



# T H E S E

Présentée à

L'UNIVERSITÉ BATNA 2  
Faculté de Technologie  
Département d'Electrotechnique



En vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES  
EN ELECTROTECHNIQUE

Option - Réseaux Electriques

*par*

**AGGOUNE NORA**

Magister en Electrotechnique – Université de Batna  
Ingénieur d'Etat en Electrotechnique - Université de Batna



## CONTRIBUTION Á L'EVALUATION DES EFFETS DU CHAMP MAGNETIQUE ET ELECTROMAGNETIQUE SUR LES ORGANISMES VIVANTS



Thèse soutenue le : 15 Décembre 2018 devant le jury :

Fatima Zohra Kadid	Prof	Univ.Batna2	Président
Malika NEZAR	MCA	Univ. Batna2	Rapporteur
Rachid ABDESSEMED	Prof	Univ. Batna2	Co-Rapporteur
Abdelhamid BENAKCHA	Prof	Univ. Biskra	Examineur
Abderrahmane DIB	Prof	Univ. O.E.Bouaghi	Examineur
Azeddine CHAIBA	MCA	Univ. Khenchela	Examineur
Abdelaziz AGGOUNE	MCB	Hopital Constantine	Invité

Thèse préparée au sien du laboratoire *de* Mécanique des Structures et Matériaux (LaMSM), Batna2

*Je dédie ce travail*

*À la mémoire de mes chers parents et mon frère*

*À mon mari et mes filles Yasmine et Meryem*

*À mes frères et sœurs*

*À tous ceux qui m'ont me sont chers*

### **Remerciements**

*Je souhaite exprimer mes profonds remerciements à mes directeurs de thèse Dr Malika Nezar Maître de Conférences et Pr Rachid Abdessemed Professeur à l'Université de Batna 2 pour leurs conseils, leur soutien et leur disponibilité tout au long de ce travail. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements au Dr Fatima Zohra Kadid, Professeur à l'Université de Batna 2 pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.*

*Mes remerciements vont de même aux autres membres de jury examinateurs qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de ma thèse. Il s'agit, en l'occurrence de :*

*Dr. Benakcha Abdelhamid*

*Pr, Université de Biskra*

*Dr. Dib Abderrahmane*

*Pr, d'O.E.Bouaghi*

*Dr. Chaiba Azeddine*

*Maître de Conf, Université de Khenchela*

*Dr. Aggoune Abdelaziz*

*Maître de Conf en Imagerie médicale et*

*Ancien Chef de service à l'Hôpital militaire de Constantine.*

*Ce travail n'aurait pu être réalisé sans la collaboration, l'aide et le soutien du Dr M.S. Aggoune, Dr G. Mebarki, Dr M. Abdelhamid, Dr M. Naoun, Dr N. Bouzeghaia, Dr W. Kaddouri et Dr M. Masmoudi à qui je dois beaucoup et leur exprime toute ma gratitude pour leur disponibilité, leur gentillesse et leurs conseils.*

## Remerciements

---

*Mes vifs remerciements vont aux membres Laboratoire de Mécanique des Structures et Matériaux (LaMSM) de l'Université de Batna 2, pour leur soutien et encouragements.*

*Une pensée particulière pleine de respect à mes enseignants Mrs M. T. Bellal, A. Benoudjit, S. Benaggoune, B. Zaouch, B. Bouhzila, C. FethaR. Manaa et S. Derradji.*

*Une pieuse pensée aux enseignants qui nous ont quitté Mrs B. Benhassine, A. Kadjoudj, R. Menina, C. Abdelhamid, S. Deffel et M. Benyahia.*

*Je remercie mes collègues du département de Mécanique de l'université de Batna 2, en particulier Dr L. Messaoudi, Dr L. Bourih, Dr N. Saidani, et Mr M. Menasria pour leur soutien.*

*Je remercie chaleureusement mes amies Z. Sabah, S. Warda, T. Dalila, N. Nassira, Z. Badra, M. Khamsa, B. Fatima, G. Hafida, K. Feirouz et B. Malika.*

*Grand merci à ma famille pour le soutien absolu que j'ai eu de leur part, tout au long de mon parcours d'étude et sans lequel je n'aurai rien fait.*

**N. AGGOUNE**

## Nomenclature

Symbole	Grandeur	Unité
$\vec{H}$	Champ magnétique	A.m <sup>-1</sup>
$\vec{B}$	Induction magnétique	T
$\vec{E}$	Champ électrique	V.m
$\vec{D}$	Induction électrique	C.m <sup>-2</sup>
$\vec{A}$	Potentiel vecteur magnétique	Wb.m <sup>-1</sup>
$\epsilon$	Permittivité	F.m <sup>-1</sup>
$\epsilon_0$	Permittivité dans le vide	F.m <sup>-1</sup>
$\mu_0$	Perméabilité magnétique dans le vide	H.m <sup>-1</sup>
$\mu_r$	Perméabilité magnétique relative	H.m <sup>-1</sup>
f	Fréquence	Hz
$\mu$	Viscosité cinématique du fluide	Pa s
$\nu$	viscosité dynamique du fluide	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
$\lambda$	Conductivité thermique	W/mK
$\omega$	Pulsation	Radiant
$\vec{j}$	Densité de courant	A.m <sup>-2</sup>
$\sigma$	Conductivité électrique	S.m <sup>-1</sup>
P	Pression	Pa

### Acronymes et abréviations

SAR	Specific Absorption Rate (Taux Spécifique d'Absorption)
DAS	Débit d'Absorption Spécifique
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
INRS	Institut national de recherche et de sécurité
CM	Champ Magnétique
CMS	Champ Magnétique Statique
CEM	Champ Electro Magnétique
IEM	Impulsions Electro Magnétiques
BF	Basse Fréquence
EBF	Extrême Basse Fréquence
HT	Haute Tension
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ISTA	International Seed Testing Association

Dédicaces  
Remerciements  
Nomenclature  
Acronymes et abréviations

### **Introduction générale**

1. Contexte et problématique.....2  
2. Objectif de la thèse.....10  
3. Structure de la thèse.....11  
Références bibliographiques.....13

### **Partie 1 : CEM et tissus biologiques humains**

#### **Chapitre I : Etat de l’art**

I.1 Etat de l’art.....16  
I.2 Références bibliographiques.....27

#### **Chapitre II : Modélisation mathématique de l’écoulement sanguin**

II.1 Introduction.....32  
II.2 Notions fondamentales de la mécanique des fluides.....32  
II.3 Définition de la rhéologie.....37  
II.4 Rhéologie du sang.....38  
II.5 Composition du sang.....38

---

II.6 Sang et écoulement .....	40
II.7 Modélisation magnétostatique.....	40
II.8 Modélisation de la dynamique des fluides.....	41
II.9 Conclusion.....	42
II.10 Références bibliographiques.....	43

### Chapitre III

#### **Première application : Etude numérique d'une ligne HT 440 KV sur la vitesse d'écoulement dans les capillaires d'un tissu musculaire humain**

III.1.1 Introduction.....	47
III.1.2 Problématique.....	50
III.1.3 Importance des capillaires dans la circulation sanguine.....	51
III.1.4 Vitesse d'écoulement du sang dans les vaisseaux.....	53
III.1.5 Procédure de la simulation numérique .....	53
III.1.6 Simulation et résultats.....	56
III.1.7 Conclusion.....	59
III.1.8 Références bibliographiques.....	60

#### **Deuxième application : Contrôle de l'écoulement sanguin dans l'aorte, en présence d'une athérosclérose, par l'application d'un champ magnétique externe**

III.2.1 Introduction.....	63
III.2.2 Problématique.....	63
III.2.3 Objectif de l'étude.....	65

III.2.4 Procédure de la simulation numérique .....	65
III.2.5 Etude d'indépendance du maillage .....	66
III.2.6 Résultats et discussion .....	68
III.2.7 Conclusion.....	76
III.2.8 Références bibliographiques.....	78
III.2.9 Lexique médical.....	79

## **Partie 2 : CEM et plantes**

### **Chapitre IV : Etat de l'art**

IV.1 Etat de l'art .....	82
IV.2 Références bibliographiques.....	92

### **Chapitre V : Expérimentation et résultats**

V.1 Introduction.....	96
V.2 Etude expérimentale.....	96
V.3 Matériel et méthodes.....	97
V.4 Protocole expérimental.....	105
V. 5 Observations et interprétation des résultats.....	107
V.6 Conclusion.....	115
V.7 Références bibliographiques.....	116
V.8 Lexique botanique.....	117

## **CONCLUSION GENERALE**

1. Problématique et solutions.....	121
2. Perspectives.....	122

## **Introduction générale**

1. Contexte et problématique
2. Objectif de la thèse
3. Structure de la thèse
4. Références bibliographiques

## 1. Contexte et problématique

Physiciens, médecins et biologistes se sont acharnés, depuis quelques décennies, à l'étude des effets des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques sur les organismes vivants (humain, animal et végétal) sans pour autant prouver l'existence d'une relation de cause à effet entre eux. L'objectif essentiel de cette thèse est l'analyse des effets des CEM et CMS sur les tissus biologiques humains et sur les plantes.

### 1.1 CEM et santé humaine

Le développement rapide des technologies industrielles et médicales mettant en œuvre des CEM a accru ces dernières années, leurs effets biologiques, **volontaires et involontaires**, sont devenus un sujet d'investigation scientifique.

La recherche dans ce domaine a grandement contribué à notre compréhension de l'environnement électromagnétique complexe auquel nous sommes exposés, mais il n'a pas diminué la controverse associée aux effets nocifs des CEM. Les résultats de ces recherches ont divisé les scientifiques en deux groupes, ceux qui pensent qu'une exposition à CEM de faible fréquence provoque des effets sur la santé et ceux qui pensent le contraire. Ceux qui croient qu'il y a une association causale tentent de trouver le mécanisme responsable et ceux qui sont contre pensent que cette recherche est un gaspillage de temps et d'argent.

Or, nous savons que nous vivons dans un environnement électromagnétique, à commencer par la terre qui est considérée comme un aimant [THE03]. Son champ magnétique, aussi nommé champ géomagnétique et qui présente une force de  $70 \mu\text{T}$  aux pôles et  $30 \mu\text{T}$  à l'équateur [BHD04] est généré par le mouvement du fer liquide qui se déplace constamment en son centre (Figure 1).

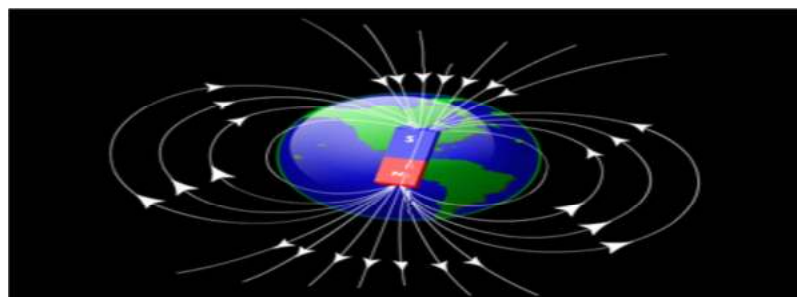


Figure 1 Champ magnétique terrestre.

De même, notre corps est le siège de micro-courants dû essentiellement aux réactions chimiques qui correspondent aux fonctions normales de l'organisme, par exemple, certains signaux sont relayés par les nerfs sous forme d'impulsions électriques. Or, La plupart des réactions biochimiques qu'implique la digestion ou l'activité cérébrale comportent une redistribution de particules chargées, ainsi que le cœur qui est lui-même le siège d'une activité électrique que le médecin peut suivre sur l'électrocardiogramme [KAT11].

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

### 1.1.1 Expositions résidentielle ou professionnelle

Jusqu'à récemment, les fréquences inférieures à la bande des micro-ondes ont été supposées être biologiquement sécuritaires; mais, réellement les premiers symptômes de leur impact nuisible ont été signalés après que les premières sous stations Haute Tension (500 kV) étaient devenues fonctionnelles dans l'Union Soviétique et que les travailleurs dans les postes de manœuvre ont commencé à se plaindre de la mauvaise santé d'une façon générale. Les effets nocifs des lignes électriques HT sur les travailleurs de postes et leurs familles ont été le sujet des documents [NOR83] et [NOR94].

D'autres chercheurs ont étudié les effets des CEM suivant le type de l'exposition : **résidentielle** ou **professionnelle**. Pour le premier cas, une exposition quotidienne maximale cumulée peut être attribuée aux appareils, au câblage intérieur, ou aux lignes électriques extérieures selon les circonstances. Les personnes peuvent être exposées à des CM différemment selon le type d'appareils qu'ils utilisent ou encore la durée qu'ils ont passé à leur proximité. Ces différences qui n'étaient pas considérées, dans les premières études, peuvent expliquer en partie la différence dans les résultats, alors, les investigations futures devront les prendre en considération [POW98].

Quant au second cas, et comme l'intérêt pour l'exposition professionnelle a augmenté, plus de mesures de CM dans divers milieux de travail associés à l'exposition individuelle ont commencé à être documentées. En raison de la variabilité au sein et parmi les professions ainsi entre les types de mesures, les comparaisons entre les professions sont difficiles et ne peuvent être considérées que comme provisoires à ce temps. Le contrôle individuel des

travailleurs fournit plus d'informations et, à long terme, peut se révéler être la mesure la plus utile. Malgré la variation de l'exposition professionnelle, quelques conclusions générales peuvent être élaborées. Par exemple, certaines des expositions les plus élevées se produisent dans l'industrie textile (ex couturières et tailleurs utilisant des machines à coudre (en moyenne 3  $\mu\text{T}$ )), industrie des services publics (ex électriciens et monteurs de lignes (en moyenne 1.4 à 3.6  $\mu\text{T}$ )), le transport (ex les cheminots (moyenne de 4  $\mu\text{T}$ )) et les industries métallurgiques (ex soudeurs (en moyenne de 2  $\mu\text{T}$ )). Une autre industrie avec une exposition importante est celle des télécommunications, en particulier les monteurs de lignes téléphoniques (en moyenne 0.35 to 0.43  $\mu\text{T}$ ) [HAV00].

### 1.1.2 Etudes épidémiologiques

De nombreuses études épidémiologiques ont été menées pour vérifier la présence d'effets nuisibles à court, mais surtout à long terme, sur la santé humaine. Une grande majorité de ces études portent sur une éventuelle relation entre les CM basse fréquence et l'émergence des cas de cancer [POW98] et [EXP17].

Au début de ces études, les informations sur l'exposition étaient rares, puis, elles ont été complétées par des études in vivo et in vitro pour tenter d'explorer les mécanismes sous-jacents de l'effet des CEM. En raison de la nouveauté de ce type de recherche, il n'y avait pas (et sont toujours) de protocoles normalisés pour les tests. Les intensités expérimentales de la densité de flux magnétique est de moins de 0,1  $\mu\text{T}$  à plus de 300 mT; l'exposition quotidienne varie de 30 minutes à 24 heures; et la durée de l'exposition se prolonge de quelques jours à plusieurs années [SCO03].

Certains des tests impliquent des champs homogènes, continus, d'autres impliquent des gradients, ou encore, d'autres utilisent des champs intermittents avec cycles on : off allant de quelques secondes à plusieurs heures. Interpréter un tel large éventail de conditions d'exposition n'est pas une tâche facile et les conclusions contradictoires sont à prévoir en fonction du poids scientifique mis sur les études individuelles.

### 1.1.3 Expositions involontaires

Pour les expositions involontaires, elles sont dues essentiellement, dans la maison, aux appareils ménagers électriques, les écrans d'ordinateurs, les fours à microondes, les téléphones sans fil et dans l'environnement, au radar, aux systèmes de sécurité, aux trains et trams à traction électrique, aux antennes des stations de radiodiffusion, aux téléphones portables et

leurs stations-relais, les portiques de sécurité et aux réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique.

### **1.1.4 Expositions volontaires : applications médicales**

Les champs électromagnétiques sont utilisés dans le domaine médical à des fins diagnostiques comme l'Imagerie par Résonance Médicale (IRM) et plus récemment la spectroscopie par résonance magnétique (SRM), ainsi que thérapeutiques comme la magnétothérapie et l'hyperthermie ou encore dernièrement le ciblage des médicaments lors de la chimiothérapie. L'exposition peut également résulter d'autres gestes médicaux, tels que l'utilisation d'aimants de prothèses, et comme pour toutes ces applications, il est fondamental de connaître les phénomènes électromagnétiques à l'intérieur du corps humain, pour pouvoir les maîtriser.

#### **1.1.4.1 Imagerie et la spectroscopie par résonance magnétique**

L'Imagerie et la spectroscopie par Résonance Médicale sont considérées parmi les plus fortes expositions, elles sont aujourd'hui largement utilisées soit à des fins diagnostiques soit, de plus en plus pour guider les professionnels lors d'interventions chirurgicales. La densité du flux magnétique se situe entre 0.15 et 3 T et la durée d'exposition est généralement inférieure à une heure, mais atteint parfois quelques heures [GOW05].

Dans ces pratiques, les gestes médicaux permettant un contrôle en temps réel de l'intervention, sont de plus en plus courants. Ces gestes se traduisent par une exposition professionnelle accrue du personnel médical (chirurgiens, radiologues, infirmiers et techniciens), parfois présents durant plusieurs heures dans le CM. Le personnel peut être fortement exposé dans les situations d'urgence où il doit se tenir tout près du patient. À cela s'ajoutent des expositions de courte durée lors du positionnement des patients ou de leur sortie de l'installation de résonance magnétique donnent lieu à des expositions professionnelles à des forts champs magnétiques statiques.

Ces dispositifs d'imagerie utilisent trois types de champs, soit le champ magnétique statique, le champ magnétique variable dans le temps et le champ radiofréquence (RF) (Figure 3) [DEM99]. Leur principe de fonctionnement consiste d'abord à aimanter le corps humain par le biais d'un champ magnétique statique uniforme très intense (de l'ordre du Tesla), auquel vient s'ajouter une onde radiofréquence (20 - 400) MHz accordée sur la

fréquence de résonance des atomes d'hydrogène (fréquence de Larmor), exprimé en fonction du champ appliqué par:  $f_L = 2\gamma B$

$\gamma$  étant le rapport gyromagnétique, qui ne dépend que du type de noyau des atomes.

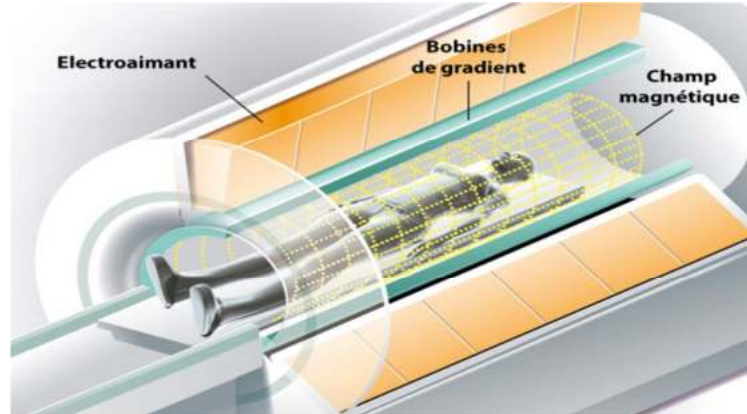


Figure 3 Appareil utilisé en IRM.

Les atomes d'hydrogène entrent en résonance, et lorsque le champ alternatif est brutalement interrompu il est possible de mesurer la perturbation du champ magnétique due aux vibrations de ces atomes. Pour obtenir des images localisées, on joue sur le fait que la fréquence de résonance  $f_L$  dépend de l'intensité du champ magnétique. On superpose alors un gradient statique de champ pour moduler cette fréquence, selon l'endroit où l'on souhaite mettre en résonance les atomes.

Dernièrement une autre application est entrée en jeu, c'est l'IRM fonctionnelle qui est aujourd'hui largement utilisée dans la recherche universitaire et médicale pour explorer les fonctions du cerveau humain. Des systèmes faisant appel à des champs allant jusqu'à 10 T, sont employés par divers organismes de recherche dans le monde [MVG06].

#### 1.1.4.2 La magnétothérapie

La magnétothérapie est utilisée pour le soin des fractures et qui consiste à immerger le membre fracturé dans un champ magnétique basse fréquence assez intense. L'efficacité de ce type de thérapie est prouvée mais en revanche, le mécanisme qui en est à la base demeure assez méconnu. L'explication la plus vraisemblable est que les courants induits facilitent le transport des ions calcium vers le membre fracturé, en accélérant ainsi la soudure de la fracture [BOL16].

### 1.1.4.3 Traitement du cancer par hyperthermie

L'hyperthermie est une technique utilisée pour le traitement du cancer qui consiste à chauffer de manière sélective les tissus malades avec une radiation électromagnétique, dont la fréquence est liée à la profondeur de la tumeur. La difficulté de cette technique réside dans le fait qu'il faut bien cibler la partie du corps à chauffer pour ne pas endommager les tissus sains qui se trouvent à proximité. Ce procédé, tout seul, n'est pas considéré comme une thérapie, mais plutôt, il sert à améliorer l'efficacité d'autres traitements, et notamment la chimiothérapie [SIA02].

### 1.1.4.4 Ciblage magnétique des médicaments

Le ciblage magnétique des médicaments (Magnetic Drug Targeting (MDT)) est une technique récente et non invasive utilisée dans le traitement de certains cancers. Elle consiste à diriger le médicament anticancéreux uniquement vers les cellules atteintes et éviter ainsi que les cellules saines soient attaquées. Un support de nanoparticules magnétiques, composé généralement d'un noyau magnétique et d'un matériau de revêtement biocompatible, chargé de molécules de médicament est injecté dans le flux sanguin et dirigé vers la région ciblée dans le corps à l'aide d'un champ magnétique local (Figure 2) [AGG17].

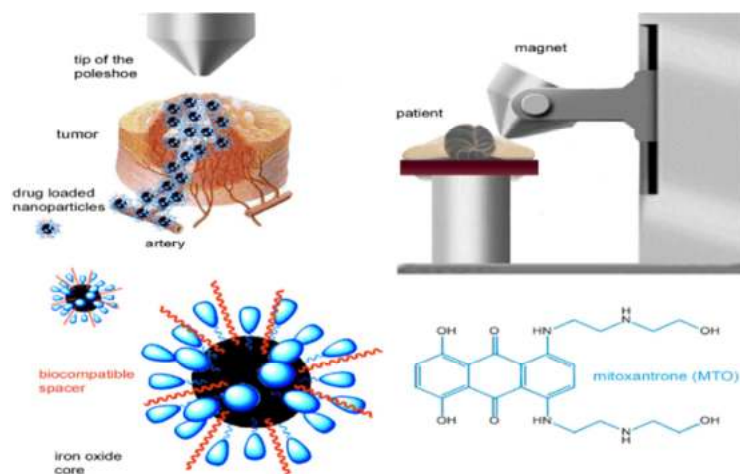


Figure 2 Techniques ciblages magnétiques des médicaments.

### 1.1.4.5 CEM et implants médicaux

Les implants passifs tels que les broches ou les plaques, lorsqu'ils contiennent des matériaux ferromagnétiques, sous l'effet de champs magnétiques statiques intenses peuvent

être parcourus par des courants induits à l'origine d'échauffement des tissus en contact avec l'implant et le risque de leur déplacement par attraction.

En présence d'un champ magnétique, les implants actifs comme les stimulateur cardiaque, les défibrillateurs, les stimulateurs neurologiques, les prothèses auditives, les pompes à insuline...etc, peuvent subir des dysfonctionnements électriques et/ou électroniques (déprogrammation, reprogrammation, arrêt, stimulation ou inhibition inappropriés) mettant ainsi les patients en danger [INRS]. L'association d'un aimant et d'un objet contenant du fer ou de deux aimants produit d'importantes forces d'attraction. Sous un tel effet, l'aimant peut être projeté dans l'air et se briser en petits morceaux sous l'effet du choc.

### 1.2 CEM et plantes : Electroculture et Magnétoculture

Ce mode de culture exploite l'énergie électromagnétique, présente dans la nature de plusieurs façons, dans le but de stimuler la croissance des sèmes et les premiers essais d'électro-culture ne datent pas d'hier. Cette technique était utilisée de façon empirique dans l'antiquité chez les égyptiens ou en chine, mais, étudiée depuis plus d'un siècle [COL17].

On peut diviser sa pratique en deux familles : l'**électro-culture dite passive**, qui requiert uniquement des piquets, des grillages et des pointes métalliques et cherche à canaliser les courants et champs électromagnétiques naturels ; et l'**électro-culture active**, avec des générateurs de courant électrique, de champs magnétiques ou d'ions négatifs nécessitant une énergie extérieure ou d'être branchés sur un réseau électrique.

Dans l'électro-culture active, utilisée dans les premières expérimentations par le physicien finlandais Lemstrom dans les années 1890 ainsi que les essais faits en Angleterre et aux Etats-Unis durant l'entre deux-guerres, deux approches sont aussi à distinguer : celle à base de courant continu, et celle utilisant du courant alternatif. Là, à nouveau, deux axes : l'un privilégiant les courants basses fréquence (Hertz ou Kilohertz), l'autre les courants hautes fréquences (Mégahertz ou Gigahertz) [ELC].

Un autre paramètre essentiel qui devrait être pris en considération est le sens du courant appliqué. Selon sa polarité, positive ou négative, orienté vers le nord ou vers le sud, l'effet peut s'avérer diamétralement opposé ; retardant par exemple la croissance de la plante au lieu de la stimuler.

**La magnéto-culture**, pratiquée par certains pionniers et soutenue par une documentation scientifique de plus en plus précise et fournie, ouvre aujourd'hui de nouveaux horizons à la jeune génération des électro jardiniers, en particulier dans les domaines de l'électro-semence ou de l'électro-germination qui pour un gain d'au moins 30% utilisent des traitements cherchant à magnétiser les graines en les exposant à des champs magnétiques deux à cinq fois plus puissants que le champ magnétique terrestre [MAG].

Tandis que l'électro-culture passive, celle branchée sur l'électricité de l'air, l'électricité du sol ou le magnétisme terrestre, c'est-à-dire sur l'ensemble des forces électromagnétiques ambiantes, est historiquement la source de l'électro culture. Bon marché, elle ne nécessite pas non plus d'installation complexe et est également inépuisable, puisque puisant son énergie dans les phénomènes naturels de la conduction atmosphérique globale. Son efficacité ne dépend pas d'un seul et unique facteur, mais plutôt d'une somme de réaction en chaîne, d'un concours de circonstances d'éléments et d'énergies libres, cosmiques, telluriques et biochimiques.

### **1.2.1 Mécanismes d'action : Suivant le principe du paratonnerre**

Le principe de fonctionnement de l'électro culture passive pour capter et exploiter les différentes forces naturelles est basé sur des effets électriques tels que le paratonnerre et la cage de Faraday.

Verticalement, le simple fait de mettre en terre une tige métallique conductrice fine, longue et pointue, permet de drainer des charges électriques présentes dans l'air et de les amener au sol. La flèche du métal tendue vers le ciel est traversée par un courant : C'est sur le principe de paratonnerre ou de l'effet de pointe, que de nombreux appareils d'électro-culture sont apparus (ex enceinte métallique grillagée, entourant une plantation).

Horizontalement, pour canaliser les courants telluriques, certains ont déployé des grilles de fils métalliques de cuivre ou fer galvanisé orientés selon le nord magnétique, enfouis dans les sols suffisamment profonds pour ne pas gêner le travail externe de la terre. D'autres se contentent d'enfouir deux barres métalliques de différentes natures (généralement cuivre et fer) en deux points de leur jardin, espérant susciter une différence de potentiel, source de fertilité.

### 1.2.2 Interactions électrochimiques

Enfoncer un piquet métallique dans le sol modifie la conductivité électrique du terrain tels que le circuit des courants telluriques locaux ou la répartition des charges chimiques, cations (+) et anions (-). Le changement de ces circulations électromagnétiques et électrochimiques du sol peut sembler minime ; mais, il se propage, transformant légèrement les conditions électriques et magnétiques en place. Touchant par exemple à l'activité bactérienne autour des racines, très sensible aux modifications électriques, ou en amorçant des réactions de type électrolyse car, de nombreuses interactions électrochimiques relient la microbiologie des sols à la conductivité électrique des sols ou à leur susceptibilité magnétique [ELC].

### 1.2.3 Renaissance

Dans les années 1960 et 1970, plusieurs scientifiques anglo-saxons se sont attachés à explorer plus en détail l'électro-physiologie des plantes, notamment l'influence des ions positifs ou négatifs sur les enzymes et en particulier les métallo-enzymes qui pilotent la biochimie des plantes. Une électro-culture expérimentale au sein des laboratoires universitaires, s'est développée, redonnant ses lettres de noblesse à une pratique passée de mode. En parallèle, l'effet des champs magnétiques a aussi été étudié,

## 2. Objectif de la thèse

L'objectif essentiel de cette thèse est d'analyser les effets produits par des CEM sur les des tissus biologiques humains et les CMS sur plantes.

Pour **la première partie**, deux applications seront exposées : la première consiste en une simulation numérique 3D, à l'aide du logiciel COMSOL5.0 pour voir les effets du CEM sur la vitesse de l'écoulement du sang dans les capillaires qui alimentent un échantillon musculaire humain exposé à une ligne de HT 440 KV. Quant à la seconde, le contrôle actif par un champ magnétique externe de l'écoulement sanguin dans l'aorte, avec une athérosclérose, sera étudié en détail.

Pour **la deuxième partie**, partant de l'hypothèse que les CMS sont des stimulateurs de croissance, des expériences seront menées au laboratoire, pour voir leur influence sur la germination et la croissance des graines de lentilles, en faisant varier les durées (0, 2, 4 et 8) h

et le sens d'application de ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $180^\circ$ ) (par rapport au pôle nord terrestre) de l'exposition tout en maintenant constant l'intensité du champ magnétique statique à 36 mT.

Notre contribution fera le point sur les connaissances acquises et les constats effectués à ce jour tout en pointant les zones d'ombre persistantes. Les résultats seront analysés et les recommandations nécessaires seront faites.

### 3. Structure de la thèse

La thèse est structurée en deux parties, la première est consacrée à l'analyse des conséquences produites par des CEM sur les tissus biologiques humains et la seconde à l'étude des effets des CMS sur plantes.

- Après avoir introduit les principaux effets des CEM, volontaires et involontaires, sur les tissus biologiques et des CMS sur la germination et la croissance des plantes, ie, ce qu'on appelle communément l'électro-culture et la magnéto-culture ;

- L'état de l'art, divisé en deux parties, sera présenté au premier et quatrième chapitre, où nous donnerons une synthèse bibliographique très fournie vue l'importance de cet axe de recherche car il touche à la vie quotidienne des humains et il est considéré comme un trait d'union entre plusieurs branches : Médecine, Botanique, Electrotechnique, Agronomie, Vétérinaire, Mécanique des fluides et Biophysique etc;

- Le deuxième chapitre, de la première partie, sera dédié à la formulation mathématique qui régit notre problème, nous donnerons le modèle "électromagnétique" en utilisant les équations de Maxwell couplés à celui de l'écoulement sanguin requis par les équations de Navier-Stokes, dans les capillaires et l'aorte;

- Le troisième chapitre sera destiné à la présentation et l'interprétation des résultats de la simulation numérique des effets de l'exposition d'un échantillon musculaire aux CEM d'une ligne HT 440 KV ainsi qu'au contrôle de l'écoulement sanguin dans l'aorte, avec une athérosclérose, en utilisant un champ magnétique externe;

- Pour la deuxième partie consacrée à l'expérimentation où des graines de lentille seront exposées à un champ magnétique statique d'un aimant permanent d'intensité de 36 mT, pour diverses durées allant de 0 à 8 heures et différents sens d'application. Les résultats obtenus seront commentés au cinquième chapitre.

