

Rapport de projet de fin d'étude 2011

Conception d'un prototype d'un four combiné vapeur/micro-ondes

Tuteurs INSA : M. HERMAL

M. ENGEL

Tuteurs entreprise : M. FLESCH, responsable pré-développement



Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg

PROJET DE FIN D'ETUDES

<u>Auteur</u> : LIZEE Jean-Baptiste	<u>Promotion</u> : GM 2011
<u>Titre</u> : Conception d'un prototype de four combiné vapeur micro-ondes	<u>Soutenance</u> : 1 Juillet 2011
<u>Structure d'accueil</u> : GAGGENAU Industrie	
Nb de volume(s) : 1 Nb de pages : 91 Nb de références bibliographiques : 8	
<u>Résumé</u> : Le projet consiste en la réalisation d'un prototype de four combiné vapeur et micro-ondes. Le but de mon travail sur ce prototype fut la réalisation de l'étanchéité aux micro-ondes. La première partie du travail fut une étude théorique des pièges à ondes. La seconde partie consiste en la conception du prototype. Le projet se termine par la réalisation et le montage d'un prototype à partir d'un appareil existant.	
<u>Mots clés</u> : Conception, Modélisation, Ondes, Etanchéité	
<u>Zusammenfassung</u> : Das Ziel dieses Projekt wird die Fertigung eine Prototyp. Das Gerät vereint die Funktionen eines konventionellen Dampf Backofen zusätzlich Mikrowelle. Mein Arbeit ist die Fertigung die Mikrowelle und Dampf Dichtung des Apparat. Die Arbeit beginnt mit der Studie der Sperrkreis. Der zweite Teil der Arbeit ist das Design des Prototyps. Das Projekt beendet sich mit der Fertigung des Prototyps aus einem existierten Dampf Apparat.	

I. Remerciements

Je tiens à remercier d'abord Mr Yves Lebrun et mes tuteurs, Mr Sébastien Flesch, Mr Gérard Hermal et Mr Thierry Engel sans qui ce stage n'aurait pas été possible.

Je remercie ensuite tous les collègues qui ont contribué à rendre ce stage intéressant, Julien, Stéphane et Nicolas du pré-développement, tout le service de développement des fours, et à toute l'équipe du laboratoire. Leur connaissance, leur envie de la partager et leur disponibilité ont fait de ce stage, un moment de formation enrichissant.

Merci à toute l'entreprise GAGGENAU et le groupe B/S/H pour leur soutien.

Je tiens aussi à remercier l'INSA pour le soutien apporté, en particulier, Mr Christophe Cordier pour sa connaissance du logiciel Comsol.

II. Tables des matières

II.	Remerciements	3
III.	Tables des matières.....	4
IV.	Présentation de GAGGENAU	5
V.	Présentation du projet	10
VI.	Principe de fonctionnement des fours vapeurs	11
VII.	Principe de fonctionnement d'un four à micro-onde	15
VIII.	Etanchéité du four vapeur micro-ondes	21
IX.	Etude de l'étanchéité de la porte.....	29
X.	Modélisation.....	37
XI.	Etanchéité de la lampe.....	47
XII.	Etanchéité de la chaleur tournante.....	51
XIII.	Tests à réaliser sur le prototype :	58
XIV.	Bilan de mon stage	59
XV.	Bibliographie	61
XVI.	Annexe 1 : Mise en plan des principales pièces réalisées.....	63
XVII.	Annexe 2 : Résultats de la modélisation d'un piège à ondes escargot	70
XVIII.	Annexe 3 : Résultats sur la modélisation d'un piège à onde simple	74
XIX.	Annexe 4 : Protocoles expérimentaux	77
XX.	Annexe 6: Photos des différentes parties du projet	86

III. Présentation de GAGGENAU

1. Présentation générale et historique

- **Présentation générale**

GAGGENAU est une marque haut de gamme dans le domaine des appareils de cuisine. Grâce à la combinaison de technologies innovantes permettant à des particuliers de disposer d'un matériel de professionnels, de la simplicité d'utilisation de leurs produits et d'une conception assurant qualité et fiabilité, GAGGENAU est aujourd'hui reconnu dans le monde entier comme l'un des leaders de l'électroménager culinaire.

Depuis 1995, GAGGENAU appartient au groupe « BSH BOSCH und SIEMENS Hausgerate GmbH », un groupe aux dimensions internationales dont le chiffre d'affaires annuel s'élève à 8,76 milliards d'euros en 2008.

- **Historique**

La longue tradition de l'entreprise débute en 1681 par la création des forges de GAGGENAU, « Eisenwerke GAGGENAU » en allemand, par Le comte Ludwig Wilhelm Von BADEN, près de la ville actuelle de GAGGENAU, à la lisière de la forêt noire.

Durant tout le 18^{ème} et 19^{ème}, les forges de GAGGENAU vont produire des appareils pour l'agriculture, des biens en métal et des outils.

Dans les années 1880, les forges se font surnommer « l'établissement pour les nouveautés », en allemand « Etablissement fur Neuheiten ». Spécialiste de l'émaillage, GAGGENAU développe une ligne de produits très variée allant des panneaux publicitaires aux bicyclettes ou encore aux fours à charbon et à gaz. Jusqu'en 1908, 250 000 vélos « BADENIA » seront vendus.



Figure 1: le vélo BADENIA de GAGGENAU

Au 20^{ème} siècle, GAGGENAU va devenir une marque de renom très prisée à l'international. L'émail très résistant devient la base du succès des fours produits. En 1961, Georg Von BLANCQUET, visionnaire et cuisinier passionné prend la tête de l'entreprise. Il concrétise son idée révolutionnaire

de cuisine aménagée sur mesure. Son objectif est de concevoir des appareils pour professionnels, très fonctionnels et avec une esthétique sans fioriture.

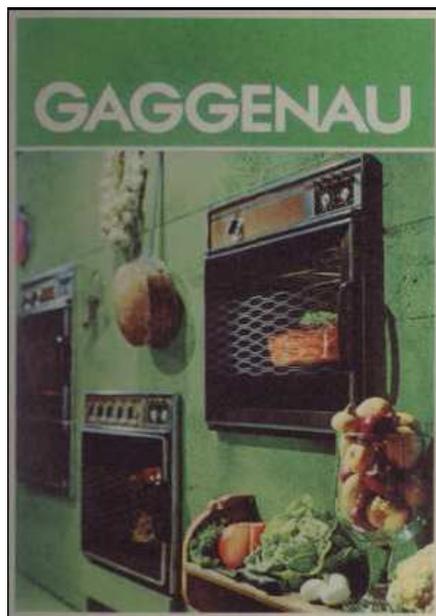


Figure 2: Affiche publicitaire GAGGENAU

Depuis 1995, GAGGENAU appartient au groupe « BSH BOSCH und SIEMENS Hausgerate GmbH ». Implantée dans plus de 30 pays, GAGGENAU est aujourd'hui reconnue par les professionnels du domaine comme la référence en matière de qualité et de design.

2. La marque GAGGENAU

- **Statut juridique (GAGGENAU INDUSTRIE LIPSHEIM)**

D'un point de vue juridique, le site de LIPSHEIM, où se déroule mon stage, est une Société par Actions Simplifiée (SAS) au capital de 8 000 000 euros et qui réunit 273 salariés.

En 2007, le chiffre d'affaire était de 79 928 808 euros avec un EBE de 11,58% et un résultat net de 5 133 282 euros.

- **Les implantations**

GAGGENAU est une marque haut de gamme appréciée dans le monde entier et qui dispose de succursales dans plus de 30 pays. Mon stage se déroule sur le site de LIPSHEIM à côté de STRASBOURG.



Figure 3: Galeries d'exposition dans le monde

- **Les Produits**

- Les fours classiques : élément central de la cuisine, le four GAGGENAU propose à l'utilisateur de nombreuses fonctions évoluées permettant de réaliser tout type de recettes.



Figure 4: Four EB 388

- Les fours vapeur : La cuisson vapeur sans pression fait partie de méthodes de cuisson les plus saines. Les vitamines, éléments nutritifs, le croquant et la couleur sont préservés. Le goût naturel est renforcé, et sans aucun additif artificiel.



Figure 5: Four vapeur BS 280

- Les tables de cuisson : Qu'il s'agisse de vitrocéramique, de gaz ou d'induction, chaque table de cuisson possède ses propres avantages.



Figure 6 : Table de cuisson GAGGENAU

GAGGENAU propose aussi des réfrigérateurs, des lave-vaisselle, des caves à vin, des appareils de ventilation, des machines à café ou encore des tiroirs chauffants.

3. Le groupe BSH

- **Présentation générale du groupe et de ses marques**

Créé en 1967 par la fusion des sociétés allemandes Robert BOSCH GmbH, et SIEMENS AG, « BSH BOSCH und SIEMENS Hausgerate GmbH » est un groupe de dimension internationale et l'un des plus grands fabricants d'électroménager au monde.

BSH compte à ce jour plus de 39 000 employés repartis dans 40 pays. En Allemagne, le groupe emploie 14 000 collaborateurs et représente ainsi le premier employeur dans le secteur de l'électroménager. Avec un chiffre d'affaires annuel de 8,8 milliards d'euros, BSH affiche une progression nettement supérieure à celle du secteur.

Deux marques principales, BOSCH et SIEMENS, sont le fondement de ce développement. BOSCH se distingue par la qualité de ses produits et la perfection technologique. SIEMENS est une marque plus orientée vers l'avenir, qui propose de nombreuses innovations en matière de technologie et de design. Le groupe peut aussi compter sur des marques spécialistes, dont fait partie GAGGENAU, et des marques régionales.

Marques principales	Marques spécialisées	Marques régionales
 BOSCH	GAGGENAU	 Balay
SIEMENS	 NEFF	LYNX
	Thermador	PITSOS
	Constructa	PROFILO
	viva	 Continental
	ufesa	COLDEX

Figure 7: Les marques du groupe

Grâce à toutes ces marques, BSH propose une gamme de produits complète et de qualité. Le groupe assure la distribution de produits qui font partie de notre quotidien comme les lave-linge, les sèche-linge, les lave-vaisselle, les aspirateurs et tout le petit électroménager.

IV. Présentation du projet

1. Introduction

Mon projet au sein de l'entreprise Gaggenau regroupe un PRT et un PFE. Le but est la réalisation du prototype d'un four combinant les fonctions d'un four vapeur actuel et la fonction micro-ondes. Nous travaillons en binôme avec Mr ADAM. Il s'est occupé de la partie génération et répartition des ondes pendant que j'ai conçu l'étanchéité de la porte.

Dans le souci de diversifier sa gamme de produit, Gaggenau cherche à réintégrer la fonction micro-ondes à ses appareils. En effet, il est intéressant pour un client d'avoir un appareil étant capable de coupler toutes ses fonctions pour gagner de la place dans la cuisine. Il n'a plus à privilégier un appareil qui ne fait que micro-ondes. Gaggenau ne les produisant pas, un appareil combiné lui permet de gagner des parts de marché. La base de notre prototype sera un four BS 240.

Le but de ce projet pour Gaggenau est d'accroître ses compétences sur la fonction micro-ondes. Les connaissances acquises pendant sa conception et les retours d'expériences que l'on pourra avoir dessus seront un premier pas dans l'acquisition de la compétence micro-ondes. Il permettra à Gaggenau d'orienter ses choix technologiques lors de la conception d'un tel appareil.

