

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Bordj Bou Arreridj



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département des Sciences Biologiques

Domaine : Des Sciences de la Nature et de la Vie

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Option : Phytopathologie

Thème

Biostimulation électromagnétique de la germination

(Cas de pois chiche «*Cicer arietinum* .L)

Présenté par:

- **Bessa Dalila**
- **Merzougui Samia**

Jury de soutenance:

Président : Mr. T Aliat M A

Université de BBA

Encadreur : Mr.N.Benyoucef MA

Université de BBA

Co-encadreur : Mr.D.Moatassem M A

Université de BBA

Examineur : Mr. A.W Bentabet Professeur

Université de BBA

2012/2013

Remerciements

Je remercie avant tout ALLAH le tout puissant de m' avoir accordé force et volonté pour terminer ce travail.

Mes sincères remerciements sont exprimés agréablement à mon encadreur,

Mr Nabil Benyoucef pour sa patience, son aide, ses conseils et encouragements pour réaliser ce modeste travail.

Mes remerciements vont également à Mr Daho Moatassim le chef de département, Mr Aliat

Toufik et Mr le professeur Abd. Wahab Bentabti d' avoir accepté de juger ce modeste travail

Sans oublier aussi tous les enseignants, les ingénieurs des laboratoires qui nous ont donné de l'aide et des conseils durant la période de notre travail dans les laboratoires.

En fin, je voudrais remercier tous mes amis qui m' ont toujours soutenu et l'ensemble des personnes, qui m'ont aidé, de près ou de loin, à réaliser ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail :

*À qui avec, leur soutien permanent, leur m'intéressent, leur encouragement et leurs
amours, qui permit d'arriver à cette étape très importante de ma vie:*

ma mère et mon père

À mes grandes mères

A mes frères Mohamed et kheir Dinne

A mes sœurs Hakima, Sabah , Souhila

A ma sœur Saida et son mari Ahmed

A ma cousine Houda

A toute ma famille.

A toute mes amies

À tous mes collègues

*A tous les enseignants qui ont participés à ma formation et tous
les techniciens de laboratoire.*

A toutes personnes que je porte dans mon cœur.

Dalila

Listes des figures

Figure 01: Le pois chiche (<i>Cicer arietinum</i> .L)	03
Figure 02: Schéma anatomique d'un plant de pois chiche.....	08
Figure 03: Représentation d'une onde électromagnétique plane.....	13
Figure 04: spectre du rayonnement électromagnétique	15
Figure 05: Les modalités de stimulation électromagnétiques provenant des champs et des vagues	18
Figure 06: Sites d'interaction moléculaire des influences électromagnétiques.....	33
Figure 07: Le système d'exposition électromagnétique	35
Figure 08: L'effet des différentes intensités du CEM sur la vitesse et le taux final de germination du pois chiche	40
Figure 09: Effet de la durée d'exposition aux radiations électromagnétiques sur la vitesse de germination des grains de pois chiche	42
Figure 10: Différence entre les hauteurs des plantules de pois chiche issues de graines prétraitées et non prétraitées aux radiations électromagnétiques au 10 ^{ème} après le semis	44
Figure 11: L'effet de CEM sur les hauteurs des plantes.....	45
Figure 12: La différence entre les longueurs des racines des plantules de pois chiche	47
Figure 13: L'effet de CEM sur la longueur des racines	48
Figure 14: L'effet de CEM sur la biomasse sèche	49
Figure 15: L'effet de CEM sur le contenu chlorophyllien de la plante de pois chiche.....	51
Figure 16: Coupe transversale des tiges de pois chiche (A : témoin, B : traitée). (GrossissementX40)	52

Liste des tableaux

Tableau 01: Caractéristiques physiques et nutritionnelles : (moyenne pour 100g).....	04
Tableau 02: Principaux pays producteurs de pois chiche dans le monde.....	05
Tableau 03: Légumineuses alimentaires cultivées en Algérie : leur importance en superficie, production et rendement.....	07
Tableau 04: Agents responsables du flétrissement de pois chiche	10
Tableau 05: Le taux de germination à différentes inductions d'exposition électromagnétique en (%).....	39
Tableau 06: Le taux de germination à divers temps d'exposition à une induction électromagnétique de 20mt	41
Tableau 07: Les hauteurs de 10 plantules prétraitées et autres contrôles	44
Tableau 08: La moyenne et l'écart type de 10 plantules issues de graines traitées et autres non traitées	46
Tableau 09: Les moyennes et l'écart type des longueurs des racines des plantes	48
Tableau 10: Les pourcentages de la biomasse sèche	49
Tableau 11: Le contenu de la chlorophylle a+ la chlorophylle b.....	50

Liste des abréviations

ADN: acide désoxyribonucléique

ADP: adénosine diphosphate

AMP: adénosine monophosphate

ARN: acide ribonucléique

ATP: adénosine triphosphate

B: induction magnétique

CC: courant continu

CE: champ électrique

CEM: champ électromagnétique

Cm: centimètre

CM: champ magnétique

CMs: champ magnétique statique

COX: cytochrome c-oxydase

DSA : Direction des Semences Agricole

E: électrique

ELF: extremely low frequency

EM: électromagnétique

EV: électron volt

FOC : Fusarium oxysporum ciceris

GHz: Giga hertz

H: magnétique

Hz: hertz

IR: infra-rouge

kHz: kilo hertz

Km: kilomètre

MA : Ministère de L'Agriculture

MHz: Méga hertz

mm: millimètre

MT: millions de tonnes

mT: milli Tesla

MTs: microtubules

MW: micro-wave

RF: radio frequency

ROS: reactive oxygen species

RNI: rayonnement non ionisant

SAR: specific absorption rate

T : Tonne

THz: Téra hertz

UPE: Ultra weak Photon Emission

UV: ultraviolet

sommaire

sommaire

Introduction

Chapitre I : Généralité sur le pois chiche

I) Historique et origine	02
II) Biologie de pois chiche	02
III) Classification de pois chiche	03
IV) Valeur nutritionnelle	04
V) Importance économique du pois chiche	04
V.1) Production mondiale	04
V.2) Production Algérienne de pois chiche.....	06
V.2.1) Répartition géographique et superficie.....	06
V.2.2) Production et rendement	06
VI) Cycle et saison de culture	07
VII) Les maladies de pois chiche	09
VII.1) L'Anthracnose du pois chiche	09
VII.2) Le complexe de flétrissement vasculaires et pourritures radiculaires de pois chiche....	09

Chapitre II : Généralités sur le champ électromagnétique

I) Le champ électromagnétique	11
II) Nature fondamentale de la source de champ	11
III) les champs et ondes électromagnétiques.....	12
III. 1) Définition.....	12
III. 2) Champ magnétique (CM).....	13
III. 3) Champ électrique (CE).....	14
IV) Le spectre électromagnétique.....	14
IV. 1) Les rayonnements ionisants.....	15
IV. 2) Les rayonnements non ionisants.....	16
V) Les sources d'ondes électromagnétiques.....	16
V. 1) Sources naturelles.....	16
V. 2) Sources artificielles.....	17
VI) Interactions ondes-matières.....	17
VII) Expériences électromagnétiques.....	17

Chapitre III: Biostimulation électromagnétique sur les systèmes vivants

I) Les plantes et le champ électromagnétique.....	19
II) Phénomènes Bio-électromagnétiques.....	19
II.1) Corrélation de l'activité électromagnétique cellulaire avec le métabolisme, la vitalité et la répliation.....	19
II.2) Comment les cellules peuvent générer des champs électromagnétiques.....	20
II.2.1) Les bases de la production de champ électromagnétique.....	20
II.2.2) Les base pour la production de champ électromagnétique cellulaire.....	20
II.2.3) Théories de génération des champs électromagnétiques cellulaire.....	20
III) Les effets biologiques des champs électromagnétiques.....	22
III. 1) Les catégories des effets biologiques dus à l'exposition au champ électromagnétique.....	22
III.1.1) Effet thermique.....	23
III.1.2) Effet non-thermique.....	23
III. 2) L'interaction des champs électromagnétiques et les systèmes biologiques.....	23
III. 3) Les réponses des structures cellulaires à des champs électromagnétiques ou magnétiques.....	24
III. 3.1) Modifications de la membrane.....	25
III. 3.2) Effets ioniques.....	27
III. 3.2.1) Calcium.....	27
III. 3.2.2) Le sodium et le potassium.....	27
III. 3.3) Acide nucléique et l'expression du gène.....	28
III. 3.4) L'activité enzymatique.....	28
III. 3.4.1) La pompe Na ⁺ / K ⁺ ATPase.....	29
III. 3.4.2) Le cytochrome c-oxydase	29
III. 3.5) Effets sur l'eau.....	29
III. 3.5.1) Effets sur les solutions aqueuses.....	30
III. 3.6) Effets sur les molécules d'adénosine-phosphate (ATP, ADP et AMP).....	31
III.3.7) Effets sur les espèces réactives de l'oxygène.....	31
IV) Mécanismes possibles d'action.....	31
IV.1) Mécanisme radical-pair.....	31
IV.2) Mécanisme de résonance des ions en cyclotron.....	32
IV.3) Mécanisme ferrimagnétique.....	32

Chapitre IV : Matériels et méthodes

I) Matière végétale	35
II) Description du montage expérimentale.....	35
III) Etude expérimentale.....	35
III. 1) La germination.....	35
III. 1.1) Optimisation de l'induction électromagnétique.....	35
III.1.2) Effets de la durée d'exposition aux radiations électromagnétiques sur la capacité germinative des graines.....	36
III.2) Paramètres de croissance.....	36
III.2.1) La longueur des tiges.....	36
III.2.2) La longueur des racines.....	36
III.2.3) Production de la biomasse (Matière sèche).....	36
III.2.4) Dosage des pigments de la chlorophylle (A et B).....	37
III.3) Observation microscopique d'une coupe transversale dans la tige Mode opératoire.....	38

Chapitre V : Résultats et Discussions

I) Effet de prétraitement électromagnétique sur la vitesse et le taux de germination.....	39
I.1) Effet de l'induction électromagnétique.....	39
I.2) Optimisation du temps de traitement.....	40
II) Effet du CEM sur la croissance de la plante.....	43
II.1) Effet sur la hauteur de la plante.....	43
II.2) Effet sur la longueur des racines.....	46
II.3) Effet sur la biomasse sèche.....	49
II.4) Le contenu de chlorophylle (a et b).....	50
II.5) Observation microscopique d'une coupe transversale dans la tige	51

Conclusion

Références bibliographiques

Introduction

Introduction

Dans les dernières années, la production agricole a connue des pertes très importantes dus aux maladies et des attaques par des microorganismes pathogènes, ces derniers peuvent mener des problèmes sur la germination, et sont capable de provoquer de sévères dégâts en plein champ après le semis (*Harman, G et al., 1983*). Certains d'entre eux affectent la qualité des semences. (*Lepoivre, Ph. 2003*).

Plusieurs méthodes de lutte et de traitement sont appliquées au champ agricole, telle que les méthodes chimiques qui utilisent les pesticides, les méthodes physiques comme le désherbage, le travail de sol et les méthodes biologiques qui sont les plus préférées pour l'agriculteur, mais elles sont complexes,...etc

Les efforts agricoles modernes sont maintenant à la recherche d'une technologie efficace basés sur le traitement physique des graines pour augmenter le développement et l'accélération de germination. (*Alexander et al., 2002; Harichand et al., 2002*).

Le bio-électromagnétisme est considérablement développée depuis des dizaines d'années, concernant essentiellement les domaines de physique, de biologie et de médecine. L'utilisation des radiations électromagnétiques en biologie et les preuves données par les chercheur à travers les recherches effectuées est l'un des causes qui ont poussé les chercheur a étudier le comportement des végétaux à ce type de radiations.

Le présent travail à pour objectif de l'étude de la possibilité d'utiliser les radiations électromagnétiques comme moyen pour accélérer la vitesse de germination des graines, en vue de d'assurer une protection de la semence contre les attaques qu'elle peut subir durant la phase de germination: phase très sensible et améliorer la compétitivité des semences face aux adventices de cultures.

I) Historique et origine

Le pois chiche est parmi la première légumineuse à graines domestiquées par l'homme depuis l'antiquité (*Van Der Maesen, 1987*).

Les premières traces d'utilisation du pois chiche comme aliment remontent à environ 7000 ans.

Le pois chiche est originaire du Moyen-Orient, plus précisément du sud-est de la Turquie et de la Syrie (*Saxena, 1984, Smithson et al., 1985, Singh, 1997*).

Duke (1981) rapporte que ce légume sec a conquis l'Europe durant le Moyen-âge après que les croisés l'aient redécouvert au Proche-orient. Mais, sa culture et sa consommation ont en réalité été attestées par des sources écrites et archéologiques, bien avant; au moins dès le IX^e siècle. Il arriva sur les côtes du bassin méditerranéen après avoir traversé de nombreux pays et les Phéniciens pourraient être à l'origine de cette diffusion (*Anonyme a, 2003*).

Le nom latin du genre Pois chiche est *Cicer* dérivé du grec antique *Kickere* (*Anonyme, 1992*). Cependant, il est désigné aujourd'hui par plusieurs noms, chickpea, bengal gram, Gram, Egyptianpea, spanishpea, Chestnutbean (anglais), le pois chiche (français), Chana (Inde), Homos (Arabe), Grao- de-bico (Portugal), Garbanzo ou Garvance (Espagnole) (*Ayyub A, 2001*).

II) Biologie de pois chiche

Est une légumineuse (*Fabacée*) annuelle, autogame, herbacée (*Summerfield Robert, 1985, Bejiga et Van Der Maesen, 2006*). La *Cicer arietinum* est la seule espèce annuelle cultivée (*Summerfield et al., 1984 ; Van Der Maesen, 1987 ; Giller, 2001*).

Est une plante diploïde à $2n = 16$ chromosomes. A l'intérieur de l'espèce, la variabilité génétique est extrêmement importante et se trouve révélée par l'autogamie. Les graines ont généralement une forme plus ou moins arrondies, de couleur crème pâle et présentant une saillie en forme de bec. Sur la surface orientée vers le sommet de la graine se trouve l'embryon noyé dans un tissu nutritionnel qui est l'albumen. L'ensemble est enveloppé dans les téguments. L'albumen contenant les matières de réserves, comprennent, outre des matières amylacées, du gluten et des matières minérales destinées à l'alimentation du jeune embryon.

Sur le plan botanique, il est décrit comme une plante herbacée, dressée ou rampante couverte de poils glanduleux. Sa germination est du type hypogé (les Cotylédons restent souterrains). Ses racines peuvent atteindre un mètre de profondeur, mais la plupart se trouvent

dans les premiers centimètres (*Duke, 1981*). Sa tige anguleuse a une hauteur de 0.20 à 1 mètre de haut. Ses feuilles se composent de 7 à 17 folioles ovales et dentées.

Les fleurs peuvent être blanches, bleues ou violettes; solitaires et pédonculées. Les gousses sont renflées à 1 - 2 graines presque rondes. (*Anonyme c, 2004*) (Figure 1).



Fig 1 : Le pois chiche (*Cicer arietinum*.L) (*Anonyme k, 2003*)

III) Classification de pois chiche

Selon Paterson et al (2000) sur le plan taxonomique, le pois –chiche se rattache à la famille des :*Papilionacées*, sous famille *Papilionoideae*, genre *Cicer* et espèce *Cicer arietinum* L contenant 40 espèces.

Il existe de nombreuses variétés de pois chiche (*Cicer arietinum*) (20000 dans le monde) qui peuvent se classer en trois grands types : (*Plancquaert, Wery 1991, Boyeldieu, 1991*).

- Desi : utilisé pour l'alimentation animale.
- Kabuli : destiné à l'alimentation humaine.
- Gulabi : intermédiaire beaucoup moins cultivé.

Le pois chiche appartient à:

Embranchement : Spermaphytes

S/ embranchement : Angiospermes

Classe : Dicotylédones

Ordre : Rosales

Famille : Légumineuses

S/famille : Papilionacées

Espèce : *Cicer Arietinum* L(*Muehlbaueret al., 1998*).

IV) Valeur nutritionnelle

Le pois chiche, au même titre que la fève et les haricots, est une graine protéagineuse cultivée pour sa richesse en protéine. Il fait partie du nombre très réduit d'aliments qui apportent à la fois des protéines et un grand nombre de sels minéraux (calcium, fer, potassium et phosphore) jouant un rôle important dans l'alimentation. Elle renferme entre 20 % et 25% de protéines. A titre de comparaison, la teneur en protéines de la viande est de 16 à 25% et celle du poisson de 14 à 20% (*Anonyme b, 2004*).

Tableau 1 : Caractéristiques physiques et nutritionnelles : (moyenne pour 100g) (*Markel., 2011*)

Les compositions	La quantité
Humidité	Max. 12 %
Glucides	58 à 61 g
Protéines	21 à 23 g
Lipides	5 à 7 g
Cendres	3 à 4g
Valeur énergétique	371 Kcal 1 571 KJ

V) Importance économique du pois chiche

V.1) Production mondiale

La culture du pois chiche occupe la troisième place dans la production mondiale des légumineuses après la fève et le petit pois, dont l'Asie est le premier producteur avec une superficie de 10 159 000 Ha (*Rajesh, 2001*).

Pendant les cinq dernières années la production mondiale de pois chiche a pris une forte ampleur (Tableau 2). Elle est passée de 7,085000 T en 2000 à 8,650000 T en 2006,

contrairement aux superficies emblavées par cette culture pendant la même période, qui est passée de 546 millions d'ha en 2000 à 358 millions d'ha en 2006. Durant cette période, l'Inde comptait entre 60 et 70 % de la production mondiale (AAC, 2006).

La production a varié également parmi les principaux pays producteurs, notamment l'Australie, le Pakistan, le Mexique, le Myanmar et l'Éthiopie. Par contre, elle a suivi une tendance ascendante aux États-Unis, au Canada et l'Iraq, et une tendance décroissante en Syrie et l'Espagne. L'Australie, la Turquie, l'Iran, Mexique et Canada constituent les pays potentiels exportateurs du pois chiche. Les exportations mondiales de pois chiche ont aligné de 998-682 million de tonnes dans la période de 2001-2004, par contre Les importations mondiales de pois chiche ont aligné de 1118-732 million de tonnes durant la même période, et les pays importateurs potentiels sont l'Inde, le Bangladesh, l'Espagne, le Pakistan et l'Algérie (AAC, 2006; Mcvicar, 2006).

Tableau 02 : Principaux pays producteurs de pois chiche dans le monde.(AAC, 2006).

Pays	Années				
	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007
Inde	4,240	5,720	5,470	5,650	5,700
Turquie	600	650	620	610	610
Pakistan	362	675	611	868	400
Australie	139	186	123	138	304
Iran	300	310	310	310	280
Mexique	235	240	240	240	240
Myanmar	212	228	230	230	230
Canada	156	68	51	104	163
Éthiopie	187	114	136	135	135
Iraq	97	104	100	95	100
USA	38	20	27	49	67
Syrie	89	87	45	55	55

Espagne	70	51	57	18	40
Maroc	51	43	42	42	40
Autres	259	275	271	288	286
Total	7,085	8,721	8,333	8,832	8,650

Les légumineuses à graines constituent toujours une part importante de l'alimentation du monde, particulièrement dans les Pays en Développement où elles sont la principale source de protéines pour l'homme. Citons le Haricot (*Phaseolus vulgaris*) en Amérique Latine, le Pois Chiche (*Cicer arietinum*), la lentille (*Lens culinaris*) et la Fève (*Vicia faba*) dans le bassin méditerranéen, le Soja (*Glycine max*) en Asie sans oublier l'Arachide (*Arachis hypogea*) et le Pois (*Pisum sativum*) dans le monde entier. (Broughton et al., 2003). Au cours des 10 dernières années, la production mondiale a connu des hauts et des bas, allant de 6,76 millions de tonnes (mt) en 2000-2001 à 9,56 Mt en 1998-1999, sans qu'il n'y ait de tendance à la baisse ou à la hausse. (AAC, 2006).

V.2) Production algérienne de pois chiche :

V.2.1) Répartition géographique et superficie :

En Algérie, la culture des légumineuses et en particulier le pois chiche à un intérêt national, car elle doit permettre de satisfaire les besoins, réduire les importations et limiter la dépendance économique vis-à-vis de l'étranger. En effet, cette culture occupe environ 37,04 % de la superficie totale, et avec un taux de production de 39,28% de la production des légumineuses alimentaires au niveau national (Tableau 03). La production du pois chiche est répartie dans tous le Nord Algérien. La plus grande part de la superficie nationale plus (48,30%) est contribué par le Nord-ouest Algérien. Alors que, le reste de la superficie est partagée dans les autres zones géographiques (Maatougi et al., 1996).

V.2.2) Production et rendement

L'Algérie occupe la neuvième place dans les pays producteurs, alors qu'elle est classée dans la quatrième dans les pays importateurs de pois chiche. Cette situation due en premier ordre à la diminution des superficies emblavées par le pois chiche, qui est passée de 37860 en 1994 à 19330 en 2001.

Parmi les 48 régions 31 sont des régions productrices de cette culture, d'après les statistiques agricoles de DSA, (2007) représentés dans les régions de Ain Témouchent, Tlemcen, Sidi Bel Abbes, Mostaganem et Mascara, constituent les régions productrices potentielles. Cependant, la production dans les autres régions a connue une importante régression en particulier dans les régions de Relizane, Constantine, Media et Saida, dont la production a atteint une diminution jusqu'à 100 %.

Malheureusement, les productions n'ont pas évolué, au contraire les rendements ont connu une régression importante. Les niveaux actuels de rendements sont parmi les plus faibles dans le monde.

Tableau 03 : Légumineuses alimentaires cultivées en Algérie : leur importance en superficie, production et rendement (moyenne 1993-2002). (M .A : Ministère de l'Agriculture. 993-2002)

Culture	Superficie		production		RdtQx/ha
	Ha	%	Qx	%	
Fève fèverole	40299	48,96	207042	50,27	5,13
Pois chiche	30487	37,04	161799	39,28	5,30
Pois sec	8627	10,48	29793	7,23	3,45
Lentilles	1271	1,54	5021	1,22	3,95
Haricot sec	1240	1,50	6480	1,57	5,22
Gesse	377	0,46	1732	0,42	4,59
Total	82301	100	411867	100	

VI) Cycle et saison de culture

Dans le bassin méditerranéen, le pois chiche est considéré comme une culture de printemps et d'hiver. En général, la plante se développe vigoureusement et complète son cycle évolutif en 4 mois (*El Aoufir, 2001*). C'est une plante rustique connue pour sa résistance à la sécheresse. Grâce à son enracinement profond elle peut supporter les terrains secs et peut se développer dans les zones à faible pluviométrie (*El Aoufir, 2001*).

