



Mémoire de Projet de fin d'étude

Préparé par

Lamiaie HADDACHA

Pour l'obtention du diplôme

Ingénieur d'Etat en

SYSTEMES ELECTRONIQUES & TELECOMMUNICATIONS

Intitulé

**ETUDE ELECTROMAGNETIQUE
& THERMIQUE DES MAGNETRONS**

Encadré par :

Pr M.JORIO

Mr R.BENNANI (MASciR-Micro)

Soutenu le 25 Juin 2013, devant le jury composé de :

Pr M.JORIO : Encadrant

Pr R.BENNANI : Encadrant

Pr N.ESSBAI : Examineur

Pr A.AHAITOUF : Examineur

Pr N.S.ECHATOUI : Examineur

Dedication:

*To my mother who has done everything for me,
To my father who never hesitated to encourage me,
To my brothers: Elmehdi & Youness,
To the spirits of my grandparents,
To my family,
To my teachers,
To my all best friends,
To all who believes in human values.*

Acknowledgments

At first, I thank ALLAH, who inspires me strength and endurance to complete this project.

Before to start, I would like to think Pr.M.JORIO and Mr.R.BENNANI, for their efforts, encouragements and support during my training.

I would like to thank greatly all MASciR Micro& Nanotechnology staff, they allowed me to do this training in a wonderful environment and they were too helpful especially Mr. Francois BOURZEIX, Dr.BEN YOUSSEF, Dr.HAMDOUN, and all the team.

I greatly thank all the contributors for their help I would like to thank who has encouraged me infinitely and has been so patient with me during the preparation of this report.

Abstract

Whenever we warm food, we do not imagine the complexity of the device used and the physical phenomena caused by simply pressing the « on » button of a microwave oven.

In this work we try to describe the operation of a microwave oven and give a more precise and clear vision of what are the microwaves, the component responsible for the generation of these waves, and we will try to offer solutions to problems encountered in the use of microwave ovens.

Introduction générale

Chaque fois que nous dégelons ou que nous réchauffons des aliments, nous n'imaginons pas la complexité du dispositif mis en œuvre et des phénomènes physiques engendrés par une simple pression sur le bouton « on » d'un four à micro-ondes.

Dans ce travail, nous essaierons de décrire le fonctionnement d'un four et de donner une vision plus précise et la plus claire possible de ce que sont les micro-ondes, le composant responsable sur la génération de ces ondes. Nous tenterons aussi de proposer des solutions aux problèmes rencontrés lors de l'utilisation des fours à micro ondes.

Le présent rapport est structuré comme suit :

- Le premier chapitre concerne la présentation de l'organisme d'accueil ainsi que les étapes par lesquelles on est passé pour atteindre les objectifs prédéfinis.
- Le deuxième chapitre concerne une étude générale des magnétrons pour déterminer les critères d'un bon fonctionnement. En se basant sur ces paramètres, on a choisi le magnétron qui semble être le plus adapté au four industriel de la société COSUMAR objet de ce travail.
- Le troisième chapitre est consacré à la description du phénomène de chauffage par micro-ondes et de la propagation des ondes dans le four.
- Le quatrième chapitre concerne le développement d'un four à micro-ondes domestique comme base des fours industriels tout en s'intéressant à la simulation électromagnétique de ce four.
- le chapitre cinq est consacré au développement du four industriel et aux simulations des modifications a apportées sur ce four pour augmenter son rendement. .
- Une conclusion mettra fin à ce rapport.

SOMMAIRE

Dedication.....	3
Acknowledgments.....	4
Abstract	5
Introduction générale	6
Nomenclature	8
Liste des figures	9
Liste des tables	11

CHAPITRE I : introduction générale

1. Historique	13
2. Présentation de l'organisme d'accueil : MAsciR	13
3. Motivation / problématique.....	14
4. Objectifs.....	15

CHAPITRE II : Etude des magnétrons

I- Générateur hyper-fréquence : Magnétron

1. Introduction.....	17
2. Structure du magnétron.....	18
3. Carte d'alimentation du magnétron	18
4. Principe du fonctionnement du magnétron.....	20
5. Paramètres influent son fonctionnement	22
a. Matière de la cathode.....	22
b. Les formes des cavités dans l'anode	24
c. La valeur du champ magnétique critique	25
6. Justification du choix du magnétron	27

II-Description du logiciel CST : Computer Simulation Technology	29
-----------------------------------------------------------------------	----

1. Généralité sur CST studio Suite.....	29
a. CST PARTICLE Studio.....	30
b. CST Microwave Studio.....	30
c. CST Mphysics Studio	30
III- Simulation du magnétron	31
1. Simulation de la trajectoire de charges sous CST PARTICLE	31
a. Description du modèle de simulation	31
b. Résultats de simulation	32
2. Simulation thermique sous CST Mphysics	33
a. Description	33
b. Résultats	33

Chapitre III : Chauffage par micro-ondes

I- Structure générale du four à micro-ondes	36
II- Propagation des micro-ondes	37
1. Propagation en espace libre	37
2. Propagation en guide d'onde	39
3. Aspect énergétique	40

Chapitre IV : Développement d'un four a micro-ondes domestique

I- Introduction	43
II- Simulation électromagnétique du four a micro-ondes domestique sous CST Microwave Studio	
a. Géométrie	43
b. Conditions aux limites & propriétés des matériaux	44
c. Comportement du magnétron	44
d. Source équivalente du magnétron dans CST Microwave Studio	45
e. Distribution du champ électromagnétique a l'intérieur de four....	46
f. Puissance et interaction avec la matière	49
g. Configuration optimisée du four	50

Chapitre V : Développement d'un four a micro-ondes industriel (en perspective)

I-	Introduction	54
II-	Description de l'état actuel	55
III-	Configurations optimisées.....	55

CONCLUSION	58
-------------------------	-----------

NOMENCLATURE

Le séparateur décimal est le point.

\vec{B}	Champ d'induction magnétique	(T)
\vec{E}	Champ électrique	(V.m ⁻¹)
q	Charge d'électron	(C)
m	Masse de l'électron	(g)
\vec{v}	Vitesse de l'électron	(m.s ⁻¹)
r_a	Rayon de l'anode	(m)
r_0	Rayon de la cathode	(m)
I_{bob}	Courant à l'électro-aimant	(A)
I_a	Courant anodique	(A)
V_a	Tension anodique	(V)
F_0	Fréquence d'oscillateur libre	(Hz)
ω_0	Pulsation de l'oscillation libre	(rad/s)
	Longueur d'onde	(m)
	Rendement	
Cst	Computer Simulation Technology	
RF	Radio fréquence	
T.O.S	taux d'ondes stationnaire	
UHF	Ultra Haute Fréquence	

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1 :Structure organisationnelle de MASciR	14
Fig. 2.1 : Magnétron de 1,2 kW à 2,45 GHz	18
Fig. 2.2 :Composition du magnétron.....	18
Fig.2.3 :Schéma de base de la carte d'alimentation du magnétron	19
Fig. 2.4 :Diode de protection	19
Fig. 2.5:Trajets des électrons en absence du champ magnétique et en présence du champ magnétique	20
Fig. 2.6:Le flux des électrons dans l'espace d'interaction	20
Fig. 2.7 : Vue en coupe d'un magnétron de type « pointe de tarte » montrant les fentes et les bride de jonction.....	21
Fig. 2.8 :Les différentes formes des cavités du magnétron	24
Fig. 2.10 :Les trajectoires des électrons pour les différentes valeurs de champ Magnétique.....	27
Fig. 2.11 : Modèle du magnétron sous CST PARTICLE.....	31
Fig.2.12 :L'énergie des électrons émis par la cathode	32
Fig. 2.13: Paramètre de réflexion S11 du magnétron simulé.....	32
Fig. 2.14 : Température du magnétron lors du fonctionnement normal.....	33
Fig.2.15 :Température du magnétron après ajout du système de refroidissement.....	34
Fig.3.1 : Composition d'un four a micro-ondes	36
Fig.3.2 :Propagation en espace libre d'une onde plane progressive électromagnétique	38
Fig. 3.3 :Guide d'onde rectangulaire.....	39
Fig. 4.1 : Configuration utilisée dans le four a micro-ondes de la cavité, où est représentée une charge de forme cylindrique placée au centre de la cavité.....	44
Fig. 4.2 : paramètre de réflexion S11	45
Fig. 4.3 : modèle du four en remplaçant le magnétron par le waveguide port.....	46
Fig. 4.4 : paramètre S11 du port 'waveguide	46

Fig. 4.5 : distribution du champ électromagnétique.....	47
Fig. 4.6 : distribution du champ pour différentes coupe du plan (Y, Z)	48
Fig. 4.7 : champ a l'intérieur de l'aliment décalé.....	49
Fig. 4.8 : puissance a l'intérieur de l'aliment	50
Fig. 4.9 : model du four avec la source au coin	50
Fig. 4.10 : le S11 de la source dans la position actuelle	51
Fig. 4.11 : distribution uniforme du champ électromagnétique	51
Fig. 5.1 : modèle du four industriel actuel	55
Fig. 5.2 : configuration optimisée 1 : on ajoute un plateau dans la partie supérieur du four et on supprime une ligne de magnétons.....	56
Fig. 5.3 : configuration optimisée 2 : on supprime les magnétons des deux faces parallèles et on les places au plafond	56

LISTE DES TABLES

Tableau 1 : ressources humains à MASciR	13
Tableau 2 : ressources financières de MASciR.....	13
Tableau 3 : Propriétés des matériaux utilisés dans la fabrication des cathodes..	23
Tableau 4 : classement des magnétrons.....	28
Tableau 5 : caractéristiques des matériaux.....	44

CHAPITRE I:
INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Historique

En 1946, le Dr Percy Spencer testant un nouveau magnétron, dans le cadre de recherches sur les radars, remarqua que la barre chocolatée, qui se trouvait dans sa poche, avait fondu.

Intrigué, il disposa des grains de maïs à proximité du tube et observa le pop corn sauter à travers tout son laboratoire. Le lendemain, Spencer et un collaborateur placèrent un œuf près du magnétron. Ils le virent trembler puis, à cause de la forte pression interne due à la rapide hausse de température dans l'œuf, exploser. Immédiatement Spencer en déduisit que ces réactions étaient provoquées par une exposition à de l'énergie provenant des micro-ondes.

Il façonna une boîte métallique dotée d'une ouverture par laquelle pouvaient pénétrer des micro-ondes. Une fois l'énergie dans la boîte, elle ne pouvait plus en sortir ; ainsi se créait un champ électromagnétique à haute densité. Lorsque de la nourriture était placée dans la boîte et l'énergie envoyée, la température des aliments s'élevait très rapidement. Des ingénieurs rejoignirent Spencer sur son projet, le développant dans l'optique d'un usage plus pratique. Vers la fin de l'année, la Raytheon Company déposa un brevet proposant l'utilisation des micro-ondes pour cuire des aliments.

Dans ce travail, réalisé à MASCiR, on essaie de comprendre le fonctionnement du four à micro-ondes.

2. Présentation de l'organisme d'accueil: MASciR

a. Brièvement

MASciR, Moroccan Foundation for Advanced Science, Innovation and Research, fondée en Mars 2007 par le gouvernement Marocain en tant que fondation à but non-lucratif, pour assurer le développement de la technologie et de l'innovation avec des partenaires clients, en particulier dans les domaines de la micro-électronique, l'énergie, l'environnement, etc.

b. MASciR en chiffres

Ressources humaines

Doctors	28
PhD	23
Engineers	24
Techniciens	7
Support	19
TOTAL	101

Ressources financières

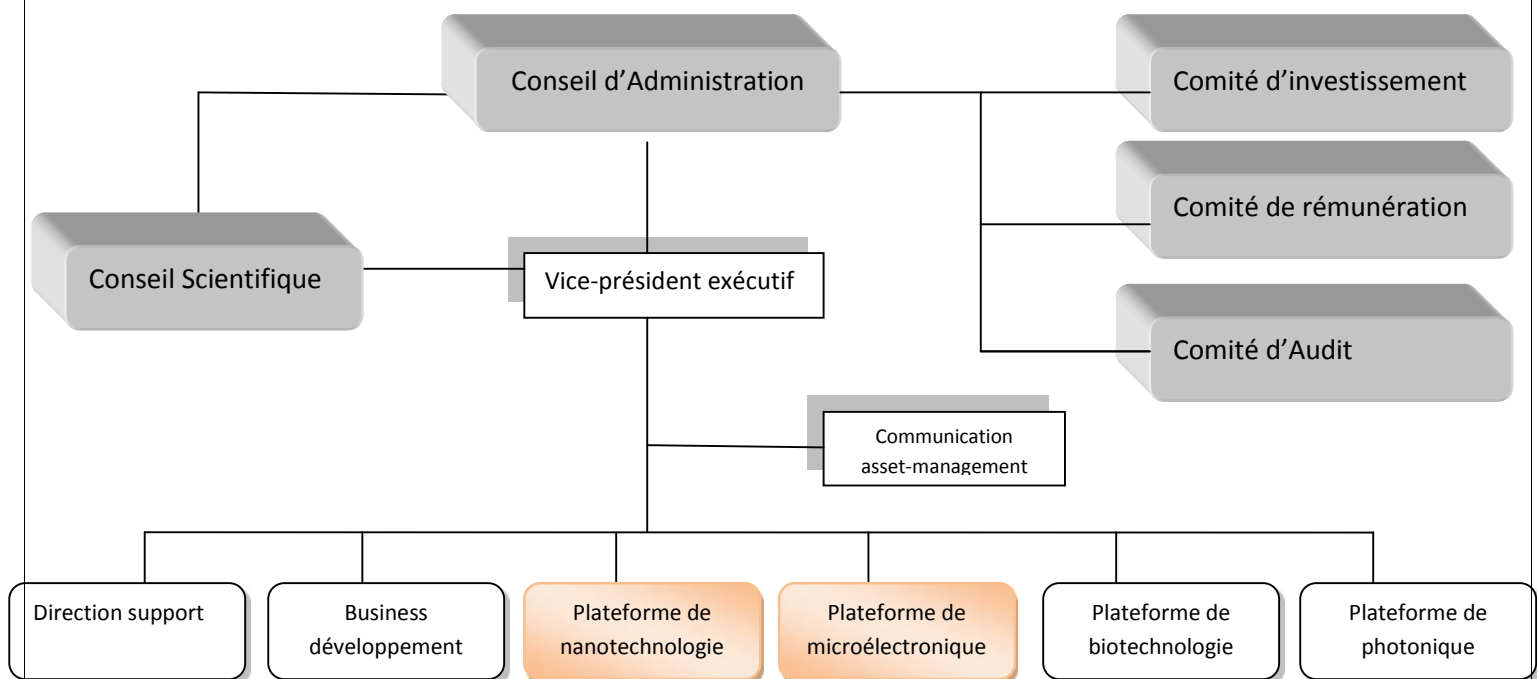
Gouvernement	M\$ 34 (300 MD)
HASSAN II foundation	M\$ 17 (150MD)
HASSAN II academy	M\$ 2.5 (21 MD)
TOTAL	M\$ 53.5 (470 MD)

c. Mission

Pour devenir un centre de recherche et de développement par excellence, MASciR fournira ses services aux entreprises et organisations dans les domaines suivants :