2. Rappels du PRT

Dans cette première partie du projet, nous avons réalisé deux études en parallèle.

La première est l'étude énergétique du phénomène de cuisson par la vapeur, les micro-ondes et les deux modes combinés. La modélisation des échanges de chaleur montre que la combinaison des deux modes de cuisson offre un compromis intéressant entre vitesse et qualité de cuisson.

La seconde étude est une analyse fonctionnelle d'un tel produit. Elle a permis de voir qu'il n'y avait à priori pas de problèmes majeurs empêchant la réalisation d'un tel appareil. Le travail peut se découper en plusieurs grandes parties :

- L'étanchéité aux ondes
- L'implantation et la ventilation des composants du micro-onde
- La répartition des ondes dans le moufle
- La compatibilité électromagnétique du moufle et de ses composants

V. Principe de fonctionnement des fours vapeurs

1. Présentation générale

- **Utilisation d'un four vapeur**

Un four vapeur est un produit qui se développe très vite et qui occupe de plus en plus de part de marché dans les outils de cuisson.

Il permet de cuire les aliments tout en préservant sa saveur d'origine et sa couleur. Les plats gardent pendant la cuisson l'eau qu'ils contiennent et un ensemble d'éléments qui sont asséchés par la cuisson classique, comme les vitamines et les sels minéraux. Les plats cuits ne sont jamais brûlés puisqu'ils contiennent toujours de l'eau. La cuisson ne dégage pas d'odeurs car la vapeur maintient les arômes dans les mets. Le four vapeur permet de gagner de l'énergie par rapport à un four traditionnel. La cuisson se fait à plus basse température et plus rapidement. La chaleur est transmise par la vapeur donc l'aliment reçoit la chaleur latente de condensation. Ce moyen est plus efficace que la convection et la conduction de l'air d'un four traditionnel.

Par contre, un tel four cuit beaucoup moins vite qu'un four micro-ondes. Pour réchauffer une baguette de pain précuite, seules 2 minutes suffisent avec un four micro-ondes alors que 10 minutes seront nécessaires avec un four vapeur. La température maximale de cuisson est moins importante que dans un four traditionnel. Les fours réalisés actuellement peuvent atteindre 230°C au lieu de 300°C, ce qui limite pour certains plats, par exemple les pizzas.

Avantages	Inconvénients
Conservation de la saveur et la couleur	Moins rapide qu'un four micro-ondes
Pas de plats brûlés	Moins chaud qu'un four traditionnel
Gain d'énergie	
Pas d'odeurs de cuisson	

- **Schéma général d'un four vapeur**

Le premier schéma représente un four vapeur avec une résistance entourant un ventilateur répartissant les gouttelettes sur celle-ci :

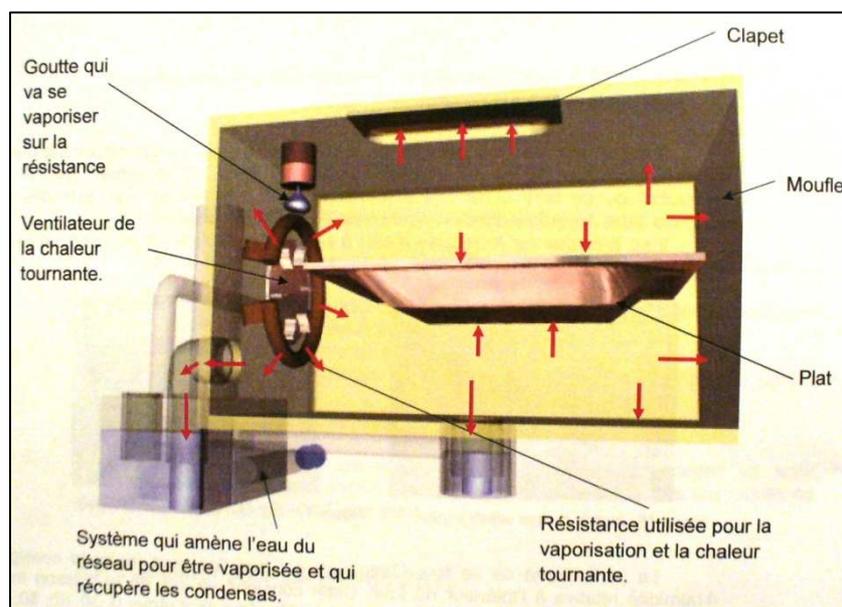


Figure 8 : Schéma général d'un four vapeur

La vapeur est produite par la résistance sur le côté de l'appareil. Elle est dirigée vers l'aliment par le déplacement d'air créé par le ventilateur. En cas de surpression, elle est évacuée par le clapet. Les condensats sont récupérés au fond du moufle, soit directement par la coupelle soit par un siphon.

Le second schéma représente le système d'alimentation en vapeur d'eau de la deuxième technologie. L'eau est amenée dans une coupelle en bas de la cavité puis évaporée par une résistance. C'est ce système qui équipe notre prototype.

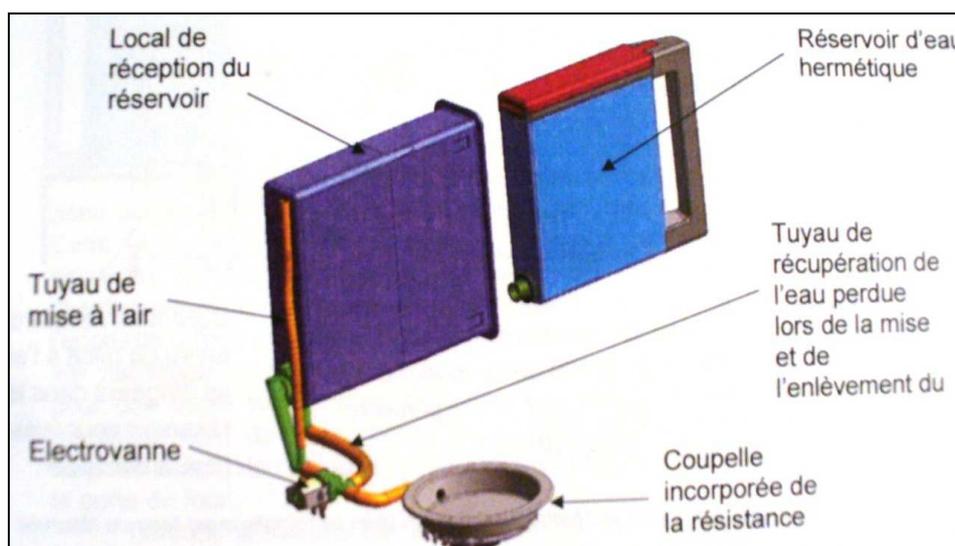


Figure 9 : Système d'alimentation en eau du four vapeur

- **Principe de fonctionnement :**

La transmission de chaleur se fait par la vapeur. L'enjeu est de la produire constamment. Actuellement chez Gaggenau, il existe deux types de technologies : une qui chauffe de l'eau contenue dans une coupelle et l'autre qui projette des gouttelettes d'eau sur une résistance.

Celle avec la coupelle sera la technologie retenue pour cette étude. Elle équipe les fours vapeur d'entrée de gamme. L'eau est contenue dans une coupelle en bas du four. En dessous de la coupelle se trouve une résistance qui vaporise progressivement l'eau.

Une des subtilités du système réside dans l'approvisionnement en eau de la coupelle. L'eau est stockée dans un réservoir rempli régulièrement par l'utilisateur. Le réservoir est étanche la seule ouverture en fonctionnement normal est celle qui est dirigée vers la coupelle. Lorsque l'eau de la coupelle descend en dessous du niveau de l'ouverture, de l'air remonte le conduit jusqu'au réservoir et le niveau d'eau retrouve son niveau d'origine.

La seconde technologie fonctionne avec une résistance circulaire qui entoure un ventilateur. Les gouttes d'eau sont amenées sur le ventilateur qui les projette en gouttelettes sur la résistance. L'eau est immédiatement vaporisée. L'approvisionnement d'eau est géré par une pompe commandé par un automate.

2. Cuisson par vapeur

- **La vapeur d'eau**

Pour appréhender tous les phénomènes qui rentrent en jeu dans un four vapeur, il faut s'intéresser aux principes régissant les changements d'états de la matière. Dans un four vapeur, se trouve une transformation liquide-vapeur et la transformation réciproque.

Dans la cavité du four, l'eau est présente sous les deux états, on y trouve aussi de l'air. Pour une température et une pression donnée, l'air est capable de contenir une certaine quantité de vapeur d'eau. Cette quantité est répertoriée dans des diagrammes. Plus la température est élevée et plus la pression est basse, plus l'air peut contenir de la vapeur. C'est selon ces abaques que la quantité d'eau à évaporer est calculée dans les fours vapeurs actuels.

La vapeur d'eau se condense de nouveau lorsqu'elle est en présence d'air ou d'un solide plus froid ou lorsque l'air est saturé en vapeur. Dans le cas d'un four, la vapeur est produite en continu, elle est donc obligée de se condenser en quantité équivalente. Une partie se condense sur l'aliment et les parois de la cavité, l'autre partie se condense à l'extérieur quand elle est évacuée par le clapet. Le fonctionnement normal est à la pression atmosphérique.

Ci-dessous, un diagramme (p,V) mettant en évidence la zone où l'on trouve de la vapeur et du liquide :

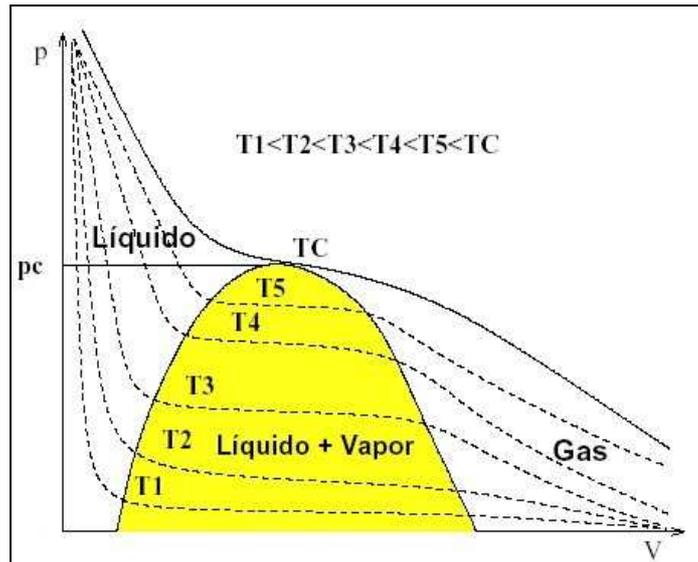


Figure 10 : Diagramme (p,v)

- **La transmission de puissance**

La chaleur est transmise à l'aliment à travers la vapeur. Lorsqu'elle se dépose sur l'aliment moins chaud, elle change d'état et lui restitue toute la chaleur latente qu'elle contient. On retrouve alors sur l'aliment une pellicule d'eau liquide qui va être absorbée dans la suite de la cuisson. Une partie de la vapeur se condense également sur les parois. Elle les réchauffe mais constitue une perte d'énergie et une salissure. Cependant il est très difficile d'améliorer ce point, la répartition de vapeur est uniforme et ce sujet ne devrait pas être abordé pendant cette étude.

Une autre partie de l'apport de chaleur vient de l'air chaud qui par convection forcée chauffe les parois de l'aliment. L'absence de grill produit un réchauffement par rayonnement assez faible.

