

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTÉ : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : Génie Électrique

N° : 2020/ ELTRE /



DOMAINE: Sciences et Technologies

FILIÈRE : électrotechnique

OPTION : RESEAU ELECTRIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Par : Chia Achouak

Lensari Charif

Intitulé

**L' influence de champ électromagnétique
sur la cellule biologie**

Mr. REHALI Hillal

Mr. CHOUCOU Abdelmadjid

Mr. MABRAK Samir

Université de M'sila

Université de M'sila

Université de M'sila

Président

Encadreur

Examinateur

Année universitaire : 2019 /2020

REMERCIEMENTS

Tout d'abord nous remercions notre encadreur **Dr. Abdelmadjid Chouchou** qui a accepté de nous encadrer pour réaliser ce mémoire. Nous lui sommes reconnaissants de nous avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence, de sa rigueur intellectuelle, de son efficacité et de ses précieux conseils.

Nous tenons à remercier également ma sœur Chia Radhia d'avoir réservé une partie de son temps pour suivre notre travail.

Nous tenons également à remercier les membres de jury qui nous font l'honneur de juger ce mémoire et venir proclamer sa valeur scientifique. Nous ne manquerons pas de remercier également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

*Après de longues années d'études et de travail, sachant l'importance de
l'aide des êtres qui m'aiment*

Je dédie ce travail :

*Aux deux personnes, les plus chers pour moi dans ce monde, Qui ne
m'a pas quitté pour toujours, Qui ont veillé à ce que je sois ce que je
suis devenu maintenant.*

*Mon cher père qui a su m'imprégner de son savoir et de sa sagesse. ET
qui ma transmis toute sa grande patience.*

*À Ma chère mère qui s'est sacrifiée pour moi et témoignée de toute
mon affection tout le long de mon parcours scolaire et académique.
ET qui m'a transmit toute sa volonté, sa persévérance. Que
dieu les préserve et les bénisse.*

*A ma belle sœur Radhia, qui m'a aidé et m'a apporté un soutien
particulier et m'a conseillé à tout moment. Que dieu le
préserve*

À Toutes ma famille

À toutes mes amies

ACHOUAK CHIA

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mon cher père pour
ses sacrifices en témoignage de tout mon affection
au long de mes études.*

*A ma chère mère qui m'a fourni de la tendresse et de l'amour,
je leur dis:*

*Vous m'avez donné la vie, l'espoir et grandi sur une passion
pour la connaissance et la connaissance,*

A mes frères

À Toutes ma famille

À toutes mes amies.

Lensari Charif

Table des matières

LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
ABREVIATION ET NOTATION.....	XIII
INTRODUCTION GENERALE.....	XVI

CHAPITRE I

Influence Des Champs Electromagnétique Sur Les Cellules Biologique et CEM

Introduction	6
I.1 Définition des champs électromagnétique	6
I.2- Source des champs électromagnétique	6
I.2.1. Les champs électromagnétiques d'origine naturelle.....	6
I.2.2 Les champs électromagnétiques créés par l'activité humaine.....	7
I.3 Catégories de champs électromagnétique	7
I.3.1 Les champs électriques.....	7
I.3.2- Les champs magnétiques	8
I.3.3- Les champs micro-ondes	9
I.4 Comparaison entre le champ magnétique et le champs électrique	9
I.5- Différence entre un champ statique et un champ variable	9
I.5.1 Champ électrique statique.....	9
I.5.2- Champ magnétique statique.....	10
I.6- Modèles des champs électromagnétiques	10

I.6.1. Modèle ondulatoire	10
I.6.1.1 Émission d'une onde électromagnétique	11
I.6.1.2 Propagation	12
I.6.2. Modèle corpusculaire	12
I.6.2.1. Dualité onde-corpuscule.....	12
I.7- Spectre électromagnétique	13
I7.1- Catégories d'ondes ionisantes	14
I7.2- Catégories d'ondes non-ionisantes	15
I.7.3- Différence entre un rayonnement ionisant et un rayonnement non ionisant	18
I.8- Utilisation des ondes électromagnétique dans le domaine	18
I.8.1- Cas de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)	19
I.8.2- Effets biologiques	20
I.8.2.1. Études in vitro	20
I.8.2- Effets biologiques	20
I.8.2.1. Études in vitro.....	20
I.8.2.2- Études in vivo chez l'animal	20
I.8.2.3- Effets biologiques chez l'humain (IRM)	22
I.9- Effet de l'exposition aux champs électromagnétique.....	22
I.9.1- Influence de l'exposition à un champ électromagnétique	22
I.9.2 Les effets des champs en fonction du domaine de fréquence	23
I.9.2.1- Champs électrique et magnétique basse fréquence.....	23
I.9.2.1.1- Etudes sur in vitro	24
I.9.2.1.2- Etudes sur les animaux	24
I.9.2.1.3- Les études épidémiologiques	25
I.9.2.2- Influence des champs moyens fréquences	25
I.9.2.3- - Influence des champs hauts fréquences.....	26
I.9.3- Effets biologiques sur les études cellulaires	26
I.9.3.1 Interaction avec les tissus	26
I.9.3.1.1- Champs et courants induits	26

I.9.3.1.2. Quelques notions sur la cellule biologique.....	27
I.9.3.2 Effets sur la cellule	27
I.9.3.2 .1Effets des champs électriques pulses	28
I.9.3.3 Effets sur les systèmes biologiques	28
I.9.3.3.1 Système neuroendocrinien	28
I.9.3.3.2 Système nerveux	29
I.9.3.3.2 Système cardiovasculaire	30
I.9.3.3.3 Système reproducteur	30
I.9.3.3.4 Système immunitaire	31
I.9.3.3.5 Plausibilité biologique	31
I.10 Limites d'exposition aux champs électromagnétique	32
I.10.1 Règlements	32
a) Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants : ICNIRP	32
b) Règlements européenne	34
c) Règlements française	36
CONCLUSION.....	36

CHAPITRE II

La Compatibilité électromagnétique (CEM)

Introduction	38
II. 1. Définition de la compatibilité électromagnétique (CEM)	38
II.2 Amélioration de la CEM.....	39
II.3 Perturbation électromagnétique	40
II. 3.1 Sources de perturbation électromagnétique	40
II.3.1.1 Classification des sources de perturbations.....	40
II. 3.1.2 Sources de perturbation électromagnétique permanentes et transitoire.....	41
II.3.2 - Les vecteurs de propagation.....	42

II.4 <i>Le couplage électromagnétique</i>	42
II.4.1 <i>Mode de couplage</i>	43
II.4.1.1 Le couplage par conduction.....	43
II.4.1.2 Le couplage par rayonnement (par champ)	43
II.4.1.3. <i>Le couplage par champ proche</i>	44
II.4.1.4. <i>Le couplage par champ lointain</i>	44
II.5. Les Caractérisations de la cellule biologique d'un point de vue électromagnétique...45	
II.5.1. Propriétés biologiques	45
II.5.1.1. La membrane.....	45
II.5.1.2. Le cytoplasme.....	46
II.5.2. Propriétés physiques.....	47
II.5.2.1. Propriétés mécaniques.....	48
II.5.2.2 Propriétés magnétiques.....	49
II.5.2.3 Propriétés diélectriques.....	50
II.6. Electrorotation.....	52
II.6.1. Principe.....	52
II.6.1.1 Notion de polarisation.....	53
II.6.1.2. Diélectrophorèse.....	53
II.6.1.3. Électrorotation.....	55
II.7 .Système d'exposition.....	56
II.7.1 Appicateurs pour l'electroporation ms- μ s.....	56
II.7.2 Appicateurs pour l'electroporation ns.....	57
II.7.2.1 <i>Cuvette biologique</i>	57
CONCLUSION.....	59

CHAPITRE III

Synthèse des travaux effectués dans le même contexte

INTRODUCTION :.....	60
III.1 Essais effectués sur des plantes :	60
III.2. Préparation d'échantillons.....	61
III.2.1 Mise en place.....	63
III.2.1 .1 Elaboration des godets.....	63
III.2.2 . Mise en place champ électromagnétique :	63
III.2.3. Observations.....	64
III.2.3.1. Observation microscopique.....	65

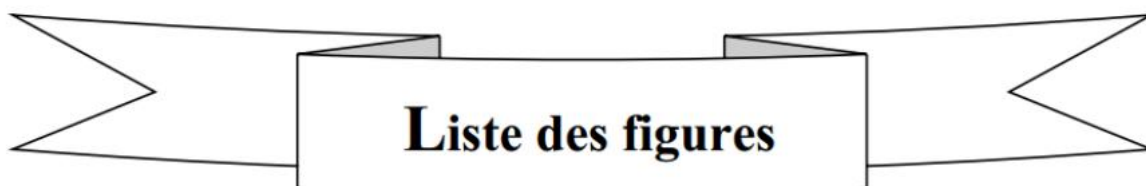
III.2.3.1.1 le microscopique.....	65
III.2.3.1.1 2. Principe du micro-scope :.....	66
III.2.3.1.3 Les différentes sortes de microscopes.....	66
III.2.3. 2 Observation réel et microscopique des plants exposés	66
III.2.4 Conclusion des observations.....	71
III.2.4.1. Observation microscopique	71
III.2.4.2 Observations sur la croissance	71
III.2.2.3- Remarques et interprétation :.....	71
III.3. Expérience des Œufs	72
III.4 La cellule TEM	77
III.4 .1 Le principe de La cellule TEM	80
III.4.2- Exemple de mesures pratiquées en cellule TEM	81
a- Mesures en rayonnement.....	81
b- Mesures en immunit.....	82
Conclusion :	84

CHAPITRE IV

Modélisation en vue d'étude numériques de l'influence des champs électromagnétiques sur les êtres vivants

INTRODUCTION :	86
IV.1. Définition des grandeurs électromagnétiques.....	86
IV.1.1 Champ et potentiel électrique.....	86
IV.1.2. Comportement diélectrique de milieu biologique	87
IV.1.3 Permittivités et conductivité complexe	88
IV.1.4 Ordre de grandeur des dimensions et propriétés électromagnétiques des milieux	89
IV.2 Modélisation de la cellule	90
IV.2. 1. Champ électrique et potentiel transmembranaire	91
IV. 2.1.1 Approche analytique	91
IV.2.1.2 Approche circuit électrique.....	92

IV.2.2 Densité de pores	93
IV. 2.2.1 Equation de Smoluchowski.....	93
IV.2.2.2 Modèle asymptotique de l'équation de Smoluchowski.....	94
IV.2.3 Modélisation 2D - 3D	94
IV.2.3.1 Circuit électrique distribué.....	94
IV.3 Méthodes numériques	95
IV.3.1 Méthode des différences finies.....	95
IV.3.1.1 Equation du potentiel scalaire du champ électrique	96
IV.3.1.2 Discrétisation des équations	96
IV.3.1.2.1 Potentiels électriques	96
IV.3.1.2.2 Champs électriques	98
IV.3.1.2.3 Interface	98
IV.3.1.2.4 Conditions aux limites	99
IV.3.1.2.5 Résolution dans le domaine fréquentiel	99
IV.3.1.3 Méthode de sur relaxation	100
IV.4. Influence des champs Pulsés sur les cellules biologiques.....	100
IV.4.1- Présentation des générateurs d'impulsion	100
<i>IV.4-2 Etude de générateur de choc de type Marx en utilisant les circuits équivalents....</i>	<i>101</i>
IV.4.3 Application sur la tension de générateur choc	104
CONCLUSION.....	106



Liste des figures

Fig. I.1 Attraction et répulsion dans un champ électrique.....	8
Fig.I.2- Un courant électrique d'intensité par courant un fil crée un champ magnétique autour de celui –ici	8
Fig. I.3- Schéma d'une onde électromagnétique.....	11
Fig. I.4- Représentation d'une onde électromagnétique.....	11
Fig. I.5- Spectre électromagnétique.....	13
Fig. I.6- Schéma du spectre électromagnétique avec les longueurs d'ondes.....	15
Fig. I-7 a) Radiographie prise par le découvreur des rayons X , b) Photographie d'une cabine à UV .	14
Fig. I.8- Schéma d'une ligne de transport a Haute Tension.	15
Fig. I.9 a) Télécommande infrarouge, b) Détecteur d'intrusion	16
Fig. I.10- Réalisation une expérience de stimulation musculaire par un courant alternatif sur un patient.....	18
Fig. I.11- Représentation schématique de la rotation d'un proton	19
Fig. I.12-: Schéma explicatif de la modification de l'axe des spins pendant l'IRM.....	20
Fig. I.13-: Image obtenue après réalisation de l'IRM	20
Fig. I.14 : Influence champs électrique et magnétique basse fréquence	24
Fig. I.15. Structure simplifiée d'une cellule vivante	27
Fig. I.16.: Principe d'application de champs électriques pulses sur une cellule biologique place entre deux électrodes.[34].....	28
Fig. I.17. Certain partie du système neuroendocrinien.....	29
Fig. I.18. Schéma du système nerveux humain.....	30
Fig. I.19 Schéma simplifié de l'homéostasie et de la réponse immunitaire au niveau de la barrière intestinale	31

Fig. I.20- : Valeurs déclenchant l'action pour les champs magnétiques	35
Fig. I.21- : Valeurs déclenchant l'action pour les champs électriques.....	35
Fig. II.1. Schéma de la problématique de la CEM.....	40
Fig. II.2. - <i>Concept de Compatibilité Electromagnétique</i>	40
Fig. II.3 - <i>Transmission des perturbations</i>	40
Fig. II.4 – <i>Classification des sources de perturbations</i>	41
Fig. II.5 Les modes de couplage entre la source de perturbation et la victime.....	42
Fig. II.6 Le mode commun entre deux systèmes.....	43
Fig. II.7 Le mode différentiel entre deux systèmes.....	43
Fig. II.8 Les modes de couplage.....	44
Fig. II.9: Dimensions caractéristiques des structures biologiques et technologiques.....	45
Fig. II.10: Structure d'une membrane : toute bicouche peut se refermer sur elle-même pour former une cellule.....	46
Fig. II.11: Structure d'une cellule eucaryote	47
Fig. II.12 : Structure d'une cellule procaryote.....	47
Fig. II.13: La cellule adhère sur le substrat via des complexes d'adhésion (en rouge), l'extension de la membrane Elle est gouvernée par la dynamique du cytosquelette qui permet de faire migrer la cellule	48
Fig. II.14 : (a) les valeurs de la densité de flux magnétique issu d'une source magnétique. Modification de cartographie suite à la présence d'un corps (b) ferromagnétique (c) paramagnétique (d) diamagnétique.....	49
Fig. II.15 : Echelle de susceptibilités magnétiques (unité SI).....	49
Fig. II.16: <i>Magnetospirillum magnetotacticum</i> (a) la bactérie synthétise une chaîne de nanoparticules qui est ancrée à l'intérieur de son corps (b) chaque particule est recouverte d'une membrane (c) anneau de nanoparticules formé par la manipulation et la lyse de deux bactéries magnétotactiques.....	50
Fig. II.17 : Lignes de champ électrique (a) cas où la particule est plus (b) ou moins polarisable que le milieu.....	51
Fig. II.18 : Modèle de circuit équivalent pour une cellule en suspension	51
Fig. II.19 : De gauche à droite : la particule est moins, plus et autant polarisable que le milieu environnant	54
Fig. II.20 : Electrodes rectangulaires interdigitées : en vert, des particules soumises à la diélectrophorèse négative, en rouge, des particules soumises à la diélectrophorèse positive ..	55
Fig. II.21 : à gauche : un champ tournant est engendré entre quatre électrodes par application d'une tension sinusoïdale avec un déphasage de 90° ; à droite : selon l'angle de phase entre la polarisation induite et le champ électrique, le couple agit sur la particule qui se met en mouvement dans le sens identique ou inverse au champ.....	55
Fig. II.22: Illustration d'applicateurs bases sur des électrodes planaires et électrodes Aiguilles.....	57

Fig. II.23: Cuvette d'électrolocation avec différentes distances inter-electrodes ⁹ (de gauche à droite 1 mm, 2 mm et 4 mm).....	57
Fig. II.24: Schéma d'un système d'exposition employant une cuvette d'electroporation	58
Fig. II. 25 : Comparaison du champ incident et du champ appliqué pour une impulsion rectangulaire de 10 ns(a) dans le domaine temporel (b) dans le domaine fréquentiel	59
Fig. II. 26 : Comparaison du champ incident et du champ appliqué pour une impulsion bi-polaire de 2 ns(a) dans le domaine temporel (b) dans le domaine fréquentiel.....	59
Fig. III.1 la plante de ray-grass.....	61
Fig. III.2 Salle où on fait l'expérience.....	62
Fig III.3 Photo des godets avec les semences de ray-grass anglais.....	63
Fig III.4 Salle de test et les matériels utilisées.....	64
Fig III.5 Résultats d'exposition d'une durée de 25 jours.....	64
Fig III.6 Résultats d'exposition aux ondes de 10 jours.....	65
Fig III .7 un microscopique	65
Fig III.8 Observation microscopique des plants exposés après 10 jours d'exposition aux ondes.....	66
Fig III.9 Plantes témoins non exposés aux ondes.....	67
Fig III.10 Observation microscopique des plants non-exposés après 10 jours de pousse.....	67
Fig III.11 Godets Après 18 jours d'exposés aux ondes	68
Fig.III.12 Observation microscopique des plants exposés après 18 jours d'exposition aux ondes.....	68
Fig III.13 Godets témoins non exposés aux ondes.....	69
Fig III.14 Observation microscopique des plants non-exposés après 18 jours d'exposition aux ondes.....	69
Fig III .15 Godets exposés aux ondes après 25 jours d'exposition.....	70
Fig III.16. Godets témoins non exposés aux ondes après 25 jours.....	70
Fig III.17 Observation Echantillons sans exposition état 0.....	73
Fig III.18 Observation Echantillons après 30 mn.....	73
Fig III.19 Observation Echantillons après 45 mn.....	74
Fig. III.20 Observation Echantillons après 1h	74
Fig. III.21 Observation Echantillons après 1.30h	75
Fig III.22 Observation Echantillons après 1.45 h	75
Fig III.23 Observation Echantillons après 2 h.....	76
Fig III.24 Observation Echantillons après 2.30 h	76
Fig. III.25 Observation Echantillons après 3 h.....	77
Fig III.26: Représentation d'une cellule TEM. (a) vue de profil avec une boîte de Petri entre le septum et l'un des murs métalliques. (b) vue de dessus avec la boîte de Petri	78

Fig III.27: Comparaison des champs incident en sortie du générateur (« forward pulse »), réfléchi par la cellule TEM (« reflected ») et transmis à la cellule TEM (« input ») (a) impulsion rectangulaire. (b) impulsion bipolaire, de durée 1.2 ns de temps de montée de 800 ps et d'amplitude $\sim 140\text{kV/m}$	78
Fig III 28: Cellule TEM ouverte (ou ligne triplaque) pour microscope, et sa modélisation.....	79
Fig III.29: Cellule TEM ouverte : ligne triplaque	79
Fig III.30: Cellule TEM fermée	79
Fig III.31. Photographies des cellules <i>GTEM</i> (à gauche) et <i>TEM</i> (à droite).....	80
Fig III.32 schématise le principe de la mesure en cellule <i>TEM</i>	81
Fig III.33. Orientations de la boucle dans la cellule TEM.....	81
Fig III.34 : Représentation des tensions mesurées en fonction de l'orientation de l'équipement.	82
Fig III.35 : Représentation des courants induits en fonction de l'orientation de l'équipement	83
Fig III.36 : Représentation des configurations testées	83
Fig III.37: Représentation des courants induits en fonction de la position de la boucle le long de l'axe x	84
Fig IV.1 : Comportement fréquentiel de la permittivité et phénomènes de polarisation associés	87
Fig IV.2: Permittivité relative équivalente complexe (parties réelle et imaginaire) Modèle de Debye et conductivité électrique : $\epsilon_s = 81$; $\epsilon_\infty = 1.8$; $\tau = 9.4\text{ ps}$; $\sigma = 1\text{ S/m}$	88
Fig IV.3 : Modèle de cellule avec deux membranes (la membrane plasmique et la membrane de l'organelle).	89
Fig IV.4: Schéma d'une cellule eucaryote : (a) modèle complet ; (b) modèle simplifié homogène ; (c) modèle avec une organelle	90
Fig IV.5 Circuit électrique équivalent à une cellule en suspension : (a) modèle simple membrane ; (b) modèle avec organelle concentrique.	92
Fig IV.6: Réseau distribué du modèle de cellule, ainsi que les circuits équivalents aux modèles locaux.	95
Fig IV.7: Calcul du potentiel $V(i,j)$ (en rouge) à partir des quatre potentiels qui l'entourent (en vert). Le calcul du champ électrique (en rouge) est obtenu à partir de potentiel. Le champ électrique moyen est évalué au centre de la maille (en bleu).....	97
Fig IV.8: Chaque maille est affectée par une permittivité en son centre. $\epsilon_r(i-1,j-1)$ délimitée par le contour rouge. $\epsilon_r(i-1,j)$ délimitée par le contour bleu .la surface hachurée correspond à la permittivité moyenne obtenue à partir de $\epsilon_r(i-1,j-1)$ et $\epsilon_r(i-1,j)$	98
Fig IV.9: Damier, représentant les nœuds auxquels sont calculées les valeurs de potentiel en deux temps.	100

Fig IV.10: Schéma équivalent du générateur de Marx à trois étages.....	101
FigIV.11: Circuit équivalent simplifiés d'un générateur à impulsions	101
Fig IV.12: Schéma simplifié du générateur	102
Fig IV.13: Bloc diagramme des calcules des paramètres du schéma équivalent de générateur de Marx.....	104
Fig IV.14: Tension de générateur de choc pour une onde (500/10000) μ s avec une tension crête 1870kV	105
Fig IV.15: Tension de générateur de choc d'une onde (1.2/50) μ s avec une tension crête 600kV.....	105
Fig IV.16: tension de générateur de choc d'une onde (250/2500) μ s avec une tension crête 8500kV.....	106



Liste des tableaux

Tableau I.1- Comparaison entre le champ magnétique et le champs électrique	9
Tableau I.2. Rayonnements électromagnétiques : caractéristiques et principales applications.	17
Tableau I.3. Restrictions de base pour les champs électriques et magnétiques alternatifs en fonction des fréquences. ICNIRP. 1998.....	33
Tableau I.4. Niveaux de référence pour l'exposition professionnelle et de la population générale à des champs électriques et magnétiques alternatifs. ICNIRP 1998.....	34
Tab II.1 : Lois d'échelles pour différentes grandeurs physiques.....	52
Tab IV.1: Caractéristiques des cellules biologiques.	89

Abréviations et Notations

A: Ampères par mètre

ADN : Acide Désoxyribo Nucléique

ARN :Acide ribonucléique

B : champ magnétique

β : compressibilité

BF : Basses Fréquences

C: Vitesse de la lumière

CEM : Compatibilité électromagnétique

Cl⁻ : Chlore

Cl₂⁺ : Chlorine

CPL : Courant Porteur en Ligne

D : Dimension

DAS : Débit d'Absorption Spécifique

E: Energie

E : champ électrique

ECG : Electrocardiogramme

EEG : Electroencéphalogramme

EHF : Fréquences Extrêmement Hautes

ELF : Extrêmement Basse Fréquence

f : Fréquence

Fe₃O₄ : Oxyde de Fer

FM : Fréquence Moyenne

GdR : Groupe de Recherche

GSM :Global System for Mobile Communications

HF : Hautes fréquences

I : courant électrique

ICNIRP : International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

IF : Fréquences Intermédiaires

IR : Infrarouge

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

K+ : Potassium

L : Loi d'échelle

LCD : Écran à Cristaux Liquides

m: mètre

MF : Moyennes Fréquences

Na+ : Sodium

N₂ : L'azote

NYSPLP : New York State Power Liens Project

O₂ : Oxygène

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

r : rayon de la cellule

R_i : résistance dans le milieu intracellulaire

R_m : résistance dans Le milieu externe

RMN : Résonance Magnétique Nucléaire

SHF : Fréquences Super Hautes

T : Période

TLM : Transport Lettice Méthode

UHF : Fréquences Ultrahautes

UMTS : Universal Mobile Telecommunications System

μ_r : perméabilité relative

μT: micro teslas

UV: Ultra-Violet

V : tension électrique

VDA : Valeurs limites Déclenchant l'Action

VLE : Valeurs Limites d'Exposition

χ : susceptibilité magnétique

ϵ_r : permittivité électrique relative

ϵ_m : permittivités

λ : Longueur d'onde

ρ : masse volumique

τ_m : temps de charge

σ : conductivité électrique

σ_m : conductivité de la membrane plasmique

Ψ : potentiel transmembranaire

Introduction Générale

Introduction générale

L'influence des champs électromagnétiques sur les êtres vivants et les cellules biologiques constitue un sujet de recherche d'une grande importance et l'un des sujets de recherche scientifique le plus intéressant dans les domaines de l'étude et de la biotechnologie depuis quelques décennies. Les premières réalisations de cette technique ont été faites dans le but d'augmenter la qualité des tissus comme l'amélioration de la perméabilité des tissus cellulaires et par la suite l'intérêt est porté à l'influence des ondes électromagnétiques sur le cycle de vie des êtres vivants au niveau macroscopiques et des cellules au niveau microscopique. Dans le domaine des téléphones mobiles ce sujet prend de plus en plus une position très importante vu les grandes inquiétudes des effets indésirables du champ électromagnétique mis en jeu lors des communications téléphoniques.

La maîtrise des effets des champs électromagnétiques sur le vivant constitue un enjeu scientifique et sociétal majeur. Durant ces dernières décennies, les sources électromagnétiques se sont multipliées : l'exposition quotidienne de l'homme s'en est retrouvée considérablement accrue. Le grand public a souvent une perception néfaste des nouvelles technologies et de leur impact sur la santé malgré les applications potentielles de ces champs dans le domaine médical telles que l'imagerie médicale ou le traitement de certains cancers (hyperthermie). De nombreuses études se sont orientées vers les interactions entre les champs électromagnétiques et la matière vivante comme l'étude du comportement des cellules cardiaques lors des électrochocs.

L'étude des effets des champs sur l'organisme, de la cellule à l'être humain, passe par une meilleure compréhension des phénomènes à l'échelle de la cellule, unité de base de l'être vivant. Avec les progrès de la biochimie, de la génétique et des techniques de laboratoire, les mécanismes régissant le fonctionnement interne de la cellule sont de mieux en mieux compris.

Les microsystèmes dédiés à la caractérisation et à la manipulation de cellules jouent un rôle essentiel dans la compréhension de ces mécanismes et participent à la mise au point de nouveaux traitements ou outils de diagnostic permettant de mieux dépister, par exemple, les cellules de la leucémie ou du cancer du sein. Le champ d'investigation de la matière vivante est vaste ; en effet, la cellule est caractérisée par de nombreuses propriétés biologiques et physiques. Nous nous intéressons aux propriétés électriques de la cellule afin d'appréhender qualitativement et quantitativement l'effet du champ électrique. En particulier, l'un de nos principaux objectifs consiste à mesurer les paramètres électriques des principaux compartiments cellulaires tels que le cytoplasme et la membrane afin de renseigner des modèles permettant de simuler le comportement de cellules exposées à une source de champ. L'étude de l'interaction du champ avec des cellules est une première étape avant de pouvoir

investiguer des communautés cellulaires et de remonter, par exemple, aux comportements des tissus.

Organisation du mémoire :

Le premier chapitre est une description générale sur les Champs Electromagnétique et les types de sources et ses modèles. Ensuite nous parlons de Effets biologiques sur les études cellulaire et les limites d'expositions aux champs électromagnétiques.

Dans le deuxième chapitre, Nous commençons par une définition de la compatibilité électromagnétique, et ses sources de perturbation et les modes de couplage d'une onde électromagnétique. Puis nous mettrons le point sur les caractérisations de la cellule biologique d'un point de vue électromagnétique et les différentes approches (analytique, électrique) permettant de modéliser le comportement de la cellule.

Le troisième chapitre est consacré à l'expérimentation sur les effets des ondes électromagnétiques sur des matières vivants, nous choisissons un type de plantes et les œufs.

Enfin le dernier chapitre est consacré à la partie numérique sur l'influence des champs électromagnétiques en particulier vis-à-vis les champs pulsés.

CHAPITRE I

Influence Des Champs Electromagnétique Sur Les Cellules Biologiques

CHAPITRE I

Influence Des Champs Electromagnétique Sur Les Cellules Biologique et CEM**INTRODUCTION :**

Les champs électrique et magnétique sont présents partout dans l'environnement. Ils peuvent être de source naturelle telle que les CEM produits par le soleil ou la terre ou encore d'origine humaine telle que les télécommunications, les appareils électriques commerciaux et médicaux, les lignes de transport d'électricité et autres appareils électriques dont l'humain fait usage.

Dans ce chapitre, nous allons parler les catégories de ces champs. Et on va donner également des généralités sur les effets biologiques et les limites d'exposition recommandées par les organismes internationaux pour pouvoir les utiliser en sécurité.

I.1- DEFINITION DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES :

Les champs électriques sont produits par des variations dans le voltage: plus le voltage est élevé, plus le champ qui en résulte est intense. Ils surviennent même si le courant ne passe pas. Au contraire les champs magnétiques apparaissent lorsque le courant circule: ils sont d'autant plus intenses que le courant est élevé. Ainsi, lorsqu'on a un courant électrique, l'intensité du champ magnétique variera selon la consommation d'électricité, alors que l'intensité du champ électrique restera constante. [1]

I.2- SOURCES DES CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES :

On peut distinguer deux types de sources pour les champs électromagnétiques. [1]

I.2.1. Les champs électromagnétiques d'origine naturelle

Bien que non perceptibles par l'œil humain, des champs électromagnétiques sont partout présents dans notre environnement. Ainsi, l'apparition en certains points de l'atmosphère de charges électriques sous l'influence d'orages donne naissance à un champ électrique. L'orientation de l'aiguille aimantée d'une boussole dans la direction nord-sud est due au champ magnétique terrestre qui est également utilisé comme aide à la navigation par les oiseaux et les poissons.

I.2.2 Les champs électromagnétiques créés par l'activité humaine

A côté des sources naturelles qui composent le spectre électromagnétique, existent d'autres champs qui résultent de l'activité humaine : ces champs sont par exemple à l'origine des rayons X que l'on utilise notamment pour mettre en évidence les fractures dues à des accidents de sport. Au niveau de toute prise de courant existe un champ électromagnétique de basse fréquence engendré par le courant électrique.

Nous utilisons également toutes sortes de rayonnements dans le domaine des radiofréquences élevées pour la transmission d'informations, au moyen d'antennes de télévision et de radio ou encore pour la liaison avec les téléphones portables.

I.3 CATEGORIES DE CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES

I.3.1 Les champs électriques

Les champs électriques sont associés à la présence de charges positives ou négatives. L'intensité d'un champ électrique se mesure en volts par mètre (V/m). Tout fil électrique sous tension produit un champ électrique dans son voisinage. Ce champ existe même si aucun courant ne circule. Pour une distance donnée du fil, le champ est d'autant plus intense que la tension est plus élevée.

Comme cette tension existe même lorsqu'aucun courant ne passe, il n'est pas nécessaire d'allumer l'appareil pour qu'un champ électrique soit présent dans la pièce où il se trouve. Le fait de brancher la prise d'un appareil électrique sur le secteur crée un champ électrique dans l'espace environnant.

Le champ électrique sera le plus grand à proximité immédiate de la source sous tension. L'intensité va diminuer rapidement avec la distance. Les conducteurs métalliques constituent un blindage efficace contre les champs électriques. Les matériaux de construction, les arbres, etc. confèrent également une certaine protection. [2]

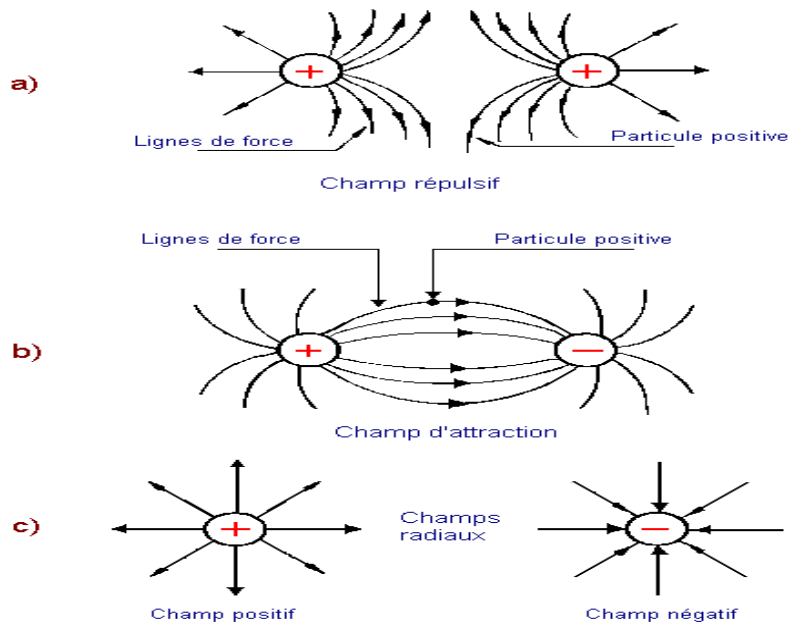


Fig. I.1 Attraction et répulsion dans un champ électrique [3]

I.3.2- Les champs magnétiques

Les champs magnétiques sont engendrés par le déplacement de charges électriques. L'intensité d'un champ magnétique se mesure en ampères par mètre (A/m), toutefois dans la recherche et les applications techniques, il est plus courant d'utiliser une autre grandeur liée à celle-ci, qui s'exprime en teslas ou en micro teslas (μT). Contrairement au champ électrique, le champ magnétique n'apparaît que lorsqu'un appareil électrique est allumé et que le courant passe. Plus l'intensité du courant est forte, plus le champ magnétique est élevé. Les champs électrique et magnétique coexistent donc dans l'environnement d'un appareil électrique. Comme dans le cas du champ électrique, le champ magnétique est d'autant plus intense qu'on est proche de la source et il diminue rapidement lorsque la distance augmente. Les matériaux courants tels que les matériaux de construction ne constituent pas un blindage efficace contre les champs magnétiques. [2]

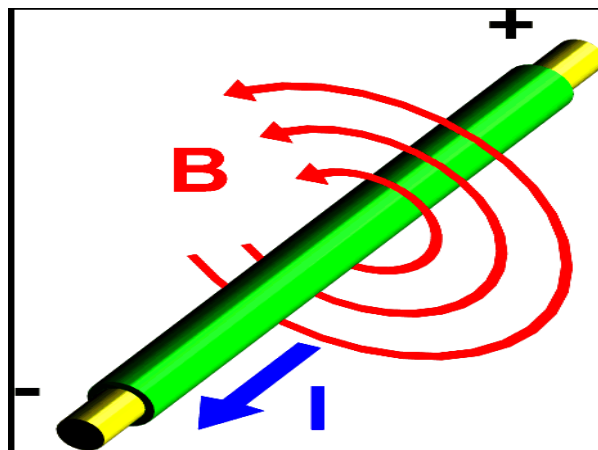


Fig. I.2- Un courant électrique, d'intensité(I) par courant un fil crée autour de celui-ci. [4]

I.3.3- Les champs micro-ondes

Les champs micro-ondes émettent des champs électromagnétiques à des fréquences dont le champ électrique est prépondérant. Il n'est pas nécessaire de mesurer le champ magnétique pour déterminer le niveau de dangerosité pour les travailleurs pour ce type de source, que l'on peut assimiler comme une source de champ électrique. [2]

I.4 Comparaison entre le champ magnétique et le champs électrique

Type de champ	Origine	Phénomène	Source	Unité de mesure	Impact pour le corps humain
Champ magnétique	Courant électrique	Invisible	Engendré par le courant électrique (A)	Tesla	Le corps humain ne peut le percevoir par la peau (le sentir)
Champ électrique	Courant électrique	Invisible	Engendré par la tension électrique (V)	V/m	Le corps humain peut le percevoir par la peau (le sentir)

TabI.1- Comparaison entre le champ magnétique et le champs électrique [2]

I.5-Ddifférence entre un champ statique et un champ variable

On appelle courant continu un courant qui ne se déplace que dans un seul sens. Dans un appareil alimenté par une pile ou une batterie, le courant va du générateur à l'appareil puis revient vers le générateur. Ce courant crée un champ magnétique statique. Un champ statique reste constant au cours du temps. Le champ magnétique terrestre est aussi un champ statique. C'est également le cas de celui qui est créé par un barreau aimanté et dont on peut observer les lignes de force lorsqu'on répand de la limaille de fer tout autour.

En revanche, un courant alternatif va créer un champ variable dans le temps. Un courant alternatif change de sens à intervalles réguliers. Dans la plupart des pays européens, ce changement de sens s'opère avec une fréquence de 50 Hertz, soit 50 cycles par seconde. De même, le champ magnétique engendré par ce courant oscille à raison de 50 cycles par seconde. En Amérique du Nord, la fréquence du courant électrique est de 60 Hz. [5]

I.5.1 Champ électrique statique

La différence de potentiel créant un champ électrique statique apparaît principalement dans deux situations : autour des équipements placés à un potentiel élevé ou par frottement d'objets électriquement isolés. Un frottement peut séparer les charges positives des charges négatives. Il arrive que, en atmosphère sèche, une personne se charge en marchant sur un sol

revêtu d'une matière isolante (moquette ou matière plastique). Lorsque la personne arrive au contact d'un objet non chargé, le champ électrique statique local au niveau du contact est égal à la différence de potentiel divisée par la distance. Si ce champ dépasse le champ de claquage dans l'air (environ 30 kV/cm), l'air devient conducteur et la personne se décharge sur l'objet : c'est ce qu'on appelle une «décharge électrostatique», plus ou moins ressentie selon les individus.

La seule source créant, dans notre environnement, un champ électrique statique d'intensité comparable à celle du champ terrestre et une exposition non localisée est le transport d'énergie électrique sous tension continue. Toutefois, ce mode de transport de l'électricité est aujourd'hui peu utilisé. Par contre, le courant continu a été utilisé au début de l'électrification des voies ferrées. [

Le champ électrique statique à la surface de la Terre est d'environ 100 à 150 V/m par beau temps. Par temps orageux, sa valeur est en moyenne de 10 à 15 kV/m . [6]

I.5.2- Champ magnétique statique

Est produit par les aimants permanents ou tous les courants électriques continus, Naturels.ou.artificiels.