- L'intégration et la miniaturisation des systèmes en micro-électronique
- Modélisation des systèmes complexes (analyse thermique, simulation électromagnétique, conception mécanique et simulation ...)
- Fiabilité et analyse des défaillances
- Prototypage rapide et industrialisation de produits innovants
- Industrialisation rapide des idées et des résultats académiques

d. Structure organisationnelle



Ce stage a été effectué au sein des plateformes : Microélectronique & Nanotechnologie

3. Motivation / problématique

Les magnétrons sont largement utilisés comme sources de puissance RF à cause de leurs hautes efficacités de conversion d'énergie (75%) à faible coût. Grâce à leurs petites tailles, et leurs puissances élevées ils sont considérés idéals pour une utilisation dans les radars, mais avec la production de masse et le développement des techniques de fabrication

automatiques, le magnétron fait un déplacement vers la maison comme une source de rayonnement dans des fours à micro-ondes.

Les problèmes rencontrés dans le fonctionnement du four à micro-ondes est que les magnétrons génèrent des quantités importantes de puissance, dont une partie est perdue en premier lieu dans le magnétron lui-même sous forme de chaleur dissipée par effet joule, ce qui augmente sa température, et en deuxième lieu, le reste de la chaleur transmis dans la cavité du four pour chauffer l'aliment est perdue de son tour si les dimensions de la cavité et l'emplacement de la source n'est pas optimal.

4. Objectif :

Ce projet se partage en deux parties :

Le but de la première partie est d'étudier le magnétron, comme source d'hyper fréquences la plus utilisée dans le domaine de chauffage par micro ondes afin de déterminer les caractéristiques et les paramètres qui influencent son fonctionnement pour mieux les contrôler pour d'assurer la stabilité de fréquence et de puissance de sortie du magnétron .

A la base de ces paramètres on a fait une étude de marché pour choisir le magnétron le plus stable et le plus adapté, qui a le rendement le plus élevée, pour garantir un meilleur transfert de chaleur, une simulation électromagnétique est thermique est primordiale dans ce cas, pour s'assurer du bon choix.

Le but de la deuxième partie, consiste à étudier, dans un premier temps, le comportement du magnétron choisi à l'intérieur d'une cavité du four à micro ondes domestique. On tentera de déterminer les effets de retour d'ondes sur les parois réfléchissantes de la cavité, de déterminer les dimensions optimales de la cavité, et l'emplacement optimal de la source, pour que la distribution du champ et de puissance permette à l'aliment d'absorber le max d'énergie générée.

Dans un deuxième temps, on cherchera à étendre cette étude de la cavité du four domestique à une cavité plus grande (cavité d'un four à micro ondes industriel). Le nombre de magnétrons sera augmenté, pour atteindre les 100 KW à l'intérieur de la cavité. Dans cette partie on tentera de déterminer la distance optimale entre les magnétrons pour éviter les effets mutuels entre eux, ainsi que la distribution des aliments à l'intérieur de la cavité.

CHAPITRE II:
ETUDE DU GÉNÉRATEUR
HYPERFRÉQUENCES
"MAGNETRON"

I- Les MAGNETRONS

1. Introduction :

Les magnétrons sont des tubes à vide de type oscillateur, capables de produire de très haute puissance, atteignant parfois 300 KW à ondes continues, dans une gamme de fréquence qui varie entre 848 MHz et 2.45 GHz.

Une description précise du magnétron pourrait se résumer en ce qui suit : c'est un tube électronique (tron) baigné dans un champ magnétique (magn), d'où son nom. Pour être plus précis, il appartient au type des tubes à champs croisés qui mettent en œuvre un champ électrique et un champ magnétique statiques et orthogonaux.

Il est conçu pour auto-osciller dans des fréquences spécifiques (915 MHz, 434 MHz, 2.45GHz), et il permet de convertir une puissance de type continu (fourni par le secteur) en énergie micro-ondes importante (jusqu'au MW) avec un rendement élevé.

Doté d'une gamme de puissance large et d'un rendement, atteignant 80 %, le magnétron, offre un intérêt économique important par rapport aux autres tubes à vide susceptibles d'être implantés dans le système de chauffage.

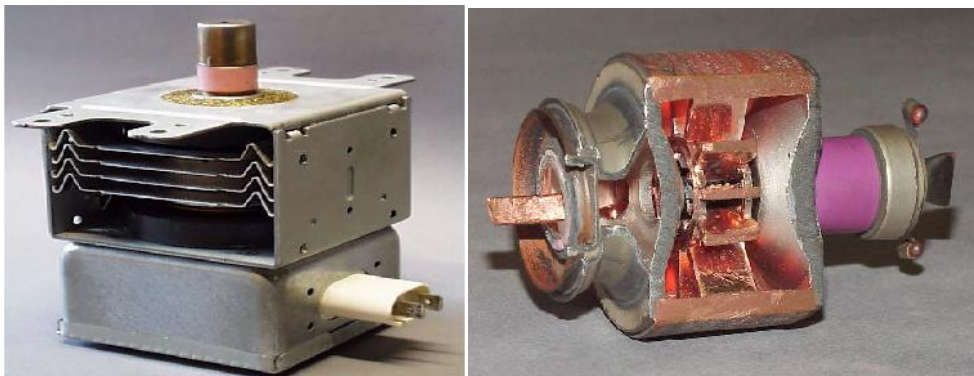


Fig. 2.1 : Magnétron de 1,2 kW à 2,45 GHz

Toutefois, pour un fonctionnement optimal de ces magnétrons, particulièrement dans des applications industrielles, l'adaptation est nécessaire. Cela signifie que la connaissance des principes de leurs fonctionnements et la compréhension de la façon dont les changements des paramètres de conception affectent leurs caractéristiques opérationnelles est indispensable.

Pour ce faire, on a procédé à la simulation du magnétron choisi en utilisant le logiciel CST PARTICLE. Les principales caractéristiques qu'on dégage de cette simulation sont: la fréquence de résonance, la trajectoire des électrons émis, et leurs énergies de déplacement .et une simulation thermique sous CST MPHYSICS pour contrôler la température de fonctionnement du magnétron.

2. Structure du magnétron

Il est constitué d'une anode cylindrique creuse, dans l'axe de laquelle se trouve une cathode à chauffage direct ou indirect. La distance séparant l'anode et la cathode détermine l'espace d'interaction. Une sortie de type coaxial (antenne) permet de coupler le magnétron au circuit de sortie, et le bloc anodique est muni d'un système de refroidissement par ailettes (ou par circulation d'eau pour les fortes puissances).

Des aimants sont placés en haut et en bas créent un champ magnétique perpendiculaire au champ électrique à l'intérieur du magnétron.

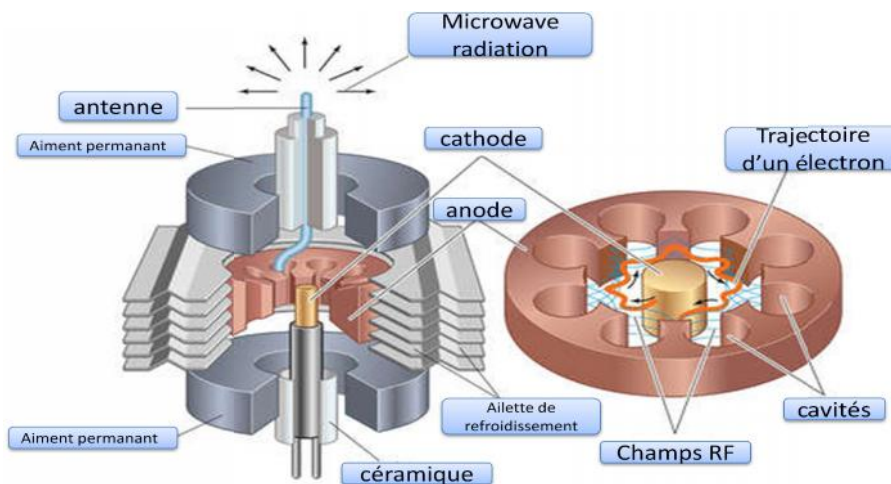


Fig. 2.2 : composition du magnétron

3. Carte d'alimentation du magnétron :

Le circuit d'alimentation du magnétron est composé de : transformateur à trois enroulements (230 V/ HT-BT), un condensateur, une diode de puissance, le magnétron, et accessoirement un composant de protection baptisé protecteur AK.

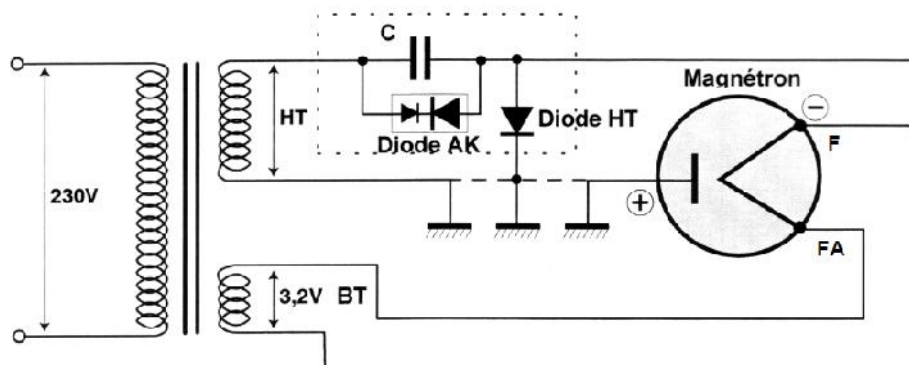


Fig. 2.3 : schéma de base de la carte d'alimentation du magnétron

Le transformateur :

Il est constitué de 3 enroulements :

- L'enroulement primaire est alimenté sous 230 V.
- L'enroulement secondaire qui délivre une basse tension de 3.1V nécessaires a l'alimentation du filament du magnétron (cathode).
- Un enroulement secondaire qui délivre une haute tension de 2100 Volts nécessaires a la création du champ électrique. il est constitué d'un nombre de spires très élevées de tres faible section.

Une extrémité de cet enroulement est reliée directement a la carcasse du transformateur (elle-même reliée a la terre) tout comme l'anode (+) du magnétron.

Doubleur de tension :

Il est constitué d'un condensateur et d'une diode HT.

Le condensateur est non polarisé. Sa valeur est comprise entre 0.95 μ F et 1.15 μ F. il intègre une résistance de décharge 10 M Ω .

L'anode sera raccordée au condensateur, et la cathode à la carcasse de l'appareil (la masse).

La diode de protection AK

C'est un composant facultatif. Il est composé de deux diodes montées têtes bêche ayant des tensions inverses différentes. Il permet de protéger le transformateur en cas de court-circuit de la diode de puissance.

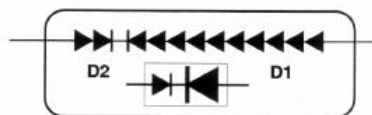


Fig. 2.4 : diode de protection AK

Tension inverse de claquage : VD1 =6000 Volts

VD2=1200 Volts

4. Principe de fonctionnement

Le magnétron fait intervenir deux types « d'influences » : celle du champ magnétique, produit par les aimants, et celle du champ électrique, entre l'anode et la cathode. C'est pour cela qu'on appelle parfois le magnétron *tube à champs croisés*.

On applique entre l'anode et la cathode une tension très élevée (de l'ordre de quelques kilovolts), pour un espace très restreint (quelques millimètres). Une fois la cathode est chauffée par une tension de 3.1 V elle émet des électrons dans l'espace d'interaction, Les électrons qui quittent la cathode sont accélérés par le champ continu, et, en absence de champ

magnétique, ils suivraient une trajectoire radiale pour rejoindre l'anode, mais le champ magnétique incurve ces trajectoires, et les électrons décrivent une trajectoire spirale.