- Nous terminerons notre thèse par une conclusion générale où nous présenterons les principaux résultats de simulation et d'expérimentation ainsi que des perspectives futures.

## 5. Références bibliographiques

- [AGG17] M.S Aggoune, N. Aggoune, N. Bensedira, A. Bouhantala et A. Belkbir, "Simulation of a 2D Magnetic Drug Targeting Model", *International Journal of Civil and Structural Engineering* 4, 345-355, (2017).
- [BHD04] N.A. Belyavskaya, D.L. Henninger, A.E. Drysdale et A.V. Kondyurin. Kidlington, Pergamon- "Biological effects due to weak magnetic field on plants. *Space Life Sciences: Life Support Systems and Biological Systems under Influence of Physical Factors*", Elsevier Science Ltd. 34: 1566-1574, 2004.
- [BOL16] M. Bollart, "Place du champ magnétique pulse dans la prise en charge de la douleur chronique", Thèse de Doctorat en médecine, Université François-Rabelais, Faculté de Médecine de Tours, 2016.
- [COL17] A. Colombier, "Les secrets de l'électroculture", Edition Eyrolles, 112 pages, 2017.
- [DEM99] R.J. Demeure, "Physique IRM-IRM d'aujourd'hui et de demain", *Louvain Med*, 118 :107–113, 1999.
- [EPA92] EPA, «EMF in your Environment: Magnetic Field Measurements of Every day Electrical Devices», Environmental Protection Agency, 1992.
- [EXP17] Exponent, "Electric and Magnetic Fields and Health: Review of the Scientific Research from March 1, 2012 to December 31, 2016", *Health Sciences Practice*, February 21, 2017.
- [GOW05] P.A. Gowland, "Present and futur magnetic resonance sources of exposure to static fields", *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 87, 175-183, 2005.
- [HAV00] M. Havas, 2000, "Biological effects of non-ionizing electromagnetic energy", *Environmental Reviews* 8:173-253, 2000.
- [INRS] Institut National de Recherche et de Sécurité, dossier: Champs électromagnétiques.
- [KAT11] J. Katrib, "Etude théorique et expérimentale des implants médicaux actifs en environnement électromagnétique : application aux défibrillateurs implantables en champ magnétique basse fréquence dans la bande 50 Hz-50 kHz", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré – Nancy1, France ,13 octobre, 2011.

- [MVG06] G. de Marco, J.N. Vallée, R. Guillevin et P. Lehmann, "L'IRM fonctionnelle (IRMf) 1ère partie : Bases physiques et application aux tumeurs cérébrales", Neurologies n° 91, Vol. 9, 589-597, Novembre 2006.
- [NOR83] S. Nordstrom, E. Birke et L. Gustavsson, "Reproductive Hazards among Workers at High Voltage Substations". Bioelectromagnetics 4:91-101, 1983.
- [NOR94] I. Nordenson, K. Hansson Mild, G. Anderson et M. Sandstrom, "Chromosomal aberrations in human amniotic cells after intermittent exposure to fifty-hertz magnetic fields". Bioelectromagnetics 15:293-301, 1994.
- [POW98] C.J. Portier, et M.S. Wolfe, "Assessment of Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields", National Institute of Environmental Health, 1998.
- [SCO03] R. Scorretti, "Caractérisation numérique et expérimentale du champ magnétique B.F. généré par des systèmes électrotechniques en vue de la modélisation des courants induits dans le corps humain", Thèse de Doctorat, L'Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [SIA02] N. Siauve, "Modélisation par éléments finis des phénomènes électromagnétiques en hyperthermie et optimisation des applicateurs", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2002.
- [THE03] E. Thébault, "Modélisation régionale du champ magnétique terrestre", Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, Spécialité géophysique, 2003.
- [ELC] <http://www.electroculturevandoorne.com/>
- [MAG] [http://www.magnetoculture.com/magnetoculture/Histoire %26 Livres.html](http://www.magnetoculture.com/magnetoculture/Histoire_%26_Livres.html)

**Partie 1**  
**CEM et tissus biologiques humains**

## **Partie I**

### **Chapitre I : Etat de l'art**

L'impact des CEM sur les systèmes biologiques a attiré l'attention de nombreux chercheurs dans divers domaines des sciences comme la biologie, la médecine, l'agriculture, l'électrotechnique ou encore la mécanique des fluides, mais, dont les avis sont mitigés.

Les études menées jusqu'à présent peuvent se classer en deux catégories principales : études épidémiologiques chez l'homme, principalement, dans le but de lier l'exposition aux CEM à l'augmentation de leucémie chez l'enfant, la maladie d'Alzheimer et le cancer du sein chez l'adulte et la leucémie et le cancer du cerveau chez les travailleurs des métiers de l'électricité, ainsi que l'exposition de longue durée chez l'animal.

Malheureusement, pour le premier type d'étude, il est impossible de maîtriser l'exposition aux CEM sur une longue période. De plus, il est également impossible de séparer les effets reproductibles aux seuls champs, des effets de tout autre facteur auxquels la population est exposée dans la vie courante, comme des facteurs familiaux (hérédité génétique...), l'habitude de vie (régime alimentaire, tabagisme, ...) et d'autres facteurs liés à l'environnement (pollution, utilisation de produits chimiques ...).

Pour le deuxième type d'étude, les expériences ont été effectuées sur des animaux en laboratoire, car, il est possible de contrôler les niveaux d'exposition et de minimiser tout autre facteur de perturbation ; cependant, il est impossible de transposer directement à l'homme les résultats obtenus chez les animaux ; mais, ces analyses nous donnent des idées sur l'interaction entre "la matière vivante" et les CEM.

Les CEM interagissent avec le corps humain. Cette interaction dépend fortement de la fréquence et de l'intensité des champs. Certains effets à court terme peuvent être observés (Tableau I.1) [OMS].

Champ magnétique (50/60Hz) (mT)	Densité de courant induit (mA/m <sup>2</sup> )	Le seuil de perception
0,5 – 5	1 – 10	Effets biologiques mineurs.
5 – 50	10 – 100	Effets bien établis sur le système nerveux et la vision.
50 – 500	100 – 1000	Stimulation des tissus excitables et des dommages possibles sur la santé.
> 500	> 1000	Fibrillation ventriculaire et des extrasystoles – Effets aigus.

Tableau I.1 Seuil de perception du champ magnétique.

Par contre, les effets à long terme ont fait l'objet de nombreuses recherches donnant ainsi naissance à une bibliographie très diversifiée mais qui reste difficile à synthétiser tant les clés de classification dépendent des objectifs et des intérêts visés. En effet, qu'il s'agisse des sources rencontrées ou des fréquences concernées, des milliers d'articles ont été publiés depuis quelques décennies. C'est pourquoi une modélisation précise de la répartition des CEM dans le corps humain est nécessaire. Cette modélisation doit tenir compte des particularités du " système " étudié comme les propriétés électromagnétiques des tissus qui sont partiellement connues et sont différentes de celles des matériaux habituellement utilisés ainsi que la géométrie complexe des tissus (partiellement connue, elle-aussi) constitue une difficulté majeure, aussi bien dans l'analyse mathématique que dans l'implémentation numérique.

La première publication scientifique est apparue en 1979 où **Wertheimer et Leepe** [WEL79] qui, à travers une étude épidémiologique, ont lié la croissance du risque de cancer aux CEM EBF et la leucémie et le cancer du cerveau chez les travailleurs des métiers de l'électricité [TGM94], [SL95].

Cependant, les recherches réalisées aux Etats - Unis, au Canada, et en France par **M. S. Linet et al.** [LHK97] et **M. L. McBride et al.** [MGT99] ont fournis des résultats discordants, et ne permettent pas de tirer une conclusion sur l'association entre le champ électromagnétique et ces maladies.

**N. Burais et M. Nadi** [BUN02] se sont limités à la présentation de la problématique "CEM et santé" uniquement dans le domaine des basses fréquences, en prenant comme exemple d'application la perturbation des implants actifs en raison de leur utilisation croissante dans le corps humain et ceci dans le but d'établir des protocoles de mesures rigoureux et robustes.

Pour calculer les courants induits dans le corps humain par des dispositifs réalistes, **R. Scorretti et al.** [SBF04] ont utilisé la méthode de la formulation tridimensionnelle par éléments finis. Cette méthode a été validée par des solutions analytiques appliquées à une sphère puis, a été généralisée en utilisant un modèle précis du corps humain. Les résultats obtenus leur ont permis d'étudier l'influence des paramètres de dispositifs de rayonnement sur les courants induits afin de rechercher des modèles simplifiés d'appareils, qui visent à saisir les caractéristiques du champ de dispersion qui est considéré comme un élément indispensable pour un calcul précis des courants induits dans le corps humain.

L'étude de **N. Burais** [BUR04] consacrée aux phénomènes électromagnétiques complexes en BF qui donnent naissance à des courants induits dans le corps humain. Vu la complexité (de point de vue électrique) de ce dernier, avec des conductivités (organes) très faibles, donc, très faibles valeurs de courants induits non mesurables, d'où la nécessité d'une modélisation numérique de ces phénomènes pour une évaluation plus précise des restrictions de base ainsi que pour la définition des normes industrielles plus appropriées (SAR).

La modélisation des courants induits dans le corps humain par un champ magnétique BF en utilisant la méthode des éléments finis tridimensionnelle et une formulation spéciale ( $\emptyset$ -A) est utilisée par **R. Scorretti et al.** [SBN05]. D'après les résultats obtenus, plusieurs points doivent être améliorés comme prendre en compte à la fois des champs électrique et magnétique et ne pas négliger les courants de déplacement. Une autre méthode a été utilisée pour le même type de calcul (**R. Scorretti et al.**) [SPM10] ; c'est la formulation (T-B). Malgré que son coût de calcul soit supérieur à la formulation précédemment citée ( $\emptyset$ -A), les résultats obtenus sont plus précis.

**Le Ha Hoang et al.** [HSB09] a présenté une méthode pour le calcul du champ électrique et des densités de courants induits dans un modèle hétérogène du corps humain par l'exposition simultanée à des champs magnétiques et électriques générée par une ligne électrique de HT triphasée où des courants induits se sont développés, d'une manière

asymétrique, à l'intérieur du corps. Les résultats obtenus ont été partiellement validés et analysés par comparaison avec les données existantes avec un CM uniforme.

Des résultats similaires ont été également trouvés par **R. Scorretti et al.** [SSM11] où ils ont utilisé les deux formulations (T-B et  $\emptyset -A$ ) dans le calcul des champs induits dans le corps humain avec des fréquences extrêmement basses et ceci pour améliorer la précision du calcul et pour estimer l'erreur numérique. Dans ce même contexte, **T. Lelong et al.** [LTS13] qui, en utilisant la formulation ( $\emptyset -A$ ), ont proposé un estimateur d'erreur pour évaluer la qualité de la solution dans le cas des courants induits dans le corps humain.

Quant à **R. Scorretti et al.** [SSM12], ils ont présenté deux formulations éléments finis pour calculer les courants induits dans le corps humain par des champs (EBF) ce qui a permis d'estimer l'erreur numérique, qui est rigoureusement liée à la Co-énergie totale. Cette méthode est appliquée au cas classique de l'exposition à un CM homogène et les calculs ont été effectués avec des fantômes numériques ayant des résolutions élevées ce qui est considéré comme une nouveauté dans la simulation des champs électromagnétiques.

Dans le but de voir si les impulsions électromagnétiques (IEM), avec un SAR moyen (du corps entier) de 50 mW / kg à 200 kV / m ou 75 mW / kg à 400 kV / m, provoquent des variations de la pression artérielle chez les rats mâles (Sprague-Dawley) que **L. Bao-Feng et al.** [BGD07] ont réalisé des expériences au laboratoire. Pendant 4 semaines, à l'aide d'un tensiomètre (capteur photoélectrique) non invasif, les fonctions cardio-vasculaires, à savoir, la fréquence cardiaque, la moyenne des tensions artérielles diastolique (PAD) et systolique (PAS) ont été mesurées immédiatement après l'exposition. Les résultats trouvés montrent que des modifications significatives dans la pression artérielle ont été observées chez des rats exposés tandis que les fréquences cardiaques n'ont pas été modifiées,

**Z. Davanipour et E. Sobel** [DAS09] ont présenté une évaluation équitable de l'état actuel des connaissances sur la relation entre l'exposition à long terme aux champs magnétiques et les risques de la maladie d'Alzheimer et le cancer du sein en proposant une riche synthèse bibliographique et ceci pour répondre à la question : si les champs magnétiques (CM) à fréquences extrêmement basses (EBF) et à radiofréquence, qui ont envahis notre environnement, sont associés au risque accru de ces maladies graves. Pour cela, deux hypothèses biologiques sont discutées: la première concerne l'exposition aux (CM, EBF) qui augmente la production du bêta-amyloïde (A $\beta$ ) et le développement ultérieur de la maladie d'Alzheimer. La seconde, concerne l'exposition aux (CM, EBF) qui diminue la production de

mélatonine, cette dernière semble avoir des conséquences nocives liées au développement de la maladie d'Alzheimer et le cancer du sein.

**S.Yalçın et G. Erdem** [YAE12] ont montré, à la suite d'essais expérimentaux, que les CEM provoquent des changements dans les activités biologiques des organismes tels que l'expression des gènes, l'activité enzymatique, du biorythme et des hormones...etc.

**M. Souques et al.** [SML13] a présenté un travail expérimental sur les risques que peuvent avoir les interférences électromagnétiques sur les implants cardiaques tels que les défibrillateurs automatiques implantés (DAI) à travers deux cas d'étude, l'un avec une exposition à un champ magnétique 50 Hz, l'autre avec une exposition à des radiofréquences (RF) émises par les systèmes de communication dans les véhicules des pompiers. Le protocole consistait à évaluer le fonctionnement du DAI sur les différents lieux de travail des personnes implantées, La surveillance télémétrique du DAI a été effectuée en continu, les résultats des évaluations ont montré qu'aucun dysfonctionnement n'a été enregistré malgré que les deux cas d'étude soient en présence presque permanente des champs magnétiques de 50 Hz pour le premier et électromagnétique RF pour le second.

L'influence des CMS sur les facultés vasomotrices périphériques a été réalisée par **S. Xu et al.** [XON13] où ils ont effectué des expériences sur des rats (Wistar, mâles, âgés de 10 semaines et pesant entre 310 à 360 g). Au cours d'une période d'essai de 7 semaines, les mesures ont été effectuées périodiquement pendant la 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> semaine et l'amplitude de la vasomotricité et de la fréquence ont été analysés par transformées de Fourier rapides. Les résultats obtenus indiquent que les CMS (160 mT et 154mT.mm-1) ont un effet régulateur sur la vasomotricité rythmique dans la zone ischémique en augmentant et lissant l'amplitude de la vasomotricité dans le stade précoce du processus de cicatrisation.

Les effets de l'exposition des rats aux CMS ainsi qu'aux CMS associés avec d'autres substances chimiques ou physiques peut-elle être utilisée pour des fins thérapeutiques ; c'est l'objectif de l'étude de **S. Yu et P. Shang** [YUS14]. Les avantages ou les inconvénients de cette thérapie résident dans l'intensité de l'exposition, qui doit être modérée, sa durée d'exposition et du sens de son application, bien que la relation exacte entre eux soit encore vague.

Le nombre des cas de leucémie infantile dans l'Union Européenne (UE) a augmenté ces dernières décennies, **J. Grellier et al.** [GRC14] ont utilisé utilisant une approche de simulation

probabiliste pour prouver si l'exposition aux (CEM, BF) pourrait être la cause. Les résultats obtenus ont montré, que chaque année, entre (50.1 à 61.1) de cas de leucémie infantile pourrait être dû aux expositions courantes aux (CEM, BF). Si l'association présentée, par preuve épidémiologique, est supposée être causale, ceci correspond à un taux de (1,5 à 2,0) % de tous les cas de leucémie infantile en Europe.

La dosimétrie électromagnétique tente d'évaluer les interactions entre les ondes électromagnétiques et les tissus biologiques, qui se traduit par le calcul du taux spécifique d'absorption (SAR) dans le corps humain qui pour l'estimer avec précision, les simulations numériques sont le seul outil. Tenant compte de la complexité du problème (la nature et la morphologie des tissus ainsi que la description de la source, sa position ou sa fréquence), les calculs déterministes ne sont pas adaptés pour le décrire correctement ce qui a mené les gouvernements à imposer des limitations aux champs rayonnés autorisées par les systèmes d'alimentation en utilisant les résultats des études épidémiologiques et par l'application du principe ALARA (As Low As Reasonably Achievable).

**D. Andreuccetti et N. Zoppetti** [ANZ06] ont présenté une étude complète sur la dosimétrie électromagnétique quasi-statique: du principe de base aux exemples d'applications. Ils ont commencé par une étude descriptive des normes et des approches expérimentales et analytiques utilisés puis l'attention s'est concentrée sur la dosimétrie numérique. Une représentation du corps humain au moyen d'un fantôme réaliste a été donnée. Comme exemple d'application, ils ont présenté une coupe médiane de la distribution de densité de courant induit dans une tête humaine, du modèle Brooks, exposée à une densité de flux magnétique uniforme de 1 mT à 100 Hz. Pour résoudre le problème en 3D, la méthode SPFD (scalar potential finite difference) a été utilisée car elle s'est avéré la plus adaptée pour faire face aux problèmes complexes rencontrés.

Pour mieux comprendre les interactions champs- systèmes biologiques, **R. Scorretti et N. Burais** [SCB08] ont montré que la dosimétrie numérique 3D est un outil très utile pour la réglementation nécessaire dans les cas de la proximité de sources de forts champs, et qu'une certaine maturité est atteinte pour la quantification macroscopique des courants induits dans les organes pour tout type de source. Par contre, la dosimétrie aux échelles inférieures (microscopiques), ou dans des conditions réelles d'exposition n'a pas donné les résultats voulus.

**D. Voyer et al.** [VMN08] ont montré la faisabilité des méthodes probabilistes en dosimétrie électromagnétique. Une jambe d'un homme adulte a été modélisée par un cylindre infini avec trois couches représentant les différents tissus biologiques à savoir l'os, les muscles et la graisse ayant différentes épaisseur et caractéristiques électromagnétiques, soumise à une onde plane incidente, donc, le problème électromagnétique est invariant suivant la direction de l'axe du cylindre et une symétrie apparaît. Le problème consistait, alors à évaluer comment ces incertitudes affectaient au maximum le SAR dans la jambe. Les résultats obtenus, après comparaison et en utilisant différentes approches numériques donnent des résultats précis. A la fin, et pour l'obtention des résultats plus proches de la réalité, des difficultés devraient être surmontées concernant non seulement les aspects numériques comme le temps de calcul mais aussi la modélisation de la variabilité dans le corps humain.

Les CEM sont de plus en plus utilisés dans les applications médicales, la modélisation de leur distribution dans le corps humain est nécessaire pour la conception de systèmes optimisés. Les CEM sont considérés comme une arme à double tranchons, car d'un côté, ils peuvent être nocifs pour la santé, et d'un autre côté, ils peuvent être utilisés pour le diagnostic de certains problèmes comme l'imagerie médicale (IRM) et le traitement de certaines tumeurs cancéreuses par la technique d'hyperthermie : c'est l'objectif du travail de **N. Siauve et al.** [SSB07] où la méthode utilisée, pour augmenter la température, est basée sur la technique des micro-ondes, la chaleur obtenue doit être concentrée seulement dans la tumeur cancéreuse tout en gardant saines les cellules voisines.

L'étude de **H.R. Gungor et al.** [GAO15] a été consacrée aux effets de l'exposition chronique, aux CMS, sur la qualité de l'os (niveau de la vitamine D et l'ostéoporose) des rats (Wistar, mâles ( $230 \pm 15$ ) g âges de 20 semaines) en les plaçant à de différentes distances de l'ouverture de l'aimant de 1,5 T de l'appareil de l'IRM. Les résultats obtenus ont indiqué que le niveau moyen de la vitamine D ainsi que l'épaisseur moyenne cortical, l'épaisseur moyenne de paroi tabulaire, et le nombre de travées par 1mm étaient significativement plus faibles chez les rats placés à 50 cm de l'ouverture de l'appareil alors que l'essai Tunel a montré que l'apoptose des ostéocytes (mort programmée des cellules osseuses) est significativement plus grande que chez ceux qui étaient dans la chambre du technicien et ceux de contrôle.

La dynamique des bio-fluides magnétiques est un nouveau domaine de la mécanique des fluides qui traite de la dynamique du sang en présence de champ magnétique et son

importance réside dans le fait qu'elle vise à trouver des solutions, notamment non invasives, à certaines affections au corps humain.

La mauvaise circulation sanguine est un problème de plus en plus commun dans la santé des personnes et est considérée comme la principale cause d'un grand nombre de pathologies telles que les accidents cardiovasculaires. Afin d'améliorer les paramètres de débit sanguin dans les vaisseaux, principalement la viscosité et la vitesse d'écoulement, plusieurs études ont été menées en utilisant l'effet des champs magnétiques pour réduire l'épaississement ou la viscosité du sang, qui pourrait être une alternative aux médicaments **M.S. Alghamdi et al.** [AIG12] et **J. Gmitrov** [GMI14].

En outre, les expériences effectuées par **Haik et al.** [HAP01] ont montré que le flux sanguin diminue de 30% lorsqu'il est soumis à un champ magnétique élevé de 10 T. La diminution du débit est due à une augmentation de la viscosité apparente du sang due au champ magnétique.

**Tzirtzilakis et Loukopoulos** [TZLO05] ont étudié les effets du champ magnétique sur la vitesse, le champ de température, le frottement cutané et le taux de transfert de chaleur d'un fluide biomagnétique dans un canal sous l'influence d'un champ magnétique fort, stable et uniforme. Ils ont démontré que le champ magnétique influe considérablement le champ d'écoulement provoquant la formation de deux vortex au niveau des deux points où l'influence du champ magnétique commence et s'arrête.

**Misra et Shit** [MIS07] ont présenté un modèle numérique de l'effet du champ magnétique sur le flux sanguin à travers différents segments du système circulatoire avec différents diamètres tels que l'aorte, l'artère fémorale, l'artère carotide et l'artère coronaire. Leurs résultats ont montré clairement que le champ magnétique a le potentiel de réduire le flux sanguin à travers les artères, la contrainte de cisaillement et le débit volumétrique et il est également possible de réduire ces niveaux à n'importe quel niveau désiré en augmentant ou diminuant l'intensité du champ magnétique. À cette fin, les auteurs suggèrent d'utiliser des applications de champs magnétiques externes dans le traitement clinique des maladies hémodynamiques, telles que l'hypertension. Dans le même contexte, un modèle mathématique général pour les simulations de flux sanguin sous des champs magnétiques non uniformes forts a été présenté par **Kenjere. S** [KEN08] et validé pour différentes géométries, allant d'un seul cylindre à l'artère coronaire droite chez l'homme. La dépendance temporelle de la

contrainte de cisaillement sur la paroi pour différentes sténoses et les effets de champs magnétiques non uniformes imposés au modèle de flux sanguin sont analysés.

Les résultats obtenus par **R. Tao et K. Huang** [TAH11] démontrent que la viscosité du sang peut être contrôlée et maintenue dans la plage souhaitée au moyen d'impulsions magnétiques d'intensité et de durée appropriées. En effet, leurs expériences ont montré qu'en appliquant un champ magnétique parallèle à la direction du flux sanguin et d'intensité égale à 1,3 T, pendant environ une minute, la viscosité sanguine diminue de 20 à 30%, puis augmente lentement et retrouve sa valeur initiale après deux ou trois heures.

L'effet d'un champ magnétique externe est également utilisé par **L. Parmar et al.** [PAK13] pour contrôler la vitesse du sang et la contrainte de cisaillement sur la paroi de l'artère en présence de sténose imbriquée. Les auteurs ont démontré qu'il est possible de réduire ces paramètres à n'importe quel niveau désiré en augmentant ou en diminuant les intensités du champ, ce qui constituera un nouveau protocole médical dans le traitement des maladies cardiovasculaires telles que l'hypertension et l'athérosclérose. L'athérosclérose est un dépôt par accumulation de différents éléments (graisse, sang, tissu fibreux, ...) sur une partie de la paroi interne d'une artère. Le diamètre de l'artère diminue, ce qui peut obstruer la circulation sanguine. Ses complications sont chroniques et cumulatives, progressent lentement et peuvent provoquer la formation d'un thrombus qui ralentira ou arrêtera le flux sanguin rapidement, entraînant une nécrose du tissu vivant.

L'effet du champ magnétique sur le bio fluide a été présenté par **A. Mohammed** [MOH16] où il a constaté qu'en présence d'un champ magnétique, la viscosité du sang diminue. La conductivité électrique du sang qui dépend de sa vitesse augmente considérablement.

Une approche magnétohydrodynamique a été utilisée par **Shah. N.A et al.** [SHV16] pour étudier le comportement du flux sanguin avec des particules magnétiques réparties uniformément à travers un tube cylindrique circulaire soumis à un champ magnétique appliqué perpendiculairement à sa direction. Les résultats obtenus montrent que la vitesse du sang ainsi que celle des particules magnétiques diminuent en augmentant le champ magnétique. Cette même approche a été utilisée expérimentalement par **S. Sharma et al.** [SHS15] pour mesurer la vitesse du sang artériel avec différentes intensités de champs magnétiques. Les résultats du modèle montrent que la vitesse du sang et des particules magnétiques est sensiblement réduite sous l'influence du champ magnétique.

Quant à **Aggoune.M.S et al.** [AAB17], ils ont développé un modèle mathématique pour prédire la trajectoire des nanoparticules magnétiques dans un vaisseau sanguin sous l'influence d'un aimant permanent positionné à l'extérieur du corps. Les résultats obtenus peuvent être utilisés pour étudier de nouvelles stratégies d'optimisation des CM pour la cancéro-thérapie localisée (ciblage des médicaments).

## Références bibliographiques

- [AAB17] M. S. Aggoune, N. Aggoune, N. Bensedira, A. Bouhantala, et A. Belkbir, "Simulation of a 2D Magnetic Drug Targeting Model", *International Journal of Civil and Structural Engineering* 4, 345-355, 2017.
- [ALG12] M.S.Alghamdi et N. El-Ghazaly, "Effects of Exposure to Electromagnetic Field on Some Hematological Parameters in Mice", *Open Journal of Medicinal Chemistry* 2, 30-42, 2012.
- [ANZ06] D. Andreuccetti, N. Zoppetti, "Quasi-Static Electromagnetic Dosimetry: From Basic Principles to Examples of Applications", *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, Vol. 12, No. 2, 201–215, 2006.
- [BGD07] L. Bao-Feng, G. Guo-Zhen, R. Dong-Qing, L. Jing et Z. Ruo-Bing, "Electromagnetic pulses induce fluctuations in blood pressure in rats", *International Journal of Radiation Biology*, 01-06-2007.
- [BUR02] N. Burais et M. Nadi, "Environnements électromagnétiques et santé", *Journées Electrotechniques du Club EEA*, Cachan, 21-22 mars 2002.
- [BUR04] N. Burais, "Les courants induits par les champs électromagnétiques basses et moyennes fréquences", *Journée SFRP*, « Expositions professionnelles aux champs électromagnétiques 0 – 300 GHz », 15/12/2004.
- [DAS09] Z. Davanipour et E. Sobel, "Long-term exposure to magnetic fields and the risks of Alzheimer's disease and breast cancer: Further biological research", *Pathophysiology*, 16(2-3):149-56, Aug 2009.
- [DMN12] M. A. Drissaoui, F. Musy, L. Nicolas, R. Perrussel, R. Scorretti, et D. Voyer, "Propagation de l'incertitude sur la géométrie en dosimétrie numérique", *NUMELEC*, Marseille : France, 2012.
- [FBB09] M. Frénéa-Robin, N. Burais, F. Buret, N. Haddour et L. Nicolas, "Electromagnetic characterization of biological cells", *EHE'09 : International Conference on Electromagnetic Fields, Health and Environment*, SãoPaulo : Brazil, 2009.
- [GAO15] H.R Gungor, S. Akkaya, N.Ok, A. Yorukoglu, C. Yorukoglu, E. Kiter, E.O. Oguz, N. Keskin et G.A. Mete, "Chronic exposure to static magnetic fields from magnetic resonance imaging devices deserves screening for osteoporosis and vitamin D levels: a rat model", *Int J Environ Res Public Health*; 12 (8): 8919 – 8932, 2015.
- [GMI14] J. Gmitrov, "Static Magnetic Field Effect on Cardiovascular Regulation: A Review", *British Journal of Medicine & Medical Research* 4, 1612-1627, 2014.
- [GRC14] J. Grellier, P. Ravazzani et E. Cardis, "Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe", *Environment International*, 62, 55-63, 2014.
- [GSS12] R. Gaignaire, R. Scorretti, R. Sabariego et C. Geuzaine, "Stochastic uncertainty quantification of the eddy current in human body by using polynomial chaos decomposition", *IEEE Transactions on Magnetics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 48 (2), pp 451 - 454, 2012.
- [HAP01] Y.Haik, V. Pai et C. Chen. "Apparent viscosity of human blood in high static magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*", 225, 180-186, 2001.