Le champ magnétique est provoqué par le déplacement de charges électriques, il n'apparaît donc que lorsque le courant électrique circule dans un appareil électrique.

Les champs électrique et magnétique coexistent donc dans l'environnement d'un appareil électrique. Le champ magnétique statique est mesuré en ampères par mètre. [7]

I.6- MODELES DU CHAMP ELECTROMAGNETIQUE

I.6.1. Modèle ondulatoire

Selon ce modèle, Une onde électromagnétique correspond à des photons, (particules élémentaires de masse et de charge nulle, énergie "pure" en quelque sorte) qui circulent pour former des ondes sous forme d'énergie électromagnétique concentrée en un rayonnement qui se propage.

L'électromagnétisme est une force de faible énergie qui résulte du couplage entre un champ électrique E et un champ magnétique B . Ces deux champs sont perpendiculaires entre eux, mais également par rapport à l'axe de propagation (fig. I.3). [2]

Ainsi, lorsqu'un champ, est formé d'un champ magnétique et d'un champ électrique, il émet une onde électromagnétique. Ces deux champs oscillent en même temps mais dans deux plans perpendiculaires et se déplacent à la vitesse de la lumière ($c = 3.10^8 m.s^{-1}$). [8]

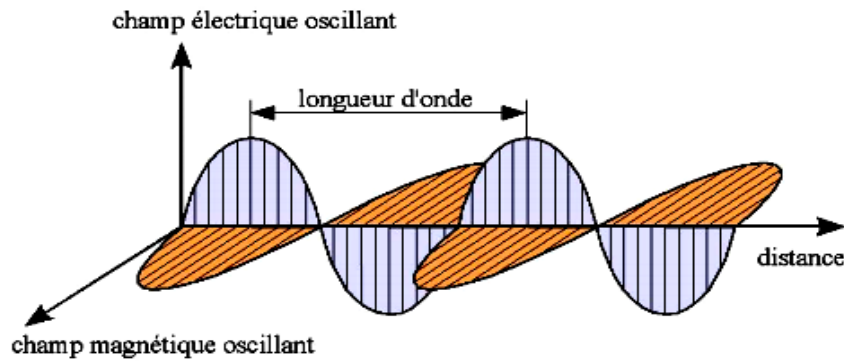


Fig. I.3- Schéma d'une onde électromagnétique [2]

L'amplitude des deux champs varie de manière sinusoïdale, avec la même fréquence et la même vitesse,

E : Champ électrique en volt par mètre (V/m)

f : Fréquence en Hertz (Hz) où $f = 1/T$

λ : Longueur d'onde en mètre (m) où $\lambda = c/f = cT$

c : Vitesse de la lumière dans le vide en mètre par seconde (m/s) : $c = 299\,792\,458\,m/s$

T : Période en secondes (s) où $T = 1/f$

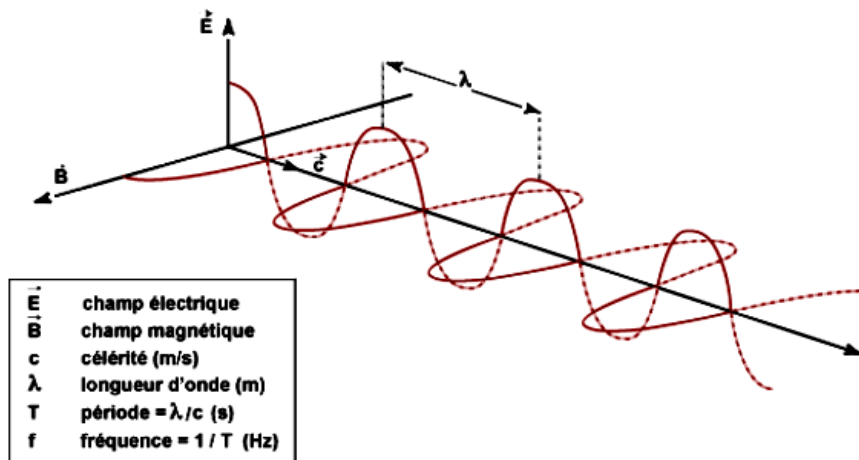


Fig. I.4- Représentation d'une onde électromagnétique [8]

I.6.1.1 Émission d'une onde électromagnétique

Les ondes électromagnétiques, se déplacent dans le vide c'est-à-dire même en l'absence d'un milieu matériel et elles se propagent à grande vitesse. Sachant qu'une onde en générale se caractérise par sa fréquence et son amplitude, les ondes électromagnétiques quant à elles se caractérisent par des fréquences plus élevées que celles du son car celles du son sont des ondes électromagnétiques avec la fréquence la plus petite. Les ondes sonores ont une fréquence entre 87,5 à 108 MHz. Prenons l'exemple d'une radio FM qui donne son adresse en donnant sa fréquence, 120.9 MHz. [2]

I.6.1.2 Propagation

Une onde électromagnétique au départ est une vibration étant simultanément un champ électrique et magnétique cela a conféré le nom champ électromagnétique. Le champ électromagnétique est invisible et immatériel. La propagation se fait lorsqu'il y a changement des valeurs des différents champs. Ce qui implique qu'un point du champ électrique est conjointement associé à un point du champ magnétique. Le changement de position ou de valeur d'un point du champ électrique implique directement le changement de la valeur du point du champ électromagnétique associé à ce dernier. La succession de changement aboutit à la modification complète du champ électrique et du champ magnétique. Ces changements créent des vibrations qui transportent le signal, le message. Une onde électromagnétique n'est donc pas quelque chose d'anodin car transporte souvent un message ou un signal grâce au champ électrique. La propagation se fait par le biais des propriétés des ondes électromagnétique: réfraction, réflexion, diffusion, diffraction, absorption .[2]

I.6.2. Modèle corpusculaire

Dans le modèle corpusculaire, le champ électromagnétique est représenté par un flux de particules chargées énergétiquement. Ces particules sont appelées photons ou quanta [2]

Dans le vide, un photon se propage en ligne droite, avec la même célérité c que l'onde électromagnétique associée ; il transporte une quantité d'énergie élémentaire E , appelée quantum, proportionnelle à la fréquence de l'onde : $E = hf$, où h est la constante de Planck : $h = 6,62 \times 10^{-34} J.s$

L'énergie E , exprimée en Joule (J) ou en électronvolt(eV), ($1J = 1.6. 10^{19} eV$) et h est la constante de Planck ($6.62 \cdot 10^{-34} j/s$) et f la fréquence en Hz

Cette énergie est liée à la longueur d'onde par les relations :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.98 \cdot 10^{-25}}{\lambda} J = \frac{1.24 \cdot 10^{-6}}{\lambda} eV$$

L'intensité d'un rayonnement électromagnétique dépend de deux facteurs : l'énergie des photons et leur nombre.

I.6.2.1. Dualité onde-corpuscule

Les modèles ondulatoire et corpusculaire sont théoriquement adaptés à n'importe quel type de rayonnement électromagnétique, mais leur utilisation dépend des phénomènes que l'on cherche à expliquer. Les phénomènes macroscopiques et les rayonnements de faible fréquence, ayant des photons d'énergie individuelle trop faible pour interagir avec la matière, sont en général plus facilement abordés en considérant le rayonnement comme une onde.

En revanche, les interactions des rayonnements électromagnétiques très énergétiques avec des atomes ou des molécules dont les niveaux d'énergie sont quantifiés relèvent d'une approche

corpusculaire. Les ondes associées à des photons très énergétiques ont des longueurs d'onde de l'ordre des dimensions atomiques et leurs indices de réfraction sont proches de 1 ; il en résulte que le modèle ondulatoire n'est le plus souvent pas utilisable et que seul l'aspect corpusculaire est à prendre en considération. [2]

I.7- SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE

Pour caractériser un champ électromagnétique, on utilise le modèle ondulatoire. On distingue plusieurs types de champs que l'on différenciera en fonction de leur fréquence ou de leur longueur d'onde. Ces deux derniers sont liés mathématiquement ($\lambda = c/f$). Ainsi on définit les différentes catégories d'ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde ou de leur fréquence **Fig. I.5** [9]

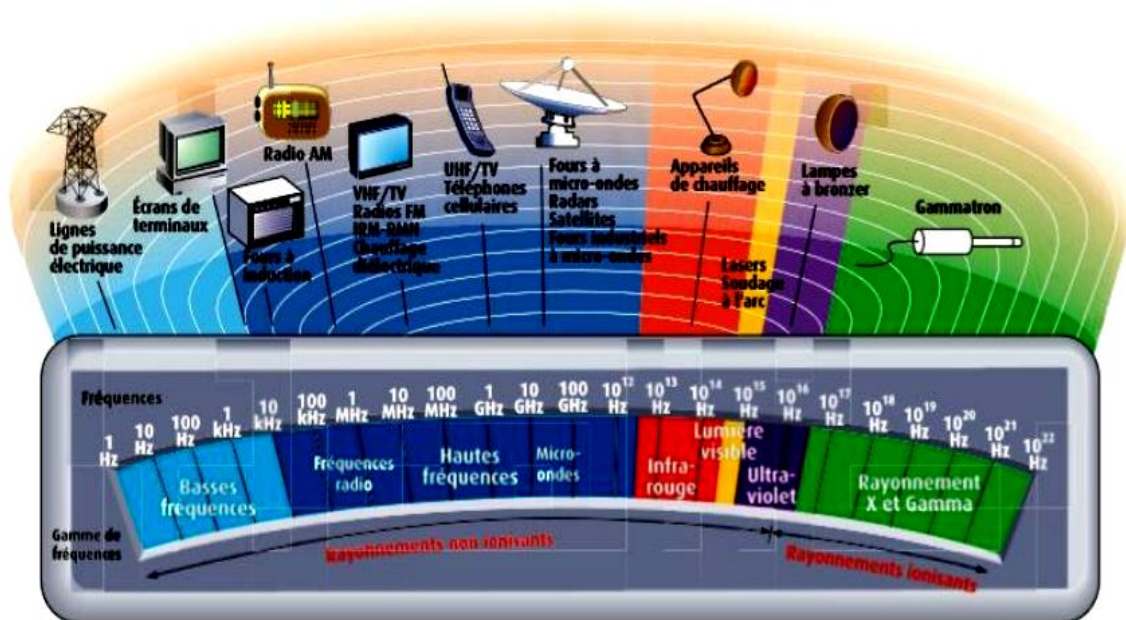


Fig. I.5- Spectre électromagnétique [9]

Cette classification est divisée en deux parties :

Les rayonnements ionisants et les rayonnements ionisants non-ionisants.

Elles correspondent au niveau d'énergie émis par l'onde entraînant plus ou moins de modifications au niveau des cellules.

Certaines ondes électromagnétiques transportent suffisamment d'énergie pour casser des liaisons atomiques. Par exemple, les Ultra-violet (*UV*) à forte dose sont connus pour provoquer des mélanomes, c'est une forme de cancer de la peau. On qualifie ces ondes d'«ionisantes» [9]

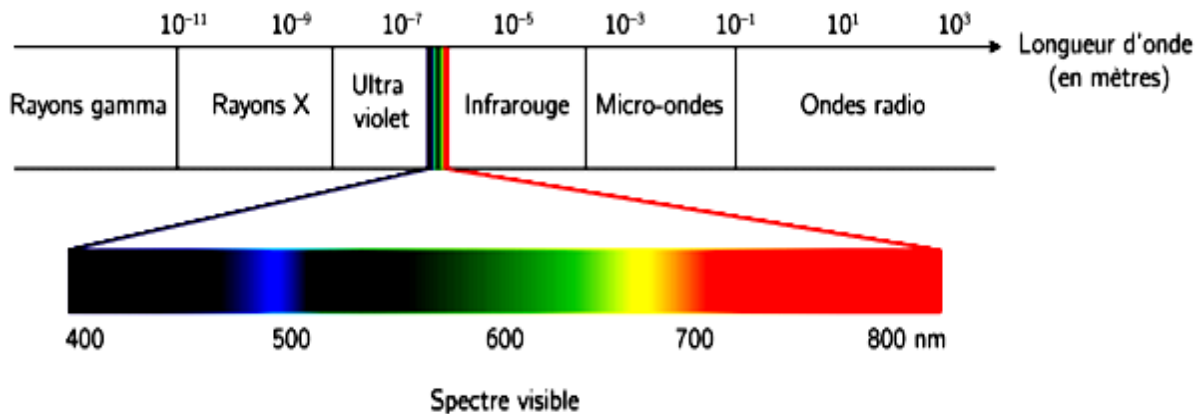


Fig. I.6- Schéma du spectre électromagnétique avec les longueurs d'ondes [8]

I.7.1- Catégories d'ondes ionisantes

- **Ondes UV** : compris entre $7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ et $3 \cdot 10^{17} \text{ Hz}$

Exemple : Le soleil est une source d'UV.

Utilisation : ces ondes peuvent être utilisées pour le traitement de certaines maladies, stérilisation d'instruments chirurgicaux.

- **Rayons X** : compris entre $3 \cdot 10^{17} \text{ Hz}$ et $3 \cdot 10^{19} \text{ Hz}$

Utilisation : Imagerie médicale (radiographie, scanné,IRM), radiothérapie

- **Rayons Gamma** : leur fréquence est comprise entre $3 \cdot 10^{19} \text{ Hz}$ et $3 \cdot 10^{22} \text{ Hz}$.

(> à $3 \cdot 10^{22} \text{ Hz}$, On parle d'onde Gamma cosmique) Les rayons Gamma sont émis lors de la désintégration d'un noyau atomique. Ce sont les rayons les plus dangereux pour le corps humain.

Cependant, les rayonnements ionisants tuent aussi les cellules saines. La radiothérapie a donc besoin de savoir où se localise exactement la tumeur et il est impératif de ne pas utiliser des doses trop fortes afin de ne pas endommager les cellules saines.

La radiothérapie est une arme thérapeutique efficace contre le cancer. Elle occupe une des toutes premières places au côté de la chirurgie, à laquelle elle est parfois associée, et de la chimiothérapie dans le traitement contre le cancer.

À l'inverse, les ondes non-ionisantes, comme les radiofréquences (dont celles des téléphones mobiles), n'ont pas assez d'énergie pour être mutagènes et donc cancérigènes. La frontière entre rayonnements ionisants et non-ionisants est la lumière visible. : [8]



a)



b)

Fig I-7 a) radiographie prise par le découvreur des rayons X, b) Photographie d'une cabine à UV [8]

I. 7.2- Catégories d'ondes non-ionisantes :

Basses fréquences : Inférieures à 30 kHz Elles présentent un faible risque pour le corps humain. et Leur Utilisation ce sont majoritairement les lignes à haute tension et les appareils électriques (rasoirs, sèche-cheveux)



Fig. I.8- Schéma d'une ligne de transport a Haute Tension.[8]

- **Radiofréquences** : comprises entre 30 *kHz* et 300 *GHz* environ.

On distingue plusieurs appareils et ondes usant de cette radiofréquence :

La téléphonie mobile (900 *MHz* – 2.4 *GHz*), la Radio *FM* (87.5 – 108 *MHz*),

La télévision (40 – 900 *MHz*), le Wi-Fi(2.4 *GHz*), les fours à microondes (2.4 *GHz*) ainsi que les radars(1 – 100 *GHz*). Dans cette catégorie, on trouve les « micro-ondes ».

La longueur d'onde des radiofréquences est comprise entre 10^5 et 10^{-3} *m*.

Infrarouges : comprises entre 300 *GHz* et 385 *THz* environ. La majeure partie des ondes sont appelées "ondes mégahertz" : [8]



a)



b)

Fig. I.9 a) Télécommande infrarouge b) Détecteur d'intrusion [6]

On distingue la télécommunication par fibre optique, les télécommandes domestiques, pour la télévision, les consoles... La longueur d'onde associée est comprise entre 10^{-2} et 10^{-6} *m*.

Domaine de la visibilité : comprises entre 385 et 750 *THz*, il s'agit des longueurs d'ondes comprises entre 700 *nm* (Infrarouges) et 400 *nm* (Ultraviolets). Ce sont les seules ondes électromagnétiques visibles par l'œil humain. On distingue donc différentes couleurs, selon la longueur de l'onde. [9]

Désignation	Fréquence	Longueur d'onde	Exemples
Fréquences extrêmement basses (ELF)	0-300 Hz	10^5 - 10^3 km	Réseau électrique 50 Hz, électroménager...
Fréquences audio (VF)	0,3-3 kHz	1 000-100 km	Transmission de données vocales, métallurgie, chauffage par induction...
Très basses fréquences (VLF)	3-30 kHz	100-10 km	Radiocommunications...
Basses fréquences (LF)	30-300 kHz	10-1 km	Radiodiffusion GO, Fours à induction...
Fréquences moyennes (MF)	0,3-3 MHz	1 km-100 m	Radiodiffusion MO, PO,
Hautes fréquences (HF)	3-30 MHz	100-10 m	CB (Citizen band), soudure, collage...
Très hautes fréquences (VHF)	30-300 MHz	10-1 m	Télévision, radio FM...
Fréquences ultrahautes (UHF)	0,3-3 GHz	1-0,1 m	Télévision, radars. téléphones mobiles, fours à micro-ondes, hyperthermie médicale...
Fréquences super hautes (SHF)	3-30 GHz	0,1-0,01 m	Radars, alarmes anti intrusion
Fréquences extrêmement hautes (EHF)	30-300 GHz	0,01-0,001 m	Radars, communications par satellite, scanner corporel...
Infrarouge (IR)	0,3-385 Th	1 mm-780 nm	Spectrométrie IR, chauffage...
Lumière visible	385-750 Th	780-400 nm	Vision humaine, photosynthèse...
Ultraviolet (UV)	750 Th – 3 PH	400-100 nm	Spectrométrie, lampes germicides, solarium...

Préfixes utilisés : k = kilo = 10^3 ; M = méga = 10^6 ; G = giga = 10^9 ; T = téra = 10^{12} ; P = péta = 10^{15} ; m = milli = 10^{-3} ; μ = micro = 10^{-6} ; n = nano = 10^{-9} ; GO : grandes ondes ; MO : ondes moyennes ; PO : petites ondes.

Tab I.2- Rayonnements électromagnétiques : caractéristiques et principales applications. [1]

I.7.3- Différence entre un rayonnement ionisant et un rayonnement non ionisant :

La longueur d'onde et la fréquence déterminent une autre caractéristique importante des champs électromagnétiques, à savoir que les ondes électromagnétiques sont transportées par des " particules" (ou "grains d'énergie") appelées quanta. Les quanta associés aux ondes de haute fréquence (ou de courte longueur d'onde) véhiculent davantage d'énergie que ceux qui sont associés aux ondes de basse fréquence (ou de grande longueur d'onde). Pour certains rayonnements électromagnétiques, le quantum d'énergie est tellement élevé que ces ondes sont capables de briser les liaisons intra- et intermoléculaires. Parmi les rayonnements qui composent le spectre électromagnétique, les rayons gamma émis par les substances radioactives, les rayons cosmiques et les rayons X possèdent cette propriété et sont appelés " rayonnements ionisants". Les rayonnements qui ne sont pas suffisamment énergétiques pour rompre les liaisons intramoléculaires sont dits "non ionisants". [5]

I.8- UTILISATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES DANS LE DOMAINE MEDICAL



Fig. I.10- réalisation une expérience de stimulation musculaire par un courant alternatif sur un patient [6]

Le monde médical utilise beaucoup les ondes électromagnétiques, que ce soit à des fins thérapeutiques ou pour de l'imagerie. Les premières utilisations connues de l'électromagnétisme dans ce domaine datent de l'antiquité où les médecins de l'époque des pharaons utilisaient des poissons électriques, comme le poisson torpille ou le poisson chat du Nil, comme anesthésiants grâce aux commotions provoquées par la décharge des organes électriques de ces poissons dans le corps humain. Les machines électrostatiques, dont l'avènement date du *XVIII^{ème}* siècle, furent utilisées aussi afin d'obtenir les mêmes effets d'électrisation sur le corps humain. C'est au *XIX^{ème}* siècle que le courant alternatif fit son apparition dans le domaine médical, notamment par Guillaume Duchenne qui est le pionnier de l'utilisation du courant alternatif dans le but de stimuler avec précision les muscles sans provoquer de brûlures. La Fig. I-10 présente une photographie de l'une de ses expériences.

C'est à partir de la fin du *XIX^{ème}*, avec la découverte des rayons ionisants, que l'imagerie médicale s'est développée, avec l'avènement de la radiographie, mais aussi plus tard, dans les années 1970 de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) qui utilise un phénomène appelé Résonance Magnétique Nucléaire afin d'obtenir une visualisation des tissus mous. Des appareils tels que les électrocardiographes permettent de visualiser l'activité électrique du cœur en récupérant les signaux électriques créés par les courants électriques qui circulent dans le cœur.

Depuis quelques années, de nouvelles thérapies anticancéreuses utilisent des impulsions électriques afin d'augmenter l'efficacité des médicaments utilisés dans les thérapies classiques, telles que les chimiothérapies. Ces nouvelles thérapies sont appelées électrochimiothérapies et elles sont de plus en plus fréquemment utilisées et sont en constante évolution. [6]

I.8.1- Cas de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)

L'imagerie par résonance magnétique ou IRM est une technique de diagnostic médical utilisant les propriétés magnétiques de l'atome d'hydrogène, plus précisément de son ion H^+ présent dans les molécules d'eau. En effet, le corps humain étant constitué pour 60 à 80% d'eau, l'atome d'hydrogène y est présent dans sa quasi-totalité. L'ion H^+ est composé d'un noyau constitué d'un proton tournant sur lui-même. Ce proton étant chargé électriquement positivement et étant en mouvement, il provoque l'apparition d'un champ magnétique. Le moment magnétique induit appelé μ dépend d'une part du spin (I) qui est un sens de rotation du proton et d'autre part de la constante gyromagnétique du proton γ selon : $\mu = \gamma \cdot I$

Le moment magnétique est représenté sous forme d'un vecteur, dans le même axe que celui du sens de rotation du proton (fig I.11).

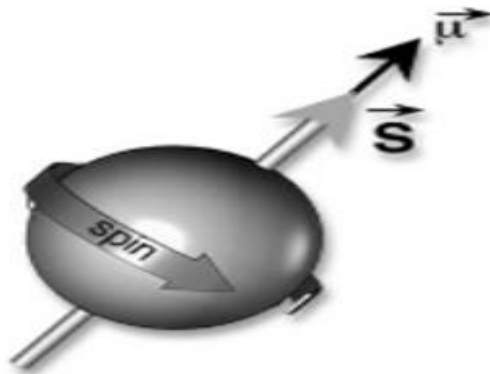


Fig. I.11- Représentation schématique de la rotation d'un proton [9]

Lors d'une séance d'IRM, le patient est placé dans une cuve exposée à un puissant champ magnétique statique. Celui-ci est généré par un aimant supraconducteur baignant dans de l'hélium liquide à $-269^{\circ}C$, ce qui signifie qu'il y aura dissipation de la chaleur et que seul sera utilisé le champ magnétique présentant une intensité allant de 0.1 à 7 Tesla, voire jusqu'à une douzaine de Tesla pour les IRM expérimentaux. Une fois ce champ créé, les moments magnétiques de tous les ions hydrogène vont s'orienter dans le même axe que celui du champ magnétique (fig. I.12).

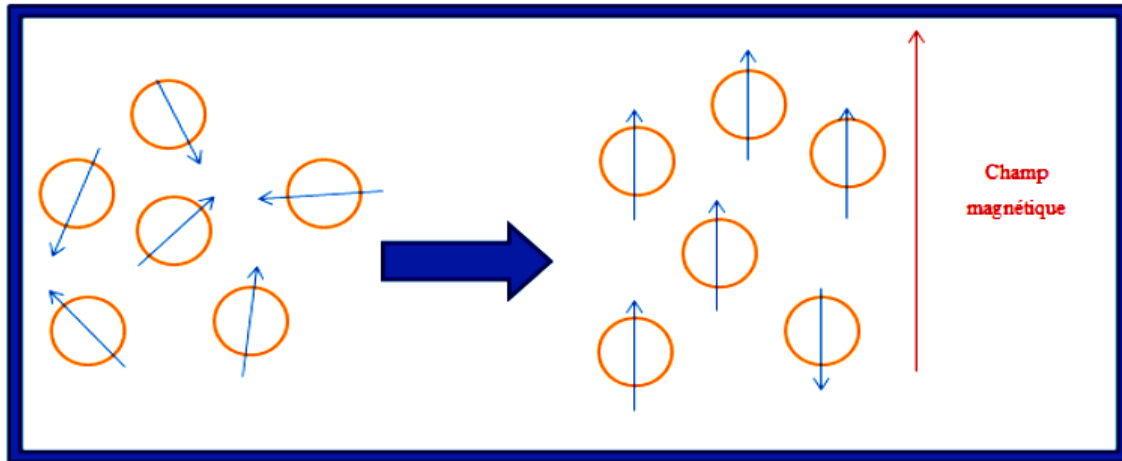


Fig. I.12-: Schéma explicatif de la modification de l'axe des spins pendant l'IRM [9]

On expose ensuite le corps du patient à des radiofréquences spécifiques sous forme d'impulsions permettant de sortir les moments magnétiques des protons de leur état d'équilibre. Ainsi ils ne sont plus dans l'axe du champ magnétique, c'est le phénomène de résonance. Le retour à l'équilibre des atomes d'hydrogène après chaque impulsion prendra plus ou moins de temps, et provoquera l'apparition de courants qui seront mesurés par des capteurs. C'est le phénomène de relaxation

En fonction des résultats obtenus, et sachant que les différents tissus biologiques n'ont pas la même densité en atomes d'hydrogène, on peut cartographier de manière très précise les différents tissus du corps humain (sauf les os et calcifications, ne contenant pas assez d'eau et donc pas assez d'atomes d'hydrogène). [9]

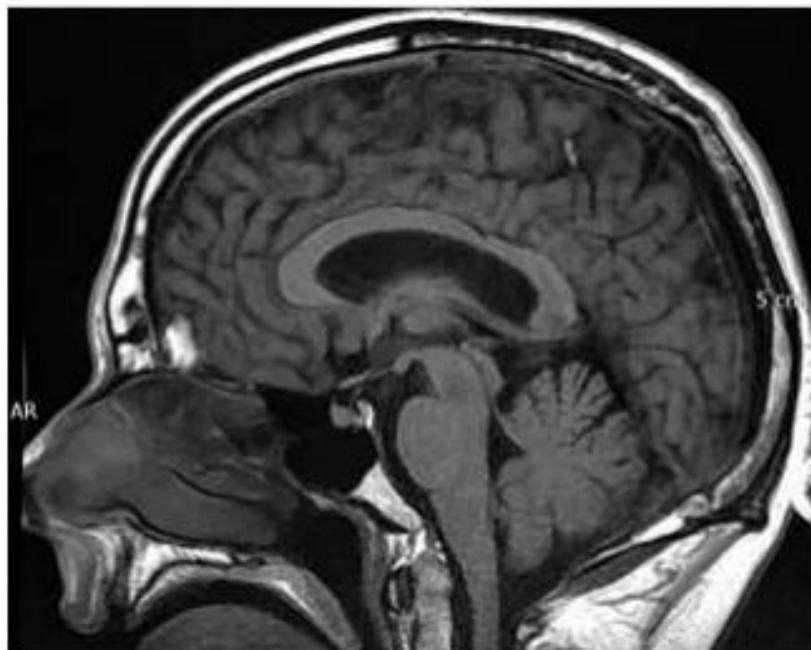


Fig. I.13-: Image obtenue après réalisation de l'IRM [9]

I.8.2- Effets biologiques

I.8.2.1. Études in vitro

Des études ont été réalisées sur les cellules animales et des bactéries, ou sur des systèmes élémentaires (membranes, enzymes isolées) pour examiner l'influence de l'exposition sur les grandes fonctions cellulaires, l'expression génique et l'intégrité du matériel génétique (ADN).

Pour une gamme de densité de flux allant jusqu'à 8 T, des résultats positifs ou négatifs ont été obtenus sans grande cohérence lorsque des effets sont observés, et pas forcément corrélés avec l'intensité du champ. Ils sont rarement reproduits et aucun effet n'a été clairement établi. Le résultat le plus consistant serait l'effet observé en 2002 sur le fuseau mitotique cité précédemment qui avait déjà été décrit en 1998 par une autre équipe.

Les résultats n'indiquent pas non plus d'effet mutagène qui aurait pu être la conséquence d'une perturbation des flux de radicaux libres. Peu d'études concernent les effets sur l'ADN (écotoxiques), elles ne montrent pas d'effet jusqu'à 9 T sauf une étude où le système de réparation est apparu déficient. Au-dessus de 1 T, un effet sur l'orientation des cellules est observé systématiquement, la signification d'un tel effet in vivo n'étant pas établie. [1]

I.8.2.2- Études in vivo chez l'animal

De nombreuses études ont été conduites chez l'animal. Chez le rat, des expériences ont mis en évidence une aversion à partir d'une densité de flux de l'ordre de 4 T qui proviendrait d'une interaction avec l'appareil vestibulaire. Il n'y a pas de preuve d'un effet sur le comportement ou la mémoire à 2 T, ni d'effet sur l'excitation électrique des tissus nerveux.

En revanche, l'induction de courants par effet Hall, due à la circulation sanguine dans le système vasculaire et autour du cœur, a été mise en évidence pour des expositions entre 0,1 et 2 T durant de quelques heures à plusieurs jours selon les études. Ceux-ci se traduisent par une modification de l'électrocardiogramme* (ECG). Des résultats similaires ont été obtenus pour différents modèles animaux et chez l'homme, sans que le flux, la pression sanguine ou le rythme cardiaque ne s'en trouve altéré.

Les expériences conduites sur des volontaires n'ont pas mis en évidence de conséquences sur la santé. Des porcs soumis plusieurs heures à une densité de flux de 8 T n'ont pas subi non plus d'altération des fonctions cardiaques. D'autres travaux ont mis en évidence des effets sur différents paramètres cardio-vasculaires chez des rongeurs (pression sanguine, micro circulation périphérique, etc.). Sans réplification indépendante de ces études, il n'est pas possible de conclure, car d'autres facteurs, comme l'anesthésie, pourraient également influencer sur ces paramètres.

En ce qui concerne les mécanismes de la magnéto-réception chez les animaux, deux types moléculaires sensibles au champ magnétique sont impliqués : la magnétite * et des réactions radicalaires faisant intervenir des crypto chromes. Des études ont montré qu'une

action combinée du champ magnétique terrestre et de la lumière, à des longueurs d'onde spécifiques (certaines couleurs), est décisive pour le choix de la direction à prendre. Chez l'homme, bien que des molécules de magnétite et de crypto chromes aient été détectées dans quelques tissus, aucune aptitude à la magnéto-réception n'a pu être mise en évidence. [1]

I.8.2.3- Effets biologiques chez l'humain (IRM)

Il s'agit essentiellement d'exposition à des appareils de RMN et d'IRM. Un suivi détaillé des paramètres physiologiques a été fait (température, respiration, oxygénation, fréquence cardiaque, etc.) en présence d'un champ magnétique jusqu'à 9,4 T.

Les effets des courants induits cités précédemment ne permettent plus d'interpréter l'ECG au-delà de 8 T mais la fréquence cardiaque n'est pas affectée, tandis que la pression systolique (le chiffre haut de la tension) augmente de 4 % au maximum. C'est le seul effet physiologique observé. Il s'explique logiquement par un phénomène de résistance aux effets magnétohydrodynamiques cités précédemment. Toutefois d'autres auteurs n'ont pas observé cet effet à 9,4 T dans des conditions d'acquisition d'images IRM (avec gradient de champ et RF).

De nombreux paramètres neurologiques ont été testés jusqu'à 8 T. Aucun effet n'a été observé notamment sur la mémoire à court terme, la parole, le temps de réaction audio-moteur. En revanche, au voisinage d'un aimant (0,5 ; 1,6 et 7 T) des effets négatifs sur la coordination yeux-main, la perception du contraste ou la poursuite visuelle ont été constatés par suite de la variation du champ dans le temps (par exemple de 0,3 T à 1,6 T/s) lors de mouvements de la tête.

Néanmoins, ils ne sont pas systématiques et révéleraient des différences de susceptibilité magnétique en accord avec les caractéristiques différentes de l'organe vestibulaire selon les individus. Il n'y a pas de répercussions sur les performances cognitives. [1]

I.9- EFFET DE L'EXPOSITION AUX CHAMPS ELECTROMAGNETIQUE

I.9.1- Influence de l'exposition à un champ électromagnétique :[5]

L'exposition aux champs électromagnétique n'a rien d'un phénomène nouveau. Cependant, au cours du vingtième siècle, l'exposition environnementale aux champs électromagnétiques générés par l'activité humaine a augmenté régulièrement, parallèlement à la demande d'énergie électrique et les progrès ininterrompus de la technique de même que l'évolution des mœurs ont conduit à la création de sources de plus en plus nombreuses. Chacun de nous est exposé à un ensemble complexe de champs électriques et magnétiques de faible intensité, tant à la maison que sur le lieu de travail, dont les sources vont de la production et du transport de l'électricité pour alimenter les appareils ménagers et les équipements industriels, aux télécommunications et aux émissions radiotélévisées.

Même en l'absence de tout champ électrique extérieur, notre corps est le siège de micro-courants dus aux réactions chimiques qui correspondent aux fonctions normales de

l'organisme. Par exemple, certains signaux sont relayés par les nerfs sous la forme d'impulsions électriques. La plupart des réactions biochimiques qu'impliquent la digestion et de l'activité cérébrale par exemple, comportent une redistribution de particules chargées. Le cœur lui-même est le siège d'une activité électrique que votre médecin peut suivre sur l'électrocardiogramme. [1]

I.9.2 Les effets des champs en fonction du domaine de fréquence

Un champ électrique ou magnétique peut faire apparaître une différence de potentiel ou des courants dans le corps, mais même juste au-dessous d'une ligne à haute tension, les courants induits sont très faibles par rapport à l'intensité nécessaire pour produire une électrocution ou d'autres effets biologiques. [10]

I.9.2.1- Champs électrique et magnétique basse fréquence

Les « basses fréquences » sont parfois appelées « extrêmement basse fréquence ». Le terme “extrêmement basse fréquence” ou ELF (en anglais « extrémal Löw fréquence ») est utilisé pour décrire les fréquences inférieures à 300 Hz. Le champ électromagnétique produit par la transmission et l'utilisation de l'électricité appartient à cette catégorie.

Il n'existe pas de source naturelle pour ce type de champ. Nous retrouvons ici les sources liées au transport de l'électricité et à l'utilisation du courant électrique (réseau 50 Hz).

Agissent sur l'organisme humain tout comme sur tout autre matériau constitué de particules chargées. En présence de matériaux conducteurs, les champs électriques agissent sur la distribution des charges électriques présentes à leur surface, ils provoquent la circulation de courants du corps jusqu'à la terre.

Les champs magnétiques de basse fréquence font également apparaître à l'intérieur du corps des courants électriques induits dont l'intensité dépend de l'intensité du champ magnétique extérieur. S'ils atteignent une intensité suffisante, ces courants peuvent stimuler les nerfs et les muscles ou affecter divers processus biologiques.

Un champ électrique ou magnétique peut faire apparaître une différence de potentiel ou des courants dans le corps, mais même juste au-dessous d'une ligne à haute tension, les courants induits sont très faibles par rapport à l'intensité nécessaire pour produire une électrocution ou d'autres effets biologiques. [10]

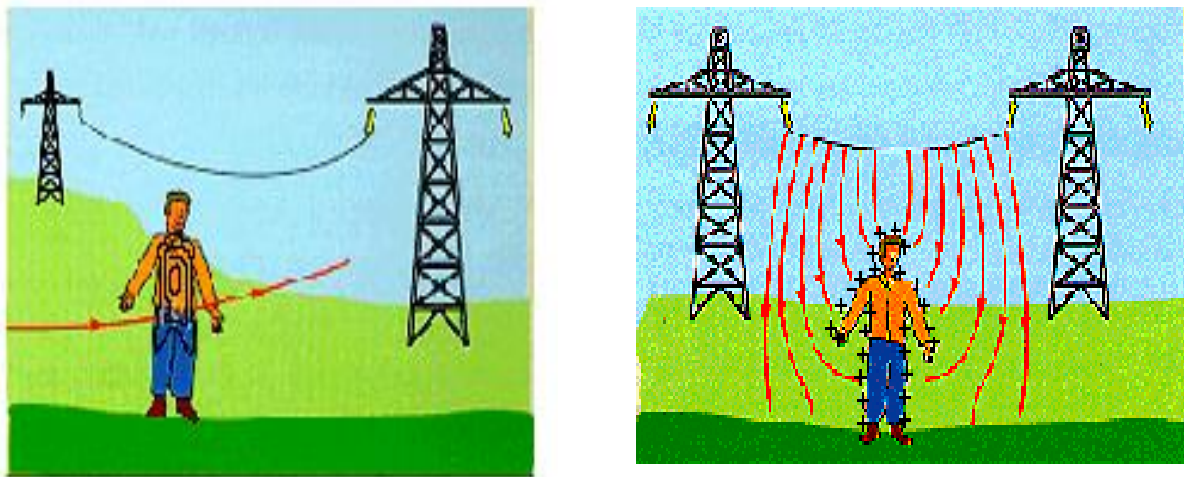


Figure I.14-: Influence champs électrique et magnétique basse fréquence [10]

I.9.2.1.1.- Etudes sur in vitro

Certaines études in vitro montrent un effet des champs bas fréquences à forte amplitude. Un accroissement de l'apoptose (mort cellulaire) a été constaté pour des champs magnétiques supérieures à $100 \mu\text{T}$ (valeur prise comme seuil ICNIRP à 50 Hz). De même, pour cette valeur de champ, il pourrait y avoir un effet sur la croissance cellulaire.

En revanche, la écotoxicité n'a pas été constatée, même pour des valeurs de champ électrique de 50 kV/m ou de champ magnétique de 1 mT (pas de cassure de l'ADN ni de perturbation sur le système de réparation). L'expression génique n'est également pas modifiée.

L'incertitude de l'existence ou non d'effets des champs extrêmement basses fréquences in vitro à des niveaux de champs faibles persiste.

Dans son ensemble, l'expertise internationale estime que les données in vitro sont très hétérogènes et manquent de validation. De plus, le degré de preuve est insuffisant pour suggérer un effet cancérogène, de type initiateur (phase d'accumulation des anomalies génétiques), pour des champs extrêmement basses fréquences d'intensité inférieure à 50 mT (500 fois supérieur à la valeur seuil fixée par l'ICNIRP). [10]

I.9.2.1.2.- Etudes sur les animaux

Les études sur des rongeurs soumis à des champs électriques de 150 kV/m ou magnétiques de 10 mT n'ont pas montré d'effet sur la reproduction et la tératogénèse (malformations congénitales).