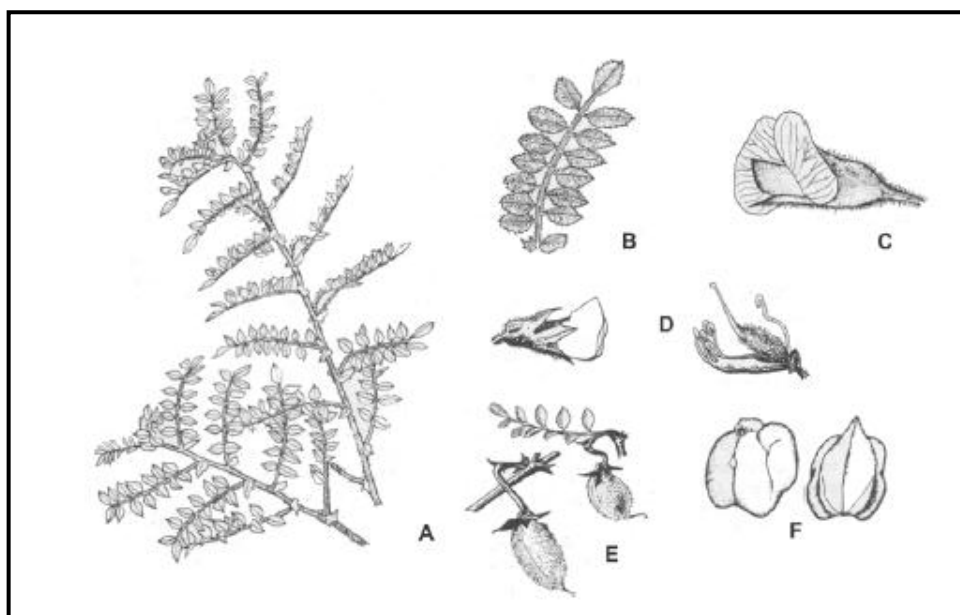


Fig 02: Schéma anatomique d'un plant de pois chiche: tige feuillue (A), feuille composé de 16 folioles (B), fleur zygomorphe (C), étamines, pistil et ovaire (D), gousses en développement (E), graines (F). (*Anonyme, 1992*)

Généralement, le cycle évolutif de pois chiche comprend deux phases : la phase végétative et la phase reproductrice. La phase végétative commence par la germination est envisagée par le passage de la graine de la vie ralentie à la vie active, affectant ainsi la sortie des racines séminales et le coléoptile qui pousse vers la surface (*Hamadach, 2001*).

Les pieds commencent à se ramifier et les bourgeons qui vont en même temps que la tige principale se développent, et donnent naissance à des pédoncules floraux qui constituent l'étape terminale de cette phase .La phase reproductrice débute par la floraison qui est marquée par l'apparition et le développement des ébauches florales, suivie par un effectif élevé en fleurs et un rendement en gousse appréciable (*Hamadach, 2001*).

Le cycle de la plante est complété par la maturation des graines. Cette phase se caractérise par un jaunissement des gousses accompagné d'une chute des folioles et d'un durcissement des graines (*Melakhessou, 2007; Hamadach, 2001*).

La durée de chaque phase et la faculté germinative diffère selon les variétés espèce et les conditions climatiques (la température, l'humidité, et la période d'éclairement) (*Melakhessou, 2007; Hamadach, 2001*).

VII) Les maladies de pois chiche

Le pois chiche est une plante à faible pouvoir de compétition face aux adventices du fait de sa croissance lente et de son faible indice foliaire (*Bhan et Kukula, 1987*).

En semis d'hiver, les adventices représentent une menace pour le pois chiche ; les pertes de rendement peuvent atteindre 98 % (*Pala et Solh, 1990*). Les conditions climatiques hivernales caractérisées par une hygrométrie relative élevée de l'ordre de 93 % et des températures clémentes, variant de 9 à 18,5 °C (*Habaieb et al., 2003*), favorisent le développement des maladies très redoutables, en l'occurrence le fusarium (*Fusariumoxysporum*), l'anthracnose (*Ascochytarabiei*) et autres, telles que la pourriture grise (*Botrytis cinerea*), la pourriture humide des racines (*Fusariumsolani*) et la pourriture sèche des racines (*Rhizoctoniabataticola*), surtout pour les variétés sensibles.

Principales maladies du pois chiche :

Plus de 172 agents pathogènes (Plus de 67 champignons, trois bactéries, 22 virus et mycoplasmes et 80 nématodes) ont été rapportés, et qui peuvent affecter la culture du pois chiche et sont partagés dans 55 pays dans le monde (*AkhtarAyyub, 2001*).

Dans ce contexte parmi ce nombre élevé des bio-agresseurs de cette culture, deux agents pathogènes sont considérés comme les plus importants.

VII.1) L'Anthracnose du pois chiche

Ascochytarabiei est l'un des plus importants pathogènes du pois chiche dans la plus grande partie des zones méditerranéennes, où il peut provoquer de très graves dégâts. Le champignon peut survivre sur les graines et sur les résidus de culture. Sur ces derniers la forme parfaite peut apparaître si les conditions climatiques sont favorables. *A. rabiei* montre un degré élevé de variabilité morphologique et pathologique. Des observations, conduites à partir de 1963, sur le comportement de plusieurs variétés au champ ou en conditions contrôlées, ont montré l'existence d'une spécialisation pathologique (*Sayoud et al., 1999*).

VII.2) Le complexe de flétrissement vasculaires et pourritures radiculaires de pois chiche

Ce complexe, induit par des agents pathogènes présents dans le sol (Tableau 4), constitue une véritable menace pour la culture du pois chiche dans la plupart des pays producteurs. Avec l'antracnose, le flétrissement et Les pourritures radiculaires sont communément observés dans les champs et constituent la principale contrainte de la culture du pois chiche dans le bassin méditerranéen (*El Aoufir, 2001*).

Le complexe inducteur de la pourriture radiculaire du pois chiche comprend le *F. solani* identifié par *Kraft, (1969)*. Les plantes infectées manifestent un flétrissement partiel ou total accompagné de lésions radiculaires et d'un jaunissement foliaire sans coloration vasculaire, d'une réduction de la croissance suivie de la mort de la plante (*El Aoufir, 2001; A. Kaouani et al., 2003*).

Le complexe fongique responsable des flétrissements vasculaires comprend d'une part le *Fusarium oxysporum f. sp. ciceris* (FOC), et d'autre part le *Verticillium albo-atrum*. Ce dernier, observé pour la première fois en Californie, est associé avec le FOC dans la manifestation de cette maladie au Pakistan, et en Tunisie, où il cause des pertes énormes pouvant atteindre 90% du rendement (*El Aoufir, 2001*).

Tableau 04: Agents responsables du flétrissement de pois chiche. (*Kaouani et al., 2003*)

Agent pathogène	Type des symptômes
<i>Fusarium oxysporum f. sp. ciceri</i>	Flétrissement et jaunissement vasculaire.
<i>Verticillium albo-atrum.</i>	Flétrissement
<i>Acrofullophora fusispora.</i>	Flétrissement.
<i>Fusarium solani</i>	Pourriture noire des racines.
<i>Rhizoctonia solani</i>	Pourriture sèche des racines.
<i>Phytophthora megaspora</i>	Pourriture des racines.
<i>Pythium ultimum</i>	Pourriture noire des semences.

I) Le champ électromagnétique

Un champ électromagnétique (CEM) est le couplage d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Un champ électrique est produit par une différence de potentiel (DDP) entre deux points : plus la DDP est élevée, plus le champ qui en résulte est intense. Ce champ électrique survient même s'il n'y a pas de circulation de courant. A l'inverse, le champ magnétique n'apparaît que lorsque le courant circule : plus l'intensité du courant est élevée, plus le champ magnétique est important.

Il y'a des champs électromagnétiques (CEM) dont la fréquence se situe entre 0 et 300 GHz.

Dans cet intervalle de fréquences on différencie trois types de champs :

- les champs statiques,
- les champs d'extrêmement basse fréquence,
- les radiofréquences.

Cette partie du spectre concerne les rayonnements dits non ionisants. (*Afsset, 2010*).

Le champ magnétique est représenté par des lignes de force. Elles suivent toujours la même direction, soit du pôle nord vers le pôle sud. (*Stéphanie Bourget, 2011*).

II) Nature fondamentale de la source de champ

Un champ est un phénomène physique d'échange d'énergie et de forces qui s'exercent à distance provoquant des effets induits sur des objets. Il se caractérise par son intensité et sa direction. Communément, il désigne la zone dans laquelle s'exerce le phénomène: on se trouve « dans le champ » ou non (*Raoul, 2010*). Dans le contexte de l'électromagnétisme, le terme « champ » désigne un phénomène susceptible de perturber des objets matériels dans un espace qui, théoriquement, peut être infini, mais qui, dans les faits, est évidemment plus restreint (*Afsset, 2010*). La gamme des ondes, ou rayonnements, électromagnétiques est vaste. Le spectre électromagnétique s'étend de la fréquence nulle avec les champs électriques et magnétiques statiques jusqu'à l'infini (rayonnements cosmiques). Tout en ayant une base physique commune, les ondes transportent des énergies très variables (*Perrin et Souques, 2010*). En se propageant, elles investissent un espace appelé champ électromagnétique, où le terme « champ » renvoie de façon plus générale à une zone où s'exercent des forces sur certains objets, particules, ions, atomes, molécules, etc., comme on parle de gravitation terrestre, ou champ de pesanteur, qui traduit l'existence d'une force s'exerçant sur tout objet possédant une masse, dirigée vers le centre de la Terre (*Perrin et Souques, 2010 ; Afsset, 2010*).

III) les champs et ondes électromagnétiques

III. 1) Définition

À la fois un champ électrique et un champ magnétique sont générés si une particule chargée se déplace à une vitesse constante. Le terme champ électromagnétique est réservé à un état où une particule chargée est accélérée. Dans la plupart des cas, l'accélération d'une particule chargée a lieu sous la forme d'une oscillation. Par conséquent, les champs électriques et magnétiques oscillent également. Toute modification dans le temps (dérivée de temps différent de zéro) du champ électrique donne naissance à un champ magnétique et vice-versa. Cela crée une interconnexion entre les oscillations des champs magnétiques et électriques (*Cifra et al., 2011*).

Donc, l'électromagnétisme désigne le phénomène d'oscillation, couplé des champs électriques et magnétiques qui peuvent se propager sous forme d'onde d'amplitude, de fréquence et longueur d'onde (*Pietak, 2012*). Les champs électriques sont associés à des forces en présence de charges électriques tandis que le champ magnétique existe en raison de la circulation des charges électriques (courants électriques) (*Durney, 1999*).

La structure la plus simple pour représenter une onde électromagnétique est une onde plane (figure 3). Une onde plane est telle que les vecteurs électrique (E), magnétique (H) et la direction de propagation forment un trièdre direct, les champs électrique et magnétique étant en phase, et le rapport de leur amplitude étant constant. Lorsqu'un objet situé dans un espace libre est soumis à une onde électromagnétique polarisée linéairement, le vecteur champ électrique est situé dans un plan fixe, perpendiculairement à la direction de propagation. Si ce même objet se trouve immergé dans une cavité intégrant une source EM de longueur d'onde faible devant les dimensions de la structure, le CEM est alors homogène (d'amplitude identique en tout point) et isotrope (les trois composantes des vecteurs champ ont la même amplitude) (*Roux, 2008*).

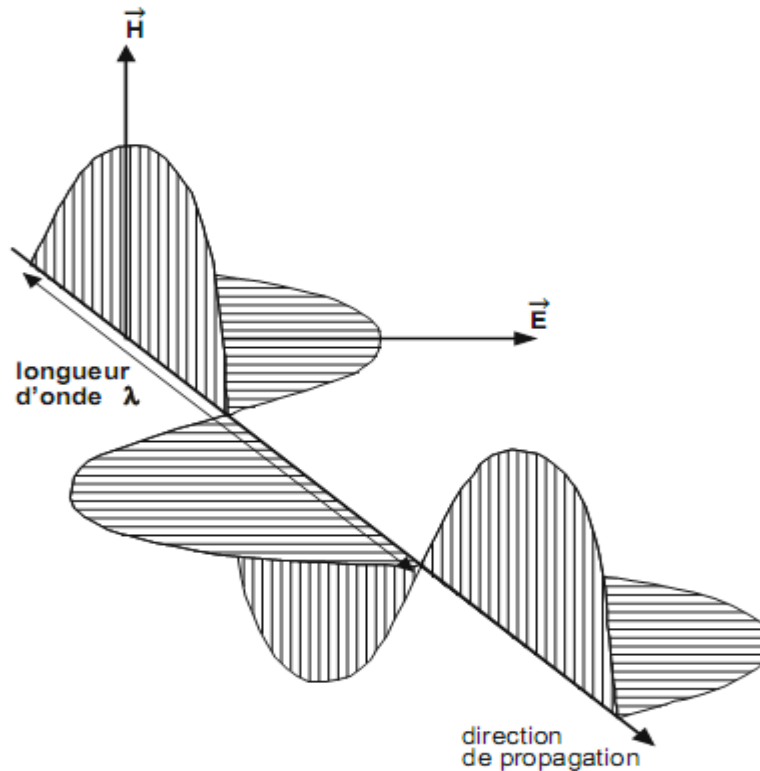


Fig. 3 : Représentation d'une onde électromagnétique plane (*Perrin et Souques, 2010*)

Les rayonnements électromagnétiques sont une forme de transport de l'énergie sans support matériel. Très hétérogènes par l'énergie qu'ils transportent et par leurs possibilités d'interaction avec la matière et en particulier les structures biologiques, ils peuvent être décrits par deux modèles physiques complémentaires, soit comme un flux de photons (modèle corpusculaire), soit comme une onde électromagnétique (modèle ondulatoire) (*Perrin et Souques, 2010*).

III. 2) Champ magnétique (CM)

Un champ magnétique est une région de l'espace sur lequel une force électrique agit sur les charges en mouvement. Les unités du champ magnétique sont Newton / Weber (N / Wb) ou Ampère / mètre (A / m), les deux sont équivalents. La densité de flux magnétique, étant définie comme la quantité de flux passant à travers une zone de section transversale unitaire, est souvent utilisée à la place du champ magnétique (*Kato, 2006*). L'unité de densité de flux magnétique (B) est le Tesla dans le système international (*Bourget, 2011*). Les champs magnétiques n'apparaissent que si le courant circule. Ils sont provoqués par le déplacement de charges électriques. Ils sont d'autant plus intenses que le courant est élevé (*Raoul, 2010*). Ainsi, si un champ magnétique existe, un champ électrique existe aussi. C'est pourquoi on parle de champ électromagnétique de manière générale (*Afsset, 2010*).

Un champ magnétique, tout comme le champ de pesanteur, ne peut être touché ou vu et correspond à un champ vectoriel (un champ magnétique possède une direction et une intensité). Nous pouvons prendre conscience de l'existence d'un champ magnétique par son effet sur des objets particuliers, sensibles à celui-ci, telle que la boussole. Par exemple, l'aiguille aimantée de la boussole est sensible au champ magnétique terrestre et s'aligne avec les lignes de champ, pointant le Nord magnétique (*Fanjat, 2012*).

Un champ **magnétique statique** est un champ de force créé par un aimant ou par le flux constant d'électricité, par exemple dans les appareils fonctionnant au courant continu (CC) (*OMS, 2006*). Les champs électriques et magnétiques statiques sont présents en permanence dans l'environnement. Alors que le champ électrique statique est associé à la présence de charges électriques fixes, le champ magnétique est dû au mouvement physique de charges électriques (*Perrin et Souques, 2010*).

III. 3) Champ électrique (CE)

Un champ électrique est une région de l'espace sur lequel une charge électrique exerce une force sur les objets chargés dans son voisinage. Les unités du champ électrique sont Newton / Coulomb (N / C) ou Volt / mètre (V / m), les deux sont équivalents (*Kato, 2006*).

IV) Le spectre électromagnétique

Selon l'approche choisie, le CEM peut être considéré comme une perturbation locale des champs électriques et magnétique ou comme un déplacement de photons (particules de masse nulle) dont l'énergie dépend de la fréquence du rayonnement. Par conséquent, la nature des CEM est très variable: onde radio lumière visible, rayons cosmiques, etc., et couvre un large spectre de fréquences qui s'étend des ondes radio (longueur d'onde de plusieurs kilomètres) aux rayonnements Gamma (γ , longueur d'onde de l'ordre du picomètre et moins) en passant par le spectre étroit de la lumière visible ($\lambda = 400 - 700\text{nm}$) (*Roux, 2008*). Le spectre est la distribution produite lorsque l'onde électromagnétique est décomposée en différentes composantes de fréquence (*Kato, 2006*). La figure 4 montre le spectre d'ondes électromagnétiques.

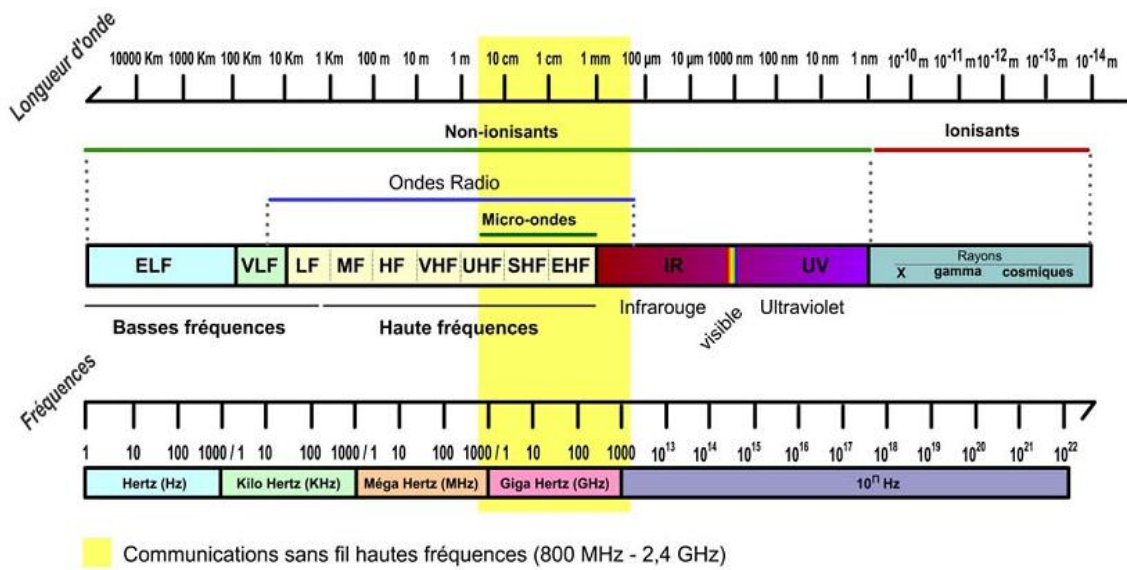


Fig.4 : spectre du rayonnement électromagnétique: E, extremely ; F, frequency ; H, high ; L, low ; M, medium ; S, super ; U, ultra ; V, very (*Roux, 2008*).

Les champs d’extrêmement basse fréquence sont ceux allant jusqu’à 300 Hz – par exemple le courant électrique. Les champs de moyenne fréquence 300 Hz à 10 MHz sont engendrés par certains appareils électriques. Les radiofréquences sont comprises entre 10 MHz et 300 GHz (domaine hertzien et ultrahertzien) et sont le fait de la radio, de la télévision, du radar, des téléphones portables ou des fours à micro-ondes (*Raoul, 2010; Vallée, 2004*).

Les rayonnements électromagnétiques peuvent être classés en deux types: rayonnements ionisants et les rayonnements non ionisants.

IV. 1) Les rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants sont définis comme la radiation EM à haute énergie de telle sorte que lors d'une interaction avec un atome, on peut arracher des électrons à destination de l'orbite d'un atome, ce qui provoque l'ionisation de l'atome (*Wang, 2009*). Ce mécanisme peut être à l'origine de modifications provenant de cassures mal réparées au sein des molécules d'ADN, support de l'information génétique (mutations). Cela confère un caractère mutagène aux rayonnements concernés pouvant, par voie de conséquence, se révéler cancérogènes (*Perrin et Souques, 2010*). L'atome le plus facilement ionisable est le potassium, avec une énergie d'ionisation de 4,3 eV. L'énergie de liaison des électrons les moins liés des atomes de la matière vivante (H, C, N, O) est 12,4 eV. Tout rayonnement d'une longueur d'onde inférieure à 288 nm peut donc être considéré comme ionisant (*Mouhssine, 2004*). Des ondes de fréquence plus basse (la chaleur et de la radio) ont moins d'énergie que

les ondes de fréquences plus élevées (les rayons X et gamma), d'où seule la partie à haute fréquence du spectre électromagnétique qui comprend des rayons X et des rayons gamma a suffisamment d'énergie pour provoquer une ionisation (*Wang, 2009*).

IV. 2) Les rayonnements non ionisants

Les champs non ionisants présentent des fréquences correspondant à des énergies de photons bien en dessous des énergies d'ionisation ou de liaisons pertinentes (*Kaiser, 1996*), c'est à dire ils ne portent pas suffisamment d'énergie pour ioniser un atome ou des molécules (*Wang, 2009*). Le rayonnement non ionisant (RNI) comprend le spectre des rayons ultraviolets (UV), lumière visible, infrarouge (IR), micro-ondes (MW), la fréquence radio (RF), et les rayonnements extrêmement basses fréquences (ELF) (*Astumian et al., 1995; Weaver et al., 1998*). Leur mode d'action sur l'organisme est différent, fondé sur la circulation de courants et/ou des phénomènes d'échauffement selon la fréquence. Une erreur courante consiste à penser que la dangerosité potentielle d'un RNI est d'autant plus forte que sa fréquence est élevée, ce qui n'est pas le cas puisque l'interaction ondes-matière et la puissance sont également à prendre en compte (*Perrin et Souques, 2010*).

Dans notre travail, il ne sera question que des RNI.

V) Les sources d'ondes électromagnétiques

V. 1) Sources naturelles

La source naturelle la plus intense est le soleil, qui produit une onde électromagnétique ayant des fréquences dans l'ensemble du spectre avec un maximum d'intensité dans le domaine visible (dans le jaune puisque le soleil est jaune). L'atmosphère bloque les rayonnements les plus énergétiques (rayons X et γ) dangereux pour la vie, mais aussi, avec l'ionosphère, une partie des rayonnements dans le domaine des ondes radio (*Afsset, 2010*).

Le champ magnétique terrestre, dû au fait que la Terre se comporte comme un aimant, présente d'importantes variations locales. Sa valeur est non négligeable. En moyenne, il varie de 30 à 70 μT (*Perrin et Souques, 2010; Bourget, 2011*). Ce champ géomagnétique dirige l'aiguille de la boussole, mais joue aussi un rôle décisif dans l'orientation et la migration de certaines espèces animales grâce à des mécanismes biologiques spécifiques permettant la sensibilité au champ magnétique ou magnétoréception (*Perrin et Souques, 2010; OMS, 2006*).

Les êtres vivants sont continuellement soumis à une grande variété de CEM et ils en émettent eux-mêmes à travers leurs activités métaboliques, leurs communications cellulaires, etc. (*Roux, 2008*).

V. 2) Sources artificielles

Les sources courantes sont principalement les matériels électroménagers, les matériels électroniques professionnels, les appareils électriques (tels que la télévision, les lumières, ventilateurs, radiateurs, etc.), les transports électrifiés, les dispositifs de télécommunications sans fil, les câbles de transmission à haute tension (*Huang et Wang, 2007; Maziah et al., 2012; Ragha et al., 2011; Raoul, 2010*). De plus La multiplication des sources artificielles est liée au développement technologique (*Perrin et Souques, 2010*).