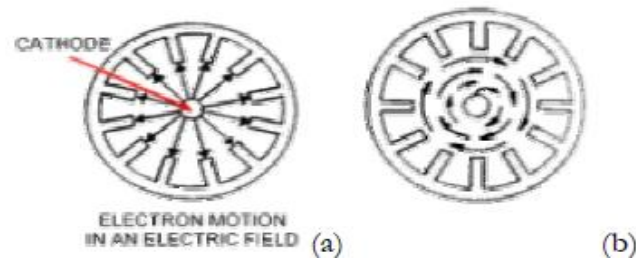


Fig. 2.5 : trajets des électrons en absence du champ magnétique (a) et en présence du champ magnétique (b)

En effet, la force totale \vec{F} subie par un électron de charge e est donnée par :

$$\vec{F} = e\vec{E} + e\vec{v} \wedge \vec{B} \quad 2.1$$

Où \vec{E} sont le champ électrique, \vec{B} le champ magnétique et \vec{v} la vitesse de l'électron.

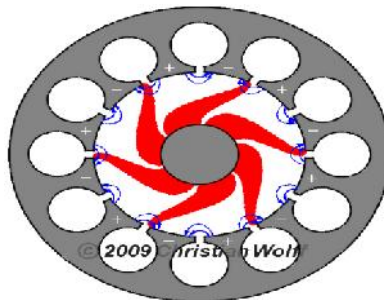


Fig. 2.6 : le flux des électrons dans l'espace d'interaction

Ce mouvement des électrons dans l'espace d'interaction est donc contrôlé par la différence de potentiel de plusieurs kV entre la cathode et l'anode et par le champ magnétique créé par les aimants permanents. Les électrons qui passent devant les cavités de l'anode, et les paquets d'électrons ainsi formés entraînent leur oscillation : il y a auto oscillation.

Ce parcours des électrons se fait à une fréquence liée à la géométrie et au nombre de cavités creusées dans l'anode. La charge d'espace ainsi créée oscille entre anode et cathode, et le contrôle de la tension permet l'émission d'une onde à puissance et fréquence fixes.

Une antenne de couplage permet d'émettre un rayonnement électromagnétique (micro-ondes) à partir de l'oscillation des charges (courants électriques) : l'énergie électrique est convertie en énergie électromagnétique. Cette antenne, entourée d'une céramique pour le maintien du vide,

Modes d'oscillation

La fréquence d'opération dépend du type et des dimensions des fentes, ainsi que de l'interaction entre l'anode et la cathode. Les cavités sont également couplés les unes avec les autres par la distance qui les sépare. En conséquence, il y a plusieurs fréquences de résonance possibles pour un système donné. Par exemple, la Figure 2.7 montre deux des quatre ondes qui peuvent être produites par un magnétron à 8 cavités. Il existe de nombreux autres modes ($3/4$, $1/2$, $1/4$) d'oscillation mais le mode $1/2$ donne la plus grande puissance et il est de ce fait le plus utilisé.

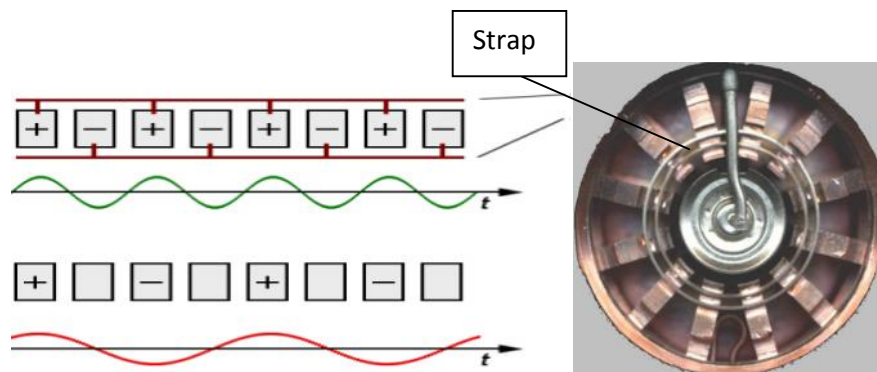


Fig. 2.7 : vue en coupe d'un magnétron de type « pointe de tarte »

Montrant les fentes et les bride de jonction.

La fréquence du mode $1/2$ est séparée de celle des autres modes en posant deux fils en cercle (strap), comme illustré sur la figure, autour des cavités de telle sorte que les cavités paires aient la même polarité et que celles impaires aient une polarité opposée. La tension dans un fil est donc la même tout autour du cercle mais les deux fils ont une tension opposée.

5. Paramètres influent le fonctionnement du magnétron

a. Matière et dimensions de la cathode

Les propriétés des magnétrons dépendent fortement des propriétés physiques

De la cathode, car en plus d'être une source d'électrons, une cathode magnétron dissipe une quantité relativement importante de chaleur résultant de l'émission d'électrons.

C'est pour cela qu'on doit tenir en compte des dimensions et des propriétés physiques de la cathode pour garantir les conditions optimales du fonctionnement du magnétron

Les principales conditions que doit remplir la cathode sont les suivantes :

- Bonne émission
- Saturation pour des densités de courant les plus élevées possibles
- Travail de sortie de l'électron hors de la couche le plus bas possible.
- Bon rendement thermique

- Insensibilité aux effets de la très haute tension
- Longue durée de vie.

Les matières courantes dans la fabrication des cathodes sont:

1° Les cathodes à oxydes

La température de chauffage n'étant pas très élevée (de l'ordre de 850 °C), ces cathodes ont un bon rendement thermique, environ 0.25 A de courant électrique pour 1.0 W de courant de chauffage, en régime continu.

La fabrication en est très facile, et le coefficient d'émission secondaire de la couche d'oxyde, relativement bon, fait qu'elles seraient intéressantes à employer dans les magnétons. Mais ces qualités s'accompagnent malheureusement de défauts assez importants pour que l'on ait du abandonner leur utilisation dans le domaine de chauffage.

L'inconvénient majeur de cette cathode est sa fragilité, défaut qui devient un vice rédhibitoire lorsqu'on aborde le domaine des tubes de grande puissance. En effet, la cathode à oxydes supporte très mal le bombardement ionique.

D'autre part, la couche d'oxyde est assez fortement résistive. Lorsque la cathode débite, la puissance dissipée par effet Joule provoque un échauffement qui, s'il devient excessif, contribue à la destruction de la couche émissive. C'est la une limitation importante de la cathode à oxydes.

2° Les cathodes en tungstène thorié

Le premier élément auquel on songe après l'oxyde est évidemment le tungstène thorié car il résiste parfaitement aux bombardements ioniques et aux effets de la haute tension.

Mais le tungstène n'est pas sans défauts. De tous les émetteurs couramment utilisés, c'est celui qui a le plus mauvais rendement thermique (7.10^{-2} A/W) et un travail de sortie classé parmi les plus élevés : 4.52 eV.

La résistivité de ce matériau est faible par rapport que celle de l'oxyde, ce qui permet une évacuation de température.

Et malgré ces inconvénient , il reste le meilleur a supporter les températures élevées qui arrivent a 1800 °C , ce qui veut dire que sa durée de vie est plus longue que celle d'oxyde qui se grille a 800 °C , et aussi le tungstène thorié possède un bon pouvoir émissif (2 A/cm^2), avec un faible travail de sortie ce qui constitue une caractéristique intéressante , c'est pour cela qu'on opte pour ce matériau dans la fabrication de la cathode .

On regroupe les propriétés des deux matériaux dans le tableau ci-dessous :

	V _s (V)	t° (°C)	J _s (A/cm ²)	rendement (A/W)	Usage
tungstène thorié	2,6 à 2,9	1500 à 1800	2	0,07	Tubes de moyenne puissance. durée de vie de 10.000 heures.
cathodes oxydes	0,8 à 1,2	700 à 950	0,5	0,2	Tubes de petite puissance et à faible tension.

Tableau 3 : Propriétés des matériaux utilisés dans la fabrication des cathodes

✚ La taille de la cathode et aussi un paramètre important qui influence le

fonctionnement du magnétron, elle doit être maintenue dans des limites étroites de sorte que les électrons sont libérés de la charge d'espace à un point où les conditions de champ RF sont propres au fonctionnement efficace de la charge d'espace.

Un rayon trop petit provoque une instabilité de mode, trop grands rayon résultante une inefficacité de fonctionnement. La taille optimale dans la plupart des cas est telle que r_c / r_a est égale ou légèrement supérieure à $(N-4) / (N+4)$,

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{N-4}{N+4} \quad 2.2$$

Ou : r_c : rayon de la cathode

r_a : rayon de l'anode

N : nombre de cavité dans l'anode

b. Forme des cavités résonantes de l'anode :

L'anode est un cylindre en cuivre creusée de 8 à 20 trous autour de sa circonférence. Ceux-ci servent de cavités résonantes et s'ouvrent sur le trou central par de minces fentes divisant le tube en autant de sous-sections. Les caractéristiques et le nombre de cavités déterminent la fréquence émise par le magnétron

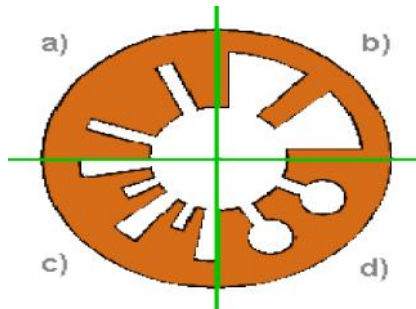


Fig. 2.8 : les différentes formes des cavités du magnétron

Les cavités peuvent prendre plusieurs formes, comme illustré sur la figure 2.8 :

a. Fentes

Cavités rectangulaires génèrent des fréquences différentes et très proche ce qui conduit à une instabilité de fonctionnement, cette structure n'est plus utilisée.

b. Pointes de tarte

La forme des cavités dans cette structure ne permet pas de générer des ondes de longueur plus courte de 10 cm ($f < 3\text{GHz}$).

c. Rayons de soleil

Les Cavités adjacentes ont des formes différentes, et cela permet de réduire les modes non désirés, cette structure permet de générer des ondes de longueur millimétriques, cette structure est difficile à réaliser, et ne génère que de très hautes fréquences ($f > 10\text{GHz}$)

d. Trous circulaires avec ouverture en fente :

Cette structure augmente la séparation entre les modes, ce qui conduit à une stabilité de fonctionnement.

Les formes les plus utilisés dans la construction des magnétrons sont les formes b) et d). Elles répondent aux critères indispensables pour un bon fonctionnement du magnétron, à savoir, la stabilité de la fréquence de fonctionnement et la séparation des modes. Dans la structure b), l'utilisation des strap est nécessaire pour séparer les modes générés par les cavités adjacentes, par contre, dans la structure d) les modes sont parfaitement séparés.

c. Valeur du champ magnétique critique B_c

Des aimants permanents sont fixés, transversalement par rapport à l'axe du tube, en haut et en bas du bloc anodique. Ils créent ainsi un champ d'induction magnétique \vec{B} , parallèle à l'axe et perpendiculaire au champ électrique radial \vec{E} .

En présence du champ d'induction magnétique seul, chaque électron, est animé d'une vitesse de déplacement radial \vec{v} est soumis à la force de Lorentz :

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B} \quad 2.5$$

Où q est la charge de l'électron

Sous l'effet de cette force, les électrons ont tendance à incurver leur trajectoire et à venir sur la cathode. Les champs croisés $\vec{E} \perp \vec{B}$ engendrent une force appliquée aux électrons, une force \vec{F} résultante de la conjugaison de la force de Lorentz, \vec{F}_L et de la force électromotrice \vec{F}_E :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = q(\vec{v} \wedge \vec{B} + \vec{E}) \quad 2.6$$

Les électrons décrivent alors une trajectoire ayant l'allure de cycloïdes.

Nous travaillerons en coordonnées cylindriques (ρ, θ, z) , en faisant l'approximation d'une géométrie parfaitement cylindrique, c'est-à-dire en posant que :

$$\frac{\partial E}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial \theta} = 0$$

$$B_{\theta} = 0, \quad B_{\phi} = 0$$

Soumise à la conjugaison des forces \vec{E} et $\vec{v} \wedge \vec{B}$, les électrons sont susceptibles de suivre différentes trajectoires définies selon la valeur des champs \vec{E} et \vec{B} . Nous négligerons aussi les répulsions entre électrons. Dans ces conditions, on obtient l'équation

$$m\vec{a} = -q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

$$= -q\vec{\nabla}V - q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Qui devient en coordonnées cylindriques,

$$\frac{d^2\rho}{dt^2} - \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 \rho = \frac{q}{m} \left(\frac{dV}{d\rho} - \rho \frac{d}{dt} B_{0z}\right)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d}{dt} \left(\rho^2 \frac{d\theta}{dt}\right) = q \frac{d}{dt} B_{0z}$$

La pulsation comme $\omega_0 = \frac{1}{2} \frac{q}{m} B_{0z}$

Notons r_c le rayon de la cathode, r_a celui de l'anode, et V_A le potentiel de l'anode.