- [HGV09] V. Hartwig, G. Giovannetti, N. Vanello, Ma. Lombardi, L. Landini et S. Simi, "Biological effects and safety in magnetic resonance imaging: a review", *International journal of environmental research and public health*, Volume 6, Numéro 6, Pages 1778-1798, 6/10/2009.
- [HSB09] L. H. Hoang, R. Scorretti, N. Burais et D. Voyer, "Numerical Dosimetry of Induced Phenomena in the Human Body by a Three-Phase Power Line", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, N°. 3, March 2009.
- [KEN08] S. Kenjere, "Numerical analysis of blood flow in realistic arteries subjected to strong non-uniform magnetic fields", *International Journal of Heat and Fluid Flow* 29, 752-764, 2008.
- [KUR14] Y.R. Kumar, G.S.N. Raju, "Study of Characteristics for Dielectric Properties of Various Biological Tissues", *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, Vol. 3, Issue 1, January 2014.
- [LHK97] M. S. Linet, E. E. Hatch, R. A. Kleinerman, "Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children", *The new England Journal of Medicine*, Vol 337 : 1 – 8, 3 july 1997.
- [LTS13] T. Lelong, Z. Tang, R. Scorretti, P. Thomas, Y. Le Menach, E. Creusé et F. Piriou "Error estimation in the Computation of Induced Current of Human Body in the Case of Low frequency Magnetic Field Excitation", 2013.
- [MGT99] M. L. McBride, R. P. Gallagher, G Thériault "Power – frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada", *American Journal of Epidemiology*, Vol. 149, 831 – 42. 1 may 1999.
- [MIS07] J.C Misra et G.C. Shit, "Effect of magnetic field on blood flow through an artery: a numerical model", *Computing technologies* 12(4), 3-15, 2007.
- [MOH16] A. Mohammed, "A Study on Influence of Magnetic Field on Blood", *International Archive of Applied Sciences & Technology* 7, 61-65, 2016.
- [PAK13] L. Parmar, S.B. Kulshreshtha et D.P.Singh, "The role of magnetic field intensity in blood flow through overlapping stenosed artery: A Herschel-Bulkley fluid model", *Advances in Applied Science Research* 4(6), 318-328, 2013.
- [PDS08] R. Perrussel, P. Dular et R. Scorretti, "Comparaison de deux méthodes éléments finis pour la prise en compte de détails. Exemple simple sur un problème de conduction", *NUMELEC*, Liège : Belgique, 2008.
- [PTP15] A. Patruno, S. Tabrez, M. Pesce, S. Shakil, M.A. Kamal et M. Reale, "Effects of extremely low frequency electromagnetic field (ELF-EMF) on catalase, cytochrome P450 and nitric oxide synthase in erythro-leukemic cells", *Life Sci. Life Sci*, 15, 121,117-23, Jan 2015.
- [PVN11] R. Perrussel, D. Voyer, L. Nicolas, R. Scorretti et N. Burais, "Domain Decomposition for Computing Extremely Low Frequency Induced Current in the Human Body", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, N°. 5, May 2011.
- [SAL95] Savitz DA, Loomis DP. "Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers". *American Journal of Epidemiology*, Vol 141, Number 2, P 123 – 134, 15 jan 1995.
- [SBF04] R. Scorretti, N. Burais, O. Fabregue, A. Nicolas et L. Nicolas, "Computation of the Induced Current Density Into the Human Body Due to Relative LF Magnetic Field

- Generated by Realistic Devices", IEEE Transactions on magnetics, Vol. 40, N°. 2, March 2004.
- [SBN05] R. Scorretti, N. Burais, L. Nicolas et A. Nicolas, "Modeling of induced current into the human body by low-frequency magnetic field from experimental data", IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 41, N°. 5, May 2005.
- [SCB08] R. Scorretti et N. Burais, "Dosimétrie numérique en champs magnétique et/ou électrique basses fréquences", SFRP, Grenoble, 07/10/08.
- [SHS16] S. Sharma, U. Singh et V.K. Katiyar, "Magnetic field effect on flow parameters of blood along with magnetic particles in a cylindrical tube", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 377, 395-401, 2015.
- [SHV16] N. Ali Shah, D. Vieru et C. Fetecau, "Effects of the fractional order and magnetic field on the blood flow in cylindrical domains", 2016.
- [SML12] M. Souques, I. Magne et J. Lambrozo, "Interférences électromagnétiques et implants cardiaques Electromagnetic interferences and cardiac implants", JS'12, Cnam Paris, 3-4 Avril 2012.
- [SOU13] M. Souques, "Quels sont les travailleurs à risque particulier?", Exposition professionnelle aux champs électromagnétiques 0-300 GHz – La nouvelle directive européenne 2013/35/CE Paris – 3 décembre 2013.
- [SPM10] R. Scorretti, R. Perrussel, L. Morel, N. Burais et L. Nicolas, "Numerical dosimetry of currents induced in the human body by ELF magnetic fields", The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering 29, 1425-1434, 6, 2010.
- [SSB07] N. Siauve, R. Scorretti, N. Burais, L. Nicolas et A. Nicolas, "Electromagnetic Fields and Human Body: a New Challenge for the Electromagnetic Field computation", 18 April 2007.
- [SSM11] R. Scorretti, R. Sabariego, L. Morel, C. Geuzaine, N. Burais et L. Nicolas, "Computation of induced fields into the human body by using dual formulations", Compumag, Sydney : Australia, 2011.
- [SSM12] R. Scorretti, R.V. Sabariego, L. Morel, C. Geuzaine, N. Burais et L. Nicolas, "Computation of induced fields into the human body by dual Finite Element formulations", IEEE Transaction on magnetics 48, 783-786, 2, 2012.
- [TAH11] R. Tao et K. Huang "Reducing blood viscosity with magnetic fields", Physical Review 84, 001900, 2011.
- [TGM94] Theriault G, Goldberg M, Miller AB, "Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in ontario and Quebec", Canada, and France: 1970-1989. American Journal of Epidemiology, Vol 139, No 6, P 550 – 572, 15 mar 1994.
- [TZLO05] E. Tzirtzilakis et V. Loukopoulos, "Biofluid flow in a channel under the action of a uniform localized magnetic field", Computational Mechanics 36, 360-374, 2005.
- [VMN08] D. Voyer, F. Musy, L. Nicolas et R. Perrussel, "Probabilistic methods applied to 2D electromagnetic numerical dosimetry", The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 27 (3), pp.651-667, 2008.

- [VNP09] D. Voyer, L. Nicolas et R. Perrussel, "Comparison of methods for modeling uncertainties in a 2d hyperthermia problem", Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 11, 189–204, 2009.
- [WEL79] N. Wertheimer et E. Leeper, "Electrical wiring configurations and childhood cancer", American Journal of Epidemiology 109, 273 – 284, 1979.
- [XON13] S. Xu, H. Okano, M. Nakajima, N. Hatano, N. Tomita et Y. Ikada, "Static Magnetic Field Effects on Impaired Peripheral Vasomotion in Conscious Rats", Hindawi Publishing Corporation, Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, Article ID 746968, 6 pages, Volume 2013.
- [YAE12] S. Yalçın et G. Erdem, "Biological effects of electromagnetic fields", African Journal of Biotechnology, Vol. 11(17), pp. 3933-3941, 28 February, 2012.
- [YUS14] S. Yu, P. Shang, "A review of bio-effects of static magnetic field on rodent models", Prog. Biophys. Mol. Biol, 114, 14–24, 2014.
- [ICNIRP] the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection:  
<http://www.icnirp.org/>.
- [ICRP] International Commission on Radiological Protection: <http://www.icrp.org/>.
- [OMS] Organisation Mondiale de la Santé:  
<http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/fr/index1.html>

## **Chapitre II**

# **Modélisation mathématique de l'écoulement sanguin**

II.1 introduction

II.2 Notions de mécanique des fluides

II.3 Définition de la rhéologie

II.4 Rhéologie du sang

II.5 Composition du sang

I.6 Sang et écoulement

II.7 Modélisation magnétostatique

II.8 Modélisation de la dynamique des fluides

II.9 Conclusion

II.10 Références bibliographiques

---

## II.1 Introduction

Le sang est un fluide biologique vital qui circule continuellement dans les vaisseaux sanguins, notamment grâce à une pompe cardiaque. Ce liquide transporte le dioxygène ( $O_2$ ) et les éléments nutritifs nécessaires aux processus principaux de tous les tissus du corps, ainsi que les déchets, tels que le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) ou les déchets azotés, vers les sites d'évacuation (reins, poumons, foie, intestins). Il permet également d'acheminer les cellules et les molécules du système immunitaire vers les tissus, et de diffuser les hormones dans tout l'organisme. Chez l'adulte, c'est la moelle osseuse qui produit les cellules sanguines au cours d'un processus appelé l'hématopoïèse [MOU10].

Or, le travail du cœur est directement relié à la résistance de l'écoulement qui dépend non seulement des caractéristiques géométriques ou mécaniques des vaisseaux comme l'élasticité des parois, mais aussi des propriétés hémodynamiques du fluide sanguin [CHA13].

L'analyse et la compréhension de l'écoulement sanguin à travers l'ensemble des vaisseaux, qui se rétrécissent au fur et à mesure qu'on s'approche des capillaires, doivent prendre en compte tous les éléments précédemment cités ce qui constitue une tâche très complexe.

## II.2 Notions Fondamentales de la mécanique des fluides, [CCM10], [LOU12] et [MES13].

### 2.1 Viscosité d'un fluide

La viscosité d'un fluide peut être définie comme étant le frottement interne entre les couches durant l'écoulement, ce qui permet son adhérence à la surface du solide en contact avec lui. Aussi, à cause de cette propriété visqueuse des fluides, il existe des contraintes de cisaillement exprimées par unité de surface notée ( $\tau$ ) :

$$\tau = dF / dS \tag{II.1}$$

Où :

$dF$  est la force en N ;

$dS$  est la surface en  $m^2$ .

## 2.2 Viscosité dynamique et cinématique

Pour un même fluide et à même température, la viscosité cinématique ( $\nu$ ) reste constante et se mesure en Pa·s ou N·s/m<sup>2</sup> ou Kg/m·s ou encore Poiseuille (Pl).

Elle est reliée à la Viscosité dynamique, notée ( $\mu$ ) et se mesure en m<sup>2</sup>/s, par :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{II.2})$$

Où,  $\rho$  est la masse volumique en kg/m<sup>3</sup>.

## 2.3 Fluide newtonien

On appelle fluide newtonien (en hommage à Isaac Newton) un fluide dont la variation de la contrainte en fonction de la vitesse de déformation est linéaire et où la constante de proportionnalité est la viscosité dynamique  $\mu$ .

Le rhéogramme  $\tau = f(\dot{\epsilon})$  d'un tel fluide est donc une droite de pente  $\mu$  passant par l'origine.

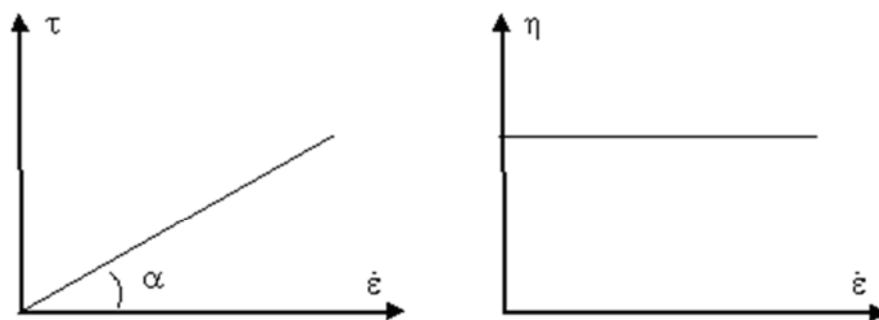


Figure II.2.1 Rhéogramme d'un fluide newtonien, [BER09] et [WIK].

En termes usuels, cela signifie que le fluide continue de s'écouler indépendamment des forces extérieures qui agissent sur lui. Par exemple, l'eau est un fluide newtonien parce qu'elle continue d'exhiber les propriétés d'un fluide quelle que soit la vitesse à laquelle elle est agitée. Les solutions aqueuses et les huiles de faibles viscosités, la plupart des solvants, l'air, de nombreux gaz et le sang sont des exemples de fluides newtoniens [ZIT96].

## 2.4 Fluide non-newtonien

Dans ce cas, la viscosité n'est pas constante, ie, qu'à chaque valeur du couple vitesse de cisaillement, contrainte de cisaillement correspond une valeur de la viscosité. Dès lors, on

parle de viscosité apparente. Les exemples de fluides non newtonien tels que le blanc d'œuf, le fromage fondu et les chocolats fondus abondent dans la nature et l'industrie.

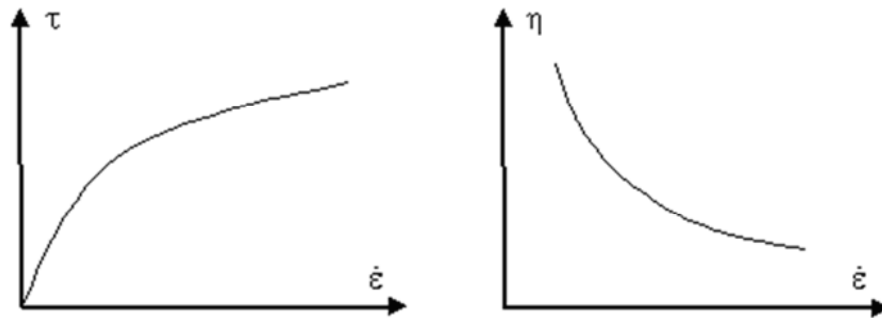


Figure II.2.2 Rhéogramme d'un fluide non newtonien [BER09] et [WIK].

On distingue plusieurs types de comportement non-newtonien :

#### 4.1 Fluides rhéofluidifiants

Quand on les agite ou qu'on les presse, ils deviennent plus fluides, donc moins visqueux, ils s'écoulent plus facilement.

#### 4.2 Fluides de Bingham

C'est un cas particulier où la fluidité survient uniquement après qu'un certain seuil de contrainte soit dépassé, par exemple, la pâte de dentifrice ne coule pas hors du tube sous son propre poids quand l'ouverture du tube est vers le bas : il faut presser, donc, appliquer une contrainte) pour qu'elle sorte du tube.

#### 4.3 Fluides rhéépaississants

Au contraire, quand on les agite, ils deviennent plus visqueux, plus difficiles à mélanger, ils se figent parfois. C'est le cas d'une solution d'alcool polyvinylique dans l'eau : au-delà d'une certaine concentration, quand on agite fortement la solution liquide, celle-ci devient plus visqueuse et peut même se gélifier.

#### 4.4 Fluides thixotropes

Proche des fluides rhéofluidifiants, mais à ne pas confondre, car là il s'agit d'un passage de l'état solide, gélifié ou liquide très visqueux à un état liquide moins visqueux, lorsqu'une

contrainte est appliquée pendant un certain temps. Il s'agit donc d'une variation de viscosité dans laquelle le temps de la contrainte intervient : une contrainte appliquée ne peut provoquer le passage à l'état liquide qu'après un certain temps. Exemples : les sables mouvants, ou certaines argiles, peuvent devenir liquides si on les soumet à des vibrations ou mouvements.

#### 4.5 Fluides antithixotropes ou rhéopexes

Au contraire, il s'agit du passage de l'état liquide à un état liquide plus visqueux, gélifié ou solide, lorsqu'une contrainte est appliquée pendant un certain temps.

#### 2.5 Ecoulement laminaire

Quand le débit est faible, toutes les particules ont une vitesse parallèle au sens général de l'écoulement. Les lames liquides glissent les unes sur les autres : le régime est laminaire, (Figure II.2.3) [ANC].

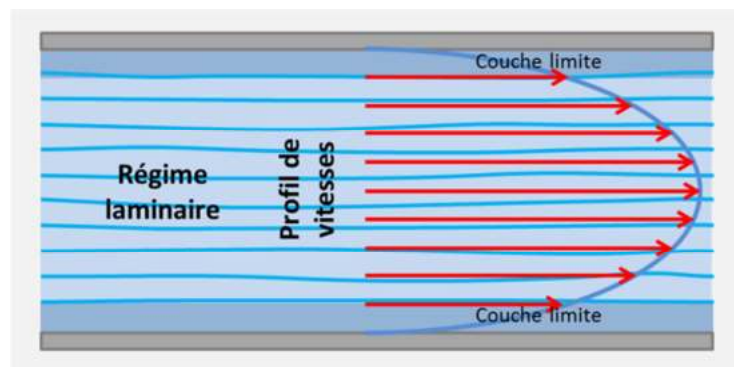


Figure II.2.3 Profil des vitesses en régime laminaire [BER09] et [WIK].

#### 2.6 Ecoulement turbulent

S'oppose à l'écoulement laminaire comme l'ordre au désordre, absence de parallélisme des vitesses de chaque lame. Effet du frottement plus important, perte d'énergie plus importante, le profil des vitesses n'est plus parabolique, (Figure II.2.4) [ANC] et [CAU].

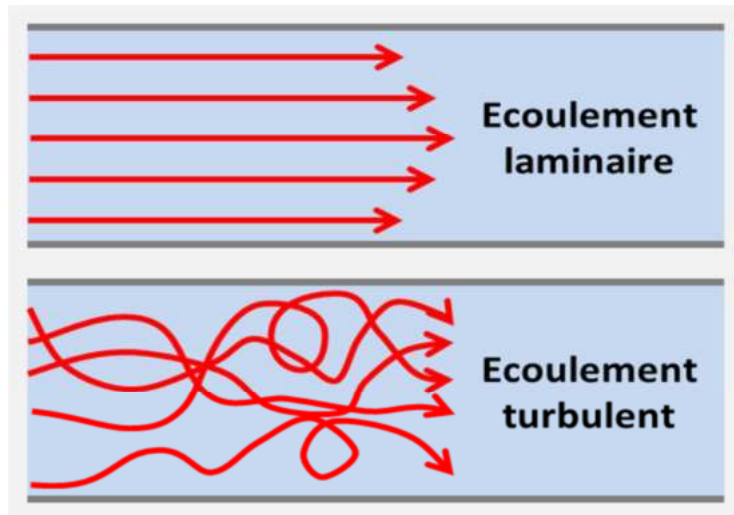


Figure II.2.4 Ecoulements turbulent et laminaire [ANC].

### 2.7 Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds ( $Re$ ) a été mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds. C'est un nombre sans dimension liant la viscosité, la masse volumique, et une longueur de référence (Le diamètre intérieur de la conduite (pour les écoulements en conduites)) et il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime (laminaire, transitoire, turbulent) [ANC].

$$R_e = v \cdot \frac{L}{\nu} \quad (\text{II.3})$$

Où,

$v$  : vitesse caractéristique du fluide en m/s;

$L$  : dimension caractéristique en m;

$\nu$  : viscosité dynamique du fluide en  $\text{m}^2/\text{s}$ .

Or, sachant que  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  ;

Alors,

$$R_e = \rho \frac{v \cdot L}{\mu} \quad (\text{II.4})$$

-  $R_e < 2300$  : Le régime est toujours laminaire;

-  $R_e > 3000$  : Le régime est toujours turbulent;

-  $2000 < R_e < 3000$  : Le régime est intermédiaire.

### 2.8 Fluide compressible

Un fluide compressible est un fluide dont on peut changer le volume, c'est-à-dire qu'on peut le comprimer dans un espace plus restreint. La totalité des gaz sont compressibles (air, oxygène, hydrogène, azote, ...). Dans un fluide compressible, la pression est inversement proportionnelle au volume [MES13], [DEP01] et [LQP10].

### 2.9 Fluide incompressible

Un fluide incompressible est un fluide dont on ne peut changer le volume, c'est-à-dire qu'on ne peut pas le comprimer dans un espace plus restreint. La totalité des liquides sont incompressibles (eau, **sang**, huile, mercure, ...), autrement dit, un fluide est dit incompressible si sa masse volumique ( $\rho$ ) est constante indépendamment des conditions qui lui sont imposées [MES13], [DEP01] et [LQP10].

## II.3 Définition de la rhéologie

La rhéologie, créée aux États Unis en 1929 par Eugène Cook Bingham (1878-1945), est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps [PON13]. La rhéologie est composée de plusieurs sortes d'études:

### 3.1 Rhéologie expérimentale

C'est la détermination expérimentale des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation).

### 3.2 Rhéologie structurale

C'est l'explication des comportements à partir de la structure du matériau.

### 3.3 Rhéologie théorique

C'est fournir des modèles mathématiques, en nombre limité, des comportements indépendamment de la structure microscopique.

## II.4 Rhéologie du sang

La circulation du sang dans l'organisme dépend de nombreux facteurs, à la fois biochimiques et mécaniques : onde de pression et de vitesse en sortie du cœur, viscoélasticité des parois vasculaires, ramifications successives des vaisseaux, nature du fluide en lui-même, propriétés mécaniques des cellules circulantes, interactions de ces cellules entre elles ou avec les cellules endothéliales qui tapissent la paroi interne des vaisseaux.

Pour des faibles taux de cisaillement, les cellules sanguines sont orientées au hasard alors que, quand la vitesse de l'écoulement augmente, donc le taux de cisaillement aussi, les hématies s'orientent dans le sens de l'écoulement, parallèlement les unes par rapport aux autres, l'écoulement est alors facilité et la viscosité du sang diminue [BIO13] et [CIR].

La compréhension de ces différentes interactions (fluide/vaisseaux, fluide/cellules, cellules/cellules) est un enjeu important dans des contextes cliniques aussi variés que les maladies cardiovasculaires (hypertension, athérosclérose etc.) ou la lutte contre le cancer.

## II.5 Composition du sang

Le sang est une suspension concentrée de plusieurs espèces de particules (globules rouges, globules blancs, plaquettes) dans du plasma (solution saline de différentes protéines), [ENC] et [DICV].

### 5.1 Les globules rouges

Les globules rouges sont colorés en rouge par l'hémoglobine qu'ils transportent. Ils assurent le transport de l'oxygène, carburant de l'organisme, depuis les poumons où il pénètre à chaque inspiration, jusqu'aux organes. Ils jouent également un rôle d'éboueur en transportant le gaz carbonique, déchet de l'organisme, dans le sens inverse : des organes jusqu'aux poumons, où il est évacué lors de l'expiration. Nous possédons 4 à 5 millions de globules rouges par  $\text{mm}^3$  de sang, ce qui correspond de 2 à 3 litres.

## 5.2 Les globules blancs

Les globules blancs prennent leur couleur lorsqu'on les sépare des autres cellules du sang. Ils interviennent dans la défense immunitaire en participant, entre autres, à l'élimination des bactéries, des virus et des parasites. Nous possédons 4 à 8 000 globules blancs par  $\text{mm}^3$  de sang.

## 5.3 Les plaquettes

Les plaquettes sont des cellules du sang, formées dans la moelle osseuse mais qui se fragmente immédiatement en petits éléments. Les plaquettes ne sont donc en fait pas des cellules complètes mais uniquement de petits fragments. Les plaquettes permettent la formation d'une croûte rouge sombre, qui bouche la plaie, et qui finira par se décrocher à la fin de la cicatrisation. Les plaquettes sont donc importantes pour la coagulation sanguine. Nous possédons 150 à 400 000 plaquettes par  $\text{mm}^3$  de sang.

## 5.4 Le plasma

Le plasma est la partie liquide du sang. Il permet aux cellules du sang de circuler dans le système vasculaire. Il transporte l'urée, le sucre, le cholestérol et permet aux déchets de l'organisme d'être véhiculés jusqu'au foie et aux reins, où ils sont évacués sous forme de bile ou d'urine. Il est composé de 90 % d'eau et de 10 % de protéines, de sels minéraux, de vitamines, d'hormones et de diverses substances. Quand il est séparé des cellules, sa teinte est jaune.

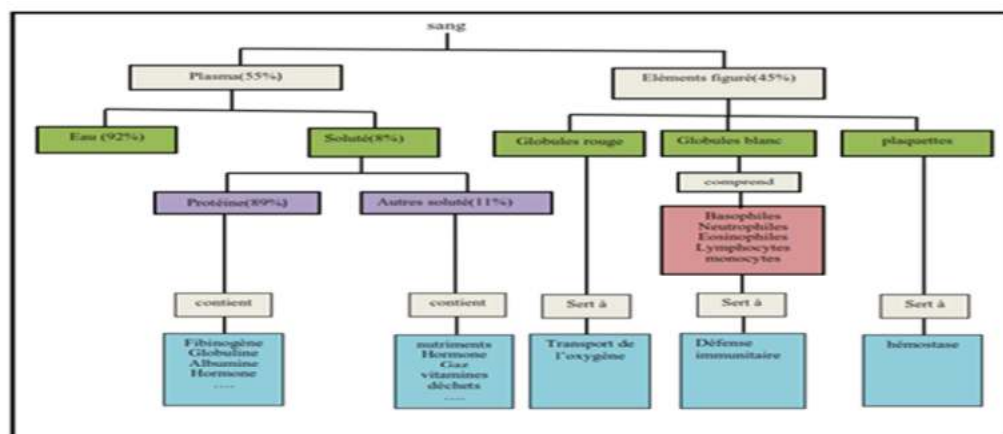


Figure II.2.5 Composition du tissu sanguin [OUM].

## II.6 Sang et écoulement

Vu que les caractéristiques physiques des biomatériaux sont différentes de celles des matériaux usuellement utilisés, ceci a pour effet, la précaution lors de l'application des règles de la mécanique des fluides classique à l'hémodynamique, mais, en dehors des caractéristiques du fluide, des parois et de la nature des écoulements, il faut prendre en compte aussi les facteurs physico-chimiques : phénomènes d'échanges, tant au sein du fluide qu'au niveau des parois vasculaires. Tout cela peut conduire à des écoulements complexes dont la structure est essentiellement différente de celle des fluides classiques.

## II.7 Modélisation magnétostatique

Le sang présente des propriétés magnétohydrodynamiques (MHD) car il s'agit d'un fluide électriquement conducteur. Pour étudier l'effet du champ magnétique appliqué sur le comportement sanguin, une simulation est réalisée pour résoudre les équations couplées de Maxwell et Navier-Stokes.

Partons des quatre équations de Maxwell:

$$\text{Loi de conservation du flux magnétique : } \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Loi d'Ampère : } \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.6})$$

$$\text{Loi de Lenz : } \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.7})$$

$$\text{Loi de Gauss : } \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II.8})$$

et des relations constitutives des matériaux :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.9})$$

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{II.10})$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{II.11})$$

Les équations différentielles partielles obtenues en utilisant les équations de Maxwell en termes de potentiel de vecteur magnétique ( $A$ ) sont adoptées dans le présent travail. Alors,

$$\vec{B} = \overrightarrow{Rot} \vec{A} \quad (\text{II.12})$$

L'équation (II.6) sera réécrite comme suit:

$$\overrightarrow{Rot} \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu \sigma \vec{E} + \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{II.13})$$

Avec  $\omega$  est la vitesse angulaire du signal appliqué.

Si l'opérateur  $\overrightarrow{Rot}$  est introduit des deux côtés de l'équation (II.13), le résultat serait:

$$\overrightarrow{Rot}(\overrightarrow{Rot} \vec{B}) = \mu(\sigma + j\varepsilon\omega) \overrightarrow{Rot} \vec{E} = \mu(\sigma + j\varepsilon\omega)(-j\omega \vec{B}) = -\mu(j\omega\sigma - \varepsilon\omega^2) \vec{B} \quad (\text{II.14})$$

$$\overrightarrow{Rot}(\overrightarrow{Rot} \vec{B}) = -\mu(j\omega\sigma - \varepsilon\omega^2) \overrightarrow{Rot} \vec{A} \quad (\text{II.15})$$

$$\overrightarrow{Rot} \vec{B} = -\mu(j\omega\sigma - \varepsilon\omega^2) \vec{A} \quad (\text{II.16})$$

Enfin, l'équation du modèle magnéto statique peut être réduite à:

$$(j\omega\sigma - \varepsilon\omega^2) \vec{A} + \vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) = 0 \quad (\text{II.17})$$

## II.8 Modélisation de la dynamique des fluides

Les équations de l'analyse de la dynamique des fluides par ordinateur impliquent des équations de conservation de masse et de quantité de mouvement. Pour un écoulement fluide bidimensionnel, laminaire et incompressible, ces équations sont données par:

### 8.1 Équation de continuité

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{II.18})$$

### 8.2 Équation de la quantité de mouvement

$$(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \nabla^2 \vec{v} + \vec{g} + \vec{f} \quad (\text{II.19})$$

Où  $\rho$  est la densité du sang,  $\nu$  est la viscosité cinématique du sang et  $\vec{v}$  est le vecteur de la vitesse du sang,  $\vec{f}$  est le vecteur de la force de Lorentz, exprimé par:

$$\vec{f} = \vec{J} \wedge \vec{B} \quad (\text{II.20})$$

Avec,

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.21})$$

Alors,

$$\vec{f} = \sigma \vec{E} \wedge \vec{B} + \sigma(\vec{v} \wedge \vec{B}) \wedge \vec{B} \quad (\text{II.22})$$

## II.9 Conclusion

Le sang est un fluide biologique complexe qui circule dans des vaisseaux possédant des propriétés mécaniques et rhéologiques assez particulières pour accomplir la mission qui leur est destinée. Dans le chapitre précédent, nous avons essayé d'appliquer les lois de la mécanique des fluides, pour pouvoir formuler l'équation du modèle mathématique à l'écoulement sanguin.

---

## II.10 Références bibliographiques

- [ANC] C. Ancey, "Chapitre 6 : Ecoulements laminaires et turbulents", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [BER09] M. Bertin, "Mécanique des fluides", Cachan, 8 Juin, 2009.
- [BIO13] Cours de Biophysique, "Viscosité des liquides et des solutions- Hémorhéologie", Département de Pharmacie, Faculté de Médecine, Université de Batna, 2012/2013.
- [BRU08] J.M. Brun, "Mécanique des fluides", August 8, 2008.
- [CAU] O. Caudrelier, "Mécanique des fluides : Partie I", POLY-PREPAS, Centre de Préparation aux Concours Paramédicaux.
- [CCM10] A.Y. Cengel, J.M. Cimbala et McGraw-Hill, " Chapter 1 : Introduction and basic concepts", Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, 2nd Edition, 2010.
- [CHA13] R. Chatelin, "Méthodes numériques pour l'écoulement de Stokes 3D : fluides à viscosité variable en géométrie complexe mobile ; application aux fluides biologiques", Thèse de Doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier, 2013.
- [CIR] Cours, "Quelques aspects de la circulation sanguine", Éditions H&K, Publié dans les Annales des Concours, Téléchargé gratuitement sur [www.Doc-Solus.fr](http://www.Doc-Solus.fr)
- [DEP01] N. Depauw, "Solutions des équations de Navier Stokes incompressibles dans un domaine extérieur", Rev Mat Iberoam 17, 21-68, 2001.
- [ENC] A. Cosson et J. Rouffy, "SANG - Composition et propriétés", Encyclopædia Universalis [en ligne], <http://www.universalis.fr/encyclopedie/sang-composition-et-proprietes/>.
- [LOU12] O. Louisnard, "Cours de mécanique des fluides", 25 septembre, 2012.
- [LQP10] P. Le Quéré et B. Podvin, "Méthodes numériques pour les écoulements incompressibles", Cours, Année 2010.
- [MES13] L. Messaoudi, "Dynamique des fluides incompressibles", Cours pour Masters, Université de Batna, 2013.
- [MOU10] F. Moumen, "Etude des effets turbulents de l'écoulement sanguin dans la crosse aortique. Théorie et simulation", Thèse de Magistère, Université d'Oran Es-senia, 2010.
- [OUM] M.Ouarghi, "Caractérisation électrique du sang humain", Mémoire de Magister, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département d'Electronique, Université de Batna.
- [PON13] S. Poncet, "Initiation à la rhéologie", IUT Génie Thermique et Energie – Marseille, Année 2012-2013.

- 
- [VIG13] M.H. Vignal, "Modélisation, équations aux dérivées partielles", Ingénierie Mathématique à Toulouse, février 2013.
- [ZIT96] B. Zitouni, "Etude de l'écoulement sanguin à travers les bifurcations artérielles humaines", Thèse de Magistère, Université de Batna, 1996.
- [DICV] "Dictionnaire Visuel : la référence visuelle",  
<http://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/etre-humain/anatomie/circulation-sanguine/composition-du-sang.php>
- [LYO] <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/comment-coulent-les-fluides.xml>
- [MIC] <http://www.lesia.obspm.fr/perso/michel-moncuquet/DESS/node4.html>
- [NLP] [http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP\\_C\\_M02\\_G02/co/Module\\_NLP\\_C\\_M02\\_C02\\_5.html](http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M02_G02/co/Module_NLP_C_M02_C02_5.html)
- [NST] <https://scienctonnante.wordpress.com/2014/03/03/la-mysterieuse-equation-de-navier-stokes/>
- [WIK] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quations\\_de\\_Navier-Stokes#Quelques\\_solutions\\_exactes\\_des\\_%C3%A9quations\\_de\\_Navier-Stokes\\_incompressibles](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quations_de_Navier-Stokes#Quelques_solutions_exactes_des_%C3%A9quations_de_Navier-Stokes_incompressibles)

## **Première Application**

# **Etude numérique de l'effet d'une ligne HT 440 KV sur la vitesse d'écoulement dans les capillaires d'un tissu musculaire humain.**

III.1.1 Introduction

III.1.2 Problématique

III.1.3 Importance des capillaires dans la circulation sanguine

III.1.4 Vitesse d'écoulement du sang dans les vaisseaux

III.1.5 Procédure de la simulation numérique

III.1.6 Simulation et résultats

III.1.7 Conclusion

III.1.8 Références bibliographiques

### III.1.1 Introduction

Durant ces dernières années, en raison de l'apparition de nouvelles technologies, les sources électromagnétiques se sont multipliées et l'environnement est devenu un simple générateur de champs magnétiques (Tableaux III.1.1 et 2) [INRS]. Ainsi, l'homme est exposé à une pollution électromagnétique qui résulte de l'utilisation croissante de l'énergie électrique dans une large gamme de fréquences. En Basses Fréquences, des micro-courants sont généralement induits, par des champs électromagnétiques (champ électrique  $\vec{E}$  et/ou magnétique  $\vec{H}$ ), dans le corps humain, et selon l'OMS "*dans l'environnement habituel, l'intensité des courants induits dans l'organisme est pratiquement toujours trop faible pour avoir des effets marqués*" [OMS].