VI) Interactions ondes-matières

L'électromagnétisme fait l'objet de la résolution numérique des équations de Maxwell à l'aide de ressources informatiques limitées. Ces solutions décrivent les interactions physiques entre les champs électromagnétiques et les objets exposés à des champs (*Umashankar, 1993*).

Les compréhensions quantitatives des interactions sont essentielles dans la microdosimétrie pour évaluer l'intensité de champ et le potentiel sur la membrane cellulaire (*Wang, 2009*).

L'interaction entre un rayonnement électromagnétique et la matière peut se traduire par une diffusion sans transfert d'énergie ni changement de fréquence (diffusion élastique) ou par un transfert au matériau de tout ou partie de l'énergie du rayonnement. Dans ce dernier cas, l'énergie incidente est en partie absorbée par la matière et en partie diffusée sous la forme d'un nouveau rayonnement électromagnétique de fréquence plus basse (diffusion inélastique). La fraction absorbée peut avoir un éventuel effet biologique. Elle peut entraîner une transition énergétique et/ou un effet thermique (*Perrin et Souques, 2010*). Une façon courante pour décrire l'absorption du champ électromagnétique dans la matière consiste à calculer le débit d'absorption spécifique (SAR). SAR est la mesure de l'absorption du rayonnement EM non ionisant par un tissu vivant (*Ragha et al., 2011*).

VII) Expériences électromagnétiques

Trois classes primaires des expériences d'influence électromagnétique (figure 5) peuvent être distinguées savoir (*Hunt et al., 2009*):

- I. champs magnétiques: Principalement régime en champ proche (permanent, changeant lentement, et les champs pulsés à partir de bobines magnétiques)
- II. domaines à prédominance électrique: régime en champ proche (permanente ou changent lentement)

III. Les champs avec des composants électriques et magnétiques, avec des ratios compris entre 0,1 et 10: régime en champ lointain (fréquence d'oscillation CEM typique est de 100 kHz ou plus)

IV. champs de (I, II, ou III) avec une topologie spatiale et / ou temporelle uniques.

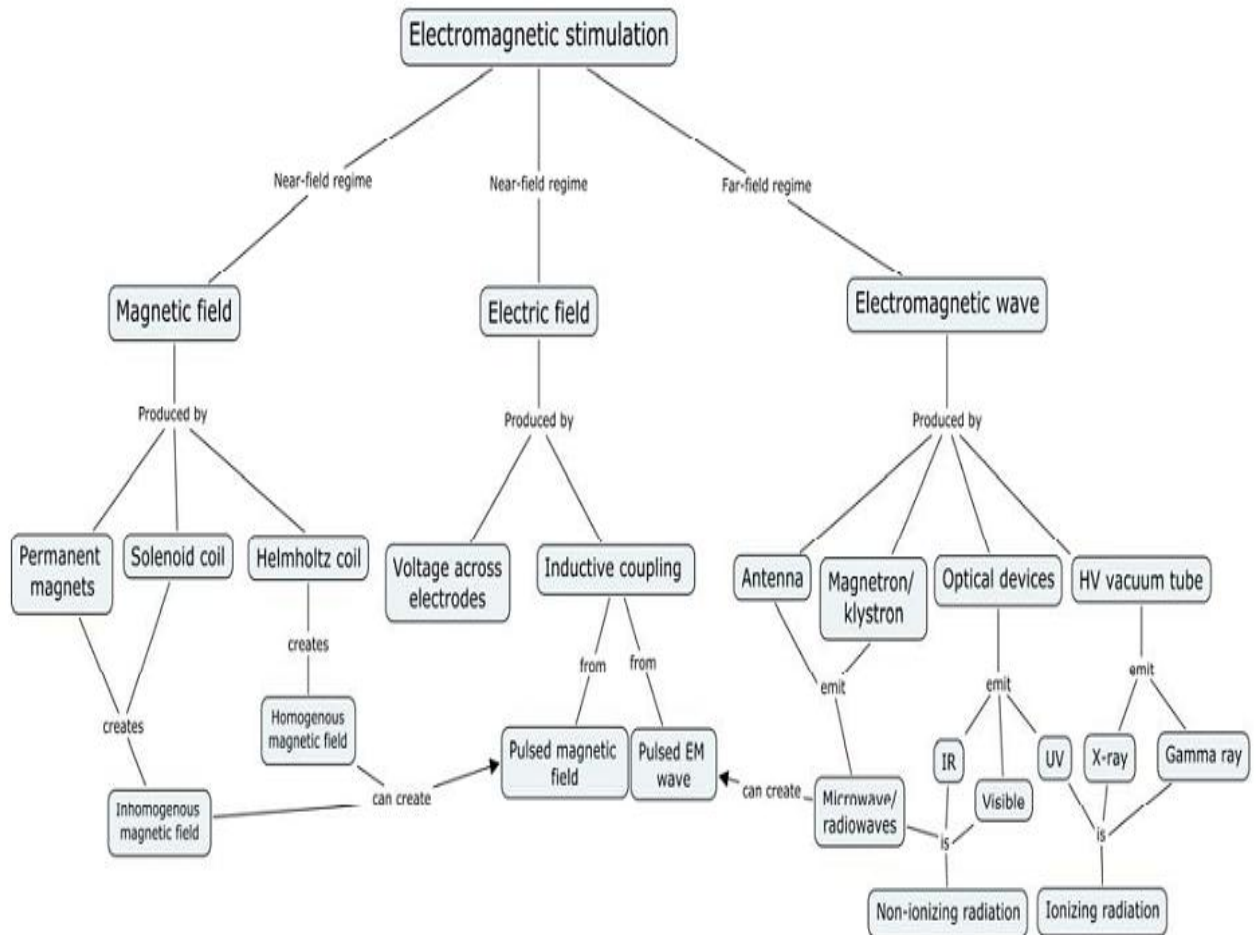


Fig. 5 : Les modalités de stimulation électromagnétiques provenant des champs et des vagues (Hunt et al., 2009).

I) Les plantes et le champ électromagnétique

L'intérêt pour les effets biologiques des champs électromagnétiques (CEM non ionisants) sur l'ensemble du corps, mais plus spécifiquement sur les systèmes cellulaires, a considérablement augmenté ces dernières années (*Blank, 1992; Lin, 1994; Blank et Goodman, 2009*). Un certain nombre d'études expérimentales ont montré que les champs électromagnétiques faibles peuvent influencer les systèmes biologiques (*Kaiser, 1996*).

Comme les expériences sur les humains avec micro-ondes sont difficiles, les plantes seraient un meilleur choix pour étudier l'effet global sur la croissance, la productivité, les paramètres biochimiques et physiologiques (*Ragha et al., 2011*).

Les plantes sont des récepteurs naturels des CEM haute fréquence dans la mesure où elles possèdent des structures dédiées à l'absorption des rayons lumineux (antennes collectrices pour la photosynthèse). Quelques travaux se sont intéressés à étudier l'impact des CEM haute fréquence sur le monde végétal. Cette démarche est justifiée puisque les plantes sont très sensibles aux champs magnétiques, notamment le champ terrestre ainsi que les CEM de très basse fréquence qui influencent leur développement (*Gallan et Pazur, 2005*). Il est possible de mesurer chez ces organismes immobiles des paramètres cellulaires universels, dans des conditions contrôlées (*Roux, 2008*). Les études sur les plantes n'ont pas besoin d'installations spéciales et n'ont pas les obligations statutaires. Par conséquent, les cultures populaires doivent subir au préalable une sélection pour l'étude du champ électromagnétique (*Ragha et al., 2011*). Cependant, les variables décrites dans la littérature sont encore peu nombreuses et trop souvent mesurées à long terme (*Roux, 2008*).

II) Phénomènes Bio-électromagnétiques

II.1) Corrélation de l'activité électromagnétique cellulaire avec le métabolisme, la vitalité et la réplication

Certaines études montrent une corrélation claire de la fonction cellulaire et l'activité électromagnétique naturelle. *Pohl et al. (1981)* ont observé des variations importantes du CEM dans des cellules de levure en utilisant la technique diélectrophorétique pendant la mitose des cellules. Il existe également des rapports de corrélation du pic de l'émission électromagnétique cellulaire lors de la réplication. Le procédé de microtubules remonte de forme fuseaux mitotiques : une liaison de chromatides pour former les microtubules kinétochoriens et l'allongement de fuseau mitotique lors de l'anaphase A et B. Ceci suggère un rôle crucial des microtubules dans la production de champs électromagnétiques cellulaires (*Pokorny et al., 2001*).

II.2) Comment les cellules peuvent générer des champs électromagnétiques

II.2.1) Les bases de la production de champ électromagnétique

Tous les objets, qu'ils soient vivants ou non vivants, génèrent des champs électromagnétiques en permanence en raison de l'agitation thermique des particules. Le spectre électromagnétique qui est généré est décrit par la loi de Planck pour le cas idéal d'un corps noir à l'équilibre thermique. Les CEM générés thermiquement ont un caractère aléatoire, non-cohérent. Cependant, la question demeure de savoir si le CEM qui est générée par une entité biologique est un CEM simple généré par un objet ou fait partie d'une propriété biologique d'un système vivant. Il semble que ces champs électromagnétiques font partie intégrante des systèmes biologiques et font donc partie des processus intentionnels (*Cifra et al., 2011*).

Physiquement, les systèmes biologiques vivant sont non-équilibrés (ils ont différents niveaux d'énergie que leur environnement) et ouvert (ils peuvent échanger de l'énergie et de la matière avec l'environnement) (*Cifra et al., 2011*).

II.2.2) Les bases pour la production de champ électromagnétique cellulaire

Diverses fonctions cellulaires sont associées à des charges en mouvement dans des compartiments cellulaires et peuvent générer des champs électromagnétiques (*Buzsaki et al., 1992*). Par exemple, la dépolarisation de la membrane (un neurone à plusieurs centaines de Hz) génère des oscillations de charges électriques avec des harmoniques supérieures, la création d'un CEM avec une fréquence jusqu'à 10 kHz (*Collins et al., 2001*). Toutefois, ce phénomène est limité à un groupe de cellules spécialisées dans les organismes supérieurs et de toutes les cellules d'un organisme sont impliqués dans le processus de dépolarisation de la membrane. En 1968, Herbert Fröhlich postulé que les systèmes biologiques présentent des vibrations longitudinales cohérentes des structures électriquement polaires (*Fröhlich 1968a, b, 1969*). Les structures électriquement polaires, par définition, contiennent des charges électriques et peuvent, sous certaines conditions, générer des champs électromagnétiques quand ils vibrent. Sans surprise, la majorité des molécules de protéines sont des structures électriquement polaires. Alors, où dans la cellule pourrait exister ces vibrations cohérentes.

II.2.3) Théories de génération des champs électromagnétiques cellulaire

Le modèle Fröhlich original était général et ne limite pas le processus à n'importe quelle structure cellulaire particulière. Dans son modèle, lorsque l'alimentation en énergie dépasse un niveau critique, la structure polaire pénètre dans un état dans lequel un état constant de vibration non linéaire est atteint et que l'énergie est stockée de façon très ordonnée. Cet ordre s'exprime par une corrélation de phase à longue portée, ce qui est

physiquement semblable à la supraconductivité et la superfluidité, où le comportement des particules est communal et inséparables. La source d'énergie dans ce modèle est l'énergie métabolique, et la non-linéarité du système de vibration est provoquée par un fort champ électrique statique dans la membrane cellulaire. Donc Fröhlich à considérer les membranes cellulaires comme la source de vibrations postulées. Dans une série élaborée et complète de publications, Fröhlich a proposé un rôle pour les CEM dans la régulation de la croissance cellulaire et la déréglementation (*Fröhlich, 1980*).

Après la découverte du cytosquelette cellulaire, les microtubules (MTs) sont devenus un candidat sérieux comme la source de CEM cellulaires. Cela était dû au fait que les MTs satisfaisent les exigences du système Fröhlich et pour la génération de champs électromagnétiques (*Cifra et al., 2011*).

D'autres structures cellulaires ont également été considérées comme des sources potentielles de production de champs électromagnétiques. Techniquement, une structure ou sous-structure cellulaire peuvent osciller à sa fréquence de résonance (fréquence propre) lorsqu'il est excité par l'énergie, à moins fortement atténué (*Jafary-Asl et Smith, 1983*).

Des scientifiques russes, tel que Betskii et ses collègues ont considéré les déformations et les asymétries de la membrane cellulaire polaire comme un mécanisme de génération d'ondes acousto-électriques (*Betskii et al., 1988*).

Une autre théorie de la génération du CEM à l'électrosoliton a été mise en évidence par **Brizhik et Eremko (2003)**, **Musumeci et al. (2003)**. L'électrosoliton est l'équivalent électrique de soliton. Le soliton est une onde solitaire d'auto-renfort (un paquet d'ondes ou d'impulsions) qui conserve sa forme pendant qu'il se propage. Les électrosolitons peuvent être considérés comme des charges mobiles qui assurent le transport de charge dans les systèmes biologiques et peut être considéré comme un concurrent important de la production de champs électromagnétiques dans le domaine des fréquences micro-ondes.

Un modèle électrochimique a été proposé par Pohl. Il a suggéré que les CEM cellulaires peuvent être générés par le couplage des réactions chimiques à ions physiquement mobiles dans les régions de la cellule pour produire des ondes de charge (*Pohl et al., 1981; Pohl, 1982*). Néanmoins, le modèle de la génération de CEM cellulaire de Pohl n'a pas été développé.

Les auteurs de tous les modèles mentionnés ci-dessus ont été créés directement pour décrire comment les CEM cellulaires peuvent être générés. Par contre, le modèle récent établi par Gov permet l'analyse des vibrations mécaniques sur la base du cytosquelette membranaire ne mentionnant aucune connexion à des oscillations électriques (*Gov et Safran, 2004, 2005a,*

b; Lin et al., 2006). Cependant, **Cifra et al., (2011)** supposent que ces vibrations mécaniques peuvent conduire à oscillations de protéines transmembranaires électriquement polaires qui générant ainsi des oscillations électriques.

Parallèlement à ces études d'autres chercheurs ont tenté d'explorer l'origine des champs électromagnétiques cellulaires dans la gamme de fréquences THz. Par contre d'autres chercheurs se sont concentrés sur la région optique du CEM et les propriétés optiques cellulaires (*Cifra et al., 2011*).

Voeikov est un autre scientifique qui croit qu'il ya un rôle non négligeable de l'eau cellulaire pour la production de le CEM électroniquement excité (*Voeikov, 2005*). Il a été montré expérimentalement que divers processus physiques de faible énergie tels que l'agitation par ultrasons, permet de faire passer de l'eau à travers des tubes capillaires et les CEM micro-ondes externes peuvent influencer la génération UPE "ultra-faible émission de photons" dans l'eau (*Vaks et al., 1994*).

Les modèles décrivant la génération de faibles fréquences cellulaires utilisant des vibrations des champs électromagnétiques de structures électriquement polaires tandis que la production de CEM optique est enracinée dans l'excitation électronique des molécules. Cependant, certains scientifiques tels que Swain et Popp ont suggéré qu'il y ait un lien entre les différents domaines spectraux des CEM cellulaires. Ils ont proposé que si certaines conditions non-linéaires sont remplies, la conversion ascendante (additionnant l'énergie des photons à envoyer à des photons d'énergie plus élevés) de photons dans la même gamme de fréquences GHz pourrait donner naissance à des photons optiques (*Popp, 2006; Swain, 2008*).

III) Les effets biologiques des champs électromagnétiques

III. 1) Les catégories des effets biologiques dus à l'exposition au champ électromagnétique

Les rayonnements électromagnétiques peuvent également être divisés en plusieurs catégories en fonction des propriétés des ondes électromagnétiques. Une catégorie est l'exposition aux ondes continues (*Hayashi et al., 1999*). D'autre part, l'exposition aux ondes non-continues (pulsé ou impulsion modulée) a un impact différent sur le système biologique. L'évaluation de ces impacts dépend d'un certain nombre de paramètres, tels que l'intensité, la forme de l'impulsion, la largeur et le type de séquence d'impulsions (*Framme et al., 2005; Huber et al., 2005*).

En termes d'effet de chauffage, ces radiations non ionisantes peuvent être subdivisées en deux types thermiques et non thermiques (*Wang, 2009;Ragha et al., 2011*).

L'effet thermique est induit par la puissance EM absorbée dans le tissu ou l'organe. L'effet non thermique est la résultante de l'interaction directe de champs électrique ou champs magnétique avec des cellules ou des tissus corporels (*Wang, 2009*).

III.1.1) Effet thermique

L'effet thermique se réfère à l'effet biologique en raison de l'élévation de température provoquée par l'absorption de l'énergie électromagnétique à l'intérieur d'une masse donnée de matériel biologique (*Wang, 2009*).

III.1.2) Effet non-thermique

Conformément à la norme IEEE C95.3-2005, les effets non thermiques sont définis comme «tout effet de l'absorption d'énergie EM pas associé ou dépendant de la production de chaleur ou d'une augmentation mesurable de la température» (*IEEE, 2005*).

Bien que l'énergie associée à des rayonnements radio fréquences ne soit pas assez grande pour provoquer l'ionisation des atomes et des molécules, des effets biologiques non thermiques peuvent encore exister au sein de ces niveaux d'énergie. Ces effets peuvent être détectés si l'effet du champ électrique à l'intérieur du système biologique exposé à des champs radio fréquences n'est pas masqué par le bruit thermique (ou de mouvement aléatoire, ou appelé mouvement brownien) (*Wang, 2009*).

L'un des effets non thermiques les plus détectables est l'ion-flux, qui décrit le mouvement des ions calcium sous l'influence de champs électriques oscillants externes. Cependant, le mouvement de ces ions est fortement réduit par la viscosité des liquides environnants (*Fear et Stuchly, 1998; Cooper, 1984*).

III. 2) L'interaction des champs électromagnétiques et les systèmes biologiques

Depuis des dizaines d'années, Les effets biologiques des champs électromagnétiques de faible, moyenne et haute fréquences ont fait l'objet de nombreux travaux, notamment sur les effets observés dans la bande des micro-ondes (de longueur d'onde du mm au cm) (*Bamothy, 1964*). L'intérêt est également tourné vers l'action des rayonnements de basse fréquences (30-300 Hz, de longueur d'onde: 1000 à 10000 Km) et de très basse fréquence (autour de Hz) (*Pool, 1990a, b*).

L'interaction est en fait plus compliqué en raison de l'apparition de sources dans les matériaux étudiés. En général, les matériaux biologiques sont composés d'un mélange complexe de l'eau, des ions, des molécules polaires et non polaires, des protéines, des lipides et autres. Les caractéristiques des propriétés diélectriques de ces matériaux complexes sont fortement dépendantes de leur composition réelle et l'environnement, ainsi que la fréquence électromagnétique et de la température (*Wang, 2009*). Les champs magnétiques ne sont pas

atténués par les membranes et les parois biologiques et ils peuvent pénétrer dans les cellules et même plus profondément dans les tissus vivants. Grâce à ce mécanisme, ils peuvent influencer les voies métaboliques et les événements qui se produisent au niveau cellulaire (*Funk et al., 2009*).

Les matériaux exposés à un CEM peuvent éprouver des modifications au sein de leur structure intermoléculaires. Le champ électrique appliqué provoque une polarisation induite, l'alignement des dipôles électriques déjà existants, ainsi que le mouvement des charges libres. Les champs électriques à l'intérieur et à l'extérieur de la substance sont modifiés à partir du champ incident à cause de ces effets (*Wang, 2009*). Plusieurs expériences ont montré que les cellules et les organismes réagissent de diverses manières distinctes appliqué à l'extérieur des rayonnements non ionisants à des puissances assez bas pour éviter de chauffer le tissu (*Cifra et al., 2011; Levin 2003; Levin 2009*). Par exemple, chez les plantes, l'application de rayonnement électromagnétique de faible puissance dans la gamme de 10^8 - 10^9 Hz entraîne des changements à l'expression des gènes, la formation de méristèmes aberrant, modification des modes de croissance cellulaire et la croissance accrue de l'organisme (*Racuciu et Miclaus, 2007; Roux et al., 2008; Tafforeau et al., 2003; Tkalec et al., 2009*).

Trois termes macroscopiques sont définis pour tenir compte des interactions entre les champs électromagnétiques et les matières. La permittivité ϵ (unité: F / m, farads par mètre), décrit combien de polarisation provoquée et de l'alignement partiel des dipôles électriques permanents se produit pour un champ E appliquée donnée (*Wang, 2009*).

III. 3) Les réponses des structures cellulaires à des champs électromagnétiques ou magnétiques

Il est difficile d'évaluer les effets sur les organismes qui sont exposés à des champs électromagnétiques ou magnétiques. La principale raison à cela est la structure complexe des systèmes biologiques. De nombreuses expériences sur les effets des champs électriques ou magnétiques sont terminées sur les deux organismes structurés simples et complexes. Comme la plupart des structures biologiques sont non homogène, quand ils sont exposés à des champs électriques ou magnétiques, ils montrent des changements cellulaires importants. Cette situation peut s'expliquer par l'examen des réponses des molécules, des ions et des membranes de moins de champs électriques et magnétiques (*Goodman et al., 1995; Simko, 2004; Funk et al., 2009*). Plusieurs études ont montré que les champs magnétiques et les champs électromagnétiques externes optimal peuvent exercer une influence sur une grande variété de fonctions cellulaires, et pourraient accélérer l'activation de la germination des graines (*Kavi, 1983; Oomor, 1992; Yano et al., 2004*). Il a été rapporté que les champs électromagnétiques

externes induisent à la fois l'activation des ions et la polarisation des dipôles dans les cellules vivantes (Johnson, 1972). Les traitements électriques et magnétiques sont supposés améliorer la vigueur des semences en incitant les processus biochimiques qui impliquent les radicaux libres et en stimulant l'activité des protéines et des enzymes (*Takahashi, 1996, Ming, 1988*). Mais le mécanisme exact de ces actions et de cette interaction avec les cellules vivantes est encore inconnu (*Dao-liang, 2009*).

Par exemple, il a été illustré que les champs électromagnétiques de basse fréquence et de radio fréquence peuvent agir au niveau cellulaire et affecter diverses fonctions cellulaires, y compris la prolifération et la différenciation cellulaire (*Foletti et al., 2009; Lisi et al., 2006, 2008; Ventura et al., 2005*), la perméabilité de la membrane cellulaire et l'homéostasie des ions (*Goltsov, 1999*), l'apoptose (*Tian et al., 2002; Santini et al., 2005*), la synthèse de l'ADN (*Takahashi et al., 1986; Litovitz et al., 1994*), la transcription de l'ARN (*Goodman et al., 1983*), l'expression des protéines (*Goodman et Henderson, 1988*), la phosphorylation des protéines (*Sun et al., 2001*), les dommages cellulaires (*Wolf et al., 2005*), la motilité des liposomes (*Gölfert et al., 2001*), la synthèse d'ATP (*Zrimec et al., 2002*), la production d'hormones (*Paksy et al., 2000*), l'activité des enzymes anti oxydantes (*Kula et al., 2000*), l'activité métabolique (*Milani et al., 2001*), et l'inhibition de l'adhésion (*Jandová et al., 2001*) ainsi que le stress oxydatif (*Meral et al., 2007*). Il existe aussi certaines preuves que les micro-ondes (300 MHz à 300 GHz) ont divers effets sur le système biologique au niveau de l'organisme, tissu, cellule et au niveau moléculaire (*Roux et al., 2006*) et produisent des changements dans la perméabilité de la membrane cellulaire et le taux de croissance des cellules ainsi que les interférences avec les ions et les molécules organiques, comme les protéines (*Ungureanu et al., 2009*).