Les résultats d'études sur les animaux ne retiennent pas non plus l'hypothèse d'une augmentation du risque des tumeurs dues aux champs extrêmement basses fréquences, mais ne l'exclut pas pour autant.

En effet, une promotion de ces tumeurs est retrouvée dans certaines lignées particulièrement sensibles de souches de rat. Il est important de noter que les expérimentations sont menées à des niveaux très supérieurs aux limites définies par l'ICNIRP pour ces fréquences. [10]

I.9.2.1.3- Les études épidémiologiques

Pour l'adulte, le faible nombre de cas exposé ne permet pas de conclure sur un éventuel risque de cancer ou de maladies cardio-vasculaires, de dépressions ou de maladie neurale dégénérative. L'OMS a classé les champs magnétiques extrêmement basse fréquence comme cancérogène possible (groupe 2B).

Les champs électriques extrêmement basse-fréquences sont, quant à eux considérés « inclassables quant à leur cancérogénicité pour l'Homme » (Groupe 3). Pour l'enfant, certaines études considèrent que le champ magnétique d'amplitude supérieure à 0,2 - 0,4 μT serait susceptible d'accroître les risques de leucémie. [10]

I.9.2.2- Influence des champs moyens fréquences

Les fréquences intermédiaires (IF) sont définies ici comme la bande de fréquence entre les fréquences extrêmement basse (ELF) et les radiofréquences.

On parle généralement de la gamme 300 Hz à 10 MHz, elles font intervenir les mécanismes liés aux fréquences basses (courants induits) et les mécanismes liés aux radiofréquences (absorption diélectrique).

Cette bande de fréquence couvre les équipements comme les plaques à induction, mécanismes anti-intrusion, chauffage par induction, mais également les moniteurs d'ordinateurs ou TV (avant le LCD ou plasma), la radio grandes ou moyennes ondes, et également des lampes basse consommation...

Des effets physiologiques sont susceptibles d'être produits par le champ électromagnétique de moyenne fréquence et de très grande amplitude :

- Stimulation nerveuse,
- Stimulation de la rétine,
- Echauffement.

Cependant, peu d'études expérimentales et épidémiologiques sont disponibles concernant les effets des champs électromagnétiques des fréquences intermédiaires sur la santé. Elles ne permettent pas de conclure quant à l'existence ou non d'effet dangereux lié à des niveaux d'exposition non thermiques. Quelques publications mentionnent des effets sur des systèmes cellulaires en division.

On retient également la difficulté de caractérisation de l'exposition dans ces bandes de fréquences.

Des études spécifiques ont eu lieu sur les terminaux cathodiques de télévision et d'ordinateur, sur les plaques à induction et les lampes fluo-compactes, sans pouvoir mettre en évidence un effet cancérigène, écotoxique ou sur la reproduction. Le nombre d'étude portant sur ce domaine de fréquence est bien plus faible que pour les hautes fréquences, malgré l'accroissement de l'exposition à ce type de rayonnement. Il est important de noter que nous n'avons pas trouvé d'études portant sur l'impact sanitaire des dispositifs à Courant Porteur en Ligne (CPL). Il persiste donc une zone d'incertitude qui empêche de proposer des conclusions définitives sur les champs à fréquences intermédiaires. [10]

I.9.2.3- - Influence des champs hauts fréquences

Aux fréquences comprises entre 10 MHz et 300 GHz, l'échauffement constitue l'effet principal de l'absorption d'énergie électromagnétique, et toute élévation de température supérieure à 1 ou 2 °C peut avoir des effets nocifs tels que le coup de chaleur ou l'insolation.[10]

I.9.3- Effets biologiques sur les études cellulaires

Au cours des dernières années, plusieurs centaines d'études ont été réalisées en laboratoire sur la cellule, chez l'animal et chez l'homme pour évaluer si les champs électromagnétiques avaient des effets biologiques décelables. Des effets ont été observés au niveau des tissus de même qu'au niveau des différents systèmes biologiques. [11]

I.9.3.1 Interaction avec les tissus

I.9.3.1.1- Champs et courants induits

Le corps humain est un conducteur. En présence de champs électrique et Magnétique, des champs et des courants électrique et magnétique sont induits à l'intérieur De celui-ci. Ces champs et ces courants sont cependant plus faibles que ceux que l'on Rencontre habituellement au niveau tissulaire. Ainsi un champ électrique externe de 1 kV/m induira un champ électrique de 0.1 à 100 mV/m et un courant de 0.016 mA, ce qui Est nettement inférieur aux niveaux physiologiques. Il en va de même pour les champs Magnétiques. De prime abord, sur la seule base électro physiologique, des effets biologiques Apparaissent donc peu plausibles. De faibles chocs électriques sont aussi observables à des Niveaux de champs extérieurs de quelques kV/m lorsqu'un individu vient en contact avec Un objet métallique. Les normes d'exposition sont d'ailleurs principalement basées sur le Niveau de courant induit dans de telles circonstances, lequel ne doit pas dépasser 5 mA pour Permettre de "lâcher prise". [11]

I.9.3.1.2. Quelques notions sur la cellule biologique

En biologie, la cellule est définie comme étant l'unité fondamentale du vivant. Cette entité est capable de remplir toute les fonctions de tous les organismes vivants, comme le métabolisme, le mouvement, la croissance, la reproduction, etc. Une cellule est donc une entité vivante dont le fonctionnement est autonome mais coordonné avec les autres cellules d'un même organisme. Il existe deux types de cellules biologiques : les cellules eucaryotes et les cellules procaryotes. Les cellules eucaryotes possèdent un noyau et l'emplacement du matériel génétique (le noyau des cellules) est délimité par une structure membranaire. Les cellules procaryotes ont leur propre matériel génétique libre et ne possèdent pas de noyau. La Figure I-10 montre des illustrations d'une cellule eucaryote et d'une cellule procaryote. Les cellules eucaryotes forment des organismes multicellulaires, tels que les être humains, les animaux, etc. Les cellules procaryotes correspondent aux bactéries. Dans cette partie, seules les cellules eucaryotes seront décrites. [6]

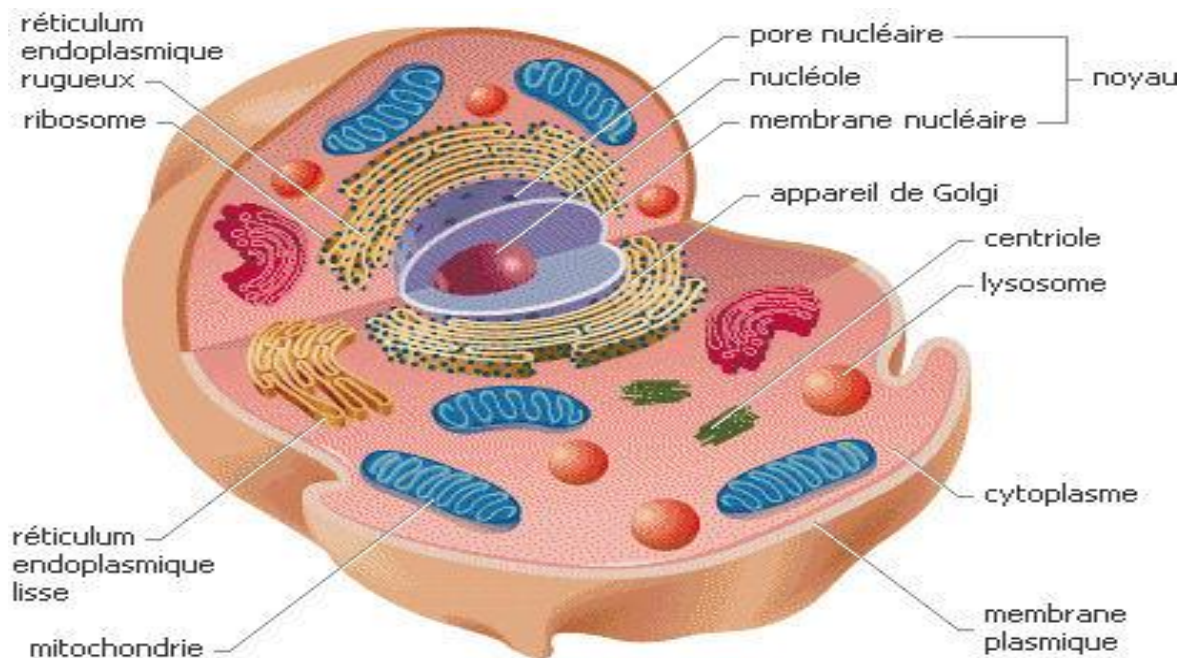


Fig. I.15. Structure simplifiée d'une cellule vivante [16]

I.9.3.2 Effets sur la cellule

Le courant électrique induit est confiné à l'espace extracellulaire. Cependant, des Études récentes ont démontré la présence de modifications biochimiques au niveau cellulaire. En présence de champs électromagnétiques. Ces modifications touchent les concentrations D'ions calcium à la surface de la membrane et d'enzymes intracellulaires comme la protéine Kinase. Ces modifications surviennent à des fenêtres de fréquence et d'intensité spécifiques.

De plus, d'autres travaux ont démontré que des champs électromagnétiques de basse fréquence (72 Hz) augmentaient la transcription de l'acide ribonucléique (ARN) et la Biosynthèse des protéines à l'intérieur de la cellule. [11]

I.9.3.2 .1 Effets des champs électriques pulses

L'exposition des cellules biologiques aux champs électriques pulses s'effectue Généralement pour les études *in vitro* en plaçant l'échantillon biologique entre deux conducteurs (électrodes) auxquels est appliquée l'impulsion. La **Fig. I.16** représente un milieu de culture dans lequel baigne une cellule biologique placée entre deux électrodes. Ces dernières sont en contact direct avec le milieu de culture et ce type de dispositif peut être aussi utilise pour une application *in vivo*, sur des tissus par exemple.

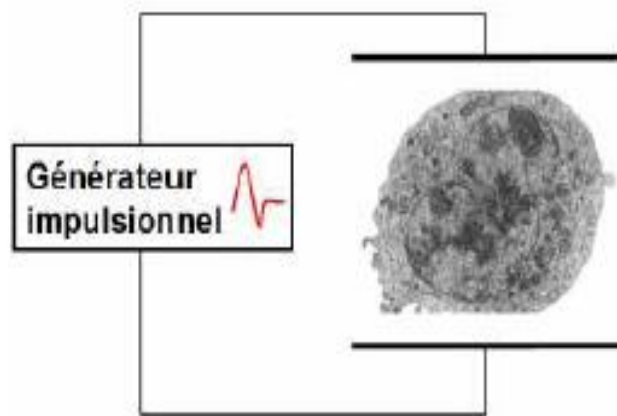


Fig. I.16.: Principe d'application de champs électriques pulses sur une cellule biologique place entre deux électrodes.[34]

L'objectif de la partie suivante est de présenter les mécanismes biologiques connus de nos jours grâce aux nombreuses études qui ont porte sur l'interaction de champs électriques pulses dits classiques (kV/m, ms- μ s) avec les cellules biologiques. Les éléments qui motivent l'intérêt porte pour les nsPEFs dans la manipulation intracellulaire en tant qu'application biomédicale seront également présents dans ce sous-chapitre. [34]

I .9.3.3 Effets sur les systèmes biologiques

I .9.3.3.1 Système neuroendocrinien

Deux impacts principaux ont été identifiés, la modification du rythme circadien et l'inhibition de la sécrétion de la mélatonine. Deux études chez le rongeur ont montré que le rythme circadien était modifié lors d'une exposition à un champ de 35 kV/m. Une étude récente menée chez le singe dans le cadre du New York State Power Liens Project a confirmé

la présence d'une modification à partir de 2.6 kV/m. Une étude moins récente réalisée chez l'homme par Weaver avait montré une modification du cycle à des niveaux très bas. Cependant, ces premiers résultats n'ont pas été confirmés.

Les études récentes ont aussi démontré que chez le rat, l'exposition à des champs électriques de 60 Hz, de 2 à 40 kV/m, provoquait une diminution de la sécrétion de la mélatonine par la glande pinéale. Les CEM, comme la lumière, supprime le pic nocturne

De sécrétion de mélatonine. Chez l'homme, les résultats préliminaires d'une étude menée par Wilson chez des utilisateurs de couvertures chauffantes tendent à confirmer ce phénomène. Cependant, il est trop tôt pour tirer des conclusions claires de ces travaux récents.

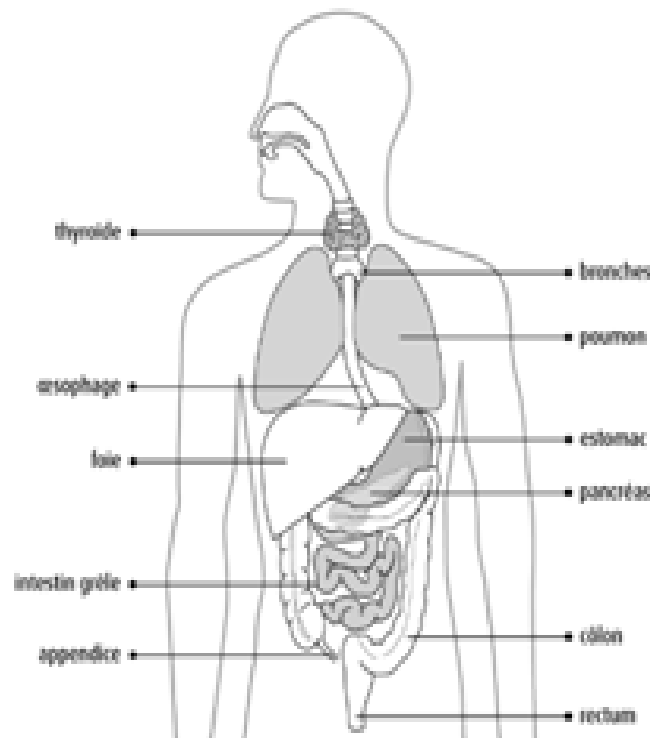


Fig. I.17. certain partie du système neuroendocrinien [13]

I. 9.3.3.2 Système nerveux

Le champ électrique est perçu à partir d'un seuil se situant entre 4 et 15 kV/m chez L'animal et chez l'homme. Le champ magnétique, quant à lui, n'est pas perçu. De multiples études sur le système nerveux ont été réalisées chez l'animal mais les résultats demeurent en général difficilement interprétables. Toutefois, signalons le phénomène bien documenté De la magnéto phosphènes chez l'homme. Ces derniers sont des scintillements lumineux apparaissant dans le champ visuel à une fréquence de 20 Hz et à partir de 10 G. Une étude rigoureuse a été réalisée récemment chez le singe dans le cadre du New York State Power Liens Project (NYSPLP). Cette étude a mis en évidence une diminution de certains métabolites de la dopamine et de la sérotonine dans le liquide céphalorachidien de même qu'une modification des potentiels évoqués auditifs et visuels à l'électroentéphalogramme .

L'électroencéphalogramme (EEG). Ces effets ont été observés à des niveaux d'exposition comparables à ceux rencontrés occasionnellement chez l'homme. Dans le cadre du NYSPLP, une étude réalisée en laboratoire chez des volontaires s'est avérée négative sauf pour les potentiels évoqués mentionnés précédemment.

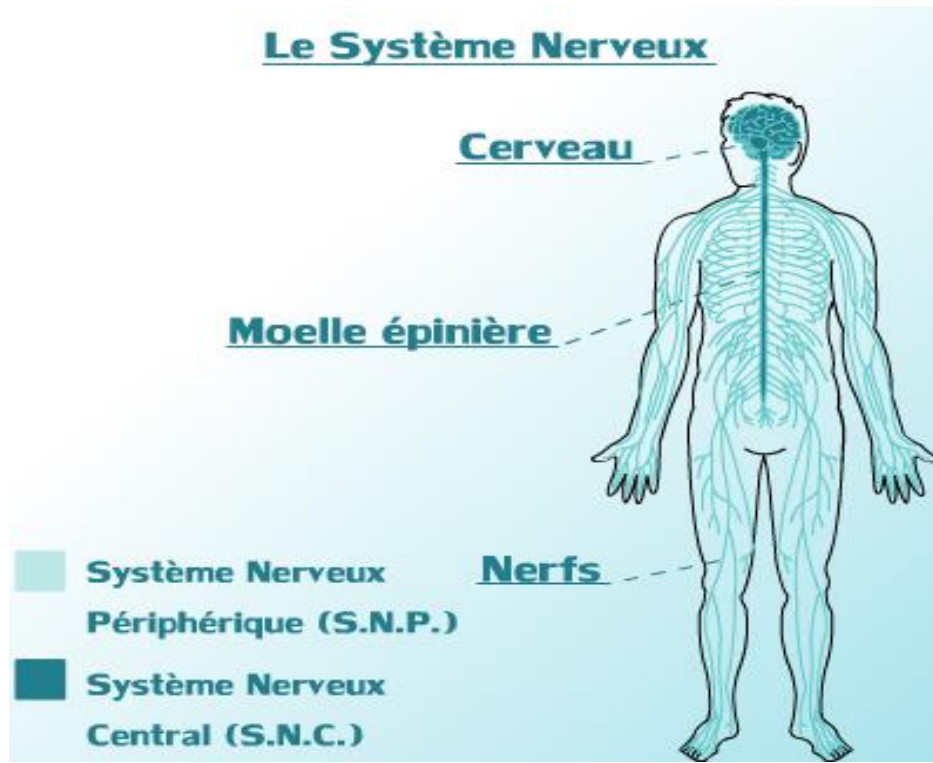


Fig. I.18.Schéma du système nerveux humain [14]

I.9.3.3.2 Système cardiovasculaire

Au niveau du système cardiovasculaire, le principal effet documenté chez l'homme, par Graham et al, est un ralentissement faible du pouls lors d'une exposition à des CEM de 60 Hz, à 9 kV/m et 0.2 G. Des études ont aussi montré un risque d'interférence des CEM de plus de 5 kV/m et 1.5 G sur le fonctionnement de certains types de stimulateurs cardiaques à demande. Cependant, il s'agit là d'un phénomène rare.

I.9.3.3.3 Système reproducteur

Pour ce qui est du champ magnétique, suite à une première étude de Delgado, une dizaine d'autres études ont montré un excès significatif de malformations chez l'embryon de poulet ou d'oiseau. Il s'agissait cependant de champ magnétique pulsé. Sept autres études se sont avérées négatives. Les études chez l'animal sont négatives.

En ce qui concerne le champ électrique, les études *in vitro* et les premières études *in vivo* se sont avérées négatives. Toutefois, des études plus récentes effectuées par Rommereim chez le rat et par Sikov chez le porc, ont donné des résultats contradictoires.

I.9.3.3.4 Système immunitaire

Dans des études "*in vitro*", des chercheurs ont mis en évidence une diminution de la cytotoxicité des lymphocytes T lors d'une exposition à des champs de 60 Hz, de 0.11 mV/cm. Chez l'animal et chez l'homme, les études sont négatives.

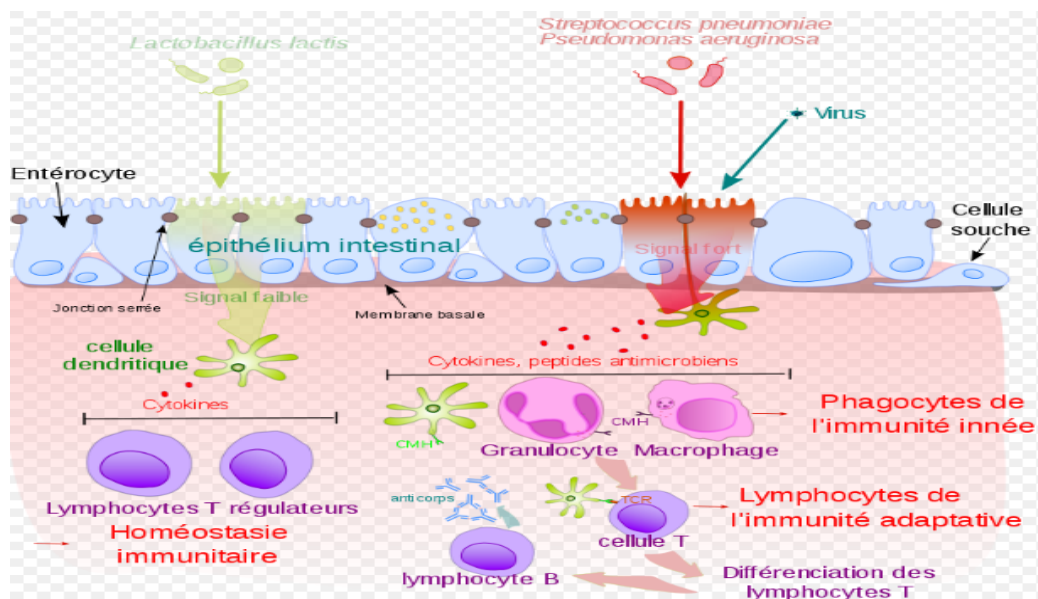


Fig. I.19 Schéma simplifié de l'homéostasie et de la réponse immunitaire au niveau de la barrière intestinale [15]

I.9.3.3.5 Plausibilité biologique

Les effets biologiques démontrés au niveau cellulaire, par exemple, sur le calcium, l'omithine décarboxylase, la synthèse de l'ADN la synthèse des protéines, donnent une certaine plausibilité biologique à des effets cliniques, tels que le cancer, en dépit du faible niveau des courants induits dans les tissus. Les CEM d'extrême basse fréquence, s'ils étaient cancérogènes, agiraient plutôt comme promoteurs. Cette plausibilité est renforcée par les découvertes récentes de l'action sur la sécrétion de la mélatonine. De plus, des théories fondamentales crédibles ont été avancées par des chercheurs pour expliquer de tels effets que ce soit celle du "cyclotron résonance" ou celle de la coopération biologique. L'ensemble des résultats des études expérimentales présente une cohérence certaine.

Toutefois, l'interprétation de ces résultats à la lumière des théories nouvelles soulève certaines questions importantes. Soulignons l'existence de "fenêtres" d'action au niveau de

La cellule. Si de telles fenêtres existent au niveau des fréquences et des intensités et si les champs électromagnétiques sont réellement cancérigènes, cela peut vouloir dire que le risque n'augmente pas nécessairement avec la dose d'exposition. D'autres recherches sont nécessaires pour approfondir nos connaissances. [11]

I.10- LIMITES D'EXPOSITION AUX CHAMPS ELECTROMAGNETIQUE :

I.10.1 Règlementation

Actuellement, il n'existe pas de réglementation spécifique française limitant l'exposition aux Champs électromagnétiques. Les limitations actuelles découlent de recommandations Internationales.

a) Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants : ICNIRP

L'ICNIRP est une organisation non gouvernementale officiellement reconnue par l'OMS. Elle a établi en 1998 des valeurs limites d'exposition humaine à tous les champs électromagnétiques

Ces valeurs limites ont été fondées sur les résultats d'études (la plupart sur le modèle animal) et basées sur les effets apparaissant au plus bas niveau d'exposition. Les seuils ont été définis avec des précautions d'extrapolation du modèle animal à l'homme. Les limites ont ainsi été définies en fonction du seuil établi chez l'animal, de la manière suivante :

- Exposition professionnelle : seuil chez l'animal /10
- Exposition de la population générale : seuil chez l'animal / 50.

Les limites ainsi définies sont exprimées de deux manières, les restrictions de base et les niveaux de référence.

- **Les restrictions de base**

Ce sont les valeurs limites en termes d'exposition recevable au niveau de l'organisme pour Éviter un effet biologique. Elles sont exprimées en densité de courant, DAS et densité de puissance selon la fréquence du champ électromagnétique (tableau 3).

- **Entre 1 Hz et 10 MHz.** Elles sont exprimées en densité de courant. L'effet à éviter Est la stimulation électrique du système nerveux central.

- **Entre 100 kHz et 10 GHz.** Elles sont exprimées en DAS afin d'éviter tout Échauffement excessif des tissus supérieur à 1°C.

Entre 100 kHz et 10 MHz, on cherche donc à éviter à la fois la stimulation électrique et l'échauffement des tissus.

- **Entre 10 et 300 GHz.** La restriction est exprimée en densité de puissance afin d'éviter Un échauffement excessif des tissus à la surface du corps ou à proximité.

Population	Domaine de Fréquences	Densité de courant (tête et tronc) (mA .m ⁻²)	DAS moyen Corps entier (W/kg)	DAS local (tête et tronc) (W/kg)	DAS local (membres) (W/kg)
Travailleurs	Jusqu'à 1 Hz	40	-	-	-
	1-4 Hz	40/f	-	-	-
	4 Hz-1kHz	10	-	-	-
	1-100 kHz	f/100	-	-	-
	100 kHz-10MHz	f/100	0,4	10	20
	10 MHz-10 GHz	-	0,4	10	20
Population générale	Jusqu'à 1 Hz	8	-	-	-
	1-4 Hz	8/f	-	-	-
	4 Hz-1kHz	2	-	-	-
	1-100 kHz	f/500	-	-	-
	100 kHz-10MHz	f/500	0,08	2	4
	10 MHz-10 GHz	-	0,08	2	4

Tab I.3. Restrictions de base pour les champs électriques et magnétiques alternatifs en fonction des fréquences. ICNIRP. 1998. [16]

Ainsi, pour les seuils de thermorégulation et d'échauffement excessif des tissus précédemment Définis (DAS "corps entier"=4 W/kg et DAS "local"=100 W/kg), on obtient les limites Suivantes chez les professionnels et pour la population générale respectivement : exposition Corps entier : 0,4 W/kg et 0,08W/kg ; exposition locale tête et tronc : 10W/kg et 2 W/kg.

- **Les niveaux de référence**

Ce sont les limites, exprimées en grandeurs physiques mesurables, qui doivent être Appliquées au niveau de l'émetteur pour respecter les restrictions de base au niveau de L'organisme. Ces niveaux de référence permettent d'évaluer l'exposition. Ils sont exprimés en Intensités des champs électrique (V/m) et magnétique (A/m) ou induction magnétique (It) en Un point donné, en fonction de la fréquence du champ électromagnétique utilisée par L'émetteur (tableau 4).

Ainsi, pour un champ de 50Hz, d'après les recommandations, les niveaux de référence Suivants doivent être respectés :

- **Exposition professionnelle continue (8h/j) :**
 - Champ électrique : 10 kV/m
 - Champ magnétique : 500 μT
- **Exposition du public :**
 - Champ électrique : 5V/m
 - Champ magnétique : 100 μT

Population	Domaine de fréquences	Intensité de champ (V/m)	Intensité de champ H (A/m)	Champ B (μ T)
Travailleurs	Jusqu'à 1 Hz	-	$1,63 \times 10^5$	2×10^6
	1 – 8 Hz	20 000	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$
	8 – 25 Hz	20 000	$2 \times 10^4 / f$	$2,5 \times 10^4 / f$
	0,025 – 0,82 kHz	500 / f	20 / f	25 / f
	0,82 – 65 kHz	610	24,4	30,7
	0,065 – 1 MHz	610	1,6 / f	2,0 / f
	1 – 10 MHz	610 / f	1,6 / f	2,0 / f
	10 – 400 MHz	61	0,16	0,2
	400 – 2000 MHz	$3 f^{1/2}$	$0,008 f^{1/2}$	$0,01 f^{1/2}$
	2 – 300 GHz	137	0,36	0,45
Population générale	Jusqu'à 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^6
	1 – 8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^5 / f^2$
	8 – 25 Hz	10 000	4000 / f	5000 / f
	0,025 – 0,8 kHz	250 / f	4 / f	5 / f
	0,8 – 3 kHz	250 / f	5	6,25
	3 – 150 kHz	87	5	6,25
	0,15 – 1 MHz	87	0,73 / f	0,92 / f
	1 – 10 MHz	$87 / f^{1/2}$	0,73 / f	0,92 / f
	10 – 400 MHz	28	0,073	0,092
	400 – 2000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$
2 – 300 GHz	61	0,16	0,20	

Tab I.4. Niveaux de référence pour l'exposition professionnelle et de la population générale à des champs électriques et magnétiques alternatifs. ICNIRP. 1998.[16]

b) Règlementation européenne

- **Exposition du public**

Elle est limitée par la Recommandation du Conseil de l'Union européenne 1999/519/CE

Du 12 juillet 1999 relative à l'exposition du public

Aux champs électromagnétiques. Elle reprend les valeurs limites de l'ICNIRP en termes de Restrictions de base et de niveaux de référence.

- **Exposition professionnelles**

Elle est limitée par la Directive européenne 2004/40/CE publiée en mai 2004

Elle reprend les valeurs limites de l'ICNIRP en définissant deux nouveaux termes :

- Valeurs limites d'exposition (VLE) qui correspondent aux restrictions de base

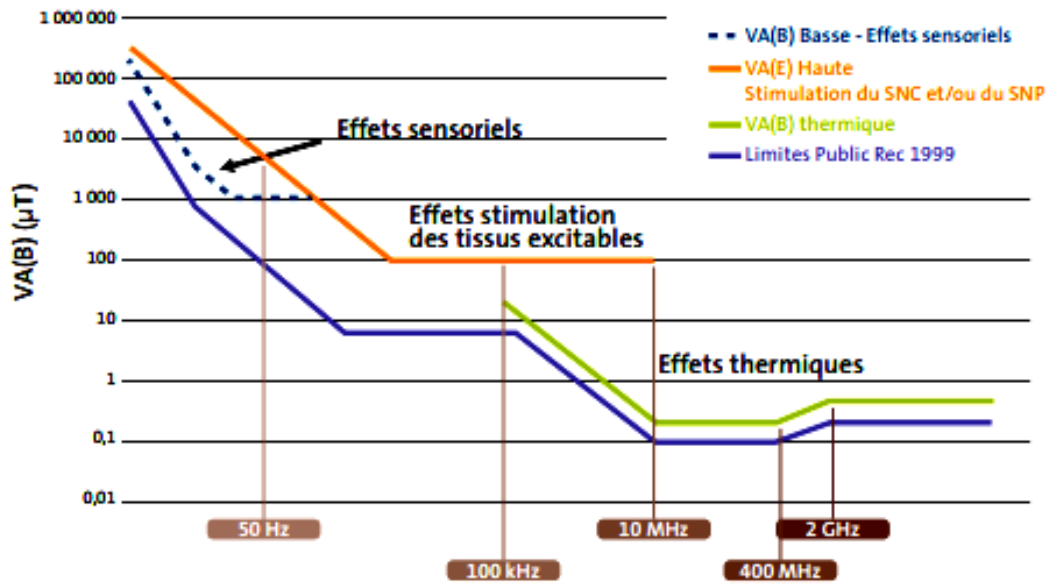
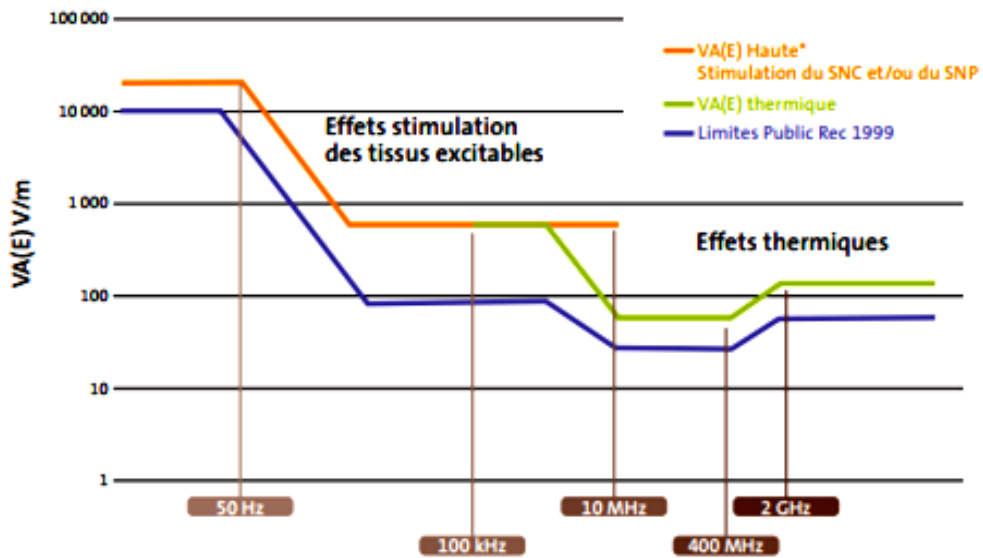


Fig. I.20-: Valeurs déclenchant l'action pour les champs magnétiques [16]

- Valeurs limites déclenchant l'action (VDA) qui correspondent aux niveaux de Référence.



* Pour le champ électrique, la VA(E) basse ne concerne que le risque d'étincelage dans les installations (non représentée sur la figure).

SNC : Système nerveux central – SNP : système nerveux périphérique

Fig. I.21-: Valeurs déclenchant l'action pour les champs électriques [16]

c) Règlements française

Elle suit la recommandation européenne 1999/519/CE (pour le public) et la directive Européenne 2004/40/CE (pour les professionnels).

Décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 relatif aux valeurs limites d'exposition du Public aux champs électromagnétiques (télécommunications ou installations Radioélectriques)

Il reprend les valeurs limites de l'ICNIRP et fixe ainsi les restrictions de base pour les Expositions du public aux radiofréquences :

- DAS corps entier : limite 0,08 W/kg
- - DAS tête et tronc : limite 2 W/kg.

Il définit ainsi les niveaux de référence, applicables aux systèmes de télécommunication :

- 41 V/m pour le GSM 900 (téléphonie mobile 2G)
- 58 V/m pour le GSM 1800 (téléphonie mobile 2G)
- 61 V/m pour l'UMTS (téléphonie mobile 3G)
- 28 V/m pour un émetteur de radiodiffusion
- 31 à 41 V/m pour un émetteur de télédiffusion

Arrêté du 8 octobre 2003

Cet arrêté, relatif à l'information des consommateurs sur les terminaux radioélectriques, Rend obligatoire l'affichage du DAS tête et tronc pour les téléphones portables [16]

CONCLUSION

Les ondes électromagnétiques passent inaperçues. Cependant, ils se trouvent tout autour de nous, mais lorsqu'ils sont utilisés pour le diagnostic médical, l'induction magnétique peut être suffisamment forte pour être dangereuse et potentiellement jouer un rôle dans l'émergence de maladies telles que le cancer et les. Par conséquent, l'exposition devrait être limitée.

Dans le cas de l'IRM, si le diagnostic est fait dans les conditions recommandées et que les signaux sont bien respectés, tout risque sanitaire est évité. A long terme ,

Il est indéniable que l'exposition aux champs électromagnétiques en laboratoire entraîne des effets biologiques découvrables. Les principales influences sont:

Ajuster la fonction de la membrane cellulaire, inhiber la sécrétion de mélatonine, ajuster le rythme quotidien, augmenter l'occurrence de malformations et modifier certains facteurs neurochimiques et neurophysiologiques. Bien que la plupart de ces effets soient observés dans la cellule ou chez l'animal, certains d'entre eux ont également été documentés chez l'homme,

notamment en relation avec les effets de la neuroendocrine. Ces résultats chez l'homme, encore fragmentés, justifient davantage les résultats d'études en laboratoire.

L'hypothèse principale soulevée par les résultats des études expérimentales est l'effet cancérigène du type promoteur des CEM. Des hypothèses secondaires ont été avancées, à savoir les effets sur la santé mentale et la reproduction. Actuellement, on peut dire qu'il existe deux types d'effets à partir des résultats d'études expérimentales. Comprend le premier type Effets directs sur la cellule: effet du promoteur, diminution de l'immunité cellulaire, anomalies génitales. Dans le second, on retrouve des effets indirects à travers le système neuroendocrinien, notamment par la mélatonine et certains neurotransmetteurs.

CHAPITRE II

Etat de l'art sur la compatibilité électromagnétique (CEM)

CHAPITRE II

la compatibilité électromagnétique (CEM)**INTRODUCTION :**

L'objectif de ce travail est d'étudier Les Caractérisations de la cellule biologique d'un point de vue électromagnétique ; Dans le premier partie de ce chapitre, Nous commençons par une définition de la compatibilité électromagnétique, ainsi que les diverses sources de perturbation et la classification de ces sources, puis une brève description sur les modes de couplage d'une onde électromagnétique.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons présenter une brève description de la cellule biologique et des propriétés physiques. Nous présenterons ensuite différentes approches (analytique, électrique) permettant de modéliser le comportement de la cellule.

II. 1. Définition de la compatibilité électromagnétique (CEM)

La compatibilité électromagnétique (CEM) est l'aptitude d'un appareil ou d'un système électrique ou électronique à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement.

Une bonne compatibilité électromagnétique, décrit un état de « bon voisinage électromagnétique » :

- ne pas « trop » déranger les voisins.
- supporter un niveau « raisonnable » de bruit de leur part, ou plus généralement de l'environnement.

Les bruits électromagnétiques et radioélectriques sont le résultat de tous les courants électriques induisant une multitude de champs et signaux parasites.

- Il doit avoir un niveau d'immunité ou "susceptibilité" suffisamment élevé.
- Il ne doit pas émettre trop de perturbations. [17]

L'objet de la compatibilité électromagnétique (CEM) est de garantir le bon fonctionnement des différents éléments électriques d'un système [18].

La compatibilité électromagnétique doit s'occuper de trois points ci-après[19] :

- Les émissions ou perturbations électromagnétiques : indiquent le pouvoir perturbateur d'un équipement électrique qui peut perturber le fonctionnement d'autres équipements et aussi la santé des êtres vivants.
- La susceptibilité électromagnétique : indique la capacité de ce même dispositif à supporter les perturbations venues de l'extérieur
- □ Le couplage : c'est le phénomène de propagation des perturbations qui se produit entre la source et la victime.

Une étude CEM peut être schématisée par la **Fig. II.2**, de la manière suivante :

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

Parmi ces trois études précédentes, notre étude s'intéresse par les sources des perturbations.