En supposant raisonnablement que les électrons ne sont pas encore en rotation lorsqu'ils sont arrachés à la cathode, on déduit :

$$\left. \frac{d}{dt} \right|_{r=r_c} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d}{dt} = \omega \left(1 - \frac{rc^2}{2}\right)$$

En portant ce résultat dans la première équation, on obtient trivialement

$$\frac{d^2}{dt^2} + \omega^2 \left(1 - \frac{rc^2}{4}\right) = \frac{q}{m} \frac{dV}{d\rho}$$

En intégrant, après avoir multiplié par $2 \frac{d}{dt}$, il vient :

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)^2 = \frac{2q}{m}V(r) - w^2 \left(1 - \frac{rc^2}{2}\right)^2$$

On en déduit la condition de coupure $\frac{dp}{dt}|_{r=ra} = 0$, qui entraîne

$$\frac{2q}{m}V(ra) = \frac{2q}{m}V(ra) = w^2 ra^2 \left(1 - \frac{rc^2}{ra^2}\right)^2$$

On définit une valeur critique de l'induction magnétique, B_c , liée à la tension appliquée V_c par l'équation de coupure de Hull définie par :

$$V_c = \frac{q}{8m} \cdot B_c^2 \cdot r_a^2 \left(1 - \frac{r_c^2}{r_a^2}\right)$$

Et l'induction magnétique de coupure B_c vaut,

$$B_c = \frac{1}{r_a} \sqrt{\frac{2mVa}{q} \left(1 - \frac{r_c^2}{r_a^2}\right)}$$

2.7

Où r_a : rayon de l'anode

r_c : rayon de la cathode
 m : la masse de l'électron

Par rapport à cette condition de coupure, trois cas sont envisageables:

1er cas : $B < B_c$, les électrons suivent la trajectoire 1 et entraînent l'apparition d'un courant au niveau de l'anode. Dans ce cas, le magnétron fonctionne en diode thermoionique.

2e cas : $B = B_c$, les électrons aboutissent tangentiellement à l'anode.

3e cas : $B > B_c$, les électrons sont dans l'incapacité d'atteindre l'anode et forment un nuage de charges d'espace tournant dans l'espace d'interaction,

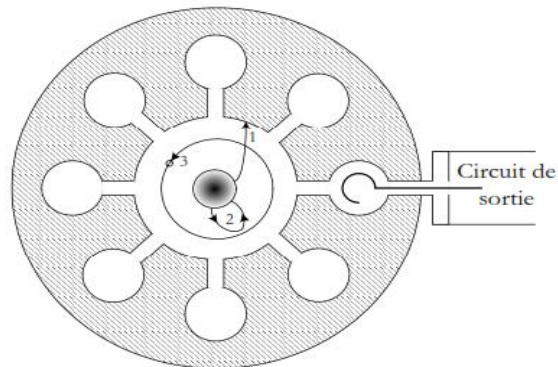


Fig. 2.10 : les trajectoires des électrons pour les différentes valeurs de champ magnétique

6. Justification du choix du magnétron

Le principe de chauffage par micro-ondes étant basé sur la propagation de l'énergie sous forme d'une onde, et sachant que les magnétrons peuvent fonctionner dans différentes fréquences, Il est important de préciser l'ensemble des recommandations à respecter avant de choisir le magnétron le plus performant et qui répond le mieux à notre application.

Le magnétron doit remplir les conditions suivantes :

- puissance de sortie qui répond au besoin.
- Rendement énergétique élevé sur toute la gamme de fréquence de fonctionnement ;
- Structure géométrique symétrique pour une fixation efficace du radiateur ;
- Très faible niveau de radiation des harmoniques ;
- Durée de vie de l'ordre de la décade ;
- Coût financier réduit ;
- Fonctionnement à température élevée pour augmenter le flux de chaleur évacuée par rayonnement.

La première caractéristique à définir concerne le choix du magnétron et la fréquence de fonctionnement.

On a adopté la fréquence 2.4 GHz pour les raisons suivantes :

- Les magnétrons opérant dans cette fréquence sont disponibles avec un bon rapport qualité/prix.
- Les magnétrons fonctionnant dans cette fréquence disposant d'une large gamme de puissance de sortie (de 100 W à 100 KW), alors que les magnétrons qui fonctionnent à 915 MHz et 848 MHz délivrent une puissance minimale de 5KW réduisant ainsi leur utilisation pour tout type d'application.

D'après l'étude du marché qu'on a fait pour trouver le magnétron le plus adapté et d'après les datasheet, on a classé dans le tableau ci-dessous les magnétrons qui semblent les plus performants pour répondre à nos besoins en termes de performances et de prix :

Désignation	Compagnie	Paramètres électriques				Paramètres physiques		Efficacité	Cooling Type	Débit	prix
		Fréquence (GHz)	Power output (KW)	Va(KV)	Ia(A)	r _a	T _c (°c)				
YJ1540	NATIONAL	2.46	1.26	4.5	0.45	Tungstène thorié	180 max	70%	Air	170 m ³ /min	467.28 EUR
NL1054-IL	PANASONIC	2.455	1.4	4.5	0.45	Tungstène +nitrure	160 max	70%	water	1.5 L/min	379.9 EUR
2M121A	Hitachi	2.45	1.45	4.5	0.45	-	-	65%	air	1.5 m ³ /min	297.5 EUR
MAF1610B	JRC	9.38-9.44	5	3.2	2.2	Tungstène thorié	0.55	85%	water	3.7 L/min	497.28 EUR

Tableau 4 : classement des magnétrons

L'application du magnétron dans le four à micro-ondes industriels exige un niveau de puissance autour de 1.2 KW avec un haut rendement. Ce qui écarte les magnétrons fonctionnant à une fréquence de 915 MHz, par contre les magnétrons qui oscillent à 2.45 GHz semblent parfaitement adaptés à notre four industriel. D'après les performances des différents magnétrons qui figurent dans le tableau, le YJ1540 semble le plus adéquat, car il a un rendement élevé, et sa cathode est en tungstène thorié pouvant résister à la température et aux chocs, il a un système de refroidissement par air, donc on ne va pas trop changer la structure existante.

Selon le constructeur, le YJ 1540 a une cathode chauffée par un courant de fort ampérage, dans notre cas le transformateur du filament est capable de délivrer une tension de sortie de 4.5V(AC),

En ce qui concerne l'influence de la température, nous limiterons son impact en veillant à placer le magnétron dans un régime de fonctionnement thermique stationnaire. Car son aspect est important surtout lors du démarrage.

En conclusion pour cette partie, l'étude du magnétron nous a permis de déterminer ces paramètres caractéristiques qui influencent son fonctionnement ainsi que les conditions d'un bon fonctionnement, ceci nous a facilité la tâche pour choisir le magnétron le plus performant et le plus adapté à notre application.

Une fois le choix est effectué, une simulation est primordiale pour s'assurer de son comportement. La simulation du magnétron a été faite sous le logiciel CST STUDIO SUITE, et particulièrement CST PARTICLE que nous présentons dans ce qui suit.

II- Description du logiciel CST : Computer Simulation Technology

1. Généralité : CST Studio suite

Le logiciel de simulation CST STUDIO SUITE est l'aboutissement de nombreuses années de recherche et développement des solutions informatiques les plus précises et efficace pour la conception et la simulation. Il comprend des outils pour la conception et l'optimisation des dispositifs fonctionnant dans une large gamme de fréquences. Les solveurs de CST proposent des simulations tenant compte des effets thermiques et mécaniques, ainsi que des simulations de circuits.

CST STUDIO SUITE comprend les modules suivants :

- **CST Microwave Studio** (CST mws) : est le principal outil pour la simulation électromagnétique 3D rapide et précise des dispositifs à hautes fréquence, et leader dans le marché dans le domaine temporel. il permet l'analyse rapide et précise des antennes, filtres, coupleurs, des structures planaires et multicouche et la CEM, etc.
- **CST EM Studio** (CST EMS) : est un outil facile à utiliser pour la conception et l'analyse des applications à faible fréquence telle que les moteurs, capteurs, transformateurs et boîtiers de protection
- **CST Particle studio** (CST PS) : a été développé pour la simulation tout à fait conforme des particules chargées se déplaçant librement. Les applications incluent les tubes à vides, tubes cathodique, magnétrons, etc.
- **CST Câble Studio** (CST CS) : pour la simulation de l'intégrité du signal et l'analyse EMC/EMI de faisceaux de câbles
- **CST PCB Studio** (PCBs CST) : pour la simulation de l'intégrité du signal sur les cartes de circuit imprimés.
- **CST MPhysics** (CST MPS) : pour l'analyse des contraintes thermiques et mécaniques
- **CST Design Studio** (CST DS) : est un outil polyvalent qui facilite la conception et la synthèse

Dans ce projet, on a utilisé les Studio : CST MWS, CST MPS, et CST PARTICLE. Ces modules sont détaillés ci-dessous :

a. CST PARTICLE STUDIO :

CST PS est un outil spécialisé pour l'analyse rapide et précise de la dynamique des particules chargées dans des champs électromagnétiques 3D. Puissant et polyvalent, il est adapté pour des tâches allant de la conception des magnétrons et les réglages des tubes électroniques à la modélisation des sources de particules.

b. CST MICROWAVE STUDIO :

C'est un outil de simulation électromagnétique, thermique, 3D basé sur la technique de modélisation appelée FITD (Finite-Integration Time-Domain) qui discrétise les équations de Maxwell sous leur forme intégrale. Le logiciel propose plusieurs solveurs pour traiter tous types de structures fonctionnant dans le domaine des basses et hautes fréquences.

c. CST MPHYSICS STUDIO :

Est un outil puissant et facile à utiliser pour l'analyse des contraintes thermiques et mécaniques. Les systèmes et/ou appareils tombent très rarement pannes dans un seul domaine de la physique, donc la simulation multiphasique est souvent nécessaire pour une simulation complète des caractéristiques des systèmes.

Avec le solveur thermique de CST MPS, les changements de température générés par ces interactions peuvent être modélisés, et le flux de chaleur dans le dispositif de simulation pour tester les performances des dissipateurs de chaleur et d'assurer la fiabilité des composants sensibles à la température. Le solveur thermique peut même simuler les effets biochaleur, pour calculer comment les champs vont interagir avec le corps.

III- Simulation du magnétron

1. Simulation sous CST PARTICLE :

La simulation numérique d'un magnétron se fait sous CST PARTICLE, fonctionnant avec une fréquence 2.445GHz à la tension 4500V, le champ magnétique 0.27 Tesla, et l'anode a courant 0.45 A,

a. Description du modèle de simulation :

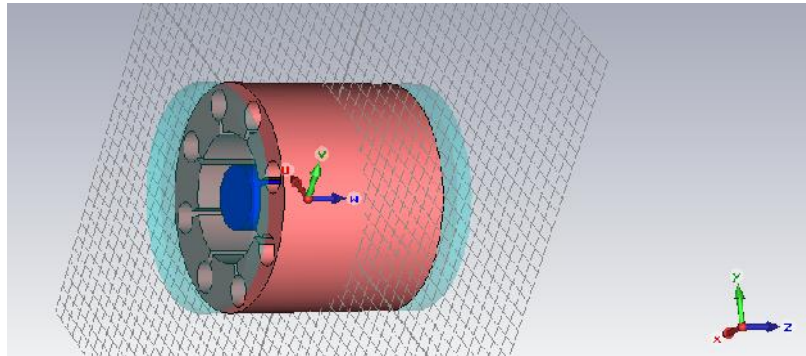


Fig. 2.11 : model du magnétron sous CST PARTICLE

Le modèle de simulation reflète le design typique d'un magnétron à 8 cavités résonantes creusées dans l'anode. En tenant compte des paramètres définis dans le début du chapitre et qui fixent la fréquence de résonance et le champ magnétique de coupure, et les rayons de la cathode et de l'anode, on établit les dimensions suivantes :

Les démentions géométriques du modèle sont :

- Cathode, rayon : 2 cm, longueur : 10 cm
- Anode, rayon : 4 cm, longueur : 11 cm
- Cavité résonante,
 - o Ouverture de fente : 0.4 cm
 - o Rayon de la cavité : 1 cm
- Aiment, rayon : 7 cm

Les entrées :

- Une tension anodique de 4500 V
- Un courant anodique de 0.45 A
- Un champ magnétique de 0.27 Tesla

Le champ magnétique est uniforme et constant toute la durée de la simulation

b. Résultat de la simulation:

La simulation nous retrace la trajectoire des électrons, ainsi que l'énergie avec laquelle elles se déplacent, la figure ci-dessous nous illustre cette trajectoire :

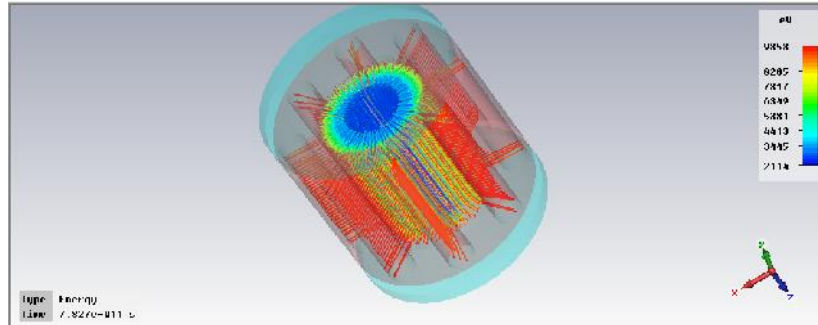


Fig. 2.12 : l'énergie des électrons émis par la cathode

Les électrons sont accélérés dans l'espace d'interaction et atteignent les cavités de l'anode avec une énergie importante, cette énergie est extraite par un système de sortie vers l'antenne.

