Energie Electrique", Mémoire de Magister, Université d'ORAN, Mohamed Boudiaf.
- [58] J. L. Cocquerelle, "CEM et électronique de puissance", Collection Sciences et Techniques, éditions techniques, Paris 1999.
- [59] "Position des Autorités de Sécurité Publique sur la Gestion des Champs Magnétiques Emis par les Lignes Electriques", Ministère de la Santé Gouvernement du Québec, 2014.
- [60] J. L. Lilien, " Calcul d'une Liaison Aérienne", Transport et distribution de l'énergie électrique, Année académique 1999-2000.
- [61] J. L. Lilien, " Calcul des Caractéristiques « R-L-C » d'une Jonction Triphasée ", Transport et distribution de l'énergie électrique, Année académique 1999-2000.
- [62] C. Avril, "Construction des Lignes Aériennes à Haute Tension", Edition Eyrolles, Paris, 1974.
- [63] Siemens Energy Sector, "Power Engineering Guide", Edition 7.1/2014.
- [64] Cahier des charges pour la construction des ouvrages du réseau de transport d'électricité HT/THT, fascicule tome 2 relatif à l'étude et la construction des lignes aériennes. GRTE. Version Décembre 2010
- [65] Recueil des directives-types pour la construction des lignes aériennes du réseau de transport d'électricité, GRTE. Version Décembre 2010

Bibliographie

- [66] Carnet de prescriptions (CDP) GRTE Version 2016
- [67] Document Opérationnel « D - compléments », relatif aux Opérations sur un ouvrage HT consigné Procédure interne référence NA-P2S-CNER-DEPS-PS-08-00059 Indice : 3 « Protection contre le risque électrique » de RTE/France Version mise à jour le 15/12/2008.
- [68] "Travaux Sur Lignes Soumises a Induction", Directives N° 27/DG- 471/DGA, Etablissement Public à Caractère Industriel et Commercial Sonelgaz, Janvier 1995.
- [69] W. Langguth, "Eléments Fondamentaux de Compatibilité Electromagnétique", Leonardo ENERGY, Guide Power Quality, Mai 2009.
- [70] " Réseaux d'Énergie Electrique et Environnement", Pol Pirote, Septembre 2001.
- [71] E. Montigny, " Travaux Diriges TD2", Electromagnétisme, Novembre 2005.
- [72] K. Hocine, "Influence de L'Effet Couronne sur les Surtensions dans les Lignes et les Transformateurs de Haute Tension", Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [73] « utilisation de l'effet corona dans le cadre de la surveillance et de la maintenance preventive des reseaux htb », Projet HE14 ESEA, RTE Nord-est. Année universitaire 2009/2010.
- [74] M. Bengrit, "Les Vibrations Induites par Effet Couronne", Thèse de Magister en Electrotechnique, Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, Algérie.
- [75] K. Dezelak, G. Stumberger, F. Jakl, "Arrangements of Overhead Power Line Conductors Related to the Electromagnetic Field Limits", Modern Electric Power Systems 2010, Wroclaw, Poland.
- [76] "Câbles ALMELEC", Selon : NFEN 50182.
- [77] M. Ungureanu, A. C-Tin Rusu, I. Baran, "Field Components of the Electromagnetic Environment Related to the Presence of the Overhead Transmission Lines", WSEAS Transactions on Environment and Development, Issue 9, Volume 3, September 2007.
- [78] M. J. Baishya, S. Bhuyan, N. K. Kishore, "Calculation of Electric and Magnetic Field Under AC Transmissin and Distribution Lines in Guwahati City", ADBU – Journal of Engineering Technology, Volume 1, 2014.
- [79] Electric and magnetic field management reference book, EPRI, Palo Alto CA : 1999, TR – 114200
- [80] Plan As Built ligne 400 kV SALEH BEY – OUED EL ATHMANIA du constructeur ENERGOINVEST/2005.

ANNEXES

ANNEXE 1

Tableau de caractéristiques des conducteurs
(alliage d'aluminium, AMS, en fonction de la section)