Appareil	À 3 cm ( $\mu\text{T}$ )	À 30 cm ( $\mu\text{T}$ )	À 1 m ( $\mu\text{T}$ )
Sèche-cheveux	6-2000	0,01-7	0,01-0,03
Rasoir électrique	15-1500	0,08-9	0,01-0,03
Aspirateur	200-800	2-20	0,13-2
Tube fluorescent	40-400	0,5-2	0,02-0,25
Four microondes	73-23	4-8	0,25-0,6
Radio portable	16-56	1	< 0,01
Four électrique	1-50	0,15-0,5	0,01-0,04
Lave-linge	0,8-0,50	0,15-3	0,01-0,15
Fer à repasser	8-30	0,12-0,3	0,01-0,03
Lave-vaisselle	3,5-20	0,6-3	0,07-0,03
Ordinateur	0,5-30	< 0,01	
Réfrigérateur	0,5-17	0,01-0,25	< 0,01
Téléviseur	2,5-50	0,04-2	0,01-0,15

Tab III.1.1 Intensités du champ magnétique à diverses distances des appareils électriques domestiques.

Ligne	Valeur maximale	Valeur moyenne
Ligne 400 000 volts	30 $\mu$ T sous la ligne 12 $\mu$ T à 30 m 1,2 $\mu$ T à 100 m	6 $\mu$ T sous la ligne 1,6 $\mu$ T à 30 m 0,16 $\mu$ T à 100 m
Ligne 225 000 volts	20 $\mu$ T sous la ligne 3 $\mu$ T à 30 m 0,3 $\mu$ T à 100 m	4,3 $\mu$ T sous la ligne 0,6 $\mu$ T à 30 m 0,06 $\mu$ T à 100 m
Ligne 63/90 000 volts	10 $\mu$ T sous la ligne 1 $\mu$ T à 30 m 0,1 $\mu$ T à 100 m	2,1 $\mu$ T sous la ligne 0,1 $\mu$ T à 30 m 0,01 $\mu$ T à 100 m
Ligne 230 volts (BT)	0,4 $\mu$ T sous la ligne	

Tab III.1.2 Intensités du champ magnétique à diverses distances des lignes électriques.

Malgré que les conséquences sur la santé ne soient pas clairement établies, des normes européennes définissant les valeurs de références maximales pour le champ électrique ( $\vec{E}$ ) et le champ magnétique ( $\vec{B}$ ) et des restrictions de base sur l'intensité de courant induit (J) dans l'environnement professionnel ont été élaborées, (Figure III.1.1 et 2). Or, le non-dépassement des valeurs de référence des champs électrique et magnétique est une condition conservative, mais, suffit pour garantir la conformité aux normes. Cependant, le dépassement de ces valeurs de référence est admis, à condition de prouver que les restrictions de base sont respectées.

Depuis le 3 août 2016, les dispositions des décrets n° 2016-1065 et n° 2016-1074 relatifs à la protection des travailleurs contre les risques dus respectivement au CEM et aux champs électriques sont applicables. Ils fixent les valeurs limites d'exposition (VLE) ou les valeurs déclenchant l'action (VA) qui protègent les travailleurs des effets des CEM court terme. Ces (VLE) et (VA) sont fondées sur les recommandations de la Commission Internationale de Protection Contre les Rayonnements Non Ionisants (ICNIRP) reconnue par l'OMS et l'Organisation Internationale du Travail (OIT), (Figures III.1.1 et 2).

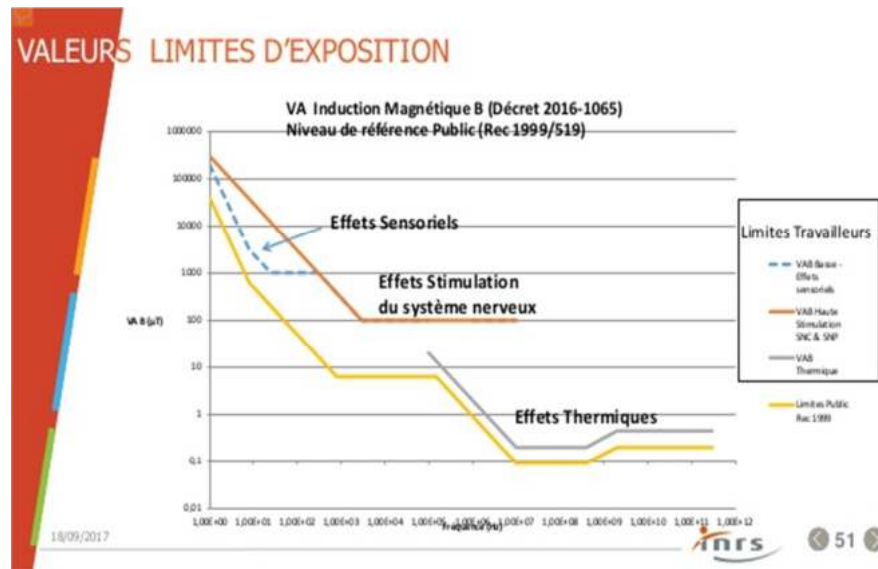


Figure III.1.1 Valeurs limites d'exposition à des champs magnétiques (décret n° 2016-1065).

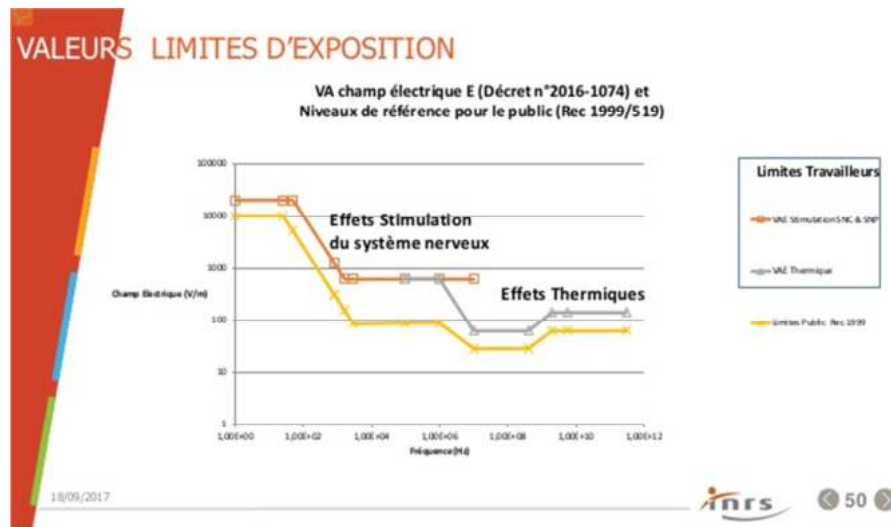


Figure III.1.2 Valeurs limites d'exposition à des champs électriques (décret n° 2016-1074).

A l'heure actuelle, la simulation numérique est le seul moyen pour quantifier les micro-courants induits par des champs électromagnétiques à l'intérieur du corps humain car la technologie ne permet pas encore de les mesurer directement. C'est pourquoi de nombreuses études se sont orientées vers les interactions entre les champs électromagnétiques et les tissus biologiques.

Bien que les premières études aient commencé depuis quelques décennies, les résultats obtenus restent incertains compte tenu de ce qui suit :

✓ le matériau : ce sont des tissus biologiques possédant des propriétés thermo-physiques très inhabituelles (perméabilité magnétique, permittivité électrique, conductivité électrique, viscosité Dynamique, Chaleur spécifique etc.) et ne sont pas bien connus et dépendent de plusieurs paramètres;

✓ le couplage de phénomènes: l'effet thermique est l'une des principales séquelles et est affecté par la circulation sanguine ;

✓ la géométrie: très complexe et il faut tenir compte de l'environnement ;

✓ Le manque de résultats expérimentaux pour valider les calculs et les limites des méthodes utilisées.

Les problèmes auxquels nous devons faire face sont:

- L'identification des caractéristiques de la "matière" ;
- La solution du problème couplé ;
- La représentation du phénomène simulé.

### III.1.2 Problématique

Pour appréhender la nuisance des champs sur la santé, si elle existe, le présent travail est destiné à mettre en évidence certains de ces effets à travers une étude de simulation d'un tissu biologique (échantillon de muscle humain) soumis au champ électromagnétique créé par une ligne triphasée de HT de 440 KV, avec un courant  $I = 24 \text{ KA}$  dans les conducteurs (le courant de transit par phase de la ligne 440 kV). Le corps humain est placé juste à côté de la ligne comme dans la Figure III.1.3, Les courants induits dans ce tissu et de leurs effets sur la circulation sanguine, dans les capillaires qui l'alimente, seront soulignés. Afin de calculer le champ magnétique rayonné, nous avons supposé la longueur des lignes infinie.



Figure III.1.3 Ouvrier travaillant sous tension.

### III.1.3 Importance des capillaires dans la circulation sanguine

Comme nous l'avons cité précédemment, l'appareil circulatoire est vital, car chacune des cellules du corps doit pouvoir bénéficier d'un apport continu de nutriments et d'oxygène, en plus, le dioxyde de carbone et les autres déchets du métabolisme produits par les cellules doivent être collectés et éliminés. Il est composé de trois types de vaisseaux sanguins: les artères, les veines et les capillaires.

Les artères sont des vaisseaux sanguins larges qui transportent le sang oxygéné du cœur vers les tissus et les cellules de l'organisme. Les veines sont des vaisseaux chargés de transporter le sang pauvre en oxygène et les déchets du métabolisme vers le cœur (Figure III.1.4)

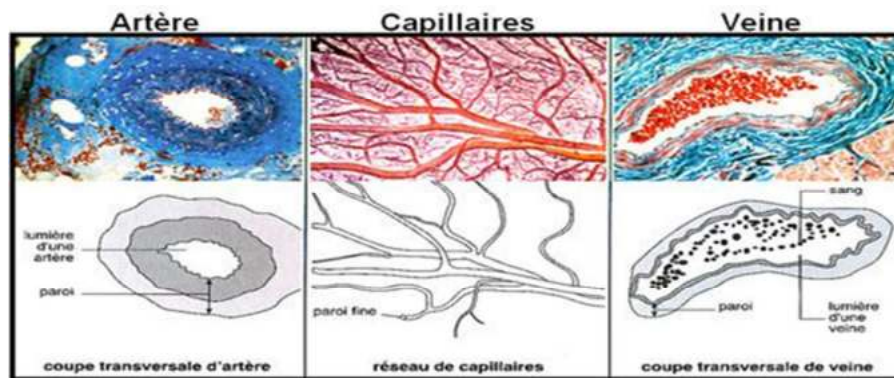


Figure III.1.4 Les trois types de vaisseaux sanguins [RIB12] et [DOL].

Tandis que les capillaires sont microscopiques et relient les artères et les veines aux tissus de l'organisme et sont le siège de l'échange entre l'oxygène et le dioxyde de carbone (Figure III.1.5).

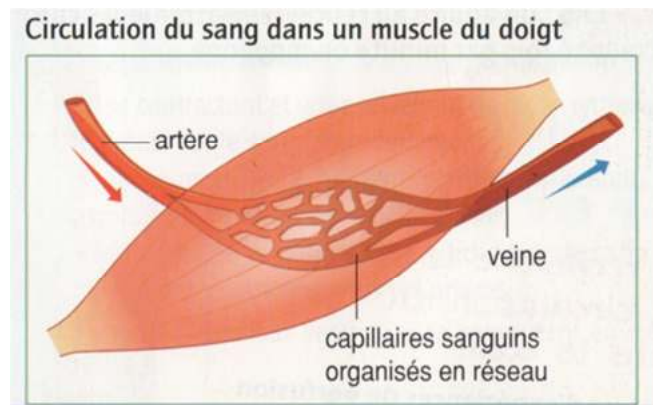


Figure III.1.5 Processus d'alimentation d'un tissu musculaire [RIB12] et [DOL].

Leur importance réside dans ce qui suit :

1. Malgré que leur diamètre soit de (8 à 10)  $\mu\text{m}$  bien plus fin que celui d'un cheveu (40 à 100)  $\mu\text{m}$ , leur paroi est si fine que les molécules d'oxygène, d'eau et même certains lipides peuvent la traverser par diffusion entre les tissus et contrairement aux autres vaisseaux qui n'assurent que le transport rapide du sang, eux sont le siège d'échanges importants au niveau de divers organes (poumons, intestins, muscles, etc.) qu'ils irriguent en  $\text{O}_2$  ;

2. Ils sont composés d'une monocouche de cellules entourée d'une simple et fine membrane basale qui jouent un rôle de barrière, mais un traumatisme peut provoquer des ecchymoses et leur rupture. Les cellules de la paroi de la plupart des capillaires sont jointives, mais équipées d'un dispositif de communication permettant à l'information de passer d'une cellule à l'autre ;

3. En dehors des échanges nutritifs qu'ils assurent, ils sont aussi le siège d'importants mouvements d'eau. Les perturbations de ces mouvements d'eau entraînent l'apparition d'œdèmes.

4. Les tissus les plus richement vascularisés par des capillaires sont ceux des muscles, du foie, des reins, des poumons et du système nerveux. Au contraire, ceux qui sont les moins vascularisés sont les tendons, les ligaments, les os et les cartilages. Les capillaires sont absents de certains tissus (épiderme, cornée de l'œil), (Figure III.1.6).

5. La circulation capillaire est absolument uniforme; le sang s'écoule des artères vers les veines à vitesse constante.

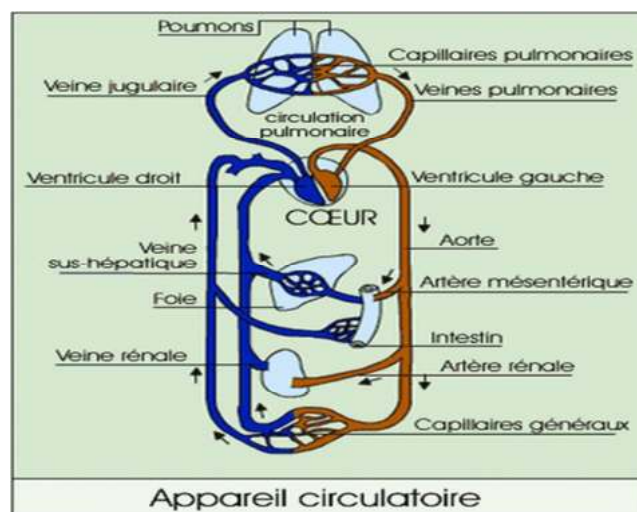


Figure III.1.6 Les principaux organes alimentés par les capillaires [RIB12] et [DOL].

### III.1.4 Vitesse d'écoulement du sang dans les vaisseaux

La vitesse d'écoulement du sang, varie d'un vaisseau à un autre, est illustrée dans la (Figure III.1.7).

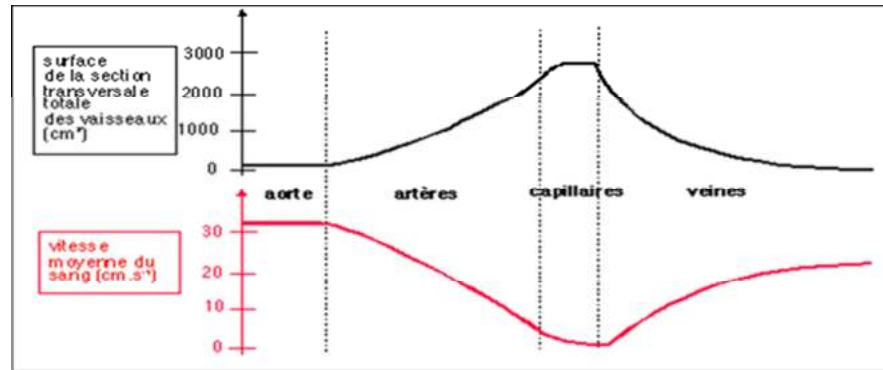


Figure III.1.7 Vitesse du sang dans les trois types de vaisseaux sanguins [RIB12] et [DOL].

### III.1.5 Procédure de la simulation numérique

Afin d'étudier l'effet d'un champ électromagnétique, créé par une ligne HT sur la vitesse d'écoulement dans les capillaires qui alimentent un échantillon d'un tissu musculaire, une simulation numérique a été réalisée.

Une solution des équations aux dérivées partielles de Maxwell couplées avec celles de Navier-Stokes (magnétohydrodynamiques) est obtenue en utilisant le logiciel Comsol 5.0 Multiphasiques qui est un outil de simulation permettant de résoudre ces équations en utilisant la méthode des éléments finis en une, deux et trois dimensions. Comsol 5.0 permet également de résoudre les problèmes comme formulation mathématique (sous forme d'équations) et physiques (le choix des modèles physiques). Dans le mode dit physique, on peut aussi utiliser les équations prédéfinies pour la majorité des phénomènes qui ont lieu dans les sciences et la technologie, tels que le transfert de chaleur et d'électricité, la théorie de l'élasticité, la propagation des ondes de diffusion, l'écoulement du fluide...

Les équations résolues par ce logiciel reflètent l'aspect magnétique et dynamique de fluides. Dans cette application multiphysique, nous procédons à un couplage entre ces deux domaines.

L'organigramme de cette procédure est utilisé pour résoudre les équations de (II.5) à (II.22) du chapitre précédent est représenté sur la (Figure III.1.8),

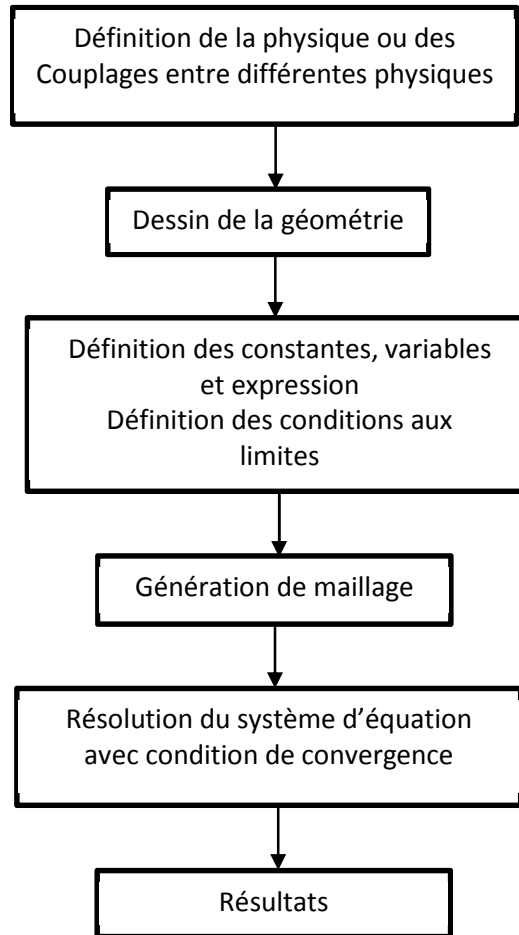


Figure III.1.8 Organigramme général de la procédure numérique.

Le modèle choisi pour l'étude (Figure III.1.9) et son maillage (Figure III.1.10) représente un échantillon d'un tissu musculaire, avec une configuration 3D, alimenté par des capillaires caractérisés par un écoulement unidirectionnel en réponse à un champ électromagnétique créé par une ligne haute tension (440 kV).

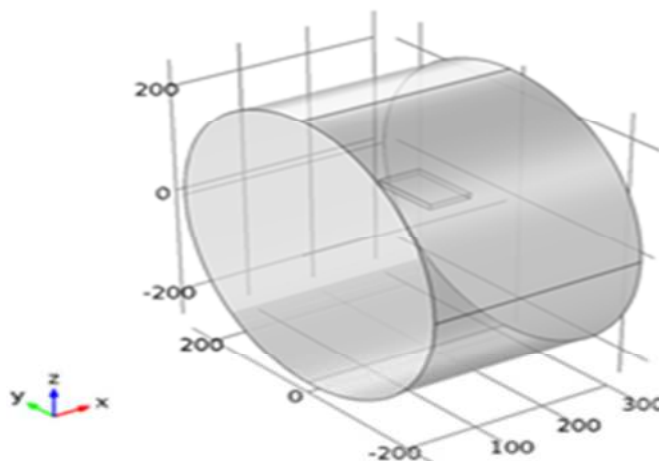


Figure III.1.9 Présentation de l'échantillon.

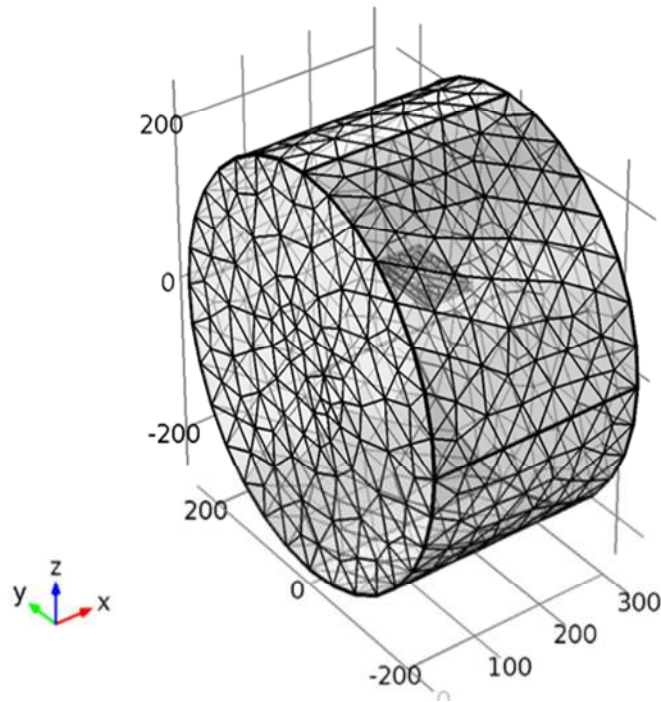


Figure III.1.10 Maillage de l'échantillon.

Les lignes du champ magnétique sont représentées sur la figure ci-dessous (Figure III.1.11).

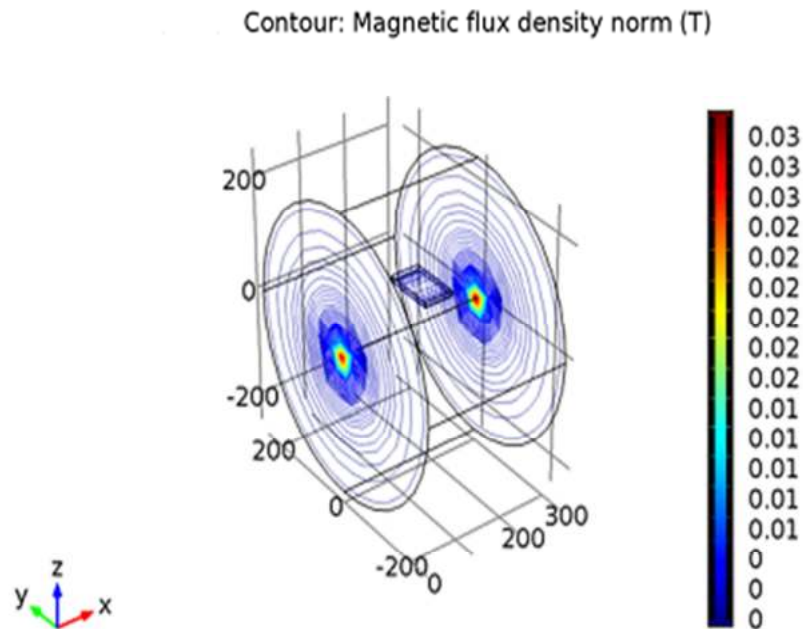


Figure III.1.11 Lignes du champ magnétique.

Les propriétés thermo-physiques du bio-fluide (sang) et du tissu sont supposées constantes et sont donnés dans le Tableau III.1.3.

Paramètre	Unités	Sang	Tissu musculaire
Densité	Kg/m <sup>3</sup>	1050	1000
viscosité Dynamique	Kg/ms	0.00365	0.005
Chaleur spécifique	J/kgK	3617	3421
Conductivité thermique	W/mK	0.52	0.52
Conductivité électrique S/m	1/ohm.m	0.65	0.23329
Perméabilité magnétique	h/m	0.0012	1.7719 e+07

Tableau III.1.3 Propriétés thermo-physiques du sang et du tissu musculaire, [IT'IS17] et [IFAC].

Dans cette étude, le sang est considéré comme newtonien, homogène et électriquement conducteur [HAP01], [TZL05], [TAH11] et [MOH16].

### III.1.6 Simulation et résultats

✓ Nous avons commencé avec une vitesse de sang nulle (valeur initiale ( $v(0)=0$ )) à l'entrée et avons choisi un modèle sans condition de glissement sur les faces latérales du tissu et une pression atmosphérique à la sortie;

✓ Différents paramètres ont été analysés et les résultats montrent une augmentation de la vitesse du sang ainsi que du courant induit qui atteint une valeur maximale de 1,4 [A.m<sup>2</sup>];

✓ La distribution de la densité de flux magnétique suivant la largeur de l'échantillon est représentée sur la Figure III.1.11 et la répartition des densités de courant induit sur la Figure III.1.12. En raison de sa symétrie, la valeur maximale (pic) est obtenue au milieu de l'échantillon.

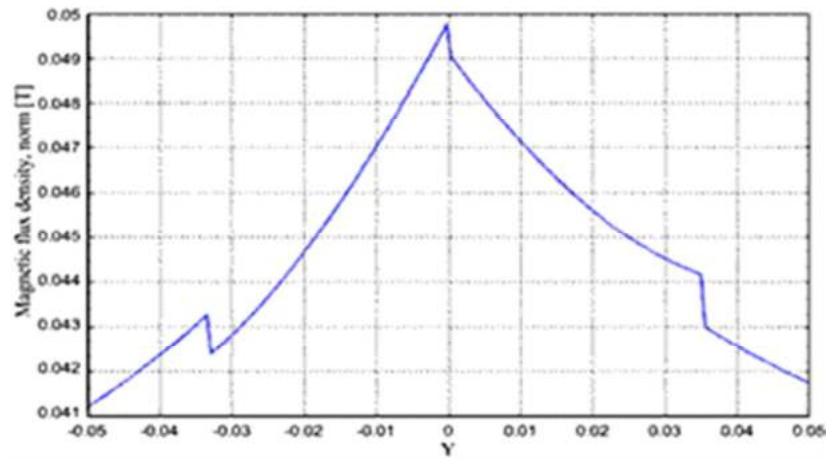


Figure III.1.11 Distribution de la densité de flux magnétique.

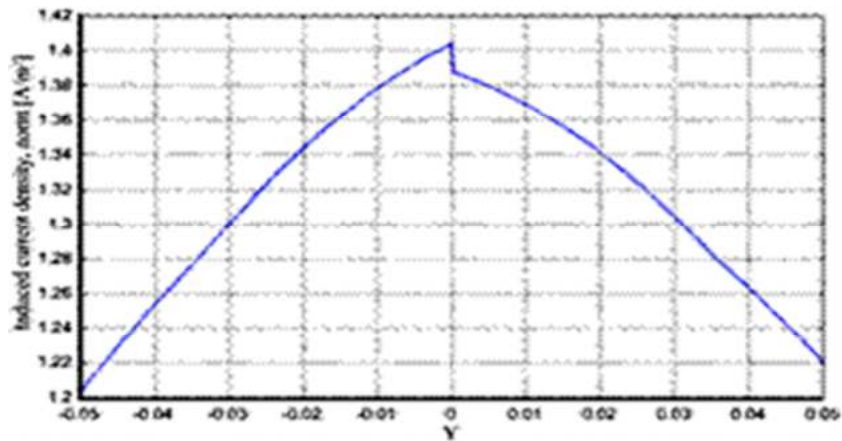


Figure III.1.12 Distribution de densité de courant induit.

✓ Les effets de ces deux champs créent la force de Lorentz qui, à son tour, accélère la vitesse du sang dans les capillaires et atteint 46% sa valeur nominale ( $0,005 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

✓ Cet accroissement est indiqué dans la direction transversale (Figure III.1.13) et dans le sens de l'écoulement (x) la Figure III.1.14.

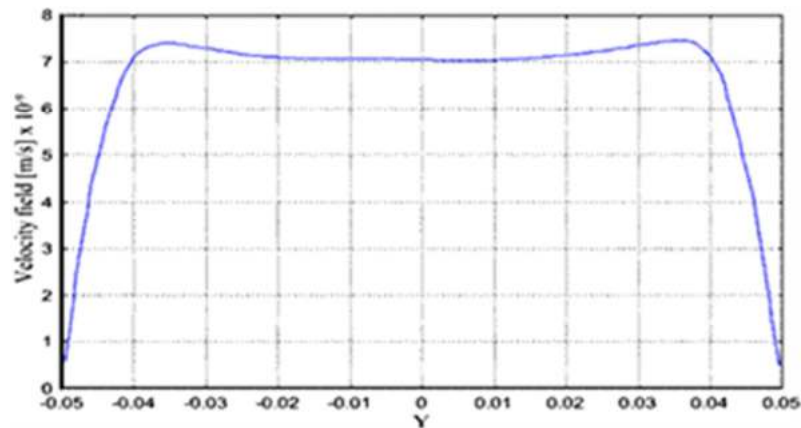


Figure III.1.13 Variations de vitesse du sang dans la direction transversale.

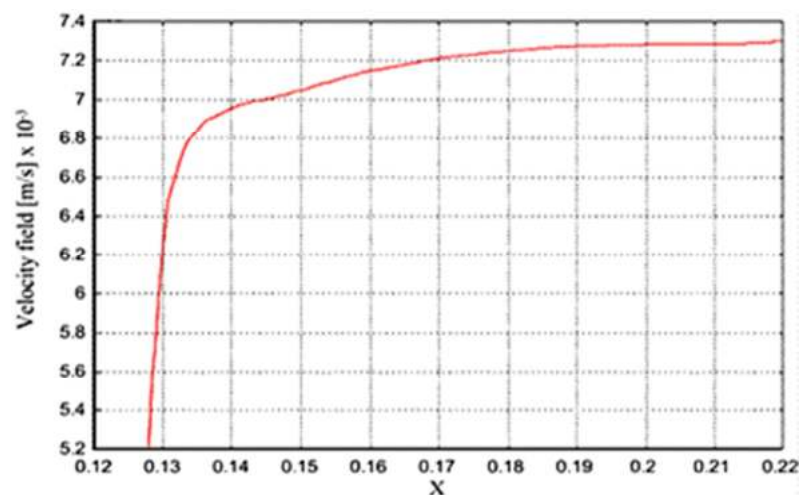


Figure III.1.14 Variations de vitesse sang le long de la direction x.

L'augmentation de la vitesse du sang dans les capillaires pourrait améliorer le débit sanguin comme mentionné dans les travaux de recherche expérimentaux de X. Shenzi et al. [SOO00] et J. Gmitrov et al. [GOO02].

En effet, X. Shenzi et al. ont constaté que l'exposition de rats anesthésiés à un CMS ou EMF 50 Hz de 1 mT pendant 10 min augmente la vitesse sanguine maximale de 20 à 45% dans les capillaires alimentant le muscle tibial antérieur et ils suggèrent qu'un champ magnétique de 1mT pourrait être considéré comme un seuil permettant d'améliorer la microcirculation musculaire.

Tandis que, J. Gmitrov et al. ont démontré qu'après l'application locale d'un CMS de 0,25 T, une augmentation du flux sanguin dans les réseaux micro vasculaires est remarquée et qui diminue progressivement après la suppression de l'exposition chez le lapin et ils

suggèrent qu'une longue exposition à un CMS non uniforme de haut niveau modifie probablement l'homéostasie macro et micro circulatoire par la modulation de la libération locale de facteurs neuro humoraux et paracrines endothéliaux agissant directement sur le muscle lisse de la paroi vasculaire, vraisemblablement en affectant les canaux ioniques ou les systèmes de messagers secondaires.