VI. Principe de fonctionnement d'un four à micro-onde

1. Présentation générale

- **Principe de fonctionnement**

Un four à micro-ondes est un appareil électroménager de grande consommation. Sa fonction principale est de transférer de l'énergie vers un élément que l'on souhaite chauffer. Le procédé de chauffage s'effectue par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques.

Cette technique de transmission de chaleur est dite « active », contrairement aux fours à résistance classiques. En effet, l'énergie est acheminée directement au cœur de l'aliment avec la technologie des micro-ondes tandis que dans un four classique la transmission de chaleur s'effectue par l'intermédiaire de l'air.

Les fours à micro-ondes utilisent le principe de chauffage diélectrique pour transmettre l'énergie à l'élément à chauffer. Ce procédé nécessite la création d'ondes électromagnétiques spécifiques d'énergie suffisante qui sont acheminées vers une charge (ici un aliment) dans laquelle elles peuvent se dissiper notamment sous forme de chaleur. La fréquence utilisée pour les appareils domestiques ($f = 2450 \text{ Hz}$) appartient à la famille des micro-ondes qui couvrent le domaine fréquentiel suivant :

$$400 \text{ Hz} \leq f_{\text{micro-ondes}} \leq 18\,000 \text{ Hz}$$

La longueur d'onde utilisée dans ces appareils a été choisie de manière à optimiser le transfert d'énergie vers les molécules d'eau liquide. En pratique, plus une charge est composée d'eau, plus celle-ci va être chauffée.

Les micro-ondes ainsi créés et acheminés vont se dissiper à une certaine vitesse dans la charge que l'on souhaite chauffer. Ceci permettra de chauffer un aliment directement de l'intérieur de celui-ci puisque les micro-ondes vont avoir le temps de s'y propager avant de perdre toute leur énergie.

- **Schéma général**

De manière générale, tous les fours à micro-ondes fonctionnent suivant un principe commun. L'élément de base servant à générer les ondes électromagnétiques est appelé magnétron¹. Cet élément va permettre de générer des ondes à la fréquence voulue et de les transmettre via un guide d'onde ainsi que des répartiteurs d'ondes dans l'enceinte du four à micro-onde (également appelé le moufle).

Le moufle correspond dans le four à micro-onde à l'enceinte de cuisson dans laquelle l'utilisateur va y placer un élément qu'il souhaite chauffer. Concrètement, il s'agit d'un caisson dont les parois réfléchissent les ondes à la manière de miroirs optiques. La charge à chauffer est donc placée dans le moufle, de telle manière que les ondes électromagnétiques présentes dans le moufle finissent par s'y dissiper.

¹ Voir Chapitre II.3 – Génération des micro-ondes

Un four à micro-onde peut donc être représenté comme le montre la figure ci-dessous. Il est à noter qu'en pratique, le magnétron ne diffuse pas les ondes directement dans le moufle mais sont acheminés à l'aide de guides spécifiques².

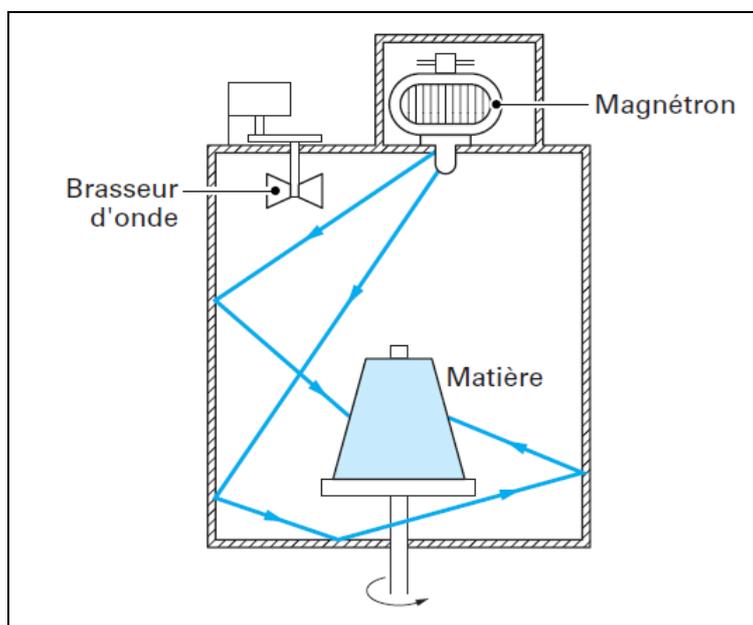


Figure 11 : Schéma général d'un four à micro-onde

Pour que le chauffage de l'aliment soit le plus homogène possible, il faut que la répartition des ondes dans le moufle soit uniforme. En pratique ceci est difficile à réaliser, malgré les systèmes de répartition utilisés. Dans certains fours à micro-ondes, il est donc important de tourner directement l'aliment à l'aide d'un moteur pour uniformiser son chauffage.

- **Utilisations, avantages, inconvénients**

La fréquence des ondes employées dans les appareils domestiques permet de chauffer préférentiellement les aliments dont la teneur en eau est importante. De plus, la génération des ondes étant très rapide³, le four peut en quelques secondes fonctionner à sa puissance maximale.

En pratique, le four à micro-onde sera donc principalement utilisé pour chauffer très rapidement des aliments. La montée en température sera cependant limitée par la température d'évaporation de l'eau. En effet, les ondes utilisées n'interagissant pas avec les gaz il est impossible de chauffer un aliment à plus de 100°C.

Cette limitation en montée de température ne permet donc en général pas de cuire des aliments c'est-à-dire les transformer au niveau moléculaire. Les températures mises en jeu pour effectuer une cuisson sont généralement comprises entre 100°C et 300°C. On utilisera donc principalement le four à micro-onde pour chauffer ou réchauffer un aliment avant de le consommer. Pour palier à cette limitation, certains fours à micro-onde sont équipés de résistance chauffante pour permettre une montée en température plus importante permettant une cuisson.

² Voir Chapitre II.3 – Guidage des ondes

³ Un préchauffage de 3 à 4 secondes par effet joule de la cathode du magnétron est nécessaire.

Le tableau ci-dessous récapitule les différents avantages et inconvénients de l'utilisation d'un four à micro-onde :

Avantages	Inconvénients
Mise en route après quelques secondes	Montée en température limitée
Puissance maximale disponible immédiatement	Chauffage dépendant de la teneur en eau liquide
Chauffage en profondeur de l'aliment	

2. Le chauffage diélectrique

• Définitions et formalisme

Les phénomènes physiques permettant le transfert d'énergie sous forme de chaleur dans un aliment repose sur la physique de l'électromagnétisme. Durant la suite de ce rapport nous allons utiliser le formalisme d'une onde monochromatique (c'est-à-dire composée d'une seule fréquence). On peut donc définir le champ électromagnétique par :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t)}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \cdot t)}$$

Avec :

- \vec{E} le champ électrique et \vec{B} le champ magnétique.
- (\vec{k}, ω) le couple caractérisant l'onde avec \vec{k} le vecteur d'onde (complexe) et ω la pulsation
- \vec{r} repère la position d'un point M quelconque dans un repère $R(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$

Les constantes fondamentales utilisées sont les suivantes :

- la constante diélectrique du vide : $\epsilon_0 = \frac{1}{36 \cdot \pi \cdot 10^9} F \cdot m^{-1}$
- la perméabilité magnétique du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1}$
- la vitesse de la lumière : $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$

Dans ce cas, Le sujet intéressant portera sur la propagation d'une onde électromagnétique dans la matière.

Pour rendre compte des propriétés électriques dans un matériau considéré, seuls deux paramètre seront utilisés. Ces deux paramètres vont permettre de rendre compte de la propagation d'une onde électrique dans un milieu. Ces paramètres sont les suivants :

- la perméabilité complexe du matériau : $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 = \varepsilon_0 [\varepsilon_r'(\omega) + i\varepsilon_r''(\omega)]$
- la conductivité électrique du matériau : γ en $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$

La perméabilité relative ε_r d'un matériau s'écrit également sous la forme :

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + i \varepsilon_r' \tan(\theta_p)$$

La quantité $\varepsilon_r' \tan(\theta_p)$ est appelée le facteur de perte, car il caractérise l'aptitude du milieu matériel à absorber l'énergie électromagnétique, en général convertie en énergie thermique.

- **Classification électrique des matériaux**

D'un point de vue électrique, on distingue deux grandes classes de matériaux : les conducteurs et les isolants (aussi appelés diélectriques). Un matériau est conducteur lorsqu'il dispose de charges libres capables de se mouvoir dans la matière sous l'effet d'un champ électrique.

La capacité à conduire l'électricité d'un matériau est donnée par sa conductivité électrique γ . Les matériaux conducteurs sont caractérisés par une forte conductivité électrique tandis qu'un matériau diélectrique (ou isolant) aura une conductivité très faible devant un conducteur. Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs de conductivité pour certains matériaux :

Type	Matériau	Conductivité [$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$]
Conducteurs	Conducteur parfait	∞
	Argent	$6,25 \cdot 10^7$
	Cuivre	$5,9 \cdot 10^7$
	Fer	$9,62 \cdot 10^6$
Diélectriques	Diélectrique parfait	0
	Eau pure liquide	$\approx 10^{-9}$
	Verre	$\approx 10^{-17}$
	Polymères	$\approx 10^{-20}$

Cette classification des matériaux est très importante dans l'utilisation des micro-ondes. En effet, la réaction d'un objet soumis à un champ électrique sera radicalement différente selon la nature conductrice de celui-ci.

Une remarque importante peut également être formulée ici : le tableau ci-dessus montre clairement que la molécule d'eau liquide a une conductivité électrique très faible. L'eau liquide est donc classée comme un isolant électrique (diélectrique).

Or, il est en général couramment admis que l'eau conduit l'électricité. En réalité, ce sont les ions présents dans l'eau qui vont augmenter la conductivité du mélange « eau + ions ». En pratique, il sera impossible de supprimer tout les ions présents dans l'eau car les molécules H₂O auront une propension naturelle à se diviser en ions H⁺ et OH⁻ qui seront conducteurs.

En conclusion, lorsque l'on considère un volume d'eau quelconque, globalement ce volume aura une conductivité voisine de celle d'un conducteur (selon sa teneur en ions) mais la grande majorité de ses molécules (H₂O) sera intrinsèquement isolantes. C'est pourquoi en présence d'un champ magnétique, l'eau liquide réagira globalement comme un diélectrique.