Et pour s'assurer de la réponse de ce magnétron on cherche le paramètre de réflexion S11 figuré ci-dessous :

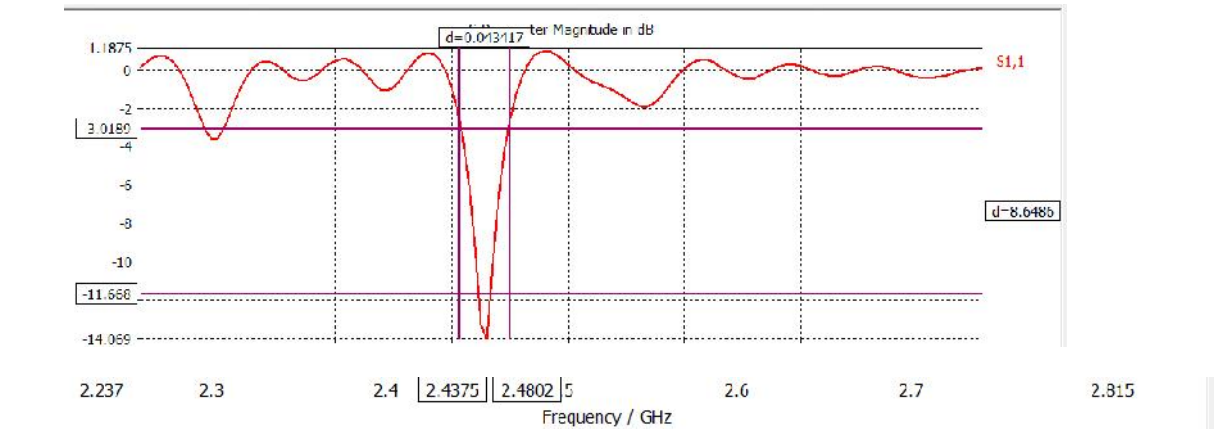


Fig. 2.13 : paramètre de réflexion S11 du magnétron simulé

Le coefficient de réflexion S11 présente une résonance dans la fréquence de fonctionnement du magnétron (2.45 GHz), avec une bande passante de $\pm 20\text{MHz}$.

Le coefficient de réflexion descend à -14 dB pour la fréquence de fonctionnement du magnétron.

2. Simulation thermique sous CST MPS :

a. Description

On garde les mêmes propriétés du magnétron définies avant, et on ne change que le studio de travail.

Environnement de travail :

- le magnétron est placé dans l'air, avec un coefficient de convection $h= 10 (W.m^{-2}.K^{-1})$.
- La température de l'environnement de travail $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

b. Résultats :

La température de fonctionnement normal du magnétron est présentée dans les figures ci-dessous :

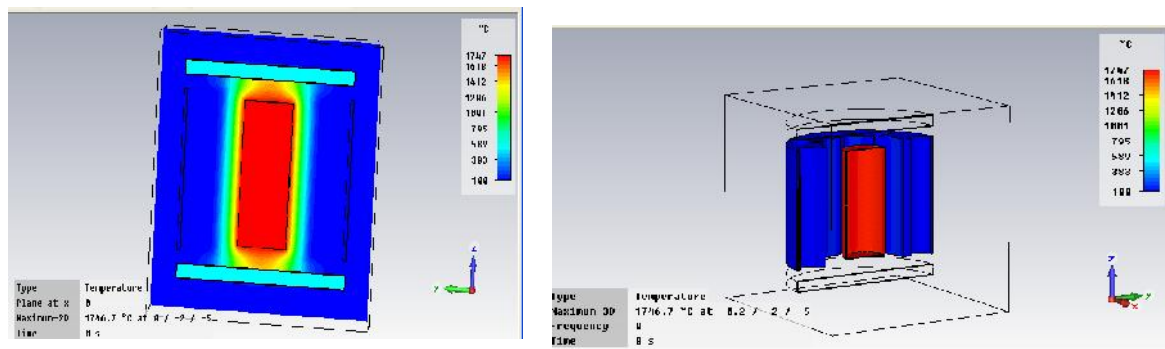


Fig2.14 : Température du magnétron lors du fonctionnement normal

On observe sur les figures que, dans l'environnement déjà défini, la température de fonctionnement du magnétron est très élevée, elle atteint $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans la cathode et $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans l'anode, pour une durée de fonctionnement de 2 min.

Doté d'une cathode fragile, Le magnétron ne peut pas supporter de telles températures pour une durée plus longue, c'est la cause principale des pannes des magnétrons.

Pour éviter la surchauffe du magnétron et diminuer cette température, on ajoute un système de refroidissement par air (ventilateur) qui fournit un débit d'air = $170\text{ m}^3/\text{min}$,

Les résultats sont figurés ci-dessous :

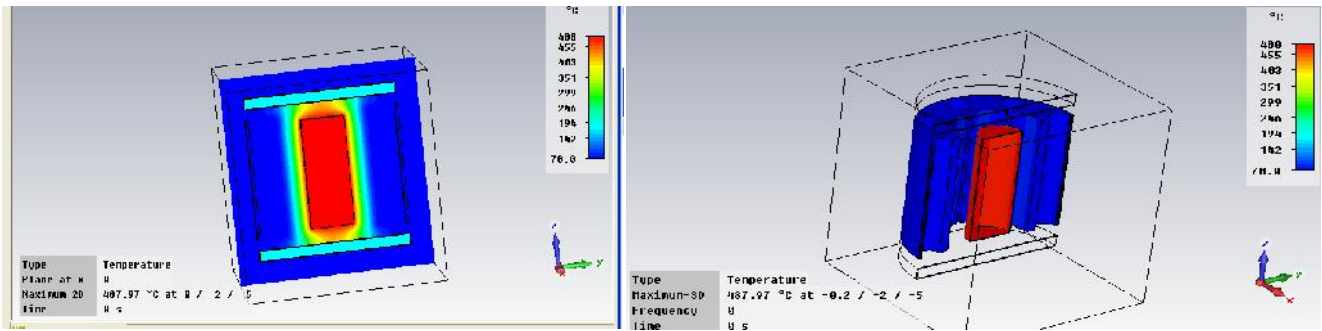


Fig2.15. : Température du magnétron après ajout du système de refroidissement

L'ajout du système de refroidissement a permis de diminuer la température à 400 °C dans la cathode, et 70 °C dans l'anode au bout de 2 min. À cette température, le magnétron peut travailler jusqu'à 10 min continu sans aucun problème.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a déterminé les conditions du bon fonctionnement du magnétron, on a choisi le magnétron adapté à l'application, on s'est assuré du comportement des charges par une simulation.

L'application la plus courante des magnétrons est le four à micro-ondes. Dans ce four, les ondes émises par le magnétron se propagent dans un guide d'onde pour arriver à l'applicateur, donc elles passent d'une propagation guidée à une propagation dans un espace libre.

Dans le chapitre qui suit, les phénomènes de propagation seront détaillés.

CHAPITRE III :

CHAUFFAGE PAR MICRO- ONDES

I- Structure générale du four à micro-ondes

La production d'ondes électromagnétiques à la fréquence 2.45GHz est assurée par le magnétron. L'onde électromagnétique générée par le magnétron est transmise vers la cavité via un guide d'onde. Ces guides d'ondes sont des structures métalliques, de section rectangulaire remplie en général par l'air. Les parois conductrices engendrent des réflexions multiples de l'onde qui imposent une certaine distribution des champs à l'intérieur du guide et des courants de conduction à la surface de ses parois. Leurs pertes sont très faibles car l'air, dont les propriétés isolantes sont remarquables, est utilisé comme diélectrique.

Les ondes sont acheminées vers la cavité du four qui est une cavité multimode. C'est une enceinte métallique fermée. Les dimensions de cette cavité sont très supérieures à celles du guide d'onde, et par conséquent à la longueur d'onde de travail. Lors de leur entrée dans la cavité, les ondes passent alors d'une propagation guidée à une propagation libre : les ondes se propagent dans toutes les directions de l'espace jusqu'à leur réflexion contre les parois métalliques. Ces réflexions multiples des micro-ondes sur les parois de la cavité conduisent à la superposition d'ondes incidentes et réfléchies et à la formation d'ondes stationnaires. Ceci rend la configuration spatiale du champ électromagnétique complexe car il y a coexistence de différents modes de propagation, d'où le terme de multimode.

Dans ce qui suit nous présentons les postulats généraux de la propagation des ondes électromagnétiques en partant des équations de Maxwell, dans un espace puis dans un espace guidé.

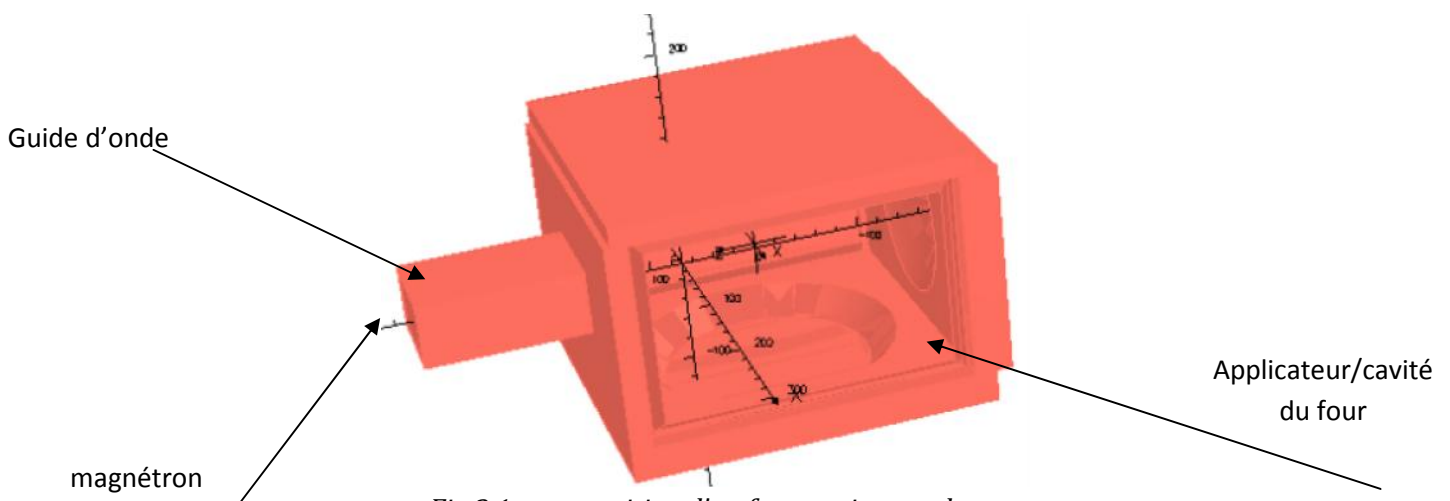


Fig.3.1 : composition d'un four a micro-ondes

II- Propagation des micro-ondes

1. Propagation en espace libre

Avant d'aborder la propagation des micro-ondes, rappelons dans un premier temps les équations de Maxwell qui lient le champ électromagnétique (\vec{E}, \vec{B}) aux sources, c'est-à-dire les charges électriques (ρ) et les densités de courants (\vec{J}) dans le cas général.

$$\text{Loi de Maxwell-flux} \quad : \quad \text{div} \vec{B} = 0 \quad 3.1$$

$$\text{Loi de Maxwell-Gauss} \quad : \quad \text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad 3.2$$

$$\text{Loi de Maxwell-Faraday} \quad : \quad \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 3.3$$

$$\text{Loi de Maxwell-ampère} \quad : \quad \text{rot} \vec{H} = \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad 3.4$$

Les équations de Maxwell-flux, assurant la conservation du flux magnétique, et Maxwell-Faraday, traduisant le phénomène d'induction, sont indépendantes des charges et des courants électriques, sources du champ. Les équations Maxwell-Gauss et Maxwell-Ampère lient le champ électromagnétique à ses sources.

Dans le vide, charges et courants sont nuls, les flux des champs électrique et magnétique sont conservatifs :

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad 3.5$$

$$\text{div} \vec{E} = 0 \quad 3.6$$

D'autre part les évolutions spatiales et temporelles des champs électrique et magnétique sont régies par les équations couplées :

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 3.7$$

$$\text{rot} \vec{H} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad 3.8$$

Ce couplage est à l'origine du phénomène de propagation des signaux électromagnétique, qui peut se faire dans le vide, c'est-à-dire en absence de support matériel pour la propagation. Toujours dans le vide, cette propagation est décrite par l'équation d'Alembert :

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{j} \quad 3.9$$

$$\Delta \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \vec{j} \quad 3.10$$

Dans tout autre milieu que le vide, la permittivité ϵ et la perméabilité μ sont supérieures aux valeurs ϵ_0 et μ_0 du vide. Néanmoins, les relations valables dans le vide peuvent être étendues à un milieu diélectrique, isolant ($\vec{J} = \vec{0}$) et non chargé ($\rho = 0$), linéaire homogène isotrope, dont on néglige les propriétés magnétiques, comme l'air par exemple.

Dans le cas le plus général, les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans les trois directions de l'espace : c'est la propagation libre. Cependant, à une distance suffisante de son émetteur, une onde électromagnétique peut être assimilée à une onde plane. Une onde est dite plane si, à un instant donné, la grandeur caractérisant l'onde qui se propage est la même en tous les points d'un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Une onde progressive (OPP) est une onde plane qui se propage dans une direction et un sens bien déterminés. Ces quelques définitions permettent de caractériser le champ électromagnétique. En effet, si on cherche un champ électromagnétique :

- Satisfaisant aux équations de propagation sous la forme d'une onde progressive (OPP) selon une direction parallèle à l'axe (Oz) définie par le vecteur unitaire \vec{u}_z et
- Vérifiant les équations de Maxwell,

Alors le champ électromagnétique est transverse :

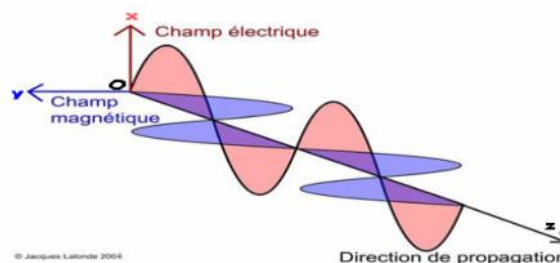
$$\vec{u}_z \cdot \vec{E} = 0 \quad 3.11$$

$$\vec{u}_z \cdot \vec{B} = 0 \quad 3.12$$

Par ailleurs le champ magnétique est lié au champ électrique de l'onde par la relation de structure :

$$\vec{B} = \frac{\vec{u}_z \wedge \vec{E}}{c} \quad \Leftrightarrow \quad \vec{E} = -c \cdot \vec{u}_z \wedge \vec{B} \quad 3.13$$

On en déduit que les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} sont perpendiculaire entre eux et à la direction de propagation. Cette onde électromagnétique, représentée sur la figure, est aussi appelée onde TEM (transverse électromagnétique).