Section nominale mm ²	Section Théorique mm ²	Nombre de fils	Diamètre nominal mm	Diamètre extérieur du conducteur mm	Masse par km de conducteur ¹² kg/km	Masse de graisse par km de conducteur ¹³ kg/km	Résistance électrique par km de conducteur ¹⁴ Ω/km à 20°C	Charge de rupture nominale du conducteur daN	Module d'élasticité du conducteur ¹⁵ N/mm ²	Coefficient de dilatation linéique du conducteur ¹⁶ 10 ⁻⁶ K ⁻¹	Intensité de courant admissible A
35	34,36	7	2,5	7,50	94	5	0,967	1105	59000	23 10 ⁻⁶	180
55	54,55	7	3,15	9,45	149	8	0,609	1755	59000	23 10 ⁻⁶	240
95	93,27	19	2,5	12,5	257	5	0,358	3005	56000	23 10 ⁻⁶	340
117	116,99	19	2,8	14	322	7	0,286	3765	56000	23 10 ⁻⁶	385
148	148,07	19	3,15	15,75	407	8	0,226	4765	56000	23 10 ⁻⁶	450
153	152,81	19	3,2	16	421	9	0,218	4920	56000	23 10 ⁻⁶	460
182	181,62	37	2,5	17,50	501	14	0,184	5845	56000	23 10 ⁻⁶	510
198	197,96	37	2,61	18,3	546	15	0,169	6375	56000	23 10 ⁻⁶	535
210	210,28	37	2,69	18,85	579	16	0,159	6770	56000	23 10 ⁻⁶	560
228	227,83	37	2,8	19,6	627	17	0,147	7335	56000	23 10 ⁻⁶	585
248	247,77	37	2,92	20,45	682	19	0,135	7980	56000	23 10 ⁻⁶	620
265	265,04	37	3,02	21,15	731	20	0,127	8985	56000	23 10 ⁻⁶	645
288	288,35	37	3,15	22,05	795	22	0,116	9285	56000	23 10 ⁻⁶	680
298	297,57	37	3,2	22,4	819	22	0,112	9585	56000	23 10 ⁻⁶	695
313	312,64	37	3,28	22,95	859	24	0,107	10070	56000	23 10 ⁻⁶	715
318	318,38	37	3,31	23,2	878	24	0,105	10250	56000	23 10 ⁻⁶	720
366	366,23	37	3,55	24,85	1009	28	0,0913	11795	56000	23 10 ⁻⁶	790
446	445,68	61	3,05	27,45	1230	37	0,0752	14355	54000	23 10 ⁻⁶	895
475	475,38	61	3,15	28,35	1312	40	0,0705	15310	54000	23 10 ⁻⁶	925
570	570,24	61	3,45	31,05	1573	48	0,0588	18365	54000	23 10 ⁻⁶	1035
621	620,90	61	3,6	32,4	1713	52	0,0540	19995	54000	23 10 ⁻⁶	1095
709	709,17	91	3,15	34,65	1964	63	0,0474	22840	54000	23 10 ⁻⁶	1185
851	850,69	91	3,45	37,95	2356	76	0,0395	27390	54000	23 10 ⁻⁶	1330
926	926,27	91	3,6	39,6	2562	83	0,0636	29830	54000	23 10 ⁻⁶	1410

12 Basé sur une masse volumique de 2,70 Kg/dm³.

13 Toutes les couches graissées sauf la couche extérieure.

14 Résistance linéique.

15 Ces valeurs sont données à titre d'information et ne doivent pas être considérées comme des exigences d'essais.

16 Ces valeurs sont données à titre d'information et ne doivent pas être considérées comme des exigences d'essais.

ANNEXE 2

• Conducteurs

La fabrication, les essais et la livraison de ces matériels devront être en concordance avec les normes de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) en vigueur

CEI 104; CEI 888; CEI 889; CEI 1089 ou toutes autres normes nationales ou internationales qui assurent une qualité égale ou supérieure.

1 - Câbles Alu Acier : 412 mm²

Section du Câble	411,66 mm²
Diamètre Extérieur	26,40 mm
Masse Linéique	1,593 kg / km
Charge de Rupture	16960 daN
Module d'Elasticité	8300 H.bar
Coefficient de Dilatation	17,5 10⁻⁶ / °C
Résistance Electrique à 20° C	0,089 Ω / km
Composition Aluminium (nombre et diamètre en mm des brins)	32 x 3,60
Composition Acier (nombre et diamètre en mm des brins)	19 x 2,40

Les couches intérieures des câbles doivent être graissées avec une graisse neutre vis à vis de l'aluminium et du zinc et chimiquement stable conformément à la norme EN 50 182.

2 - Câble Alu Acier : 288 mm²

Section Nominale du Câble	288 mm²
▪ Section Aluminium	234 mm²
▪ Section Acier	54,6 mm²
Composition Aluminium (nombre et diamètre en mm des brins)	30x 3,15 mm
Composition Acier (nombre et diamètre en mm des brins)	7x 3,15 mm
Charge de Rupture Minimale (daN)	
▪ Avec Acier N	9.220 daN
▪ Avec Acier R	10.890 daN
Diamètre Extérieur	22,05 mm
Masse Linéique	1,083 kg / m
Module d'Elasticité	8300 H.bar
Coefficient de Dilatation	17,5x 10⁻⁶ / °C
Résistance Electrique à 20° C	0,124 Ω / km

3 - Câbles Almélec : 366 mm²

Section du Câble	366,22 mm²
Diamètre Extérieur	24,85 mm
Masse Linéique	1,009 kg / m
Charge de Rupture	11535 daN
Module d'Elasticité	57000 MPa
Coefficient de Dilatation	23 10⁶ K
Résistance Electrique à 20° C	0,0905 Ω / km

Les couches intérieures des câbles doivent être graissées avec une graisse neutre vis à vis de l'aluminium et du zinc et chimiquement stable conformément à la norme EN 50 182.