Fig. II.2. Schéma de la problématique de la CEM

II. 2 Amélioration de la CEM

L'amélioration de la CEM est obtenue par différents types d'actions :

a. Diminution des sources externes :

Par exemple, nous pouvons réduire les perturbations dues aux décharges électrostatiques en augmentant l'humidité des locaux, en utilisant un sol antistatique etc.

b. Augmentation de la susceptibilité :

Un système électronique peut être « durci » en choisissant les composants les moins sensibles aux perturbations

c. Réduction des couplages :

Pour une source externe déterminée, le niveau de perturbations reçu par un appareillage dépend des couplages, c'est à dire du chemin de propagation entre la source et la victime. [20]

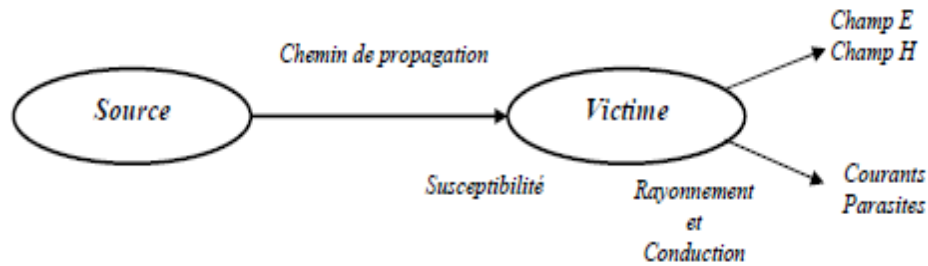


Fig. II.2. - Concept de Compatibilité Electromagnétique.

II.3_Perturbation électromagnétique

Par «perturbation électromagnétique» il faut entendre: tout phénomène électromagnétique, notamment un bruit électromagnétique, un modification du milieu de propagation lui fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil où d'un système.

Tout problème de compatibilité implique

- Une source de perturbations
- Un canal de couplage
- Un récepteur (perturbé)

normale. Si les perturbations reçues par ce dernier sont trop élevées et provoquent des interférences, alors on parle de *victime* de ces perturbations. [17]



Fig. II.3 - Transmission des perturbations.

II.3.1 Sources de perturbation électromagnétique

II.3.1.1 Classification des sources de perturbations

On peut classer les sources de perturbations électromagnétiques selon différents critères ; [21] le schéma II.4 ci-dessous récapitule ces différents critères.

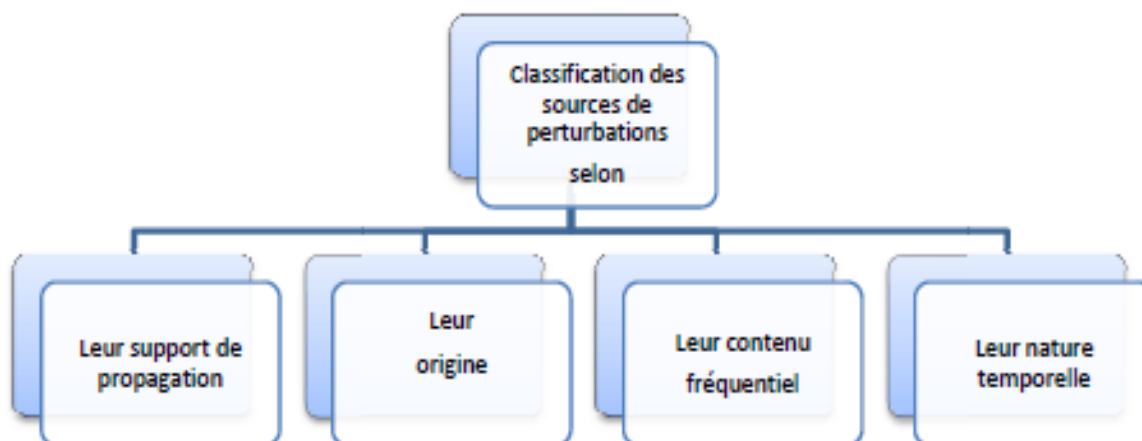


Fig. II.4 – Classification des sources de perturbations.

Leur origine

- Les sources de perturbation d'origine naturelle ;
- Les sources de perturbation qui proviennent de l'activité humaine

Leur support de propagation

- Les signaux conduits qui sont caractérisés par leur courant et différence de potentiel ;
- Les signaux rayonnés qui sont caractérisés par leurs champs électriques et magnétiques.

Leur nature temporelle

- Les sources permanentes ou entretenues ;
- Les sources transitoires

Leur contenu fréquentiel

- Les perturbations Basses Fréquences BF ;
- Les perturbations Moyennes Fréquences MF ;
- Les perturbations Hautes Fréquences HF.

II.3.1.2 Sources de perturbation électromagnétique permanentes et transitoiresSources permanentes (fréquence fixe)

- Emetteurs radio ;
- Radars ;
- Bruits des moteurs électriques ;
- Communications fixes et mobiles ;
- Ordinateurs, écrans, imprimantes ;
- Redresseurs ;

Sources transitoires (large de bande de fréquence)

- La foudre ;
- Défauts dans les lignes d'énergie ;
- Interruption de courant (disjoncteurs) ;
- Décharge électrostatique ; [17]

II.3.2 - Les vecteurs de propagation

La transmission d'une perturbation entre la source et une « victime » fait intervenir un ou plusieurs phénomènes physiques que l'on appelle des « couplages ». Selon les phénomènes en question, sur lesquels nous reviendrons, on parle de couplage par impédance commune, de couplage capacitif, de couplage inductif, de couplage électromagnétique. Ceci dit, la CEM fait une première classification entre les vecteurs en distinguant :

- Les perturbations conduites : celles qui se propagent par les câbles de liaison, et en particulier les câbles d'alimentation ;
- Les perturbations rayonnées : celles qui n'empruntent pas de voie matérielle, mais agissent par l'intermédiaire de champs magnétique, électrique, électromagnétique ;
- Les décharges électrostatiques consécutives à la mise en contact d'un conducteur chargé électriquement ou à un « amorçage » par ionisation de l'air ;

L'impulsion électronucléaire (IEMN). Elle évoque le rayonnement électromagnétique ravageur qui serait provoqué par l'explosion en altitude d'une charge nucléaire, et qui pourrait mettre hors d'usage une partie importante des matériels électriques exposés [22]

II.4 Le couplage électromagnétique

Un couplage est le phénomène de propagation des perturbations qui se produit entre la source et la victime. Les modes de couplage peuvent être classifiés selon le type de perturbation et selon le support de propagation, par conduction (caractérisé par les courants et différences de potentiel), ou par rayonnement (caractérisé par les champs électriques, et magnétiques) [21,18 et 23].

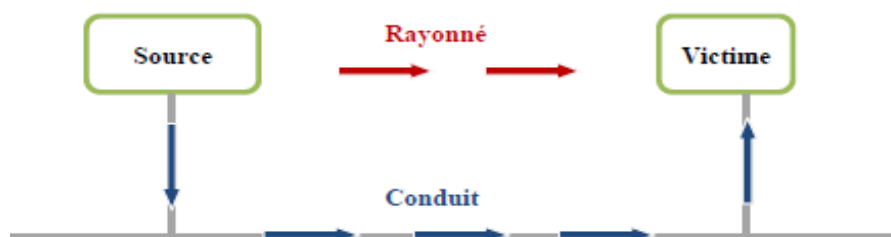


Fig. II.5 Les modes de couplage entre la source de perturbation et la victime

II.4.1 Mode de couplage

Les modes de couplage entre une source de perturbation et une victime peuvent être classifiés selon le type de perturbation et son support de propagation. La *Fig. II.6*, récapitule les différents mécanismes de couplages fortement liés au niveau fréquentiel. [24]

II.4.1.1 Le couplage par conduction

Le couplage par conduction se produit lorsque la source de perturbation et la victime sont reliées entre elles par un conducteur. Il se fait en deux modes :

➤ *le mode commun* : En mode commun, les signaux se propagent dans le même sens sur tous les conducteurs. Les courants de mode commun reviennent par la masse. Ce mode représente 10 % des cas. Il est aussi appelé mode "parallèle", "longitudinal", ou mode "asymétrique".

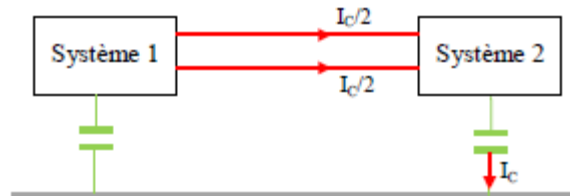


Fig. II.6 Le mode commun entre deux systèmes

➤ *Le mode différentiel* : le mode différentiel est le mode idéal de la transmission des signaux qui représente 90 % des cas. Dans ce mode, tout le courant qui entre dans le récepteur revient vers la source par un fil de retour. Il est appelé aussi mode "série", "normal", ou mode "symétrique".

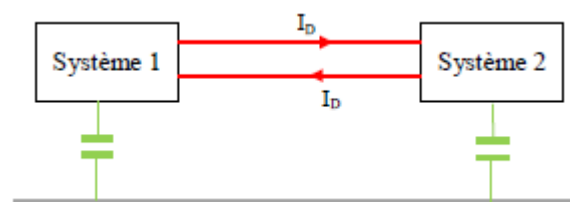


Fig. II.7 Le mode différentiel entre deux systèmes

II.4.1.2 Le couplage par rayonnement (par champ)

Nous disons un couplage par rayonnement (champ), si le support de propagation d'une perturbation transmise de la source vers le récepteur est l'espace.

Nous savons que le champ électromagnétique rayonné par une source de radiation varie de la distance qui sépare la source de radiation et le lieu où le champ est observé, pour cela nous distinguons deux types de couplage par champ :

II.4.1.3. Le couplage par champ proche

Près de la source, le champ électromagnétique dépend des caractéristiques de la source :

➤ *Le couplage par champ électrique (capacitif) :*

La différence de potentiel entre un conducteur et son environnement généré autour de ce dernier un champ électrique, la variation de ce champ injecte un courant sur tous les conducteurs proche. La cause des couplages capacitifs est les capacités parasites formées par la présence de deux conducteurs.

➤ *Le couplage par champ magnétique (inductif) :*

Un courant circulant dans un fils génère un champ magnétique. La variation de ce champ induit une force électromotrice dans les boucles voisines.

II. 4.1.4. Le couplage par champ lointain

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

La Fig. II.8 nous résume tous les types du couplage.

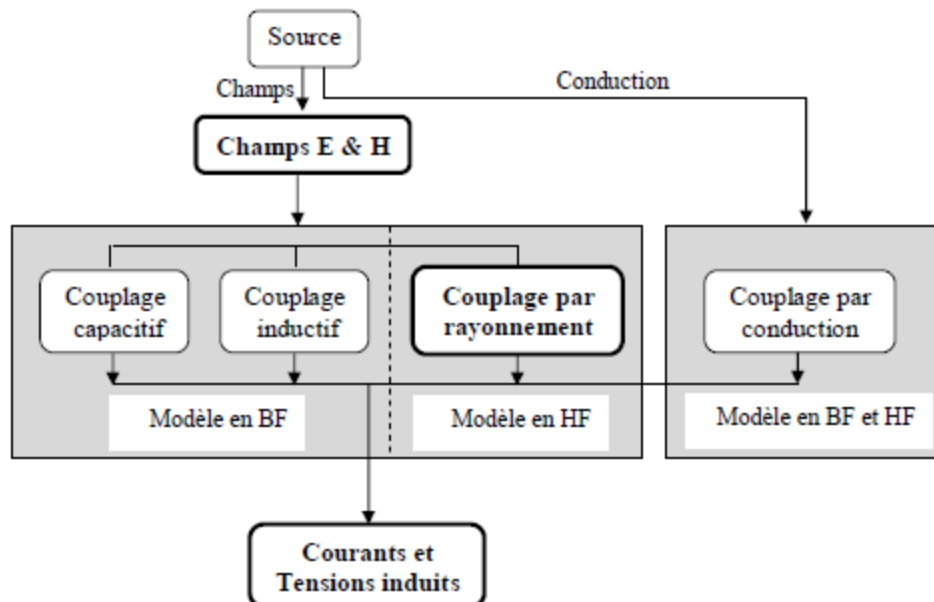


Fig. II.8 Les modes de couplage

II.5. Les Caractérisations de la cellule biologique d'un point de vue électromagnétique

II.5.1. Propriétés biologiques

Tous les êtres vivants sont constitués de cellules, unités élémentaires vivantes. La classification des cellules est basée sur l'existence ou non d'un noyau au sein de celles-ci :

- les procaryotes dépourvus de noyau (les bactéries, par exemple),
- les eucaryotes qui possèdent un noyau (la plupart des cellules humaines, par exemple).

Parmi les êtres vivants constitués de cellules eucaryotes, deux grandes catégories se dégagent : ceux formés d'une seule cellule dits unicellulaires et ceux formés de plusieurs cellules regroupées en tissus pour former les différents organes d'un organisme dits pluricellulaires. La taille typique des cellules eucaryotes est de l'ordre d'une dizaine de micromètres. La Fig. II.9 montre l'échelle des tailles des systèmes biologiques et des dimensions de dispositifs technologiques du nanomètre au centimètre.

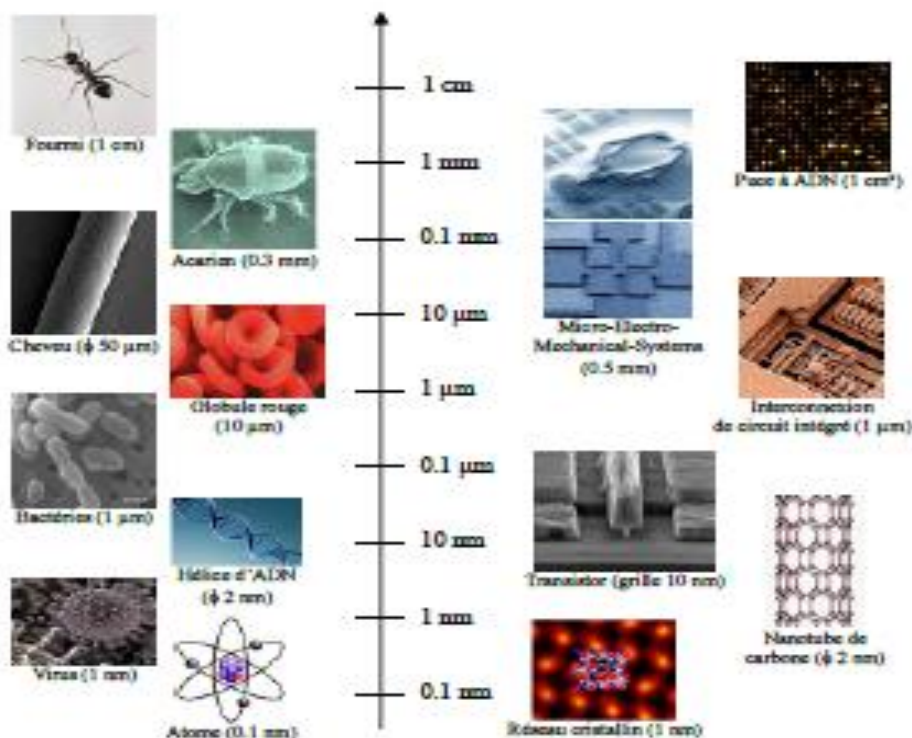


Fig. II.9: Dimensions caractéristiques des structures biologiques et technologiques

De formes variées, les cellules présentent des constitutions plus ou moins complexes avec cependant une structure universelle. En effet, elles sont toutes délimitées par une membrane qui renferme des molécules qui baignent dans un milieu gélatineux appelé le cytoplasme.

II.5.1.1. La membrane

La membrane, formée d'une bicouche lipidique (Fig. II.10) renfermant des protéines, est une enveloppe qui délimite, entoure et protège la cellule. Grâce à cette structure moléculaire inhomogène, la membrane joue un double rôle dans la vie de la cellule : à la fois en tant qu'isolant et en tant que filtre :

- les molécules lipidiques, arrangées en une bicouche épaisse de 5 à 10 nm, forment une barrière imperméable au passage de la plupart des molécules solubles dans l'eau ; elles bloquent totalement le passage des ions inorganiques (K^+ , Na^+ , Cl^- , Cl_2^+ , ...) et freinent la diffusion des solutés organiques polaires tels les acides aminés,
- les protéines ont pour rôle de réguler les échanges transmembranaires ; en elle-même, la membrane n'est perméable qu'aux petites molécules hydrophobes (O_2 , N_2 , glycérol, ...).

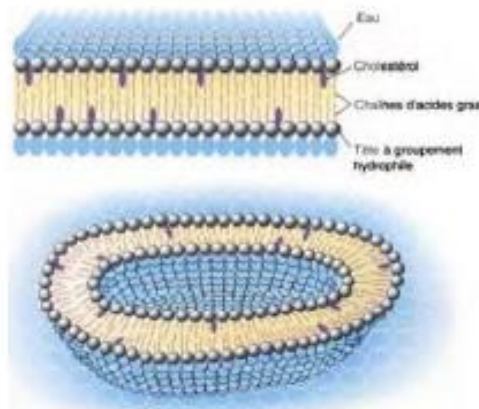


Fig. II.10: Structure d'une membrane : toute bicouche peut se refermer sur elle-même pour former une cellule

La structure en bicouche est due aux propriétés amphiphiles des molécules lipidiques qui possèdent une tête hydrophile et 2 queues hydrophobes.

II.5.1.2. Le cytoplasme

Le cytoplasme est un milieu fluide où l'eau représente 70% de la masse cellulaire.

Les cellules eucaryotes ont compartimenté dans le cytoplasme (Fig. II.11) les éléments assurant la gestion des processus nécessaires à leur fonctionnement : se reproduire, se nourrir, se déplacer et se défendre.

Ces compartiments (appelés organites) ont chacun une fonction biologique propre pour la production, la dégradation, la régulation ou le maintien cellulaire.

Toutes les cellules ont les mêmes organites, mais en fonction de leur rôle dans l'organisme, ceux-ci sont plus ou moins développés. Le cytoplasme peut se déformer grâce à la présence d'un cytosquelette qui se déconstruit et se reconstruit sans cesse.

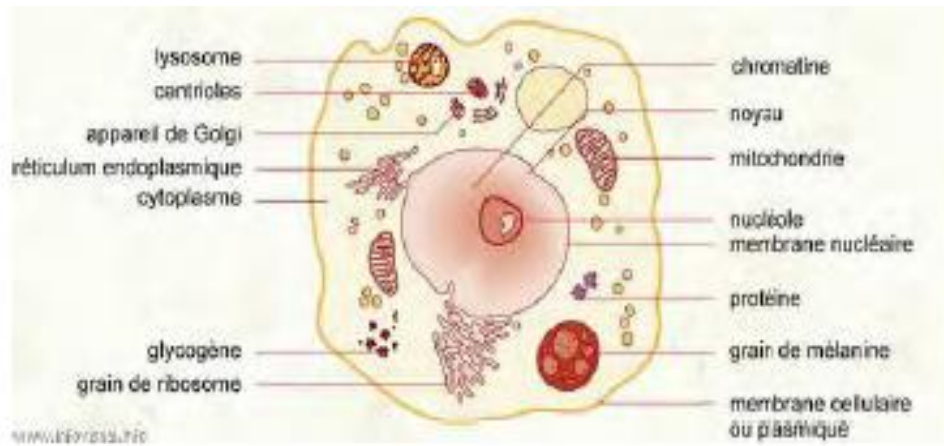


Fig. II.11: Structure d'une cellule eucaryote

Les principales réactions du métabolisme et la synthèse des protéines intracellulaires se déroulent dans le cytoplasme qui assure aussi la duplication de l'ADN et la synthèse d'ARN (fonctions du noyau) et entre autres la synthèse des protéines extracellulaires (fonction du réticulum endoplasmique) ainsi que la respiration (fonction des mitochondries). À l'inverse du noyau chez les cellules eucaryotes, la cellule procaryote (Fig. II.12) possède un filament d'ADN qui contient l'information génétique et qui n'est pas protégé par une membrane nucléaire. [25]

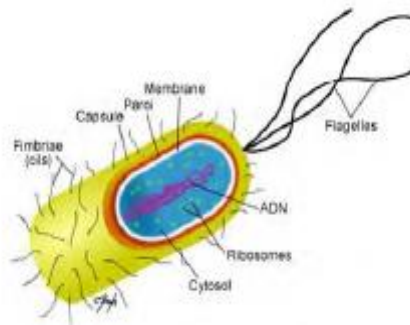


Fig. II.12 : Structure d'une cellule procaryote

II.5.2. Propriétés physiques

Il est possible de caractériser une cellule à partir de ses propriétés acoustiques, mécaniques, magnétiques, optiques et électriques. L'enjeu à long terme de la caractérisation est la mise à disposition de la communauté scientifique de bases de données exhaustives et robustes en vue d'applications ou d'études en biophysique.

Aussi, de nombreuses techniques actuelles (mécaniques, électriques, optiques ou encore acoustiques) sont employées dans les bio-microsystèmes à des fins de caractérisation (mesure des propriétés physiques intrinsèques d'une cellule)[26] ou de manipulation (tri, transport, micro positionnement).

II.5.2.1. Propriétés mécaniques

Afin d'analyser la réponse de cellules soumises à des sollicitations mécaniques comme l'accélération ou la gravité, les chercheurs tendent à caractériser les modules d'élasticité des différents types cellulaires. Le module élastique ou module d'Young, noté E , caractérise la résistance intrinsèque d'un matériau à une contrainte mécanique qu'il faut exercer pour en doubler la longueur; à titre d'exemple, le module d'Young de la membrane d'un globule rouge est de 1 kPa. Il a aussi été montré que des cellules se déformaient en présence de substances chimiques, c'est le cas des fibroblastes V-79 qui ont la particularité de prendre la forme de la lettre en réaction à la molécule de cytochalasine B [27].

Les cellules vivantes sont dotées de propriétés mécaniques leur permettant d'accomplir certaines fonctions cellulaires (*Fig. II.13*) comme l'adhésion ou la migration. La régulation de ces fonctions dépend de l'environnement mécanique comme la peau, les muscles ou encore le cerveau. Dans ce contexte, un GdR (Groupe de Recherche) a été mis en place au 1er janvier 2008 sur la mécano transduction – processus de transformation des signaux mécaniques externes en signaux biologiques– afin de mieux comprendre les processus impliqués, par exemple, dans l'évolution du tissu osseux tel que le remodelage sous l'action de contraintes mécaniques.

La coordination des cellules, qui interagissent entre-elles pour assurer l'intégrité des tissus, passe par l'amplitude des contraintes et des déformations qui sont transmises par le cytosquelette aux différents points de contact que la cellule met en place avec son environnement.

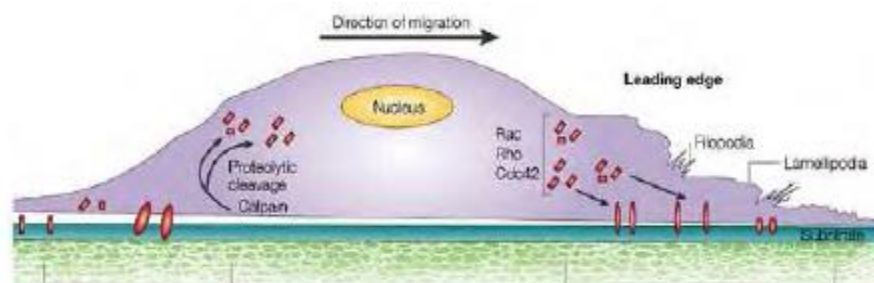


Fig. II.13: La cellule adhère sur le substrat via des complexes d'adhésion (en rouge), l'extension de la membrane Elle est gouvernée par la dynamique du cytosquelette qui permet de faire migrer la cellule

La compréhension des mécanismes de couplage entre l'adhésion des cellules et la nature physique de leur environnement est un enjeu crucial pour la biologie à titre d'exemple, la rigidité du substrat peut réguler la différenciation des cellules souches. L'étude de l'adhérence des cellules en culture est importante ; par exemple, pour connaître le potentiel migratoire de cellules cancéreuses

Des chercheurs de l'université de Princeton ont mis au point des filtres mécaniques pour séparer différents types de cellules sanguines à partir de leur propension à adhérer aux surfaces.

Une cellule est aussi caractérisée par sa masse volumique, notée ρ , ainsi que sa compressibilité, notée β , propriété qu'ont les corps de diminuer de volume sous l'effet d'une pression. Elle peut être définie par $\beta = 1/\rho c^2$ où c correspond à la vitesse du son dans le matériau considéré. A titre d'exemple, la densité de l'eau et celle des globules rouges valent $0,997$ et $1,139 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivement. En ce qui concerne leur compressibilité, elles valent respectivement $4,48.10^{-10}$ et $3,38.10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$; une étude montre qu'une diminution de la concentration de l'hémoglobine contenue dans les globules rouges entraîne une augmentation de leur compressibilité.

La densité et la compressibilité des cellules et de leur milieu environnant interviennent dans l'expression de la force acoustique, de plus en plus exploitée dans les dispositifs de micromanipulation de cellules .[28]

II.5.2.2 Propriétés magnétiques

Le comportement d'une cellule en présence d'un champ magnétique dépend de sa susceptibilité magnétique (notée χ) . Cette propriété désigne la capacité d'un matériau à s'aimanter sous l'effet d'un champ magnétique (Fig. II.14).

χ est reliée à la perméabilité relative μ_r par l'équation

$$\chi = \mu_r - 1 \tag{I.1}$$

la susceptibilité du vide est nulle. Lorsque $\chi > 0$, le matériau est dit paramagnétique ; pour $\chi < 0$, il est dit diamagnétique (Fig. II.14).

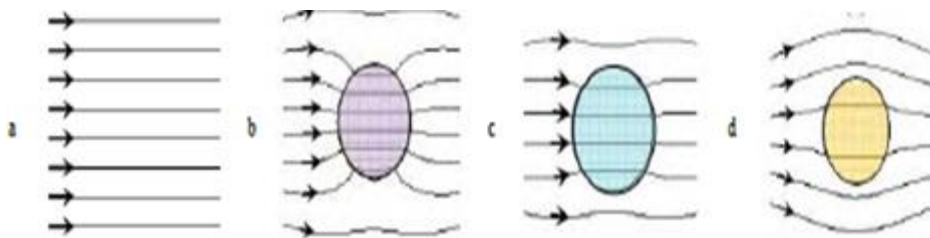


Fig. II.14 : (a) les valeurs de la densité de flux magnétique issu d'une source magnétique. Modification de cartographie suite à la présence d'un corps (b) ferromagnétique (c) paramagnétique (d) diamagnétique

La plupart des cellules sont faiblement diamagnétiques, leur susceptibilité magnétique volumique se rapproche de celle de l'eau valant $-9,05.10^{-6}$ unité SI L'échelle donnée Fig. II.15 permet d'avoir une vue d'ensemble de la gamme de susceptibilités magnétiques des matériaux.

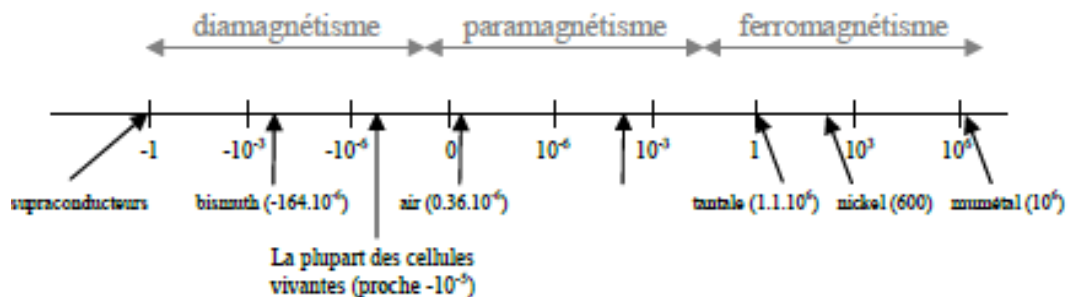


Fig. II.15 : Echelle de susceptibilités magnétiques (unité SI)

Il existe quelques exceptions :

- les globules rouges qui contiennent une grande concentration de fer dans l'hémoglobine –molécule paramagnétique qui permet le transport de l'oxygène – sont des cellules diamagnétiques mais ont une susceptibilité plus importante que celle de l'eau ($-6,52 \cdot 10^{-6}$) pour les globules désoxygénés .[29]
- Les bactéries magnétotactiques ont des propriétés magnétiques intrinsèques qui leur permettent de se déplacer le long des lignes de champ magnétique terrestre .Elles synthétisent naturellement des chaînes intracellulaires de nanoparticules magnétiques Fe_3O_4 appelés magnétosomes (Fig. II.16) et des études ont montré une nouvelle méthode pour cultiver et assembler des nanoparticules dans des structures ordonnées par manipulation avec des micro-aimants après lyse de la membrane .[30]

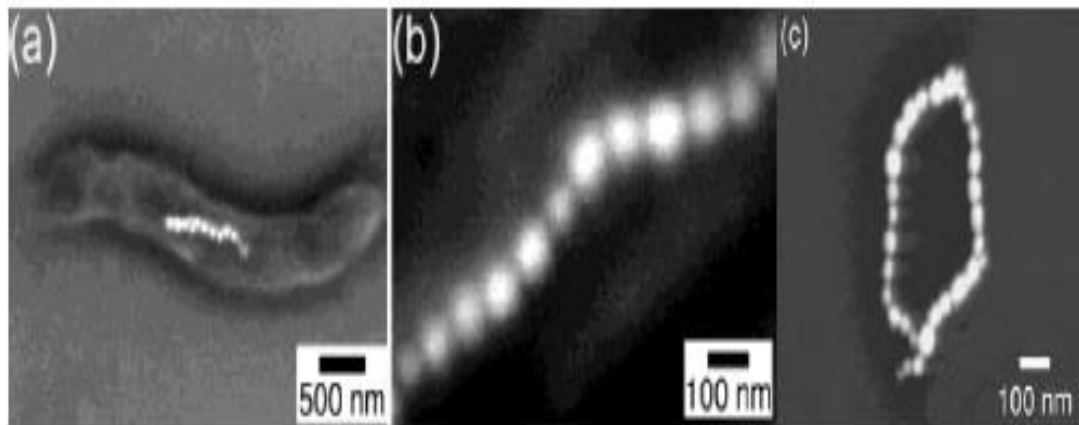


Fig. II.16: *Magnetospirillum magnetotacticum* (a) la bactérie synthétise une chaîne de nanoparticules qui est ancrée à l'intérieur de son corps (b) chaque particule est recouverte d'une membrane (c) anneau de nanoparticules formé par la manipulation et la lyse de deux bactéries magnétotactiques

La résonance magnétique nucléaire est une technique d'analyse non destructive très utilisée pour l'étude de matériaux ou l'imagerie médicale. Actuellement, la méthode utilisée pour observer les zones actives du cerveau est basée sur l'aimantation de l'hémoglobine contenue dans les globules rouges . En effet, l'activation génère un appel massif de sang oxygéné local ; en suivant la perturbation du signal de résonance magnétique nucléaire émis par une molécule active de l'hémoglobine ;il est possible de localiser ces zones.

II.5.2.3 Propriétés diélectriques

- Indice de réfraction Quand un faisceau de lumière (onde électromagnétique)

Pénètre dans un organisme, les propriétés optiques, telles que l'absorption et la dispersion, déterminent la transmission et la distribution de la lumière. La modification de la propagation des faisceaux par leur interaction avec le milieu matériel dans lequel ils se propagent est caractérisée par l'indice de réfraction n .

La plupart des cellules ont des indices de réfraction voisins malgré des tailles et des formes très différentes ; pour exemple, l'indice de réfraction de l'eau, des cellules mammifères et du plasma sanguin sont respectivement de 1,333 ; de 1,38 à 1,41 et 1,351 .

- Permittivité et conductivité électriques

La caractérisation électrique des cellules, qui s'intéresse à la mesure de l'impédance, est donc un point clé pour la compréhension des phénomènes intrinsèques ou non à la cellule.

La réponse d'une cellule en présence d'un champ électrique dépend de deux paramètres que sont la permittivité électrique relative (notée ϵ_r) qui reflète la capacité à polariser un matériau par accumulation de charges et la conductivité électrique (notée σ) qui reflète la capacité à laisser passer un courant électrique avec un minimum de pertes. Le comportement de la cellule résulte de la différence de permittivités complexes entre le milieu extracellulaire et la cellule (*Fig. II.17*)

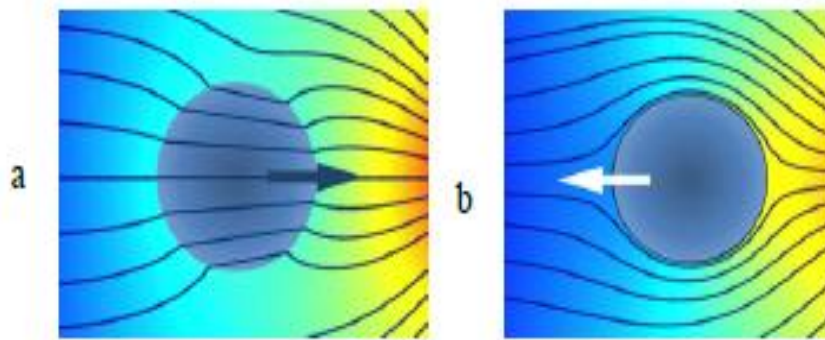


Fig. II.17 : Lignes de champ électrique (a) cas où la particule est plus (b) ou moins polarisable que le milieu

Pour étudier l'influence des champs électromagnétiques sur les cellules, il est nécessaire de construire un modèle électrique. En 1ère approche, la cellule peut être assimilée à un circuit électrique composé d'une capacité C_{mem} représentant la membrane (modélisation du phénomène de polarisation apparaissant à l'interface) reliée en série avec une résistance R_i représentant le milieu intracellulaire ou plutôt les charges libres internes à la cellule. Le milieu externe est symbolisé par une résistance R_m en parallèle avec une capacité C_m (*Fig. II.18*).

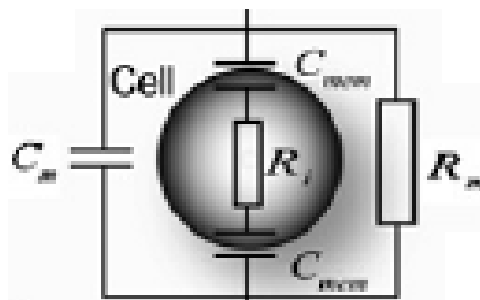


Fig. II.18 : Modèle de circuit équivalent pour une cellule en suspension

II.6. ELECTROROTATION

Les manipulations basées sur l'utilisation d'un champ électrique sont particulièrement adaptées à la miniaturisation car celle-ci permet la génération de forts champs électriques avec de faibles tensions. L'électrorotation – utilisée pour la caractérisation de cellules – se fonde sur le principe de polarisation des cellules biologiques sous l'effet d'un champ électrique. Par ailleurs, la caractérisation diélectrique se fait à partir de l'extraction des paramètres du spectre et implique l'utilisation d'un modèle analytique choisi. Des exemples non exhaustifs d'applications qui ont cours avec ce principe seront aussi présentés. [25]

II.6.1. Principe

Pour comprendre l'intérêt d'appliquer des forces électriques à une échelle micrométrique, il convient de regarder l'évolution des forces avec la taille. Si on considère une longueur caractéristique L de l'objet considéré, il est possible d'exprimer les différentes forces comme des lois de puissance de cette grandeur (Tab II.1) : [25]

Grandeur physique	Loi d'échelle
Force de Van des Waals inter-moléculaire	L^{-7}
Force capillaire	L^1
Vitesse d'écoulement	L^1
Puissance thermique transférée par conduction	L^1
Force électrique	L^2
Temps de diffusion	L^2
Force de Gravité	L^3
Force magnétique entre aimants	L^2
Force magnétique entre courante à densité de courant constant	L^3

Tab II.1 : Lois d'échelles pour différentes grandeurs physiques.

Il apparaît que les forces électrostatiques, inexploitable en conversion électromécanique à l'échelle macroscopique, sont largement utilisées dans les microsystèmes. En effet, alors que les forces électromagnétiques dominantes dans les applications macroscopiques peuvent être vues comme une interaction entre un champ magnétique et un courant volumique, les forces électrostatiques résultent d'une interaction entre des charges surfaciques et un champ électrique.

La réduction d'échelles permet en outre d'obtenir des champs électriques élevés (plusieurs $kV.m^{-1}$) avec des tensions d'alimentation de quelques volts seulement, ce qui accroît la prépondérance et l'intérêt de ces forces ; en effet, pour $L = 1cm$ ou $L = 100\mu m$, on peut réduire la tension par 1000 et obtenir la même force diélectrophorétique [31].

II.6.1.1 Notion de polarisation

Une cellule est une particule électriquement neutre mais polarisable. Sous l'effet d'un champ électrique non uniforme, une réorganisation interne des charges la polarise et lui confère les propriétés d'un dipôle. Il a été mis en évidence des phénomènes appelés dispersions qui correspondent à la dépendance fréquentielle de la permittivité complexe :

- jusqu'à 10⁴ Hz (dispersion a) : la structure de la membrane cellulaire joue un rôle de condensateur et les charges de surface induisent des valeurs importantes de permittivités et conductivités,
- jusqu'à 10⁸ Hz (dispersion b) : la polarisation interfaciale des membranes induit une diminution de la capacité membranaire ce qui se traduit par la circulation d'un courant dans le milieu intracellulaire. La conductivité augmente et devient représentative du milieu extra et intracellulaire tandis que la permittivité apparente diminue fortement (*Fig. II.19*).

Ce comportement s'explique principalement par l'effet Maxwell-Wagner, après 10⁸ Hz (dispersions d et g) : elles sont essentiellement dues à la polarisation des molécules dipolaires. La membrane est alors court-circuitée d'un point de vue électrique et le milieu se comporte comme un électrolyte .

Le mécanisme de polarisation interfaciale confère à la cellule les propriétés d'un dipôle :

les ions internes à la cellule se déplacent vers l'électrode de polarité opposée et sont stoppés par la membrane plasmique qui présente une résistivité électrique très supérieure à celle du cytoplasme . Le même processus se produit au niveau du milieu, ce qui conduit à l'accumulation de charges au niveau de l'interface cellule/milieu.

Dans le cas d'un champ uniforme, les forces de Coulomb qui s'exercent sur les charges opposées du dipôle se compensent : la polarisation ne produit donc aucune force électrique nette capable de déplacer la cellule. Dans le cas contraire, les forces ne se compensent pas ce qui engendre un déplacement de la particule polarisée. Le non uniformité du champ électrique est donc une condition nécessaire à la manipulation de cellules. Deux types de méthodes peuvent induire une polarisation et permettre le déplacement d'une cellule :

- L'application d'un champ non uniforme en amplitude associée au terme de diélectrophorèse conventionnelle, l'application d'un champ non uniforme en phase tel qu'un champ tournant induisant le phénomène d'électrorotation ou glissant induisant le phénomène de diélectrophorèse dite à ondes progressives [32].