*Figure 3.2 : Propagation en espace libre
D'une onde plane progressive électromagnétique*

Dans le cas des micro-ondes, les ondes électromagnétiques sont également de forme sinusoïdale et pour une fréquence fixe (2.45 GHz par exemple). Cela correspond à un cas particulier d'OPP dite monochromatique. L'amplitude d'une onde plane progressive monochromatique (OPPM) se propageant dans une direction parallèle à l'axe (Oz) dans e sens des Z croissants peut se noter en notation complexe sous la forme :

$$\Psi(x, t) = \Psi_0 e^{j(\omega t - kz + \phi_0)} \quad (3.14)$$

Elle est caractérisée par sa pulsation $\omega(\text{rad.s}^{-1})$ et son vecteur d'onde $\vec{k} = k \cdot \vec{u}$ (m^{-1}).

2. Propagation en guide d'onde

Bien qu'il existe de nombreux autres types de guides d'ondes, notre étude se restreindra à la propagation d'une onde électromagnétique dans les guides d'ondes métalliques de section rectangulaire. Cette propagation est possible si le champ électrique de l'onde incidente est parallèle aux faces sur lesquelles cette onde va se réfléchir successivement.

On exclura l'étude des modes de propagation des ondes TM pour s'intéresser aux modes de propagation de type transverse électrique

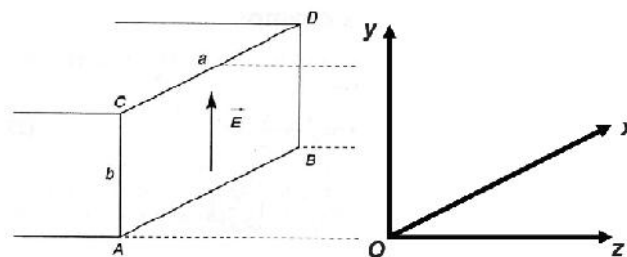


Fig. 3.3 : guide d'onde rectangulaire

a désigne le grand côté de la section selon (Ox)

b désigne le petit côté de la section selon (Oy)

(Oz) est la direction de propagation

Pour les ondes TE, la fonction génératrice H_z est déterminée à partir de l'équation de Propagation de la composante longitudinale (parallèle à (Oz)) :

$$\nabla_T^2 H_z + k_c^2 H_z = 0 \quad (3.15)$$

k_c est appelée constante de propagation à la coupure et est définie dans l'équation 21.

Les parois du guide étant parallèles à la direction de propagation (Oz), cette condition se démontre à partir de $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = j\omega \epsilon \vec{E}$ en tenant compte de $E_T = 0$ ($E_T = \vec{E} \cdot \vec{x}$) et $H_N = 0$ ($H_N = H_N = \vec{H} \cdot \vec{y}$).

L'équation de propagation sur H_z n'admet de solutions que pour une suite de valeurs discrètes de K_c , appelées valeurs propres.

En effet, le calcul de la solution générale de la propagation en guide d'ondes rectangulaires se ramène à la détermination des modes TE (ou TM) pouvant exister dans ce guide. Ainsi, la fonction génératrice solution de l'équation de propagation guidée que l'on obtient est :

$$H_z(x, y) = H_0 \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad 3.16$$

On peut ainsi obtenir par simplification des équations de Maxwell les composantes transversales du champ des ondes TE :

$$E_x(x, y) = H_0 \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \cdot \frac{n\pi}{b} \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad 3.17$$

$$E_y(x, z) = -H_0 \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \cdot \frac{m\pi}{a} \cdot \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad 3.18$$

$$H_x(x, y) = H_0 \frac{\gamma}{k_c^2} \cdot \frac{m\pi}{b} \cdot \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad 3.19$$

$$H_y(x, y) = H_0 \frac{\gamma}{k_c^2} \cdot \frac{n\pi}{b} \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad 3.20$$

avec m et n , deux entiers naturels arbitraires ($m, n \in \mathbb{N}$).

Il existe une valeur propre de $(k_c)_{mn}$ pour chaque paire d'entiers naturels (m, n) tel que :

$$(k_c)_{mn} = \frac{2\pi}{(\lambda_c)_{mn}} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad 3.21$$

Et à chacune de ces valeurs propres correspond une solution particulière pour les champs électrique et magnétique.

3. Aspect énergétique

Dans le procédé de chauffage par micro-ondes, on peut distinguer différentes puissances (électromagnétiques, thermiques...), certaines pouvant être mesurées par des détecteurs et d'autres ne pouvant être qu'estimées par le calcul.

Dans tous les cas, ces puissances doivent être définies clairement, tout d'abord, il y a la puissance de l'onde délivrée par le magnétron : c'est la puissance électromagnétique incidente, notée P_I .

Après réflexion sur la face court-circuit, l'onde revient en direction du magnétron ; cette onde est déviée et absorbée par l'aliment. Cette onde dite réfléchie, et notée P_R .

Lorsqu'il n'y a pas de pertes dans la cavité ou qu'elles sont très faibles, alors $P_I = P_R$. En revanche, lorsqu'il y a des pertes dans la cavité, $P_I > P_R$

On définit la puissance électromagnétique dissipée dans la cavité, notée P_C , par la somme de la puissance incidente et la puissance réfléchi :

$$P_C = P_I + P_R \quad 3.22$$

La puissance électromagnétique dissipée dans la cavité P_C est maximale à la résonance, ce qui correspond aussi à la distribution du champ électromagnétique pour laquelle les intensités des composantes électriques et magnétiques sont les plus élevées.

La puissance électromagnétique dissipée dans la cavité P_C peut être décomposée en deux termes : la puissance dissipée par le matériau pour le chauffer, notée P_M , et la puissance dissipée dans les parois de la cavité, notée P_C'' . Si un échantillon placé dans la cavité couple fortement avec le champ électromagnétique, la majeure partie de la puissance électromagnétique P_C servira au chauffage du matériau.

Au contraire, s'il n'y a pas d'interaction entre l'échantillon et les micro-ondes ou très faiblement ($P_M \approx 0 \rightarrow P_C \approx P_C''$) la puissance électromagnétique P_C sera dissipée principalement dans les parois de la cavité sous forme de chaleur (courant de conduction dans les parois \rightarrow effet Joule), et par rayonnement hors de la cavité.

Contrairement à la puissance dissipée dans les parois de la cavité P_C'' , la puissance dissipée par le matériau P_M , qui dépend de ses propriétés diélectriques, peut être estimée. En effet, en première approximation, c'est la somme de la puissance nécessaire pour chauffer le matériau à une vitesse donnée (P_{ch}) et de la puissance nécessaire pour compenser ses pertes thermiques, dues principalement au rayonnement (P_{ray}).

$$P_M = P_{ch} + P_{ray} = m \cdot C_p^m \dot{T} + \varepsilon \cdot \sigma_{SB} \cdot (T^4 - T_{ref}^4) \cdot S \quad 3.23$$

m : masse du matériau (Kg)

C_p^m : capacité calorifique massique du matériau (J.Kg⁻¹.K⁻¹)

\dot{T} : vitesse de chauffage (K.s⁻¹)

ε : émissivité du matériau

σ_{SB} : constante de Stefan-Boltzman = 5,67.10⁻⁸ W.m⁻².K⁻⁴

T : température de l'environnement de l'objet (K)

S : surface externe de l'échantillon à travers laquelle le matériau rayonne (m²)

CHAPITRE IV :

DÉVELOPPEMENT D'UN FOUR À MICRO-ONDES DOMESTIQUE

I- Développement d'un four a micro ondes domestique

1. Introduction

Nous nous sommes intéressés dans un premier temps sur ce qui constitue l'usage le plus courant des magnétrons, c'est-à-dire le four à micro-ondes domestique. Il arrive à l'occasion qu'un plat sortant du four à micro-ondes soit chaud à l'extérieur et froid à l'intérieur ou encore qu'il soit toujours froid après un certain laps de temps.

Dans les applications de chauffage à micro-ondes, l'énergie est introduite directement dans le volume du matériau et par conséquent la qualité du processus est très dépendante de l'uniformité de la distribution du champ électromagnétique le long de la cavité.

Pour comprendre ce phénomène, une description de la façon dont le champ électromagnétique se propage et comment il est absorbé par les matériaux est essentielle. Nous avons réalisé la simulation de champ électromagnétique 3D dans le four a micro-ondes chargé d'un échantillon en eau , en changeant plusieurs paramètres comme : les dimensions de la cavité du four , la position des aliments à l'intérieur de la cavité , ainsi que l'emplacement de la source , en utilisant le logiciel CST microwave studio .

2. Simulation électromagnétique du four a micro-ondes domestique

a. Géométrie

Les différents essais de simulation qu'on a fait ont montré que les dimensions de l'applicateur doivent être bien calculées. La longueur (L) de l'applicateur doit être 1.5 fois plus grande de sa hauteur (h), c'est-à-dire que : $L=1.5*h$. En respectant ce rapport, on obtient une meilleure réponse du magnétron dans sa fréquence de fonctionnement.

Les dimensions qui ont donné de bons résultats sont les suivantes :

L=22.5 cm, h=15 cm, et p=15 cm, avec :

L : longueur de l'applicateur

h: hauteur de l'applicateur

p : profondeur de l'applicateur

La configuration est représentée sur la figure 4.1, où est également représenté un échantillon cylindrique d'eau placé au centre de la cavité sur un support en verre.

Le magnétron délivre une puissance de sortie de 1.2 kW transférée par un guide d'onde WR-340 vers l'intérieur du four, avec une fréquence de $2,45 \pm 0,25$ GHz.

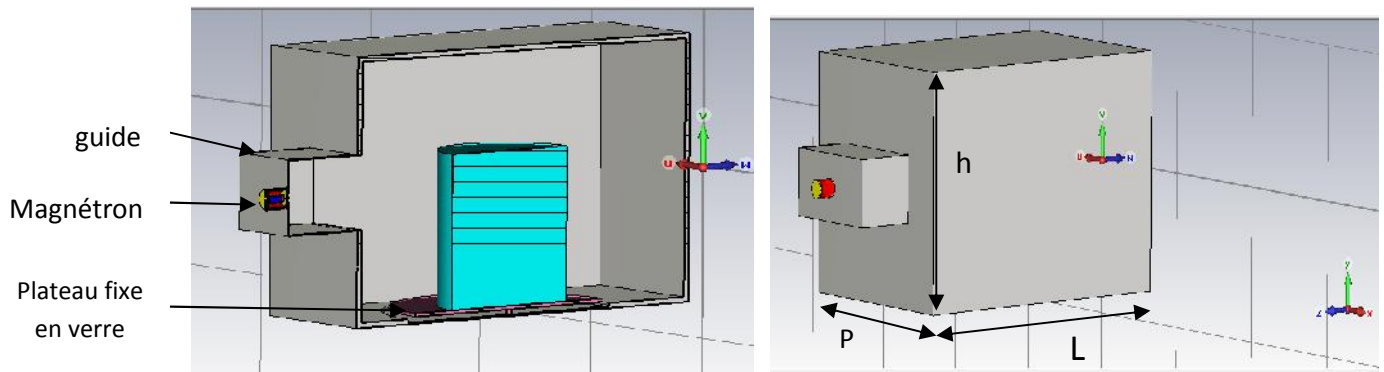


fig.4.1 : configuration utilisée dans le four a micro-ondes de la cavité, où est représentée une charge de forme cylindrique placée au centre de la cavité

b. Conditions aux limites & propriétés des matériaux

En respectant les conditions aux limites, les parois de la cavité sont considérées comme des conducteurs parfaits, représentée par la condition aux limites suivantes $\vec{n} \wedge \vec{E} = \vec{0}$, c'est-à-dire que la composante tangentielle du champ électrique est nulle sur toutes les parois.

Les caractéristiques des matériaux constituant les parois des cavités ont une grande influence sur les phénomènes de propagation. Donc les conditions aux limites imposent à ce que la permittivité relative des matériaux utilisés pour simuler toutes les pièces du four micro-ondes, soit sélectionnée en répondant à certains critères, particulièrement la réflexion.

Les paramètres des matériaux utilisés sont présentés dans le tableau 1

Matériel	Permittivité relative : $\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$	Tanδ
Céramique	10.2	$5.10^{-2} - 1.2.10^{-2}$
Glass	6.9	0.02-0.04
Water	78	0.22

Tableau 5 : caractéristiques des matériaux

ϵ' : La permittivité relative

$\tan\delta$: facteur de perte

c. Comportement du magnétron dans le four

Pour une bonne réponse du magnétron, il faut que le coefficient de réflexion S11 soit inférieur à -10 dB. Pour s'assurer du fonctionnement du magnétron dans la cavité du four, on utilise le solveur transitoire pour calculer son coefficient de réflexion S11.