### **III.1.7 Conclusion**

C'est dans le but de voir l'effet du champ électromagnétique créé par une ligne HT 440 kV sur l'écoulement sanguin dans les capillaires d'un échantillon musculaire nous avons mené cette étude numérique en utilisant le logiciel Comsol Multiphysique.

Les résultats montrent une augmentation de la vitesse 46% engendrant ainsi une amélioration de la microcirculation musculaire qui est considéré comme un facteur bénéfique par plusieurs chercheurs.

### III.1.8 Références bibliographiques

- [DOL] Dr Yvan LE DOLLEY, Physiologie de l'appareil cardiovasculaire, Cardiologie, Bouches du Rhône, Marseille, France.
- [GOO02] J. Gmitrov, H. Okano et C. Ohkubo, "Effect of 0.25 T Static Magnetic Field on Microcirculation in Rabbits", *Bioelectromagnetics*, 23, 224- 229, 2002.
- [HAP01] Y.Haik, V. Pai et C. Chen. "Apparent viscosity of human blood in high static magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*", 225, 180-186, 2001.
- [ICNI98] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.*, vol. 74, n° 4, pp. 494–522, 1998.
- [INRS] INRS, "Hygiène et Sécurité du travail", 1er trimestre, 218-2010.
- [MOH16] A. Mohammed, "A Study on Influence of Magnetic Field on Blood", *International Archive of Applied Sciences & Technology* 7, 61-65, 2016.
- [RIB12] Pr Christophe RIBUOT, Circulation: Différenciation fonctionnelle des vaisseaux, cours de Physiologie, Chapitre 5, Université Joseph Fourier de Grenoble, 2011/2012.
- [SOO00] X. Shenzhi, H. Okano et C. Ohkubo, "Acute effects of whole-body exposure to static magnetic fields and 50-Hz electromagnetic fields on muscle microcirculation", *Elsevier, Bioelectrochemistry*, 53, 127–135, 2000.
- [TAH11] R. Tao et K. Huang "Reducing blood viscosity with magnetic fields", *Physical Review* 84, 001900, 2011.
- [TZL05] E. Tzirtzilakis et V. Loukopoulos, "Biofluid flow in a channel under the action of a uniform localized magnetic field", *Computational Mechanics* 36, 360-374, 2005.
- [IFAC] Institute of applied physics "Nello Carrara", Florence, Italian National Research Council: Dielectric Properties of Body Tissues: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php>
- [IT'IS17] The Foundation for Research on Information Technologies in Society (IT'IS). <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/database-summary/>
- [OMS] <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/fr/index1.html>

## **Deuxième Application**

# **Contrôle de l'écoulement sanguin dans l'aorte, en présence d'une athérosclérose, par l'application d'un champ magnétique externe**

III.2.1 Introduction

III.2.2 Problématique

III.2.3 Objectif de l'étude

III.2.4 Procédure de la simulation numérique

III.2.5 Étude d'indépendance du maillage

III.2.6 Résultats et discussions

III.2.7 Conclusion

III.2.8 Références bibliographiques

III.2.9 Lexique médical

### III.2.1 Introduction

La dynamique des bio-fluides magnétiques (BDF) est un nouveau domaine de la mécanique des fluides qui étudie la dynamique du sang en présence de CM et son importance réside dans le fait qu'elle vise à trouver des solutions, notamment non invasives, à certaines pathologies. Dans la littérature, deux techniques ont été utilisées pour le contrôle l'écoulement des bio-fluides : la méthode active et la méthode passive. La première citée implique une puissance externe pour améliorer l'écoulement sanguin tandis que la seconde, elle utilise des modifications de surfaces ou de géométries du flux en incorporant des inserts ou des dispositifs supplémentaires.

### III.2.2 Problématique

Comme nous l'avons vu précédemment, une bonne circulation implique que le sang est véhiculé vers l'ensemble des tissus de l'organisme pour leur apporter l'oxygène et les nutriments nécessaires à leur fonctionnement et les débarrasser de leurs déchets. Or, cet acheminement ne peut s'effectuer de façon naturelle pour diverses causes telles que l'hérédité, le tabagisme, la sédentarité, la mauvaise alimentation, l'hypertension artérielle, le diabète, la thrombose veineuse, l'athérosclérose : c'est ce qu'on appelle la mauvaise circulation sanguine ou encore la mauvaise irrigation des différents organes. Sans traitement, elle peut entraîner des maladies des conséquences néfastes comme une nécrose du tissu vivant.

Afin d'améliorer les paramètres du débit sanguin dans les vaisseaux plusieurs études ont été menées pour réduire l'épaississement ou la viscosité du sang en utilisant l'effet des CEM ce qui pourrait être une alternative aux médicaments et qui constituera un nouveau protocole médical dans le traitement des maladies cardiovasculaires telles que l'hypertension et l'athérosclérose.

**L'athérosclérose** est un dépôt par accumulation de différents éléments (graisse, sang, tissu fibreux, calcaire) sur une partie de la paroi interne d'une artère. Le diamètre de celle-ci diminue, ce qui peut obstruer la circulation sanguine. Ses complications sont chroniques et cumulatives, progressent lentement et peuvent provoquer la formation d'un thrombus qui ralentira ou arrêtera le flux sanguin rapidement, entraînant la mort des tissus nourris par l'artère en environ 5 minutes [SAN17] et [ZIV16] (Figure III.2.1).

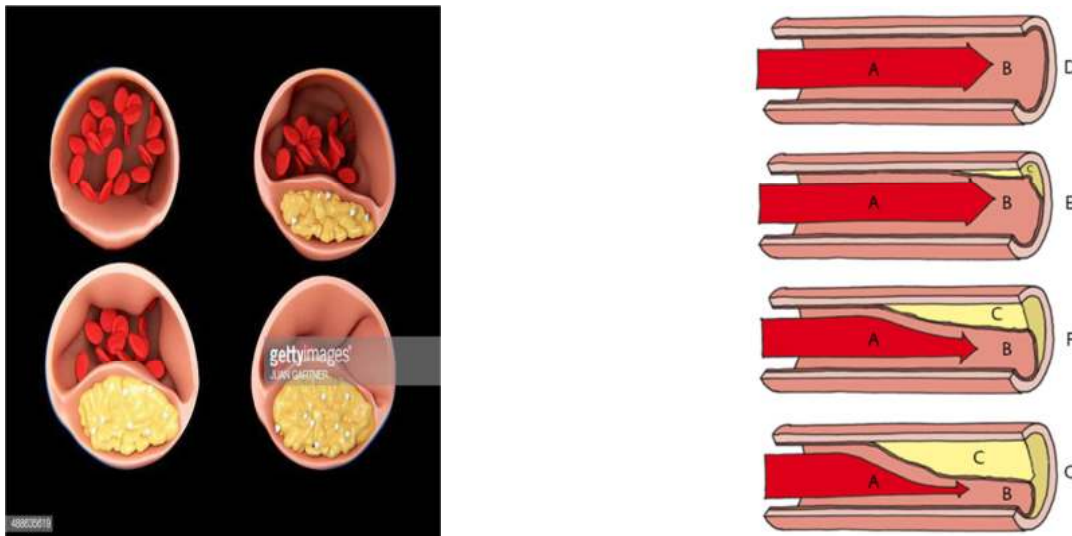


Figure III.2.1 Evolution de l'athérosclérose.

**L'aorte** est la plus grande artère du corps qui provient du ventricule gauche du cœur et s'étend jusqu'à l'abdomen, où il bifurque en deux artères plus petites (les artères iliaques communes). Il fournit du sang oxygéné à toutes les parties du corps via la circulation, à l'exception de la circulation fonctionnelle des poumons (artère pulmonaire). Il est divisé en trois sections: l'aorte ascendante, l'arche de l'aorte et l'aorte descendante. L'arc aortique est la section qui ressemble à une forme en U inversé [FAI14], [CHA16] et [BOU14] (Figure III.9).

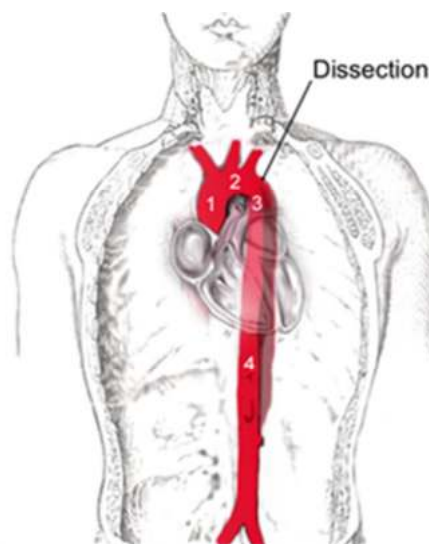


Figure III.2.2 Aorte humaine.

### III.2.3 Objectif de l'étude

Dans cette étude, une simulation numérique est réalisée afin d'étudier les effets de l'application d'un champ magnétique (CEM) externe sur l'écoulement sanguin dans l'aorte et particulièrement en présence d'obstacles tels que l'athérosclérose. Une solution des équations de Navier-Stokes magnétohydrodynamiques complètes (II.5 à II.22) est obtenue en utilisant le logiciel Fluent en tenant compte des conséquences du changement de l'intensité et de sens d'application du CEM externe.

### III.2.4 Procédure de la simulation numérique

- Les équations gouvernantes avec les conditions initiales et aux limites du chapitre précédent sont résolues numériquement par la méthode des volumes finis en utilisant le code de simulation FLUENT ;
- Concernant la résolution des équations de mouvement par la méthode des volumes finis avec FLUENT, nous avons choisi l'algorithme SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) pour le couplage vitesse-pression. La discrétisation de la pression est obtenue par un schéma standard et un schéma du second ordre décentré est choisi pour les discrétisations des équations de quantité de mouvement et d'énergie ;
- La géométrie et le maillage ont été effectués avec le logiciel de maillage GAMBIT ;
- La géométrie de l'aorte étudiée est supposée idéale avec des coupes circulaires (Figure III.2.3);

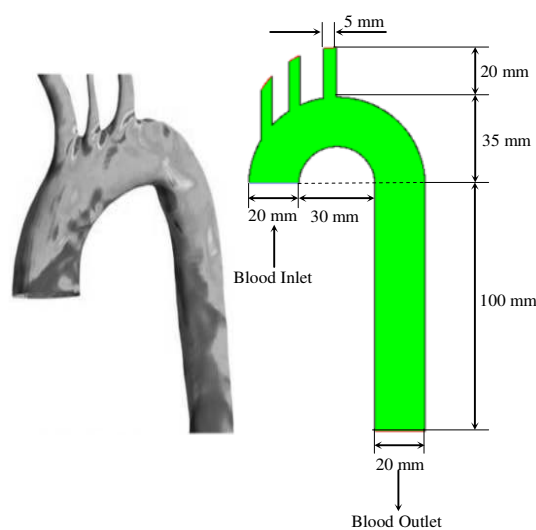


Figure III.2.3 Géométrie de l'aorte étudiée.

- Le sang, qui se compose de plasma, globules rouges, globules blancs et de plaquettes, est considéré comme un fluide newtonien et électriquement conducteur par la majorité des recherches, [HAP01], [TZL05], [TAH11] et [MOH16];
- Il est également considéré comme homogène, incompressible et son écoulement est supposé instable, bidimensionnel et laminaire;
- Les propriétés thermo-physiques du bio-fluide (sang) et du tissu de l'aorte sont supposées constantes et sont donnés dans le Tableau III.2.1 [IT'IS 2017] et [IFAC].

Matériau	Unités	Sang	Tissu de l'aorte
Densité	Kg/m <sup>3</sup>	1050	1102
Viscosité dynamique	Kg/ms	0.00365	
Chaleur spécifique	J/kgK	3617	3306
Conductivité thermique	W/mK	0.52	0.46
Conductivité électrique	1/Ω.m	0.65	0.261
Perméabilité magnétique	h/m	0.0012	0.0018

Tab III.2.1 Propriétés thermo-physiques du sang et du tissu de l'aorte.

- Pour la configuration considérée, les conditions aux limites sont données par:

A l'entrée de l'aorte, la vitesse du sang est imposée:  $v = 0,15 \text{ m.s}^{-1}$  pour un écoulement laminaire et  $v = 1,5 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$ , pour un écoulement turbulent.

A la sortie de l'aorte, le flux de fluide est considéré comme entièrement développé.

### III.2.5 Étude d'indépendance du maillage

Afin de choisir le maillage le plus approprié, une étude de l'indépendance du maillage a été menée. L'indépendance sur la taille du maillage est évaluée par une faible variation du coefficient de frottement. Pour cela, cinq maillages différents générés par le logiciel ont été testés, leurs détails sont représentés dans le Tableau III.2.2. Nous constatons que les géométries avec le maillage de 1 à 3 ne conviennent pas car l'effet de la taille de la maille sur les résultats est clair. Cependant, les maillages 4 et 5 sont acceptables en raison de la faible variation du coefficient de frottement. Ainsi, pour notre étude numérique, nous avons choisi le

quatrième maillage car il a moins d'éléments que le cinquième sans que la variation du coefficient de frottement soit grand. La vue détaillée du maillage de la surface choisie est représentée sur la Figure III.2.4.

Maillage	Nombre d'élèments	Coéfficient de frottement
1	4189	0.0331581
2	6284	0.0360573
3	7028	0.0385712
4	8189	0.0395305
5	11289	0.0395304

Tableau III.2.2 Test de l'indépendance du maillage.

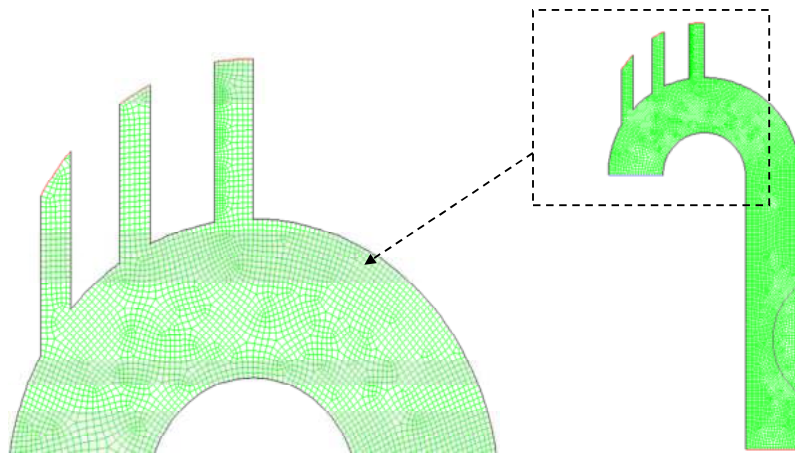


Figure III.2.4 Détails du maillage choisi.

Tenant compte de toutes ces hypothèses, des simulations numériques sont effectuées, pour voir l'influence du contrôle actif sur l'écoulement sanguin dans l'aorte en présence d'une athérosclérose, dans les cas suivants:

- 1- Effets du CEM externe ;
- 2- Effets du sens d'application CEM externe ;
- 3- Effets de l'intensité du CEM externe.

### III.2.6 Résultats et discussions

#### 6.1 Effets de champ magnétique externe

La Figure III.2.5 montre les contours de la pression dans l'aorte avec et sans CEM externe. La pression et la vitesse systoliques d'entrée ont été prises successivement égales à 120 mmHg et  $20 \text{ cm.s}^{-1}$  (correspondant à un nombre de Reynolds de 1208). Nous remarquons clairement que sous l'effet du CEM, la pression est largement affectée, elle augmente légèrement dans la partie ascendante de l'aorte et le gradient de pression augmente fortement dans sa partie descendante.

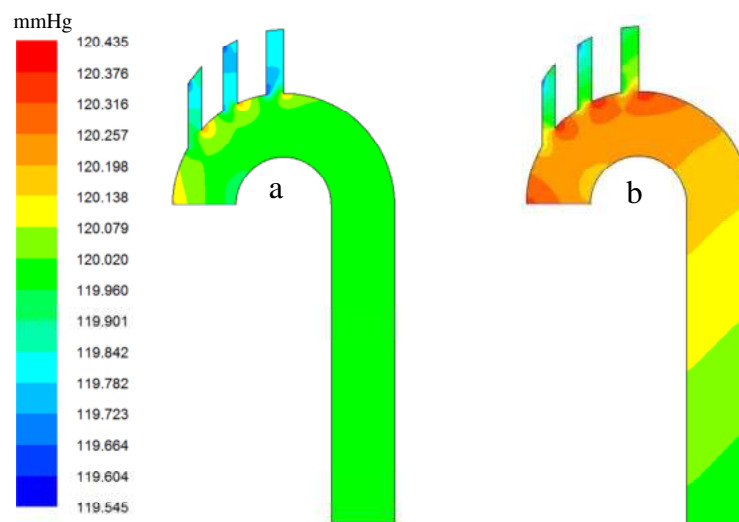


Figure III.2.5 Contours de pression systolique dans l'aorte:

(a) sans CEM      (b) avec CEM.

Pour les courbes de vitesse, nous observons que la distribution de la vitesse dans la partie descendante de l'aorte devient **uniforme** et plus faible après l'application du CEM, Figure III.2.6. Ce résultat a été également trouvé, expérimentalement, par deux médecins **R. Tao et K. Huang** [TAH11] qui ont montré qu'en appliquant un champ magnétique d'intensité égale à 1,3 T pendant environ une minute, la viscosité sanguine diminue de 20 à 30%.

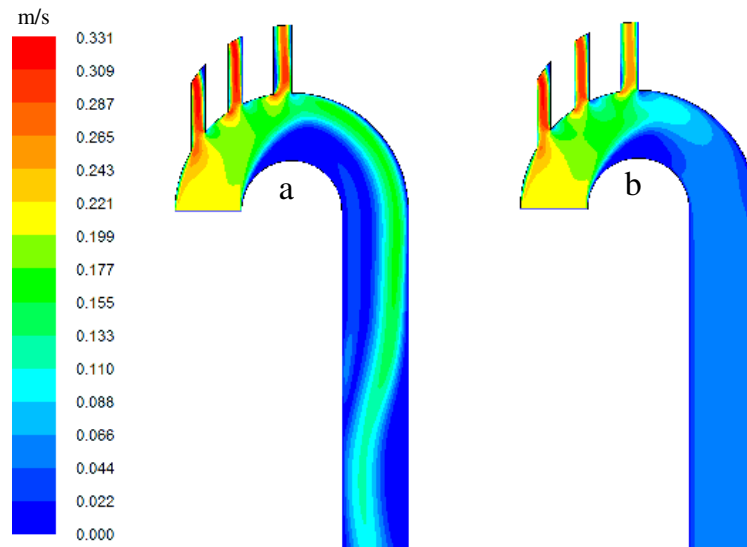


Figure III.2.6 Contours de vitesse dans l'aorte humaine:  
(a) sans CEM (b) avec CEM.

En effet, selon **R. Tao et K. Huang** l'application d'un CM intense a pour effet de polariser magnétiquement les globules rouges. Chaque globule (un disque), va acquérir grâce au fer qu'il contient un dipôle magnétique dirigé selon l'un de ses diamètres, les forces d'interaction entre dipôles tendent alors à les regrouper en petits chapelets de quelques globules accolés par leurs bords (Figure III.2.7).

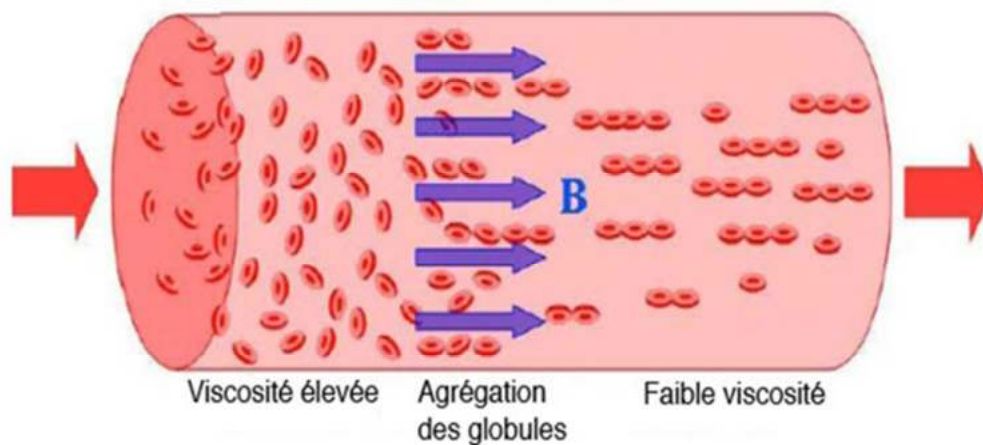


Figure III.2.7 Regroupement et alignement des globules rouges.

Ceci a pour conséquences :

- Augmentation et élargissement de la taille des particules en suspension.
- Les chaînes de globules seront alignées dans la direction de l'écoulement.
- Réduction de la friction, donc la viscosité dans cette direction.

D'autre part, le développement de la zone de recirculation du sang dans la région de l'arc de l'aorte est également affecté. La Figure III.2.8 montre que cette zone s'est rétrécie considérablement. A partir de ces résultats, on peut dire que la CEM permet de **minimiser les instabilités d'écoulement** dues aux singularités géométriques de l'aorte (surtout dans la région de l'arc de l'aorte).

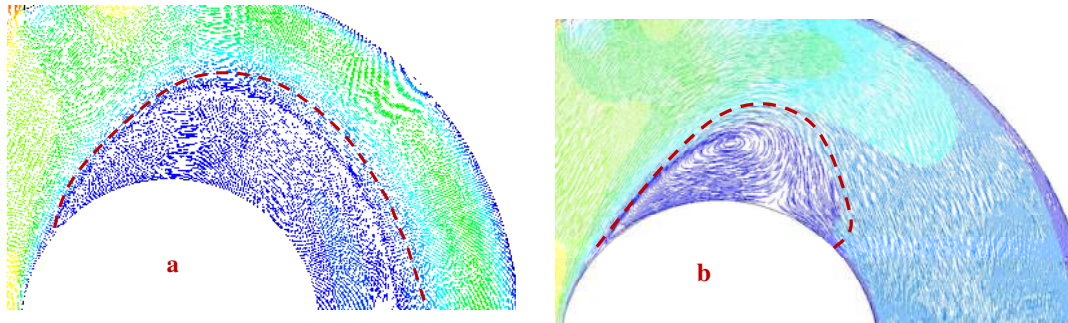


Figure III.2.8 Développement de la zone de stagnation du sang dans l'arc de l'aorte:

(a) sans CEM      (b) avec CEM.

## 6.2 Contrôle de l'écoulement sanguin dans l'aorte par application d'un CEM

Afin de contrôler l'écoulement sanguin dans l'aorte, on s'est intéressé au cas pathologique de l'athérosclérose sur la partie descendante de l'aorte et de forme semi-circulaire. La Figure III.2.9 montre que la présence de ce dépôt diminue la tension artérielle.

Puisque le modèle d'étude choisi (aorte) a de petites dimensions, la variation de pression est faible. Pour cette raison, nous avons eu recours au calcul du gradient de pression qui décrit la direction et le taux de changements de pression autour d'un endroit particulier. Tableau III.2.3 montre les différents gradients de pression dans l'aorte avec et sans athérosclérose, où nous remarquons que la diminution du gradient de pression est d'environ 43%.

Gradients de pression mmHg/m	Sans athérosclérose	Avec athérosclérose	Pourcentage de diminution, %
$\Delta P/L$	0.388	0.222	42.78

Tableau III.2.3 Gradients de pression dans l'aorte avec et sans athérosclérose.

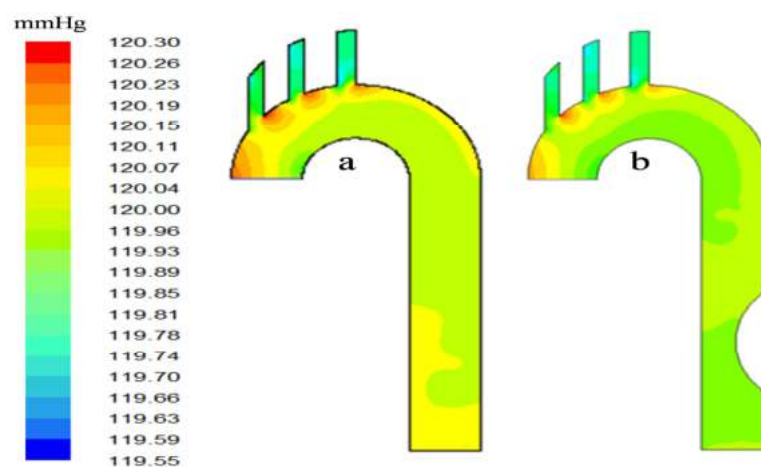


Figure III.2.9 Contours de pression systolique dans l'aorte:

(a) sans athérosclérose      (b) avec athérosclérose.  
(b)

La présence de l'athérosclérose affecte également la distribution de la vitesse locale dans l'aorte (Figure III.2.10) et augmente la vitesse du sang dans la zone environnante et crée des zones de recirculation (Figure III.2.11).

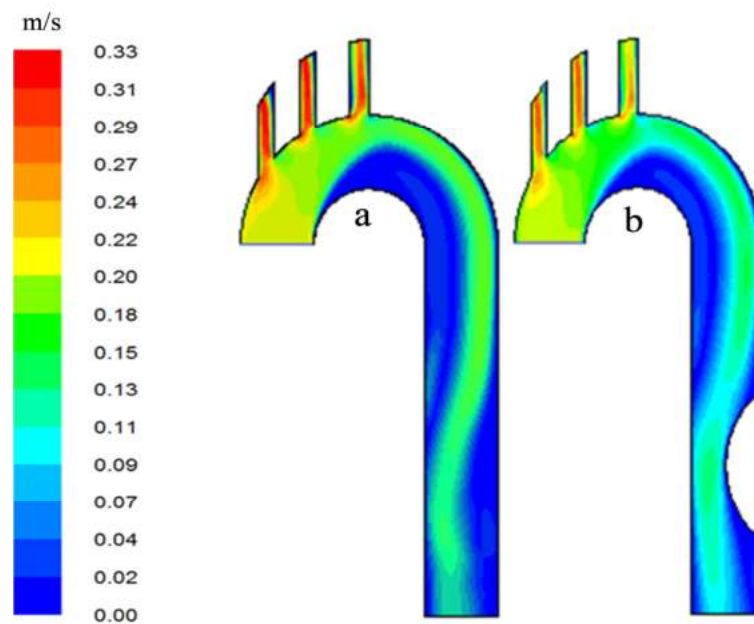


Figure III.2.10 Contours de vitesse dans l'aorte:

(a) Sans athérosclérose      (b) Avec athérosclérose.

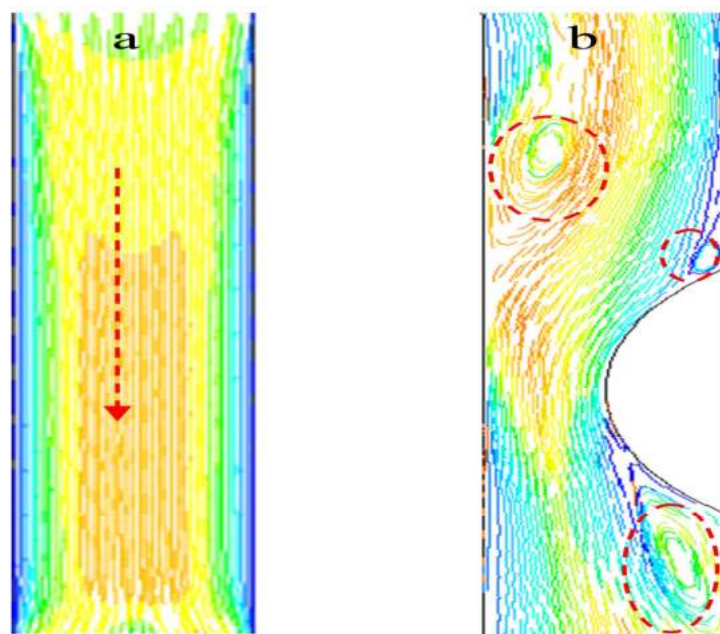


Figure III.2.11 Lignes d'écoulement et zones de recirculation dans la partie descendante de l'aorte:

(a) sans athérosclérose      (b) avec athérosclérose.

### 6.3 Effets du sens d'application du CEM, avec l'athérosclérose, sur l'écoulement sanguin

Dans le but de contrôler l'écoulement sanguin dans l'aorte avec l'athérosclérose, un CEM est appliquée suivant deux directions (x) et (y) avec:

$B_{0x}$ : dans la direction transversale à l'écoulement.

$B_{0y}$ : dans la direction de l'écoulement.

La Figure III.2.12 montre une comparaison entre les pressions systoliques dans les trois cas à savoir:

- sans CEM ;
- avec un CEM appliqué dans la direction (x);
- avec un CEM appliqué dans (y).

Les résultats montrent que seul le CEM appliqué dans le sens de l'écoulement a créé un gradient de pression, ce qui facilite l'écoulement sanguin autour de la zone de l'athérosclérose, par rapport aux deux autres cas. La morphologie de la zone de recirculation a également été significativement modifiée (Figure III.2.13).

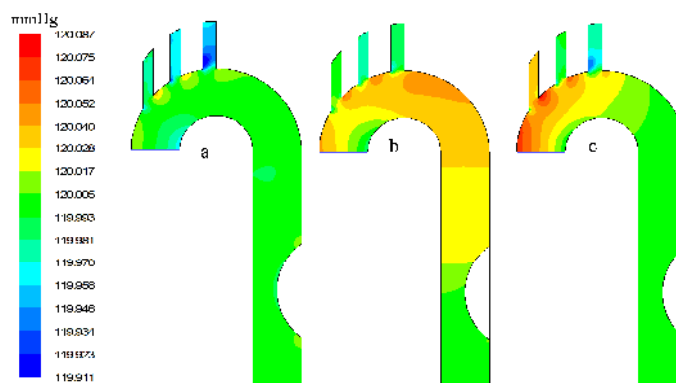


Figure III.2.12 Contours de pression systolique dans l'aorte:

(a) Sans CEM      (b)  $B_{0x}$       (c)  $B_{0y}$ .

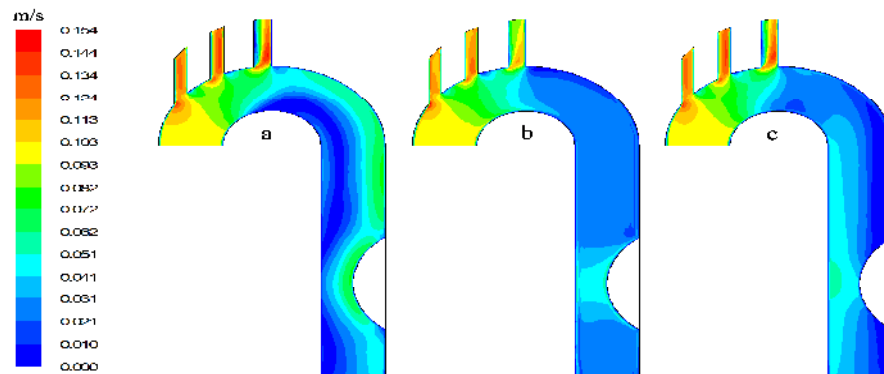


Figure III.2.13 Contours de vitesse dans l'aorte :

(a) Sans CEM      (b)  $B_{0x}$       (c)  $B_{0y}$ .

La Figure III.2.13 montre que lors de l'application d'un CEM dans la direction transversale de l'écoulement, les zones de recirculation dans la partie avant l'athérosclérose disparaissent mais de petites zones ont été créées en amont et en aval de l'athérosclérose.