II.6.1.2. Diélectrophorèse

La diélectrophorèse utilise les propriétés de polarisabilité des particules et consiste à leur appliquer un champ électrique non uniforme en amplitude pour les déplacer. Depuis la preuve de faisabilité de son utilisation sur des objets de faibles tailles à la fin des années 1970 par Pohl ;elle est devenue un principe de plus en plus utilisé dans les applications microfluidiques pour déplacer, trier, différencier et obtenir des informations sur les particules ciblées, notamment les cellules biologiques. Placée dans un champ électrique, la cellule présente un moment dipolaire m ; la force résultante a donc pour expression :

$$\underline{\underline{F}} = (\underline{\underline{m}} \cdot \underline{\underline{\nabla}}) \underline{\underline{E}} \tag{II.2}$$

La plupart des cellules sont assimilables à des objets sphériques diélectriques présentant des pertes. L'expression du moment dipolaire conduit à :

$$\underline{\underline{m}} = 4\pi\epsilon_m k(\omega) r^3 \underline{\underline{E}} \tag{II.3}$$

d'où l'expression du facteur de Clausius-Mossotti :

$$k(\omega) = \frac{\epsilon_p - \epsilon_m}{\epsilon_p + 2\epsilon_m} \tag{II.4}$$

avec ϵ_m et ϵ_p permittivités et conductivités du milieu d'immersion et de la particule

(N.B. : $\epsilon_x^\circ = \epsilon_x - j \frac{\sigma_x}{\omega}$ avec $\epsilon_x^\circ = \epsilon_0 \epsilon_{x,r}$ avec $\epsilon_{x,r}$ la permittivité dite relative)

- ω et E : respectivement pulsation et intensité efficace du champ électrique appliqué
 - r le rayon de la cellule Un gradient de champ électrique génère donc une force sur une particule et dans le cas où la non uniformité se restreint à une variation d'amplitude, on obtient :

$$\underline{\underline{F}} = 2\pi\epsilon_m r^3 \text{Re}[K(\omega)] \underline{\underline{\nabla}}(E^2) v^2 \tag{II.5}$$

Il est à noter que $[\underline{\underline{\nabla}}(E^2)] = \frac{[v^2]}{[distance^3]}$ il est donc possible de générer une force à partir d'une tension faible pour une petite distance. En effet, on voit bien que l'intérêt du microsysteme réside dans sa faible distance inter-électrodes : le facteur d'échelle est ici favorable aux dimensions micrométriques.

Dans le cas où $\text{Re}[K(\omega)] > 0$, les cellules sont amenées vers les maxima de champ (diélectrophorèse positive) ; la particule est donc plus polarisable que son milieu de suspension.

Dans le cas opposé (diélectrophorèse négative), les cellules sont amenées vers les minima de champ (Fig. II.19) Pour une particule et un milieu donnés, le passage d'un régime à l'autre dépend, uniquement de la fréquence du champ électrique appliqué.

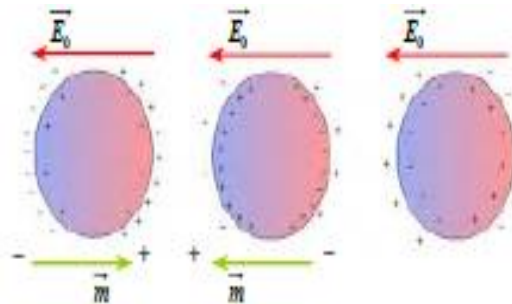


Fig. II.19 : De gauche à droite : la particule est moins, plus et autant polarisable que le milieu environnant

De nombreuses structures d'électrodes peuvent être utilisées pour générer un champ électrique non uniforme, comme les électrodes rectangulaires interdigitées (*Fig. II.20*). Une comparaison de différentes structures d'électrodes pour la diélectrophorèse a été proposée par M. Frénéa-Robin *et al.* : différentes possibilités sont offertes par l'intégration aisée de ce procédé.

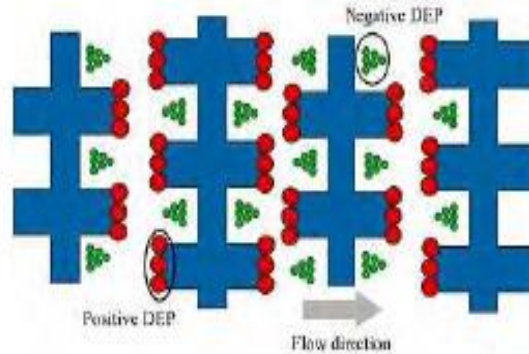


Fig. II.20 : Electrodes rectangulaires interdigitées : en vert, des particules soumises à la diélectrophorèse négative, en rouge, des particules soumises à la diélectrophorèse positive

La diélectrophorèse concerne autant la matière neutre (cellules biologiques) que chargée (particules fonctionnalisées). Des micro-dispositifs ont montré la faisabilité d'utiliser ce principe pour la séparation cellulaire, la fusion cellulaire ou le tri cellulaire. Des microsystèmes permettant de générer des forces intenses ont été mis au point ; le pilotage en temps réel est tout à fait réalisable. Ces microsystèmes sont compatibles avec des solutions biologiques et sont parfaitement intégrables dans un microcircuit, la diélectrophorèse devient incontournable dans le monde des bio-microsystèmes.

II.6.1.3. Électrorotation

L'électrorotation consiste à induire un mouvement rotatif (*Fig. II.21*) sur une particule exposée à un champ d'amplitude constante qui tourne (non uniforme en phase). Le principe a été mis en œuvre pour la 1ère fois par Arnold et Zimmermann en 1988 . Ils ont adopté un système d'électrodes dans lequel les tensions appliquées à deux électrodes adjacentes sont déphasées de 90 degrés.

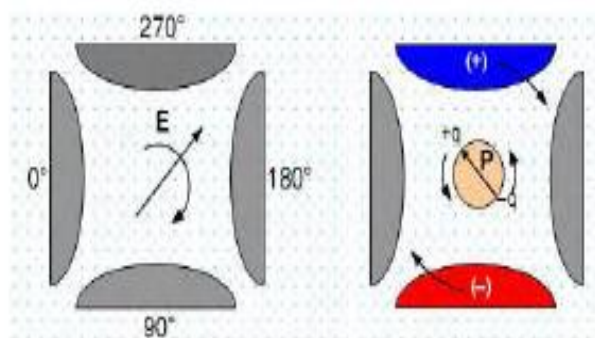


Fig. II.21 : à gauche : un champ tournant est engendré entre quatre électrodes par application d'une tension sinusoïdale avec un déphasage de 90° ; à droite : selon l'angle de phase entre la polarisation induite et le champ électrique, le couple agit sur la particule qui se met en mouvement dans le sens identique ou inverse au champ

Le temps de relaxation dû au phénomène de polarisation est trop long pour permettre un synchronisme entre le dipôle induit au niveau de la particule et le champ tournant. Le déphasage résultant se traduit par l'existence d'un couple qui s'exerce sur la particule, l'amenant à tourner sur elle-même. L'angle formé entre le dipôle induit et le champ impose le sens de rotation de la cellule.

II.7 .Système d'exposition

Une fois générée l'impulsion est transmise jusqu'à l'applicateur qui permet d'exposer le milieu biologique à l'impulsion ns. L'exposition d'un milieu biologique à une impulsion électromagnétique (EM) se fait principalement par conduction (emploi d'électrodes). Pour les impulsions les plus courtes, les dispositifs d'exposition par rayonnement (emploi d'une antenne) sont en cours de développement. Nous nous concentrerons principalement sur les dispositifs constitués d'électrodes en contact avec le milieu biologique.

Il est important de savoir exactement à quel champ est exposé le milieu biologique et le volume qui peut être affecté. La géométrie de l'applicateur a une influence directe sur la distribution du champ et la forme des impulsions délivrées à la cellule.

Les niveaux de champ que nous souhaitons atteindre pour l'étude des effets sous structuraux des impulsions nanosecondes atteignent des valeurs de l'ordre de la dizaine de MV/m. Pour cela, puisque les générateurs qui existent à ce jour atteignent des amplitudes de plusieurs kV, les électrodes sur lesquelles reposent les applicateurs doivent être séparées d'une très faible distance afin d'en augmenter le champ électrique. Le champ appliqué au milieu biologique est régi par l'équation suivante :

$$E = \frac{\Delta v}{D_{elec}} \text{ (V/m)} \quad \text{(II.6)}$$

Le champ électrique inter-électrode dépend de la différence de potentiel qui existe entre les électrodes notée ΔV et de la distance inter-électrode D_{elec} .

Le choix de l'applicateur joue un rôle primordial dans l'étude des effets des impulsions ultracourtes et de très forte amplitude puisque la valeur du champ et la durée de l'impulsion déterminent les effets et la cible. [34]

II.7.1 Appicateurs pour l'electroporation ms-µs

Les premiers applicateurs *in vivo* ont été développés avec la création du CLINIPORATOR qui fut le premier dispositif industriel permettant d'exposer des impulsions ms-µs pour l'électrochimiothérapie. Ils résultent de projets européens portés par Luis Mir qui débute dès la fin des années 90

Il existe deux catégories d'appicateurs comme l'illustre la *Fig. II.22*

- ✓ -les applicateurs planaires
- ✓ -les applicateurs de type aiguille.

Ils sont adaptés pour des tumeurs cutanées ou sous cutanées localisées et en combinaison avec un agent cytotoxique ils permettent de cibler les effets de ces composants chimiques sur

les cellules perméabilises par l'applicateur. Les impulsions employées avec ce type d'applicateur sont caractérisées par des durées de l'ordre des ms- μ s avec des amplitudes de quelques kV/m.



Fig. II.22: Illustration d'applicateurs bases sur des électrodes planaires et électrodesaiguilles [34].

Un autre applicateur tres couramment employé pour l'électroporation *in vitro* est la cuvette biologique. Les cuvettes biologiques pour l'électroporation diffèrent des cuvettes classiques par la présence d'électrodes métalliques qui remplacent deux faces opposées de cette dernière. La cuvette biologique permet l'exposition d'un grand nombre de cellules en suspension. Elle est tres fréquemment employée pour l'électroporation classique.



Fig. II.23: Cuvette d'électroporation avec différentes distances inter-electrodes⁹ (de gauche a droite 1 mm, 2 mm et 4 mm).[34]

II.7.2 Applicateurs pour l'électroporation ns

Dans cette partie, nous présenterons de façon non exhaustive les systèmes d'exposition et applicateurs adaptes pour l'étude *in vitro* des nsPEFs. [34]

II.7.2.1 Cuvette biologique

L'emploi de la cuvette d'électroporation pour l'étude des effets des nsPEFs présente un inconvénient du fait de la relativement grande distance inter électrode. En effet, le générateur employé doit alors être capable de générer des impulsions de l'ordre de la dizaine de kV et des durées d'impulsion dans le domaine des nanosecondes. Afin d'augmenter l'amplitude du nsPEF, une alternative consiste a diminuer la distance qui sépare les électrodes dans la cuvette.

Elle peut varier entre 4 mm à 1 mm, permettant ainsi d'augmenter le champ à l'intérieur de la cuvette par quatre. La *Fig. II.24* présente un montage typique qui est constitué d'un générateur impulsionnel relié par l'intermédiaire d'une ligne de transmission à une cuvette. Le Tap off, présent entre le générateur et la cuvette d'électroporation, permet d'extraire une partie du signal incident et ainsi de vérifier et caractériser l'impulsion à la sortie du générateur. Une sonde haute tension permet de mesurer l'impulsion reçue par l'applicateur. Le montage d'exposition est présente en détails dans le travaux de thèse de M. Kenzan

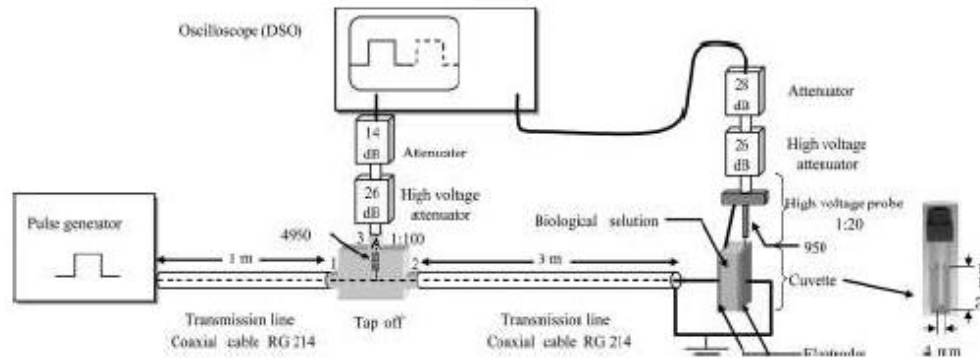


Fig. II.24: Schéma d'un système d'exposition employant une cuvette d'électroporation [34].

Ont considères des signaux de deux générateurs impulsionnels, l'un capable de générer des impulsions de 10 ns avec des amplitude entre 4.5 kV et 10 kV avec des temps de montée proches de la ns et le second permettant d'étudier des impulsions de 3 ns avec des amplitudes allant jusqu'à 3 kV avec des temps de montée de 800 ps. Les champs alors induits dans la cuvette, caractérisée par une distance inter-électrode de 4 mm, peuvent atteindre 0.750 MV/m et 2.5 MV/m avec ces types d'impulsion. La *Fig. II.25* présente la comparaison temporelle et spectrale de l'impulsion incidente de 10 ns et d'amplitude 4.5 kV délivrée par le générateur et celle mesurée aux bornes de la cuvette. On peut remarquer sur la *Fig. II.25* (a) que le temps de montée de l'impulsion au niveau de la cuvette d'électroporation est plus long que celui de l'impulsion incidente.

Cette différence peut s'expliquer à l'aide la *Fig. II.25* (b) qui nous permet de constater que le spectre de l'impulsion incidente diffère de celui de l'impulsion mesurée aux bornes de la cuvette au-delà de 150 MHz. De la même façon, *Fig. II.26* (a) et (b) comparent l'impulsion incidente bipolaire de 2 ns avec celle mesurée aux bornes de la cuvette. Le même phénomène de dégradation des fronts de montée de l'impulsion est observe *Fig. II. 26* (a). La comparaison des spectres (*Fig. II. 26* (b)) met également en évidence que la cuvette est adaptée jusqu'à environ 150 MHz. Ces résultats montrent que l'emploi de la cuvette pour l'étude des nsPEFs est adaptée pour des impulsions d'une durée au moins égale à 10 ns et dont le temps de montée est supérieur à la ns. [34]

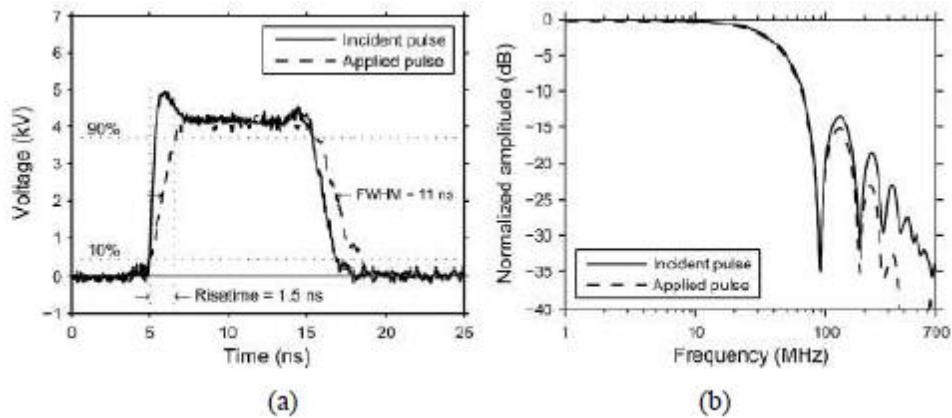


Fig. II. 25 : Comparaison du champ incident et du champ applique pour une impulsion rectangulaire de 10 ns(a) dans le domaine temporel (b) dans le domaine fréquentiel [34].

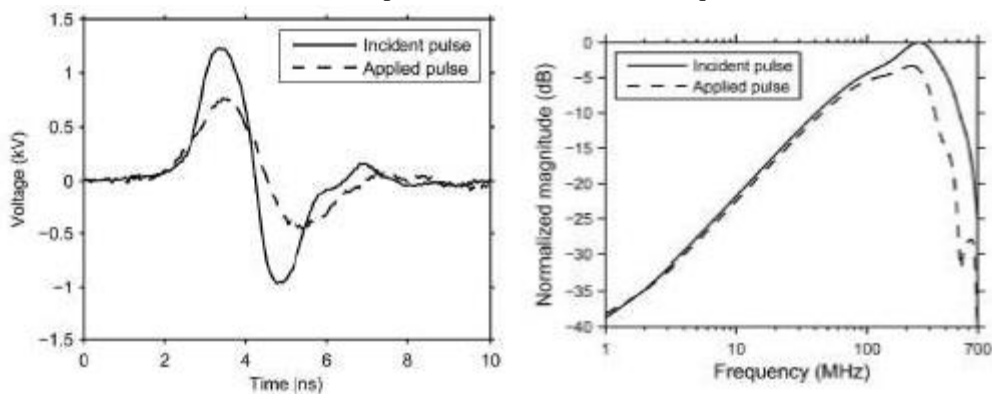


Fig. II. 26 : Comparaison du champ incident et du champ applique pour une impulsion bi-polaire de 2 ns(a) dans le domaine temporel (b) dans le domaine fréquentiel [34]

CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la présentation de l'état de l'art sur la compatibilité électromagnétique et la cellule biologique, ce qui permet de mieux comprendre l'influence des champs électromagnétiques et les différents rayonnements sur les êtres vivants d'une façon générale. Il permet d'introduire les différents éléments qui interviennent dans notre étude. Il regroupe un ensemble d'information nous permettant d'élargir nos connaissances sur la notion de la compatibilité électromagnétique (CEM), et les techniques de couplage électromagnétique.

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord étudié les champs électromagnétiques et les mécanismes de base liés au rayonnement, ainsi que la structure biologique des cellules, une structure qui est universelle quelque soit le type cellulaire. Ensuite, nous avons énuméré les différentes propriétés physiques des milieux biologiques (permittivité et conductivité, complexes).

CHAPITRE III

Résultats de l'expérimentation sur l'influence des champs électromagnétiques

CHAPITRE III

Résultats de l'expérimentation sur l'influence des champs électromagnétiques

1INTRODUCTION :

Ce chapitre sera consacré à l'instrumentation et à la présentation détaillée de la plateforme expérimentale – tout ce qui est nécessaire à la réalisation des expérimentations : matériel biologique, microsysteme et environnement électrique, système de visualisation et d'acquisition ainsi que les moyens permettant l'exploitation des déplacements observés. La mise en place de ces essais expérimentaux constitue un point de départ d'un axe scientifique sur les effets des rayonnements des champs électriques et magnétiques in vivo et in vitro. L'objectif est de caractériser les effets des champs au niveau macroscopiques sur la constitution de la matière et microscopiques au niveau cellulaire.

III.1 Essais effectués sur des plantes :

Dans le but de connaître l'influence des champs électromagnétiques sur les plantes, des essais sont effectués dont le matériel utilisé est :

- Un microscope
- Une antenne
- Un générateur d'une bande de fréquence 1800 MHz

Dans ces essais une plante appelée ray-grass est utilisée, on donne ci-dessous une définition sur cette plante et son utilisation :

III.2.1- Ray-grass :

Le ray-grass anglais (*Lolium perenne*) est une plante herbacée vivace de la famille des poacées (= graminées), très utilisée dans les pâturages ainsi que dans les jardins, elle est très robuste (souvent utilisée pour les terrains de Football ou de rugby...), et germe très rapidement (1 semaine en moyenne).

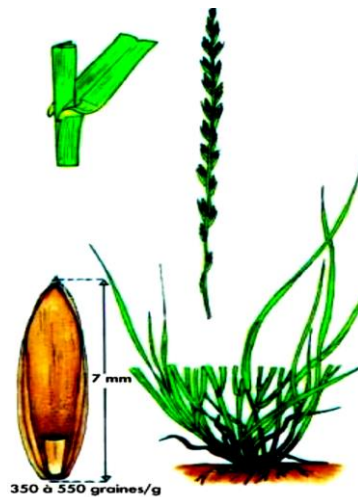


Fig. III.1 la plante de ray-grass[38]

Avantages

- Excellente plante de poture(végétation bosse et dense).
- Très oppètente .
- Bonne valeur alimentaire .
- Implantation et exploitation fociles
- Assez bonne tolérance aux excès d eau
- Bonne pérennité(3 a 6 ans selon le milieu et la variété)
- Bonne association avec le trèfle blanc.

Limites

- Production stoppée par la chaleur
- Assez sensible aux rouilles
- Difficile a faucher avec une barre de coupe

Critère De Choix Des Variétés

- Précocité. Souplesse d exploitation
- Répétition du rendement
- Ploidie
- Pérennité
- Resistance aux maladies rouilles

L'étude fondamentale de la cellule biologique et sont structurellement proches des cellules animales : ils sont donc bien adaptés pour étudier les propriétés biophysiques de la membrane. Ils participent aujourd'hui à de nombreuses applications en médecine pour la vectorisation des médicaments ou encore le diagnostic in vitro

L'idée principale est de "irradier " une plante, organisme vivant immobile et "sans conscience", avec le même type de rayonnement qu'un téléphone émet, avec la même intensité que celle recommandée pour l'homme, pour ensuite pouvoir faire une étude comparative entre des plants exposés, et des plants non-exposés.

Bien sûr, une plante, est un organisme différent de celui d'un homme, et a une manière de fonctionner différente. Les résultats observés, ne seront donc pas forcément transposables à l'homme. Mais l'étude sur la plante procure de nombreux avantages : une croissance rapide, pas de psychologie donc pas d'effets psychosomatiques, un encombrement du matériel nécessaire limité, mais surtout, il est facile d'observer leur croissance, ainsi que leurs cellules. [38]

III.2.2- Préparation d'échantillons

On sépare les godets-contenant des graines dans des bacs différents :

- Deux bacs avec chacun 12 godets de ray-grass, exposés aux ondes,
- Deux bacs de 12 godets chacun non exposés aux ondes.

Il fallait que les godets aient la même exposition à la lumière, la même luminosité, la même hygrométrie, et poussent avec la même température ambiante.

On mit les bacs exposés et non exposés dans une pièce commune, on les espacés de quelques mètres et avons orienté l'antenne de façon à ce que les plans non exposés ne soient pas sous l'effet des ondes.

La pièce est exposée vers le nord, et la température y est homogène, de l'ordre de 24°C. [38]



Godets de graines
exposées aux ondes

Godets de graines non
exposées aux ondes

Fig. III.2 Salle d'expérience [38]

III.2.2- Mise en place

III.2.2.1- Elaboration des godets

Dans la réalisation de cette expérience, des barquettes de six godets en tourbe séparées en deux pour qu'il y ait 4 barquettes exposées (24 godets) et 4 barquettes non exposées (24 godets), ces godets sont remplis de terreau,

Les graines de ray-grass sont mises dans de l'eau pendant 30 minutes et pour garantir une hydratation complète et homogène de toutes les graines, ces dernières sont semées et mises en nombre de vingtaine de graines par godet.



Fig III.3 Photo des godets avec les semences de rays-grass. [38]

En même temps, nous avons mis 24 autres godets témoins, dans la même pièce, avec la même exposition (solaire), constitués et arrosés de la même façon.

III. 2.2- Mise en place champ électromagnétique :

Il fallait maintenant les soumettre aux radiations de notre antenne, qui émettait selon un cône de 30° p. Au départ, on a placé l'antenne à 13 cm des godets.

Lorsqu'une onde se propage, elle se disperse dans l'espace et subit donc un affaiblissement, même dans un milieu sans perte. La valeur de cette perte est appelée l'affaiblissement d'espace libre.

Pour calculer la puissance reçue, il faut calculer la puissance que le rayonnement perdait, donc la valeur de l'affaiblissement d'espace libre, soustrait à la puissance de départ et au gain d'antenne, pour le générateur, une puissance de départ de 20 dbm, et un gain d'antenne de 7 dbm.

La formule de l'affaiblissement d'espace libre est la suivante :

$$A=10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (\text{III.7})$$



Fig III.4 Salle de test et les matériels utilisées [38]

1 : 1 antenne (composée de deux “patches”) émettant dans un cône de 60° sur 30° . L'antenne est placée à 20 cm pour se rapprocher au plus d'un champ proche (suivant la formule D^2/λ pour avoir la valeur de la distance permettant un champ proche, et ainsi éviter la perte de puissance).

2 : 24 godets de ray-grass anglais arrosés tous les 2 jours avec 10 ml d'eau.

3 : Générateur émettant en continu des ondes de 1800MHz à une puissance de 250Mw [38]

4

III.2.3- Observations

Les résultats qui seront présentés sont la suite d'une exposition de 25 jours



Godets non exposés

Godets exposés, le bloc arrière
n'a aucun brin de sorti.

Fig. III.5 Résultats d'exposition d'une durée de 25 jours [38]

Après 10 jours d'exposition aux ondes 12 godets ont germé mais de façon inégale (taille différente)

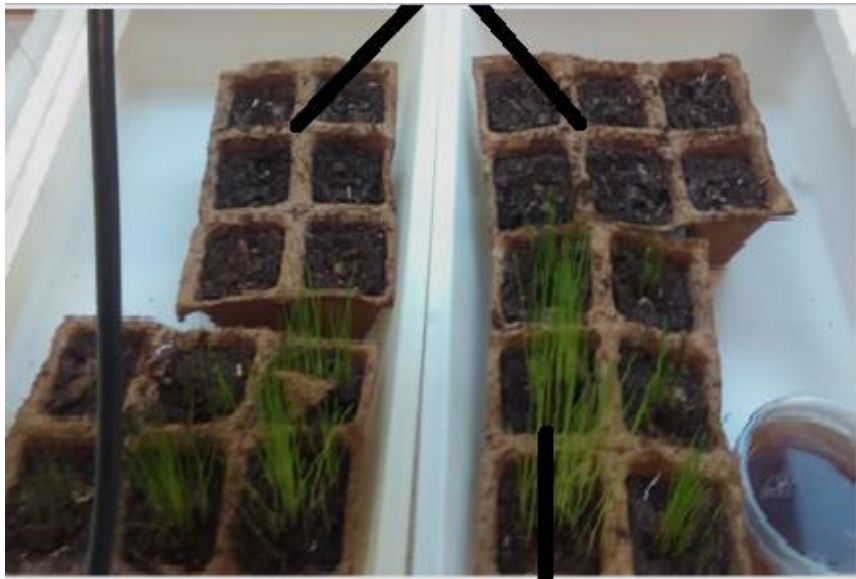


Fig III.6- Résultats d'exposition aux ondes de 10 jours

III.2.3.1- Observation microscopique

III.2. 3.1.1- La microscopique

Le microscope est un instrument optique qui donne une image grandie d'un objet en général transparent. Il est constitué d'un banc optique dont une partie se trouve devant l'objet : l'éclairage, l'autre partie derrière l'objet pour l'observation. Ce banc doit être rigide et posséder tous les organes de centrage des pièces optiques (fig.III.7) [39]

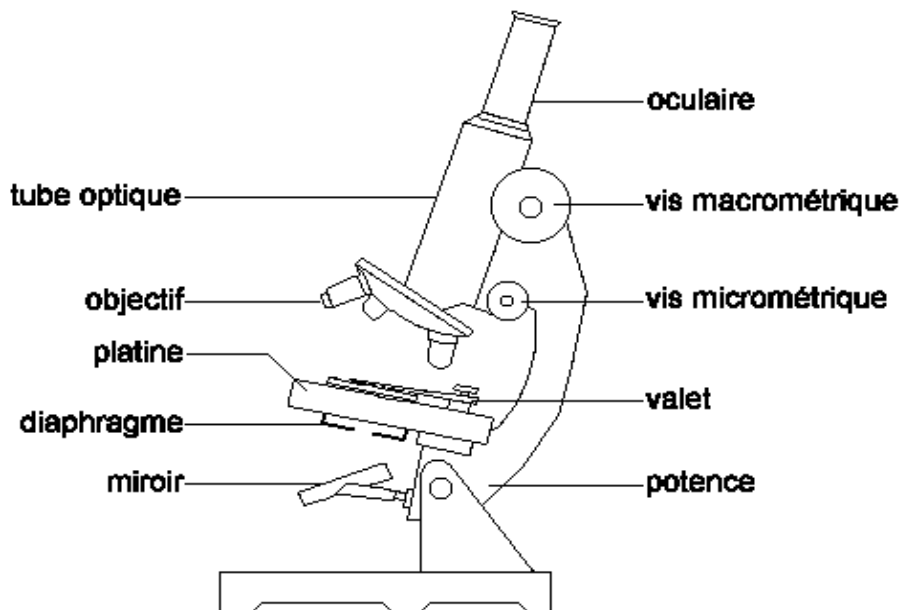


Fig III .7 Un microscopique [40]

Il existe des microscopes dits droits (objectif pointant vers le bas) et des microscopes dits inversés

III.2.3.1.2- Principe du microscope :

L'objet est transformé en une image réelle à l'aide d'un objectif. L'image se forme au plan focal d'un oculaire qui va pouvoir en donner ensuite une image virtuelle située à l'infini. On peut déduire de ce simple schéma que le grossissement de l'appareil dépend non seulement des objectifs et des oculaires mais aussi des distances qui séparent les composants.

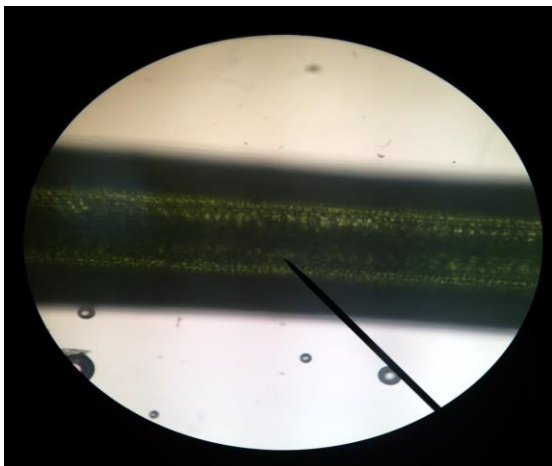
Initialement, pour la plupart des constructeurs, la longueur de tube était de 160 mm, sauf Leica qui utilisait des tubes de 170 mm et certains microscopes métallographiques avec des tubes de 250 mm.[39]

III.2.3.1.3- Les différentes sortes de microscope

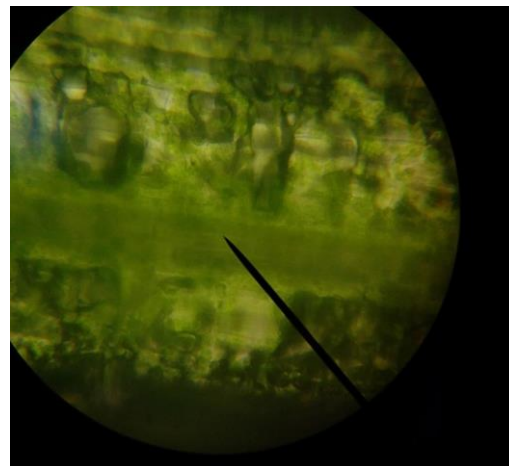
- Le microscope composé de plusieurs lentilles
- Le microscope optique composé d'une lentille biconvexe
- Le microscope électronique, utilise par des électrons
- Le microscope sonde à balayage pour l'image tridimensionnel [41]

III.2.3.2- Observation réel et microscopique des plantes exposées :

Après 10 jours d'exposition des plantes aux ondes, nous avons extraire une observation microscopique des plantes exposés ; les figures ci-dessous donne les résultats de ces observations. [38]



Moyen grossissement (x10)



Gros grossissement (x40)

Fig III.8 Observation microscopique des plantes exposées après 10 jours d'exposition aux ondes. [38]

Plantes témoins non exposés aux ondes après 10 jours

Ces plantes sont préparées pour avoir une base de référence et de comparaison des résultats d'influence, ces plantes sont soumises aux mêmes conditions que les autres plantes sauf l'exposition puisque ces plantes ne sont pas exposées.

Contrairement aux godets exposés, tous les godets non exposés ont germé avec une taille à peu près équivalente.

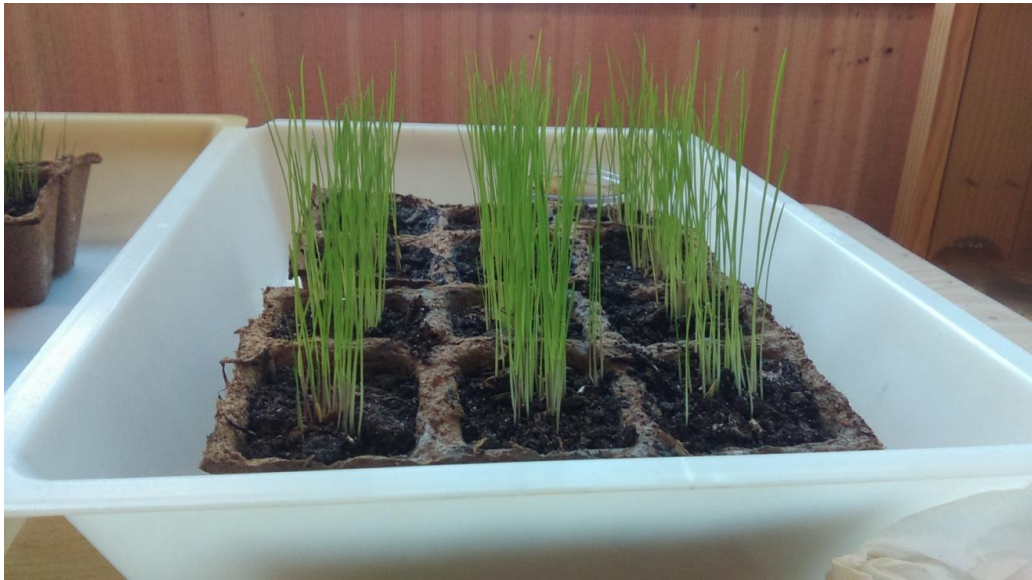
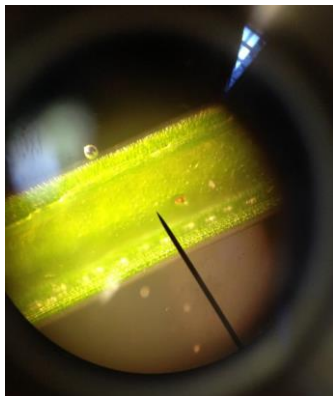


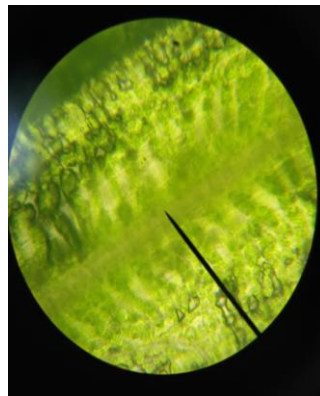
Fig III.9 Plantes témoins non exposés aux ondes

Observation microscopique des plants non-exposés après 10 jours

Les observations microscopiques faites sur les plantes non exposées ont donné les résultats ci-dessous Fig.III.10



Moyen grossissement (x10)



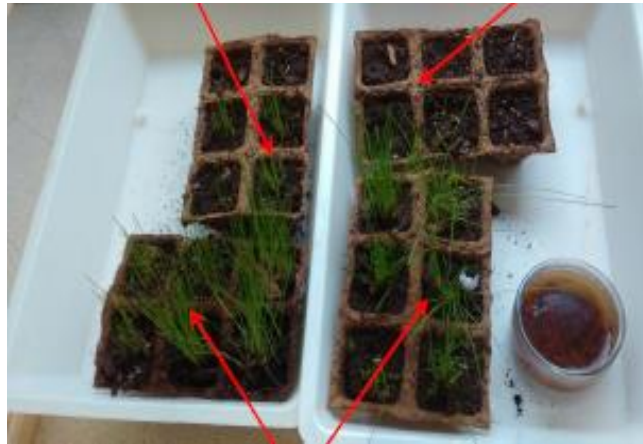
Gros grossissement (x40)

Fig III.10 Observation microscopique des plants non-exposés après 10 jours de pousse [38]

Après 18 jours d'exposition aux ondes

Les plants de ces godets commencent tout juste à pousser, avec 12 jours de retard par rapport aux autres

Aucune trace de germination pour cette zone...



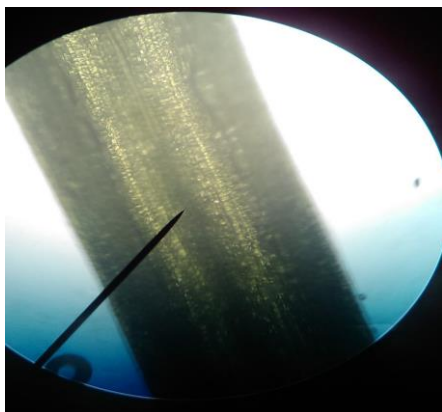
Ces brins continuent leur pousse

Fig III.11 Godets Après 18 jours d'exposés aux ondes [38]

Suivant la Fig.III.11, on remarque que les plants des godets commencent tout juste à pousser, avec 12 jours de retard par rapport aux autres

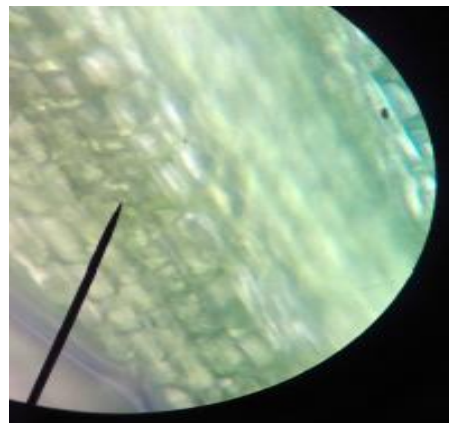
Alors que sur la zone exposée, on observe aucune trace de germination pour cette zone...

Observation microscopique des plants exposés après 18 jours d'exposition aux ondes



Moyen grossissement (x10)

Encore une fois, il est dur de distinguer les chloroplastes mais les limites précises des cellules sont visible clairement.