III. 3.1) Modifications de la membrane

Les structures cellulaires qui sont touchés par CEM dans le premier degré sont les structures de la membrane cellulaire. Alors que les membranes agissent comme des solides poreux contre les champs électriques qui sont appliqués vertical à leurs surfaces, ils réagissent comme des liquides visqueux contre ces champs dans le plan de la membrane. En outre, les membranes, quand ils sont électriquement ou chimiquement stimulés, créer des réactions biochimiques actifs qui peuvent changer les canaux ioniques à l'intérieur en fonction des exigences de la cellule. C'est pourquoi les champs électriques affectent le caractère semi-perméable des membranes pour différentes molécules et ions; ils modifient la configuration de lipides et de protéines de la membrane et modifient le niveau d'interaction de molécules qui interagissent avec la membrane (*Yalçın et Erdem, 2012*).

Les effets biologiques associés à des membranes cellulaires peuvent aussi exister dans des conditions d'exposition aux radiofréquences. La porosité de membranes sélectives pour les ions impliqués dans diverses réactions chimiques actives est régie par deux potentiels électriques et des signaux chimiques (*Cain, 1980; Stoykov et al., 2004*). En outre, les impulsions électriques ont été montrées pour modifier la structure de la membrane plasmique, par la formation d'ouvertures semblables à des pores (*Neumann et Rosenheck, 1972*). Selon **Neumann et al. (1982)**, la présence d'un champ électrique externe préférera les configurations dipôle le long de la direction du champ qui peut ensuite conduire à un amincissement de timbres de membrane et, finalement, à la formation de trous ou des pores. Un tel "modèle d'électroporation" (*Weaver et Barnett, 1992*) indique que l'interaction du champ électrique externe avec les doublets de lipides d'une configuration des pores peut rendre compte de l'échange de matière renforcée à travers la membrane (*Chernomordik, 1992*). À cet égard, à des champs électriques sous-critiques de la taille moyenne des pores est fixe et très faible, mais à une intensité de champ supercritique, les pores se développent de sorte que quand un diamètre de pore critique est atteint l'effondrement de la membrane (claquage) (*Benz et Zimmermann, 1981*). Cette formation de pores "électroporation" électro-induite augmente la perméabilité de la membrane plasmique de molécules de différentes tailles. En outre, il a été démontré au cours des années que plusieurs des effets du champ magnétique sur les organismes vivants découlent de l'altération du flux de calcium à travers la membrane. L'explication se trouve dans les propriétés diamagnétiques des phospholipides qui composent la membrane (*Rosen, 2003; Galland et Pazur, 2005*).

Selon les données obtenues après des expériences en laboratoire, il a été conclu que les changements dans les deux structures formant la membrane et dans les charges de surface sont à la suite de l'exposition aux CEM. Lorsque des groupes de micro-organismes ont été exposés à des champs électrique ou magnétique à la fois séparément et en association pendant 24 heures, il a été observé que la négativité des charges de surface a augmenté. Par ailleurs, il est rapporté que les membranes de ces cellules sont plus hydrophobes. Comme on peut le comprendre à partir de ces études, la structure hydrophobe est modifiée lorsque le champ électrique ou magnétique est appliqué sur les cellules, ou une caractéristique hydrophobe est diminuée en raison de axées sur les changements négatifs de la charge de la membrane (*Marron et al, 1983, 1988*).

III. 3.2) Effets ioniques

Comme mentionné précédemment, les modifications qui se produisent dans les canaux ioniques de la membrane lorsque les structures membranaires cellulaires sont affectées par le

CEM change la concentration en ions des canaux spécifiques à l'intérieur de la cellule et les activités cellulaires connectés à ces ions (*Yalçın et Erdem, 2012*).

L'existence de courants électriques transcellulaires endogènes chez les plantes supérieures (*Behrens et al., 1982*) est entraîné par les canaux ioniques et des pompes ioniques dans différentes zones de la membrane cellulaire (*Chang, 1992*). Néanmoins, les points de vue décrits dans (*Lednev, 1991; Liboff, 1992*) impliquent que CM extrêmement basse fréquence peut affecter les ions dans les cellules.

III. 3.2.1) Calcium

Chionna et al (2003) ont signalé des changements dans les lymphocytes humains et les cellules U937 en raison d'un champ magnétique statique (CMs). Ils ont découvert que le champ magnétique statique modifié la forme des cellules, la membrane plasmique, et a augmenté le niveau de Ca^{2+} intracellulaire qui joue un rôle anti-apoptotique. Dans une étude, une fréquence de 50 Hz, et une intensité de 0,1 mT d'un CEM a été appliquée aux cellules Jurkat et il a été constaté qu'ils affectent les concentrations de Ca^{2+} intracellulaires libres. Les chercheurs ont passé les cellules à travers la bobine Helmholtz pour des périodes comprises entre 15 et 200s. Pendant ce processus, le niveau de Ca^{2+} intracellulaire augmenté de deux à quatre fois, à partir de ses valeurs normales de 50 à 100 nm à des valeurs de 200 à 400 nm (*Lindström et al., 1993*). Dans une étude similaire sur ce domaine, les cellules HL-60 ont été exposées à différentes intensités de champ magnétique à 6,25 MHz pour diverses périodes de temps entre 10 et 60 min en utilisant le système de résonance magnétique et les variations de flux de Ca^{2+} ont été déterminés. À la suite de cette étude, il a été constaté que 23 min d'application a augmenté l'apport de Ca^{2+} à 25% par rapport à celle de la normale (*Carson et al., 1990*).

Grundler et Kaiser (1992), Kaiser (1995) ont considéré que le couplage des champs électromagnétiques aux oscillations de Ca^{2+} intracellulaire peut être un mécanisme possible.

III. 3.2.2) Le sodium et le potassium

En comparaison avec le calcium, il existe peu d'études sur les effets des champs électromagnétiques sur le sodium et le potassium. Dans les études qui ont été menées par **Tsong** et ses collègues, il a été observé qu'il ya une augmentation du transport Rb^+ qui est un potassium analogique. Malgré le gradient de concentration, il n'y a pas de changement dans l'hydrolyse de l'ATP. Compte tenu de ce résultat, il est suggéré que l'enzyme Na^+/K^+ ATPase augmente le transport de Rb en utilisant l'énergie provenant du CEM (*Serpersu et Tsong, 1983*).

III. 3.3) Acide nucléique et l'expression du gène

Dans de nombreuses études qui ont été menées sur les effets in vivo de champs électriques et magnétiques, il est rapporté que l'ADN n'est pas affecté négativement (*Fiorani et al, 1992*).

Plus récemment, d'autres auteurs ont notifié des changements cytogénétiques (micronoyaux, des ponts et des fragments chromosomiques interchromosomal) induites dans le blé exposés à une source de micro-ondes. Ils concluent que ces effets ne sont pas thermique (*Pavel et al., 1998*). Un enquêteur ukrainien a également observé des modifications dans la distribution de la chromatine condensée des cellules du méristème exposées à des champs magnétiques faibles (*Belyavskaya, 2001*).

Les expériences sur les réponses cellulaires de fibroblastes de rat ont été effectuées séparément dans un champ électrique de 50 Hz et un champs magnétique de 2mT. Le champ magnétique a augmenté le dépôt des fibroblastes en phase G1 du cycle cellulaire, il a causé plus de l'accumulation que le champ électrique aux phases G2, S et M (*Schimmelpfeng et Dertinger, 1993*). De même, dans une autre étude sur les ostéoblastes de rat, il a été constaté que les CEM de valeur de 50 Hz allongent la phase S du cycle cellulaire et diminuent le taux d'apoptose dans les cellules (*Tang et Zhao, 1999*). Les études qui ont été menées ont présenté l'idée que les CEM n'affectent pas directement l'ADN dans des conditions in vivo, mais il peut affecter l'ADN indirectement en modifiant certaines réponses cellulaires importantes (*Kindzelski et Petty, 2000*).

III. 3.4) L'activité enzymatique

L'activité de nombreuses enzymes semble être modulée par des CEM. Les systèmes enzymatiques les plus étudiés sont l'ornithine-décarboxylase, enzyme nécessaire à la réplication d'ADN; la Na⁺/ATPase, qui joue un rôle clé dans la transmission du potentiel d'action membranaire et les protéines kinases C jouant un rôle régulateur dans le cycle cellulaire (*Fitzsimmons et al., 1989*). Une augmentation de l'activité des enzymes ornithine-décarboxylase et phenylalanineammonia lyase a été observée suite à des expositions à un champ magnétique combiné à un champ électrique (*Trebbi et al., 2007*). Ces enzymes sont impliquées dans la réaction d'hypersensibilité chez les plantes. De plus, après 72h d'exposition de grains d'orge à un champ magnétique faible, l'activité de la catalase est grandement augmentée alors que celle de la polyphénol oxydase est réduite de près de 50% (*Belyavskaya, 2004*). Les champs magnétiques faibles et modérés affectent l'activité de la cytochrome oxydase c (*Nossol et al., 1993*). *Blank (1992)* quant à lui propose une action

indirecte des champs via l'accumulation d'ions à la surface de la membrane qui activeraient l'enzyme $\text{Na}^+/\text{ATPase}$.

Bolognani en 1992 a révélé que la myosine ATPase préalablement inactivé par gaz CO_2 pourrait être partiellement réactivée après irradiation avec He-Ne (632,8 nm) et une diode (904 nm) lasers (*Bolognani et al., 1992*). En outre, l'enzyme irradié pourrait agir dans le mode inverse (lorsque les conditions appropriées sont réunies), la synthèse d'ATP à partir d'ADP et de P_i . Cette synthèse de l'ATP a été renforcée à la fois par irradiation laser visible et proche infrarouge et aussi par un champ électrique pulsé (110 Hz, 0,11 mV / cm). Ces effets étaient non thermiques, puisque la température de l'échantillon n'a pas augmenté et il n'y avait pas d'absorption à des longueurs d'onde étudiées (*Amat et al., 2006*).

III. 3.4.1) La pompe $\text{Na}^+ / \text{K}^+ \text{ATPase}$

Les longueurs d'onde visibles (632,8 nm) sont signalés à augmenter l'activité de la $\text{Na}^+/\text{K}^+ \text{ATPase}$ dans les érythrocytes (*Kilanczyk et al., 2002*). Une observation intéressante est que, en raison d'un potentiel transmembranaire induit par le champ électrique qui fournit l'énergie pour le fonctionnement, la $\text{Na}^+/\text{K}^+ \text{ATPase}$ peut être activé par les courants et les fonctions électriques sans ATP (*Serpersu et Tsong, 1984*). Dans d'autres études, des champs électriques alternant modifient également l'activité de la pompe (*Blank, 1992*).

III. 3.4.2) Le cytochrome c-oxydase

Le cytochrome c-oxydase (COX) une enzyme essentielle à la synthèse d'ATP mitochondriale, et est un métal ou une molécule qui contient des atomes métalliques dans leur structure (*Richter et Ludwig, 2003*) peut agir comme un photorécepteur dans les cellules eucaryotes exposés à un faisceau monochromatique rouge au rayonnement proche infrarouge (*Musumeci et al., 2003*). **Albrecht-Buehler (2010)** a également suggéré que les cellules sont capables de détecter des champs électromagnétiques dans le proche infra-rouge. **Hamblin et Demidova (2006)** ont proposé des mécanismes similaires pour expliquer comment la lumière peut affecter les cellules. Dans leur théorie, les cibles moléculaires de la lumière de bas niveau sont principalement le cytochrome c-oxydase et porphyrines photoactives et la mitochondrie est le site majeur de cette réaction (*Cifra et al., 2011*).

III. 3.5) Effets sur l'eau

Les champs magnétiques peuvent éliciter une grande variété de réponses en influençant directement les organismes exposés, mais aussi en ayant un effet sur l'eau et les milieux de croissance. Ainsi, les champs magnétiques interfèrent dans la vaporisation de l'eau (*Nakagawa et al., 1999*). En général, l'eau est diamagnétique. Les champs magnétiques ont démontré une capacité à augmenter le nombre de monomères de molécules d'eau (*Zhou et*

al., 2000), mais aussi d'augmenter simultanément la tétrahedralité de l'eau. Les traitements magnétiques de l'eau peuvent aussi augmenter la force des liens hydrogène (*Wang et al., 2007*). Des expériences ont montré que l'eau préalablement exposés aux champs électriques, magnétiques, électromagnétiques, acoustiques ou des champs vibratoires maintient l'activité biologique acquis pendant de longues périodes de temps (*Lobyshev, 2005*). L'enquête sur les effets indirects de champ magnétique a montré que l'eau traitée magnétiquement a des changements dans l'absorption de lumière, la conductivité électrique spécifique, la susceptibilité magnétique, Spectre de Raman, l'indice de réfraction de la lumière, la tension superficielle et la Viscosité (*Hunt et al., 2009*).

Dans certains cas, un traitement de champ magnétique de l'eau d'irrigation suffit pour affecter la croissance des organismes exposés à cette eau, comme dans le cas du céleri et du pois mange-tout (*Maheshwari et Grewal, 2009*). Il a été rapporté que des prétraitements de l'eau dans laquelle nagent les poissons ont modifié la grosseur et la densité des cellules ainsi que la grosseur du noyau sur des cellules hépatiques.

III. 3.5.1) Effets sur les solutions aqueuses

Agarwal et al. (1995) suggèrent que des changements physicochimiques sur les solutions aqueuses peuvent entraîner des effets biologiques reliés aux champs électromagnétiques.

Une perte diélectrique solide est prévue également pour le rayonnement électromagnétique dans les tissus aqueux pour la gamme de fréquences applicable 10^9 - 10^{12} Hz. Ces caractéristiques de pertes doivent être comptabilisées dans n'importe quel modèle d'évaluation de la faisabilité de l'hypothèse sur plantes comme résonateurs électromagnétiques (*Gabriel et Lau, 1996; Liebe et al, 1991*).

Selon *Vallée (2004)*, le traitement magnétohydrodynamique peut augmenter ou diminuer la turbulence dans la solution calcique (ex. le carbonate de calcium), promouvoir la précipitation ou la désagrégation à la fois de colloïdes ferromagnétiques et diamagnétiques. Les facteurs importants qui augmentent l'effet magnétohydrodynamique sont la conductivité de la solution (existence d'un seuil optimal pour produire un courant), la vitesse linéaire et la densité du flux magnétique. De plus, la température du liquide semble déterminante: l'effet n'existe plus si l'eau est chaude. Le dispositif de traitement magnétique pourrait être considéré comme un moyen physique pour créer une turbulence supplémentaire sur le liquide. Les turbulences pourraient promouvoir le dégazage de la solution et donc diminuer le taux de CO_2 dissous qui influencerait le pH et la concentration du carbonate engendrant la précipitation du calcium.

III. 3.6) Effets sur les molécules d'adénosine-phosphate (ATP, ADP et AMP)

Après une analyse par spectroscopie de molécules d'adénosine de phosphate, les scientifiques ont constaté que l'absorption de lumière se produit dans la partie des molécules d'adénosine, généralement à des longueurs d'onde UV. Les fréquences visibles et proches infrarouges ne sont pas absorbées (*Gagliardi et al., 1989*). Toutefois, lorsque l'ATP, ADP et AMP sont exposés à la lumière visible et proche infrarouge, des changements significatifs dans la cinétique des réactions chimiques dans lesquelles ils sont impliqués sont observés (*Gagliardi et al., 1989; Amat et al., 2004; Amat et al., 2005*).

III.3.7) Effets sur les espèces réactives de l'oxygène

Le stress oxydatif ou la production accrue d'espèces réactives de l'oxygène (ROS), tels que les radicaux superoxydes peroxyde radical et de l'hydrogène, hydroxyle, ont été rapportés lors de l'exposition aux RF-EMF in vivo (*Meral et al, 2007. Oktem et al, 2005; Tkalec et al., 2007*) et in vitro (*Zmyslony et al, 2004; Yao et al, 2008*). Récemment, **Hajnorouzia et al. (2011)** ont signalé qu'une combinaison appropriée de géomagnétique et des champs magnétiques alternatifs promu la croissance des semis de maïs par un excès de production d'espèces réactives de l'oxygène.

Une explication possible pour les effets des champs magnétiques sur les organismes vivants est le stress oxydatif par une augmentation de la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS). Le stress oxydatif affecte la structure de la membrane et la croissance cellulaire et peut même provoquer la mort cellulaire (*Green et al., 1999*).

IV) Mécanismes possibles d'action

Les observations prouvant que les champs magnétiques peuvent produire ou altérer plusieurs phénomènes biologiques sont nombreuses (*Bourget, 2011*). Plusieurs facteurs semblent avoir une incidence sur le processus de stimulation. Le système de génération de flux, de l'intensité du flux, du type de flux (oscillatoire ou statique), l'orientation des pôles magnétiques, la durée d'exposition, la densité de cellules et l'environnement de la cellule (par exemple le type du milieu et de ses ingrédients) et d'autres conditions physico-chimiques affectent le processus de bio-stimulation par des forces électromagnétiques. Il ya des autres effets physiologiques sur la croissance qui ont été observés. Ce sont des processus tels que l'absorption du carbone, la synthèse des sucres et de l'évolution de l'oxygène dans la photosynthèse, la synthèse des pigments (chlorophylle, caroténoïdes et phycocyanines), glucides et des protéines, l'accumulation de micro et de traces de métaux et les acides aminés essentiels, l'activité fermentaire et même des processus génétiques comme la transposition. Ils

peuvent être stimulés dans des conditions spécifiques adoptées dans les expériences (*Ryan et al., 2009*). Plusieurs modèles ont été proposés pour tenter d'expliquer les mécanismes d'action en jeu (*Bourget, 2011*). Actuellement, il existe trois mécanismes qui reçoivent une grande attention pour la magnétoreception par les organismes vivants: le mécanisme radical-pair, le mécanisme de résonance des ions en cyclotron et le ferrimagnétisme (*Hajnorouzi et al., 2011*).

IV.1) Mécanisme radical-pair

Le "mécanisme radical-pair" ou bien "mécanisme des radicaux libres" consiste en la modulation des taux d'interconversion singulet-triplet pour une paire de radicaux par des champs magnétiques faibles (*Galland et Pazur, 2005*). Les radicaux libres possèdent des propriétés magnétiques, ce qui porte à croire que les réactions chimiques les impliquant pourraient être influencées par le champ magnétique (*Bourget, 2011; Hajnorouzi et al., 2011*).

Les champs magnétiques provoquent un stress oxydatif dans les organismes en modifiant les niveaux d'énergie et de l'orientation du spin des électrons et la concentration et la durée de vie de radicaux libres, qui changent les probabilités relatives de recombinaison à d'autres interactions avec les conséquences biologiques possibles (*Repacholi et Greenebaum, 1999*). Cette situation affecte également la perméabilité de la membrane et le processus de transport des ions et pourrait être responsable de l'accélération de l'excitation de la chlorophylle par la lumière (*Wang et al., 2008*).

IV.2) Mécanisme de résonance des ions en cyclotron

Le "mécanisme de résonance des ions en cyclotron" centré dans le fait que les ions doivent circuler dans un plan perpendiculaire à un champ magnétique externe au niveau de leurs fréquences de Larmor, qui peut interférer avec un champ électromagnétique alternatif (*Liboff et McCleod, 1995*).

L'effet de résonance de cyclotron induit donc une modification de l'équilibre des réactions biochimiques (*Bourget, 2011*).

IV.3) Mécanisme ferrimagnétique

Les effets magnétiques sur certains microbes, les champignons, les oiseaux, les plantes et les humains peuvent être mieux expliquées dans le cadre de la troisième hypothèse, "le mécanisme ferrimagnétique" ce qui explique la transduction de faibles champs électromagnétiques par de la magnétite biogénique endogène (Fe_3O_4) et le maghémite présent dans ces créatures ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) (*Cranfield et al., 2003*). Bien que la transduction ferrimagnétique représente un des mécanismes les plus plausibles pour les effets biologiques

observés, ce modèle n'a pas été testé expérimentalement sur des cellules. Dans le modèle de résonance ferrimagnétique, le signal magnétique est couplé au vecteur de magnétisation, la faisant résonner comme si la taille et la forme de la particule sont compatibles pour une résonance à la fréquence d'émission. Cette résonance excite des vibrations dans le réseau cristallin de la magnétite, ce qui peut perturber les fonctions cellulaires normales, en fonction de l'emplacement de la magnétite dans la cellule. La ferritine est une grosse protéine qui sert une protéine de stockage du fer chez de nombreux animaux et plantes (*Guertin et al., 2007*). La majeure partie du fer de la ferritine est connu pour être stockées sous forme de cristallites d'oxyde ferrique hydraté de différentes tailles jusqu'à 12 nm de diamètre et capable de stocker jusqu'à 4500 atomes de fer (*Hajnorouzi et al., 2011*).

La figure 6 montre les différents sites essentiels d'interaction moléculaire des influences électromagnétiques.

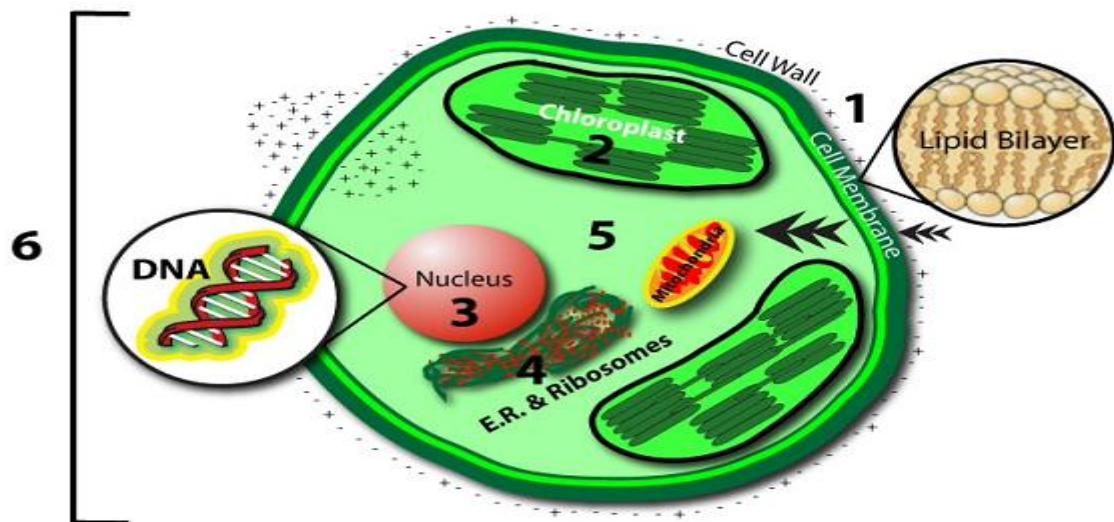


Fig. 6. Sites d'interaction moléculaire des influences électromagnétiques (*Hunt et al., 2009*).