- **Propagation d'une onde dans la matière**

Nous allons nous intéresser ici à la propagation dans la matière d'une onde électrique. Ces équations de propagations sont directement issues des équations de Maxwell. Une onde monochromatique⁴ a pour équation de propagation :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

Dans cette expression, on a :

- \vec{E}_0 [V.m⁻¹] l'amplitude initiale de l'onde
- ω [rad.s⁻¹] la pulsation de l'onde en rad/s
- \vec{r} repère la position d'un point M quelconque dans un repère $R(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$
- \vec{k} le vecteur d'onde (complexe)

Concrètement, le type de propagation d'une onde dans un milieu va donc dépendre entièrement du vecteur d'onde complexe \vec{k} . La valeur de \vec{k} va donc dépendre du milieu dans lequel l'onde se propage, celle-ci se calcule à partir de la permittivité relative du matériau de la manière suivante :

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r(\omega)$$

On distinguera donc trois types de propagation selon la valeur du vecteur d'onde :

a) Onde progressive sans atténuation

La propagation progressive sans atténuation d'une onde est permise lorsque $k = k_r$ est un **nombre réel**. Le champ électrique aura comme écriture :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

Ce type de propagation ne modifie pas l'amplitude de l'onde électromagnétique, c'est une propagation sans perte. On retrouve ce type de propagation dans les milieux comme par exemple le vide ou encore les gaz.

b) Onde évanescente

Si $k = i \cdot k_i$ est un nombre **imaginaire pur**, l'onde sera appelée évanescente. L'écriture du champ électrique sera alors :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-\vec{k}_i \cdot \vec{r}} e^{-i \cdot \omega t}$$

Le champ électrique présentera donc une décroissance spatiale exponentielle sans propagation. Ce type de propagation se retrouvera dans notre cas dans les métaux, qui vont alors empêcher la propagation de l'onde et la réfléchir dans la direction opposée.

c) Onde progressive atténuée

⁴ Une onde composée d'une seule fréquence.

Enfin, dans le cas le plus général \vec{k} sera un **nombre complexe**, c'est-à-dire $\vec{k} = k_r + i \cdot k_i$. Dans ce cas, le champ électrique sera défini par :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-k_i \cdot \vec{r}} e^{i(k_r \cdot \vec{r} - \omega \cdot t)}$$

La première exponentielle décrit alors l'atténuation spatiale de l'amplitude de l'onde⁵. Le second terme décrit la propagation de l'onde sans atténuation. C'est le type de propagation qui s'effectue dans des milieux constitués de matériaux diélectriques.

Généralement, l'atténuation de l'amplitude de l'onde électrique ce fait par transmission d'énergie calorifique vers le milieu de propagation. C'est donc ce type de propagation d'onde que l'on va utiliser afin de faire chauffer un aliment dans un four à micro-ondes.

- **Transmission de puissance par ondes électromagnétiques**

La transmission de l'énergie à un aliment soumis à un champ électrique va se faire par transmission de l'énergie électrique en énergie calorifique lors d'une propagation progressive atténuée.

La puissance électromagnétique volumique reçue par un matériau de volume ΔV dont la perméabilité relative vaut $\epsilon_r = \epsilon_r' + i \epsilon_r' \tan(\theta_p)$ et placé dans un champ électrique de valeur efficace $E [V.m^{-1}]$ et de fréquence f vaut :

$$\Delta P_{\epsilon} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r' \tan(\theta_p) E^2 [W.m^{-3}]$$

La distance d est également appelée profondeur de pénétration d'une onde. Celle-ci est définie comme la distance par rapport à la surface du matériau sur laquelle les ondes cèdent 63% de leur énergie initiale sous forme de chaleur. La distance de pénétration de l'onde peut s'approximer en posant :

$$d \approx \frac{c}{2\pi f \sqrt{\epsilon_r' \tan(\theta_p)}} [m]$$

Il n'y a donc pas de transmission de puissance entre une onde électromagnétique et les gaz, en effet, la propagation d'une onde dans un gaz n'est pas atténuée. Cette notion est très importante car elle démontre le fait que les ondes électromagnétiques n'ont aucun effet sur la vapeur d'eau présente dans le four (qui est un gaz).

⁵ L'atténuation de l'onde dans un milieu dépend donc de la partie imaginaire du vecteur d'onde \vec{k} , qui lui-même dépend de la partie imaginaire de la perméabilité relative ϵ_r . La partie imaginaire de ϵ_r est également appelé facteur de perte du matériau.

VII. Etanchéité du four vapeur micro-ondes

1. Grands principes de l'étanchéité aux micro-ondes :

Une des caractéristiques les plus importantes pour un appareil utilisant des micro-ondes de forte puissance est l'isolation de l'appareil en lui-même : celui-ci doit être hermétique aux ondes et seule une petite quantité de fuite est tolérée par la réglementation⁶.

Plusieurs types de solutions peuvent être envisagées afin d'empêcher le passage des ondes électromagnétiques d'une zone à une autre. On distinguera deux types d'isolations : l'isolation à l'aide d'une paroi réfléchissante et l'isolation à l'aide de piège à ondes.

- **Isolation à l'aide de parois réfléchissantes**

Lorsque l'on souhaite isoler une zone contenant des micro-ondes d'une autre, on peut interposer entre les deux une paroi réfléchissante : c'est-à-dire dont le mode de propagation de l'onde dans le milieu constituant la paroi est du type évanescent.

De plus, les restrictions dues à l'utilisation dans le four vapeur limitent le choix de matériau que l'on peut y implanter, ceux-ci doivent en effet respecter un certain cahier des charges. Une des possibilités de matériau compatible avec l'environnement du four et conducteur d'électricité⁷ est l'acier inoxydable déjà présent dans les moufles existant.

La majorité de la paroi du moufle est donc déjà isolante aux micro-ondes. Il est cependant nécessaire à certains endroits de laisser passer l'air en empêchant le passage des micro-ondes, c'est le cas par exemple des orifices de ventilation, ou encore au niveau du clapet d'évacuation de surpression. Il peut également être nécessaire de laisser passer la lumière et de la même manière stopper les micro-ondes, c'est le cas au niveau de la lampe qui doit être isolée des micro-ondes ou encore de la porte vitrée où une vision de l'intérieur du moufle est nécessaire en fonctionnement.

Dans ces cas, on pourra utiliser des plaques en acier inoxydable trouées. En effet, sous certaines conditions pour la taille de trous, une plaque conductrice trouée pourra présenter une étanchéité suffisante aux ondes. De telles plaques sont déjà utilisées dans les vitres des fours à micro-ondes traditionnels par exemple.



Figure 12 : Plaque d'acier inoxydable perforée

⁶ La puissance surfacique issue des micro-ondes à 5cm du four ne doit pas dépasser une valeur de

$$P_{max} = 5 \frac{mW}{cm^2}.$$

⁷ Pour garantir une réflexion des ondes.

- **Etude des plaques perforées :**

Le passage d'une onde électromagnétique par une plaque conductrice trouée change les caractéristiques de l'onde. Lorsque l'ouverture est suffisamment petite, l'onde devient évanescence.

Pour déterminer la taille limite des trous à percer, on peut les modéliser par des guides d'ondes circulaires.

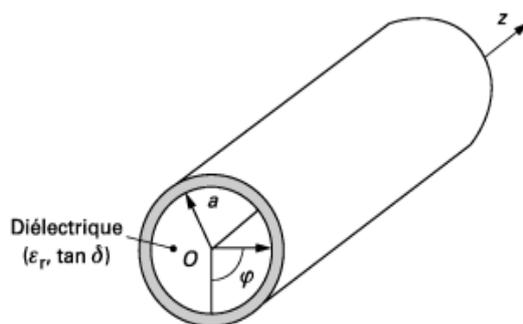


Figure 13: Guide d'ondes circulaire

Toutes les ondes qui traversent ces trous doivent être évanescences.

a) Rappel du PRT

La longueur d'onde de coupure d'un guide circulaire vaut :

$$\lambda_c = \frac{2 * \pi * a}{1,841}$$

Le coefficient 1,841 est issu des fonctions de Bessel. Ces fonctions définissent pour chaque mode TE ou TM, les coefficients qui permettent de calculer la longueur d'onde de coupure, le plus petit étant celui pour le mode TE₁₀.

Le rayon maximal à partir de laquelle les ondes deviennent évanescences vaut 35,9mm.

b) Etude de l'atténuation d'une onde évanescence :

L'objectif de cette partie est déterminé l'atténuation derrière une telle tôle.

Une onde évanescence a une équation de propagation suivante :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-\vec{k}_t \cdot \vec{r}} e^{-i \cdot \omega \cdot t}$$

La constante de propagation à l'intérieur de cette structure est donnée par la formule suivante

$$\beta = \sqrt{(k^2 - k_c^2)}$$

Avec k , la constante de propagation de l'onde dans le diélectrique à l'intérieur du guide d'onde
 k_c , la constante de coupure du guide d'onde

En les remplaçant par leurs expressions respectives, la formule suivante est obtenue :

$$k = \omega \sqrt{\epsilon_0 * \epsilon_r * \mu_0}$$

$$k_c = 2\pi * f_c \sqrt{\epsilon_0 * \epsilon_r * \mu_0}$$

Avec f_c , la fréquence de coupure du guide d'onde [Hz]

ϵ_0 , la permittivité dans le vide

ϵ_r , la permittivité dans le matériau

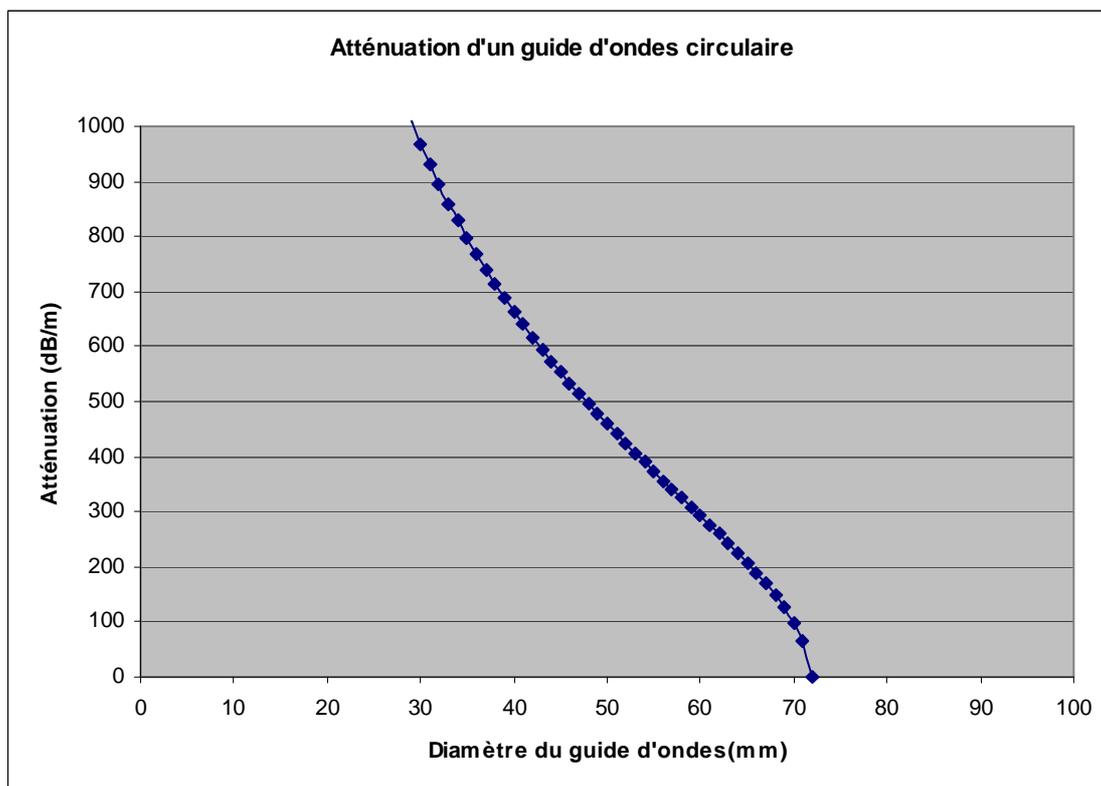
μ_0 , la perméabilité dans le vide

ω , la pulsation de l'onde dans le diélectrique

Exprimé en dB/m, nous obtenons la formule :

$$\beta = 2\pi * 8,686 * \sqrt{\left(\frac{\epsilon_r}{\lambda_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda_c}\right)^2}$$

Cette constante de propagation permet de calculer l'atténuation lors de la propagation de l'onde évanescence en fonction du rayon. Voici la courbe obtenue.