Gros grossissement (x40)

C'est la mise au point la plus possible que nous avons pu obtenir

Fig.III.12 Observation microscopique des plants exposés après 18 jours d'exposition aux ondes [38]

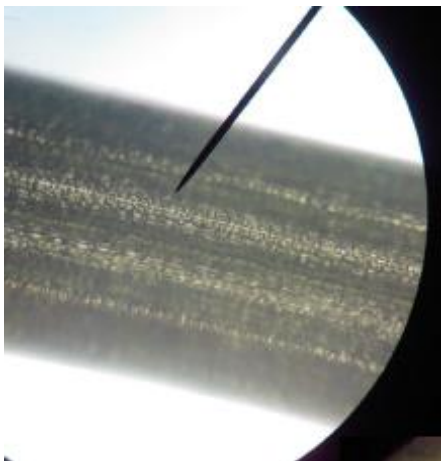
Godets témoins non exposés aux ondes après 18 jours



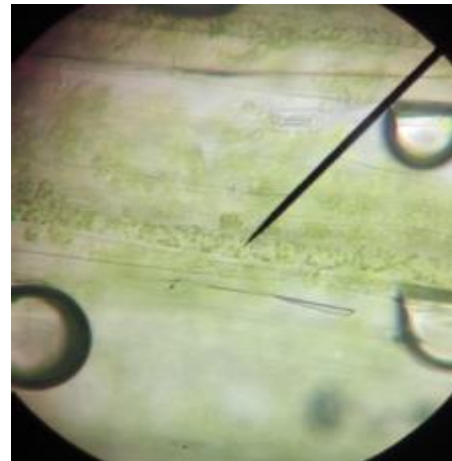
Fig III.13 Godets témoins non exposés aux ondes [38]

On observe que les plants ont tous environ la même taille et ont l'air plus solides que les plants exposés.

Observation microscopique des plants non-exposés après 18 jours d'exposition aux ondes



Moyen grossissement (x10)



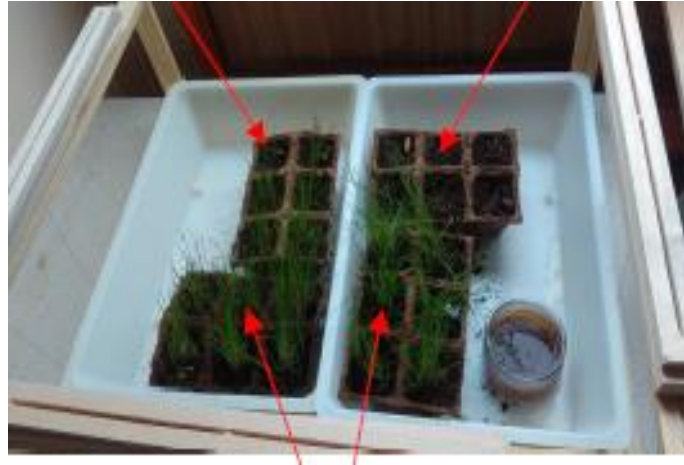
Gros grossissement (x40)

Fig III.14 Observation microscopique des plants non-exposés après 18 jours d'exposition aux ondes [38]

Godets exposés aux ondes après 25 jours d'exposition

Les brins ayant eu du retard lors
De la germination, sont en croissance.

Aucun brin n'a germé



Les brins ont continué leur croissance, mais de façon inégale. Les brins du milieu sont plus hauts que ceux aux extrémités.

Fig III .15 Godets exposés aux ondes après 25 jours d'exposition [38]

Godets témoins non exposés aux ondes après 25 jours



Fig III.16. Godets témoins non exposés aux ondes après 25 jours [38]

Tous les godets ont germés avec une taille homogène, les brins paraissent plus solides que ceux des godets exposés.

III.2.4- Conclusions des observations

Dans cette expérience nous avons comparé les plantes exposées et non exposées à l'aide d'un microscope optique ayant trois grossissements : x4, x10, x40. [38]

III.2.4.1- Observation microscopique

Avec les photos, nous pouvons peut-être supposer que les chloroplastes sont plus facilement identifiables sur les plants non-exposés et ont l'air en plus grand nombre mais cela n'est qu'une supposition.

Egalement, nous avons observé que l'apparence des échantillons exposés est plus "fragile" que les échantillons non exposés [38]

III.2.4.2- Observations sur la croissance

A travers cette expérience, nous avons pu observer des différences dans la croissance des godets exposés et non exposés.

Alors que les godets non exposés présentent tous une croissance homogène, ce n'est pas le cas pour les godets soumis au rayonnement électromagnétique.

La croissance du ray-grass anglais y est en effet inégale mais relativement symétrique dans les deux bacs exposés. Certains des godets ont une croissance comparable aux godets non exposés mais d'autres, situés à l'arrière ont eu un retard dans la germination, voire aucune germination.

Il y a donc une réelle différence entre les échantillons exposés et ceux non exposés. [38]

III.2.2.3- Remarques et interprétation :

Interprétation 1: Le stress

L'exposition aux ondes a provoqué, chez les graines qui ont poussé en retard un stress, elles auraient alors produit des protéines de stress, ce qui aurait influé sur leur germination qu'à une "faible amplitude" 5V/m (volts par mètre), très inférieures aux normes réglementaires actuelles (28V/m et plus selon les fréquences utilisées) et, à l'issue d'une courte exposition (10 minutes), on observe une augmentation immédiate et importante (3-5 fois) de protéines de stress, ces fameuses Heat Shock Proteins. Ces effets biochimiques sont comparables à ceux que l'on observe à la suite d'un choc ou d'une blessure.

L'émission de ces protéines de stress peut expliquer un dysfonctionnement dans la production des auxines (hormones de croissance des plantes)

Interprétation 2: influence sur la division cellulaire

La division cellulaire est impactée par les ondes électromagnétiques, on peut interpréter cette différence de germination et de croissance, entre échantillons témoins et traités, par une action directe du champ électromagnétique sur les divisions cellulaires comme cela a été rapporté dans la littérature scientifique". Il prend l'hypothèse que le champ exposé serait dissymétrique pour expliquer les différences entre les godets exposés.

Les petites cellules (les cellules germinatives) ne savent pas germer si elles sont dans un champ électromagnétique d'assez haute intensité. Si elles sont protégées, elles savent germer (exemple: dans de l'eau, ou de la terre humide). Ceci pourrait expliquer qu'environ la moitié de graines ne germent pas. Les graines seraient ainsi incapables de se diviser et de synthétiser toutes les protéines nécessaires à la croissance sous l'influence du rayonnement.

Interprétation 3: L'échauffement

Le rayonnement électromagnétique provoque un échauffement qui modifie la croissance de la plante l'évoque un échauffement provoqué par les ondes électromagnétiques, qui viendrait modifier la croissance des plantes exposées. "La caractéristique de DAS retenue (0,4 W/kg ici) est effectivement définie à partir de critères thermiques (la norme pour les téléphones est définie pour que l'échauffement des tissus reste inférieur à 1°C, valeur au-delà de laquelle le corps humain ne sait plus réguler)".

Il est donc possible que les ondes chauffent les échantillons exposés mais dans ce cas, .La chaleur provoquée reprendrait les effets de la chaleur que nous avons vu précédemment, mais à long terme, pendant 25 jours (déformation de la structure des protéines et de l'ADN, lésions, etc).

3. Expérience des Œufs :

En vue de l'étude de l'influence des champs électromagnétiques émis par des portables téléphoniques, nous avons choisis comme matière biologique des Œufs de poule. Nous avons pris deux pièces d'Œufs une exposée aux ondes émis entre deux portables en communication et l'autre reste sans exposition, ce deuxième Œuf constitue une base de comparaison à partir de laquelle on constate les changements.

L'exposition aux radiations a duré 3 Heures, les observations sont prises après les durées suivantes :

30 m, 45mn, 1H, 1H30, 1H45, 2H ; 2H30 et 3H

Les échantillons exposés et non exposés sont soumis aux mêmes conditions de température, humidité et pression ainsi que le niveau de lumière. Les résultats sont présentés sur les figures suivantes :

Echantillons sans exposition état 0

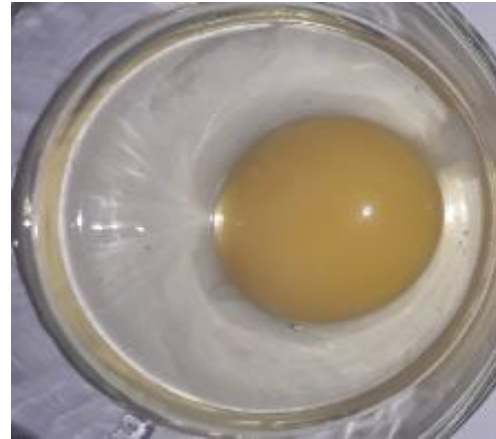
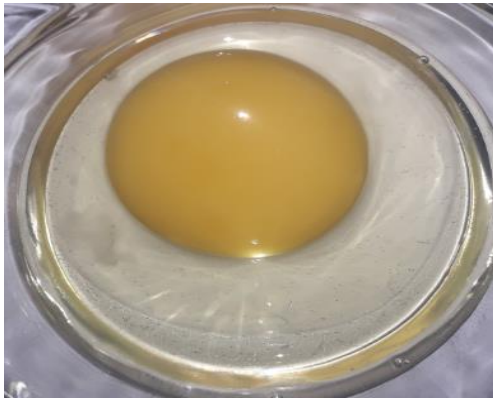


Fig III.17 Observation Echantillons sans exposition état 0

Observation prise après 30 m

Une œuf exposés



une œuf non exposés



Fig III.18 Observation Echantillons après 30 mn

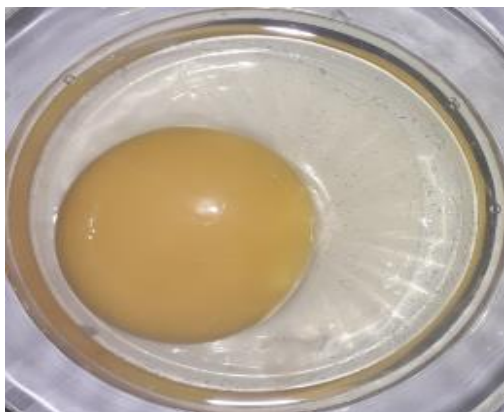
Les Remarques

Dans l'œuf exposé, on observe l'émergence de très petites bulles à la surface de l'œuf avec son espacement

Dans l'œuf non exposé, on remarque la convergence de bulles à la surface de l'œuf entre elles en grand nombre

Observation prise après 45 m

Une œuf exposés



une œuf non exposés



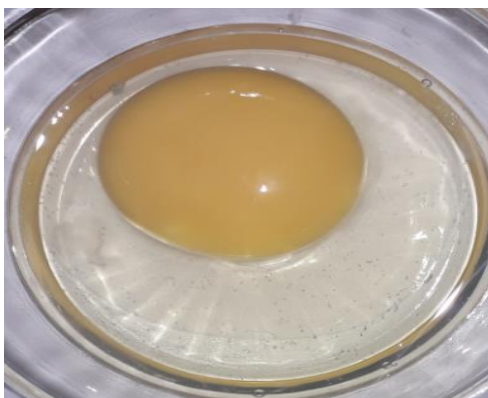
Fig III.19 Observation Echantillons après 45 mn

Les Remarques

Nous avons la même observation dans les deux cas

Observation prise après 1 h

Une œuf exposés



une œuf non exposés



Fig III.20 Observation Echantillons après 1h

Les Remarques

On remarque une augmentation de la taille des bulles à la surface de l'œuf par rapport aux deux expériences précédentes

Observation prise après 1.30 h

Une œuf exposés



une œuf non exposés



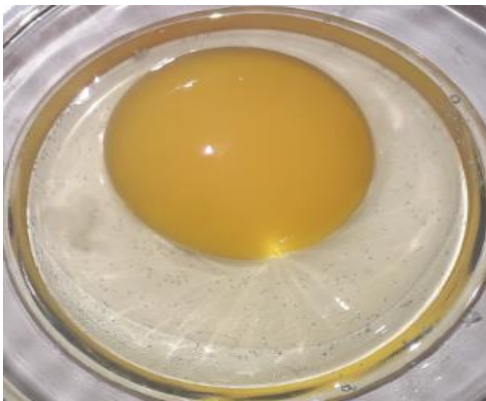
Fig III.21 Observation Echantillons après 1.30h

Les Remarques

On remarque une augmentation de la taille des bulles à la surface de l'œuf au fur et à mesure que la surface du jaune non exposé sèche

Observation prise après 1.45 h

Une œuf exposés



une œuf non exposés



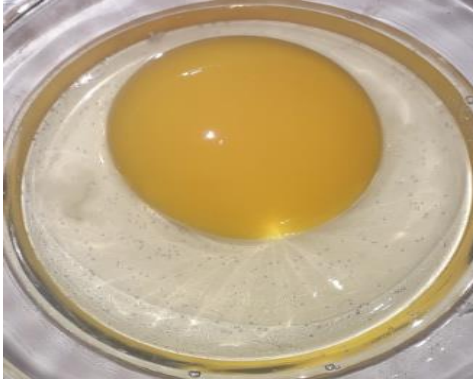
Fig III.22 Observation Echantillons apres 1.45 h

Les Remarques

Nous avons la même observation dans les deux cas

Observation prise après 2 h

Une œuf exposés



une œuf non exposés



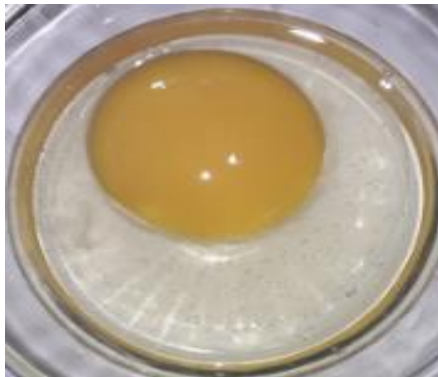
Fig III.23 Observation Echantillons après 2 h

Les Remarques

On remarque la distribution des bulles à la surface de l'œuf exposé et leur espacement est clair
Quant aux non-exposés, on remarque l'abondance de bulles à la surface de l'œuf et sa convergence

Observation prise après 2.30 h

Une œuf exposés



une œuf non exposés



Fig III.24 Observation Echantillons après 2.30 h

Les Remarques

On remarque que la taille des bulles a augmenté dans une taille plus grande que dans les cas précédents, avec le séchage du jaune d'œuf, qui n'était pas clairement exposé

Observation prise après 3h

Une œuf exposés



une œuf non exposés



Fig III.25 Observation Echantillons après 3 h

Les Remarques

Le début du séchage de la surface du jaune d'oeuf exposé

- Conclusions des observations

l'influence des champs électromagnétiques émis par des portables téléphoniques sur La cohérence et l'harmonie de la composition du contenu en œufs

III.4. La cellule TEM

La cellule Transverse Electromagnétique est une ligne de transmission de forme rectangulaire contenant une plaque métallique appelée 'septum', parallèle au champ E et plus étroite que les plaques métalliques extérieures. Cette cellule est capable de générer un champ électrique et magnétique, uniformes et perpendiculaires (mode TEM), dans une zone dite de test, encore appelée volume d'essai .La bande de fréquence, dans laquelle la cellule est capable de créer une onde TEM, dépend directement de ses dimensions transverses

La Fig III.26 (a) et (b) comparent l'impulsion incidente (en sortie du générateur), réfléchi par la cellule TEM et transmise a la cellule TEM pour des impulsions rectangle et bipolaire de durée 1.2 ns, de temps de montée de 800 ps et des amplitudes de champ électrique atteignant ~140 kV/m. Pour les deux impulsions, le signal réfléchi par la cellule TEM est très faible montrant que ce dispositif est adapte pour l'étude des champs de l'ordre de la nanoseconde. [42]

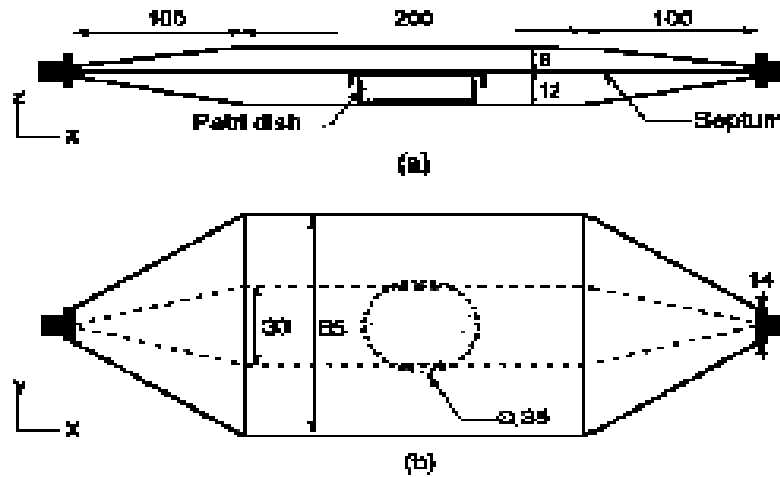


Fig III.26: Représentation d'une cellule TEM. (a) vue de profil avec une boîte de Petri entre le septum et l'un des murs métalliques. (b) vue de dessus avec la boîte de Petri [43].

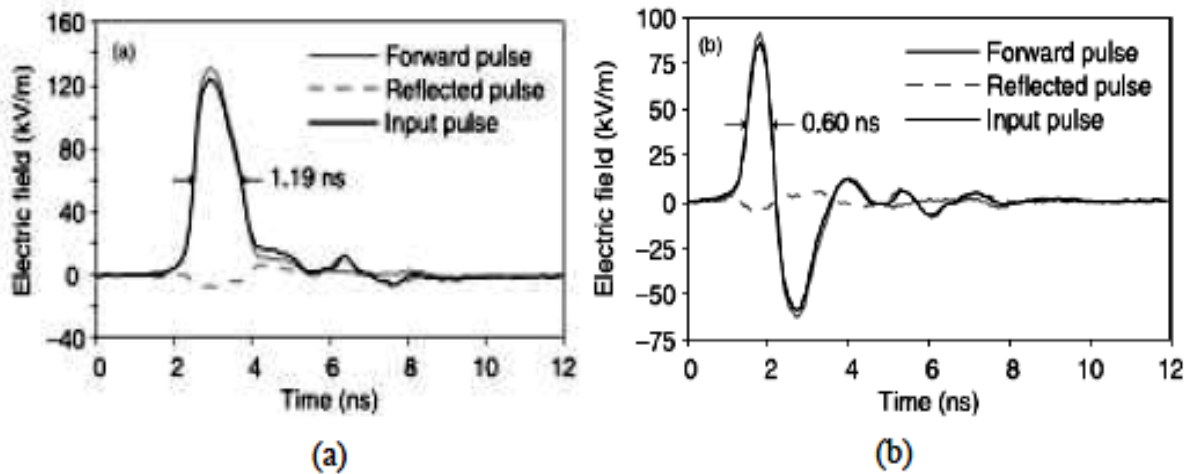


Fig III.27: Comparaison des champs incident en sortie du générateur (forward pulse), réfléchi par la cellule TEM (reflected) et transmis à la cellule TEM (input) (a) impulsion rectangulaire. (b) impulsion bipolaire, de durée 1.2 ns de temps de montée de 800 ps et d'amplitude ~140kV/m [43].

La cellule TEM peut aussi s'utiliser ouverte, pour des expositions avec microscope par exemple. Ce système est une ligne TEM triplaquée ouverte sur les côtés. Il permet une meilleure efficacité du système de thermorégulation. [44]

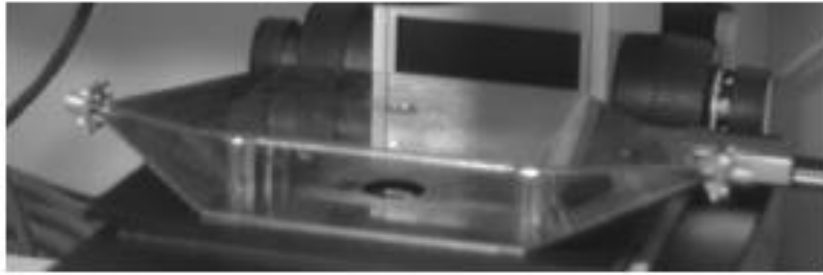


Fig III.28: Cellule TEM ouverte (ou ligne triplaquée) pour microscope, et sa modélisation .[44]

De plus, l'absence de plaques latérales sur les côtés diminue la déformation des lignes de champ, entraînant ainsi une augmentation du volume d'essai par rapport à la cellule fermée

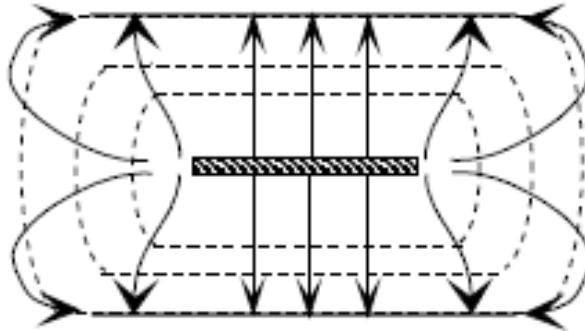


Fig III.29: Cellule TEM ouverte : ligne triplaquée .[44]

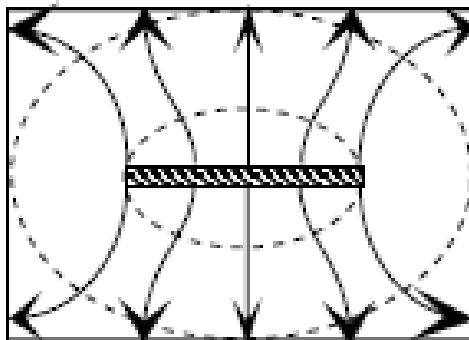


Fig III.30: Cellule TEM fermée .[44]

Cette structure ne rayonne pas. L'énergie se propage le long de la ligne pour être dissipée dans une charge.

Enfin, ce système d'exposition a la particularité d'être adapté sur une très large bande de fréquence.

III.4.1 Le principe de la TEM :

Le principe de la mesure en cellule *TEM* consiste à positionner le composant à tester en parallèle à une plaque conductrice, le *septum*, entre lesquels le champ électromagnétique se propagera selon le mode transverse électromagnétique. La conception de la cellule est basée sur une enceinte blindée selon le principe de la cage de Faraday. Généralement, le composant à tester est orienté vers l'intérieur de la cellule et est monté sur un *PCB* dont la couche de cuivre coté composant est un plan de masse. De cette manière, et une fois en contact avec la cellule, le blindage est complet autour du composant permettant ainsi de s'affranchir des effets de champs extérieurs. Il existe des cellules de différentes tailles et certaines permettent la mesure jusqu'à des fréquences légèrement supérieure à *1GHz*. Dans certains cas, et au vu de la bonne répartition des modes transverses magnétique *TM* et électrique *TE*, la cellule *TEM* est une bonne alternative à des sondes de champs proches mobiles que nous avons vues précédemment [FFI01]. L'inconvénient général de ce type de mesure reste le faible coefficient de couplage entre le septum de la cellule et le composant sous test. Ce paramètre est fortement lié à la taille du composant qui est très inférieure à la taille du septum. Pour des applications plus hautes fréquences l'utilisation de cellule *Gigahertz TEM (GTEM)*, de dimensions plus importantes en comparaison à la cellule *TEM*, permet d'atteindre des fréquences jusqu'à *24 GHz*. Pour s'affranchir des résonances *HF* celle-ci dispose d'absorbants pyramidaux identiques à ceux des chambres anéchoïdes. La Fig III.31 montre ces deux types de cellules [45]

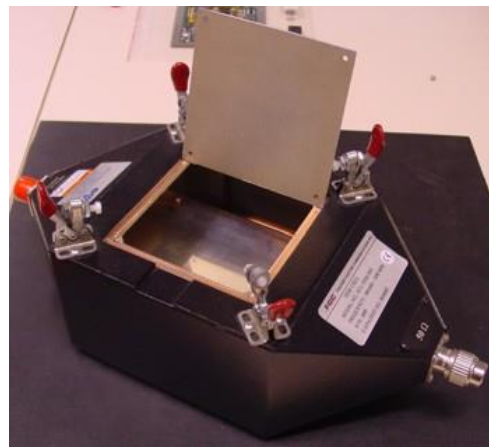


Fig III.31. Photographies des cellules *GTEM* (à gauche) et *TEM* (à droite). [45]

La Fig III.31 schématise le principe de la mesure en cellule *TEM* et illustre les résultats de simulation 3D des densités de courant induit sur le septum lors du fonctionnement du composant

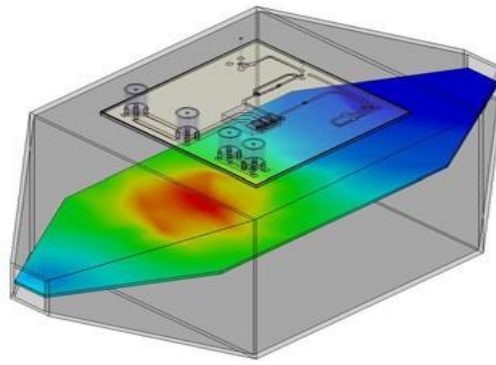


Fig III.32. Schématisation et principe de la mesure en cellule TEM. [45]

La Fig III.32 schématise le principe de la mesure en cellule TEM et illustre les résultats de simulation 3D des densités de courant induit sur le septum lors du fonctionnement du composant.

Généralement, avec des cellules TEM classiques, l'orientation du composant sous test est modifiée pour pouvoir mesurer chaque composante du couplage. Pour éviter ces manipulations et permettre la mesure de toutes ces composantes, le développement de cellules.[45]

III.4.2- Exemple de mesures pratiquées en cellule TEM

a- Mesures en rayonnement

A titre d'illustration, nous avons mesuré le rayonnement à l'intérieur de la cellule, d'une boucle fermée de 10 cm de diamètre parcourue par un courant à une fréquence fixe de 100 MHz. S'agissant d'une petite boucle, seul le couplage en champ magnétique est effectif. La boucle est placée dans trois positions spécifiques représentées sur la figure III.33.

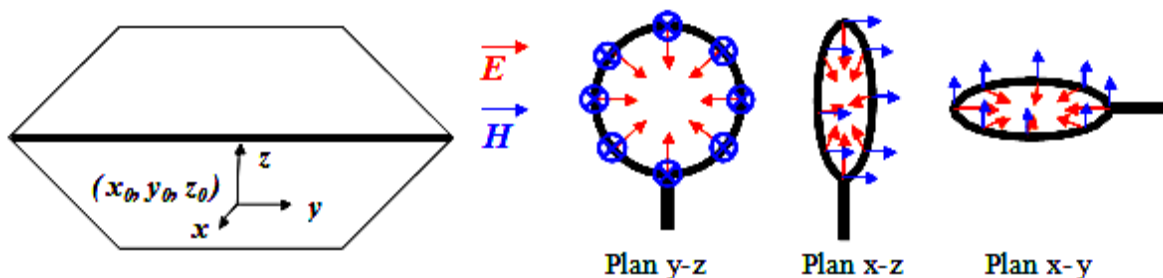


Fig III.33: Orientations de la boucle dans la cellule TEM [46]

Nous faisons coïncider successivement le plan de la boucle avec les trois plans orthogonaux définis par le repère orthonormé associé à la cellule. En nous attachant uniquement au champ magnétique généré par la boucle, nous voyons qu'en plaçant la boucle dans le plan y-z, le champ magnétique ne possède qu'une composante en x. Ainsi, le champ est parfaitement transversal au plan du septum et orthogonal à la direction de propagation. La totalité du champ peut donc être mesurée.

Nous avons ensuite positionné la boucle dans le plan x - z . Dans ce cas, le champ magnétique est également transversal au plan du septum mais parallèle à la direction de propagation. Il ne possède donc aucune composante en x . Ainsi, le champ électromagnétique ne peut être mesuré. Il en est de même pour la troisième position testée, pour laquelle le champ est orthogonal au plan du septum et ne possède aucune composante en x .

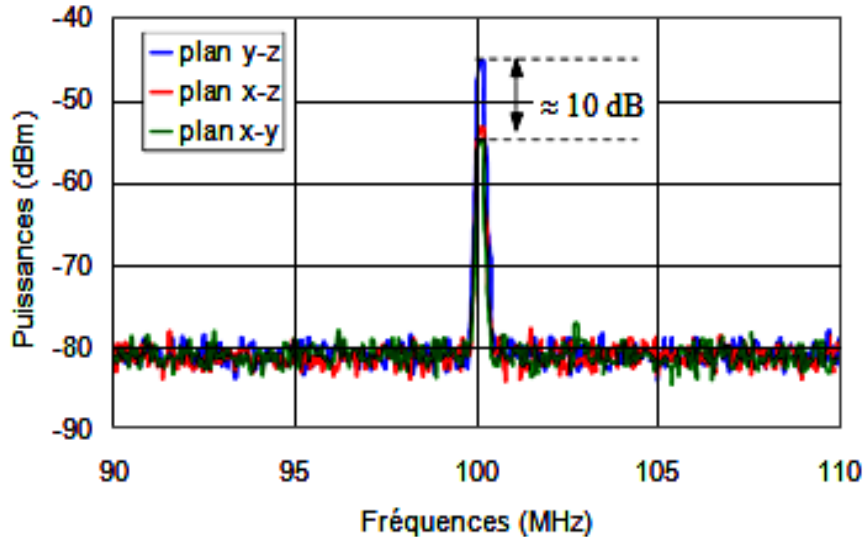


Fig III.34 : Représentation des tensions mesurées en fonction de l'orientation de l'équipement. [46]

Pour chaque position, nous avons mesuré la puissance à l'une des extrémités du septum, correspondant à la tension induite ramenée sur 50 Hz. Les résultats sont présentés figure III.34.

Dans la mesure où les dimensions de la boucle sont très petites devant la longueur d'onde, son efficacité de couplage est très faible. Les puissances recueillies sont donc très faibles.

Cependant, ce niveau de rayonnement est suffisant pour observer l'impact de la position de la boucle sur les tensions induites. En effet, les résultats obtenus en positionnant la boucle dans les plans x - y et x - z (courbes verte et rouge) présentent des niveaux maximums très similaires de l'ordre de -55 dB. En revanche, nous notons une différence d'environ $+10$ dB entre ces valeurs et la valeur recueillie en plaçant la boucle dans le plan y - z , orientation pour laquelle le champ magnétique est dans la direction de l'axe x . [46]

b- Mesures en immunité

Des mesures en immunité ont également été effectuées sur cette boucle. Les mêmes configurations ont été testées mais cette fois nous avons alimenté le septum à l'une de ses extrémités. Nous avons utilisé un transformateur de courant pour relever le niveau de courant induit dans la boucle fermée en fonction de son orientation. Les puissances correspondants au courant induit ramené sur 50 sont représentées figure III.35.

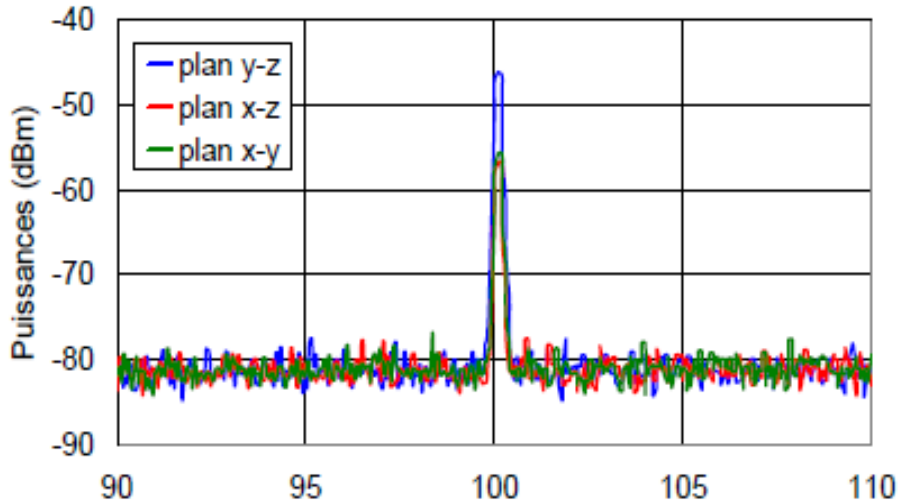


Fig III.35 : Représentation des courants induits en fonction de l'orientation de l'équipement .[46]

De manière réciproque, ces résultats montrent que la boucle est sensible au champ magnétique présent dans la cavité, uniquement dans le cas où l'orientation du champ magnétique s'avère orthogonale au plan de la boucle.

Afin d'illustrer les phénomènes apparaissant à proximité des parois, nous avons déplacé la boucle dans un plan transversal au septum. Ainsi nous l'avons fait glisser le long de l'axe x sans modifier sa position selon les axes y et z .

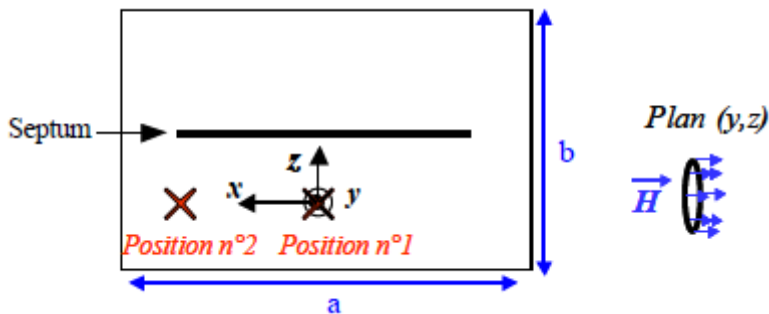


Fig III.36 : Représentation des configurations testées .[46]

La boucle a été positionnée de sorte que son plan soit parallèle au plan y - z . Sans modifier son orientation, nous avons choisi deux positions différentes le long de l'axe x . L'une au centre du volume d'essai et l'autre à proximité d'une des parois latérales.

Pour ces deux positions, nous avons recueilli la puissance correspondant au courant induit le long de la boucle ramené sur 50 , lorsqu'une puissance de 4 Watts est injectée sur le septum à 100 MHz. Les résultats des mesures pour les deux positions sont donnés figure III.37.

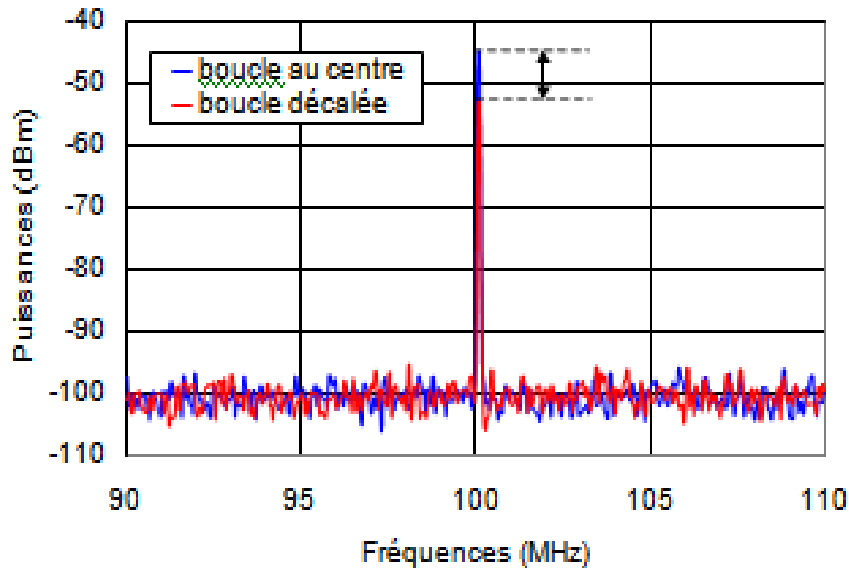


Fig III.37: Représentation des courants induits en fonction de la position de la boucle le long de l'axe x .[46]

Nous constatons un décalage de 10 dBm entre les deux signaux recueillis à 100 MHz. Ainsi, ces résultats mettent en évidence la notion de volume d'essai et montrent qu'à proximité des parois la composante prépondérante du champ magnétique au centre de la cavité, décroît fortement.

En pratique, afin de garantir l'homogénéité du champ dans la zone d'essai, l'utilisation des cellules TEM est préconisée pour tester des équipements pouvant s'inscrire dans un tiers de la largeur de la cellule et un tiers de l'espace situé entre le septum et la paroi inférieure. .[46]

Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à une synthèse des travaux effectués et les résultats de l'expérimentation sur l'influence des champs électromagnétiques, la réalisation des essais expérimentaux constitue une étape importante pour connaître les effets des rayonnements des champs électriques et magnétiques in vivo et en vitro. L'objectif est de caractériser les effets des champs au niveau macroscopique sur la constitution de la matière et microscopiques au niveau cellulaire.

Les essais sont effectués sur une plante appelée ray-grass et pour la génération des ondes, une antenne et Un générateur d'une bande de fréquence 1800 MHz sont utilisés et pour la visualisation on sert d'un microscope optique ayant trois grossissements : x4, x10, x40.

On a divisé les godets en deux parties : des godets de ray-grass, exposés aux ondes, et des godets non exposés aux ondes. Les plantes témoins non exposés aux ondes sont préparées pour avoir une base de référence et de comparaison des résultats d'influence, ces plantes sont soumises aux mêmes conditions que les autres plantes sauf l'exposition puisque ces plantes ne sont pas exposées.

A travers cette expérience, les résultats qui sont présentés sont la suite d'une exposition de 25 jours ou nous avons pu observer des différences dans la croissance des godets exposés et non exposés.

Les godets non exposés présentent tous une croissance homogène, ce n'est pas le cas pour les godets soumis au rayonnement électromagnétique. La croissance du ray-grass anglais y est en effet inégale mais relativement symétrique sur les plantes exposées.

Les facteurs probables qui influent sur la croissance des plantes exposées se résument en trois facteurs à savoir, le stress ; l'exposition aux ondes a provoqué, chez les graines qui ont poussé en retard un stress, elles auraient alors produit des protéines de stress, ce qui aurait influé sur leur germination. L'émission de ces protéines de stress peut expliquer un dysfonctionnement dans la production des auxines (hormones de croissance des plantes).

Le deuxième facteur et l'influence sur la division cellulaire qui veut dire que la division cellulaire est impactée par les ondes électromagnétiques, on peut interpréter cette différence de germination et de croissance, entre échantillons témoins et traités, par une action directe du champ électromagnétique sur les divisions cellulaires. Les petites cellules (les cellules germinatives) ne savent pas germer si elles sont dans un champ électromagnétique d'assez haute intensité. Si elles sont protégées, elles savent germer. Les graines seraient ainsi incapables de se diviser et de synthétiser toutes les protéines nécessaires à la croissance sous l'influence du rayonnement.