1. membrane cellulaire

- Les oscillations de champ magnétique peuvent augmenter la perméabilité de la membrane sous résonance cyclotron ionique;
- L'augmentation de la circulation et l'amélioration sélective des flux d'ions peuvent affecter la vitesse des réactions biochimiques;
- Modification de la vitesse de fixation des ions de calcium pour des enzymes ou des sites récepteurs;
- Changement de distribution de domaines de protéines et de lipides, et les changements conformationnels dans les associations lipide-protéine;

- Changement de distribution moléculaire interne de charge électronique à l'intérieur de la molécule lipidique dans la bicouche de membrane;

- Peut jouer le rôle principal dans le processus d'amplification de la résonance stochastique

2. Chloroplaste

- Peut moduler la quantité de pigments, tels que la chlorophylle, phycocyanine, et bêta-carotène.

3. Nucleus / ADN

- Le champ magnétique affecte l'expression du gène spécifique;

- Des séquences d'ADN individuels peuvent fonctionner comme des antennes;

- Conduit à des changements de conformation de l'ADN;

- Peut activer des différentes séquences d'ADN en fonction de l'intensité du champ;

- Peut affecter l'activité enzymatique.

4. Protéines

- Les mouvements de respiration sont la source et le récepteur de CEM multipolaire;

- Mécanisme de couplage potentiel des influences multipolaires externes.

5. Protoplasme

- Les champs magnétiques statiques influencent la vitesse de déplacement de protoplasme, l'activité méiotique, et la quantité d'acides organiques dans les plantes.

6. La cellule entière

- Émission biophotonique et l'interaction avec les cellules voisines;

- Modulation endogène de champ électrique peut modifier les processus naturels.

Matériels et méthodes

I) Matière végétale

Les graines certifiées de pois chiche (*Cicer arietinum*L.)(Variété – Flip 90-13) ont été obtenus à partir de l'Institut Technique ITGC de Galma, sont des grains récoltés dans l'année 2012. Cette variété a été utilisée dans les essais de ce travail.

II) Description du montage expérimentale

Le champ électromagnétique a été généré par une bobine solénoïdale de (8cm de diamètre, 13 cm de hauteur)à base d'un fil en cuivre. Cette bobine est alimentée par un générateur de courant continu (0-30V), permettant d'obtenir au centre de la bobine un champ magnétique dont l'intensité est mesurée par un teslamètre.

Deux ventilateurs ont été intégrés au pour éviter l'échauffement et l'élévation de la température.

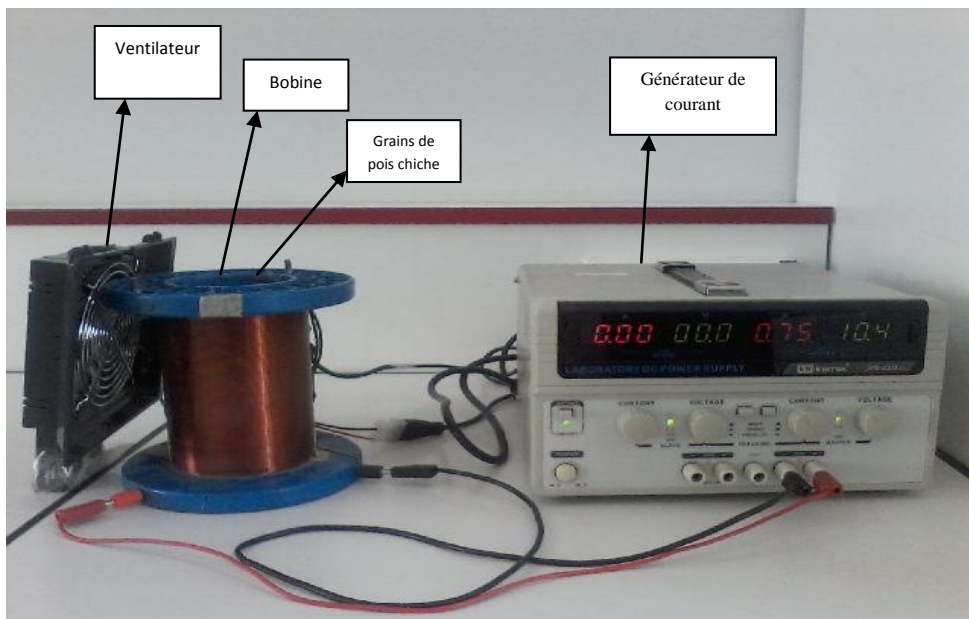


Fig7:système d'exposition de champ électromagnétique.

III) Etude expérimentale

III. 1) La germination

III. 1.1) Optimisation de l'induction électromagnétique

Trois lots de trente (30) graines des semences de pois chiche sélectionnées de même poids presque ont été placées dans la bobine à différentes inductions électromagnétiques ($B_1=2\text{mT}$, $B_2=5\text{mT}$, $B_3=7.5\text{mT}$, $B_4=10\text{mT}$, $B_5=15\text{mT}$, $B_6=20\text{mT}$, $B_7=25\text{mT}$) pendant 8h (le choix

de cette période d'exposition est basé sur des travaux antérieurs (*Tkalec et al., 2009 ;Hajnorouzi et al.,2010*).des groupes analogues ont été utilisés comme témoin.

Après le prétraitement par champ électromagnétique, les graines de chaque lot ont été semées dans dix boîtes de Pétri (diamètre 9cm). 3graines ont été placées dans chaque boîtes, et sur chacune, un support coton arrosé par l'eau distillée toutes les boîtes de Pétri ont été placées dans les mêmes conditions de température et d'éclairage (conditions de laboratoire).

Le nombre des graines germées a été enregistré dans chaque jour (24h) après le semi jusqu'à ce que le pourcentage de germination soit constant.

III.1.2) Effets de la durée d'exposition aux radiations électromagnétiques sur la capacité germinative des graines

Après l'obtention de l'induction optimal du champ électromagnétique permettant ainsi une accélération de la germination, des lots de mêmes caractéristiques que l'expérience précédente ont été soumis à l'induction optimale à différents temps d'exposition allant de 0h (comme contrôle), 30min, 1h, 3h, 5h, 7h, 8h, 9h. Les graines prétraitées ont été mises en germination dans les mêmes conditions décrites précédemment.

Le pourcentage des graines germées a été déterminé chaque jour (intervalle de temps de 24h) après le semi jusqu'à ce que le nombre de graines germées soit constant.

III.2) Paramètres de croissance

III.2.1) La longueur des tiges

Des graines de pois chiche (deux lots de 10 individus, un prétraité par CEM et l'autre est un témoin) ont été mis en germination dans des boîtes de Pétri contenant un coton arrosé par l'eau distillée, les graines sont transplantées ensuite dans des pots remplis par un mélange de sol agricole et une matière organique (les deux sont stériles) dans les proportions 2 :1.les pots ont été irrigués par l'eau distillée stérile(20ml jour par jour)et misent dans les mêmes conditions de température et d'éclairage (condition de laboratoire).

La longueur de dix plantes a été mesurée chaque 24h.

III.2.2) La longueur des racines

Cinq graines de chaque groupe ont été semées dans des boîtes de Pétri.une seule graine a été placée dans chaque boîte de Pétri et sur chacune, un support papier filtre (4 couches de papier filtre) arrosée par l'eau distillée. La longueur des racines a été mesurée chaque 24h jusqu'au 12^{ème} jour (période largement suffisant).

III.2.3) Production de la biomasse (Matière sèche)

L'évolution de la matière sèche a été suivie, pour cela des plantes ont été prélevées au hasard de chaque lot (prétraité par CEM et le témoin), et seulement la partie aérienne était soumise à l'analyse.

La détermination de la matière sèche a été réalisée suivant la norme (*AFNOR., 1982*)

Pendant une durée de 14 jours où la croissance est constatée. Le pourcentage de la matière sèche est exprimé par l'équation suivante :

$$\text{Pourcentage de la biomasse sèche} = \frac{\text{poids de matière sèche} \times 100}{\text{poids de matière fraîche}}$$

III.2.4) Dosage des pigments de la chlorophylle (A et B)

Des parties vertes sans racine sont cueillies à partir de plantes cultivées en cultures de sol et rincé à l'eau du robinet. Après un lavage soigneux à l'eau courante, ils ont été mis dans des papiers filtres. Les parties vertes ont été arrachées à des petits bouts. Puis 5g à partir de ces feuilles ont été broyées, avec 10 ml d'acétone aqueuse (80%) pour l'extraction de la chlorophylle A et B. puis cette solution a été centrifugée pendant 6 minutes environ, et l'absorbance des surnageant obtenu a été déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre (UV-Vis spectrophotomètre. UV-1240, model : SHIMADZU) à deux longueurs d'ondes (663 et 645 nm) (*Tahri et al., 1998*).

La procédure de détermination de la chlorophylle était basée sur le travail de Machinney sur l'absorption de la lumière par la chlorophylle extraite à l'acétone aqueuse. Les concentrations de chlorophylle A et B ont été déterminées en mesurant dans une cellule de 10ml, la densité optique des extraits de chlorophylle avec un spectrophotomètre à 663 et 645 nm et les concentrations en chlorophylle A et B ont été calculées suivant les équations données par *Mackinney (1941)*.

La chlorophylle (a) en milligramme par litre, est déterminée par l'équation suivante :

$$C_a = 0,0127 D_{663} - 0,00269 D_{645}$$

La chlorophylle (b) en milligramme par litre, est déterminée aussi par l'équation suivante :

$$C_b = 0,0229 D_{645} - 0,00468 D_{663}$$

La chlorophylle totale C, en gramme par litre est déterminée par l'équation suivante :

$$C = C_a + C_b = 0,0202 D_{645} + 0,00802 D_{663}$$

On exprimant la chlorophylle totale C, en termes de milligrammes par litre :

$$C_{a \text{ et } b} = 20.2 D_{645} + 8.02 D_{663}$$

III.3) Observation microscopique d'une coupe transversale dans la tige

Mode opératoire

A l'aide d'une lame, une coupe transversale a été réalisée au niveau de l'extrémité supérieure de la tige des plantes issues de graines irradiées au champ électromagnétique aux conditions optimales ainsi que ceux non irradiées.

L'observation des coupes réalisées a été effectuée à l'aide d'un microscope photonique doté d'un dispositif de prise de photos au (Grossissement x40).

L'objectif principal de ce travail était l'étude de l'effet du champ électromagnétique statique sur la germination du pois chiche, et ainsi la contribution à la compréhension de leur interaction avec la matière vivante. Pour cela plusieurs paramètres ont été suivis (taux de germination, la croissance des tiges et des racines, l'évolution de la matière sèche ainsi que la production de la chlorophylle).

I) Effet de prétraitement électromagnétique sur la vitesse et le taux de germination.

I.1) Effet de l'induction électromagnétique

L'effet de différentes intensités du CEM sur la vitesse et le taux de germination de pois chiche testé est bien présenté dans le **tableau n° 05** et **figure 08**.

Tableau 05 : Le taux de germination à différentes inductions d'exposition électromagnétique en (%).

B (milli Tesla) Temps (heures)	Témoin	2	5	7,5	10	15	20	25
12	20	25.55	21.5	6.66	8.88	13.33	26.6	15.7
24	56.66	36.66	57.77	6.66	32.22	85	81.66	65.55
36	64.44	37.77	58.88	88.33	77.77	86.66	90	65.55
48	68.88	71.11	76.66	88.33	77.77	86.66	95	88.88
60	76.66	80	78.88	96.66	77.77	86.66	95	88.88
72	76.66	81.11	85.55	100	80	86.66	98.33	91.11
84	83.33	84.44	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
96	83.33	84.44	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
108	84.44	84.44	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
120	84.44	84.44	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
132	84.44	84.44	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
144	84.44	85.55	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
156	84.44	86.66	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
168	84.44	86.66	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
180	84.44	86.66	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
192	84.44	86.66	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
204	84.44	86.66	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
216	84.44	86.66	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
228	84.44	86.66	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11
240	84.44	86.66	85.55	100	83.33	86.66	98.33	91.11

D'après les résultats obtenus, nous avons remarqué que la vitesse de germination des graines de pois chiche prétraitées par un CEM était rapide par rapport aux graines non

traitées, et ceci quelque soit l'intensité du CEM appliqué. Après 48h de germination, nous avons enregistré une amélioration considérable du taux de germination, comparativement à celui enregistré sur le lot témoin (68.88%), alors que le taux de germination des graines pour la plus part des intensités d'exposition a été renforcée: 71.11% pour 2 mT, 76.66% pour 5 mT, 88.33% pour 7.5 mT, 77.77% pour 10 mT, 86.66% pour 15 mt, 95% pour 20 mT et 88.88% pour 25 mT.

Cependant, le taux final de la germination des graines traitées a été amélioré également pour toutes les intensités d'exposition: 86.66% pour 2 mT, 85.55% pour 5 mT, 100% pour 7.5 mT, 83.33% pour 10 mT, 86.66% pour 15 mT, 98.33 pour 20 mT et 91.11 pour 25 mT, alors que pour le témoin n'a pas dépasser les 84% soit une amélioration de 25% pour une intensité optimale de 20 mT.

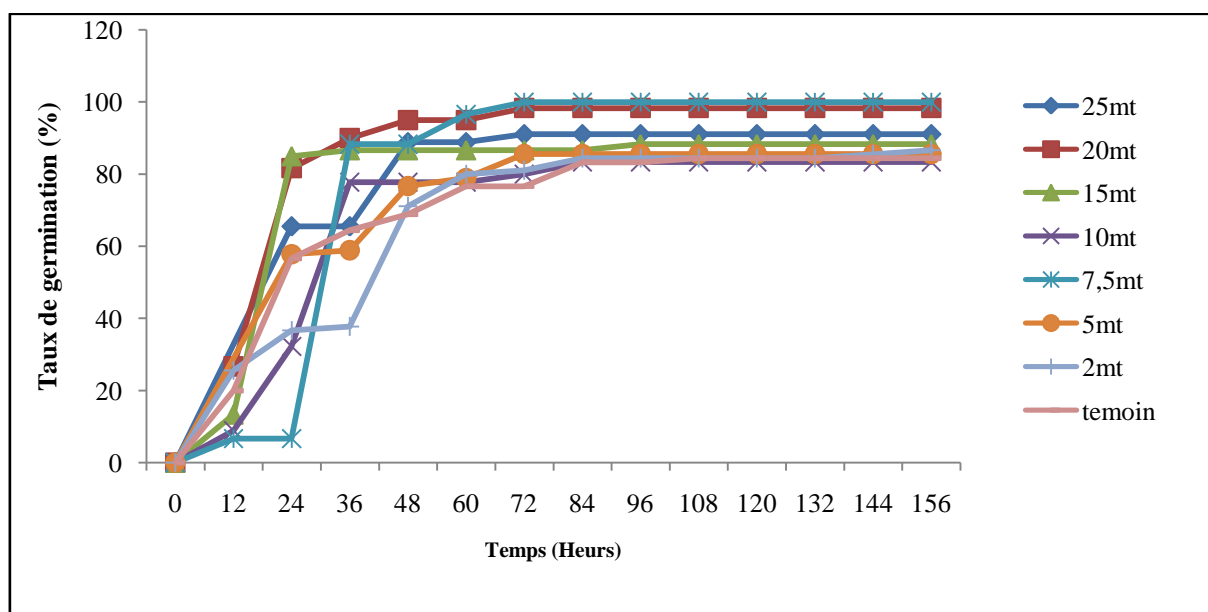


Fig 08 : L'effet des différentes intensités du CEM sur la vitesse et le taux final de germination depuis chiche.

I.2) Optimisation du temps de traitement.

La vitesse et le taux de germination des semences prétraitées ou champs électromagnétiques, ont montré des différences significatives lorsque le temps de traitement varié de 0.5 à 9 heures (**figure n°09**) L'analyse du tableau ci-dessous (**tableau n°06**) montre clairement que la vitesse de germination augmente avec l'augmentation de la durée d'exposition aux radiations électromagnétiques entre 0 et 1h. Un taux de germination 58.88% est atteint avec une durée d'exposition d'une heure dans les 24 heures qui suivent l'opération

de semis, alors que ce taux était de 33,33% pour le lot témoin. Au delà d'une heure d'exposition aux radiations électromagnétiques, un effet inverse a été observé et la vitesse de germination est ralentie. Par exemple après 36 heures qui suivent le semis le taux de germination est compris entre 8,88 et 45,55% pour des temps d'exposition allant de 5 à 9h, alors que ce taux était de 58,88% pour une durée d'exposition d'une heure.

Tableau 06 : Le taux de germination à divers temps d'exposition à une induction électromagnétique de 20mt.

Le temps (heurs)	La durée d'exposition CEM (heurs)							
	témoin	0.5h	1h	3h	5h	7h	8h	9h
12	0	0	0	0	0	0	0	0
24	33.33	35.53	58.88	22.22	2.22	1.11	26.66	7.77
36	64,44	88.88	58.88	31.11	8.88	15.55	39.66	45.55
48	68,55	88.88	92.22	68.88	14.44	21.11	80	60
60	95.55	98.88	92.22	73.33	21.11	26.66	95	70
72	95.55	98.88	94.44	81.11	22.22	27.77	95	71.11
84	95.55	98.88	96.66	81.11	26.66	30	98.33	72.22
96	95.55	98.88	96.66	82.22	26.66	32.22	98.33	74.44
10	95.55	98.88	96.66	82.22	26.66	32.22	98.33	74.44
120	95.55	98.88	96.66	83.33	28.22	34.44	98.33	78.88
132	95.55	98.88	96.66	83.33	28.22	34.44	98.33	78.88
144	95.55	98.88	96.66	83.33	28.22	34.44	98.33	78.88
156	95.55	98.88	96.66	84.44	35.55	34.44	98.33	82.22
168	95.55	98.88	96.66	84.44	35.55	34.44	98.33	82.22
180	95.55	98.88	96.66	84.44	35.55	34.44	98.33	82.22
192	95.55	98.88	96.66	84.44	35.55	34.44	98.33	82.22
204	95.55	98.88	96.66	84.44	35.55	34.44	98.33	82.22

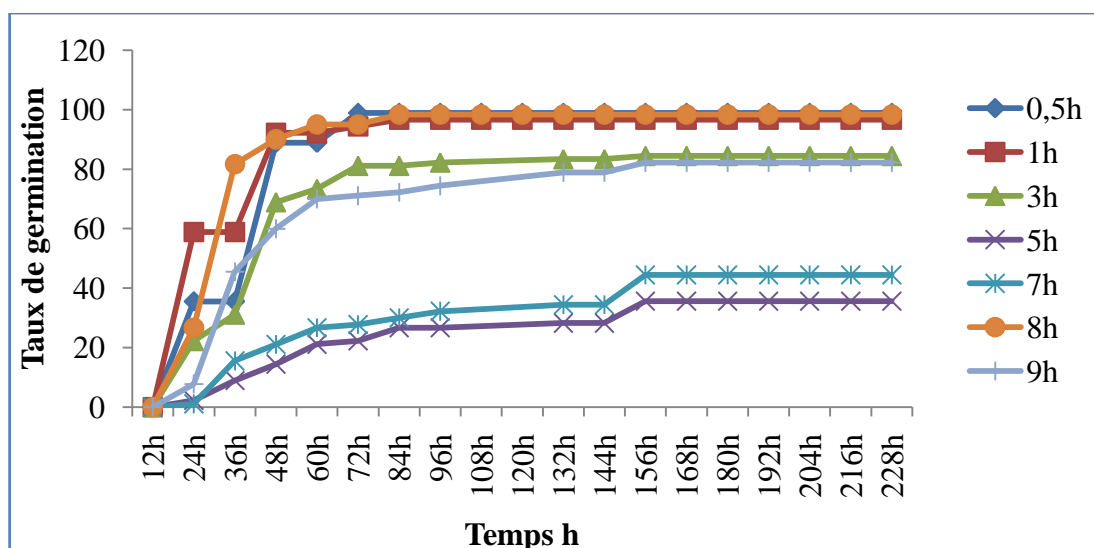


Fig. 09 : Effet de la durée d'exposition aux radiations électromagnétiques sur la vitesse de germination des grains de pois chiche.

L'ensemble de ces résultats nous permet de conclure que l'augmentation et l'accélération du taux et la vitesse de germination de pois chiche sont observées en présence d'un champ électromagnétique. Il a été rapporté que lors de la germination, la graine est stimulée par les radiations électromagnétiques, il ya une réponse très marquée lorsque le temps d'exposition se situe entre 0 et 1h, alors qu'un effet inverse a été observé lorsque le temps d'exposition est suffisamment long. Des résultats similaires ont été signalés pour l'oignon, les lentilles, le maïs, la tomate, le riz, les fèves de soja (*Tkalec et al., 2009; Majd et Shabangi, 2009a, b; De Souza, Garcia et al., 2006; Moon et Chung, 2000; Carbonell, Martinez et al., 2000; Parsi, 2007*). *Vashisth et Nagarajan (2008)* ont rapporté une augmentation de 46 à 71% de vigueur des semences du pois chiche. En outre l'amélioration de la vigueur et la qualité des graines non standards et la germination des différentes espèces par le traitement des semences avec des champs magnétiques ou électromagnétiques a été confirmée par de nombreux scientifiques (*Carbonell et al., 2008; De Souza et al., 2006; Florez et al., 2004; Mano et al., 2006; Martinez et al., 2000; Soltani et al., 2006; Aladjajjyan, 2002a, b*).

Les graines exposées au champ magnétique démontrent des différences dans leur taux de croissance, l'induction de l'activité enzymatique et l'absorption de l'eau. Par exemple, les graines de laitue exposées à un champ de 10 mT pendant 10 minutes ont montrées une augmentation de leur taux d'absorption d'eau de 30%. Les graines traitées absorbent l'eau plus rapidement en plus grande quantité que les graines témoins (*Reina et Pascual, 2001*).

De plus L'exposition de grains de blé à un champ magnétique de 125 ou 250 mT pour différente durée d'exposition a provoqué une augmentation de leur taux de germination jusqu'à 90% (*Gholami et al., 2010*). Des résultats similaires ont été obtenus avec des graines de maïs pour 100 mT (*Subber et al., 2012*). L'exposition de graines de maïs à des champs magnétiques de 60 à 200 mT a permis de stimuler la germination des graines et d'augmenter la récolte de 29,5% (*Galland et Pazur, 2005*). Dans plusieurs répétitions de germination réalisées en laboratoire, les semences à un champ magnétique statique, il a été prouvé une augmentation de la vitesse et du nombre de germinations (*Martínez et al., 2003*). En outre, *Yan et al., (2009)* ont favorisé l'efficacité de la régénération de culture in vitro de plage prune (*Prunus maritima*) de segments nodaux traités par des champs électromagnétiques. Ils ont conclu que le traitement des plantes avec une certaine intensité du champ magnétique pourrait augmenter le nombre de germes de régénération et la croissance.