L'atténuation augmente donc très rapidement. Dans la réalité, il faudra essayer de faire les trous les plus petits possibles pour une meilleure isolation. La valeur d'un centimètre étant la limite maximale.

c) Rapport avec la puissance électromagnétique :

La puissance électromagnétique s'exprime

$$\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{B}$$

En introduisant les équations d'ondes, la puissance peut s'exprimer :

$$\vec{P} = \overline{P_0} * e^{-2\beta x}$$

La puissance électromagnétique décroît deux fois plus vite que le champ électrique.

- **Etude des fentes**

De nombreux assemblages nécessitent l'assemblage de tôles l'une sur l'autre. Une technique pour réaliser l'étanchéité est de mettre des points de fixation réguliers. Entre ceux-ci, il existe toujours un espace minime. Il pose des problèmes au niveau de l'étanchéité des ondes.

Pour approcher ce problème, on peut modéliser ces fentes comme des guides d'ondes rectangulaires.

Pour étanchéifier ce type d'assemblage, il est nécessaire de les rendre évanescentes. C'est-à-dire que la longueur d'onde de coupure soit inférieure à la longueur d'onde dans le vide :

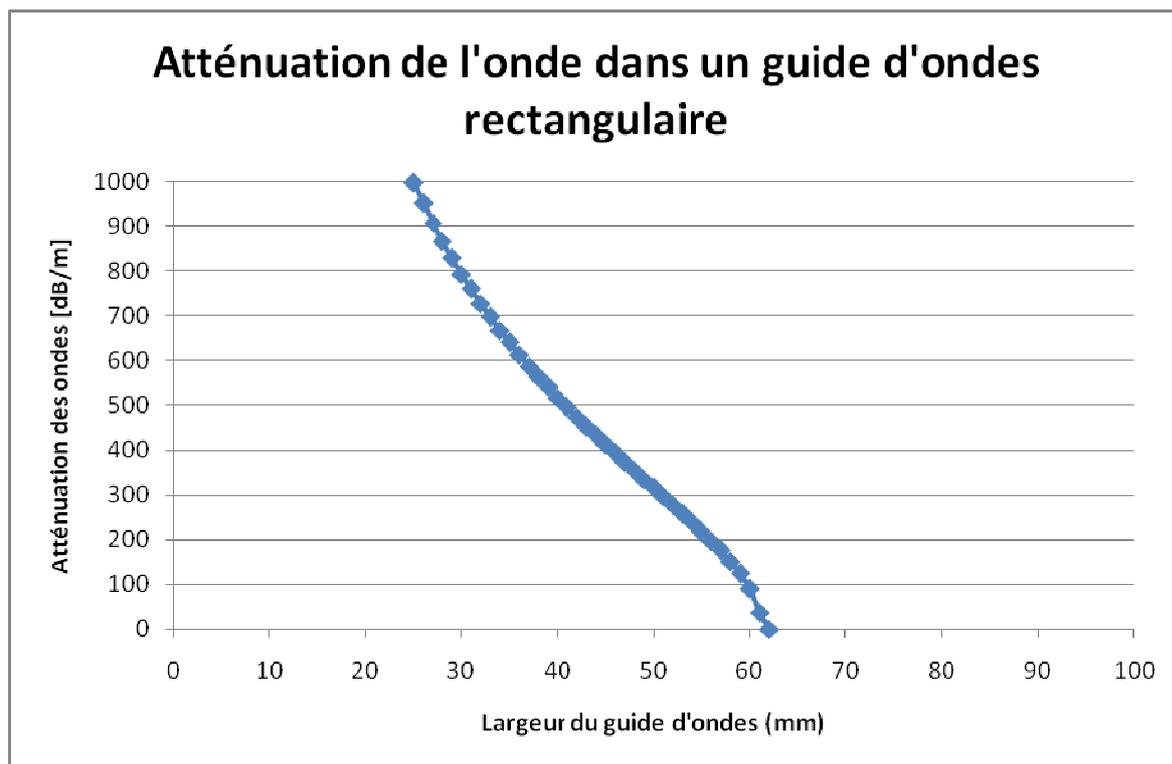
$$\lambda_c = 2 \sqrt{\left(\frac{a}{m}\right)^2 + \left(\frac{b}{n}\right)^2}$$

Avec a, largeur du guide d'onde [m]
 b, la hauteur du guide d'onde[m]
 m, le mode de propagation selon l'axe x
 n, le mode de propagation selon l'axe y

Le mode TE₁₀ est celui dont la longueur d'onde est la plus faible. Il y a donc une longueur d'onde de coupure dans ce cas égale :

$$\lambda_c = 2a$$

En suivant le même raisonnement qu'avec les guides d'ondes circulaires, nous obtenons donc une courbe similaire représentant l'atténuation en fonction de l'espacement entre les points de fixation.



Cette courbe montre qu'une petite diminution de la largeur de la fente a des conséquences importantes sur l'atténuation. En pratique, il ne faut pas laisser d'espaces de plus d'un quart de longueur d'ondes dans le vide.

- **Isolation à l'aide de pièges à ondes**

Le point le plus sensible de l'étanchéité est la porte du four, celle-ci doit en effet être parfaitement étanche aux ondes lorsqu'elle est fermée. Pour ce faire, on utilisera en général un « piège à onde ». Connaissant la longueur d'onde de l'onde à piéger, on peut réaliser une structure qui va faire interférer les ondes électromagnétiques de manière destructive.

Ce type de montage nécessite l'implantation sur le pourtour de la porte d'un profilé aux dimensions spécifiques (ElcoBrandt, 2002) :

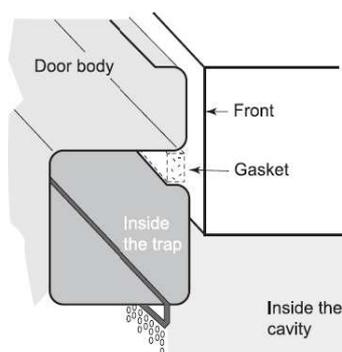


Figure 14:PIEGE A ONDE

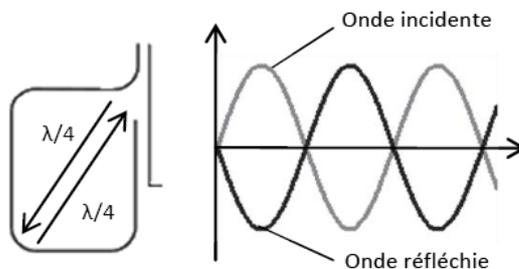


Figure 15:SUPPRESSION DES ONDES PAR INTERFERENCES DESTRUCTIVES

Les dimensions du piège à onde induisent un déphasage entre l'onde incidente et réfléchie égal à π . Ainsi, l'onde résultante aura une amplitude égale à 0 en tout point de l'espace. La théorie fait état de deux grandes familles de pièges : un piège à ondes simple et un piège à ondes « escargot ». Dans la réalité, seul le piège à ondes escargot est utilisé.

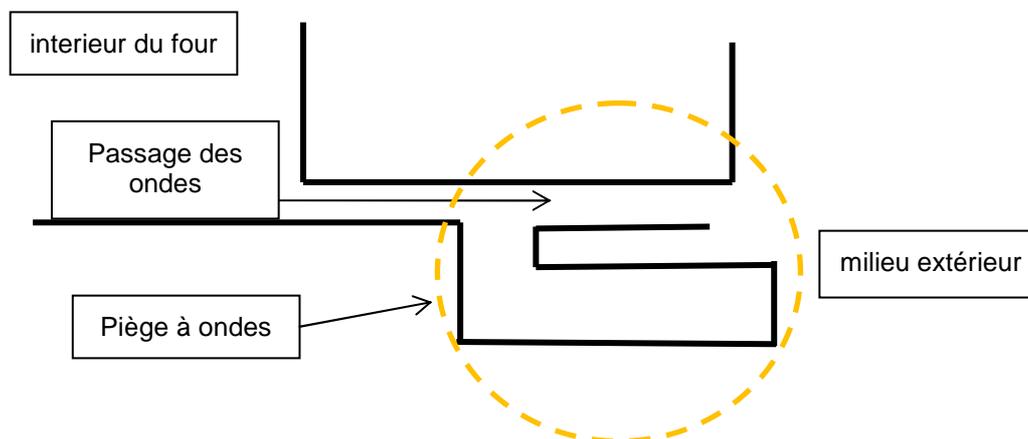


Figure 16: Piège à ondes simple

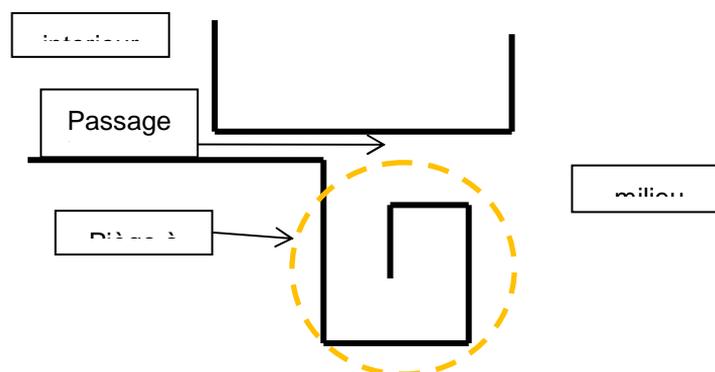


Figure 17: Piège à ondes "escargot"

2. Etude des arcs électriques

Lors de l'assemblage de plusieurs pièces métalliques à l'intérieur du moufle, il y a quelques précautions à prendre. Le risque principal provient des arcs électriques. Ils apparaissent lorsque deux pièces conductrices sont proches avec des formes anguleuses. Ce phénomène est dû au fait qu'une onde va créer par l'intermédiaire des courants de Foucault des différences de potentiel entre deux pièces conductrices. Lorsque ces potentiels sont suffisamment importants, l'air entre les deux perd ses qualités isolantes. Par une ionisation du gaz, une liaison électrique s'établit. L'inconvénient est la détérioration locale des pièces.

- **Présentation de l'expérience**

Des essais ont été réalisés pour déterminer les conditions d'apparitions des arcs électriques. Cette étude fut menée avec une plaque rectangulaire introduite à l'intérieur du moufle. Le magnétron est ensuite mis en fonctionnement. La plaque a été préalablement peinte avec une peinture isolante comme celle que l'on trouve sur les pièges à ondes. La variation de la distance entre un angle avec la plaque des bords du moufle sera étudiée.

- **Résultat de l'expérience**

Il faut un quasi-contact pour créer un arc. Cette expérience ne nous a pas permis d'être précis en dessous du millimètre mais elle permet de donner une idée des conditions d'apparitions des arcs électriques. La distance est très faible de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre. La différence de potentiel entre les deux pièces peut être estimée en prenant comme hypothèse, $d = 0,3\text{mm}$.

$$U = E_{\text{disruptif}} * d$$

Avec $E_{\text{disruptif}} = 3,6.10^6$ [V/m], la rigidité diélectrique de l'air

d (m), la distance entre les deux pièces qui génèrent l'arc électrique

U (V), la différence de potentiel entre les deux pièces

$$U = 1080\text{V}$$

Elle correspond à une différence de potentiel de l'ordre du millier de volts.