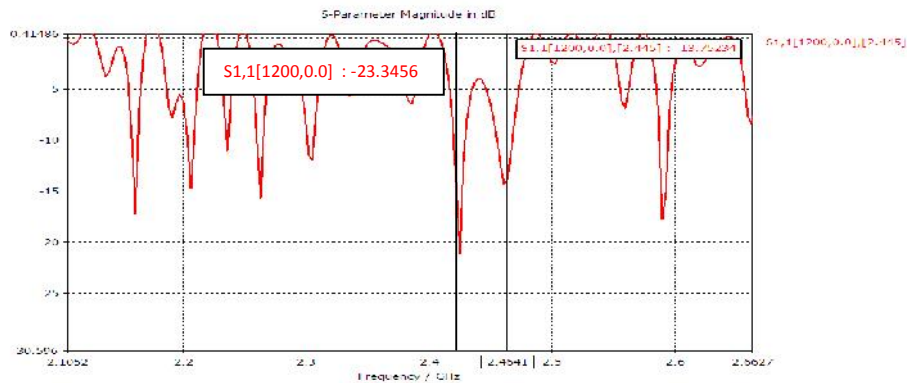


Fig.4.2 : paramètre de réflexion S11

D'après la figure, il s'avère qu'il y a plusieurs fréquences de résonances dans la cavité, ceci est dû aux réflexions sur les parois de l'applicateur.

La meilleure réponse du magnétron dans la cavité est donnée à la fréquence 2.42 GHz, alors que pour la fréquence de fonctionnement du magnétron (2.45 GHz), le paramètre S11 descend à -14 dB, ce qui signifie qu'il y a un bon transfert d'énergie.

Il faut noter que la fréquence de résonance change légèrement avec la charge dans le four. La fréquence de résonance dans le four est décalée à 2.42 GHz au lieu de 2.45 GHz.

d. 'waveguideport' source équivalente du magnétron

Le flot de conception du four dans les studios de CST nous impose à réaliser le magnétron dans CST PARTICLE, réaliser la cavité du four et le guide d'onde dans CST MWS, puis faire l'assemblage des deux pièces.

Donc pour réduire le temps de conception et de simulation, ainsi que pour simplifier le modèle, on a pensé à remplacer le magnétron par un port présenté dans la bibliothèque de CST mws.

Dans la bibliothèque de CST mws, il y a deux types de ports : les « waveguide port » et les « discrets ports », mais celui qui semble être le plus proche des caractéristiques du magnétron est le 'waveguide port'.

Et pour s'assurer que le port choisi a la même réponse que le magnétron, on a réalisé le modèle du four tout en remplaçant le magnétron par ce port, la figure ci-dessous montre le nouveau modèle.

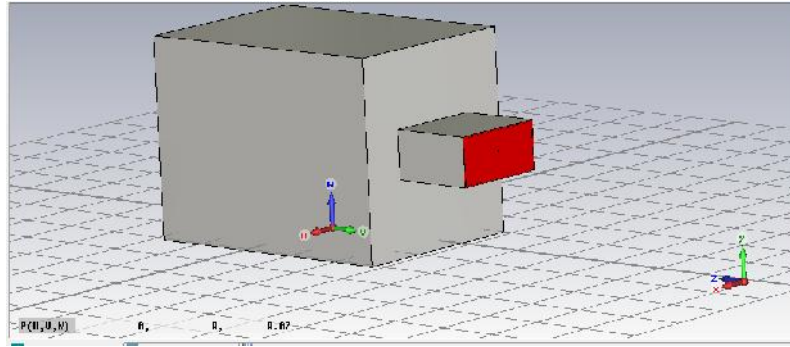


Fig.4.3 : modèle du four en remplaçant le magnétron par le waveguide port

On obtient comme résultats le paramètre S11 suivant :

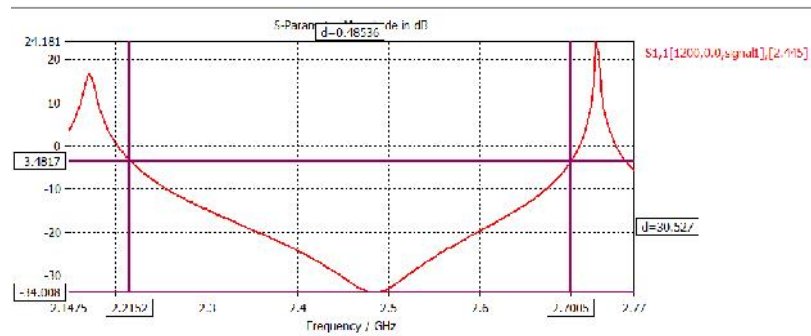


Fig. 4.4 : paramètre S11 du port 'waveguide'

On remarque que la bande passante s'élargit à ± 20 MHz, ainsi que la réponse à 2.47 GHz devient meilleure est atteint -34 dB

Donc le port a les mêmes caractéristiques que le magnétron, c'est pour cela que **dans toute la suite de ce projet on remplace le magnétron par ce port, pour simplifier le modèle, et diminuer le temps de simulation.**

e. Distribution du Champ électromagnétique :

Une fois la source des micro-ondes est fixée, on s'intéresse dans la suite, au champ électromagnétique et à la distribution de puissance dans le four.

La figure ci-dessous montre la distribution du champ électromagnétique dans le four.

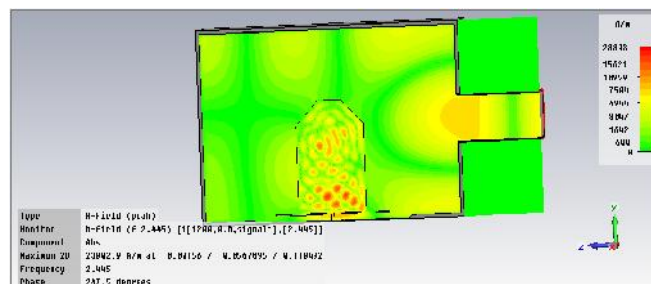


Fig.4.5 : distribution du champ électromagnétique

On peut expliquer ce constat par : les réflexions sur les parois, provoquent une superposition des ondes incidentes et réfléchies, ce qui double l'intensité du champ loin de l'axe d'émission,

On conclut que l'aliment doit être décalé de l'axe central de la source pour bénéficier d'un maximum de puissance.

On décale l'aliment vers les parois et on obtient :

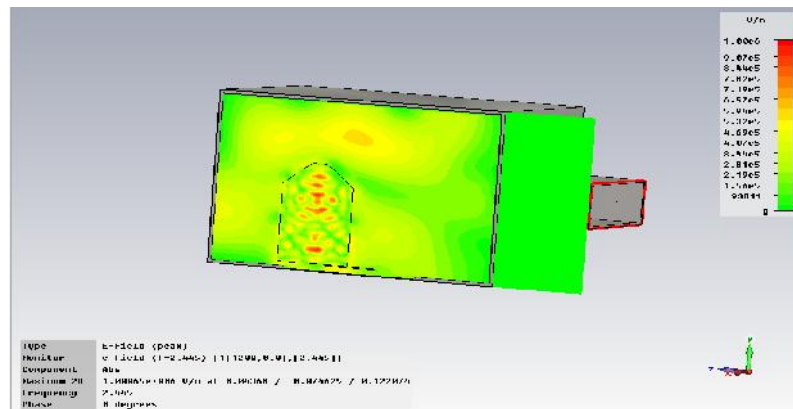


Fig. 4.7 : champ à l'intérieur de l'aliment décalé

L'intensité du champ a augmenté à l'intérieur de l'aliment, ainsi que le nombre de point chaud, et ceci confirme notre hypothèse.

Ce constat nous explique la position du guide d'onde (source) dans la majorité des fours à micro-ondes domestiques, car on le trouve souvent placé dans le coin loin du centre.

f. Puissance & interaction avec la matière

Il est important de comprendre que c'est seulement sur les matériaux diélectriques que les micro-ondes ont un effet à cause de la présence d'eau à l'intérieur de ceux-ci.

L'apparition d'un champ électromagnétique au sein du diélectrique provoque une oscillation des molécules d'eau ainsi qu'une réorientation de ses moments dipolaires permanents.

La formule ci-dessous permet de calculer la puissance dissipée dans le matériau diélectrique,

$$P = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot (\epsilon' \cdot \tan(\delta)) \cdot E^2 \quad (\text{W/m}^3)$$

ϵ_0 : Constant diélectrique du vide ($8,84 \cdot 10^{-12}$ F/m)

ϵ' : La permittivité relative

$\tan \delta$: facteur de perte

Une partie de l'énergie créée par le champ électromagnétique est absorbée dans le diélectrique. L'utilisation d'un champ alternatif qui entraîne un changement d'orientation des molécules alternativement suivant la fréquence du champ provoque donc un transfert

d'énergie du champ électrique au diélectrique. Cette énergie, qui peut devenir importante, apparaît au sein du diélectrique sous forme de chaleur.

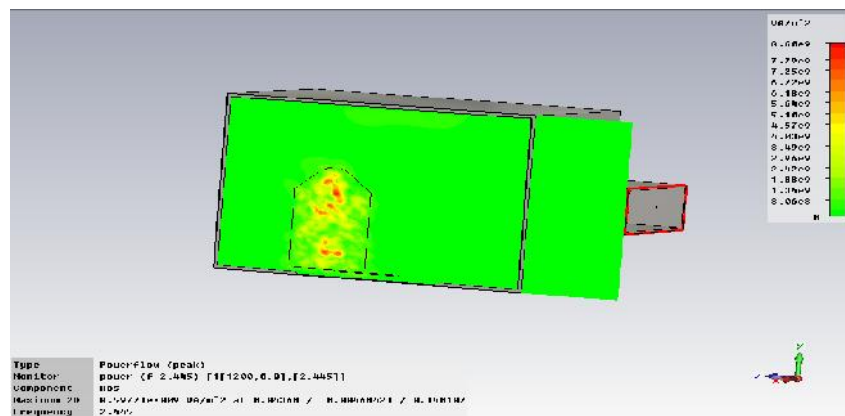


Fig. 4.8 : puissance a l'intérieur de l'aliment

La figure montre que l'absorption de puissance ne se présente qu'au niveau de l'aliment, cela explique le choix des permittivités des matière utilisés, car les parois de la cavité du four sont faites d'un conducteur parfait qui permet la réflexion totale des ondes, et les permittivités du plateau et du support du plateau sont très faibles, de telle sorte que l'absorption de puissance est presque nulle.

g. Configuration optimisée du four :

En changeant la configuration du four, de tel sorte que la source soit placé au coin de l'enceinte du four, pour qu'on puisse placer l'aliment au milieu,

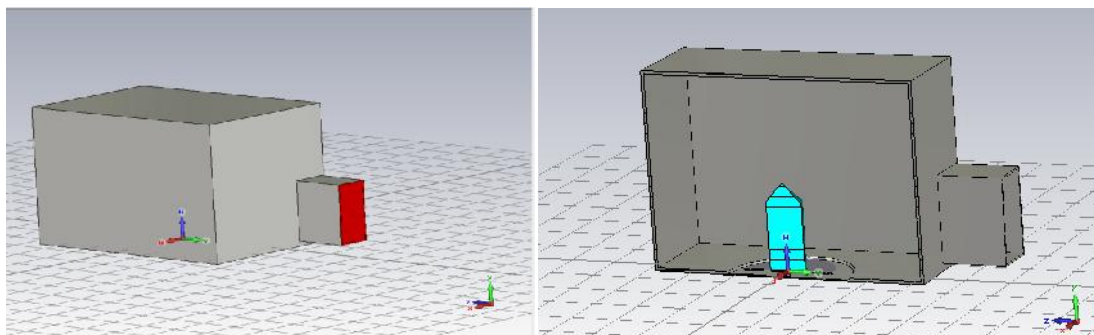


Fig. 4.9 : model du four avec la source au coin

Pour s'assurer du comportement de la source dans cet endroit, on s'est intéressé au paramètre S ;

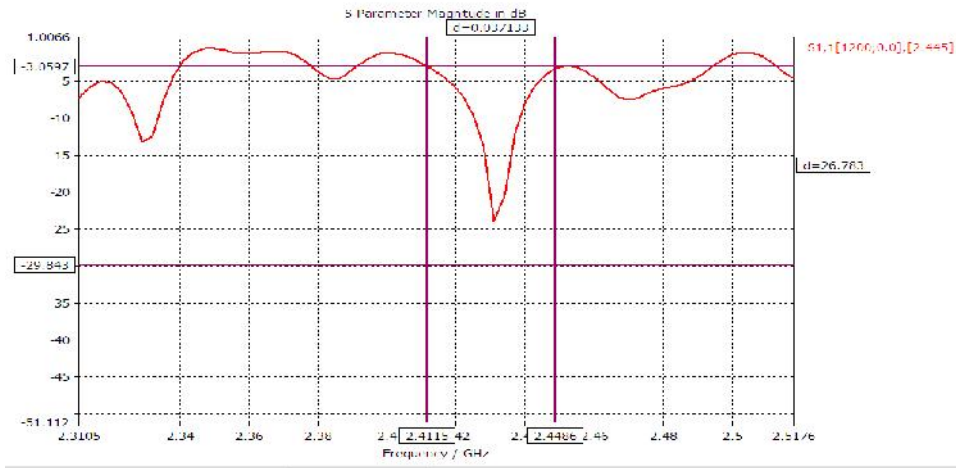


Fig. 4.10 : le S11 de la source dans la position actuelle

On remarque que la bande passante n'a pas trop changé, elle reste 20MHz, le coefficient de réflexion S11 est très inférieur a - 10 dB, et ainsi, on constate que les autres fréquences de résonance ont disparus.