L'hypothèse selon laquelle le champ magnétique influence le courant ionique dans la paroi cellulaire de l'embryon de la plante permet d'expliquer en partie ce phénomène (*Reina et Pascual, 2001*). Le champ électromagnétique peut provoquer une déformation à l'intérieur de graine par compression ou tension de couches particulières (*Sumorek et Pietrzyk, 1999*). L'exposition au champ magnétique augmente aussi la respiration cellulaire chez les graines de betteraves, permettant une germination plus rapide et plus efficace (*Rochalska et Orzeszko-Rywka, 2008*). Le taux de la respiration et de l'émission de CO₂ est augmenté par un champ magnétique faible. Au niveau cellulaire, les champs magnétiques peuvent augmenter le nombre et la grosseur des mitochondries présentes dans les cellules de pois exposées au champ magnétique (12% plus de mitochondrie, présentant un volume de 1.5 à 2 fois plus gros que les cellules non-exposées) (*Belyavskaya, 2004*).

II) Effet du CEM sur la croissance de la plante.

II.1) Effet sur la hauteur de la plante

L'effet de l'exposition des graines de pois chiche au CEM sur la hauteur de la plante dans les premiers stades de croissance est bien présenté dans les **figures n°10 et 11**. Les **tableaux n° 07 et 08** ont montrés aussi la différence entre les hauteurs de 10 plantules issues des graines traitées et autres non traitées.

Tableau 07: les hauteurs de 10 plantules prétraitées et autres contrôles

		Le temps par jours									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
La hauteur des plantes prétraitée (cm)	1	8.5	10.5	13	15.4	17.1	19.5		21.5	23	24
	2	7	9.5	12.2	14.8	17.9	20		23	25	27
	3	7.3	9.5	12.2	14.5	16.6	18.2		20.9	22	24
	4	7.6	10.5	12.5	15.4	17.8	19.2		23	24.5	26
	5	8.7	10.5	12.8	15	17.8	19.4		21.6	23	24.2
	6	8.4	10.5	13.3	15.9	18.6	21		24	25.5	27.3
	7	7.2	9.5	11.6	14.4	16.7	18.2		22	24.5	26.3
	8	8	11	13.2	15.8	18.5	23.8		23.8	26	27.9
	9	7	9.5	12	17	19.6	22.2		25.2	26	27
	10	9.1	10.5	13.7	15.32	17.86	20.27		22.82	24.43	25.95
La hauteur des plantes Témoin (cm)	1	3.8	5.5	8		12	14.3	16	17.9	20.8	23.5
	2	3.5	4.5	5		7.5	9.3	11.5	13.8	16.2	18.4
	3	3.6	8.5	8		12.5	14.5	17	18.7	21.1	23.3
	4	4.5	6.4	8.4		13.5	15	17.5	19.6	21.8	23
	5	4.5	6.4	8.3		12.5	14.4	16.5	17.6	19.7	21.8
	6	4.3	6.5	8.6		12	12.3	16.5	18.5	20.6	22.7
	7	5.4	7	9		13	15	18	20.5	22	24.6
	8	4.5	7	9		11	12.2	14	15.6	17.3	18.8
	9	4.5	6	8		12.2	14.2	16.3	18	20	22
	10	4.2	6	7.5		13.5	15.3	17.5	19.8	20.4	23.5

**Fig 10 :**Différence entre les hauteurs des plantules de pois chiche issues de graines prétraitées et non prétraitées aux radiations électromagnétiques au 10^{ème} après le semis

La figure 10 nous permet de remarquer bien la différence entre les hauteurs des plantules de pois chiche prétraitées par rapport aux non traitées.

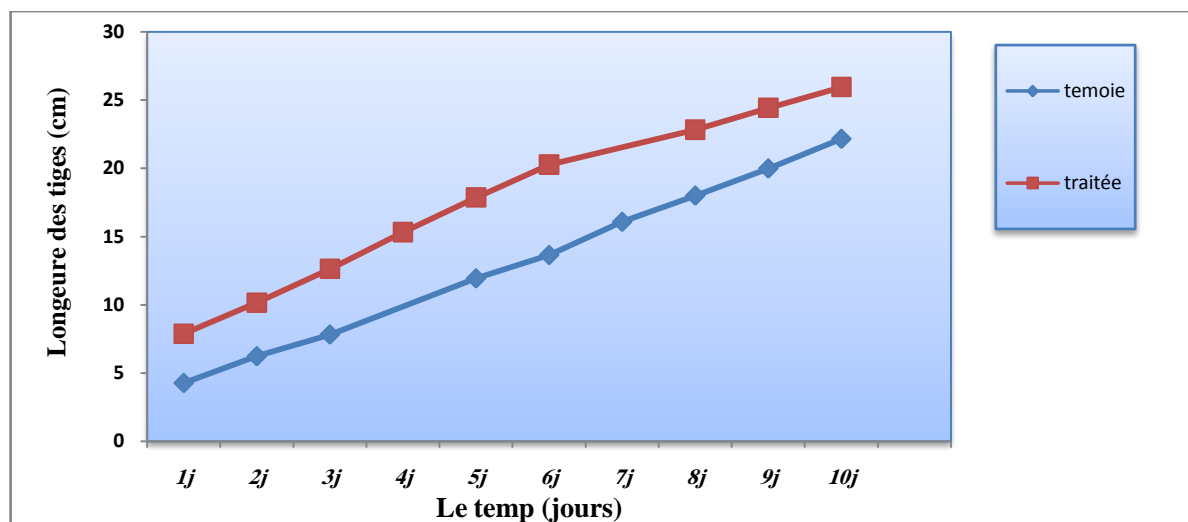


Fig. 11 : L'effet de CEM sur les hauteurs des plantes

De plus, d'après la figure n°11 nous avons constaté qu'il y a une stimulation de croissance des plantules. Par exemple, nous avons remarqué qu'au bout du 4^{ème} jour le traitement des grains au champ électromagnétique statique a permis d'atteindre une différence des hauteurs des plantules de l'ordre de 13,93% par rapport aux témoins. En effet, une influence significative sur la phase initiale de croissance a été enregistrée par rapport à ceux, qui sont issues de graines non exposées au champ électromagnétique. La plupart des chercheurs ont traité les semences avec différents champs magnétiques et stimulé la croissance des plantules; par exemple, un champ magnétique appliqué aux graines dormantes a été appliqué pour augmenter le taux de croissance des semis subséquents de blé, d'orge, du maïs, des haricots, des fruits de certains arbres et autres espèces d'arbres non fruitiers (Dagoberto *et al.*, 2002; Martinez *et al.*, 2002; Socorro et Carbonell, 2002). Des résultats similaires ont été également signalés par plusieurs auteurs (Aladjajyan., 2002a, b; Raha *et al.*, 2011; Majd and Shabrangi., 2009a).

Tableau08 : La moyenne et l'écart type de 10 plantules issues de graines traitées et autres non traitées

Les jours	EMF		Contrôle	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
1	7.88	0.769	4.28	0.521
2	10.15	0.549	6.24	0.826
3	12.63	0.635	7.83	0.699
4	15.32	0.734		
5	17.86	0.954	11.94	1.650
6	20.27	1.256	13.65	1.767
7			16.08	2.034
8	22.82	1.705	18	1.906
9	24.43	1.286	19.99	0.704
10	25.95	1.369	22.16	0.841

Belayavskaya.(2004),Racuciu et al.,(2006) ont montré que le rayonnement de micro-ondes de faible intensité améliore, la hauteur de la plante, le poids frais et les activités enzymatiques. En outre, il existe certaines preuves que les micro-ondes (300 MHz à 300 GHz) produisent des changements dans la perméabilité de la membrane cellulaire et le taux de croissance des cellules ainsi que les interférences avec les ions et les molécules organiques, comme les protéines (*Ungureanu, 2009*). De plus, *Yinan et al.,(2005)* ont publié que le prétraitement par le champ magnétique a un effet positif sur les jeunes plants de concombre, comme stimulant de la croissance des semis et le développement de la culture. *Chen et al.,(2009a, b)* ont également constaté que les micro-ondes de faibles intensités peuvent améliorer la tolérance des semis de blé au sel et au stress osmotique.

II.2) Effet sur la longueur des racines

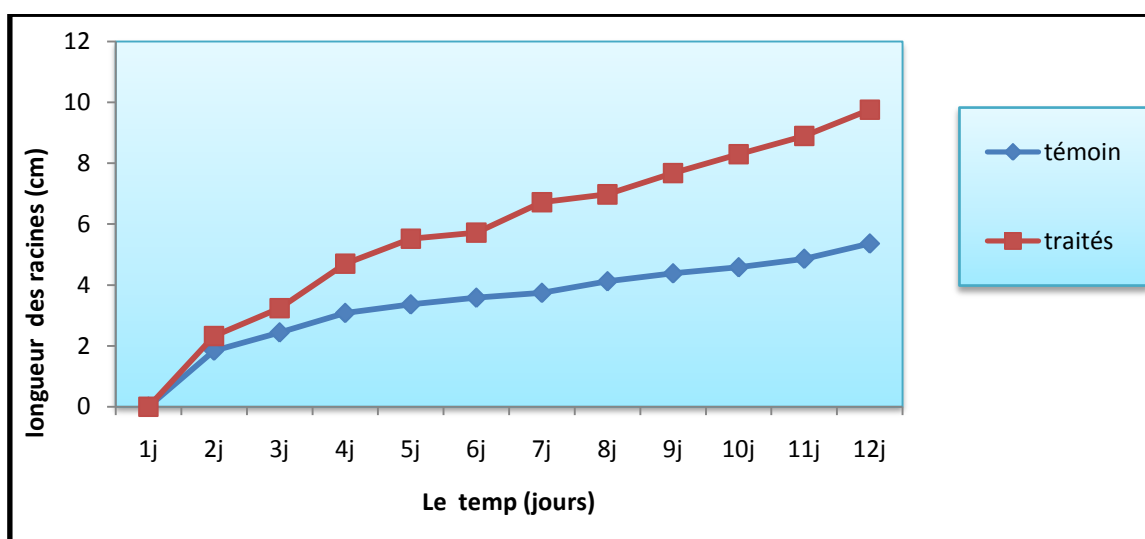
Les figures n°12 et 13 montrent les différences entre les longueurs des racines du témoin et le groupe d'individus exposés aux radiations électromagnétiques. Les résultats révèlent que la longueur des racines devient plus importante lorsque les graines ont été exposées à un CEM de 20mT pendant 1h par rapport au témoin.



Fig 12 : La différence entre les longueurs des racines des plantules de pois chiche

Tableau 09 : Les moyennes et l'carte type des longueurs des racines des plantes

Les jours	CEM		Témoin	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
1	0	0	0	0
2	2.32	0.5878	1.84	0.239
3	3.24	0.6820	2.44	0.188
4	4.7	0.6782	3.08	1.049
5	5.52	1.0850	3.36	0.541
6	5.72	1.2155	3.58	0.761
7	6.72	0.9013	3.74	0.857
8	6.98	0.9744	4.12	1.113
9	7.68	1.4355	4.38	1.223
10	8.3	1.6018	4.58	1.302
11	8.9	1.8406	4.86	1.795
12	9.76	1.9399	5.36	2.895

**Fig 13** : L'effet de CEM sur la longueur des racines

L'exposition des plants de maïs (*Zeamays*) à un champ électromagnétique continu (CME) pendant 30 h induit une stimulation de 30% du taux d'allongement des racines par rapport aux témoins. Il a également entraîné une augmentation significative de l'expansion cellulaire, à la fois dans le sens acropète (lignée de cellules métaxylème) et basipète (cellules

de la coiffe des racines). De plus, *De Souza et al.,(2005)* ont signalé une augmentation du taux d'allongement des racines des tomates traitées par un CEM de 120mt pondant 10 min ou 80mt pondant 5 min. Une augmentation de 30% a été observée dans les longueurs des racines de maïs traitées par un CEM par rapport aux témoins (*Bitonti et al., 2006*). Des résultats similaires ont été rapportés par *Subar et al.,(2012)*, *Dao-ling et al.,(2009)*, et *Tkalec et al., (2009)*.

II.3) Effet sur la biomasse sèche

La figure 14 présente les différences entre la biomasse sèche des plantes issues des deux types de graines traitées et non traitées. A partir de ces résultats, nous avons remarqué qu'il existe une certaine différence entre la biomasse de deux lots (CEM et contrôle): la biomasse sèche des plantes prétraitées a été plus grande que celle des plantes contrôle. Cette différence est de l'ordre de 40% au 11^{ème} jour de croissance.

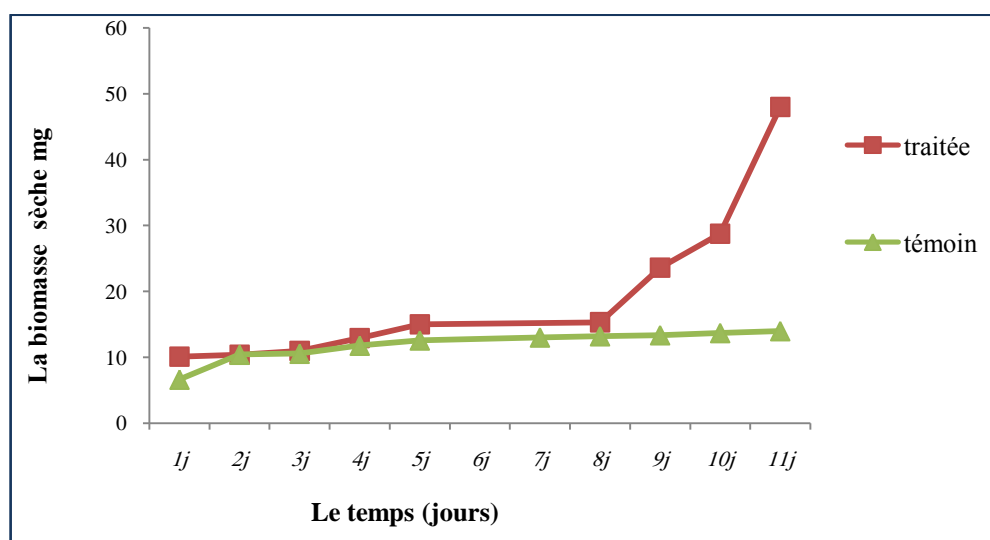


Fig 14 : L'effet de CEM sur la biomasse sèche

Tableau 10 : Les pourcentages de la biomasse sèche

temps	1 ^{er} j	2 ^{ème} j	3 ^{ème} j	4 ^{ème} j	5 ^{ème} j	6 ^{ème} j	7 ^{ème} j	8 ^{ème} j	9 ^{ème} j	10 ^{ème} j
Témoin	6.64	10.41	10.56	11.78	12.57		13.02	13.21	13.36	13.69
Traîée	10.13	10.43	11	12.93	15.03			15.34	23.62	28.79

Plusieurs chercheurs ont signalés une augmentation dans le pourcentage de la biomasse, par exemple *Ragha et al., (2011)* ont rapporté une augmentation de la biomasse de différentes cultures commerciales traitées par des CEM micro-ondes par rapport aux autres

non traitées. On outre, *Touati et al., (2012)* ont montré une augmentation de la biomasse jusqu'à 26 et 29% de deux variétés de *Raphanussativus* prétraitées par un champ magnétique de 100 mT pondent 3h. Des résultats ont été également signalés par *Shabrangi et Majd,(2009)* dans le maïs pour une induction de CEM de 10mt.

II.4) Le contenu de chlorophylle (A et B)

D'après les résultats obtenus dans cette expérience (**le tableau n°11 et la figure n°15**), nous avons remarqué que chaque jour il ya une différence dans le contenu de chlorophylle (a) et (b) entre les 2 lots, et elle a été bien définie dans le 5^{ème} jour: la chlorophylle(a+b) chez les plantes issues des graines prétraitées a été plus élevé que les plantes témoins. *Maziah et al.,(2012)* ont montré qu'un champ électromagnétique de 33kv peut renforcer la croissance des feuilles de moutarde par une augmentation de leur contenu chlorophyllien.

Tableau 11 : Le contenu de la chlorophylle a+la chlorophylle b.

Les jours	La chlorophylle (a+b) en g/l	
	CEM	Control
1	12.83	6.37
2	13.47	7.7
3	14.87	8.39
4	8.81	8.39
5	15.14	8.39
6	15.14	11.76
7	15.14	11.9
8	14.5	12.64
9	14.5	11.15
10	12.36	8.78

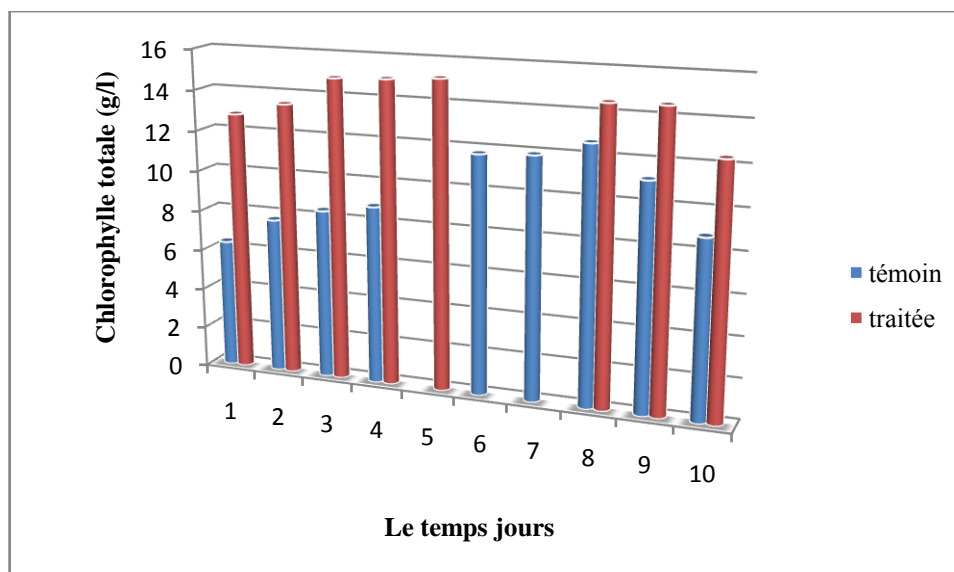


Fig 15 : L'effet de CEM sur le contenu chlorophyllien de la plante de pois chiche

Dans la présente étude, il a été constaté que l'exposition au champ électromagnétique a un effet stimulant sur le contenu de la chlorophylle de pois chiche. Ces résultats concernant la stimulation électromagnétique de la formation de la chlorophylle au sein de la partie aérienne de la plante nous permet de penser une explication sur la stimulation de tous les paramètres étudiés précédemment, c.-à-d. lorsque la chlorophylle est bien faite, cela se répercutera sans doute sur le comportement de la plante, et alors une augmentation de taux des composants nutritifs comme les acides aminés et les minéraux. De plus, tous les métabolismes de la plante y comprises la division cellulaire, l'absorption des éléments nutritifs, l'accumulation des réserves...etc. peuvent se produire d'une meilleur façon, et par conséquent elle peut provoquer un meilleur développement pour la plantes et donc maximiser la productivité.

II.5) Observation microscopique d'une coupe transversale de la tige :

Les coupes transversales réalisées au niveau du segment supérieur des tiges ont révélés une différence dans la forme et la taille des cellules meristimatiques ainsi qu'une différence dans la taille des vaisseaux conducteurs (xylème et Phloème)(**figure n°16**).

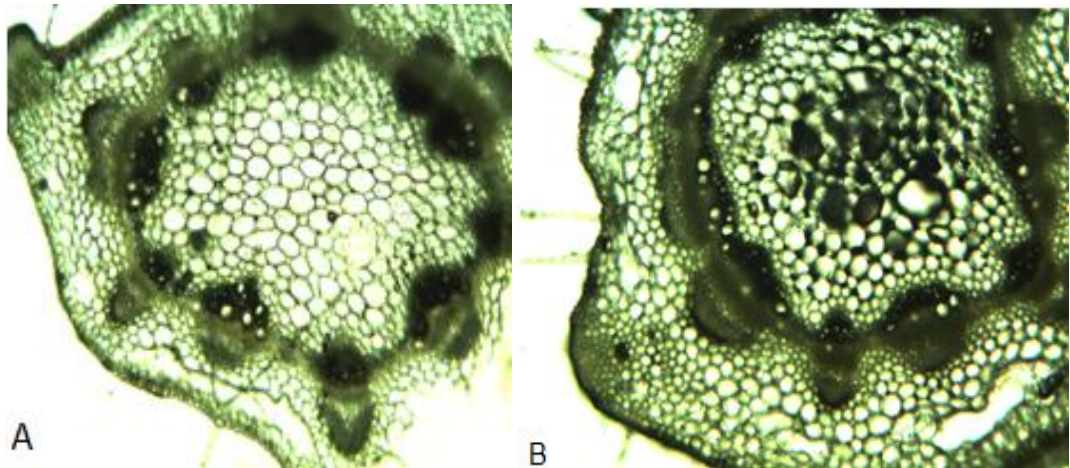


Fig16 : Coupe transversale des tiges de pois chiche (A : témoin, B : traitée).

(Grossissement X40).

Rajendra et al., (2005) ont observé qu'il y a une augmentation significative des indices mitotiques dans des graines de *faba de vicia*, exposées à un champ électromagnétique de fréquence de 100mT. Il y a des indications claires sur l'augmentation du pourcentage de croissance des jeunes plantes exposées à un champ magnétique. Les auteurs proposent que le bruit de cyclotron d'ion interfère l'ion de Ca^{2+} capable à une augmentation des concentrations libres de Ca^{2+} . La concentration accrue de Ca^{2+} signale la cellule pour entrer dans un premier cycle mitotique. Ceci est soutenu par l'observation des ions de Ca^{2+} dans des jeunes plantes de riz qui développées à des graines exposées à un champ magnétique, ont trouvés que Ca^{2+} est responsable d'une plus grande croissance de feuille et des tissus méristématiques dans les tiges et les racines (*Sak ceux-ci font la guerre et le nyam de subrahma, 1989*).

Conclusion

Le présent travail avait pour objectif d'étude de la possibilité d'utilisation du champ électromagnétique comme moyen de traitement des semences, dans le but d'améliorer leur capacité germinative pour éviter les pertes dû aux attaques par la flore du sol. Le suivi du taux de germination a montré que Les radiations électromagnétiques de l'ordre de 20 mT à des temps d'expositions allant jusqu'à 1heure affectent significativement le taux de germination dans les premières heures qui suivent l'opération de semis, alors qu'un effet inverse est observé lorsque le temps d'exposition à ce type de radiations est allongé.

Le suivi des paramètres de croissance des plants issues de semences irradiées et non irradiées aux conditions optimales à montré l'existence d'interactions possible entre le champ électromagnétique et les mécanismes biologiques de la plante manifesté par une amélioration de la production de la chlorophylle, qui à son tour agira directement sur la croissance et le développement du végétale.

La biostimulation électromagnétique peut être donc utilisée comme moyen d'amélioration des performances des grains à la germination et par conséquent sur le rendement final.