L'essai fut réalisé une fois avec de la peinture et une fois sans. Aucune différence dans les conditions d'apparitions d'arcs électriques ne fut remarquée. Ils apparaissent également lors du quasi-contact. Les risques d'arcs électriques sont donc minimes avec des pièces ne se touchant pas. Il est préférable d'assurer une continuité électrique entre deux pièces dans le moufle.

3. Grands principes de l'étanchéité à la vapeur :

- **Isolation de la cavité du four :**

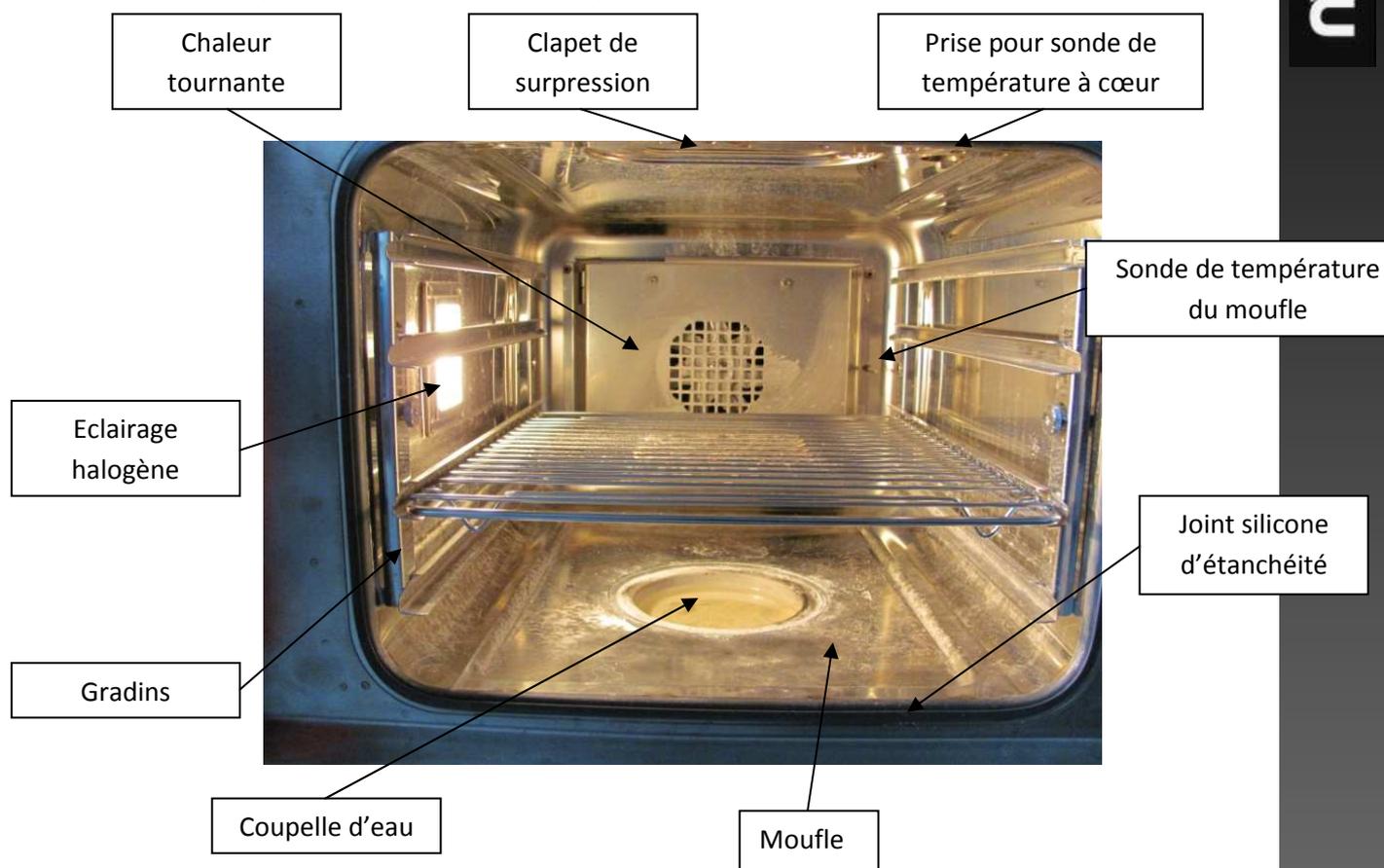
La vapeur est un gaz qui reste dans notre cas, à la pression atmosphérique. L'étanchéité d'un four s'appuie sur une cavité qui contient le gaz. Il est nécessaire d'avoir des accessoires à l'intérieur du moufle et des ouvertures comme la porte. Dans ces cas-là, l'étanchéité est réalisée par une pièce venant obstruée l'ouverture. L'interface entre les deux est réalisée par un joint. Dans le cas de la porte, un joint qui est soumis à de nombreuses contraintes, il doit absorber un jeu de la porte de 2mm, doit être efficace avec une pression réduite et ramener les condensats à l'intérieur du four. Dans les cas d'une partie non mobile, l'étanchéité peut être réalisée avec un joint tubulaire serré au niveau de l'interface. Etant soumis à d'importantes contraintes de température, ses joints sont souvent réalisés en silicone.

- **Parties à étanchéfier**

Dans cette partie, les différentes parties à étanchéfier ont été identifiées. L'élément qui demande le plus de travail est la porte. Elle réalise l'interface avec l'utilisateur et doit regrouper dans un espace restreint tous les composants permettant de répondre à un cahier des charges complexe.

A l'intérieur du four, nous avons la lampe, la chaleur tournante, les capteurs et le clapet de surpression.

Voici ci-dessous une photo de l'intérieur du four qui présente les différents accessoires :



VIII. Etude de l'étanchéité de la porte

1. Présentation de la porte :

La porte est un élément clé du futur prototype. C'est l'interface avec l'utilisateur et par sa fonction obéit à un cahier des charges assez strict. Elle doit remplir à la fois la fonction d'étanchéité à la vapeur et aux micro-ondes. Elle est composée d'un cadre, de deux vitres, une interne et l'autre externe, d'une tôle en inox derrière la vitre externe, d'un écran faisant l'interface avec l'utilisateur et d'une poignée. La liaison avec le four est réalisée à l'aide de deux charnières dont l'une laisse passer les fils de commande de l'écran.

2. Définition du cahier des charges :

Le cahier des charges complet est dans l'annexe 7, en voici les points essentiels :

- La porte doit être étanche aux micro-ondes, le flux de puissance sortant ne doit pas dépasser $5\text{mW}/\text{cm}^2$.
- La porte doit être étanche à la vapeur.
- La porte ne doit pas atteindre des températures trop chaudes en surface, 60K° pour les zones extérieures et 40°K pour les zones que l'utilisateur serait amené à toucher comme les poignées.
- La porte doit être munie de systèmes de verrouillage adéquats qui empêchent le fonctionnement du magnétron lorsque la porte n'est pas suffisamment fermée.

3. Recherche de solutions :

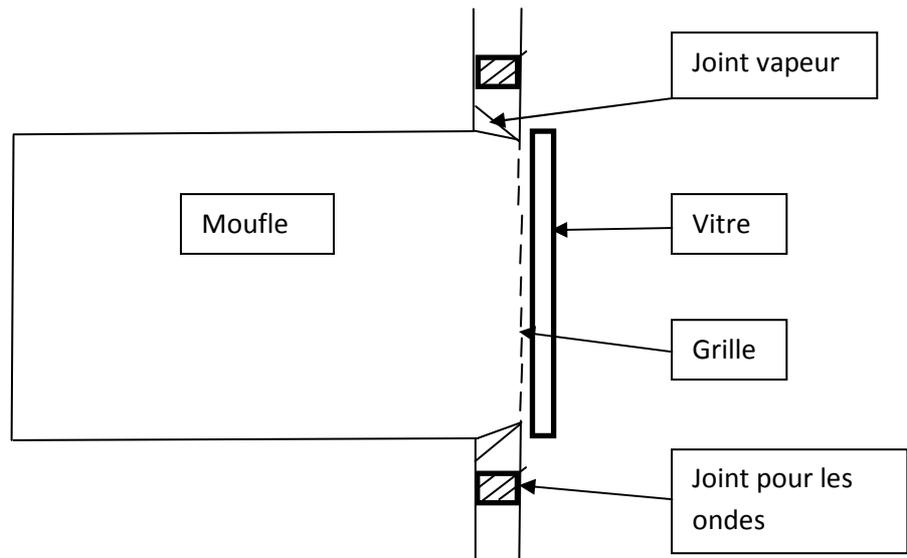
La première partie de la recherche fut d'envisager plusieurs solutions qui permettent la réalisation de l'étanchéité. La principale difficulté rencontrée est l'encombrement. Cinq solutions ont été élaborées, que l'on peut répartir en deux catégories, celles qui utilisent un piège à ondes et celles qui n'en utilise pas.

- **Solutions sans piège à ondes**

- a) Solution 1, utilisation d'un joint étanche aux ondes :*

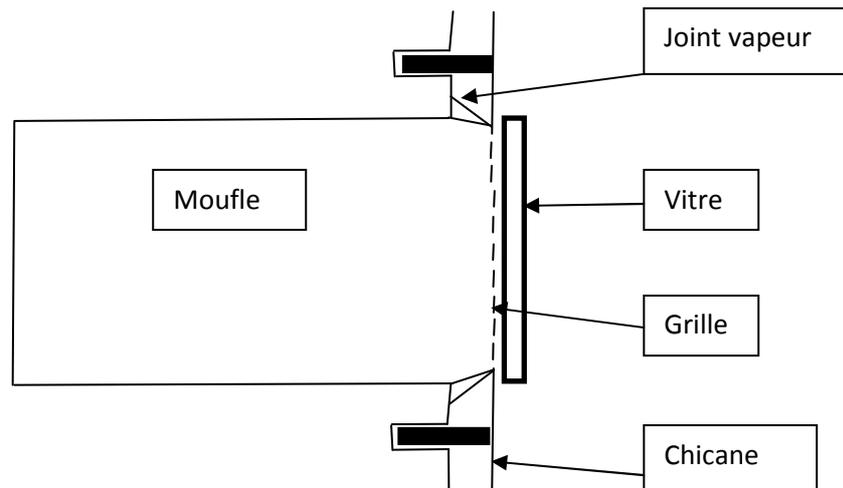
Le principe de cette solution est équivalent à celle conçue sur le prototype du four micro-ondes actuel. Elle réalise l'étanchéité aux ondes au niveau de la vitre avec une grille soudée par point au cadre. L'étanchéité sur les bords de la cavité est assurée par un joint conducteur qui atténue les ondes.