4 - Câbles Almélec : 570 mm²

Section du Câble	570,22 mm²
Diamètre Extérieur	31,05 mm
Masse Linéique	1,574 kg / m
Charge de Rupture	18530 daN
Module d'Elasticité	54000 Mpa
Coefficient de Dilatation	2.3 10⁻⁵ 1/K
Résistance Electrique à 20° C	0,0583 Ω / km

Les couches intérieures des câbles doivent être graissées avec une graisse neutre vis à vis de l'aluminium et du zinc et chimiquement stable conformément à la norme EN 50 182.

5 - Câble de mise à la terre : 48 mm² en Cuivre

Section Nominale	48 mm²
Composition	19 x 1,80 mm
Diamètre Extérieur	9 mm
Poids	441,70 kg / km
Résistance Electrique à 20°C	0,373 Ohm / km
Module d'Elasticité	105 kg / mm²

6 - Câble de Garde

6.1 - Câble de Garde Classique et Accessoires

La fabrication et la fourniture du câble de garde doivent répondre aux recommandations de la CEI, actuellement en vigueur ou toutes autres normes équivalentes ou supérieures.

6.1.1 - Caractéristiques du Câble

	60 kV	220kV	400kV
Section nominale du câble	94 mm²	116 mm²	78.94 mm²
Section Aluminium	52 mm²	56.5 mm²	- mm²
Section Acier	42 mm²	59.7 mm²	78.94 mm²
Composition Aluminium	15 x 2.10 mm	18 x 2 mm	mm
Charge de rupture minimale			
Avec acier N	5300	7300	
Avec acier R daN	6800	9300	10450
Diamètre extérieur	12.6 mm	14 mm	11.5 mm
Poids	481 KG/km	634 KG/km	0.626 dAN/m
Module d'élasticité	11.4 KG/mm²	12.2 KG/mm²	18.6 kG/mm²
Coefficient de dilatation	14.6 x 10⁻³ /°C	14 x 10⁻³ /°C	12 x 10⁻³ /°C
Résistance électrique à 20°C	0.556 Ω/Km	0.512 Ω/Km	1 Ω/Km

ملخص

أبحاث علمية عديدة ركزت على تقييم الحقل المغناطيسي ذو التردد المنخفض لخطوط نقل الكهرباء ذات التوتر العالي وذلك لضمان سلامة صحة المواطن. في هذا العمل قمنا بالمحاكاة الرقمية للتحريض المغناطيسي لخطوط الكهرباء العالية التوتر 400/220/60 كيلوفولت من أجل تركيب مختلف للأعمدة, مساحات متغيرة للكابلات وشدة تيار لحمولات مختلفة.

النتائج المحصل عليها بطريقة المحاكاة الرقمية كانت قريبة من قيم القياسات المأخوذة باستعمال الجهاز الرقمي

CHAUVIN ARNOUX 40 « Gaussmeter device »

كما أننا قمنا بمقارنة هذه النتائج بالقيمة المحددة من طرف اللجنة الدولية للحماية من الإشعاعات الغير المؤينة والتي تقدر ب 100 ميكرو تسلا .

Abstract

Considerables researches focused on the evaluation of the magnetic field at extremely low frequencies (ELF) generated in the vicinity of power transmission lines in order to ensure the safety and preservation of human health. In this work we performed a numerical modeling of magnetic fields induced by the transmission lines at different voltages like 400kV, 220kV and 60 kV and this for different configurations of towers and multiple sections of the conductors as well as for various expenses. The results are close to those obtained by direct measurements using the digital equipment Chauvin Arnoux 40 "Gaussmeter device". Also, we compared these values to the limits values 100 microtesla fixed by the International Commission for protection of non-ionizing radiation,.

Résumé

Plusieurs recherches ont porté sur l'évaluation du champ magnétique en basses fréquences (BF) généré à proximité des lignes de transport de l'électricité dans le but d'assurer la sécurité et de préserver la santé humaine. Dans ce travail nous avons procédé à une modélisation numérique des champs magnétiques induits par les lignes de transport à différentes tensions à savoir 400kV, 220kV et 60 kV et ceci pour différentes configurations des pylônes et multiples sections des conducteurs ainsi que pour des charges variées.

Les résultats trouvés sont proches de ceux obtenus par des mesures directes effectuées à l'aide de l'appareil numérique CHAUVIN ARNOUX 40 « Gaussmeter device ».

Aussi, nous avons comparé ces valeurs au seuil limite fixé à 100 microtesla par la commission internationale de protection des rayons non ionisants.