Cependant, lorsque la direction de la CEM est parallèle à la direction de l'écoulement, les zones de recirculation disparaissent complètement et les lignes de courant sont donc similaires à l'aorte sans athérosclérose (Figure III.2.14a).

Tous ces résultats nous permettent de dire que lorsque le sens d'application du CEM est parallèle au sens de l'écoulement, ceci a un impact plus important sur l'écoulement que dans le cas où il est transversal.

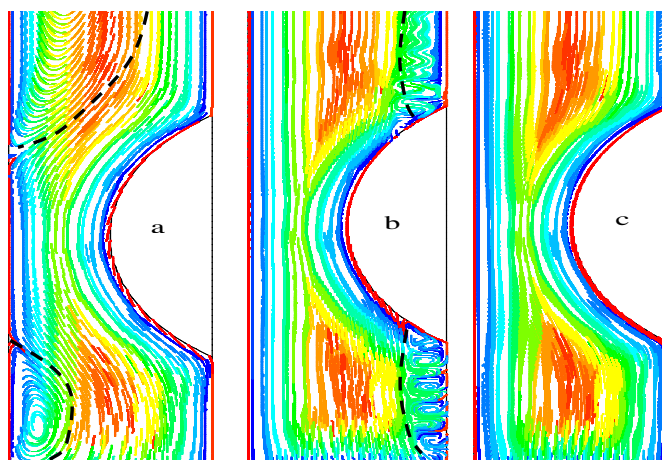


Figure III.2.14 Lignes de courant dans l'aorte:

(a) Sans CEM      (b)  $B_{0x}$       (c)  $B_{0y}$ .

### 6.4 Effets de l'intensité du CEM sur l'écoulement sanguin

En vue de contrôler l'écoulement sanguin, l'influence de l'intensité du CEM sur la distribution de la pression et de la vitesse dans l'aorte a également été étudiée. La Figure III.2.15 montre les contours de la pression systolique dans l'aorte pour différentes intensités de CEM.

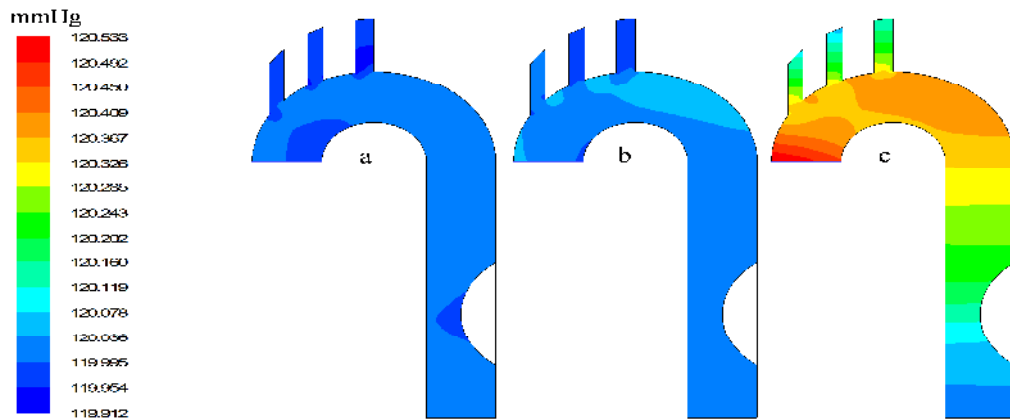


Figure III.2.15 Contours de la pression systolique dans l'aorte.

Vitesse d'entrée =  $10 \text{ cm.s}^{-1}$  ( $Re=604$ ):

(a)  $B_{0y} = 1 \text{ T}$  (b)  $B_{0y} = 3 \text{ T}$  (c)  $B_{0y} = 5 \text{ T}$ .

En raison de l'augmentation de l'intensité de la CEM, un accroissement significatif de l'amplitude de la pression est observé où le plus grand gradient de pression, le long de l'aorte, est obtenu pour les valeurs d'intensité les plus élevées. La vitesse la plus uniforme dans l'aorte est également obtenue pour des valeurs les plus élevées de l'intensité du CEM (Figure III.2.16).

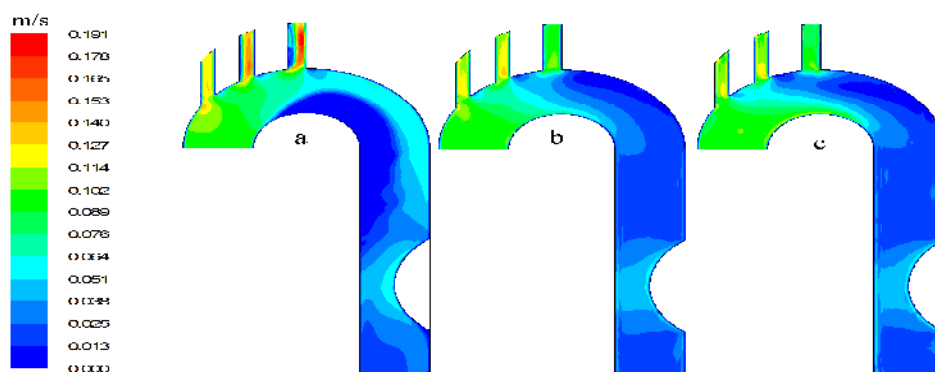


Figure III.2.16 Contours de la vitesse de l'écoulement dans l'aorte.

vitesse d'entrée de  $10 \text{ cm.s}^{-1}$  ( $Re = 604$ ):  $B_{0y} = 1 \text{ T}$

(b)  $B_{0y} = 3 \text{ T}$  (c)  $B_{0y} = 5 \text{ T}$ .

La Figure III.2.17 montre que l'application d'un CEM affecte de manière significative la zone de recirculation qui peut disparaître complètement pour des intensités plus élevées;

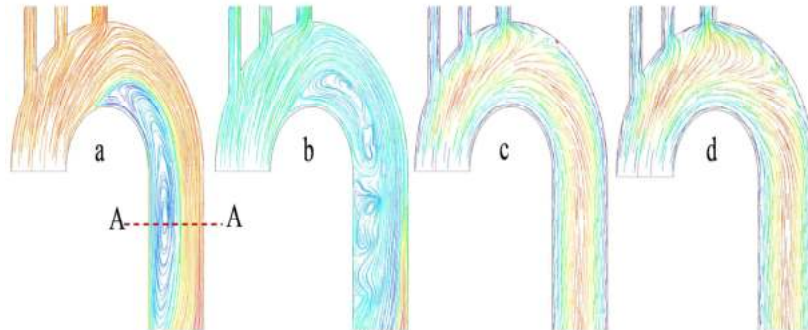


Figure III.2.17 Morphologie de la zone de recirculation:

(a) sans CEM (b)  $B_{0y} = 1T$  (c)  $B_{0y} = 3T$  (d)  $B_{0y} = 5T$ .

Egalement, nous constatons que la vitesse dans cette section devient plus uniforme sauf près de la paroi de l'aorte (Figure III.2.18), où un fort gradient de vitesse est obtenu en raison d'une contrainte de cisaillement élevée (Figure III.2.19).

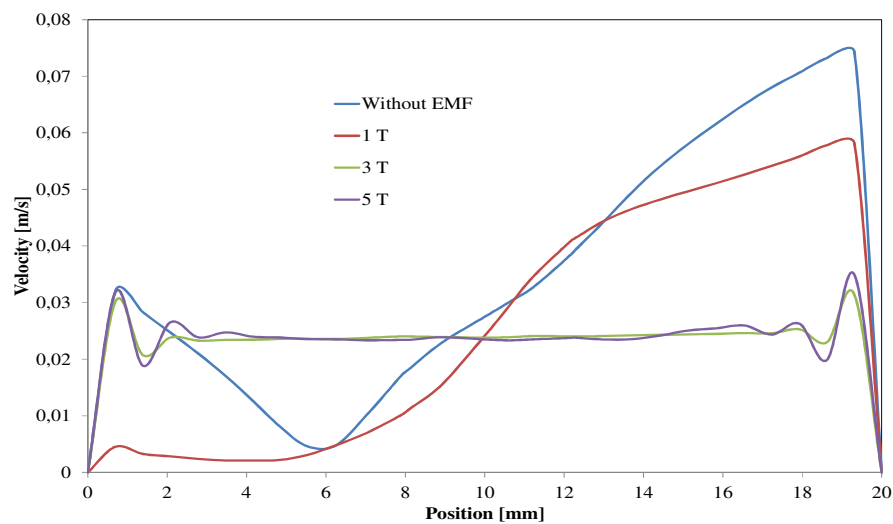


Figure III.2.18 Profil de vitesse de la section transversale (A-A) pour différentes intensités de CEM.

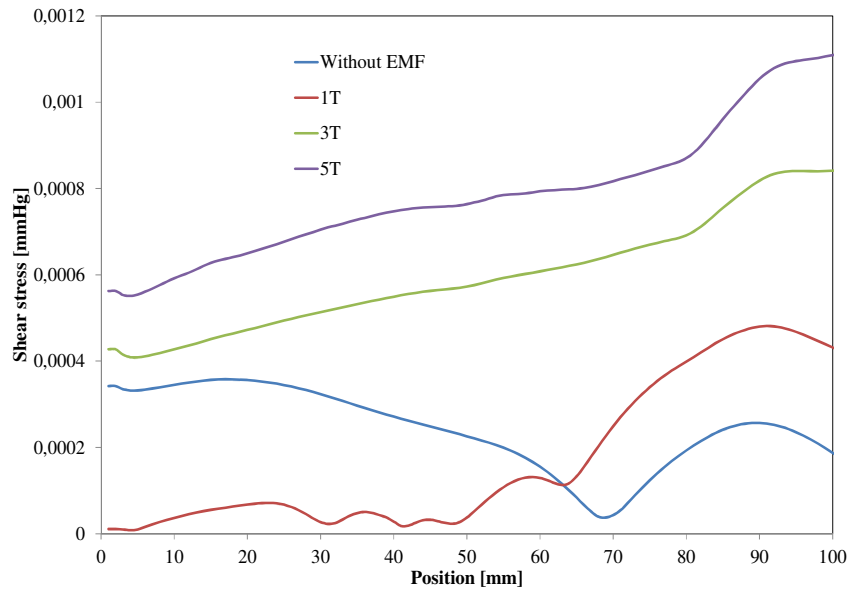


Figure III.2.19 Effort de cisaillement sur la paroi dans la zone descendante de l'aorte (du côté de l'athérosclérose).

### III.2.7 Conclusion

Dans cette étude numérique, nous avons constaté que l'écoulement sanguin peut être contrôlé, en appliquant un CEM externe, afin d'obtenir une bonne circulation dans toute l'aorte, en particulier autour de l'athérosclérose.

1. Les résultats obtenus relatifs à la vitesse, la pression et à la contrainte de cisaillement de la paroi indiquent que la présence du CEM externe influe considérablement sur l'écoulement sanguin;
2. Le changement du sens d'application du CEM externe ainsi que son intensité ont affectées, positivement, la vitesse du sang et la pression tout en permettant de minimiser les instabilités d'écoulement dues aux singularités géométriques de l'aorte.

### III.2.8 Références bibliographiques

- [BOU14] Dr Bousba, "Aorte et ses branches, Cours pour la 2ème année de médecine", Département de Médecine, Université 3 de Constantine, 2013/1014.
- [CHA16] Pr. Champsaur, "Système cardiovasculaire – Anatomie de l'aorte et ses collatérales", Cours, 26/02/2016.
- [FAI14] Dr J.B. Faivre, "Aorte Thoracique: Anatomie, Variantes et Mesures, Imagerie cardiaque pour le radiologue non spécialiste : les fondamentaux, Service de Radiologie", Hôpital Calmette, CHR de Lille, 19 Septembre 2014.
- [HAP01] Y.Haik, V. Pai et C. Chen. "Apparent viscosity of human blood in high static magnetic field", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 225, 180-186, 2001.
- [MOH16] A. Mohammed, "A Study on Influence of Magnetic Field on Blood", International Archive of Applied Sciences & Technology 7, 61-65, 2016.
- [SAN17] C. Sanchez, Athérosclérose: pathologies associées, prévention et traitements, Thèse de doctorat en pharmacie, Université de Bordeaux, U.F.R. des sciences pharmaceutiques, 2017.
- [TAH11] R. Tao et K. Huang "Reducing blood viscosity with magnetic fields", Physical Review 84, 001900, 2011.
- [TZL05] E. Tzirtzilakis et V. Loukopoulos, "Biofluid flow in a channel under the action of a uniform localized magnetic field", Computational Mechanics 36, 360-374, 2005.
- [ZIV16] V. Zivkovic, Détection des plaques d'athérosclérose carotidiennes calcifiées sur CBCT grand champ, étude portant sur 121 cas, université Toulouse III – Paul Sabatier, faculté de 2016.

### III.2.9 Lexique médical

**Apoptose:** ou mort cellulaire programmée, est le processus par lequel des cellules déclenchent leur autodestruction en réponse à un signal. C'est l'une des voies possibles de la mort cellulaire, qui est physiologique, génétiquement programmée, nécessaire à la survie des organismes multicellulaires. Elle est en équilibre constant avec la prolifération cellulaire. Contrairement à la nécrose, elle ne provoque pas d'inflammation.

**Cortex cérébral:** (ou écorce cérébrale<sup>1</sup>), d'origine pros encéphalique, désigne la substance grise périphérique des hémisphères cérébraux.

**Extrasystole:** ou prématurité est un trouble du rythme cardiaque correspondant à une contraction prématurée d'une des cavités du cœur.

**Hématopoïèse:** C'est un renouvellement cellulaire régulé qui permet de maintenir constante la numération des cellules sanguines. Tous les éléments figurés du sang sont issus d'un type cellulaire unique : les cellules souches hématopoïétiques (CSH).

**Homéostasie:** Stabilisation, réglage chez les organismes vivants, de certaines caractéristiques physiologiques (pression artérielle, température, etc.).

**Ischémie:** C'est la diminution de l'apport sanguin artériel à un organe entraînant essentiellement une baisse de l'oxygénation des tissus de l'organe en dessous de ses besoins (hypoxie) et la perturbation, voire l'arrêt, de sa fonction. L'ischémie peut être réversible et n'entraîner qu'une gêne limitée ou peut être irréversible et peut conduire à l'infarctus de l'organe, c'est-à-dire à la mort d'une partie ou de la totalité de celui-ci.

**Messagers secondaires:** ou seconds messagers sont des molécules permettant la transduction d'un signal provenant de l'extérieur d'une cellule, vers l'intérieur ou la surface de celle-ci.

**Mesure de l'épaisseur corticale:** est un domaine de recherche en plein essor. Les progrès en matière d'imagerie par résonance magnétique (IRM), donnant des images de plus en plus grande résolution ont un impact majeur dans l'activité de ce domaine. Plusieurs études ont déjà montré que l'épaisseur corticale pouvait s'avérer être un excellent bio marqueur dans le cas de certaines pathologies (maladie d'Alzheimer, schizophrénie), l'atrophie de la substance grise apparaissant comme une conséquence de la perte de neurones.

**Nécrose:** Définit l'arrêt prématuré et non programmé du fonctionnement d'une ou de plusieurs cellules d'un tissu du corps humain. Les tissus nécrosés ne peuvent plus tenir leur fonction normale dans l'organisme, ils sont comme morts.

**Paracrine :** En biologie cellulaire, la communication paracrine est un mode de signalisation cellulaire impliquant des messagers chimiques qui agissent dans le voisinage de la cellule qui les a synthétisés.

**Travées osseuses:** Ce sont de fines plaques osseuses arrangées en un lacis irrégulier. Ce type de structure osseuse est observé dans l'os spongieux.

**Vasomotricité:** Propriété qu'ont les vaisseaux sanguins de changer de diamètre en fonction de modifications du milieu intérieur et se manifeste soit par une vasoconstriction (diminution du diamètre des vaisseaux), soit par une vasodilatation (augmentation de ce diamètre). La vasoconstriction s'associe à une réduction de la circulation sanguine; la vasodilatation, à l'inverse, entraîne une augmentation du flux sanguin.

# **Partie 2**

## **CEM et plantes**

## **Chapitre IV : Etat de l'art**

Dans le but d'augmenter l'endurance des plantes et par conséquent le rendement des récoltes, des efforts ont été déployés dans l'agriculture moderne à la recherche d'une technologie de production efficace, respectueuse de l'environnement, basée sur le traitement physique des semences.

Sachant que la germination correcte est une étape essentielle pour un meilleur rendement des cultures. Or, la présence de métaux lourds dans le sol, les cycles ensoleillés et obscurs, la température ainsi que la salinité sont des facteurs naturels pouvant réduire les activités enzymatiques et les voies oxydatives du métabolisme des graines, ce qui pourrait affecter la germination et ensuite la croissance des semis.

Pour pallier à ce problème, des traitements chimiques des semences ont été utilisés mais qui se sont révélés défavorables à l'environnement car ils sont polluants et pouvant porter atteinte à la santé et à la vie des organismes vivants, d'où la nécessité d'employer des traitements physiques qui se sont avérés sans danger par rapport à ceux chimiques. À cet égard, l'utilisation du traitement des semences par CM est une technique physique écologique, saine, non invasive, sans effets indésirables et peu coûteuse pour améliorer la germination des graines et la croissance des semis, parce que, physiquement, les CM améliorent la concentration des ions, des radicaux libres et des charges électriques sans toute dégradation / modification dans le profil chimique des semences ce qui rend les membranes perméables.

Il a été constaté que d'une part, cette irradiation provoque des changements biochimiques et physiologiques dans les semences : l'absorption de l'eau devient plus rapide, la respiration de la germination s'intensifie, les performances de croissance tels que, le taux et la vitesse de germination, la hauteur des tiges, le nombre des branches et feuilles, la longueur des racines (plus profondes), poids total (frais et sec), les indices de vigueur et d'émergence, la surface foliaire augmentent significativement [AEA03]. Sachant que l'accroissement remarquable de la surface de la feuille augmentera le taux de photosynthèse, en raison de la plus grande interception de la lumière et de la plus grande quantité d'assimilates disponibles pour la croissance végétative, et active la formation de protéines ce qui améliorera considérablement la germination et la croissance des plantes. D'une autre part, un retard significatif dans l'apparition de symptômes de virus et brûlure hâtive de l'infection ont été enregistrés et à la fin le stress hydrique qui pourrait être soulagé. Cependant, la suppression du champ magnétique affaiblit la tige de la plante, ce qui suggère le rôle de magnétisme dans la fourniture de l'énergie aux plantes [EDF12].

Selon la plupart des expertises, l'intensité du CM, le sens d'application et la durée d'exposition sont des paramètres importants à prendre en considération car, chaque traitement a une combinaison bien appropriée. C'est la cause pour laquelle que les chercheurs se sont intéressés aux effets du CM sur les organismes végétaux, en particulier sur la germination des graines et la croissance des plantes.

L'amélioration de la croissance par CM semble avoir été confirmée par de nombreux scientifiques comme **D.A. Dulbinskaya** [DUL73], **D. Bathnagar et A. Deb** [BAD77], **P.S. Kavi** [KAV83] et **R. Kato** [KAT88]. **S. Pietruszewski** [PIE93] a également indiqué que la croissance des plantules, l'indice de vigueur des semences et le rendement des cultures ont augmenté lorsque les graines ont été exposées à un CM.

**C.G. Samy** [SAM98] a constaté que l'augmentation du rendement du chou à la suite d'un traitement par un CM, pour une durée d'exposition de 8 heures, et que la floraison était plus tôt.

**Ç. Atak et al.** [AEA03] ont utilisé les graines de Soja qui ont été irradiées par des CM d'intensité variant de (2.9 à 4.6) mT et ceci pour des durées d'exposition respectives de (2.2, 6.6, et 19.8) Sec. Les résultats obtenus montrent que si le taux de formation de tiges a augmenté de 61,91% dans le groupe témoin, a également augmenté respectivement de 86,96% et 74,36%, dans toutes les expériences avec CM, en revanche, si le pourcentage de la formation de racines dans le groupe contrôle est de 14,29%, il s'est élevé respectivement à 26,08% et 35,90% pour les deux autres groupes. Le poids frais des plantules régénérées, pour la durée de traitement de 6,6 secondes, a considérablement augmenté en accordance avec celui du groupe de référence. Les quantités de la chlorophylle a, chlorophylle b et de chlorophylle totale des feuilles ont augmenté sous l'influence du CM pour la durée de 2,2 secondes.

**J. Podlečný et al.** [PPP04] ont constaté que le traitement magnétique (30 et 85) mT pour une durée de 15Sec des graines de deux espèces de fèves avant le semis a eu une influence positive sur le développement de certains traits morphologiques des plantes. En effet, l'exposition magnétique de semences exerce une influence positive sur la germination et la croissance des deux variétés de fèves : l'émergence de la plante était plus uniforme et produite 2-3 jours plus tôt que dans les plantes de référence ainsi que l'amélioration du rendement. A la fin, ils ont remarqué que chaque espèce de fèves agit plus favorablement pour une intensité du champ magnétique (85mT pour le premier type et 30mT pour le second).

**Galland et Pazur** [GAP05] ont édité une revue intéressante, avec plus de 250 articles publiés depuis plus de 60 ans ont été cités, où la sensibilité des plantes au traitement par CM a été discutée à fond. Les auteurs ont confirmé que le CM d'intensité supérieur à celle du champ géomagnétique (35 à 70)  $\mu\text{T}$  pourrait affecter la croissance des plantes et leur métabolisme.

**M. Racuciu et al.** [RCC06] ont cultivé de jeunes plantules de maïs en présence du CMS dont l'intensité est de (50 et 250) mT et ceci dans le but d'observer la dynamique de la longueur de leurs tiges. Les valeurs moyennes et les écarts types ont été évalués quotidiennement. Ils ont remarqué l'effet stimulant du CM, avec une tendance de saturation au 5<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> jour. Ils ont déduit des corrélations linéaires pour décrire la dépendance de la longueur moyenne des tiges avec l'énergie magnétique.

**A. De Souza et al.** [SGS06] ont étudié l'effet de l'exposition des graines de tomate à un CM sinusoïdal, 60 Hz (100 mT pendant 10 mn) et (170 mT pendant 3 mn), sur la croissance et le développement des plantes qu'ils produisaient. Les résultats montrent que l'effet combiné de l'intensité des champs utilisés et les durées d'exposition appliquées aux graines sèches améliorent la croissance et le développement des plantes de tomates ainsi que rendement de leurs fruits. D'autre part, ils ont remarqué un retard significatif dans l'apparition des premiers symptômes de virus et des brûlures précoces et une diminution du taux d'infections. Des résultats similaires ont été trouvés par **A. De Souza et al.** [SSG10] où ils ont prouvé que l'utilisation des CM non uniformes EBF améliore la germination et la croissance précoce des graines de tomate. A cet effet, ils ont cultivé pendant 28 jours, dans une serre, des graines de tomate puis les ont exposés à de diverses combinaisons de CM (80, 120, 160 et 200) mT avec des durées de (1, 3, 5, 10, 15 et 20) mn. Les meilleurs résultats ont été trouvés pour (160 mT pendant 1 mn) et (200 mT pendant 1 mn), où une augmentation significative de l'indice de l'émergence, la longueur des tiges, le poids secs des tiges et des racines ainsi que la surface foliaire par rapport aux graines de référence a été remarquée.

L'objectif de l'étude menée par **E. Martinez et al.** [MCF07] est de déterminer et de quantifier l'effet produit par les CMS (125 et 250) mT pendant (20 minutes, 1 heure, 24 heures, ou en continu (durant toute l'expérience) sur la germination des semences d'avoine. Ils ont trouvé que le temps nécessaire pour obtenir différents pourcentages de germination est plus faible pour les graines exposées aux traitements [(125 mT, 20mn), et (250 mT, continu)], et que le temps moyen de germination (TMG) obtenu pour les graines avec le traitement (125

mt, 20mn), est significativement plus faible (11,48%) que pour le groupe témoin. Cette étude représente un progrès réalisé dans la germination et la réduction de la phase d'induction dans la plupart des traitements magnétiques appliqués. Notons à la fin que l'analyse statistique été réalisée en utilisant le logiciel Seed calculator, développé spécifiquement par Plant Research International (Wageningen, Pays-Bas) pour l'analyse des données de la germination des graines. Ce résultat a été également validé par (**E. Martínez et al.** [MCF9a] **E. Martínez et al.** [MCM9b] et **J. Alvarez et al.** [ACF12] utilisant la même méthode pour l'analyse statistique et en traitant des graines de, tomates pour le premier article, pois et lentilles pour le second et triticale pour le troisième par un CMS de même force et pour différentes périodes.

Afin d'étudier les changements biochimiques des chlorophylles, caroténoïdes totaux et des acides nucléiques, des mesures spectrophotométries ont été réalisées sur des graines de maïs cultivées en présence d'un CM dont l'intensité est comprise entre (50 et 250) mT pour une durée de 14 jours, **M. Răuciu et al.** [RCH08] ont constaté qu'il y'a une amélioration significative de la masse de tissu frais, des pigments assimilateurs, le rapport de la chlorophylle, du niveau moyen des acides nucléiques ainsi qu'une augmentation de la longueur moyenne des plantes.

Le but du travail de **M. Rochalska et al.** [RGZ08], se résume en l'impact des CM, BF (5mT, 16 Hz) sur le rendement et la qualité de la betterave à sucre. Ils ont trouvé que le traitement magnétique accélère le taux de germination, augmente l'émergence de graines, la teneur en chlorophylle des feuilles et la masse des racines au cours de la période de croissance et, par conséquent, conduit à l'obtention de rendement plus élevé. Ce type de traitement a également influencé la teneur en sucre dans la racine de la betterave.

**A. De Souza et al.** [SSL08] ont étudié l'influence des traitements magnétiques sur la croissance des plantes et le rendement final de la laitue sous des conditions biologiques. Pour cela, des graines de laitue ont été exposées à un CM sinusoïdal non uniforme induit par un électro-aimant (120 mT pendant 3 mn), (160 mT pendant 1et 5 mn). Des prélèvements à des intervalles réguliers ont été effectués au cours de l'étape pépinière et de la croissance végétative, pour l'analyse de la croissance. A la maturité physiologique, les plantes de chaque échantillon ont été récoltées où les paramètres de rendement et de rendement final ont été déterminés. Dans la phase pépinière, le traitement magnétique induit une augmentation significative de la longueur des racines et de la hauteur des pousses. Dans la phase végétative, les taux de croissance relatifs des plantes issues de graines exposées magnétiquement étaient

plus grands que ceux représentés par les plantes témoins. Dans la phase de maturité, en comparaison avec les plantes de référence, tous les traitements magnétiques augmentent de manière significative : la hauteur de la plante, la surface foliaire par plante, le rendement final par zone, et la masse fraîche par plante, donc les traitements magnétiques améliorent la croissance et le rendement final des cultures de laitue.

**H.R. Balouchi et al.** [BS09] ont montré l'effet des CEM sur la germination des graines (sèches et humides) des plantes médicinales annuelles et de Cuscute. Une exposition aux CEM (88  $\mu$ T pour 10 et 30 min) et (128  $\mu$ T pendant 10 min) est réalisée pour les graines sèches médicinales annuelles et de (88 et 128  $\mu$ T pour 12 et 24 h) pour ceux de Cuscute. Les graines humides ont été obtenues par imbibition dans l'eau pendant 12 h à 16 °C, ce qui donne en finale une teneur en humidité d'environ 40%. Leurs résultats montrent que certains traitements par CEM ont diminué le pourcentage de germination et l'indice de vigueur des plantules de Cuscute. Ainsi, les traitements par CEM pourraient contrôler la croissance de Cuscute, protégeant ainsi les autres plantes des mauvaises herbes. Pour les plantes médicinales annuelles, les traitements par CEM ont augmenté le pourcentage de germination et l'indice de vigueur des semences. Le meilleur résultat est obtenu pour l'exposition (128  $\mu$ T-10 min).

L'objectif d'**O.J.Odhiambo et al.** [ONW09] est de déterminer si les CEM, AC peuvent être utilisés pour améliorer la croissance des cultures alimentaires car, cela permettra de réduire et de minimiser l'application d'engrais et des produits chimiques pour lutter contre les ravageurs et les maladies favorisant ainsi la croissance des plantes. Des CEM alternatifs 50Hz générés par une bobine de Helmholtz de (0, 5, 10,30 et 60) mT ont été appliqués pour la germination des graines d'haricots, pour des périodes de (3, 4,5 et 6) heures par jour. Après la période d'incubation (4 jours), la longueur radicale de haricots a été mesurée toute les 12h. les résultats obtenus montrent que la période d'incubation a significativement influencé l'allongement radicule des haricots avec un taux optimal de 0.088cm/h, tandis que la période d'exposition et l'intensité du CEM n'ont pas influé de manière significative le taux initial de l'allongement de la radicule et que les haricots qui ont poussé naturellement ont une croissance plus uniforme en longueur que ceux qui sont exposés aux CEM et que les régulateurs de croissance (hormones) sont accélérés après l'exposition au CEM ce qui en résulte un plus grand allongement des racelles.

Dans le travail de **A. Aladjjiyan** [ALA10] la germination des graines de lentille, l'énergie de germination, la longueur des tiges et des racines, ainsi que la masse totale mesurée le 7<sup>ème</sup> et le

14<sup>ème</sup> jour ont été utilisés afin d'évaluer l'effet du traitement de CM (150 mT) pour t (3, 6, 9 et 12) mn. Les résultats obtenus montrent qu'il n'y'a pas de différences significatives entre les échantillons pour la germination des graines et l'énergie de germination, alors que la longueur des tiges, des racines, ainsi que la masse totale ont montré une dépendance avec la dose de traitement. Le meilleur résultat est obtenu pour la combinaison (150 mT avec 6 et 9 mn).

Ce même travail a été repris par **R. Mohammad et al.** [MOM11] pour différentes intensités et périodes d'exposition, où il a trouvé que la combinaison (0.3 et 1.2 T pour t= 10mn) est le traitement qui donne les meilleurs résultats.

**E. Rajasekhar et al.** [RNR11] ont étudié l'effet de divers types de CMS (Helmholtz, pôle nord et le pôle sud), avec de différentes intensités (5, 10, 30 et 60) mT et t (15, 30, 45 et 60) mn sur la vitesse de germination des haricots verts. Les résultats obtenus montrent qu'après augmentation de l'intensité de champ jusqu'à 10 mt, la vitesse de germination s'est améliorée, puis a diminué au-delà de cette valeur. Les meilleurs résultats ont été observés en utilisant un CEM (pôle sud) avec la combinaison de (10 mt 45 mn).

**C.D. Gutiérrez et al.** [GBA11] ont étudié les caractéristiques physiques (la longueur, la largeur et l'épaisseur, le poids de 1000 grains et le poids hectolitre) des grains de deux espèces hybrides de maïs traités avec des CEM (480 mT) et t (3, 6, 9, 12 et 15) mn. Les résultats obtenus montrent clairement que cette exposition a modifié leurs caractéristiques et que chaque type d'hybride a montré une réponse différente à l'application du CEM en raison de leurs spécificités génétiques, en particulier leur composition chimique et structurale.

**V.K.M. Smitha Rani et al.** [SKK12] ont étudié l'influence de rayonnement électromagnétique de faible fréquence, (100, 300, 500, 700 et 1000)  $\mu$ T et de durées (24, 48 et 72) h, sur les graines de tournesol et ceci en évaluant le taux de germination et de croissance, la longueur des pousses et des racines et de la biomasse. Les résultats obtenus montrent que les échantillons exposés à des intensités de (500 et 700)  $\mu$ T pour les durées de (48 et 72) h une augmentation maximale de (10 à 24)% en germination, de (53 à 67)% en longueur des pousses, de (18 à 41)% en longueur de la racine, de (24 à 49)% en poids frais et (40 à 59)% en poids sec indiquant que le traitement avec le CEM d'intensité appropriée peut stimuler la capacité d'absorption et la bioaccumulation de métabolisme dans les graines en germination, qui contribueront ensuite à la croissance accrue de la plante.