Il sera donc très intéressant de mener une étude à l'échelle pilote, pour mieux cerner la possibilité d'utiliser les radiationsélectromagnétiques pour améliorer les rendements agronomiques.

Références bibliographiques

Agriculture and Agri-Food Canada. 2006. Bi-weekly Bulletin. Chickpeas: Situation and Outlook en 2002-2007. September 1, 2006 Volume 19 Number 13.

Afnor (Association française de Normalisation), 1982. Recueil de normes françaises des produits dérivés des fruits et légumes jus de fruits. Ed. AFNOR, 325 p.

Afoulous, S., 2008. Modulation de l'expression de rédoxine chez les céréales et réponse au stress oxydatif. Mémoire de Master. Université de Toulouse. 100

Afsset (Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail), 2010.rapport «Champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences». Saisine n° 2008/006. 25-33.

AkachaTouati, M., GhanemBoughanmi, N., Ben Salem, M. etHaouala, R., 2012. Effects of moderate static magnetic field presowing treatment on seedling growth and oxidative status in two Raphanussativus L. varieties. African Journal of Biotechnology, 12(3): 275-283.

AkhtarAyyub, M., 2001.Evaluation of chickpea germplasm, fungitoxicant, organic and inorganmaterial for the management of wilt *Fusariumoxysporum f. spciceris*.Thèse de doctorat. University of agriculture, Faisalabad, Pakistan. 132p.

Alexander, L. and D. Grierson (2002). "Ethylene biosynthesis and action in tomato: a model for climacteric fruit ripening." Journal of Experimental Botany **53**(377): 2039-2055.

Albrecht-Buehler, G., March 2010. Cell intelligence. <http://www.basic.northwestern.edu/g-buehler/cellint0.htm>.

Amat, A., Rigau, J., , Waynant RW., Ilev IK. et Anders JJ., 2005. The electric field induced by light can explain cellular responses to electromagnetic energy: A hypothesis of mechanism. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 82 (2006): 152–160.

Amat, A., Rigau, J., Nicolau, R., Aalders, M., Fenoll, M.R., Gemert, M.J.C. van et Tomas, J., 2004. Effect of red and near-infrared laser light on adenosine triphosphate (ATP) in the luciferine–luciferase reaction, J. Photochem. Photobiol. A. 168: 59–65.

Rréférences bibliographiques

- Anonyme a.** 2003. Pois chiches (*Cicer Arietinum*). www.Legume-sec.com Il est cultivé dans des régions tropicales, sub-tropicales et tempérées chaudes dont le bassin méditerranéen (dont le Languedoc-Roussillon)(FAO STAT, 2010).
- Anonyme b.** 2004. Information about the family leguminosea. International legume database & information service. www.ILDIS.UK
- Anonyme C.** 2004. Information about the family leguminosea. International legume database & information service. www.ILDIS.UK
- Anonyme k .** 2003. Encyclopedie Encarta
- Anonyme,** 1992. Les légumineuses
- Astumian, R.D., Weaver, J.C. et Adair, R.K.,** 1995. Rectification and signal averaging of weak electric fields by biological cells, Proc. Nat. Acad. Sci. 92: 3740-3743.
- Barnothy, M. F.,** Ed. 1964. Biological effects of magnetic field. New York, Plenum.
- Behrens, HM., Weisenseel, MH. Et Sievers, A.,** 1982. Rapid changes in the patterns of electric current around the root tip of *Lepidium staivum* L. following gravistimulation. Plant Physiol. 70:1079-83.
- Bejiga G., van der Maesen L. G. J.** (2006). *Cicer*
- Belyavskaya, NA.,** 2001. Ultrastructure and calcium balance in meristem cells of pea roots exposed to extremely low magnetic fields. Adv. Space Res. 28: 645-650.
- Belyavskaya, NA.,** 2004. Biological effects due to weak magnetic field on plant. Advances in Space Research, 34: 1566-1574.
- Betskii, O.B., Golant, M.B. et Devyatkov, N.D.,** 1988. Millimeter Waves in Biology, in Russian, Millimetrovye Volny V Biologii. No. 6 in Fizika. Znanie, Moskva.
- Bitonti, M. B., Mazzuca, S., Ting, T. et Innocenti, A. M.,** 2005. Magnetic field affects meristem activity and cell differentiation in *Zea mays* roots. Plant Biosystems. 140(1) (2006): 87 - 93.
- Blank, M.** (Ed.), 1992, Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, San Francisco Press.
- Blank, M. et Goodman, R.,** 2009. Electromagnetic fields stress living cells. Pathophysiology 16 (2009): 71-78.
- Bolognani, L., Cavalca, M., Magnani, C. et Volpi, N.,** 1992. ATP synthesis catalysed by myosin ATPase: effect of laser and e.m. field, Laser & Technol. 2 (3):115-120.
- Bourget, S.,** 2011. Évaluation de l'effet des champs magnétiques statiques sur le mûrissement et la sénescence des tomates en post-récolte. Mémoire pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M. Sc.) Université Laval, QUÉBEC. 47-55.

Rréférences bibliographiques

- Boyeldieu j. (1991)** Produire des grains oléagineux et protéagineux. Tec et Doc. Lavoisier. Paris. 232pp.
- Brizhik, L.S. et Eremko, A.A., 2003.** Nonlinear model of the origin of endogenous alternating electromagnetic fields and selfregulation of metabolic processes in biosystems. *ElectromagneticBiology and Medicine*. 22 (1): 31-39.
- Broughton WJ, Hernandez G, Blair M, Beebe S, Gepts P, Vanderleyden J (2003)** Beans (Phaseolus spp.) . model food legumes. *Plant and Soil* 252: 55–128
- Buzsaki, G., Horvath, Z., Urioste, R., Hetke, J. et Wise, K., 1992.** High-frequency network oscillation in the hippocampus. *Science*. 256 (5059): 1025-1027. URL. <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/256/5059/1025>.
- Cain, C. A., 1980.** A theoretical basis for microwave and RF field effects on excitable cellular membranes. *IEEE trans. on microwave theory and techniques*. 28(2):142-146.
- Carson, J.J.L., Prato, F.S., Drost, D.J., Diesbourg, L.D. et Dixon, S.J., 1990.** Time-varying magnetic fields increase cytosolic free Ca²⁺ in HL-60 cells. *Am J Physiol*. 28: C687-C692.
- CCLS (Coopérative des Céréales et des Légumes Secs) de BBA, 2013.**
- Cereals and pulses. 2006].** Fondation PROTA, Wageningen, Pays-Bas/Backhuyspublishers, Leiden, Pays-Bas/CTA, Wageningen, Pays-Bas, pp. 46-51
- Chang, D.C., 1992.** Structure and dynamics of electric field-induced membrane pores as revealed by rapid-freezing electron microscopy. In: Chang DC, Chassy BM, Saunders JA, Sowers AE, editors. *Guide to electroporation and electrofusion*. New York: Academic Press Inc. 9-28.
- Chen, Y.P., Jia, J.F., Han, X.L., 2009.** Weak microwave can alleviate water deficit induced by osmotic stress in wheat seedlings. *Planta* 229, 291–298.
- Chernomordik, L.V., 1992** Electropores in lipid bilayers and cell membranes. In: Chang DC, Chassy BM, Saunders JA, Sowers AE, editors. *Guide to electroporation and electrofusion*. New York: Academic Press Inc.63–76.
- Chionna, A.,Dwikat, M., Panzarini, E., Tenuzzo, B., Carlà, E.C., Verri, T., Pagliara, P., Abbro, L. et Dini, L., 2003.** Cell shape and plasma membrane alterations after static magnetic fields exposure. *Eur. J. Histochem*. 47(4): 299-308.
- Cifra, M., Fields J. Z. etFarhadi A., 2011.** Electromagnetic cellular interactions. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 105 (2011): 223-246.
- Collins, D.R., Pelletier, J.G. et Pare, D., 2001.** Slow and fast (gamma) neuronal oscillations in the perirhinal cortex and lateral amygdala. *J Neurophysiol*. 85 (4): 1661-1672. URL. <http://jn.physiology.org/cgi/content/abstract/85/4/1661>.

Rréférences bibliographiques

- Cooper, M.**, 1984. Gap junctions increase the sensitivity of tissue cells to exogenous electric fields. *J. Theory. Biol.* 111: 123-130.
- Cranfield, C., Wieser, HG., Al Maddan, J. et Dobson, J.**, 2003. Preliminary evaluation of nanoscale biogenic magnetite-based ferrimagnetic transduction mechanisms for mobile phone bioeffects. *IEEE Trans Nanobiosci.* 2:40–3.
- Dagoberto, G.F., Angel, D.S.T., Lilita, S.P.**, 2002. Effect of magnetic treatment of onion (*Allium cepa*) seeds on the germination and growth of seedlings. *Alimentaria.* 39 (337): 181-186.
- Dao-liang, Y., Yu-qi, G., Xue-ming, Z., Shu-wen, W. et Pei, Q.**, 2008. Effects of electromagnetic fields exposure on rapid micropropagation of beach plum (*Prunusmaritima*). *Ecological engineering.* 35 (2009): 597–60.
- De Souza A., Garcia D., Sueiro L., Gilart F., Porrás E. and Licea L.**, 2006. Pre-sowing magnetic treatments of tomato seeds increase the growth and yield of plants. *Bioelectromagnetics.* 27: 247-257.
- DUKE J.A.**, 1981-Handbook legumes of world economic importance Ed .Plenum press, New-York and London, 25p
- Durney, C.H., Christensen, D.A.**, 1999. Basic introduction to Bioelectromagnetics, CRC Press LLC.
- El Aoufir, A.**, 2001. Étude du flétrissement vasculaire du pois chiche (*Cicer arietinum*) causé par le *Fusarium oxysporum f sp. Ciceri*. Evaluation de la fiabilité de l'analyse isoenzymatique et de la compatibilité végétative pour la caractérisation des races physiologiques. Thèse de doctorat, Université Lavai, P 161.
- Fanjat, G.**, 2012. Les fluctuations du champ magnétique terrestre: des variations séculaires récentes aux renversements. Thèse de Doctorat Université de Montpellier. 2-5.
- Fear, E. C., et Stuchly, M. A.**, 1998. Modeling assemblies of biological cells exposed to electric fields, *IEEE trans. on biomedical engineering.* 45(10): 1259-1271.
- Fiorani, M., Cantoni, O., Sestili, P., Nicolini, P., Vetrano, F. et Dacha, M.**, 1992. Electric and/or magnetic field effects on DNA structure and function in cultured human cells. *Mutation Research.* 282: 25-29.
- Fitzsimmons, R., Farley, J., Adey, W., et Baylink, D.**, 1989. Frequency dependence of increased cell proliferation, in vitro, in exposures to a low-amplitude, low-frequency electric field: evidence for dependence on increased mitogen activity released into culture medium. *J CellPhysiol.* 139 (3): 586- 91.
- Florez, M., Carbonell, M.V. et Martinez, E.**, 2004. Early sprouting and first stages of growth of rice seeds exposed to a magnetic field. *Electromag. Biol. Med.* 23(2): 157-166.

Rréférences bibliographiques

- Foletti, A., Lisi, A., Ledda, M., de Carlo, F. et Grimaldi, S.**, 2009. Cellular ELF signals as a possible tool in informative medicine. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 28 (1): 71-79.
- Framme, C., Schuele, G., Roider, J., and Birngruber, R.**, 2005. Influence of pulse duration and pulse number in selective RPE laser treatment. *Lasers in surgery and medicine*. 34(3): 206-215.
- Fröhlich, H.**, 1968a. Bose condensation of strongly excited longitudinal electric modes. *Physical Letters A*. 26: 402-403.
- Fröhlich, H.**, 1968b. Long-range coherence and energy storage in biological systems. *International Journal of Quantum Chemistry*. 2: 641-649.
- Fröhlich, H.**, 1969. Quantum mechanical concepts in biology. In: Marois, M., (Ed). *Proceedings of First International Conference on Theoretical Physics and Biology (1967)*: 13-22.
- Fröhlich, H.**, 1980. The biological effects of microwaves and related questions. *Advances in Electronics and Electron Physics*. 53: 85-152.
- Funk, R., Monsees, T. et Özkucur, N.**, 2009. Electromagnetic effects-from cell biology to medicine. *Progress in Histochemistry and Cytochemistry*. 43 (4): 177-264.
- Gabriel, S. et Lau, R.**, 1996. The dielectric properties of biological tissue. III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Phys. Med. Biol.* 41: 2271–2293.
- Gagliardi, S., Atlante, A. et Passarella, S.**, 1997. A novel property of adenine nucleotides: sensitivity to helium-neon laser in mitochondrial reactions, *Biochem. Mol. Biol. Int.* 41 (3): 449–460.
- Galland, P. et Pazur, A.**, 2005. "Magnetoreception in plants." *Journal of Plant Research* 118(6): 371- 389.
- Garg, T. K., et Agarwal, N.**, 1995. EFFECT OF MAGNETICALLY RESTRUCTURED WATER ON THE LIVER OF A CATFISH CLARIAS-BATRACHUS. *Electro- and Magnetobiology*. 14(2): 107-115.
- Gholami A., Sharafi S., et Abbasdokht H.**, 2010. Effect of Magnetic Field on Seed Germination of Two Wheat Cultivars. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 44: 956- 958.
- Giller K.E.** 2001. Nitrogen fixation in tropical cropping systems 2nd Ed., CAB. International Walling Ford, ISBN : 0859472.p. 423.
- Gölfert, F., Hofer, A., Thümmler, M., Bauer, H. et Funk, R.H.W.**, 2001. Extremely low frequency electromagnetic fields and heat shock can increase microvesicle motility in astrocytes. *Bioelectromagnetics*. 22 (2): 71-78.

Rréférences bibliographiques

- Goltsov, A.N.**, 1999. Electromagnetic-field-induced oscillations of the lipid domain structures in the mixed membranes, *Bioelectrochem.Bioenerg.* 48: 311–316.
- Goodman, EM., Greenebaum, B. et Marron, MT.**, 1995. Effects of electromagnetic fields on molecules and cells. *IntRev Cytology: A survey of cell biology* (Edt.: K.W. JEAN and J. JARVIK). 158: 279-338.
- Goodman, R. et Henderson, A.**, 1988. Exposure of salivary gland cells to low-frequency electromagnetic fields alters polypeptide synthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 85 (11): 3928.
- Goodman, R., Bassett, C. et Henderson, A.**, 1983. Pulsing electromagnetic fields induce cellular transcription. *Science.* 220 (4603): 1283.
- Gov, N. etSafran, S.**, 2004. Membrane undulations driven by force fluctuations of active proteins.*Physical Review Letters.*93: 268104.
- Gov, N. etSafran, S.**, 2005a. Red blood cell membrane fluctuations and shape controlled by ATP-induced cytoskeletal defects. *Biophysical Journal* 88 (3), 1859-1874.
- Gov, N. etSafran, S.**, 2005b. Red blood cell shape and fluctuations: cytoskeleton confinement and ATP activity. *Journal of Biological Physics* 31, 453-464.
- Green, LM., Miller, AB., Agnew, DA., Greenberg, ML., Li J,Villeneuve, JP., Tibshirani, R.**, 1999. Childhood leukaemia and personalmonitoring of residential exposures to electric and magnetic fields in Ontario, Canada.*Cancer Causes Control.* 10:233–43.
- Grundler, W. et Kaiser, F.**, 1992. Experimental evidence for coherent excitations correlated with cell growth. *Nanobiology.* 1 (2): 163-176.
- Guertin, RP., Harrison, N., Zhou, ZX., McCall, S. et Drymiotis, F.**, 2007. Very high field magnetization and AC susceptibility of native horse spleen ferritin.*J MagnMagn Mater.* 308:97–100.
- Hajnorouzi, A., Vaezzadeha, M., Ghanati, F., jamnezhada, H. et Nahidian B.**, 2011. Growth promotion and a decrease of oxidative stress in maize seedlings by a combination of geomagnetic and weak electromagnetic fields.*Journal of Plant Physiology.* 168 (2011): 1123–1128.
- Hamadach, 2001.** La plantation de la culture de pois chiche dans les régions tropical et semi tropical. Rapport technique ITGC.
- Hamblin, M., Demidova, T.**, 2006. Mechanisms of low level light therapy. In: *Proc. Of SPIE.*6140: 614001.
- Hayashi, N., Tarao, H. etIsaka, K.**, 1999. “Influence of bio-membrane on current characteristics induced by ambient ELF magnetic field for spherical tissue model”, *IEE High Voltage Engineering Symposium*, 22-27.

Rréférences bibliographiques

- Huang, H.H., et Wang, S.R., 2007.** The Effects of 60Hz Magnetic Fields on Plant Growth. *Nature and Science*, 5(1): 60-68.
- Huber, R., Treyer, V., Schuderer, J., etKuster, N., 2005.** “Exposure to pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields affects regional cerebral blood flow”, *Euro.J. of Neuroscience*. 21(4): 1000-1006.
- Hunt, R.W., Zavalin, A., Bhatnagar, A., Chinnasamy, S. et Das, K. C., 2009.** Electromagnetic Biostimulation of Living Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy Applications. *Int. J. Mol. Sci.* 10 (2009): 4515-4558.
- IEEE Standard C95.3-2005,** “IEEE recommended practice for measurements and computations of radio frequency electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 100kHz-300GHz”, IEEE standards, 2005.
- Jafary-Asl, A.H. et Smith, C.W., 1983.** Biological dielectrics in electric and magnetic fields. In: *Ann. Rep. Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, vol. 83. IEEE Publ. 350-355.
- Jandová, A., Hurych, J., Pokorný, J., Coèek, A., Trojan, S., Nedbalová, M. etDohnalová, A., 2001.** Effects of sinusoidal magnetic field on adherence inhibition of leukocytes. *Electromagnetic Biology and Medicine* 20 (3): 397-413.
- Kaiser, F., 1995.**Coherent oscillations e their role in the interaction of weak ELM-fields with cellular systems.*Neural Network World*. 5 (5): 751-762.
- Kaiser, F., 1996.** External signals and internal oscillation dynamics: biophysical aspects and modelling approaches for interactions of weak electromagnetic fields at the cellular level. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*. 41: 3-18.
- Kaouani, A., Khaldoun, A., etBellah. F., 2003.**Sélection pour la résistance du pois chiche a la maladie du flétrissement *Fusariumoxysporum f. sp. Ciceri*. *Céréaliculture revue technique et scientifique de ITGCn* 40.
- Kato, M., 2006.** *Electromagnetics in Biology*. Springer (ed) Japon, 31-32.
- Kilanczyk, E., Palecz, D. et Bryszewska, M., 2002.** Effect of red laser light on Na⁺,K⁽⁺⁾-ATPase activity in human erythrocyte membranes sensitized with Zn-phthalocyanine, *J. Clin. Laser Med. Surg.* 20 (2): 71–75.
- Kindzelskii, AL. et Petty, HR., 2000.** Extremely low frequency pulsed DC electric fields promote neutrophil extension, metabolic resonance and DNA damage when phase-matched with metabolic oscillators, *BiochimicaBiophysicaActa*. 1495: 90-111.
- Kraft, J. M., 1994.**Fusarium wilt of peas. *Agronomie*.ISSN 0249-5627 vol. 14, no9, pp. 561-567.

Rréférences bibliographiques

- Kula, B., Sobczak, A., Kuska, R.,** 2000. Effects of static and ELF magnetic fields on free-radical processes in rat liver and kidney. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 19 (1): 99-105.
- Lednev, VV.,** 1991. Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological Systems, *Bioelectromagnetics*. 12: 71-75.
- Lepoivre, Ph. 2003.** *Phytopathologie*. Ed : 2003, Bruxelles. 427 p.
- Levin, M.,**2003. *Bioelectromagnetics in morphogenesis*. *Bioelectromagnetics* 24: 295- 315.
- Levin, M.,** 2009. Bioelectric mechanisms in regeneration: unique aspects and future perspectives. *Semin. Cell Dev. Biol.* 20: 543–556.
- Liboff, AR., McCleod, BR.,** 1995. Power lines and the geomagnetic field. *Bioelectromagnetics*. 16:227–30.
- Liboff, AR.,** 1992. The cyclotron resonance hypothesis: Experimental evidence and theoretical constraints. In: Norden B. Ramel C. editors. *Interaction mechanisms of low- level electromagnetic fields in living systems*, New York. Oxford University Press.130-147.
- Lin, J., (Ed.),** 1994. *Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems Vol. 1*, Plenum, New York.
- Lin, L.C.L., Gov, N. et Brown, F.L.H.,** 2006. Nonequilibrium membrane fluctuations driven by active proteins. *Journal of Chemical Physics*.124: 074903.
- Lindström, E., Lindström, P., Berglund, A., Mild, KH. Et Lundgren, E.,** 1993. Intracellular calcium oscillations induced in a T-cell line by weak 50 Hz magnetic field. *J Cell Physiol*. 156: 395-398.
- Lisi, A., Foletti, A., Ledda, M., De Carlo, F., Giuliani, L., D’Emilia, E., Grimaldi, S.,** 2008. Resonance as a tool to transfer information to living systems: the effect of 7 Hz calcium ion energy resonance on human epithelial cells (HaCaT) differentiation. In: *PIERS 2008 in Cambridge Proceedings*. 902-906.
- Lisi, A., Foletti, A., Ledda, M., Rosola, E., Giuliani, L., D’Emilia, E. et Grimaldi, S.,** 2006. Extremely low frequency 7 Hz 100 mt electromagnetic radiation promotes differentiation in the human epithelial cell line HaCaT. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 25 (4): 269-280.
- Litovitz, T., Krause, D., Montrose, C. et Mullins, J.,** 1994. Temporally incoherent magnetic fields mitigate the response of biological systems to temporally coherent magnetic fields. *Bioelectromagnetics*. 15 (5): 399-410.
- Lobyshev, V.I.,** 2005. Water is a sensor to weak forces including electromagnetic fields of low intensity. *Electromagn. Biol. Med.* 24: 449–461.