Enfin L'échauffement provoqué par le rayonnement électromagnétique modifie la croissance de la plante.

Par la suite, on a donné un aperçu sur la cellule Transverse Electromagnétique TEM qui sert à la génération d'un champ électrique et magnétique, uniformes et perpendiculaires dans une zone dite de test, encore appelée volume d'essai.

CHAPITRE 4

Modélisation en vue d'étude numériques de l'influence des champs électromagnétiques sur les êtres vivants

CHAPITRE 4

Modélisation en vue d'étude numériques de l'influence des champs électromagnétiques sur les êtres vivants

INTRODUCTION :

La première partie de ce chapitre sera dédiée à la définition des grandeurs fondamentales liées à la modélisation de la cellule.

Nous présenterons ensuite différentes approches (analytique, électrique) permettant de modéliser le comportement de la cellule notamment en termes de potentiel transmembranaire.

Nous décrirons ensuite la méthode numérique proposée dans ces travaux, basée sur une approche quasistatique et la méthode des différences finies.

Nous terminerons le chapitre par Présentation des générateurs d'impulsion

IV.1. Définition des grandeurs électromagnétiques

IV.1.1 Champ et potentiel électrique

Le champ électromagnétique, constitué lui-même par la donnée de deux champs vectoriels, le champ électrique $\vec{E}=\vec{E}(\vec{r},t)$, qui s'exprime en volts par mètre ($V.m^{-1}$), et le champ magnétique $\vec{B}=\vec{B}(\vec{r},t)$, qui s'exprime en teslas (T).

- Un champ magnétique B variable engendre un champ électrique ;
- Un champ électrique E variable est source d'un champ magnétique.

Dans un problème général dépendant du temps, ce sont les équations de Maxwell qui régissent les phénomènes électromagnétiques. Elles couplent entre autre le vecteur champ électrique E avec un vecteur d'induction magnétique B en Tesla.

Les équations IV-1, IV-2, IV-3, IV-4 correspondent a la forme locale des équations de Maxwell exprimées dans le vide.

$$\text{Equation de Maxwell-Faraday} \quad \text{rot} \vec{E} = - \frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Equation de Maxwell-Ampère} \quad \text{rot} \vec{H} = \vec{j} - \frac{\delta \vec{D}}{\delta t} \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{Equation de Maxwell-Gauss} \quad \text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{IV.3})$$

$$\text{Equation de conservation du flux} \quad \text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

J : vecteur densité de courant de conduction (A.m-2)

H : vecteur champ magnétique (A.m-1)

B : vecteur induction magnétique (Tesla)

E : vecteur champ électrique (V.m-1)

D: vecteur densité de flux électrique (C.m-2)

ρ : densité de charge électrique en C/m3. [47]

IV.1.2. Comportement diélectrique de milieu biologique

La permittivité diélectrique est une grandeur macroscopique régit par des phénomènes a l'échelle microscopique. Sous l'application d'un champ électrique, plusieurs mécanismes de polarisation peuvent exister au sein même d'un diélectrique. Ces mécanismes résultent de la force appliquée sur les dipôles électriques présents dans la matière. Il en résulte que la permittivité relative ϵ_r est une grandeur complexe qui dépend de la fréquence. Elle peut se décomposer en une partie réelle et une partie imaginaire (équation IV-13), la partie imaginaire traduisant les pertes diélectriques du matériau

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_r(\omega) - j \epsilon''(\omega) \quad (IV.5)$$

Chacun des mécanismes de polarisation influe sur le comportement diélectrique des milieux, traduisant une accumulation ou une dissipation d'énergie. La figure **Fig IV.1** présente évolution typique de la permittivité relative d'un milieu biologique en fonction de la fréquence. Elle illustre la contribution de différents mécanismes de polarisations au sein d'un même diélectrique, excité par un champ de fréquence variable. [34]

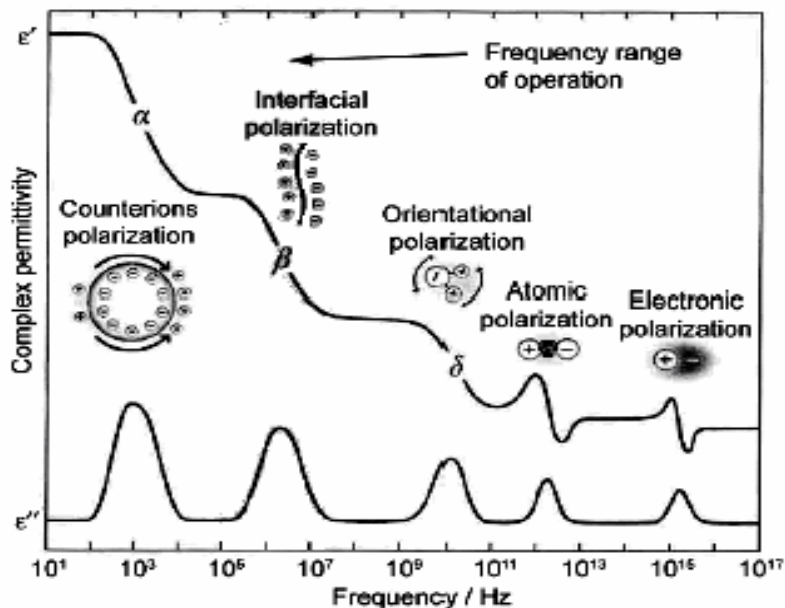


Fig IV.1 : Comportement fréquentiel de la permittivité et phénomènes de polarisation associés [48].

1.3 Permittivités et conductivité complexe [34]

IV.1.3 Permittivités et conductivité complexe

La permittivité diélectrique est une grandeur qui va dépendre de la fréquence. En effet les molécules d'eau et les têtes polaires des phospholipides pour ne citer que celles-ci, présentent un fort caractère dipolaire lie a la polarisation par orientation. Un modèle simple mais réaliste pour traduire cette dépendance repose sur le modèle de DEBYE. Ce dernier permet d'exprimer dans le domaine fréquentiel la permittivité relative sous la forme (équation IV -6) :

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \tag{IV.6}$$

avec

- ϵ_s , la permittivités relative aux basses fréquences,
- ϵ_∞ , la permittivités relative aux hautes fréquences
- τ , le temps de relaxation

τ définit le temps au bout duquel le milieu se remet en état d'équilibre lorsque qu'il est soumis a une variation de champ électromagnétique. A partir de cette grandeur, il est également possible de définir la fréquence de relaxation qui traduit la fréquence a partir de laquelle les dipôles présents dans le milieu ne parviennent plus a suivre les oscillations du champ auquel ils sont exposes.

Il est alors possible d'exprimer cette permittivité équivalente sous la forme (équation IV.7) :

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon} \tag{IV.7}$$

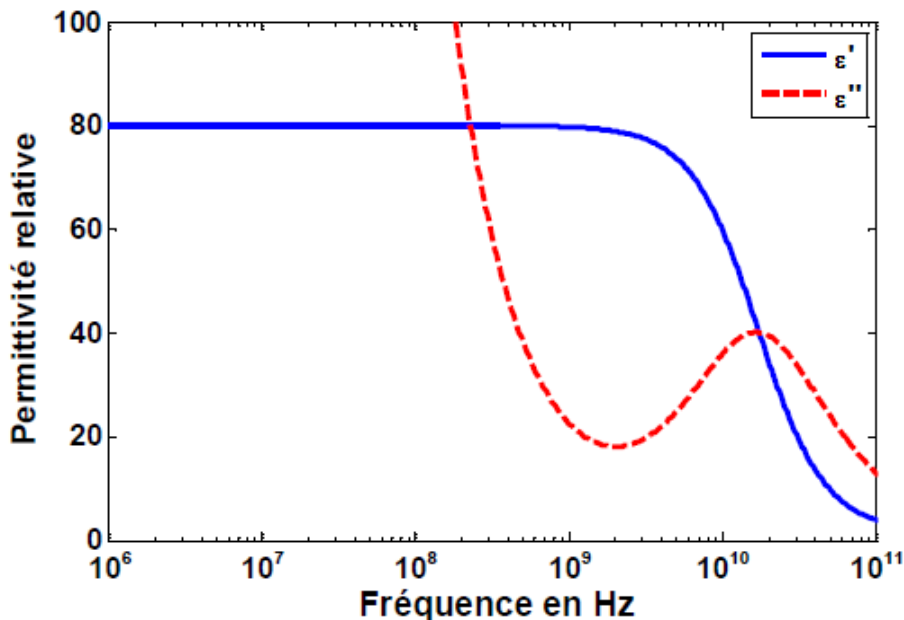


Fig IV.2: Permittivité relative équivalente complexe (parties réelle et imaginaire)
 Modèle de Debye et conductivité électrique : $\epsilon_s = 81$; $\epsilon_\infty = 1.8$; $\tau = 9.4$ ps ; $\sigma = 1$ S/m [34]

Il est possible de représenter la partie réelle et imaginaire de cette permittivité relative équivalente (Figure IV-2). Les pertes dans le milieu sont associées a la partie imaginaire de cette grandeur. Deux phénomènes distincts apparaissent. Le premier est lie a la conductivité électrique du milieu et intervient sur la partie basse fréquence avec une variation en $1/\omega$. Le second est lie aux pertes diélectriques, c'est-a-dire a la dispersion représentée par le modèle de Debye, et passe par un maximum a une fréquence supérieure a 10 GHz. Ce phénomène commence a être significatif a des fréquences inférieures aux GHz. Cela signifie que dans la partie basse du spectre, c'est le comportement conducteur du milieu biologique qui prédomine, alors qu'en haute fréquence, le comportement est principalement diélectrique. [34]

IV.1.4 Ordre de grandeur des dimensions et propriétés électromagnétiques des milieux considérés

La cellule possède des dimensions variables du fait de la diversité des cellules qui composent l'organisme. Son diamètre peut varier entre plusieurs μm a $100 \mu\text{m}$ pour les cellules eucaryotes. Sa membrane plasmique possède une épaisseur autour de 7.5 nm . Le noyau quand a lui possède un diamètre de l'ordre de $5 \text{ a } 7 \mu\text{m}$. C'est l'organelle la plus grosse du cytoplasme. L'enveloppe nucléaire a une épaisseur autour de 35 nm . [34]

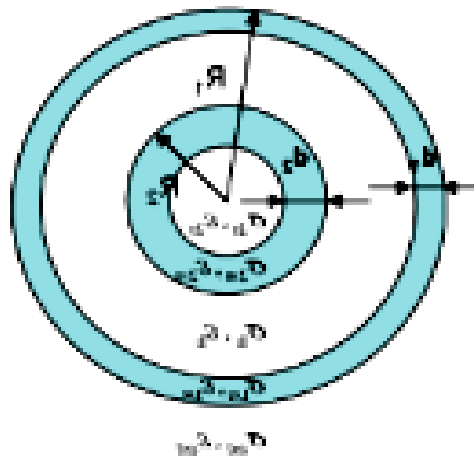


Fig IV.3 : Modèle de cellule avec deux membranes (la membrane plasmique et la membrane de l'organelle). [34]

	Rayon ou épaisseur (um)	Permittivités	Conductivité Electric(s/m)
Milieu Extracellulaire		67-80	0.141.2
Membrane plasmique	0.005-0.007	2-12	$0-10^{-5}$
Cellule	3-10	60-80	0.12-1.2
Membrane organelle	0.005-0.04	5-22.8	$10^{-9}-10^{-2}$
Orignal	0.5-5	80-120	0.18-2

Tab IV.1: Caractéristiques des cellules biologiques. [34]

Concernant les caractères dispersifs des diélectriques (eau ou lipide), des paramètres ont été définis pour traduire le comportement des milieux en fonction de la fréquence. Ces modèles sont basés sur le modèle de Debye, présenté précédemment, ou sur une combinaison de modèle de Debye et des modèles légèrement plus complexes, comme les modèles de Cole-Cole qui s'exprime sous la forme (équation IV.8) :

$$\epsilon_{\text{Cok-Cok}} = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (\text{IV.8})$$

Avec : α , prend une valeur entre 0 et 1

ϵ_s , la permittivité relative aux basses fréquences,

ϵ_{∞} , la permittivité relative aux hautes fréquences

τ , le temps de relaxation

IV.2 Modélisation de la cellule

Les cellules biologiques sont des systèmes d'une extrême complexité.. Une représentation schématique d'une cellule eucaryote illustre la présence de nombreuses organelles intra cellulaires **Fig IV.4 (a)**. Pour analyser les effets des champs électromagnétiques à l'échelle de la cellule. Le plus basique de ces modèles est celui d'une sphère **Fig IV.4 (b)**. La surface de cette dernière représente la membrane plasmique de la cellule. Elle possède une épaisseur de quelques nanomètres et elle délimite la région interne et externe de la cellule. Le diamètre est de l'ordre de la dizaine de micromètre pour une cellule classique. Les milieux sont considérés homogènes. [34]

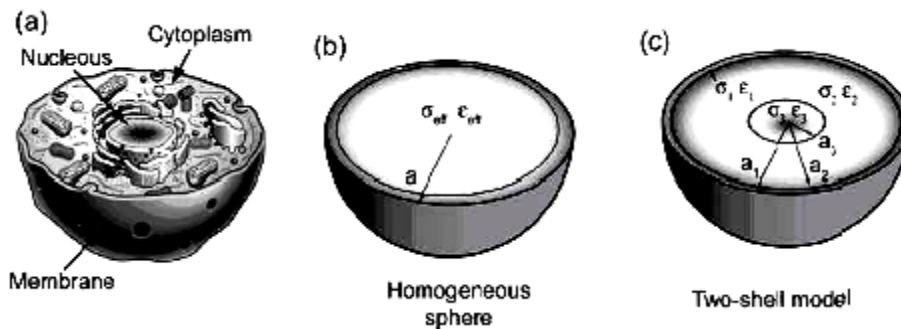


Fig IV.4: Schéma d'une cellule eucaryote : (a) modèle complet ; (b) modèle simplifié homogène ; (c) modèle avec une organelle [34]

Un modèle plus évolué intègre une organelle à l'intérieur de la cellule. Cette organelle peut être elle aussi sphérique et concentrique pour les modèles les plus simples **Fig IV.4 c)**. Le modèle de cellule le plus couramment employé avec les études d'impulsions μs - ms sont des modèles de cellules composées uniquement d'une membrane plasmique et un cytoplasme homogène possédant les caractéristiques physiques moyens en termes de caractéristiques électromagnétiques.[33]

IV. 2. 1. Champ électrique et potentiel transmembranaire

IV. 2.1.1 Approche analytique

Dans le but d'étudier l'évolution spatiale et temporelle du potentiel transmembranaire, des modèles analytiques ont été développés et ont joué un rôle important dans la compréhension des effets des impulsions électromagnétiques sur la cellule .Le modèle de Schwan permet d'estimer le potentiel transmembranaire Ψ pour une cellule sphérique, induit par un champ E et s'exprime sous la forme

$$\Delta\Psi_m = f E R \cos\theta \quad (IV.9)$$

Avec E , l'amplitude du champ électrique

R , le rayon de la cellule

θ , l'angle forme par le champ et le rayon qui passe par le point dont on souhaite déterminer le potentiel transmembranaire

f , le facteur qui tient en compte des dimensions et des propriétés électriques de la cellule telles que la permittivité et la conductivité du milieu extra σ_e , et intra cellulaire σ_i , et la conductivité de la membrane plasmique σ_m . Ce facteur s'exprime sous la forme

$$f = \frac{3\sigma_c[3d+(R^2\sigma_i+(3d^2R-d^3)(\sigma_m-\sigma_t)]}{2R^3(\sigma_m-2\sigma_c)\left(\sigma_m+\frac{\sigma_i}{2}\right)-2(R-d)^3(\sigma_c-\sigma_m)(\sigma_i-\sigma_m)} \quad (IV.10)$$

Lorsque la conductivité de la membrane ne peut être négligée, la valeur du facteur f est alors inférieure a 1.5 et lorsqu'elle est très inférieure a celle du milieu extra cellulaire et du cytoplasme alors la valeur du facteur f tend vers 1.5. Le potentiel s'exprime alors sous la forme

$$\Delta\Psi_m = 1.5 E R \cos\theta \quad (IV.11)$$

D'après cette expression le potentiel induit est égal a 0.75 V pour une cellule de rayon 5 μm et un champ électrique applique de 1 kV/cm.

Le rapport entre les conductivités des membranes et des milieux extra et intra cellulaires font que la membrane peut être vue comme une capacité. La variation temporelle du potentiel transmembranaire peut être exprime par analogie au comportement d'une capacité sous la forme

$$\Delta\Psi_m = 1.5 E R \cos\theta(1 - e^{-t/\tau_m}) \quad (IV.12)$$

Le temps de charge (τ_m) de la membrane plasmique est défini par l'équation

$$\tau_m = \frac{Rcm}{\frac{2\sigma_i\sigma_c}{2\sigma_c+\sigma_i} + \frac{R}{d}\sigma_m} \quad \text{ou} \quad \tau_m = \frac{R\epsilon m}{2d\frac{2\sigma_i\sigma_c}{2\sigma_c+\sigma_i} + R\sigma_m} \quad (IV.13)$$

Avec R , le rayon de la cellule d , l'épaisseur de la membrane σ_m , σ_i , σ_e et ϵm , les propriétés électromagnétiques des différents milieux (m la membrane, i le milieu intra cellulaire et e le milieu extra cellulaire) [34]

IV.2.1.2 Approche circuit électrique

Comme décrit précédemment, une analogie peut être faite entre une capacité électrique et la membrane plasmique de la cellule séparant deux milieux conducteurs, en particulier lorsque la cellule (son modèle électrique) est soumise a des impulsions.

De nombreux modèles se basent donc sur cette analogie pour définir un circuit électrique équivalent d'une cellule sphérique dans le but de déterminer le potentiel transmembranaire induit par l'application d'un champ électrique [35].

Deux modèles de circuit électrique équivalent a une cellule en suspension sont représentés sur la **Fig IV.5** La suspension est le milieu qui contient les cellules a exposer dans lequel deux électrodes sont plongées permettant d'appliquer un champ électrique. Dans le premier modèle, **Fig IV.5** (a), issu de travaux du groupe de K. Schoenbach, la suspension est représentée par une capacité C_s et une résistance R_s mises en parallèle. La capacité caractérise le condensateur constitue des deux électrodes et la suspension, et la résistance est liée a la présence des ions dans la solution. De façon analogue, le cytoplasme est caractérisé par une résistance R_c , alors que la membrane est représentée par une capacité C_m . La membrane est aussi le siège d'échange via des canaux ioniques qui sont définis par des admittances en parallèle dont les valeurs vont dépendre respectivement de potentiel V_1, V_2, \dots, V_i .

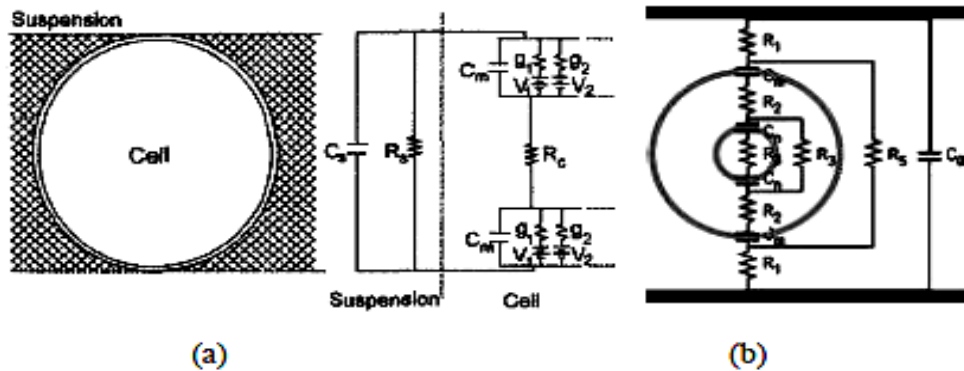


Fig IV.5 Circuit électrique équivalent a une cellule en suspension : (a) modèle simple membrane ; (b) modèle avec organelle concentrique. [34]

Sur le deuxième modèle, une organelle concentrique est ajoutée au modèle de cellule.

Comme sur le modèle précédent, les milieux sont représentés par des résistances et les membranes par des capacités. Dans ce dernier modèle, les canaux ioniques ne sont pas pris en compte. Les membranes, aussi bien plasmique que nucléaire, sont ainsi considérées comme purement diélectrique ($\sigma=0$).

Le type d'impulsion appliqué va orienter le choix du modèle. Pour les impulsions longues, typiquement de durée μs et ms , le modèle simple membrane (**Fig IV.5** (a)), représentatif d'un liposome (vésicule artificielle composée d'une double couche lipidique) peut être retenu. Pour les impulsions courtes, typiquement les nano pulses, la membrane n'a pas le temps de se charger complètement et le champ électrique peut franchir la membrane plasmique et modifier le potentiel transmembranaire des organelles. Il est alors nécessaire d'utiliser un modèle de cellule non plus de type liposome mais des cellules présentant une organelle (**Fig IV.5** (b))[36] [37]

IV. 2.2 Densité de pores

La modification du potentiel transmembranaire des cellules peut entraîner une électroporation ou électro-perméabilisations des membranes. Pour quantifier de façon théorique ces phénomènes, de création de pores ou perméabilisations, une approche consiste à définir une densité de pore. Cette dernière doit être dépendante de la variable temps et du potentiel transmembranaire. Cette première technique est basée sur une approche analytique avec un modèle connu sous le nom d'équation de Smoluchowski.

IV. 2.2.1 Equation de Smoluchowski

La modélisation du phénomène d'électroporation doit traduire une phase de formation et d'expansion des pores, ainsi qu'une phase de réduction des pores, suivant les cas.

L'équation de Smoluchowski est une équation différentielle qui permet de déterminer la fonction densité de distribution de pores notée $n(r,t)$, où r est le rayon du pore. Cette grandeur correspond au nombre de pores présent par unité de surface de membrane. Il prend en compte aussi bien le grossissement que la contraction des pores.

Elle s'exprime sous la forme

$$\frac{dn(r,t)}{dt} = D_p \frac{d}{dr} \left(\frac{dn(r,t)}{dr} + \frac{n(r,t)}{kT} \frac{dE(r)}{dr} \right) + S(r,t) \quad (IV.14)$$

Avec :

r : rayon du pore

D_p : coefficient de diffusion

kT : énergie thermique

$S(r,t)$: terme de création de pores.

$E(r)$: énergie de formation du pore hydrophile qui s'exprime par l'équation

Ce modèle met en jeu différentes grandeurs dont un terme de source $S(r,t)$ qui traduit la création de pores. L'énergie nécessaire à la création des pores $E(r)$ définit par :

$$E(r) = 2\pi\gamma r - \int_0^r 2\pi \Gamma(r^*) \cdot r^* \cdot dr^* + \left(\frac{C}{r}\right)^4 - \pi a_p V 2r^2 \quad (IV.15)$$

avec $(C/r)^4$: intervient dans la répulsion stérique des têtes lipidiques

γ : énergie par unité de longueur du périmètre du pore

Γ : énergie par unité de surface de la membrane intacte

V : PTM en V

a_p : propriété de la membrane ainsi que du milieu aqueux

L'équation peut être simplifiée en imposant certaines conditions.[34]

IV.2.2.2 Modèle asymptotique de l'équation de Smoluchowski

Si l'on considère que le rayon moyen des pores créés est d'environ 0.8 nm, que la présence de pores avec des rayons supérieurs est négligeable en raison de l'arrêt du phénomène d'expansion et enfin que la fermeture des pores est indépendante du potentiel transmembranaire, alors l'équation de Smoluchowski peut être simplifiée. Le modèle asymptotique de l'équation de Smoluchowski s'exprime sous la forme de l'équation

$$\frac{dn(t)}{dt} = A_0 e^{\frac{\delta c}{kT}} \left(e^{\frac{B}{kT}} \text{TMP}^2(t) - \frac{n(t)}{N_0} \right) \quad (\text{IV.16})$$

Avec :

$A_0 e^{\frac{\delta c}{kT}}$: densité de création de pores

kT : énergie thermique

B : paramètre d'électrolocation

N_0 : densité de pores lorsque potentiel transmembranaire est nul [34]

IV.2.3 Modélisation 2D - 3D

Différentes méthodes ont été utilisées pour traiter des problèmes nombreux et variés. Concernant la modélisation à l'échelle de la cellule biologique, certaines de ces méthodes ont été appliquées à ce problème et vont être présentées succinctement. [34]

IV. 2.3.1 Circuit électrique distribué

La méthode des réseaux distribués (Transport Lettice Méthode ou TLM, en anglais), repose sur un réseau cartésien et sur la définition de circuits électriques équivalents qui sont distribués spatialement sur le réseau, comme illustre sur la Fig IV.6 d'après D. A. Stewart . Dans cet article, les auteurs ont considéré un plan de coupe d'une cellule représenté par la Fig IV.6 (a) ou nous pouvons distinguer en gris un quart de cercle délimitant le milieu intracellulaire du milieu externe. Ce plan est décomposé en segments et à chacun de ces segments est associé un modèle local de circuit électrique. Ainsi, trois modèles locaux ont été définis suivant le milieu qu'il représente. Les modèles locaux équivalents aux milieux intra cellulaire, extracellulaire et membranaire sont définis par M_i , M_e et M_m , respectivement (Fig IV.6(b)). Les modèles M_i et M_e sont composés par une capacité et d'une résistance mis en parallèle. Alors que le modèle M_m plus complexe prend en compte le potentiel et les canaux ioniques par la définition d'une source de tension (V_{ip}) et une source de courant ($I_m(t)$).

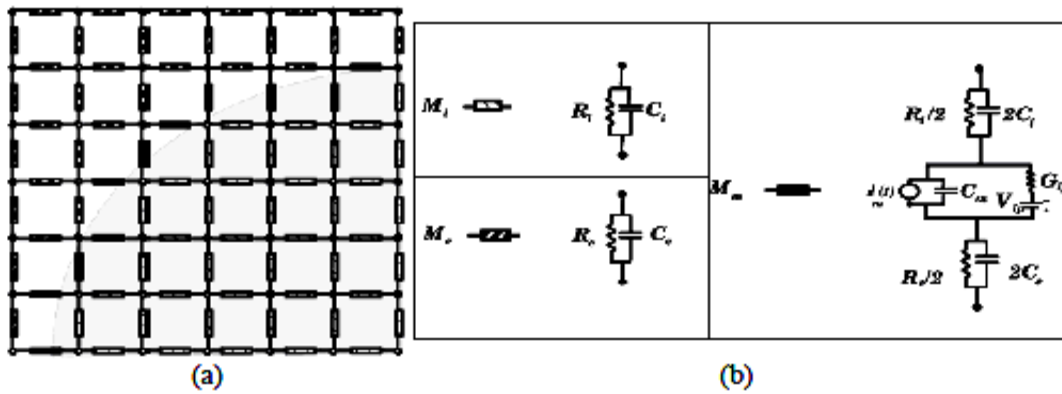


Fig IV.6: Réseau distribue du modèle de cellule, ainsi que les circuits équivalents aux modèles locaux. [34]

Par l'application des lois de Kirchhoff il est alors possible d'extraire les courants et les potentiels dans l'ensemble du réseau, a chaque nœud du réseau. Ce modèle électrique peut alors être couple au modèle asymptotique d'électrolocation permettant ainsi d'étudier l'évolution de la densité de pores dans la membrane. L'avantage de cette méthode est sa capacité à intégrer des modèles non linéaires, tels que la prise en compte de canaux ioniques ou encore le phénomène d'électro-poration.

Les travaux de T. R. Gowrishankar, en 2006, emploient également cette méthode pour étudier l'électroporation classique et celle du a des nsPEFs d'un modèle de cellule plus complexe, comportant plusieurs mitochondries, un réticulum endoplasmique et un noyau.

R. P. Joshi quant a lui a utilise un maillage cylindrique, qui apparait nettement mieux adapte pour les modèles de cellules sphériques (Fig IV.6).

IV.3 Méthodes numériques

IV.3.1 Méthode des différences finies

Les modèles que nous allons proposer dans la prochaine partie sont des modèles basés sur une cellule, en suspension aqueuse, placée entre deux électrodes auxquelles sont appliquées des impulsions nanosecondes. A ce stade, l'hypothèse sur laquelle est basée notre étude, est l'approximation des régimes quasi-stationnaires. Du fait des petites dimensions de la cellule par rapport aux longueurs d'onde associées aux fréquences qui nous intéressent, cette approximation est valable jusqu'à des fréquences de 150 GHz, donc bien au-delà des spectres des impulsions considérées qui ne vont atteindre que quelques GHz.

Nous allons maintenant nous intéresser aux grandeurs à déterminer et aux équations différentielles utilisées pour calculer ces grandeurs. La méthode utilisée pour résoudre ces équations est basée sur les différences finies.

IV.3.1.1 Equation du potentiel scalaire du champ électrique

Dans la mesure où les phénomènes de propagation peuvent être négligés, on ne traite pas le problème avec les équations de Maxwell-Faraday et Maxwell-Ampère on peut exprimer dans un milieu linéaire, homogène et isotrope, l'équation de Maxwell-Gauss sous la forme (IV-17) :

$$\text{Div } \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} = \rho \quad (\text{IV.17})$$

Sachant que le champ électrique peut s'exprimer comme le gradient d'un potentiel, on obtient l'équation IV -17

$$\text{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r (-\text{grad} V) = \rho \quad (\text{IV.18})$$

Dans le vide, il est alors possible d'en déduire une relation locale entre la distribution de charge et le potentiel qui est connu sous le nom de l'équation de Poisson. Dans une configuration sans charge d'espace, on obtient l'équation de Laplace. Ces équations ne peuvent être résolues de façon analytique que pour des cas simples. Il est alors nécessaire d'employer une méthode numérique, la plus fréquemment employée est la méthode des différences finies.

$$\Delta V = - \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (\text{IV.19})$$

$$\Delta V = 0 \quad (\text{IV.20})$$

Il est possible d'obtenir une forme générale de l'équation de Laplace. Partant de l'équation de Maxwell-Ampère et en utilisant le fait qu'un champ rotationnel est à divergence nulle, on obtient :

$$\text{div} (\text{rot } \vec{H}) = 0 \quad (\text{IV.21})$$

$$\text{div} \left(\vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \right) = 0 \quad (\text{IV.22})$$

On obtient l'équation IV.23-29 qui s'exprime sous la forme :

$$-\text{div} \left(\frac{d}{dt} (\varepsilon_0 \varepsilon_r \text{grad } V) \right) - \text{div} (\sigma \text{grad } V) = 0 \quad (\text{IV.23})$$

Cette équation permet de prendre en compte un milieu de conductivité et permittivité électrique, en intégrant une notion temporelle et par conséquent fréquentielle. C'est l'équation de base qui va servir à déterminer le potentiel à partir de son expression locale.

IV.3.1.2 Discrétisation des équations

IV.3.1.2.1 Potentiels électriques

La méthode mise en place va être présentée sur une configuration 2-D, c'est à dire que l'on considère le problème invariant suivant la troisième dimension de l'espace. La résolution est présentée en prenant un repère en coordonnées cartésiennes, mais cette méthode peut être aisément transposée en coordonnées cylindriques par exemple.

Si l'on considère l'équation de Laplace, dans sa formulation la plus simple, dans le plan xOy donne l'équation IV-24.

$$\frac{d^2V(x,y)}{dx^2} + \frac{d^2V(x,y)}{dy^2} = 0 \tag{IV.24}$$

Le Laplacien du potentiel scalaire correspond à la somme des dérivées secondes de ce même potentiel suivant chacune des dimensions de l'espace considéré. Un développement en série de Taylor nous permet d'exprimer la dérivée du premier et du second ordre de la fonction potentiel électrique V(x,y), sous la forme :

$$\frac{dV(x,y)}{dx} = \frac{V(x_0+\frac{\Delta x}{2},y)-V(x_0-\frac{\Delta x}{2},y)}{\Delta x} + \delta(\Delta^2) \tag{IV.25}$$

Donc la dérivée de la fonction V(x,y) au point x0 s'exprime en fonction des valeurs de la fonction situées de part et d'autre du point x0. De la même façon, il est possible d'exprimer la dérivée seconde sous la forme :

$$\frac{\partial^2V(x,y)}{\partial x^2} = \frac{V(x_0+\Delta x,y)-2V(x_0,y)+V(x_0-\Delta x,y)}{\Delta x^2} + \delta(\Delta x^2) \tag{IV.26}$$

Sur la base d'une discrétisation spatiale à pas constant suivant x et y ($\Delta x=\Delta y$) et en utilisant les indices (i, j) pour désigner les cellules suivant l'axe x et y, respectivement, on peut exprimer le potentiel V(i,j) sous la forme :

$$V(i,j) \approx \frac{V(i-1,j-1)+V(i+1,j)+V(i,j-1)+V(i,j+1)}{4} \tag{IV.27}$$

Les potentiels sont évalués aux intersections du maillage (trait plein), comme illustré sur la **Fig IV.7**. Le maillage en trait pointillé permet de déterminer la cellule/maille centrée sur le potentiel. Cette cellule/maille correspond à la surface sur laquelle est calculé un potentiel V moyen **Fig IV.7**.

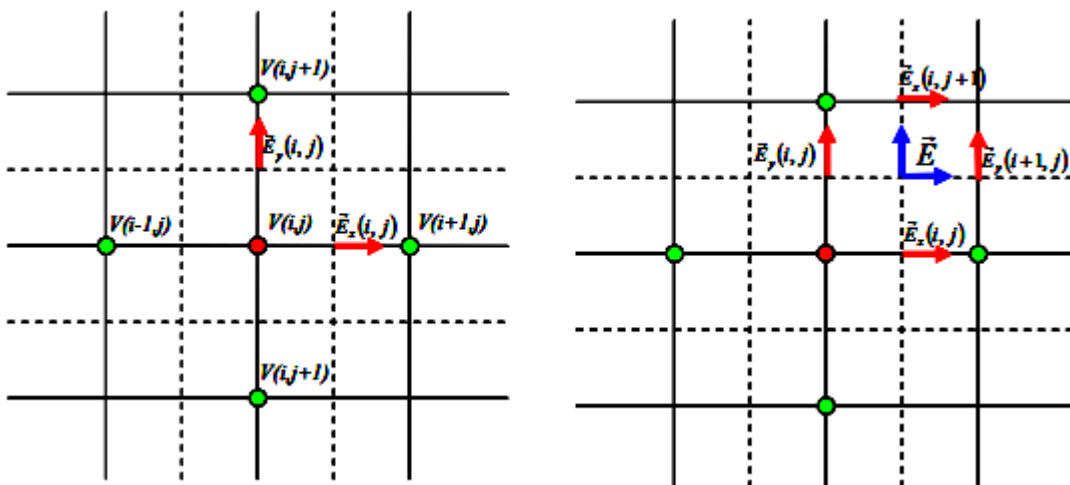


Fig IV.7: Calcul du potentiel V(i,j) (en rouge) à partir des quatre potentiels qui l'entourent (en vert). Le calcul du champ électrique (en rouge) est obtenu à partir de potentiel. Le champ électrique moyen est évalué au centre de la maille (en bleu).[34]

IV.3.1.2.2 Champs électriques

Les positions des champs électriques sont décalées par rapport aux potentiels, ceci est lié aux équations IV-28 et IV-29, qui permettent de les définir.

$$E_x(i,j) = \frac{V(i+1,j)-V(i,j)}{\Delta x} \tag{IV.28}$$

$$E_y(i,j) = \frac{V(i,j+1)-V(i,j)}{\Delta y} \tag{IV.29}$$

La position des champs électriques dans une cellule est représentée sur la **Fig IV.7**. Du fait de la position des composantes, on peut noter que le nombre de vecteurs ne sera pas identique entre le potentiel (dimension [nx, ny]) et les composantes de champ électrique (dimension [nx-1,ny] et [nx,ny-1] pour Ex et Ey respectivement). Les composantes de champ électrique ainsi positionnées peuvent être moyennées spatialement afin de se situer au centre de chaque maille. En effet, comme illustré sur la **Fig IV.7**, les composantes Ex et Ey ne sont pas calculées aux mêmes points sur le maillage. Il peut être utile de les calculer au même point avec une simple moyenne spatiale qui ramène les composantes au centre de la maille, c'est à dire à l'intersection des traits pointillés, comme illustré sur la **Fig IV.7**.

IV.3.1.2.3 Interface

Nous allons à présent prendre en compte la variation de la permittivité d'une maille à l'autre. Dans le schéma initial que nous avons retenu, il est affecté une permittivité et conductivité électrique à chaque maille, celles définies par le maillage en trait plein sur la **Fig IV.8**. Considérons maintenant une configuration avec deux milieux, comme illustrée sur la Figure **Fig IV.8**.

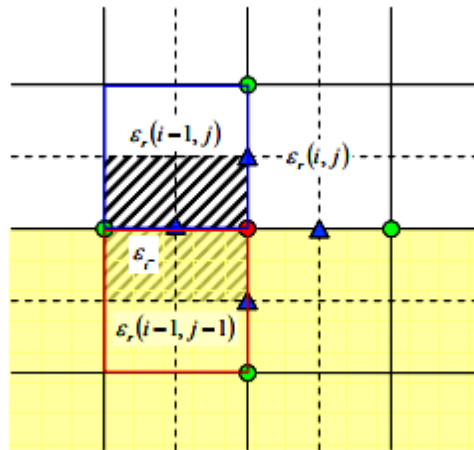


Fig IV.8: Chaque maille est affectée par une permittivité en son centre.

$\epsilon_r(i-1,j-1)$ délimitée par le contour rouge

$\epsilon_r(i-1,j)$ délimitée par le contour bleu

la surface hachurée correspond à la permittivité moyenne obtenue à partie de $\epsilon_r(i-1,j-1)$ et $\epsilon_r(i-1,j)$. [34]

En l'absence de charge d'espace (IV-38), la permittivité ne peut pas être sortie du terme divergence car elle n'est pas constante.

$$\text{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r (-\text{grad } V) = 0 \quad (\text{IV.30})$$

Le calcul va donc être décomposé. Une première étape consiste à calculer le gradient du potentiel en des points situés entre les potentiels, correspondant aux marqueurs en triangle sur la Figure IV.8. Dans une deuxième phase, le calcul de la divergence va être effectué en considérant une permittivité moyenne affectée à chacun des gradients définis précédemment.