L'étude menée par **Edward Fu** [EDF12] a pour but de confirmer l'hypothèse qu'un CM peut affecter la croissance et la santé des plantes. Pour cela, des graines de radis ont été cultivées puis irradiées par un CM statique d'intensité (0.33 et 0.49) T en continu pendant 4 semaines. L'état de santé a été mesuré par la couleur des feuilles, des taches, la courbure de la tige, et le taux de mortalité. Les résultats ont montré que le CM a un effet positif significatif sur la croissance des plantes avec un taux de germination plus grand, leur tiges sont plus élevées, et leur état est plus sain que ceux du groupe de contrôle ; cependant, la suppression du champ magnétique affaiblit la tige de la plante, ce qui suggère le rôle de magnétisme dans la fourniture de l'énergie aux plantes. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec l'intensité de 0.49 T.

Afin de voir l'impact de l'intensité, (15, 25, 35mT) le sens d'application ( $45^\circ, 90^\circ, 0^\circ$ ) et la durée (12h pour tous les cas) (sauf pour la combinaison (35mT,  $0^\circ$ ) la durée est de 6h), des CMS sur la germination précoce des graines et la croissance des germes de radis que cette présente expérience de **Young-jin Lee et al.** [YJD12] a été menée. A partir des différentes mesures accomplies, il a été constaté que les germes de radis exposés au champ montre une germination rapide d'environ (3 à 4) jours par rapport à la référence, et pour une croissance efficace, l'intensité du CMS doit être correctement sélectionnée, par contre, le sens d'application a peu d'effet sur la croissance des pousses de radis.

L'effet de l'exposition des graines du blé à un CM, EBF (50Hz, 0,5 mT), pour une courte durée (20 et 40) S, sur la croissance des semis dans des conditions contrôlées en laboratoire a été étudié par **P. Faeghi et N. Seyedpour** [FAS13]. Les paramètres mesurés sont : le taux de germination (effectué le 8<sup>ème</sup> jour), la hauteur des plantules (effectué 4<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup> jour) et le poids frais (effectué 4<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup> jour). Les résultats obtenus montrent l'existence d'une étrange relation entre le prétraitement, la durée de l'irradiation et la direction de la réponse physiologique de la plante, en effet, la longueur des tiges, la croissance, la germination et le poids des groupes exposés ont respectivement augmenté puis ont diminué par rapport à ceux du groupe de contrôle. Le meilleur impact a été obtenu avec la durée de 40S.

C'est dans le but de voir l'effet de l'augmentation de l'intensité du CM (50 mT) avec des durées de (10, 20 et 30) mn sur les semences de blé, que **W.A.Jabail et al.** [JAH13] ont effectué cette analyse. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour (50 mT, 30 mn) avec

18.8% pour la croissance des racines, 12% pour la croissance des radicelles, 0.52% pour le poids sec des racines et 43% pour le poids sec des radicelles.

Pour l'expérience de **J. Jedlička et al.** [JPA14] des graines de tomate ont été cultivées en conformité avec les normes pratiques agricoles [ISTA] puis exposées à un CM 50 Hz (20, 40 et 60) mT pour une période de 20 mn. L'effet a été mesuré en termes de taux de germination, hauteur des tiges, longueur des racines et taille du fruit. Les avantages de cette méthode résident dans le fait que du moment que la germination et la croissance des jeunes plantes est accélérée, donc il y'a raccourcissement de la période de croissance et de maturation ce qui peut apporter des économies (moins coûts d'énergie). A la fin, la période la plus courte (3 jours (50%)) a été enregistrée dans la deuxième variante expérimentale (40 mT) par rapport aux semences non traitées et la plus longue période (6 jours) de germination a été enregistrée dans la variante de référence.

L'étude **N. Mridha et al.** [MRC14] montre que les caractéristiques dynamiques des racines telles que la longueur totale, la surface et le volume des racines sont en amélioration constante dans les plantes de pois chiches traitées, par des CMS d'intensité de ((0 à 250 mT avec un pas de 50 mT) et de durées de (1, 2 et 3) h) par rapport aux graines non exposées ainsi qu'une augmentation importante de l'indice de vigueur I et II des plantes. Tous ces résultats indiquent que l'utilisation de semences traitées magnétiquement pourrait soulager le stress hydrique dans les graines. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec la combinaison (100mT, 1h).

L'objectif de l'article de **Z. Wei t al.** [WJX15] est l'étude des effets du traitement des semis par CEM (500 et 1500) mT pour des durées de (10 et 20) mn sur les graines de blé. Les résultats ont fourni un aperçu sur les changements induits par les CEM sur les lipides plutôt que les protéines dans les feuilles de blé, ce qui aidera à élucider les mécanismes biologiques des effets des traitements par CEM sur la croissance et le développement des plantes.

Si toutes les études précédemment citées montrent les effets bénéfiques des CM, en revanche, d'autres investigations prouvent le contraire, ie, que les CM ont **des effets nocifs** sur la croissance et le développement des plantes parmi lesquelles, on peut citer l'étude menée par **H. Aksoy et al.** [AUO10] sur les effets génotoxiques des CEM sur certaines plantes où leurs graines ont été mises à germer dans des pots, pendant trois jours, à différentes distances (0 m, 10 m, 25 m, 50 m et (+100 m pour le témoin) des lignes électriques HT de 380 kV. Les résultats obtenus montrent que les CEM dû aux lignes HT augmentaient l'indice mitotique et

les anomalies chromosomiques qui sont due aux dommages causés à diverses protéines et à l'ADN. Puis, **S. Zaidi et S. Khatoon** [ZAK12] ont réalisé une étude sur les effets des CEM des lignes de HT 132 kV sur les plantes, où 13 échantillons appartenant à 10 espèces de la famille des astéracées ont été collectés dans différentes localités de Karachi et ses environs, exposés au CEM, et d'autres spécimens cueillis dans des zones dépourvues de champs électromagnétiques (témoin). Le comportement de la méiose, les produits de la méiose et la fertilité du pollen méiose ont été analysée et les résultats obtenus montrent que les lignes HT créent des CEM qui peuvent provoquer des aberrations chromosomiques au cours de différents stades méiotiques. Ces anomalies peuvent passer aux générations suivantes, entraînant la formation de souches anormales pouvant être stériles.

Pour confirmer leurs résultats, **S. Zaidi et al.** [ZKI18] ont effectué une étude comparative des effets du CEM créés par des lignes de HT de 132, 220 et 500 KV sur 34 spécimens de plantes appartenant à 9 espèces de 3 familles d'angiospermes, à savoir Borraginacée, Brassicaceae et Césalpinacée collectés dans leurs écosystèmes naturels, poussant à Karachi et ses alentours. Ils ont remarqué qu'au fur et à mesure que l'intensité de CEM augmente, un accroissement considérable des aberrations chromosomiques comme la formation univalente et multivalente, le caractère collant, les chromosomes précoces, les retardataires, la division multipolaire. A la fin, ils ont conclu que leur étude a montré que les CEM affectaient les plantes de manière néfaste et pourraient également toucher d'autres organismes vivants habitant à proximité immédiate des lignes HT y compris les êtres humains.

Dans le but d'explorer les effets des CEM sur graines de féverole aux niveaux cellulaire, biochimique et moléculaire, soumises aux lignes HT que cette recherche a été réalisée par **R.M. Gaafar et al.** [GEE18]. Les résultats obtenus montrent que les CEM ont un effet cyto-mutagène sur les extrémités des racines secondaires des plantules de féverole, car ils induisaient de nombreux types d'anomalies chromosomiques telles que les cellules binucléées qui sont considérées comme de puissants marqueurs cytologiques du cancer chez l'homme. Aussi, les CEM ont perturbé les iso formes des protéines de liaison au calcium, qui jouent un rôle important dans le métabolisme du calcium. Ces anomalies ont été remarquées chez les jeunes plants de féverole cultivés directement sous les lignes HT, où l'intensité est de 4051  $\mu$ T et leur taux s'amplifie en diminuant la distance qui les sépare de la source des CEM. A la fin, ils suggèrent qu'une distance de 200 mètres des lignes HT est considérée comme une marge de sécurité.

**Références bibliographiques**

- [ACF12] J. Alvarez, M.V. Carbonell, M. Flórez, E. Martínez, A. Campos, "Study of 125 mT magnetic treatment on the germination and initial growth of triticale seeds", НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА РУСЕНСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ, Том 51, серия 3.1, 2012.
- [AEA03] Ç. Atak, Ö. Emiroglu, S. Alikamanoglu et A. Rzakoulieva, "Stimulation of regeneration by magnetic field in soybean (*Glycine max* L. Merrill) tissue cultures", *Journal of Cell and Molecular Biology* 2: 113-119, 2003.
- [GAP05] P. Galland, A. Pazur, "Magneto reception in plants", *Journal of Plant Research*, 118:6, 371-389, 2005.
- [ALA10] A. Aladjadjiyan, "Influence of stationary magnetic field on lentil seeds", *Int. Agrophys*, 24, 321-324, 2010.
- [AUO10] H. Aksoy, F. Unal et S. Ozcan, "Genotoxic Effects of Electromagnetic Fields from High Voltage Power Lines on Some Plants", *Int. J. Environ. Res.*, 4(4):595-606, autumn 2010.
- [BAD77] D. Bathnagar, A. Deb, "Some aspects of pregermination exposure of wheat seeds to magnetic field I. Germination and early growth", *Seed Res.* 5, 129-137. 1977.
- [BS08] H.R. Balouchi et S.A.M. Modarres Sanav, "Electromagnetic field impact on annual medic and dodder seed germination", *Int. Agrophysics*, 23, 111-115, 2008.
- [DUL73] D.A. Dulbinskaya, "Effect of constant magnetic field on growth of maize seedlings". *Fisiol. Rast*, 20:183-186, 1973.
- [EDF12] Edward Fu, "The effects of magnetic fields on plant growth and health", *Research Article, Young Scientists Journal*, Issue 11, 2012.
- [FAS13] P. Faeghi et N. Seyedpour, "Effects of 50 Hz Electromagnetic Fields on Seed Germination and Early Growth in Wheat (*Triticum spp.*)", *Bull. Env. Pharmacol. Life Sci.*, Vol 2 (5): 52-54, April 2013.
- [GAP05] P. Galland et A. Pazur, «Magneto reception in plants", 118(6):371-89, Dec 2005.
- [GBA11] D.C. Gutiérrez, R.Z. Bautista, C.H. Aguilar, F.A. Pacheco, A.C. Orea et J.L.L. Bonilla, "Physical characteristics of grains of maize pre-sowing treated by electromagnetic fields", *Acta Agrophysica*, 18(1), 17-31, 2011.
- [GEE18] R.M. Gaafar, A. El-Shanshoury, M. R. Eldakak et M. Elhiti, "Biochemical, Molecular and Mutagenic Effects of Electromagnetic Fields on *Vicia faba* L Seedlings", *Egypt. J. Bot.* Vol. 58, N°3, pp. 2018.
- [ISTA] International seed testing association. *Seed Sci. Technol.* 13: 299-513, 1985.
- [JAH13] W.A. Jabail, R.Ch. Abul-Hail et H.F. Hussein, "Effect of magnetic field on seed germination of *Triticum aestivum*", *World Journal of Agricultural Sciences* Vol.1 (5), pp. 168-171, June 2013.
- [JPA14] J. Jedlička, O. Paulen, Š. Ailer, "Influence of magnetic field on germination, growth and production of tomato", *Potravinarstvo*, vol. 8, no. 1, p. 150-154, 2014.

- [KAT88] R. Kato, «Effects of magnetic fields on the growth of primary roots of Zeamays", *Plant CellPhysiol*, 29:1215–1219, 1988.
- [KAV83] P.S. Kavi, "The effect of non-homogeneous gradient magnetic field susceptibility values in situ ragi seed material". *Mysore J. Agric. Sci.* 17, 121–123, 1983.
- [MCF9a] E.Martinez, M.V. Carbonell, M. Flórez, J.M. Amaya et R. Maqueda, "Pea (*Pisum sativum*, L.) and Lentil (*Lens culinaris*, Medik) Growth Stimulation Due to Exposure to 125 and 250 mT Stationary Fields", *Polish J. of Environ. Stud.* Vol. 18, No. 4, 657-663, 2009.
- [MCF9b] E.Martinez, M.V. Carbonell, M. Flórez, J.M. Amaya et R. Maqueda, "Germination of tomato seeds (*Lycopersicon esculentum* L.) under magnetic field", *International Agrophysics*, 23, 45-49, January 2009.
- [MOM11] R. A. Mohammad et M. R. Omrani " Effects of seed pretreatment by stationary magnetic fields on germination and early growth of lentil ", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(12): 1650-1654, 2011.
- [MRC14] N. Mridha et S. Chattaraj, "Effect of Pre-Sowing Static Magnetic Seed Treatment on Germination and Root Characters in Chickpea (*Cicer arietinum* L)", *Journal of Agricultural Physics*, Volume 14, Number 1, June 2014.
- [ONW09] O. J. Odhiambo, F. Ndiritu et W. N Isabel "The influence of AC electromagnetic fields on the initial radicle growth rate of *Phaseolus vulgaris* L", *J. Appl. Biosci*, 22: 1350 – 1358. 2009.
- [PIE93] S. Pietruszewski, "Effect of magnetic seed treatment on yields of wheat", *SeedSci. Technol*, 21, 621–626, 1993.
- [PPP04] Podlečný.J, S. Pietruszewsk et A. Podlečna, «Efficiency of the magnetic treatment of broad bean seeds cultivated under experimental plot conditions", *Int. Agrophysics*, 18, 65-71, 2004.
- [RCC06] M. Racuciu, G.H. Calugaru, D.E. Creanga, "Static magnetic field influence on some plant growth", *Rom. Journ. Phys.*, Vol. 51, Nos. 1–2, P. 245–251, Bucharest, 2006.
- [RCH08] M. Răcuciu, D. Creangă et I. Horga "Plant growth under static magnetic field influence ", *Rom. Journ. Phys.*, Vol, 53, Nos. 1–2, P. 353–359, Bucharest, 2008.
- [RGZ08] M. Rochalska, K. Grabowska et A. Ziarnik, "Impact of low frequency magnetic fields on yield and quality of sugar beet", *Int. Agrophysics*, 23, 163-174, 2008.
- [RNR11] E. Rajasekhar, M. Nagaraju, S. Raisa Reshma et R. Jeevan Kumar, " Effect of Different Static Electromagnetic Fields on Germination Speed of Mung Beans (*Vigna radiata* var. *radiata*)", Vol. 33, no. 2, 2011.
- [SAM98] C.G. Samy, "Magnetic seed treatment. I. Influence on flowering, siliqua and seed characters of cauli flower", *Orissa Journal of Horticulture*, 26: 2, 68-69.1998.
- [SGS6] A. De Souza, García, L. Sueiro, F. Gilart, E. Porrás et L. Licea, "Pre-sowing magnetic treatments of tomato seeds increase the growth and yield of plants", *Bioelectromagnetics*, 4 (27): 247–257, 2006.
- [SKK12] V.K. Smitha Rani, V. Kalarani et R. Karuna, "Influence of low frequency electromagnetic radiation on germination and growth of sun flower seeds (*Helianthus annus* L.)", *Current Biotica* 5(4): 436-445, 2012.

- [SSG10] A.De Souza, L. Sueiro, D. García, E. Porras, "Extremely low frequency non-uniform magnetic fields improve tomato seed germination and early seedling growth", *Seed Science and Technology*, Volume 38, Number 1, pp. 61-72(12), April 2010.
- [SSL08] A. De Souza, L. Sueiro, L.M. González, L. Licea, E.P. Porras et F.Gilart, "Improvement of the growth and yield of lettuce plants by non-uniform magnetic fields", *ElectromagnBiol Med*, 27(2):173-84, 2008.
- [WJX15] Z.Weï, D. Jiao, et J. Xu, "Using fourier transform infrared spectroscopy to study effects of magnetic field treatment on wheat (*triticum aestivum* L.) Seedlings", *Journal of Spectroscopy*, Article ID 570190, 6 pages, Volume 2015.
- [YJD12] L.Young-jin, L. Ji-hun et P.Dong-kook, "Effects of Static Magnetic Fields on Early Seed Germination and Radish Sprouts Growth", *Journal de l'Institut coréen de l'information et sciences de la communication*, Volume 17, 2012.
- [ZAK12] S. Zaidi et S. Khatoon, "Effects of electromagnetic fields (created by high-tension lines) on some indigenous plant species in the vicinity of Karachi–ii. Asteraceae", *Pak. J. Bot.*, 44(4): 1311-1318, 2012.
- [ZKI18] S. Zaidi, S. Khatoon, M. Imran et S. Zohair, "Effects of electromagnetic fields (created by high tension lines) on some indigenous plant species–v. Boraginaceae juss., Brassicaceae burnett and Caesalpiniaceae r. br.", *Pak. J. Bot.*, 50(6): 2237-2244, 2018.

# Chapitre V

## Expérimentation et résultats

V.1 Introduction

V.2 Etude expérimentale

V.3 Matériel et méthodes

V.4 Protocole expérimental

V. 5 Observations et interprétation des résultats

V.6 Conclusion

V.7 Références bibliographiques

V.8 Lexique botanique

## V.1 Introduction

Récemment, l'utilisation de méthodes physiques, tels que le champ électrique, le champ magnétique, le rayonnement laser et les ultrasons, pour la stimulation de la croissance des plantes et le retardement de la sénescence est de plus en plus répandu en raison de leurs effets moins nocifs sur l'environnement et leur commodité pour l'agriculture biologique.

L'exposition des graines au champ magnétique pour améliorer la vitesse de la germination, la croissance, le rendement et la qualité des cultures, constitue l'une des méthodes les plus utilisées malgré que le mécanisme de son impact sur les plantes ne soit pas bien compris. La stimulation magnétique est effectuée par des aimants permanents (champ magnétique constant) ou électro-aimants (champ magnétique variable) avec des intensités, des sens d'application et des durées d'exposition très variés.

Les résultats de travaux de recherches nous permettent de conclure que l'influence du champ magnétique sur le développement des plantes a été étudié de manière intensive, mais pas encore assez profondément, car la compréhension de l'effet stimulant exige la disponibilité d'un riche matériel expérimental.

## V.2 Etude expérimentale

### 2.1 Objectifs

En se basant sur les résultats des travaux de recherches précédemment cités, notre étude expérimentale a pour objectifs :

1. Évaluer l'impact de l'exposition au CMS sur la germination et la croissance des graines de lentilles;
2. Déterminer la relation dose-réponse optimale pour une exposition au CMS; autrement dit, trouver la combinaison idéale (intensité, sens d'application du champ magnétique et durée de l'exposition) qui permettrait d'avoir de meilleurs résultats;
3. Évaluer l'impact de l'exposition au champ magnétique sur l'apparition d'anomalies au cours de la germination et la croissance (observation visuelle de la santé des plantes).

### 2.2 Hypothèses

L'exposition à un champ magnétique supérieur au champ magnétique terrestre peut affecter la germination, la croissance et la santé des plantes.

### V.3 Matériel et méthodes

#### 3.1 Matériel végétal

La lentille est un légume sec (ou légumineuse) qui appartient à la famille des féculents et dont le nom scientifique est: *Lens culinaris* Medik., famille des Fabaceae, sous-famille des Faboideae, tribu des Fabeae (ou Vicieae). C'est une plante d'origine méditerranéenne, qui fût l'un des premiers légumes cultivés par l'Homme. Herbacée annuelle, elle pousse en petite plante touffue de 30 à 40 cm, à tiges très fines, ses feuilles, alternes, composées pennées, comptent de 10 à 14 folioles opposées, oblongues, et sont terminées par une vrille généralement simple ou bifide (Figure V.1). À la base, elles sont munies de stipules dentées. Les fleurs, à la corolle papilionacée typique de la sous-famille des Faboideae, sont de couleur blanche ou bleu pâle et groupées par petites grappes de deux à quatre. Le calice est régulier, à cinq dents étroites et relativement longues. La floraison estivale intervient entre mai et juillet.

Les fruits sont des gousses aplaties, courtes, contenant deux graines aplaties en forme caractéristique de disque faiblement bombé. La couleur des graines varie selon les variétés des plus pâles (vert pâle, blond, rose) au plus foncé (vert foncé, brun, violacé...) (Figure V.2) [LEN].



Figure V.1 Lentille cultivée.



Figure II.2 Diverses variétés de lentilles.

### 3.2 Récipients

Les récipients utilisés pour nos expériences sont des béchers de laboratoire (400 ml) en verre et de forme cylindrique ( $\phi = 70$  mm et  $h = 130$  mm) (Figure V.3).



Figure V.3 Récipients utilisés pour les expériences.

### 3.3 Eau d'arrosage (irrigation)

#### 3.3.1 Pourquoi faut-il arroser les plantes?

Les plantes sont essentiellement constituées d'eau, de 80 à 95 % de leur poids total. Elles puisent la plupart du temps cette eau et les nutriments qui leur sont nécessaires dans les sols par l'intermédiaire de leurs racines. Les plantes éliminent la plus grande part de cette eau par évapotranspiration. Une petite partie participe à la photosynthèse des substances organiques dont les plantes ont besoin pour se développer.

#### 3.3.2 Qualité de l'eau d'arrosage (irrigation)

La qualité de l'eau utilisée pour l'arrosage (irrigation) est un paramètre essentiel pour le rendement des cultures, le maintien de la productivité du sol et la protection de l'environnement. Ainsi, les propriétés physico-chimiques du sol, telles que sa structure (stabilité des agrégats) et sa perméabilité, sont très sensibles au type d'ions potentiellement échangeables présents dans les eaux d'arrosage (irrigation) [VAL04].

La qualité de l'eau d'arrosage peut être mieux déterminée par une analyse chimique en laboratoire. Les facteurs les plus importants pour déterminer la qualité requise de l'eau dans l'agriculture sont les suivants:

- ✓ pH;
- ✓ Risque de Salinité;
- ✓ Risque de Sodium (Degré d'Adsorption du Sodium ou SAR);
- ✓ Carbonate et bicarbonates en relation avec les teneurs en Calcium (Ca) et Magnésium (Mg).

#### 3.3.3 Importance du pH de l'eau d'arrosage

La valeur du pH indique le degré d'acidité ou d'alcalinité (basicité) d'une eau sur une échelle de 0 à 14. Elle correspond au rapport des concentrations des ions acides  $H^+$  (ou protons) et des ions basiques hydroxydes  $OH^-$ . Il est mesuré avec un pH-mètre [IRR] et [MAR15]:

- ✓ Eau acide : pH inférieur à 7;
- ✓ Eau alcaline : pH supérieur à 7;
- ✓ Eau neutre : pH égal à 7.

Or, l'eau est bien évidemment essentielle pour la plante, car c'est grâce à elle qu'elle pourra absorber tous les nutriments dont elle a besoin. Le pH optimum de l'eau est de 6. C'est dans cette zone que les oligo-éléments sont les plus disponibles pour la plante. Néanmoins la mise à disposition régulière d'engrais donne à cette mesure un caractère tout à fait relatif. La fixation, puis la libération des éléments nutritifs ne se faisant pas instantanément.

### 3.3.4 Dureté de l'eau

La dureté de l'eau est définie par le titre hydrotimétrique (TH), qui correspond à la teneur de sels de calcium et de magnésium principalement. Plus une eau est riche en calcium et en magnésium, plus elle est dite "dure". Inversement, une eau pauvre en calcaire est dite "douce". Ainsi, l'importance du calcium (calcaire) dans l'eau est le principal critère déterminant la dureté de l'eau. La dureté de l'eau, associée à son acidité, définissent son agressivité : Une eau douce associée à un pH acide donne une eau agressive [IRR] et [MAR15]. Les eaux sont classées en fonction de leur (TH), Tableau V.1 :

TH (°f)	0 à 7	7 à 15	15 à 30	30 à 40	+ 40
Eau	très douce	douce	plutôt dure	dure	très dure

Tableau V.1 Plage de valeurs du titre hydrotimétrique.

### 3.3.5 Différents types d'eau d'irrigation [VAL04]

#### 3.5.1 Eau distillée

C'est une eau qui a subi une distillation (vaporisation puis condensation) et qui est exempte des minéraux, molécules et organismes que l'on peut trouver dans l'eau "naturelle". Elle peut être considérée comme de l'eau pure, son pH théorique est de 7, mais dans la pratique légèrement acide à cause de la présence inévitable de gaz carbonique en solution. La conductivité électrique de l'eau distillée est proche de celle de l'eau pure : quasiment nulle.

### 3.5.2 Eau osmosée

C'est une eau débarrassée de ses sels minéraux, mais aussi de la plupart des molécules non ioniques. L'osmose inverse est un système de purification de l'eau par filtrage très fin qui ne laisse passer que les molécules d'eau. Ce type d'eau se rapproche beaucoup, par ses caractéristiques, de l'eau distillée.

### 3.5.3 Eau adoucie

Grâce à un adoucisseur d'eau, le calcaire est remplacé par des sels minéraux solubles (NaCl). Un adoucisseur d'eau la ramène à environ 5 °F. L'inconvénient est que cette eau, contenant beaucoup de sel, n'est pas compatible avec la culture des plantes.

### 3.5.4 Eau désionisée

Cette eau est purifiée en passant à travers des cartouches contenant de la résine qui piège les cations et anions pour donner de l'eau sans ions. Mais elle contient encore toute substance non ionique.

### 3.5.5 Eau de pluie

La pluie résulte de l'évaporation suivie d'une condensation qui forme les gouttes d'eau. L'eau de pluie est donc initialement comparable à de l'eau distillée mais en traversant l'atmosphère, elle peut se charger de différents éléments minéraux et éventuellement de polluants. Elle a un pH légèrement acide à cause de l'acide carbonique dissout, mais peut devenir très acide en zone très polluée.

### 3.5.6 Eau minérale

Les eaux minérales sont de natures différentes et contiennent des substances minérales en quantité trop importante. Les eaux minérales présentent souvent des teneurs en magnésium importantes et des teneurs en nitrates généralement faibles. Leur dureté en calcium est très variable. Leur intérêt provient de la présence de substances plus rares comme le fluor ou des oligo-éléments. La composition chimique d'une eau minérale doit être constante, et elle ne doit pas subir de traitement, sinon c'est une eau de source.

### 3.5.7 Eau de source

C'est une eau qui sort naturellement de terre et elle peut subir des traitements physiques ou chimiques pour la rendre potable.

### 3.5.8 Eau de ville

C'est une eau qui est rendue potable grâce à des traitements physico-chimiques. Contrairement à une idée très répandue, l'eau de ville dans la plupart des cas, ne présente aucune nocivité et peut être employée sans risque pour l'arrosage. Les seuls cas réels de toxicité peuvent être dus à des pompages effectués dans des nappes phréatiques envahies partiellement par des infiltrations d'eau salée ou par une dureté non imputable à des carbonates, or, dans une eau de ville de qualité standard, sauf exceptions, 85 à 95% de la dureté totale est constituée par des carbonates. L'eau de ville est en même temps normalement pourvue de tous les oligo-éléments indispensables.

### 3.3.6 Choix de l'eau d'arrosage

Pour notre étude, nous avons utilisé l'**eau distillée** pour l'arrosage des différents échantillons et ceci pour ses propriétés physico-chimiques (pH et TH).

pH=7, le titre hydrotimétrique d'une eau dépourvue de calcium et de magnésium (par exemple de l'eau distillée ou de la lessive de soude) est nul.

## 3.4 Substrat (terreau)

### 3.4.1 Nourriture des plantes

Les plantes se nourrissent de lumière et de gaz carbonique, via la photosynthèse. Or, la photosynthèse est un processus qui permet aux plantes de capter l'énergie solaire et de fabriquer les substances nécessaires à la vie de la plante. C'est la fabrication de matière organique à partir de matière minérale en présence de lumière. Les seuls nutriments nécessaires à la plante sont le dioxyde de carbone de l'air, l'eau et les minéraux du sol. Une conséquence importante est la libération de molécules de dioxygène ( $O_2$ ). Pendant la nuit, la photosynthèse ne se réalise plus, la plante respire comme tout autre être vivant. Elle consomme donc du dioxygène et relâche du dioxyde de carbone  $CO_2$  [MAR15].

Les principaux minéraux utilisables par les plantes sont :

- Azote (N) assimilable par la plante sous forme d'ions : nitrate et ammonium;
- Phosphore (P) assimilable par la plante sous forme d'ions phosphates;
- Potassium (K) assimilable par la plante sous forme d'ions potassium;

Soit la composition de base d'un engrais N/P/K.

Mais aussi:

- Calcium (Ca) assimilable par la plante sous forme d'ions calcium;
- Soufre (S) assimilable par la plante sous forme d'ions sulfates;
- Magnésium (Mg) assimilable par la plante sous forme d'ions magnésium;
- plus des oligo-éléments : fer (Fe) manganèse (Mn), zinc (Zn), cuivre (Cu), bore (B), molybdène (Mo).

Les engrais apportent ces substances qui s'épuisent dans le substrat de nos plantes. Ces dernières ne consomment pas la terre, c'est juste un support qui leur permet de capter l'eau et les éléments nutritifs. Tous ces minéraux contribuent à modifier les caractéristiques de l'eau comme le pH et sa dureté (TH).

### 3.4.2 Choix du substrat et ses caractéristiques

Le terreau (substrat) que nous avons utilisé a les caractéristiques suivantes: Figure V.4 et TabV.2.



Figure V.4 Terreau.

Valeur* pH (H <sub>2</sub> O)	Salinité* (g/l)	N(CaCl <sub>2</sub> )* (mg/l)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (CAL)* (mg/l)	K <sub>2</sub> O(CAL)* (mg/l)	Structure
6.3	1.2	190	270	420	fine

\*valeurs moyennes

TabV.2 Caractéristiques du substrat.

### 3.5 Traitements magnétiques

#### 3.5.1 Aimants permanents

Un aimant est un matériau développant naturellement un champ magnétique et capable d'attirer du fer, le nickel, le cobalt, le chrome. Il possède un pôle nord et un pôle sud. Les pôles de même nature se repoussent, ceux de natures différentes s'attirent. Les aimants sont donc des dipôles magnétiques, dont les pôles sont inséparables.

Il existe des aimants naturels (à base d'un minerai de fer, la magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)) et des aimants artificiels constitués de matières ferromagnétiques, parmi lesquels, on distingue le barreau aimanté, l'aimant en U, l'aiguille magnétique, et les aimants temporaires tels que les électroaimants (Figure V.5).

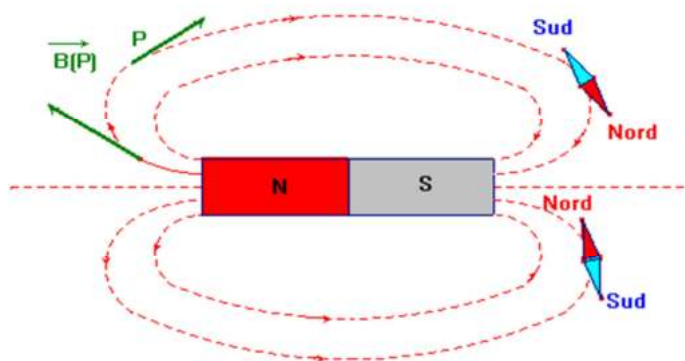


Figure V.5 Spectres magnétiques d'un aimant permanent.