Il existe des joints de la sorte dans le domaine des armoires métalliques, par exemple produit par Parker. Le problème de ces joints est qu'il faut assurer un effort très important pour qu'ils soient efficaces. La porte pouvant être manipulée par un utilisateur sans force, le joint ne correspond pas à cette utilisation.



b) Solution 2, utilisation d'une chicane :

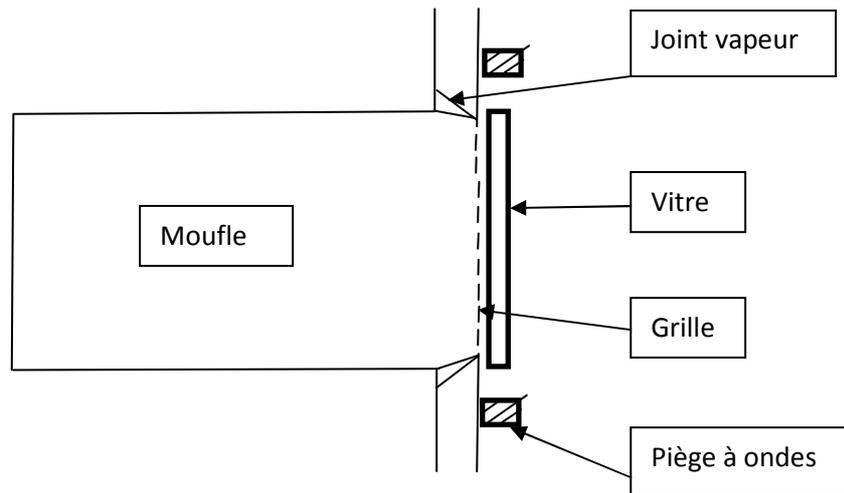
L'idée est d'utiliser une chicane à la place d'un piège à ondes. Cette chicane permet de faire deux miroirs aux ondes qui les renvoie vers l'intérieur du moufle. Cette chicane a l'avantage de ne pas créer de pertes d'énergie. Par contre, elle génère de hauts risques d'arcs électriques et demande une maîtrise importante du jeu.



- Etanchéité avec un piège à ondes :

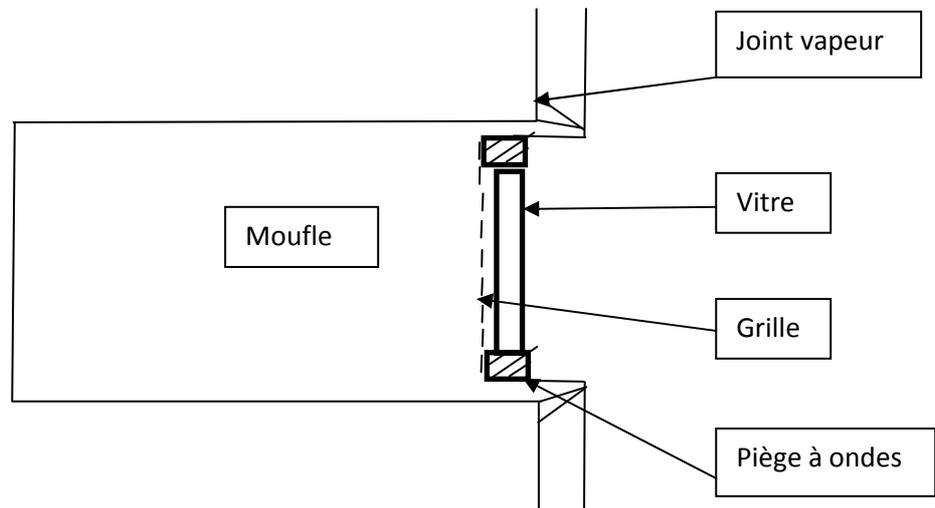
c) Solution 3, intégration d'un piège à ondes à l'intérieur de la porte :

Dans cette solution, nous intégrons le piège à ondes à l'intérieur de la porte. Cette solution est la plus classique mais engendre de nombreux problèmes d'encombrements.



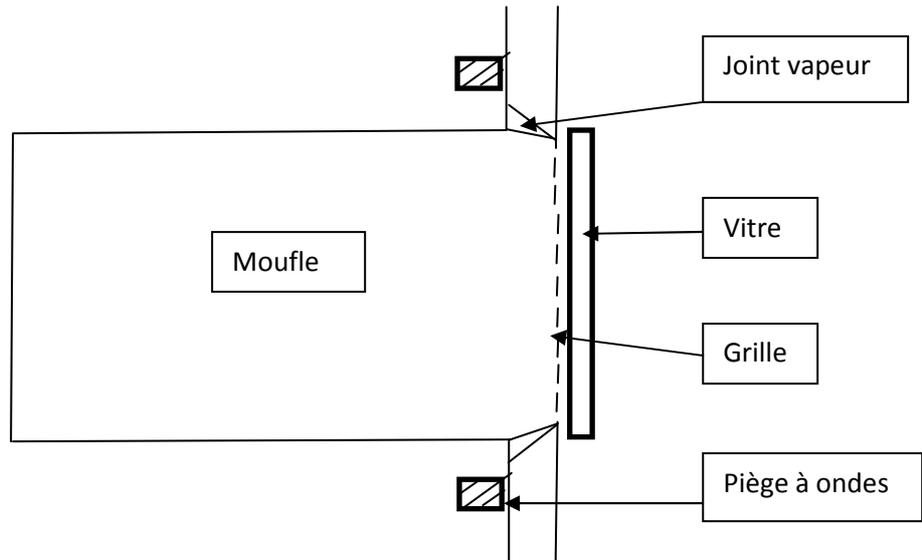
d) Solution 4, le piège à ondes s'insère dans la cavité :

Cette solution conserve la porte dans l'état actuel. Le piège à ondes est rajouté directement à l'avant en occupant un espace à l'intérieur du moufle. Elle permet de repousser l'ensemble de reporter les modifications à faire sur le moufle et nous plus sur la porte.



e) Solution 5, intégration d'un piège au moufle :

Cette solution s'appuie sur une idée originale qui n'existe pas actuellement. Elle consiste à intégrer le piège à ondes dans le moufle. Le gros avantage est de déplacer le piège à ondes à un endroit où la place ne manque pas et de ne pas être dépendant des jeux de positionnement de la porte. Cette solution est par contre difficile à réaliser car la modification du moufle est très délicate



Pour faciliter notre choix, un tableau où chaque critère est noté de 1 à 5 avec une pondération est établi. Ces critères font apparaitre la performance de la solution et la difficulté de sa mise en oeuvre.

Critères d'évaluation	Pondération	Utilisation d'un joint étanché aux ondes	Piège à ondes en chicane	Piège à ondes intégré à la porte	Piège à ondes à l'intérieur du moufle	Piège à ondes intégré au moufle
Facilité de réalisation prototype	2	4	3	3	1	2
Fiabilité de l'étanchéité	3	2	2	4	5	3
Durée de vie	2	2	2	4	4	4
Cout de fabrication	1	4	3	3	3	2
Modification de la porte	1	4	4	3	4	4
Modification du moufle	2	5	5	5	2	1
Utilisation de pièces existantes	1	2	2	3	4	2
Présence de joint dans le moufle	1	4	3	2	4	5
Problème d'encombrement	2	4	4	3	3	4
Modification du joint vapeur	2	2	2	5	4	5
Respect du design Gaggenau	1	2	1	3	4	3
Intégration à la plateforme de montage	1	2	1	4	4	1
Facilité de réalisation série	1	1	2	3	4	2
Total		59	54	73	70	60

Le tableau ci-dessus montre que les solutions les plus avantageuses pur notre prototype sont les 3 et 4 soit celle avec un piège à ondes intégré à la porte et celle avec un piège à ondes qui rentre dans le moufle.

Pour orienter le choix, ni le moufle ni le joint vapeur ne seront changés. Le moufle est très difficile à modifier car c'est la pièce maitresse du four et une erreur de réalisation rend impossible la

réalisation du prototype. Le joint vapeur est un élément stratégique clé qui est le fruit de nombreuses années de recherches. Ces deux contraintes orientent la décision vers la réalisation de la solution 3. L'intérêt pour Gaggenau est aussi de tester une solution différente de celle du four Panasonic.

4. Réalisation de la solution :

Une fois la solution choisie, la conception peut débuter. Le gros problème est l'encombrement du piège à ondes. Il a besoin d'avoir une tôle en vis-à-vis pour être efficace. Cette condition pose un problème au niveau du réservoir. Il constitue un trou dans la façade qui offre un chemin de fuite privilégié pour les ondes.

Face à ce problème, l'étude des pièges à ondes sera une aide dans nos choix technologiques.

5. Etude de la performance des pièges à ondes

Le but de cette étude est d'étudier les grilles et les pièges à ondes existants sur les appareils actuels et de comparer leur efficacité en relevant leurs principales caractéristiques.

- **Présentation des appareils étudiés**

Cette étude de l'existant s'appuie sur plusieurs modèles de fours micro-ondes présents chez Gaggenau. Voici une brève présentation de ses appareils.

a) Four micro-ondes Panasonic BM 270 :

Ce four micro-ondes est un produit de Panasonic avec un design Gaggenau. Ce sont les fours micro-ondes vendus actuellement par Gaggenau. La technologie micro-ondes est entièrement maîtrisée par Panasonic, y compris le système d'étanchéité aux ondes au niveau de la porte qui est assemblé chez eux.



Figure 18: Four micro-ondes BM 270

b) Le four EM 200 :

Ce four a été conçu par Gaggenau il y a une trentaine d'année. On en trouve encore en fonctionnement, par exemple à la cuisine de Gaggenau. Il a un système d'étanchéité avec une grille et un piège à ondes en deux pièces. C'est le seul produit étudié à être muni de cette technologie.

c) Le four EM 119 :

C'est un four micro-ondes entrée de gamme réalisé en externe par Gaggenau.



Figure 19: Four micro-ondes EM 119

d) Four vapeur/micro-ondes de Toshiba :

Ce four, créé par Toshiba possède des caractéristiques incroyables qui en font un four très polyvalent. Il peut atteindre une température de 350°C avec les modes de cuisson par vapeur, micro-ondes, chaleur tournante et les modes combinés de chaleur tournante/ vapeur et vapeur/micro-ondes. Un test de performance a été réalisé. Il montre que le four ne tient pas du tout la température annoncée et que les matériaux se dégradent à partir de 200°C.

- **Critères de performance :**

Pour mener cette étude, les fuites micro-ondes seront mesurées sur différents appareils. Pour cela chez Gaggenau un appareil mesure le flux de puissance électromagnétique venant de toutes les directions. Cet appareil est équipé d'un cadran de lecture et d'une sonde. Cette sonde est équipée d'une protection en mousse d'épaisseur 5cm ce qui permet de prendre la mesure à la distance spécifié dans la norme.

- **Résultats :**

Le tableau qui suit regroupe les résultats obtenus :

Appareil	Verre d'eau	Puissance (W)	Fuite maximale sur le contour (mW/cm ²)	Fuite maximale sur la vitre (mW/cm ²)
Panasonic	non	1000	0,4	0,1
	oui		0,2	0
Toshiba	non	1000	1,4	0,3
	oui		0,7	0,2
EM 200	non	850	0,2	0,7
	oui		0,2	0,6
EM 119	non	800	0,5	0,3
	oui		0,25	0,15

- **Grandeurs caractéristiques des différents fours étudiés :**

Des grandeurs caractéristiques de ces fours ont été relevés en parallèle qui paraissent pertinentes dans l'analyse de l'étanchéité.