Une des surfaces à prendre en compte pour ces permittivités moyennes est représentée en hachuré sur la Figure IV.8. La permittivité de la zone hachurée vaut :

$$\varepsilon_{\bar{r}} = \frac{\varepsilon_0 [\varepsilon_r(i-1, j-1) + \varepsilon_r(i-1, j)]}{2} \quad (\text{IV.31})$$

Les indices i traduisent le fait qu'il s'agit de la permittivité associée à la composante du gradient suivant l'axe x et à gauche de potentiel $V(i, j)$ (point rouge). Il est alors possible d'exprimer le potentiel $V(i, j)$ à partir des valeurs adjacentes de potentiels et des permittivités (et conductivité si nécessaire) associé aux différents potentiels. Finalement, on obtient :

$$V(i, j) = \frac{1}{4} \frac{\varepsilon_i V(i-1, j) + \varepsilon_i V(i+1, j) + \varepsilon_j V(i, j-1) + \varepsilon_j V(i, j+1)}{\varepsilon_{i,j}} \quad (\text{IV.32})$$

Deux autres approches arrivent à cette même expression. L'une est basée sur les conditions aux limites entre deux milieux (continuité des flux).

IV.3.1.2.4 Conditions aux limites

Les conditions aux limites du volume de calcul sont soit des conditions de périodicité, soit des valeurs de potentiel constantes qui correspondent aux termes sources du problème.

Dans ce dernier cas, il est généralement choisi un potentiel $+V_0$ et un autre $-V_0$.

IV.3.1.2.5 Résolution dans le domaine fréquentiel

Peut s'écrire en l'absence de dispersion, sous une forme compacte suivante :

$$-\text{div}[(\sigma + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial}{\partial t}) \text{grad } V] = 0 \quad (\text{IV.33})$$

Il est alors possible à une fréquence ou pulsation donnée d'exprimer le terme dérivé temporel de l'équation (IV-34) sous la forme classique $j\omega$. Ceci conduit à l'équation (IV.35), à partir de laquelle il est possible d'exprimer une conductivité équivalente (IV.36) ou une permittivité complexe équivalente (IV.36)

$$-\text{div}[(\sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r) \text{grad } V] = 0 \quad (\text{IV.34})$$

$$\sigma_{\text{eq}}(\omega) = \sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega) \quad (\text{IV.35})$$

$$\varepsilon_{\text{req}}(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega) - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (\text{IV.36})$$

Le calcul dans le domaine temporel ou fréquentiel se fait par itération successive jusqu'à converger vers la solution. Pour accélérer la convergence une technique de sur relaxation est appliquée.

IV.3.1.3 Méthode de sur relaxation

La détermination des valeurs de potentiel dans le domaine considéré, pour une tension appliquée à une fréquence donnée s'effectue en résolvant l'équation de Laplace. Une technique de sur relaxation, connue également sous le nom de "Red-Black" permet d'accélérer la vitesse de convergence de l'algorithme et ainsi de diminuer le temps de calcul.

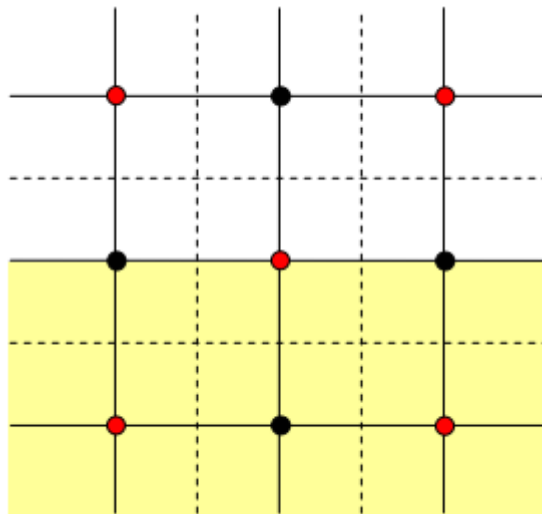


Fig IV.9: Damier, représentant les nœuds auxquels sont calculées les valeurs de potentiel en deux temps. [34]

Il est judicieux de décomposer le calcul en deux groupes, comme illustré sur la **Fig IV.9**. Dans un premier temps, les potentiels situés au niveau des points noirs sont calculés à partir de ceux situés aux points rouges,

La technique de sur-relaxation proprement dite revient à prendre en compte dans le calcul du potentiel à l'itération $n+1$, le potentiel à l'instant n , en plus des potentiels voisins. Un coefficient α est alors ajouté et doit être ajusté pour optimiser la convergence. [34]

IV.4. Influence des champs Pulsés sur les cellules biologiques

IV.4.1- Présentation des générateurs d'impulsion :

La tension de choc (ou impulsion) est une très haute tension unidirectionnelle, appliquée pendant un temps très bref de l'ordre de quelques μs . C'est un courant ou une tension qui croît rapidement jusqu'à une valeur crête, puis décroît jusqu'à zéro. Les générateurs de choc sont nécessaires pour :

- Simuler les surtensions des lignes comme l'onde de la foudre par exemple, pour l'étude et la recherche.

- Réaliser des tests d'essais sur les appareillages haute tension destinés à fonctionner lors des surtensions, tels que les appareils de protection contre les surtensions.

L'impact d'un coup de foudre sur un réseau électrique génère une onde de tension sur la ligne qui crée dans l'enroulement des transformateurs une distribution inégale du potentiel et provoque la détérioration de l'isolement.

Il existe plusieurs types de générateur de choc :

- Générateur de choc à un étage
- Générateur de choc à plusieurs étages (Générateur de Marx)
- Générateur de Ruhmkorff
- Générateur de Tesla

IV.4-2 Etude de générateur de choc de type Marx en utilisant les circuits équivalents :

La figure Fig IV.10, montre un générateur de choc qui contient trois étages à base de circuits de type figure Fig IV.10 citée précédemment. Le condensateur C_1 est chargé par la grande tension de charge V_0 à travers les résistances de charge en parallèle R_c .

La tensions V_0 est déchargé à travers les éclateurs G avec une valeur suffisante à travers les condensateurs C_1' vers le condensateur C_2 [48]

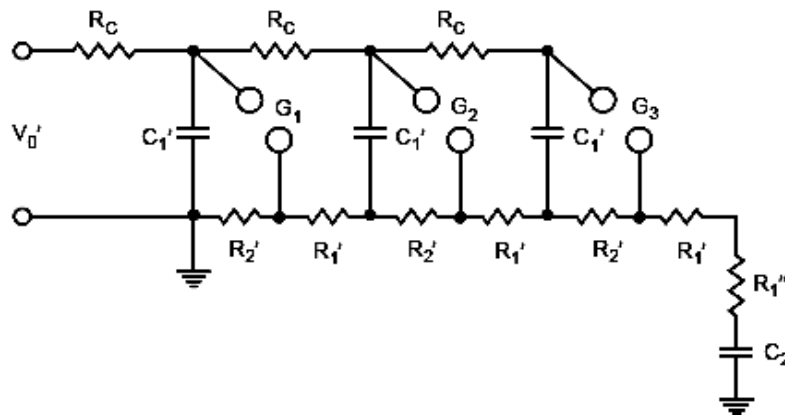


Fig IV.10: Schéma équivalent du générateur de Marx à trois étages[48]

Ce circuit peut être réduit vers un générateur de choc à un seul étage suivant la figure Fig IV.11

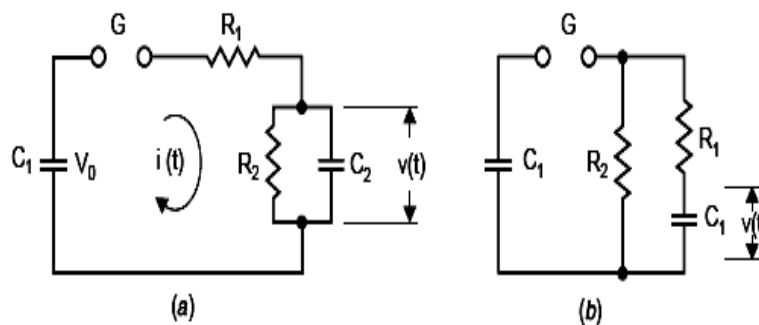


Fig IV.11: Circuit équivalent simplifiés d'un générateur à impulsions .[48]

$$R_1 = \sum^n R_1 + R_1'' \quad (IV.37)$$

$$1/C_1 = \sum^n \frac{1}{C}, \quad (IV.38)$$

Afin de faciliter l'étude, on utilise le schéma équivalent de générateur de Marx simplifié présenté à la figure Fig IV.12.

Les éléments R_c et C_c contrôlent le front et R_g et C_g , la queue de l'onde

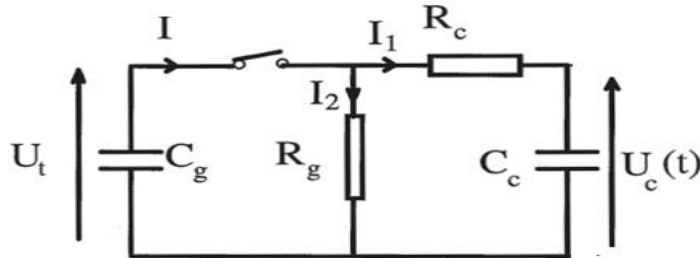


Fig IV.12: Schéma simplifié du générateur choc.[48]

En utilisant les propriétés de la transformée de Laplace pour obtenir l'expression de la tension $U_c(t)$. L'analyse de ce circuit, nous donne :

$$\frac{U_t}{p} = I_1 R_g + (I_1 + I_2) \frac{1}{p C_g} \quad (IV.39) \quad \text{sera} \quad I_1 R_g = I_2 \left(R_c + \frac{1}{p C_c} \right) \quad (IV.40)$$

$$U_c(p) = \frac{I_2}{p C_c} \quad (IV.41)$$

En remplaçant les équations (IV.40) et (IV.39) dans (IV.41) nous obtenons :

$$U_c(p) = \frac{U_t}{R_c C_c} \frac{1}{\left(p + \frac{1}{T_a} \right) \left(p + \frac{1}{T_b} \right)} \quad (IV.42)$$

Avec:
$$b = \frac{1}{R_c C_c} + \frac{1}{R_g C_g} + \frac{1}{R_c C_g} \quad (IV.43)$$

et
$$c = \frac{1}{R_g R_c C_g C_c} \quad (IV.44)$$

$$T_{a,b} = \frac{2}{b \pm \sqrt{b^2 - 4c}} \quad (IV.45)$$

Où : $(1/T_a)$ et $(1/T_b)$ sont les racines de l'équation : $p^2 + bp + c = 0$.

Finalement, en inversant la transformée de Laplace dans l'équation (IV.39), nous obtenons :

$$U_c(t) = \frac{U_t}{R_c C_c} \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \left[\exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right] \quad (IV.46)$$

Nous voyons ainsi que la forme de l'onde de tension $U_c(t)$ dépend des constantes de temps T_a

Où T_a, T_b, T_2, T_{cr} et U_t sont respectivement le temps de montée, le temps de descente, le temps à mi - amplitude, le temps crête et un facteur amplitude.

En posant:
$$\frac{T_a T_b}{(T_a - T_b) R_c C_c} = 1 \quad (IV.47)$$

Nous pouvons écrire $U_c(t)$ sous la forme

$$U_c(t) = U_t \left(\exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right) \quad (IV.48)$$

C_c sera :

$$C_c = \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \frac{1}{R_c} \quad (IV.49)$$

Les éléments du générateur sont tels que R_g et C_g sont très grands devant R_c et C_c respectivement.

L'examen de l'équation (IV.40), nous donne alors :

$$T_a \approx R_g (C_g + C_c) \quad (IV.50)$$

$$T_b \approx R_c \frac{C_g C_c}{C_g + C_c} \quad (IV.51)$$

Ces équations nous permettent de déduire C_g et R_g . D'autre part, en posant $\delta = T_a/T_b$ on peut déduire U_t

$$:U_t = \frac{U_{cr}}{\delta^{1/(1-\delta)} - \delta^{\delta/(1-\delta)}} \quad (IV.52)$$

Finalement, $U_c(t)$ sera obtenue à partir du bloc diagramme de la Fig IV13

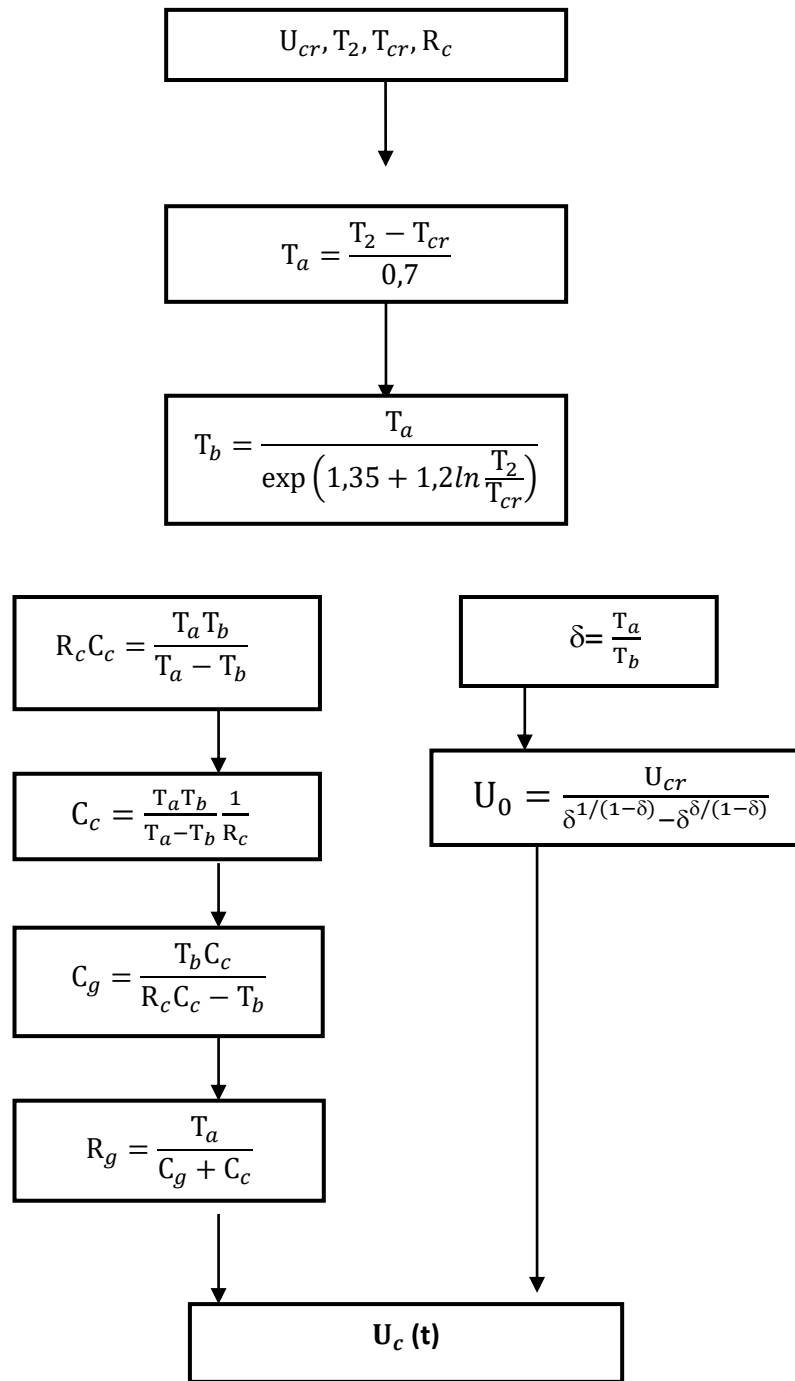


Fig IV.13: Bloc diagramme des calculs des paramètres du schéma équivalent de générateur de Marx.[48]

IV.4.3 APPLICATION SUR LA TENSION DE GENERATEUR DE CHOC :

Nous appliquons le bloc diagramme cité précédemment en utilisant Matlab, sur deux types d'ondes

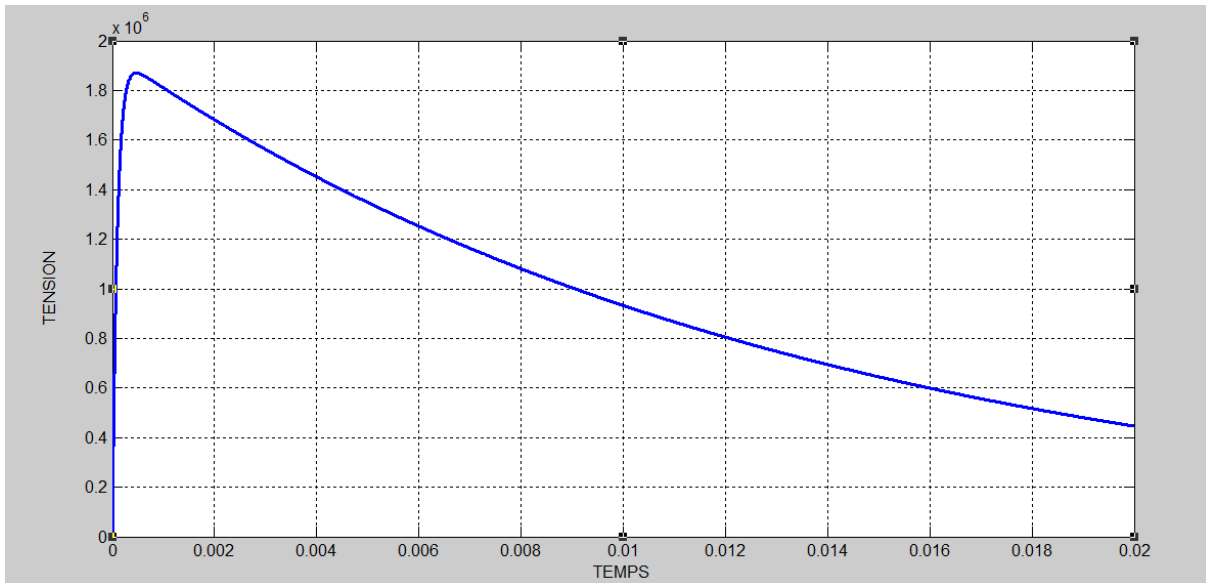


Fig IV.14: Tension de générateur de choc pour une onde (500/10000) μ s avec une tension crête 1870kV.[48]

Les résultats des paramètres de circuit équivalent pour $R_c = 160 \Omega$ d'une onde (500/10000) μ s :
 $R_g=158,8608 \Omega$ / $C_g=8,4821 \cdot 10^{-5} F$ / $C_c=6,0824 \cdot 10^{-7} F$.

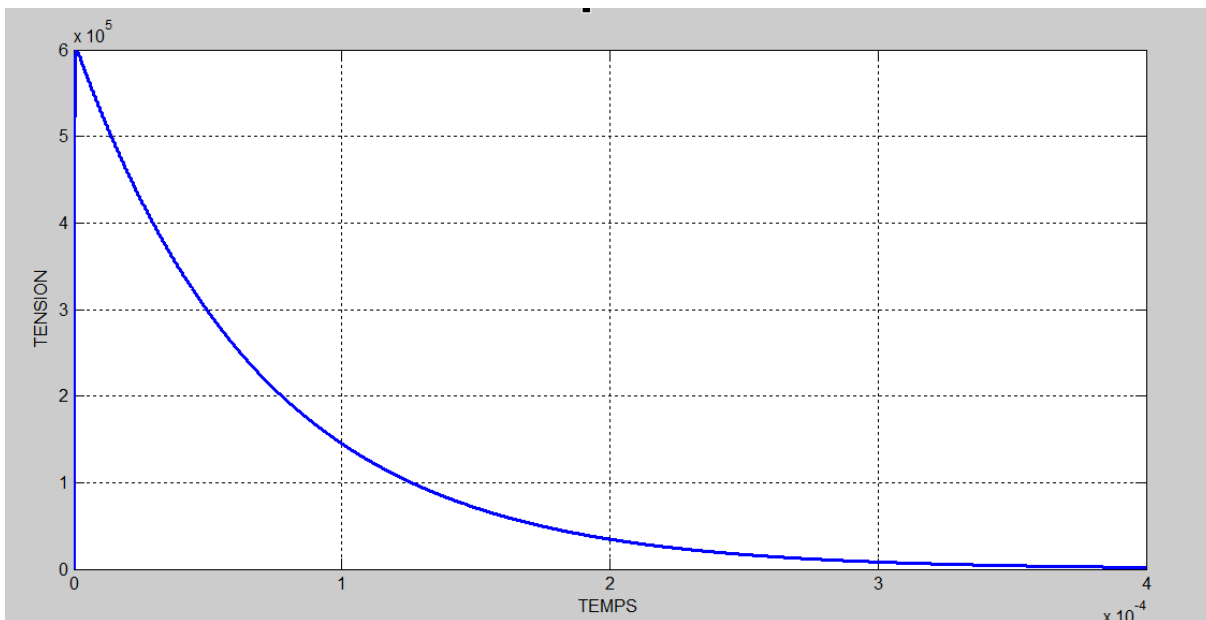


Fig IV.15: Tension de générateur de choc d'une onde (1.2/50) μ s avec une tension crête 600kV.[48]

Les résultats des paramètres de circuit équivalent pour $R_c = 160 \Omega$ d'une onde (1.2/50) μ s
 $R_g=159.5279 \Omega$ / $C_g=4.357 \cdot 10^{-7} F$ / $C_c=1,2896 \cdot 10^{-9} F$.

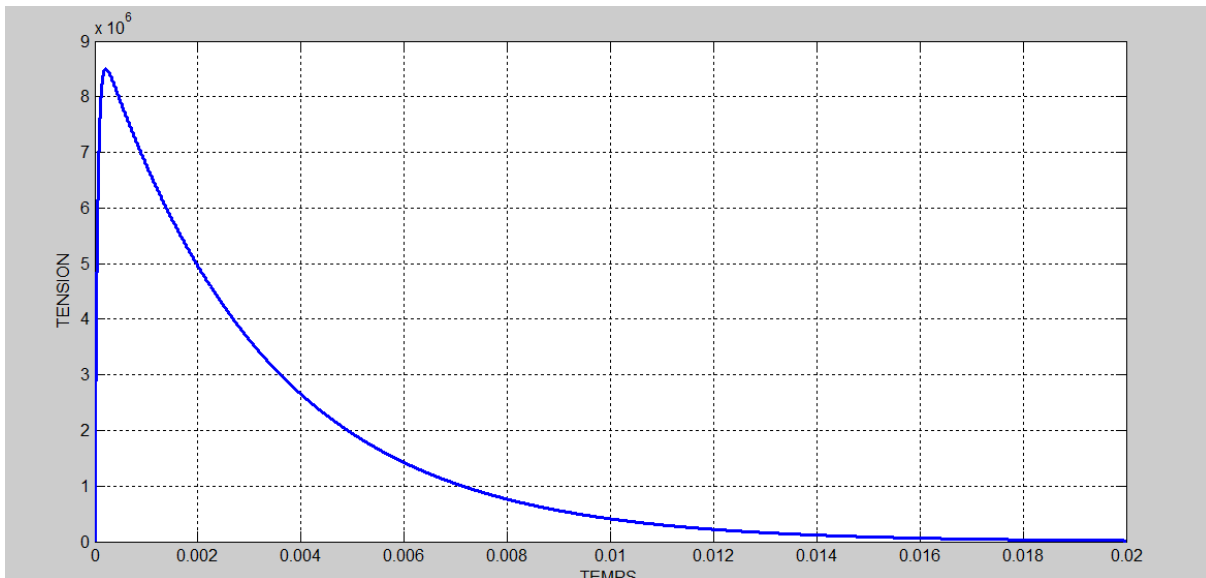


Fig IV.16: tension de générateur de choc d'une onde (250/2500) μ s avec une tension crête 8500kV

Les résultats des paramètres de circuit équivalent pour $R_c = 160 \Omega$ d'une onde (250/2500) μ s
 $R_g = 157.3829 \Omega$ / $C_g = 2.0089 \cdot 10^{-5} \text{ F}$ / $C_c = 3,3406 \cdot 10^{-7} \text{ F}$.

CONCLUSION

Nous avons exposé la nécessité de définir un modèle de cellule simplifié pour l'étude numérique des champs et potentiels induits à l'échelle de la cellule par une impulsion nanoseconde. Les principaux modèles considérés sont définis par une cellule de forme sphérique possédant une organelle. Les méthodes numériques utilisées jusqu'à présent ont été présentées. Elles reposent par exemple sur des modèles de circuit distribué ou sur la résolution de l'équation de Laplace. De plus, il existe un modèle qui permet d'évaluer la densité de pores engendrée par l'application de champs électriques. Il s'agit de l'équation de Smoluchowski et de sa forme asymptotique

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail a été consacré à l'étude de l'influence des champs électromagnétiques sur les matières vivantes. Les ondes électromagnétiques passent inaperçues. Cependant, ils se trouvent tout autour de nous, mais lorsqu'ils sont utilisés pour le diagnostic médical, l'induction magnétique peut être suffisamment forte pour être dangereuse et potentiellement jouer un rôle dans l'émergence de maladies telles que le cancer. Par conséquent, l'exposition devrait être limitée.

Le premier chapitre a traité l'état de l'art sur la compatibilité électromagnétique et la cellule biologique, ce qui permet de mieux comprendre l'influence des champs électromagnétiques et les différents rayonnements sur les êtres vivants d'une façon générale. Il permet d'introduire les différents éléments qui interviennent dans cette étude et regroupe un ensemble d'information qui permet d'élargir nos connaissances sur la notion de la compatibilité électromagnétique (CEM), et les techniques de couplage électromagnétique.

Une synthèse des travaux effectués et les résultats de l'expérimentation sur l'étude de l'influence des champs électromagnétiques, la réalisation de ces essais expérimentaux constitue une étape importante pour connaître les effets des rayonnements des champs électriques et magnétiques in vivo et in vitro. L'objectif est de caractériser les effets des champs au niveau macroscopiques sur la constitution de la matière et microscopiques au niveau cellulaire.

Les essais sont effectués sur une plante appelée ray-grass et pour la génération des ondes, une antenne et Un générateur d'une bande de fréquence 1800 MHz sont utilisés et pour la visualisation on sert d'un microscope optique ayant trois grossissements : x4, x10, x40

Les plantes témoins non exposés aux ondes sont préparées pour avoir une base de référence et de comparaison des résultats d'influence, ces plantes sont soumises aux mêmes conditions que les autres plantes sauf l'exposition puisque ces plantes ne sont pas exposées.

Les facteurs probables qui influent sur la croissance des plantes exposées se résument en trois facteurs a savoir, le stress ; l'exposition aux ondes a provoqué, chez les graines qui ont poussé en retard un stress, elles auraient alors produit des protéines de stress, ce qui aurait influé sur leur germination .

L'émission de ces protéines de stress peut expliquer un dysfonctionnement dans la production des auxines (hormones de croissance des plantes).

L'expérience des Œufs aussi constitue une investigation importante dans la recherche importante dans l'étude de l'influence et donne une appréciation importante sur les effets du champ électromagnétique.

Le matériel utilisé dans l'expérimentation comme la cellule Transverse Electromagnétique TEM qui représente une ligne de transmission de forme rectangulaire contenant une plaque métallique appelée 'septum', parallèle au champ E et plus étroite que les plaques métalliques extérieures. Cette cellule est capable de générer un champ électrique et magnétique, uniformes et

perpendiculaires (mode TEM), dans une zone dite de test, encore appelée volume d'essai .La bande de fréquence, dans laquelle la cellule est capable de créer une onde TEM.

L'étude numérique d'un phénomène bien déterminé constitue une référence d'études dans le domaine de recherche puisque elle permet de fournir plus d'informations sur l'impact des ondes électromagnétiques sur les cellules biologiques, l'étude numérique passe toujours par la modélisation du mécanisme étudié, et la simulation vient compléter cette étude. Afin d'étudier l'influence du champ pulsé nous avons simulé en premier lieu le générateur d'impulsion haute tension de type Marx et comme perspectives il est important d'impact des impulsions de type foudre ou manœuvre a proximité des cellules biologiques sur la croissance et le comportement des êtres vivants.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **Anne Perrin et Martine Souques** : "Champs électromagnétiques, environnement et santé" Springer Paris Berlin Heidelberg New York, Springer-Verlag France, Paris, 2010
- [2] **Immaculée Hounassé Nassou** : "Modélisation numérique des perturbations électromagnétiques ", master thèse, L'université du Québec à trois- rivières en october2017
- [3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_%C3%A9lectrique : Champs électrique
- [4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_magn%C3%A9tique : Champ magnétique
- [5] Organisation Mondiale de la Santé :<https://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/fr/>
- [6] **Mathieu Croizer** "Applicateurs destinés aux études d'effets biologiques des ondes électromagnétiques sub-nanosecondes" Thèse de doctorat, Université de Limoges, Le 14 décembre 2015
- [7] Champs électromagnétiques : <http://www.inrs.fr/risques/champs-electromagnetiques/ce-qu-il-faut-retenir.html>
- [8] Champs électromagnétique : <https://www.atousante.com/risques-professionnels/risques-physiques/champs-electromagnetiques/champs-electromagnetiques-definitions/>
- [9] **SEVAUX Stanislas**, "Impact sur la santé des champs électromagnétique non ionisants ",Thèse Diplôme d'État de Docteur en Pharmacie , université Angers ,17 octobre 2014.
- [10] **Bruno Lafitte**, Ademe service Bâtiment "Estimation de l'impact sanitaire des principales sources de champ électromagnétique en environnement résidentiel " , Le 15 novembre 2011 .
- [11] **Patrick Levallois, m.d., MSc, FRCP(C), Pierre Lajoie, m.d. MIH, FRCP(C), Denis Gauvin, MSc** , "LES effets des champs électromagnétique " de 50/60 hz sur la santé ; Centre Hospitalier de l'Université Laval ;1991.
- [12] http://www.infovisual.info/03/001_fr.html) : La cellule biologique
- [13] <https://www.cancer.ca/neuroendocrine/neuroendocrine-tumeurs/the-neuroendocrine-system> : Système neuroendocrinien
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_nerveux : Système nerveux
- [15] https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_immunitaire_adaptatif : Système immunitaire
- [16] **Gaëlle Coureau** "Effets sanitaires des champs électromagnétiques et tumeurs du système nerveux central", Thèse de Doctorat , 'Bordeaux 2, Le 9 décembre 2013 .
- [17] **Chehada Mohammed** , "Couplage électromagnétique d'une onde de foudre avec une ligne de transport d'énergie ", diplôme de master ; Université Larbi Ben M'Hidi ,Oum el

Bouaghi,2014.

[19] **GHERBI Azzedine, Mr. Khalem Sofiane** , “ Technique MLI aléatoire en vue de la réduction des perturbations conduites dans les convertisseurs continu-continu et continu-alternatifs”, diplôme de master ,université M’hamed Bougara boumerdes ,2015.

[20] Guy Gérard, “Compatibilité Electromagnétique : Présentation Générale” ; Technique de L’ingénieur, Vol. D, 1300.

[18] **J. L. Coquerelle** "CEM et électronique de puissance ", Edition TECHNIP, ISBN 2710807645, 1990.

[22] Copyright **Jacques Cuvillier** , "Cours deCEM" ;Jacques Cuvillier IUT de Nantes 1999.

[21] **Mircea Lanovici, et Jean-Jacques Morf** "Compatibilité Electromagnétique" deuxième édition modifiée et corrigée.

[23] **Pierre Degauque et Joël Hamelin** "Compatibilité Electromagnétique : Bruits et Perturbations Radioélectriques" Collection Technique et Scientifique

[24] **BIDI MANEL**, "CEM Compatibilité électromagnétique et réseaux d’énergie, perturbations, effets et solutions", Thèse Doctorat, Université des frères Mentouri de Constantine,2017

[25] **Julie LAFORÊT-AST**, " Caractérisation de microparticules par méthodes diélectrophorétiques : applications aux cellules biologiques", thèse doctorat, l’Ecole centrale de Lyon,2010

[26] **J. P. Desai, A. Pillariseti, and A. DBrooks**, "Engineering approaches to biomanipulation," Annu. Rev. Biomed. Eng., vol. 9, pp. 35-53, 2007.

[27] **A. Iglıc, P. Veranic, U. Batista, and V. Kralj-Iglıc**, "Theoretical analysis of shape transformation of V-79 cells after treatment with cytochalasin B," Journal of Biomechanics, vol. 34, pp. 765-772, 2001.

[28] **T. Laurell, F. Petersson, and A. Nilsson**, "Chip integrated strategies for acoustic separation and manipulation of cells and particles," Chem. Soc. Rev., vol. 36, pp. 492- 506, 2007.

[29] **J. F. Schenck**, "Safety of Strong, Static Magnetic Fields," Journal of Magnetic Resonance Imaging, vol. 12, pp. 2-19, 2000.

[30] **H. Lee, A. M. Purdon, V. Chu, and R. M. Westervelt**, "Controlled assembly of magnetic nanoparticles from magnetotactic bacteria using micro-electromagnets arrays," Nanoletters, vol. 4, pp. 995-998, 2004.

[31] **J. Voldman**, "Electrical forces for microscale cell manipulation," Annu. Rev. Biomed. Eng., vol. 8, pp. 425-454, 2006.

- [32] **L. Cui and H. Morgan**, "Design and fabrication of travelling wave dielectrophoresis structures," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 10, pp. 72-79, 2000.
- [33] **M. Breton, L. Delemotte, A. Silve, L. M. Mir, et M. Tarek**, " Transport of siRNA through Lipid Membranes Driven by Nanosecond Electric Pulses: An Expérimental and Computational Study ", *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 134, no. 34, p. 13938-13941, aout 2012.
- [34] **Thi Dan Thao VU**, " Contribution a la modélisation du comportement electromagnetique de milieux biologiques exposes a des impulsions de champ électrique nanosecondes " , Thèse Doctorat ,de l'Université de Limoges,2012
- [35] **P. Ellappan et R. Sundararajan**, " A simulation study of the electrical model of a biological cell " , *Journal of Electrostatics*, vol. 63, no. 3-4, p. 297-307, mars 2005.
- [36] **Chenguo Yao, Yan Mi, Chengxiang Li, Xiaoqian Hu, Xin Chen, et Caixin Sun**, " Study of Transmembrane Potentials on Cellular Inner and Outer Membrane—Frequency Response Model and Its Filter Characteristic Simulation " , *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 55, no. 7, p. 1792-1799, juill. 2008.
- [37] **Yafang Tan, Minghe Wu, Hongchun Yang, et Jun Xu**, " The impact of pulse duration on cell membranes and equivalent circuit " , in *2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2010, p. 1856-1858.
- [38] **Mathis Legay , Julien Marro ,Aymeric Rannou** ,
Observation des effets d'un rayonnement de 1800 MHz sur la croissance du ray-grass ,Lycée Félix le Dantec - Lannion 2016
- [39] **Marc Moreau , Catherine Leclerc** , "le microscope optique " , Centre de Biologie du Développement, UMR 5547, Université Paul Sabatier, 31062 Toulouse CEDEX 09
- [40] <https://www.monanneeaucollege.com/microscope.htm>: le microscope
- [41] <https://www.metrodiff.org/activit/pst/microscope.htm> : un microscope
- [42] **A. Collin** : Dosimétrie de systèmes d'exposition pour l'étude in vivo ou in vitro des interactions des ondes électromagnétiques décimétriques et centimétriques avec le vivant. Thèse de doctorat en électronique - Univ. de Limoges - n° d'ordre 22-2007 – Juillet 2007.
- [43] **S. Kohler, T. D. T. Vu, P. T. Vernier, P. Leveque, et D. Arnaud-Cormos**, Characterization of a TEM cell-based setup for the exposure of biological cell suspensions to high-intensity nanosecond pulsed electric fields (nsPEFs) , in *Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International*, 2012, p. 1 -3.
- [44] **A.Azoulay ;T.Letertre** : Mesures.de.champ.de.très basses fréquences à proximité d'antennes de stations de base GSM et UMTS Supélec - Département EMG 2009
- [45] **Emmanuel Batista** Nouvelles structures électronique pour le transport électrique impacts des nouvelles contraintes d'intégration sur les interférence électromagnétique ;thèse doctorat

de l'université de Toulouse ;2009

[46] Virginie Deniau ; Recherche des caractéristique optimales d'un nouveau moyen d'essais électromagnétique applique aux testes d'équipements électronique embarques sur véhicules, Thèse doctorat à L'Université des Sciences et Technologies de Lille 2003

[47] Electromagnétisme : <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectromagn%C3%A9tisme>

[48] Abderrahmane BENMOHAD, Aissat LAMOURI , Salah SIOUANI : Etude des générateurs haute tension ; rapport de projet de fin d'étude licence génie électrique option : électromécanique Faculté de technologie – Université de M'sila ,2018

ملخص :

تعددت مصادر الإشعاع الكهرومغناطيسي من اصطناعية وكذلك طبيعية ذات قوى وترددات مختلفة

حيث تتفاعل هذه المجالات الكهرومغناطيسية مع جسم الإنسان ويمكن ملاحظة هذه التأثيرات قصيرة المدى , ويمكن استخدام هذه التأثيرات لأغراض علاجية من خلال التصوير بالرنين المغناطيسي

لهذا الغرض يركز عملنا على معرفة مدى تأثير الأشعة الكهرومغناطيسية على الخلايا البيولوجية

الكلمات المفتاحية: الإشعاع الكهرومغناطيسي ، المجالات الكهرومغناطيسية ، التصوير بالرنين المغناطيسي ، الخلايا بيولوجية ، التأثير

Résumé :

Il existe de nombreuses sources de rayonnement électromagnétique, tant artificielles que naturelles, avec des intensités et des fréquences différentes.

Là où ces champs électromagnétiques interagissent avec le corps humain, et ces effets à court terme peuvent être observés. Ces effets peuvent être utilisés à des fins thérapeutiques grâce à l'imagerie par résonance magnétique IRM.

Pour cela, nos travaux portent sur la connaissance de L'influence de champ électromagnétique sur la cellule biologique

Mots-clés :

Rayonnement électromagnétique, Champs électromagnétiques, l'Imagerie par Résonance Magnétique, Cellule biologique, Les effets

Abstract :

There are many sources of electromagnetic radiation, both man-made and natural, with different intensities and frequencies.

Where these electromagnetic fields interact with the human body, and these short term effects can be observed. These effects can be used for therapeutic purposes through magnetic resonance imaging MRI.

For this, our work relates to the knowledge of the influence of electromagnetic field on the cell biology

Keywords :

Electromagnetic Radiation, Electromagnetic Fields, Magnetic Resonance Imaging, Cell Biology, Effects