#### 3.5.1 Choix des aimants permanents

Les aimants permanents que nous avons utilisé pour les expériences, ont une forme cylindriques ( $\phi = 10\text{mm}$ ,  $l = 200\text{mm}$ ), fabriqué à partir d'un alliage d'aluminium-nickel-cobalt AlNiCo (matériau magnétique), qui possède une excellente stabilité à la température et à

l'induction résiduelle élevée, ayant subi deux processus majeurs : Castings et frittage. L'intensité du champ magnétique est de 36mT (mesurée à l'aide d'un Teslamètre à effet Hall), Figure V.6,



Figure V.6 Aimant permanent utilisé, [MAG].

## V.4 Protocole expérimental

### 4.1 Situation et caractéristiques géographiques

Le lieu de l'expérimentation est un laboratoire à l'université de Batna 2 avec les caractéristiques ci-dessous:

- Champ magnétique terrestre : 36 $\mu$ T ;
- 35°33'19N, 6°10'43E ;
- température quotidienne : 35 $\pm$  2° /20 $\pm$  2° C;
- taux d'humidité : 29/50% ;
- Le cycle de la lumière naturelle est de 14h et 10h d'obscurité.

### 4.2 Mode opératoire

Selon le protocole de l'International Seed Testing Association [ISTA] et sous les conditions de laboratoires, les bancs d'essai ont été préparés comme suit:

✓ Les graines ont été préalablement trempées, pendant 1h, dans de l'eau distillée. En supposant que l'eau intracellulaire, en raison de ses propriétés magnétiques, joue un rôle dans l'absorption de l'énergie du champ magnétique;

- ✓ Sécher les graines à température ambiante;
- ✓ Mettre 100g de substrat dans chaque récipient;
- ✓ Humidifier le substrat avec 100 ml d'eau distillée;

- ✓ Dans chaque récipient, planter uniformément à 5mm de profondeur dix(10) graines de lentilles ( $\phi=5.38 \text{ mm} \pm 0.01\%$ );
- ✓ Placer les différents récipients près de la fenêtre pour qu'ils soient exposés à la lumière du soleil pendant la journée;
- ✓ Maintenir le substrat humide (ni sec ni mouillé) en l'arrosant une fois par jour avec 30ml ml d'eau distillée;
- ✓ Noter le nombre de graines germées chaque jour à partir du 2<sup>ème</sup> jour;
- ✓ A l'aide d'un pied à coulisse dont la précision est de 0.1mm, mesurer la longueur des racines ( $l_r$ ), la hauteur des tiges ( $l_t$ ) et en déduire la longueur totale ( $l_{tot}$ ) de la plante le 4<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup> et 12<sup>ème</sup> jour du début de l'expérience;
- ✓ Noter quotidiennement les observations visuelles sur l'état de santé des plantes telles que la couleur des feuilles, la fragilité de la plante, la courbure de la tige, présence de taches ou de trous dus essentiellement aux insectes et aux maladies et finalement le taux de mortalité durant la période allant du 8<sup>ème</sup> au dernier jour de l'expérience (12<sup>ème</sup> j).
- ✓ Peser les plantes et noter le poids total ( $P_t$ ) (plantes humides) de chaque échantillon le dernier jour de l'expérience (12<sup>ème</sup> j) avec une balance électronique (Sartorius) dont la précision est de 0.1mg.

### 4.3 Mode d'exposition

Afin de trouver la combinaison adéquate qui donnerait de meilleurs résultats, les paramètres à prendre en considération sont l'intensité, la durée de l'exposition et le sens d'application du champ magnétique.

Pour notre étude, nous avons utilisé des aimants permanents ayant la même intensité (36mT) pour les différents échantillons, des durées de temps de 0, 2, 4 et 8 heures et pour trois sens d'application distincts à savoir : suivant le pôle Nord terrestre (0°PN), suivant le pôle Sud terrestre (180° du pôle Nord) et finalement à 90° du pôle Nord. Les différents échantillons sont :

- Le 1<sup>er</sup> échantillon (T<sub>1</sub>): les graines sont cultivées puis exposées au champ magnétique pendant 2h (0°/PN);
- Le 2<sup>ème</sup> échantillon (T<sub>2</sub>): les graines sont cultivées puis exposées au champ magnétique pendant 4h (0°/PN);
- Le 3<sup>ème</sup> échantillon (T<sub>3</sub>): les graines sont cultivées puis exposées au champ magnétique pendant 4h (180°/PN);
- Le 4<sup>ème</sup> échantillon (T<sub>4</sub>): les graines sont cultivées puis exposées au champ magnétique pendant 4h (90°/PN);
- Le 5<sup>ème</sup> échantillon (T<sub>5</sub>): les graines sont cultivées puis exposées au champ magnétique pendant 8h (0°/PN);
- Le 6<sup>ème</sup> échantillon (T<sub>0</sub>) : les graines ont été cultivées sans exposition (Témoin).

#### IV.5 Observations et interprétations des résultats

La durée de douze jours était largement suffisante pour observer, suivre l'évolution de la germination et la croissance et faire les relevés nécessaires pour une exploitation rentable (Figures V.7, 8 et 9).



Figures V.71<sup>er</sup> Jour de l'expérience.



Figures V.8 8<sup>ème</sup> Jour de l'expérience.



Figures V.9 12<sup>ème</sup> Jour de l'expérience.

. En effet les Figures V.10, 11 et 12 représentent l'état des différents échantillons le 4<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup> et 12<sup>ème</sup> jour du début des expériences.

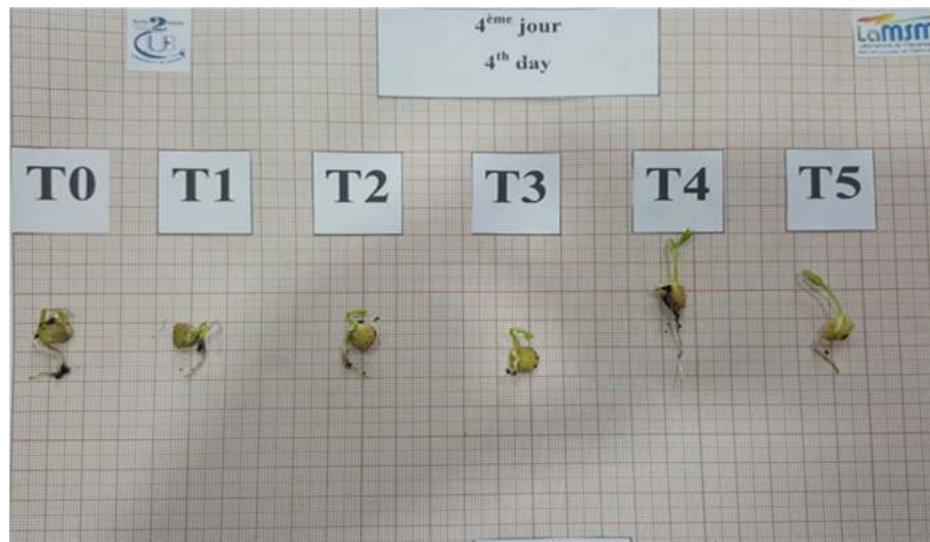


Figure V.10 Etat des échantillons le 4<sup>ème</sup> jour de l'expérience.



Figure V.11 Etat des échantillons le 8<sup>ème</sup> jour de l'expérience.



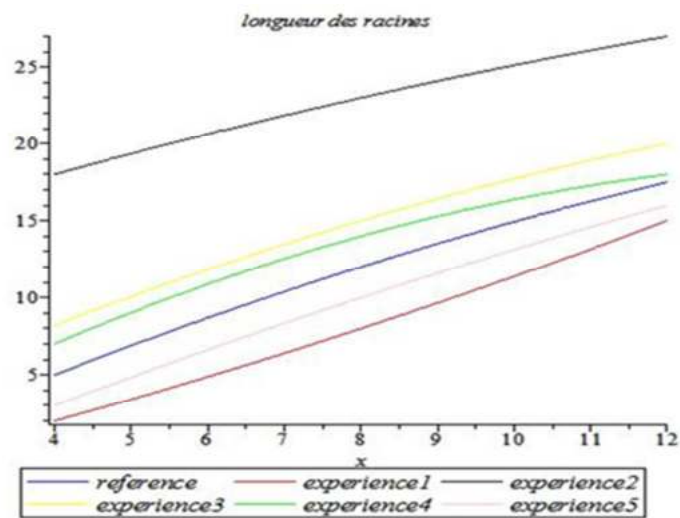
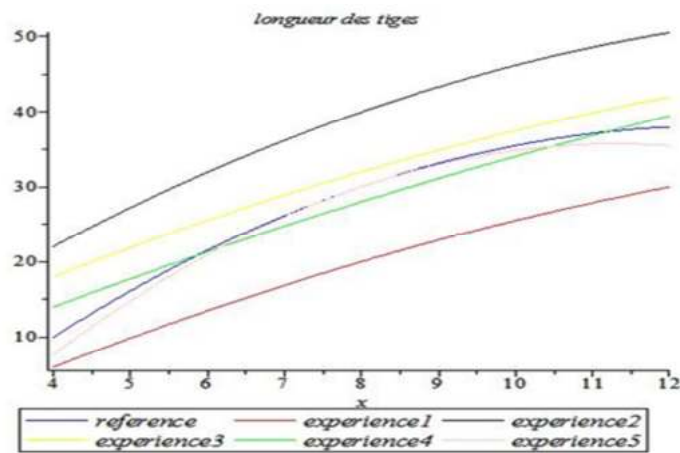
Figure V.12 Etat des échantillons le 12<sup>ème</sup> jour de l'expérience.

L'analyse statistique est réalisée par la méthode d'interpolation linéaire de Lagrange. La comparaison des résultats est effectuée par l'utilisation du (paired t-test) ; Sachant qu'un test n'est qualifié de 'statistiquement significatif' que lorsque la p-valeur, (en anglais p-value pour probability value) est inférieur au seuil de 0.05 [SGS05] (Tableau V.3).

Echantillons	t- Value	p- Valeur < 0.05	Ecart statiquement
T <sub>1</sub>	5.1962	0.0351	Significatif
T <sub>2</sub>	18.8598	0.0028	Très significatif
T <sub>3</sub>	4.3584	0.0488	Significatif
T <sub>4</sub>	1.5119	0.2697	Non significatif
T <sub>5</sub>	4.7561	0.0415	Significatif

Tab V.3 Résultats du paired t-test.

Les Figures (V.13, 14 et 15) représentent la variation respectivement de la longueur des racines, de la longueur des tiges et de la longueur totale de la plante en fonction du nombre de jours.

Figure V.13 Variation de la longueur des racines ( $l_r$ ) en fonction du nombre de jour.Figure V.14 Variation de la longueur des tiges ( $l_t$ ) en fonction du nombre de jour.

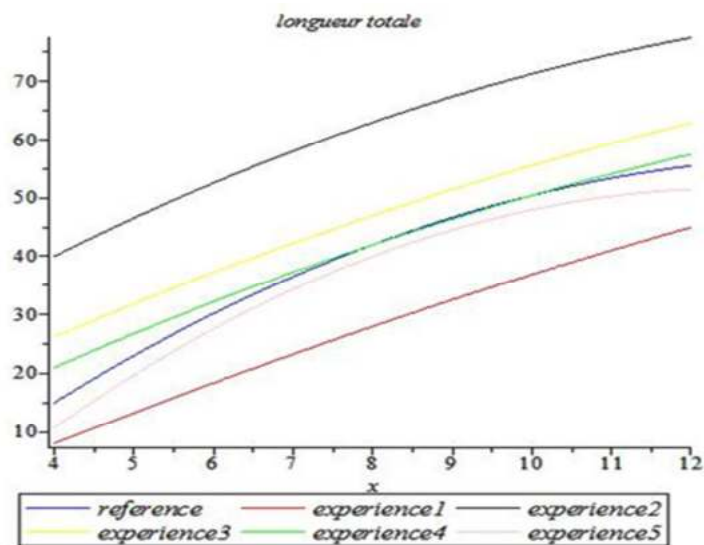


Figure V.15 Variation de la longueur totale de la plante ( $l_{tot}$ ) en fonction du nombre de jour.

Les résultats obtenus montrent que:

➤ les plantes de l'échantillon  $T_2$ , ie, celui ayant évolué sous l'influence du CMS pour une durée de 4h et suivant la direction du pôle Nord a un taux de germination 100% dès le 2<sup>ème</sup> jour (Figure V.16), les longueurs des racines, des tiges et totales ainsi que le poids total (plantes humides) (Figure V.17) est plus élevé que l'échantillon de référence suivi par l'échantillon  $T_3$  où le sens d'application du champ était suivant le pôle Sud terrestre mais, avec la même durée d'exposition;

➤ Les mauvais résultats ont été obtenus pour les échantillons  $T_5$  et  $T_1$ , ie, pour des durées d'exposition respectivement de 8h et 2h,  $0^\circ/PN$  où les taux de germination sont respectivement 70 et 50%, (Figure V.16);

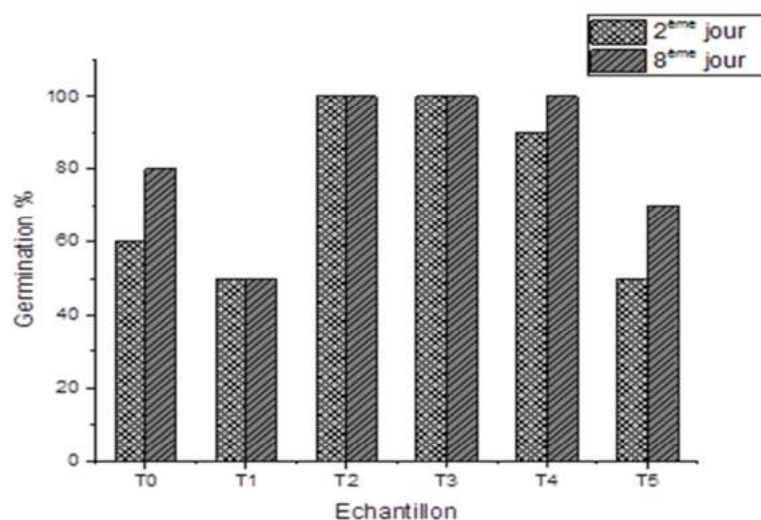


Figure V.16 Variation du taux de germination (2<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup> jour).

- Les plantes où la croissance est statistiquement significative sont les échantillons T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> et T<sub>5</sub>.
- Les observations visuelles, de point de vue état de santé des plantes, sont regroupées dans le tableau V.4;

Echantillons Observations	Mortalité %	Couleur	Etat de santé	Observations générales
T <sub>0</sub>	20	Vert clair	Tiges courbées	Présence d'insectes
T <sub>1</sub>	50	Vert très clair	Tiges courbées Très fragile	/
T <sub>2</sub>	0	Vert	Racines solides	/
T <sub>3</sub>	0	Vert	Racines solides	/
T <sub>4</sub>	0	Vert	Tiges courbées	/
T <sub>5</sub>	30	Vert très clair	Tiges courbées Très fragile	/

Tab V.4 Observations visuelles.

Pour notre étude, la dose qui a donné les meilleurs résultats est (36mT, 2h, 0°) suivi de (36mT, 2h, 180°);

➤ Pour le poids des plantes, les échantillons T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> et sont proches confirmant ainsi les résultats précédant, Figure V.17.

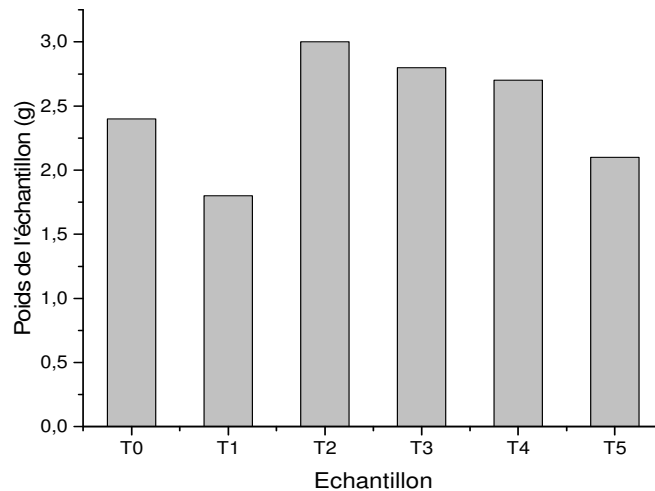


Figure V.17 Variation du poids humide des échantillons.

## V.6 Conclusion

En partant des hypothèses qui stipulent que le champ magnétique a une influence positive sur la croissance des plantes et leur développement que nous avons mené ces expériences.

Les résultats obtenus montrent que les échantillons ont répondu différemment à l'irradiation par le champ magnétique. En effet, les meilleurs résultats ont été obtenus pour la combinaison (36mT, 2h, 0°) avec des racines plus solides prouvant ainsi que magnétisme accélère la croissance des végétaux et leur fournit de l'énergie pour pousser non seulement plus vite et plus robuste, mais aussi plus sains pour mieux survivre, mais à condition de trouver la alliance appropriée entre ces trois paramètres (intensité, sens d'application du champ et la durée d'exposition).

Nous avons aussi constaté que la couleur des feuilles était un peu clair et les tiges légèrement incurvées et **la présence d'insectes dans le groupe témoin.**

## V.7 Références bibliographiques

- [BOU11] S. Bourget, "Evaluation de l'effet des champs magnétiques statiques sur le mûrissement et la sénescence des tomates en post-récolte", Thèse de Doctorat, Département des sciences des aliments et de nutrition, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec, 2011.
- [MAR15] H. Marweni, "Effet de l'irrigation par l'eau magnétisée sur la tomate", Institut Supérieur de Biotechnologie de Sfax - Diplôme en Licence Appliquée en Protection de l'environnement Parcours traitement et valorisation des rejets, 2015.
- [SGS05] A. De Souza, D. García, L. Sueiro, L. Licea and E. Porras, "Pre-sowing magnetic treatment of tomato seeds: effects on the growth and yield of plants cultivated late in the season", Spanish Journal of Agricultural Research, 3(1), 113-122, 2005.
- [VAL04] P. Vallée, "Etude de l'effet des champs magnétiques basse fréquences sur les propriétés physico-chimiques de l'eau", Thèse de Doctorat, 2004.
- [IRR] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Irrigation>
- [ISTA] International Seed Testing Association (ISTA) <https://www.seedtest.org/>
- [LEN] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Lentille\\_cultiv%C3%A9e](https://fr.wikipedia.org/wiki/Lentille_cultiv%C3%A9e)
- [MAG] <http://www.magnetosynergie.com/Pages-Fr/Aimants/FR-Aimants-06.htm>

## V.8 Lexique botanique

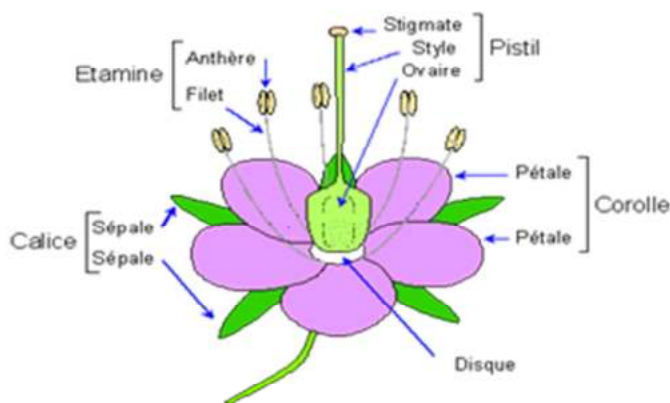
**Agrégat:** Assemblage élémentaire entre les particules minérales du sol (sables et limons) et les ciments colloïdaux (argiles, matières humiques, hydroxydes de fer et d'aluminium) qui caractérise, à l'échelle macroscopique, la structure du sol.

**Angiospermes:** ont des plantes à graines qui possèdent des ovules contenus dans des ovaires qui, à la suite d'une double fécondation, donneront un fruit. Par ailleurs, leurs organes reproducteurs sont condensés en une fleur.

**Astéracées:** La famille des Astéracées (anciennement nommées "composées") est une importante famille de plantes dicotylédones (principalement herbacées) qui comprend près de 13000 espèces réparties en 1500 genres.

**Bifide:** Fendu en deux.

**Calice:** est constitué par l'ensemble des sépales. Premier verticille floral, il a un rôle protecteur de la fleur, figure ci-dessous;



**Cellule binucléée:** Cellules qui possèdent 2 cellules. Il s'agit souvent d'un signe de souffrance cellulaire suite à une infection.

**Corolle:** (ou corole), dans le domaine de la botanique, désigne la partie de la fleur formée par l'ensemble de ses pétales.

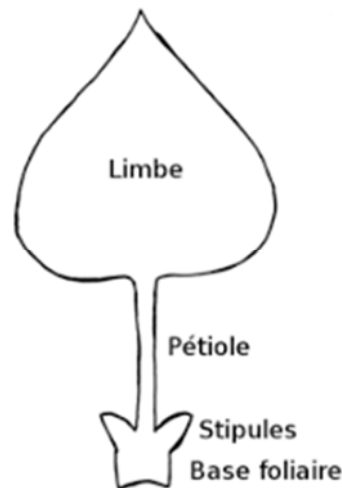
**Cytokine:** est une substance élaborée par le système immunitaire, réglant la prolifération de cellules.

**Foliole:** La foliole (du latin foliolum, « petite feuille »), parfois appelé penne, est une pièce foliaire constituant une des parties du limbe d'une feuille composée. La foliole a la même structure interne que le limbe.

**Génotoxique:** Agents d'origine physique ou chimique, ex: rayonnement ultraviolet) provoquant l'apparition de lésions dans l'ADN, qui peuvent éventuellement compromettre l'intégrité

physique (cassure chromosomique) ou fonctionnelle du génome. Les produits génotoxiques peuvent notamment être à l'origine de déficience transmise aux descendants et/ou de cancers.

**Limbe:** d'une feuille de végétal est la partie de cet organe située à l'extrémité du pétiole. Cette pièce foliaire est en général très étalée et comporte de nombreuses cellules photosynthétiques, car c'est un organe particulièrement adapté à la capture de l'énergie lumineuse.



Différentes pièces foliaires d'une feuille complète.

**Méiose:** est constituée de deux divisions cellulaires successives qui donneront naissance aux gamètes (cellules sexuelles pour la reproduction). A l'issue de la méiose, la cellule originale aura donné naissance à quatre cellules haploïdes dont les génomes auront été recombinaisonnés de manière unique.

**Mitose:** est le processus de reproduction conforme (à l'identique) des cellules, ie, à l'issue de la mitose, la cellule mère s'est divisée en cellules filles identiques entre elles et identique à la cellule qui leur a donnée naissance.

**Mutagène:** Agent susceptible de provoquer des mutations de l'ADN (étape initiale de la cancérogenèse) à condition que cette mutation porte sur des gènes impliqués dans le processus de cancérogenèse. Les agents dits cancérogènes directs sont également mutagènes.

**Nappe phréatique:** (on l'appelle aussi nappe aquifère) est une réserve d'eau qui se trouve sous la surface de la terre au-dessus d'une poche de terre imperméable.

**Oblong:** Qui est plus long que large.

**Pétiole:** Partie rétrécie de certaines feuilles vers la tige.

**Protéine iso forme:** dans le domaine de la biologie / biochimie et biologie moléculaire définit une protéine appartenant à une famille dont les représentants possèdent une structure très proche, due à une légère variation de la séquence de leurs acides aminés, et ont, de ce fait, des fonctions

voisines. Les protéines iso formes, qui dérivent d'un même gène ancestral, sont codées par des gènes situés à des locus chromosomiques différents.

**Sénescence:** est le processus de vieillissement biologique : c'est la suite des changements irréversibles dans un organisme qui aboutissent à la mort. Ce processus physiologique débute après la phase de maturité et se traduit par la dégradation progressive et inéluctable des fonctions vitales : reproduction, motricité, système immunitaire, etc.

**Titre hydrotimétrique:** (T.H), ou dureté de l'eau, est l'indicateur de la minéralisation de l'eau. Elle est due uniquement aux ions calcium et magnésium. La dureté s'exprime en ppm m/V (ou mg/L) de CaCO<sub>3</sub> ou en degrés français (symbole °f ou °fH). Un degré français correspond à 10 ppm de calcaire représentant  $10^{-4}$  mol L<sup>-1</sup> de calcium, soit 4 mg/L de Ca<sup>2+</sup>, ou encore 2,4 mg de magnésium par litre d'eau.

**Une substance mutagène:** peut provoquer des changements dans la structure du matériel génétique d'un être vivant, des effets néfastes héréditaires sur la descendance.

**Vrille:** En botanique, est une pièce foliaire correspondant à un organe spécialisé permettant à certaines plantes grimpantes de s'accrocher à des supports divers.

## **Conclusion générale**

1. Problématique et solutions
2. Perspectives

## 1. Problématique et solutions

Cette thèse est un travail de recherche ayant pour objectif l'étude de l'influence des CEM et CMS sur les organismes vivants humains et végétaux.

Le premier travail réalisé est une application par simulation numérique des effets de l'exposition à une ligne HT 440 KV, sur la vitesse d'écoulement dans les capillaires qui alimentent un échantillon musculaire humain. Les résultats obtenus ont montré une augmentation de la vitesse du sang dans les capillaires. Cet effet pourrait améliorer le débit sanguin comme mentionné dans les travaux de recherche expérimentaux de X. Shenzhi et al [SOO00] et J. Gmitrov et al [GOO02].

La deuxième application, une étude numérique sur le contrôle actif de l'écoulement sanguin dans l'aorte, avec ou sans athérosclérose, avec un CEM externe. Les résultats obtenus ont montré que:

- ✓ En appliquant un CEM, la vitesse, dans la partie descendante de l'aorte, est réduite et devient plus uniforme. Le développement de la zone de recirculation du sang diminue dans l'arc de l'aorte ;

- ✓ Le contrôle de l'écoulement sanguin peut également s'effectuer par le choix du sens de l'application du CEM. Lorsque le CEM est appliqué dans la direction de l'écoulement sanguin, un gradient de pression relativement fort est obtenu et l'écoulement sanguin devient plus régulier autour de l'athérosclérose. Les zones de recirculation disparaissent complètement et les lignes de flux sanguin sont similaires à ceux de l'aorte sans athérosclérose ;

- ✓ L'écoulement sanguin peut être également contrôlé par l'intensité du CEM ; l'augmentation de l'intensité du CEM entraîne une augmentation de l'amplitude de la pression et du gradient de pression le long de l'aorte. Une vitesse, plus uniforme, dans l'aorte est également obtenue pour les valeurs d'intensité les plus élevées et la zone de recirculation disparaît complètement. La contrainte de cisaillement augmente avec l'augmentation de l'intensité du CEM.

À partir de ces résultats, nous pouvons conclure que l'écoulement sanguin dans l'aorte humaine peut être contrôlé en appliquant un CEM car il permet de minimiser les instabilités

d'écoulement dues aux singularités géométriques de l'aorte. Ces résultats ont été validés par l'étude expérimentale menée par R.Tao, K. Huang [TAH11].

Les résultats de la partie expérimentale, entreprise pour déterminer l'influence du CMS, à des durées différentes et dans divers sens tout en maintenant l'intensité constante (36mT), sur la germination et la croissance des graines de lentilles ont montrés :

Une augmentation du taux de germination (de 30 à 40)% au 2<sup>ème</sup> jour et de 20% au 8<sup>ème</sup> et les paramètres de croissance ; longueur des racines de 102% à 155%, celle des tiges (de 103 à 132)% et la longueur totale (de 103 à 139.6)% ainsi que la masse humide des graines de (112.5 à 125)%. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour la combinaison (36 mT, 2h, 0°/PN). La présence d'insectes a été également observée dans l'échantillon Témoin (non exposé), montrant ainsi que les CMS peuvent être utilisés comme pesticides.

## 2. Perspectives

Dans un but de continuité de ce travail, les axes de recherche suivants, sont à notre avis prometteurs :

- Etude du cas où le sang est considéré comme un fluide non newtonien avec une vitesse d'entrée (pulsation) rythmée sur la fréquence cardiaque ;
- Etude de l'effet de la variation de la distance entre la source et les tissus biologiques ;
- Etude de l'effet de la variation des caractéristiques électromagnétiques des différents tissus ;
- Etude des effets de l'exposition des plantes aux CMS dans des enceintes spécialisées afin de contrôler un maximum de paramètres.

**Résumé :** Ce travail a pour objectif principal d'étudier l'influence des champs électromagnétiques (CEM) et magnétiques statiques (CMS) sur les organismes vivants (humain et végétal). L'étude comprend une partie numérique et une partie expérimentale. Les résultats de la première application numérique, sur l'amélioration de la microcirculation d'un tissu musculaire humain exposé à une ligne HT 440 KV, ont été validés par des résultats expérimentaux de différents auteurs. Les résultats de la deuxième application numérique ont montré que l'écoulement sanguin dans l'aorte humaine avec ou sans athérosclérose peut être contrôlé par un CEM externe vu qu'il permet de minimiser les instabilités d'écoulement dues aux singularités géométriques de l'aorte.

Les résultats de la partie expérimentale ont montrés que la combinaison (36 mT, 2h, 0°/PN) est celle qui donne les meilleures cultures; la présence d'insectes observée dans l'échantillon Témoin (non exposé) a montré les CMS peuvent être utilisés comme pesticides.

**Mots clés:** Magnétohydrodynamique, Vitesse du sang, Tissus vivants, Méthode des volumes finis, phénomènes électromagnétiques, Athérosclérose, Contrôle actif, Germination.

**Abstract:** The main objective of this work is to study the influence of electromagnetic (EMF) and static magnetic fields (SMD) on living organisms (human and plant). The study includes a numerical part and an experimental part. The results of the first digital application, on the improvement of the microcirculation of human muscle tissue exposed to a 440 KV HT line, have been validated by experimental results from different authors. The results of the second digital application have shown that blood flow in the human aorta with or without atherosclerosis can be controlled by an external CEM since it makes it possible to minimize the flow instabilities due to the geometrical singularities of the aorta. The results of the experimental part showed that the combination (36 mT, 2h, 0°/PN) is the one that gives the best crops; the presence of insects observed in the control sample (unexposed) showed CMS can be used as pesticides.

**Key words:** Magnetohydrodynamics, Blood velocity, Living tissues, Finite volume method, Electromagnetic phenomena, Atherosclerosis, Active control, Germination.

**الخلاصة:** الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير المجال الكهرومغناطيسي (EMF) والمجالات المغناطيسية الثابتة (SMF) على الكائنات الحية (الإنسان والنبات) تشمل الدراسة جزءاً رقمياً وجزءاً تجريبياً. تم التحقق من صحة نتائج أول تطبيق رقمي، على تحسين دوران الأوعية الدقيقة في الأنسجة العضلية البشرية المعرضة لخط HT 440 KV، من خلال نتائج تجريبية من مؤلفين مختلفين. أظهرت نتائج التطبيق الرقمي الثاني أن تدفق الدم في الشريان الأورطي البشري مع أو بدون تصلب الشرايين يمكن التحكم فيه بواسطة CEM خارجي لأنه يجعل من الممكن تقليل عدم استقرار التدفق بسبب الفروق الهندسية للأبهر. أظهرت نتائج الجزء التجريبي أن المجموعة (36 mT، 2h، 0°/PN) هي التي تعطي أفضل المحاصيل. وأظهرت وجود الحشرات التي لوحظت في عينة التحكم (غير معرّش) أن CMS يمكن استخدامه كمبيدات.

**الكلمات المفتاحية:** المغناطيسية الديناميكية ، سرعة الدم ، الأنسجة الحية ، طريقة الحجم المحدود ، الظواهر الكهرومغناطيسية ، تصلب الشرايين ، التحكم الفعال ، الإنبات.