Rréférences bibliographiques

- Maatougui, M. H., 1998.** Le développement du secteur des légumineuses alimentaires. 32-42p, in Labdi, M., Maatougui, E. H., Bouznad, Z., Benabdelli, k., et Bensedik, K. Les légumineuses alimentaires en Algérie: situation actuelle et perspectives. ITGC Editions El-Harrach – ALGER. 296p.
- Mackinney, G., 1941.** Absorption of light by chlorophyll solutions. Jour. Biol. Chem. 140: 315-322.
- Maheshwari, B. L. etGrewal, H. S., 2009.** Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity. Agricultural Water Management. 96(8): 1229- 1236.
- Majd, A. et Shabrangi, A., 2009a.** Effect of Seed Pretreatment by Magnetic Fields on Seed Germination and Ontogeny Growth of Agricultural Plants. Progress In Electromagnetics Research Symposium, Beijing, China, March 23-27: 1137- 1141.
- Majd, A. etShabrangi, A., 2009b.** Comparing Effects of Electromagnetic Fields (60Hz) on Seed Germination and Seedling Development in Monocotyledons and Dicotyledons. Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, August 18-21: 704- 709.
- Mano, J., Nakahara, T., Torii, Y., Hirose, H., Miyakoshi J. etTakimoto K., 2006.** Seed deterioration due to high humidity at high temperature is suppressed by extremely low frequency magnetic fields. Seed Sci. & Technol. 34: 189-192.
- Markel.2011.** Fiche thchnique ,poischichebiologique
- Marron, MT., Goodman, EM., Sharpe, PT. et Greenebaum, B., 1988.** Low frequency electric and magnetic fields have different effects on the cell surface. FEBS Letters, 230: 13-16.
- Martinez, E., Carbonell, M.V., Florez, M., 2002.** Magnetic biostimulation of initial growth stages of wheat (*Triticumaestivum*, L.). Electromagnetic Biology and Medicine. 21 (1): 43-53.
- Martinez, E., Carbonell, M.V., Florez, M., 2003.**Estimulación de la germinación y el crecimentoporexposición a campos magnéticos. Investigación y Ciencia, 324: 24-28.
- Maziah, M. Ooi, B. B., Tengku, M. and Sreeramanan, S., 2012.**Effects of electromagnetic field of 33 and 275 kV influences on physiological, biochemical and antioxidant system changes of leaf mustard (*Brassica chinensis*).African Journal of Biotechnology.11(66): 13016-13029.
- Mcvicar, R., Pearse, P., Panchuk, K., Brenzil, C., Hartley, S., Harris, C., Yasinowski, J., Goodwillie, D., Warkentin, T., Banniza, S., 2006.** Chickpea in Saskatchewan.Saskatchewan Pulse Growers website - Pulse Production Manual available at (306) 668-5556.

Rréférences bibliographiques

- Meral, I., Mert, H., Mert, N., Deger, Y., Yoruk, I., Yetkin, A. et Keskin, S.,** 2007. Effects of 900-MHz electromagnetic field emitted from cellular phone on brain oxidative stress and some vitamin levels of guinea pigs. *Brain Res.* 1169: 120–124.
- Milani, M., Ballerini, M., Ferraro, L., Zabeo, M., Barberis, M., Cannone, M. et Faleri, M.,** 2001. Magnetic field effects on human lymphocytes. *Electromagnetic Biology and Medicine* 20 (1): 81-106.
- Ming, Y. J.,** 1988. Effects of high-voltage electrostatic field on growth in plants, *Proceedings of the International Conference on Modern Electrostatics*, 161-165, Beijing, China,.
- Moon, J.D., Chung, H.S.,** 2000. Acceleration of germination of tomato seed by applying AC electric and magnetic fields. *Journal of Electrostatics* 48: 103-114.
- Mouhssine, D.,** 2004. Étude d'une nouvelle génération de dosimètre basée sur les détecteurs photostimulables type BaFBr(Eu) : caractérisation et application à la dosimétrie environnementale et personnelle. Thèse de Doctorat Université Louis Pasteur-Strasbourg I. 11- 12.
- Muehlbauer, F.J., and Tullu, A.,** 1998. *Cicerarietinum* L. In: J. Janick and J.E. Simon (eds.), *New crops*. Wiley, New York.
- Musumeci, F., Brizhik, L.S. et Ho, M.-W.**(Eds.), 2003. *Energy and Information Transfer in Biological Systems: How Physics Could Enrich Biological Understanding - Proceedings of the International Workshop*. World Scientific Publishing.
- Nakagawa, J., Hirota, N., Kitazawa, K. et Shoda, M.,** 1999. Magnetic field enhancement of water vaporization. *J. Appl. Phys.* 86: 2923.
- Neumann E, Schaefer-Ridder M, Wang Y, Hofschneider P.H.,** 1982. Gene transfer into mouselyoma cells by electroporation in high electric fields. *EMBO J.* 1:841–5.
- Newmann, E. et Rosenheck, K.,** 1972. Permeability changes induced by electric Impulses in vesicular membranes. *I Memr Biol.* 10: 279-90.
- Nossol, B., Buse, G., et Silny, J.,** 1993. Influence of weak static and 50 Hz magnetic fields on the redox activity of cytochrome-C oxidase. *Bioelectromagnetics.* 14: 361–372.
- OMS " Organisation Mondiale de la Santé",** 2006. Consensus Scientifique sur les Champs statiques "Environmental Health Criteria 232: Static Fields". 8. <http://www.greenfacts.org/fr/champs-statiques/>.
- Oomor, U. I.,** 1992. *Bioelectromagnetics and Its Applications*, Chap. 2.1.2, 340-346, Fuji Technosystem Ltd.
- Paksy, K., Thuróczy, G., Forgács, Z., Lázár, P. et Gaáti, I.,** 2000. Influence of sinusoidal 50-Hz magnetic field on cultured human ovarian granulosa cells. *Electromagnetic Biology and Medicine.* 19 (1): 91-97.

Rréférences bibliographiques

- Parsi, N.**, 2007. ELECTROMAGNETIC EFFECTS ON SOYBEANS. Thèse de Master Université Missouri Columbia. 50- 72.
- Pavel, A., Ungureanu, CE., Bara, II., Gassner, P., creanga, DE.**, 1998. Cytogenetic changes induced by low-intensity microwaves in the species *Triticumaestivum*. *Rev. Med. Chir. Soc. Med. Nat. Iasi.*, 102: 89-92.
- Perrin, A., et Souques, M.**, 2010. Champs électromagnétiques, environnement et santé. Springer (ed) Verlag France, Paris, 1-17.
- Pietak, A.M.**, 2012, Structural evidence for electromagnetic resonance in plant morphogenesis. *BioSystems*. 109: 367– 380.
- Plancquaert ph., wery J. (1991) Plancquaert, P. ; Braun, P. ; Wery, J. (1990) Agronomic studies on chickpea** (*Cicerarietinum L.*). *Seminairesmediterraneens* ; 1988/07/11-13 ; Saragosse (ESP). Saxena, M.C. (Editeur) ; Cubero, J.I. (Editeur) ; Wery, J. (Editeur). Present status and future prospects of chickpea crop production and improvement in the Mediterranean countries. Institut agronomique mediterraneen, Montpellier (FRA) ; *Options Mediterraneennes. Serie A. Seminaires. 1990, (9) ; 87-92.*
- Pohl, H.A.**, 1981. Electrical oscillation and contact inhibition of reproduction in cells. *Journal of Biological Physics*. 9 (4): 191-200.
- Pohl, H.A.**, 1982. Natural cellular electrical resonances. *International Journal of Quantum Chemistry: Quantum Biology Symposium*. 9: 399-407.
- Pohl, H.A., Braden, T., Robinson, S., Piclardi, J. et Pohl, D.G.**, 1981. Life cycle alterations of themicro-dielectrophoretic effects of cells. *Journal of Biological Physics*. 9: 133-154.
- Pokorný, J., Hasek, J., Jelínek, F., Saroch, J. et Palán, B.**, 2001. Electromagnetic activity of yeast cells in the M phase. *Electro- and Magnetobiology*. 20 (1): 371-396.
- Pool, R.**, 1990a. Electro;qgnetic field: The biological Evidence. *Science*. 249: 1378- 1381.
- Pool, R.**, 1990b. It there an EMF- concer connection? *Science*. 249: 1096- 1099.
- Popp, F.-A.**, 2006. Coupling of Fröhlich-modes as a basis for biological regulation. In: Hyland, G.J., Rowlands, P. (Eds.), *Herbert Fröhlich, FRS, a Physicist Ahead of His Time: a Centennial Celebration of His Life and Work*. University of Liverpool. 139-175.
- Racuciu, M. et Miclaus, S.**, 2007. Low level 900 MHz electrtomagnetic field influence on vegetal tissue. *Rom. J. Biophys*. 17: 149-156.
- Ragha L., Mishr S., Ramachandran V., et Singh Bhatia M.**, 2011. Effects of Low-Power Microwave Fields on Seed Germination and Growth Rate. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. 3: 165-171.

Rréférences bibliographiques

- Rajesh, P. N., 2001.** Chickpea genomics: BAC library construction, Resistance gene analog (RGA) mapping and tagging double-podded trait. A thesis submitted to the University of Pune for the Degree of doctor of philosophy. Plant Molecular Biology Division of Biochemical Sciences National Chemical Laboratory Pune 411 008 (India).144p.
- Raoul, D., 2010.** Les effets sur la santé et l'environnement des champs électromagnétiques produits par les lignes à haute et très haute tension. *ref. Sénat: 506 (2009-2010), ref. Assemblée nationale: 2558 (13^{ème} législature).* 11-15.
- Reina, F. G. et Pascual, L. A., 2001.** Influence of a stationary magnetic field on water relations in lettuce seeds. Part II: Experimental results. *Bioelectromagnetics.* 22(8): 596-602.
- Repacholi, M.H.; Greenebaum, B., 1999.** Interaction of static and extremely low frequency electric and magnetic fields with living systems: Health effects and research needs. *Bioelectromagnetics.* 20: 133–201.
- Richter, O.M. et Ludwig, B., 2003** Cytochrome c oxidase-structure, function, and physiology of a redox-driven molecular machine, *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.*147: 47–74.
- Rochalska et Orzeszko-Rywka, A., 2008.** "Influence of alternating magnetic field on respiration of sugar beet seeds." *International Agrophysics* 22(3): 255-259.
- Rosen, A., 2003.** "Mechanism of action of moderate-intensity static magnetic fields on biological systems." *Cell Biochemistry and Biophysics.* 39(2): 163-173.
- Ross, S., 2005.** Combined DC and ELF magnetic fields can alter cell proliferation. *Bioelectromagnetics.* 11 (1): 27-36.
- Roux, D., 2008.** Événements moléculaires chez *Lycopersicon esculentum* après exposition à des rayonnements électromagnétiques haute fréquence. Thèse de Doctorat Université Blaise Pascal. 26- 40.
- Roux, D., Vian, A., Girad, S., Bonnet, P., Paladian, F., Davies, E. et Ledoigt, G., 2006.** Electromagnetic fields (900 MHz) evoke consistent molecular responses in tomato plants. *Physiol. Plant.* 128: 283–288.
- Santini, M.T., Ferrante, A., Rainaldi, G., Indovina, P. et Indovina, P.L., 2005.** Extremely low frequency (ELF) magnetic fields and apoptosis: a review. *International Journal of Radiation Biology.* 81 (1): 1-11.
- Saxena M.C.** 1984. The physiology of tropical fields crops.ed.John Wiley and Sons Ltd , London , pp:419-452.
- Sayoud, R., Ezzahiri, B., Bouznad, Z., 1999.** Les maladies des céréales et des légumineuses alimentaires au Maghreb. ITGC, Alger.
- Schimmelpfeng, J. et Dertinger, H., 1993.** The action of 50 Hz magnetic and electric

Rréférences bibliographiques

- fields upon cell proliferation and cyclic AMP content of cultured mammalian cells. *Bioelectrochem.Bioenergy*. 30 (1993): 143-150.
- Serpersu, EH. etTsong, TY.**, 1983. Stimulation of a ouabain-sensitive rubidium ion uptake in human erythrocytes with an external electric field. *J. Membrane Biol.* 74: 191-202.
- Serpersu, EH. etTsong, TY.**, 1984. Activation of electrogenicRb⁺ transport of (Na,K)-ATPase by an electric field, *J. Biol. Chem.* 259 (11):7155–7162.
- Simkó, M.**, 2004. Induction of cell activation processes by low frequency electromagnetic fields. *Sci. World J.* 4(S2): 4-22.
- Singh K.B.**1997. Chickpea (*CicerarietinumL.*) .Field crops research, 53(1-3): 161-170.
- Smithson J.B.; Thompson J.A. and Summerfield R.J.** 1985. Chickpea (*CicerarietinumL.*) .eds. R.J.SUMMERFIELD and ROBERTS H.J. Collins ,London .pp.312-390.
- Socorro, A., Carbonell, M.V.**, 2002. Magnetic treatment of wheat seeds (*Triticumaestivum*) as a growth stimulating technique.*Alimentaria*. 39 (337): 167–170.
- Stoykov, N. S., Jerome, J. W., Pierce, L. C., et Taflove, A.**, 2004. Computational modelling evidence of a nonthermal electromagnetic interaction mechanisms with living cells: microwave nonlinearity in the cellular sodium ion channel. *IEEE trans. on microwave theory and techniques*. 52 (8): 2040-2045.
- Subber, A.R.H., Abul Hail, R Ch., Jabail, W A. et Hussein H F.**, 2012. Effects of Magnetic Field on the Growth Development of Zea mays Seeds. *J. Nat. Prod. Plant Resour.* 2 (3):456-459.
- Summerfield R.J., Hadley P., Roberts E.H., Minchin F.R. and Rawsthorne S.** 1984.Sensitivity of chickpea (*CicerarietinumL.*) to hot temperatures during the reproductive period. *Exp. Agri*, 20: 77-93.
- Sumner, D.R., B. Doupnik., and. Boosalis, M.G., 1981.** Effects of reduced tillage and multiple cropping on plant diseases.*Annu. Rev. Phytopathol.* 19:167–187.
- Sumorek, A. etPietrzyk, W.**, 1999. Influence of electric field on the speed of converctire removal of water from Wheat grains, *Int. Agrophysics*. 13 (4): 509- 513.
- Sun,W., Chiang, H., Fu, Y., Yu, Y., Xie, H. et Lu, D.**, 2001. Exposure to 50Hz electromagnetic fields induces the phosphorylation and activity of stress-activated protein kinase in cultured cells. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 20 (3): 415-423.
- Swain, J.**, 2008. Mode coupling in living systems: implications for biology and medicine. *Indian Journal of Experimental Biology*. 46: 389-394.

Rréférences bibliographiques

- Tafforeau, M., Verdus, M., Norris, V., White, G., Cole, M., Demarty, M., Thellier, M. et Ripoll, C.,** 2003. Plant sensitivity to low intensity 105 GHz electromagnetic radiation. *Bioelectromagnetics*.1-5.
- Tahri, E.H.; Belabed, A. etSadki, K.,** 1998. Effet d'un stress osmotique sur l'accumulation de proline, de chlorophylle et des ARNm codant pour la glutamine synthétase chez trois variétés de blé dur (*Triticum durum*). *Bull. Inst. Sci.*, Rabat, n°21 (1997-1998), 81-87.
- Takahashi, H.,** 1986. *Electricity and Life*, Institute Publication Center, Tokyo.
- Tang, Q. et Zhao, NM.,** 1999. Effects of low frequency electromagnetic fields on osteoblasts proliferation and cell cycle. *Chinese Science Bulletin*. 44: 2174-2177.
- Tian, F., Nakahara, T., Yoshida, M., Honda, N., Hirose, H. et Miyakoshi, J.,** 2002. Exposure to power frequency magnetic fields suppresses X-ray-induced apoptosis transiently in Ku80-deficient xrs5 cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 292 (2): 355-361.
- Tkalec, M., Malaric, K., Pavlica, M., Pevalek-Kozlina, B. et Vidakovic-Cifrek, Z.,** 2009. Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa L.* *Mut. Res.* 672: 76-81.
- Tkalec, M., Malaric, K., et PevalekKozlina, B.,** 2007. Exposure to radiofrequency radiation induces oxidative stress in duckweed *Lemna minor L.* *Sci. Total Environ.* 388: 78–89.
- Trebbi, G., Borghini, F., Lazzarato, L., Torrigiani, P., Calzoni, G. L. et Betti, L.,** 2007. *Bioelectromagnetics*. 28: 214–223.
- Umashankar, K.,** 1993. "Computational electromagnetic", Artech House, ISBN: 0890065993.
- Ungureanu, E., Maniu, CL., Vântu, S. et Cretescu, I.,** 2009 "Consideration on the Peroxidase Activity during HippophaeRhamnoides Seeds Germination Exposed to Radiofrequency Electromagnetic Field Influence," *Analele științifice ale Universității, Alexandru Ioan Cuza, Secțiunea Genetică și Biologie Moleculară*, TOM X. 29-34.
- Vaks, V.L., Domrachev, G.A., Rodygin, Y.L., Selivanovskii, D.A. et Spivak, E.I.,** 1994. Dissociation of water by microwave radiation. *Radiophysics and Quantum Electronics*.37 (1): 85-88.
- Vallée P.,** 2004. Etude de l'effet champs électromagnétiques basse fréquence sur les propriétés physico-chimique de l'eau. Thèse de Doctorat Université Pierre et Marie Curie, Paris. 9-18.
- Van Der Maesen L.J.G.** 1987. origin ,history and taxonomy of chickpea, p .11-34. In :Saxena , M.C. et Singh, K.B. (ed) *the chickpea*.

Rréférences bibliographiques

- Van Der Maesen L.J.G.** 1987. origin , history and taxonomy of chickpea, p .11-34. In :Saxena , M.C. et Singh, K.B. (ed) the chickpea.
- Vashisth, A. et Nagarajan, S.,** 2008. Exposure of seeds to static magnetic field enhances germination and early growth characteristics in chickpea (*Cicerariantum L.*). *Bioelectromagnetics.* 29: 571-578.
- Ventura, C., Maioli, M., Asara, Y., Santoni, D., Mesirca, P., Remondini, D. et Bersani, F.,** 2005. Turning on stem cell cardiogenesis with extremely low frequency magnetic fields.*The FASEB Journal.* 19: 155-157.
- Voikov, V.L.,** 2005. Biological oxidation: over a century of hardship for the concept of active oxygen. *Cellular and Molecular Biology.* 51: 663-675.
- Wang Q., Li L., Chen G. et Yang Y.,** 2007. Effects of magnetic field on the sol-gel transition of methylcellulose in water. *Carbohydr.Polym.*70:345–349.
- Wang, H.-Y.; Zeng, X.-B.; Guo, S.-Y.; Li, Z.-T.,** 2008.Effects of magnetic field on the antioxidant defense system of recirculation-cultured *Chlorella vulgaris*. *Bioelectromagnetics.* 29: 39–46.
- Wang, Z.,** 2009. Electromagnetic Field Interaction with Biological Tissues and Cells.Thèse de Doctorat Université de London. 22-58.
- Weaver, JC. Et Barnett, A.,** 1992. Progress toward a theoretical model for electroporation mechanism: Membrane electrical behavior andmolecular transport. In: Chang DC, Chassy BM, Saunders JA, Sowers AE, editors. Guide to electroporation and electrofusion. New York: Academic Press Inc. 91-118.
- Wolf, F., Torsello, A., Tedesco, B., Fasanella, S., Boninsegna, A., D'Ascenzo, M., Grassi, C., Azzena, G. etCittadini, A.,** 2005. 50-Hz extremely low frequency electromagnetic fields enhance cell proliferation and DNA damage: possible involvement of a redox mechanism. *Biochimica et BiophysicaActa (BBA)- Molecular Cell Research.* 1743 (1-2): 120-129.
- Yalçın, Y. etErdem, G.,** 2012. Biological effects of electromagnetic fields.*African Journal of Biotechnology.* 11(17): 3933-3941.
- Yan, DL., Guo, YQ., Zai, XM., Wan, SW., Qin, P.,** 2009. Effects of electromagnetic fields exposure on rapidmicropropagation of beach plum (*Prunusmaritima*). *Ecol. Eng.* 35:597-601.
- Yano A, Ohashi Y, Hirasaki T, Fujiwara K.,** 2004 Effects of a 60Hz magnetic field on photosynthetic CO2 uptake and early growth of radish seedlings. *Bioelectromagnetics.* 25: 572–81.

Rréférences bibliographiques

- Yao, K., Wu, W., Wang, K., Ni, S., Ye, P., Ye, Y., Ye, J. et Sun, L.,** 2008. Electromagnetic noise inhibits radiofrequency radiation-induced DNA damage and reactive oxygen species increase in human lens epithelial cells. *Mol. Vis.* 19: 964–969.
- Yinan, L., Yuan, L., Yongqing, Y., Chunyang, L.,** 2005. Effect of seed pre-treatment by magnetic field on the sensitivity of cucumber (*Cucumissativus*) seedlings to ultraviolet-B radiation. *Environ. Exp. Botany.* 54: 286- 294.
- Zhou, KX., Lu, GW., Zhou, QC., Song, JH., Jiang, ST. et Xia, HR.,** 2000. Monte Carlo simulation of liquid water in a magnetic field. *J. App. Phys.* 88: 1802-1805.
- Zrimec, A., Jerman, I. et Lahajnar, G.,** 2002. Alternating electric fields stimulate ATP synthesis in *Escherichia coli*. *Cellular and MolecularBiologyLetters.* 7 (1): 172-175.

Résumé

Le présent travail ait pour objectif l'étude de la possibilité d'utiliser les radiations électromagnétiques pour améliorer le taux de germination des semences de pois chiche dont le but d'éviter les pertes dus aux attaques que peut subir la graine, et par conséquent d'améliorer la production et les rendements agronomiques.

L'exposition des graines de pois chiche à différentes inductions électromagnétiques (2mT, 5mt, 7.5mT, 10mT, 15mT, 20mT et 25mT) et à des temps de traitement variables allons de 0.5- 9 heures a montré qu'une induction de 20 mT à une durée de traitement d'une heure affecte significativement la germination, alors qu'une exposition plus prolongée l'affecte négativement (retard de germination).

Le suivi des paramètres de croissance suite à une exposition à un champ électromagnétique statique a montré l'existence d'interactions entre les radiations électromagnétiques et les mécanismes biologiques (physiologiques, biochimiques,.....ect) de la plante.

Les mots clé : pois chiche, champ électromagnétique, germination, biostimulation.

Abstract

The present work is aimed at studying the possibility of using electromagnetic radiation to improve the rate of germination of chickpea aimed to avoid losses due to attacks that can undergo the seed, and therefore of improve production and crop yields.

Exposure of chickpea seeds at different electromagnetic induction (2mT, 5mT, 7.5mT, 10mT, 15mT, 20mT and 25mT) and processing times will vary from 0.5 to 9 h showed that induction of 20 mT for a period of one hour treatment significantly affects the germination, while a more prolonged exposure to negatively affect (retardation of germination).

Monitoring growth parameters following exposure to a static electromagnetic field showed the existence of interactions between electromagnetic radiation and biological (physiological, biochemical, ect) of the plant.

Key words: Chickpea, electromagnetic field, germination, biostimulation.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة إمكانية استعمال الأشعة الإلكترونية مغناطيسية في تحسين عملية إنبات بذور الحمص بهدف تجنب الخسائر الناجمة عن هجوم الطفيليات التي تتعرض لها البذرة ، وبذلك تحسين الإنتاج و المردود الزراعي.

تعريض بذور الحمص لمختلف شدات إلكترومغناطيسية (2mt ، 5mt ، 7.5mt ، 10mt ، 15mt ، 20mt ، 25mt). وفي أوقات معالجة مختلفة ابتداء من 0.5-9 ساعات بينت بأن شدة تقدر بـ 20mt لمدة ساعة تؤثر بفعالية على الإنبات.

تتبع معايير النمو بعد تعريضها لحقل كهرومغناطيسي ثابت بينت وجود تفاعل بين الأشعة الإلكترونية مغناطيسية والآليات البيولوجية (فيزيولوجية، بيوكيميائية... الخ) للنبات.

الكلمات المفتاحية: حمص- حقل كهرومغناطيسي- إنبات حث بيولوجي