L'emplacement de la source dans cet endroit favorise son fonctionnement dans sa fréquence de résonance.

Distribution du champ

La simulation du nouveau modèle nous a permis de dégager la nouvelle distribution du champ électromagnétique dans le four.

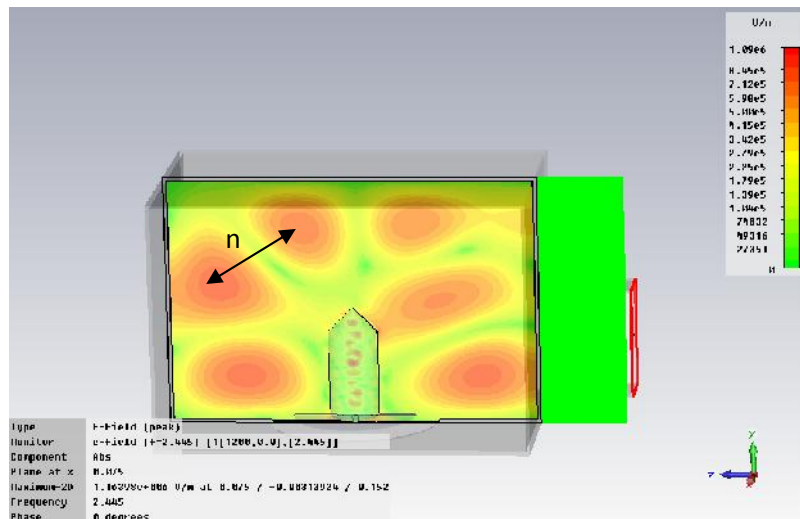


Fig. 4.11 : distribution uniforme du champ électromagnétique

La première constatation c'est que le champ dans le four devient uniforme, et les points chauds dans l'aliment sont concentrés au milieu, ainsi que l'intensité reçue par l'aliment a augmenté.

Les maxima successives du champ électromagnétique sont séparés d'une distance égale à $n = \lambda_g/2 = 6.12 \text{ cm}$.

Cette configuration paraît la meilleure à adopter dans la suite. Car elle garantit les meilleures performances du four à micro-ondes domestique.

Conclusion :

D'après ces résultats, on peut conclure que pour garantir un bon chauffage par micro ondes, il faut que :

- la source ne soit pas en face l'aliment
- les longueurs de la cavité sont proportionnelles entre elles
- le plateau tournant est une option qui permet de garantir un chauffage homogène.

En tenant compte de ces caractéristiques, on va entamer le développement d'un four à micro-ondes industriel capable d'offrir un bon rendement thermique tout en respectant les limites de sécurité.

CHAPITRE V :

DÉVELOPPEMENT D'UN FOUR À MICRO-ONDES INDUSTRIEL (EN PERSPECTIVE)

I- Introduction :

Le développement des fours à micro-ondes domestiques a très vite surpassé vers les utilisations industrielles depuis une trentaine d'années.

COSUMAR était l'une des industries agro-alimentaires qui ont adopté cette technologie de traitement thermiques par micro-ondes.

Les fours industriels à micro-ondes de COSUMAR sont principalement dédiés au chauffage des pains de sucre, cette application classique se heurte à certains problèmes qui empêchent la bonne marche de production.

Les problèmes rencontrés dans ce four industriel sont résumés ci-dessous :

- Puissance mal répartie
- grand encombrement
- rendement faible

Ceci conduit à des pertes en termes de puissance, ainsi que de consommation.

En effet, la modification d'une installation déjà existante, mais peu productive au profit d'un traitement radiatif, se déroulera toujours selon le même principe :

- Etude générale du système
- Définition de la cause principale du problème
- Proposition des solutions
- Etude des solutions proposées
- Simulation des propositions
- Mise en œuvre et exploitation

L'étude générale du système, la définition des causes des pannes, et l'étude des solutions proposées sont déjà présentés dans les chapitres précédents.

L'objectif de ce chapitre est de faire une simulation électromagnétique des modifications à apporter sur le four industriel, et qui sont déduites du chapitre précédent.

II- Description de l'Etat actuel :

Le four industriel de COSUMAR est une cavité métallique de dimension approximative de : 2 X 2 X 2 m, avec des parois conductrices. Sur les deux surfaces parallèles est placé un réseau de 80 magnétrons (40 par face), A l'intérieur du four est placé un plateau qui contient 80 pains de sucre. Il paraît que le raisonnement qui aboutissait à cette configuration était de chauffer chaque pain de sucre par une source (magnétron).

On remarque aussi que l'énergie générée par les magnétrons placés dans la partie supérieure du four est guidée directement vers les aliments au milieu par les guides d'ondes.

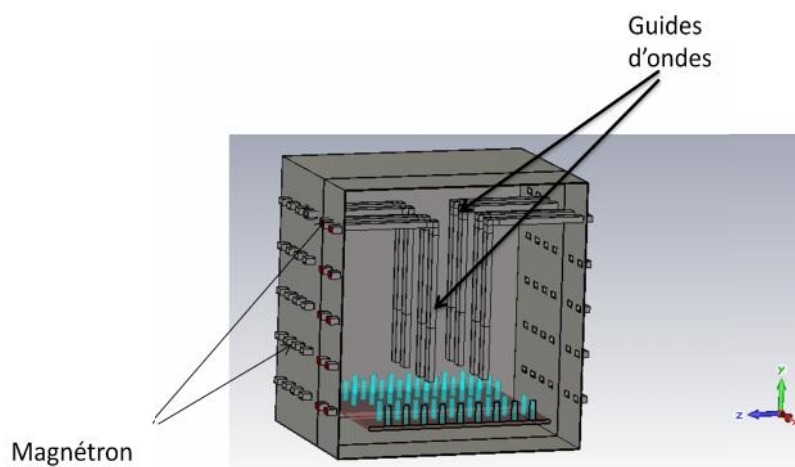


Fig. 5.1 : modèle du four industriel actuel

Cette configuration est non-économique, encombré, et peu productive.

III- Configuration optimisée :

En respectant les conditions déterminées dans le chapitre précédent dans le cas du four domestique, qui sont :

- La source ne doit pas être en face l'aliment
- Les dimensions de la cavité doivent respecter le rapport de 1.5 entre la hauteur et la longueur.

A partir de ces caractéristiques, et des caractéristiques imposées par le constructeur, on a établi des configurations optimisées qui respectent les règles de :

- Economie d'énergie
- Chauffage uniforme
- Structure moins encombrée
- Rendement élevé

1. Première configuration :

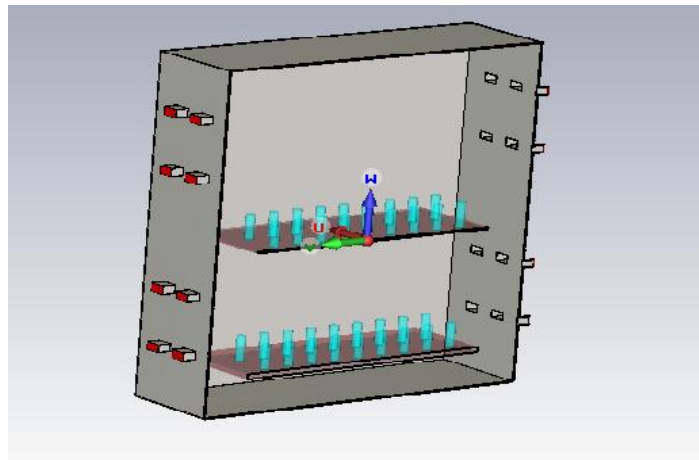


Fig. 5.2 : configuration optimisée 1 : on ajoute un plateau dans la partie supérieur du four et on supprime une ligne de magnétrons

Dans cette configuration, on profite au maximum de l'énergie produite par les magnétrons de la partie supérieure du four, et qui était avant perdue dans la cavité, ou bien guidée vers les aliments du milieu par des guides d'ondes. On a réduit l'encombrement par la suppression des guides d'ondes, on démunie la consommation par le fait de supprimer tout une ligne de magnétron, et on augmente la productivité par ajouter un autre plateau d'aliment.

2. Deuxième configuration :

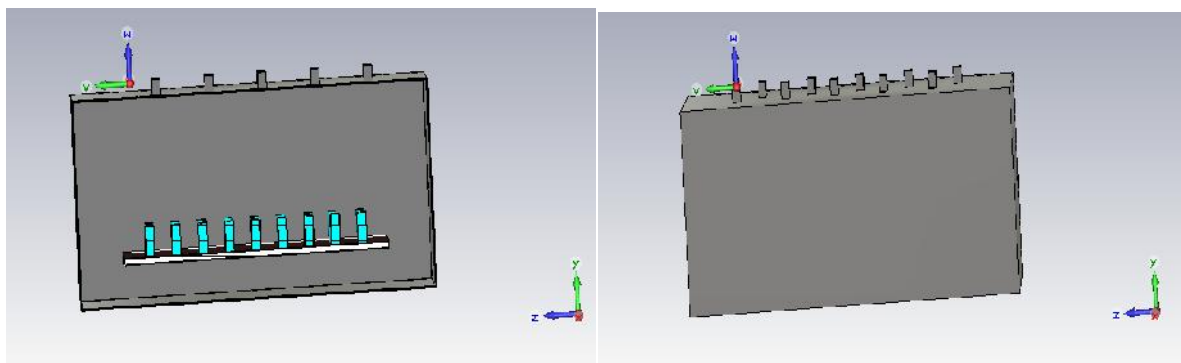


Fig. 5.3 : configuration optimisée 2 : on supprime les magnétrons des deux faces parallèles et on les places au plafond

Dans cette configuration on diminue la consommation par la diminution des nombres des magnétrons. On a supprimé les magnétrons sur les parois en face et on les remplace par

des magnétrons placés au plafond du four pour que les micro-ondes attaquent directement les aliments sont réflexion sur les parois.

Conclusion

La simulation électromagnétique de ces configuration de grandes dimensions demande des centres de calculs de haute performance, et qui ne sont pas disponible durant ma période de stage vue l'urgence des projets en cours,

Une simulation prend beaucoup de temps pour donner des résultats, "une simulation tournée nous a pris **8jours**. Cependant une suite de simulations pourra bien confirmer la meilleure solution a adopté.

CONCLUSION

L'environnement de nettoyage supérieur et la réduction des coûts de fabrication sont des exigences importantes en matière de chauffage industriel. Aujourd'hui, le chauffage par micro-ondes présente des performances intéressantes, telles que la durée plus courte de traitement, avec des avantages évidents.

L'étude faite dans ce projet nous a permis de déterminer les conditions qui garantissent ces performances et qui sont :

- réduction du taux de pannes des magnétrons, en contrôlant leurs paramètres critiques,
- optimisation des conceptions des fours pour améliorer la qualité du produit tout en comprenant l'interaction des micro-ondes avec des matériaux.
- Etablissement de l'uniformité du champ électromagnétique à l'intérieur des cavités fours, afin d'éviter les points de surchauffe qui peuvent détruire le matériel au niveau local.

Ses résultats sont obtenus tout en modélisant mathématiquement le champ électromagnétique micro-ondes à l'intérieur des cavités, en utilisant les équations de Maxwell et la distribution de champ une cavité multi mode dans l'espace 3D, sous le logiciel CST.

RÉFÉRENCES

Bibliographie :

- BERTEAUD, André J., *Les hyperfréquences et leurs applications*, Presses universitaires de France, Paris, 1976.
- GIANCOLI, Douglas A., *Physique générale 2(électricité et magnétisme)*, 2ème édition, De Boeck Université, De Boeck, Bruxelles, 1997.
- GRIFFITHS, David J., *Introduction to Electrodynamics*, 3ème édition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999.
- JOURNAL OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA, VOL. 7, NO. 2, JUNE 2009
- Large-Scale Simulation Research Laboratory (LSR)
- National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) ,112 Thailand Science Park, Pahon Yothin Rd., Klong 1, Klong Luang, Pathumthani 12120 Thailand
- 2 Plasmas agricultural application unit Walailak University, 222 Thasala, Nakhon Si Thammarat 80161 Thailand Email: chesta.ruttanapun@nectec.or.th

- THESE pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'Institut Polytechnique de Grenoble Spécialité : "Matériaux, Mécanique, Génie Civil, Electrochimie" préparée au laboratoire Science et Ingénierie des Matériaux et Procédés (SIMAP) dans le cadre de l'Ecole Doctorale " Ingénierie – Matériaux, Mécanique, Énergétique, Environnement, Procédés, Production"

- T. Santos^{1,2,*}, L. C. Costa^{1,2}, M. Valente^{1,2}, J. Monteiro^{1,2}, J. Sousa³
¹Physics Department, University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal, 213N, 3810-193 Aveiro, Portugal, 3TEKA Portugal S.A., 3834-909 Ílhavo, Portugal
*Corresponding author: Tiago Santos, tiago.santos@ua.pt

- ¹Faculty of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Narmak, Tehran 1684613114, Iran

- Institut für Hochfrequenztechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg D-21073, Germany

Internet:

<http://www.radartutorial.eu/08.transmitters/tx08.fr.html>
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Magn%C3%A9tron>
http://en.wikipedia.org/wiki/Cavity_magnetron
http://www.cst.com/Content/Documents/Articles/article679/'CST_Whitepaper_Magnetron_CST_web.pdf
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/waves/magnetron.html>
<http://www.npm.fr/p/cuisson/fours-micro-ondes/magnetrons/404>