	Dimensions générales				
Appareil	Ecart entre le moufle et la porte c (mm)	diamètre des trous dans la grille (mm)	taille du métal entre les trous (mm)	Distance entre la grille et l'extérieur a (mm)	longueur de la partie plate b (mm)
Panasonic	1	1	0,5	45	10
Toshiba	0,8	1,4	0,8	35	5
EM 200		0,7	0,25	55	
EM 119	1	1,6	0,8	25	7

Les mesures permettent de mettre en lumière plusieurs résultats intéressants :

- **Exploitation des résultats**

e) Remarque 1 :

On peut remarquer une corrélation directe entre la taille des trous de la grille et la fuite qu'elle engendre. Cette constatation rejoint la théorie démontrée dans le paragraphe

f) Remarque 2 :

L'étanchéité du four Toshiba est assez mauvaise au niveau du contour car le contact entre le piège à ondes et le moufle n'est pas bon. Il n'y a pas de force de verrouillage et seules les charnières assurent la mise en position de la porte. Dans toutes les autres portes, nous avons un système de verrouillage qui assure un bon maintien de la porte lors du fonctionnement.

g) Remarque 3 :

L'étanchéité au niveau de la grille du four EM 200 est mauvaise bien que les trous de sont maillages sont les plus petits. Ce défaut est du au fait que le piège à ondes est réalisé par deux pièces qui sont assemblées par soudure. Cette technologie laisse un chemin de fuite préférentiel pour les ondes.

h) Remarque 4 :

L'étanchéité du four Panasonic a une bonne étanchéité au niveau de son contour. D'une part, le piège à ondes est efficace mais un point qui le différencie des autres est la chicane qu'il possède derrière le piège à ondes. Elle permet d'allonger le chemin de fuite des ondes et donc d'accentuer la perte de puissance lorsque celles-ci sont évanescences et une réflexion des ondes vers l'intérieur du moufle même une fois le piège à ondes franchi.

i) Remarque 5 :

Tous les pièges à ondes sont fixés de manière à laisser un vide après eux le long du chemin de fuite des ondes. L'espace minimal laissé mesure 10 millimètres sur le four EM 119. Nous reprendrons cette valeur pour la conception de notre prototype.

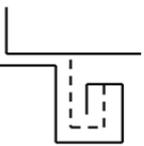
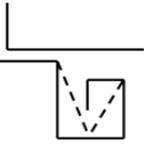
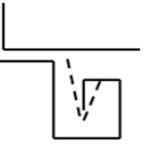
6. Etude des pièges à ondes :

Dans cette analyse de l'existant, il a fallu également essayé de voir quels étaient les dimensions importantes pour la conception d'un piège à ondes. Le but fut d'essayer de retrouver ce quart de longueur d'ondes tant recherché.

La longueur d'ondes qui doit être considérée dans ces cas là est la longueur d'ondes guidée et pas celle dans le vide. Il est possible de modéliser la fente d'arriver des ondes comme un guide d'ondes coplanaire. Avec cette hypothèse, la longueur d'onde de coupure étant infini pour les modes transverses électriques selon la direction y, il peut être considéré que :

$$\lambda_g = \lambda_0$$

Il a donc été nécessaire de recenser dans un tableau les dimensions importantes des pièges à ondes et d'essayer de retrouver une dimension commune qui serait retombe sur le quart de longueur d'onde, soit 30,6mm. Voici les différents chemins envisagés :

	chemin au centre	diagonale	Diagonale au centre
Piège à ondes Panasonic	36,15	39,27	28,65
Piège à ondes <u>Steam cube</u>	37,90	39,04	31,23
Piège à ondes EM 119	37,80	44,12	30,27
			

Ce tableau montre qu'aucun chemin ne correspond à la dimension recherchée. Cette étude ne permet pas de caractériser la dimension importante dans un piège à ondes en forme d'escargot.

IX. Modélisation

Nous avons cherché à modéliser les pièges à ondes pour plusieurs raisons :

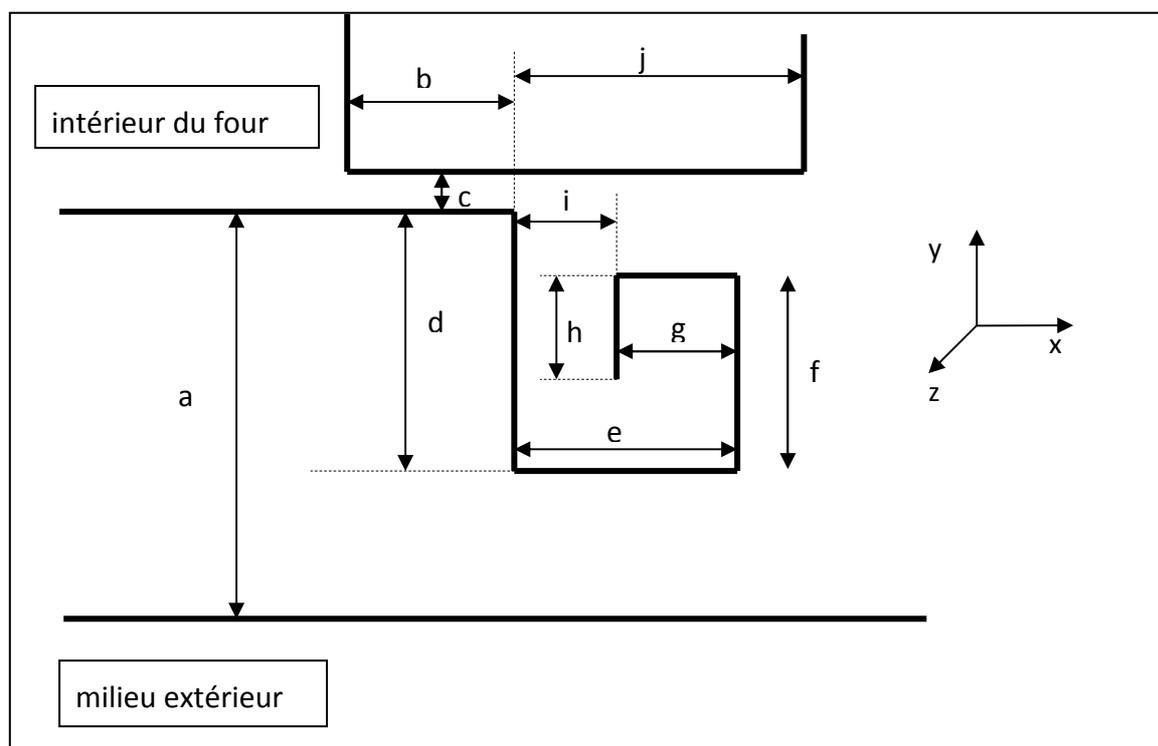
- Réduire l'encombrement du piège à ondes pour limiter le nombre de modifications,
- Essayer d'améliorer son efficacité,
- Mesurer l'influence des variations des dimensions pour la fabrication.

1. Paramètres étudiés

L'objet étudié est un piège à ondes. Le but est d'appréhender les paramètres importants dans la conception du piège à ondes.

Il a fallu varier les paramètres qui nous semblaient importants pour l'efficacité du piège à ondes :

- la longueur de l'espace entre la porte du four et le moufle, b
- la largeur de cette fente, c
- la profondeur du piège à ondes, d
- la largeur du piège à ondes, e
- la hauteur des créneaux, f
- la fermeture du piège à ondes, g
- la hauteur des rabats, h
- la longueur de tôle après le piège à ondes, j
- le mode de propagation, m



• Construction du modèle

Le modèle est construit selon la figure ci-dessous. Il a été modélisé une partie d'un piège à ondes, d'une largeur équivalente à 10 créneaux soit 17,5cm. Cette largeur permet d'avoir une propagation

non atténuée des ondes selon les modes un et deux en ayant des temps de calcul acceptables. Lors de cette étude sur les différents modes de propagation, il a fallu augmenter cette largeur à 35cm pour que les cinq premiers modes puissent exister. Il faut que cette largeur soit supérieure à la longueur d'onde de coupure donnée dans le cas des ondes transverses électriques Te_{m0} :

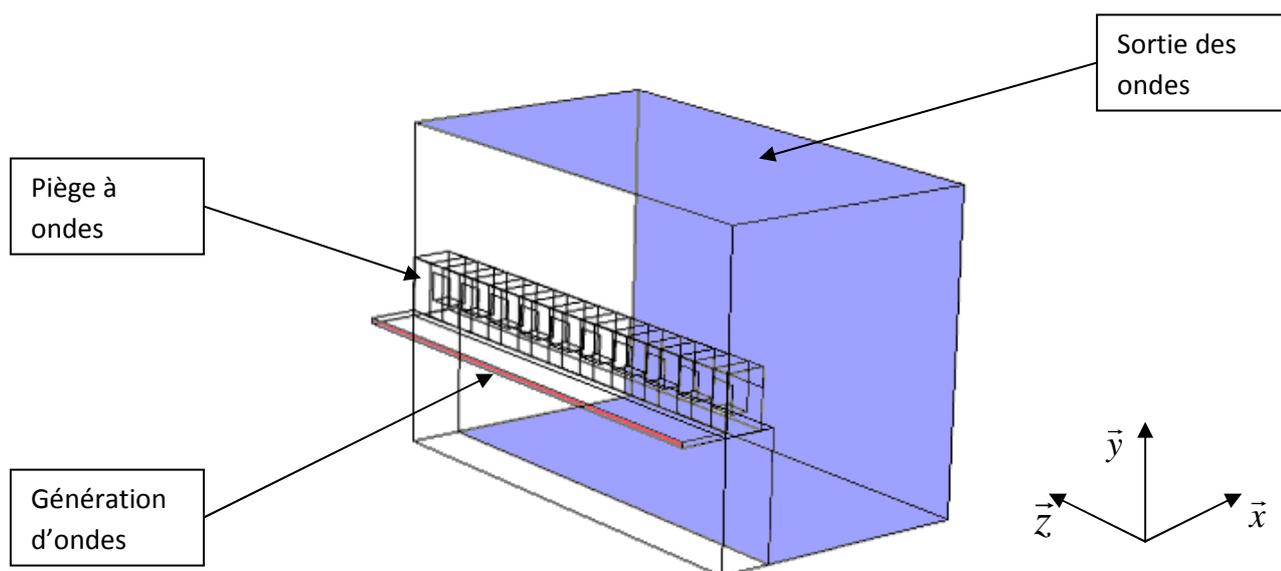
$$\lambda_c = 2ma$$

Avec m désignant le nombre de mode
à la largeur du guide

- **Conditions limites :**

Les conditions limites imposées sont les suivantes :

- A l'entrée de la fente, un générateur d'ondes appelé un port est placé. Il produit une onde transverse électrique plane qui se propage de l'intérieur du four vers l'extérieur. Elle se propage selon son mode fondamental. A chaque fois ce cas sera étudié car c'est le plus défavorable.
- Les frontières qui représentent de la matière sont des réflecteurs électriques parfaits. Cette condition n'est qu'une approche de la réalité, il existe des pertes dans les matériaux que l'on néglige dans cette étude.
- Les frontières qui sont en face du piège à ondes sont transparentes aux ondes électromagnétiques. Elles représentent la sortie vers le milieu extérieur.



Il a été posé comme base de l'étude, les valeurs des paramètres retrouvées dans le four Panasonic

Paramètres	Valeurs standards (mm)
b longueur de l'ouverture entre le moufle et la porte	10
c hauteur de l'ouverture entre le moufle et la porte	2
d profondeur du piège à ondes	20
e largeur du piège à onde	17,5
f hauteur des créneaux	17,6
g largeur des créneaux	7,8

h hauteur du rabat	7,4
--------------------	-----

Ces paramètres sont ceux qui varient pour savoir si une optimisation des dimensions est possible.

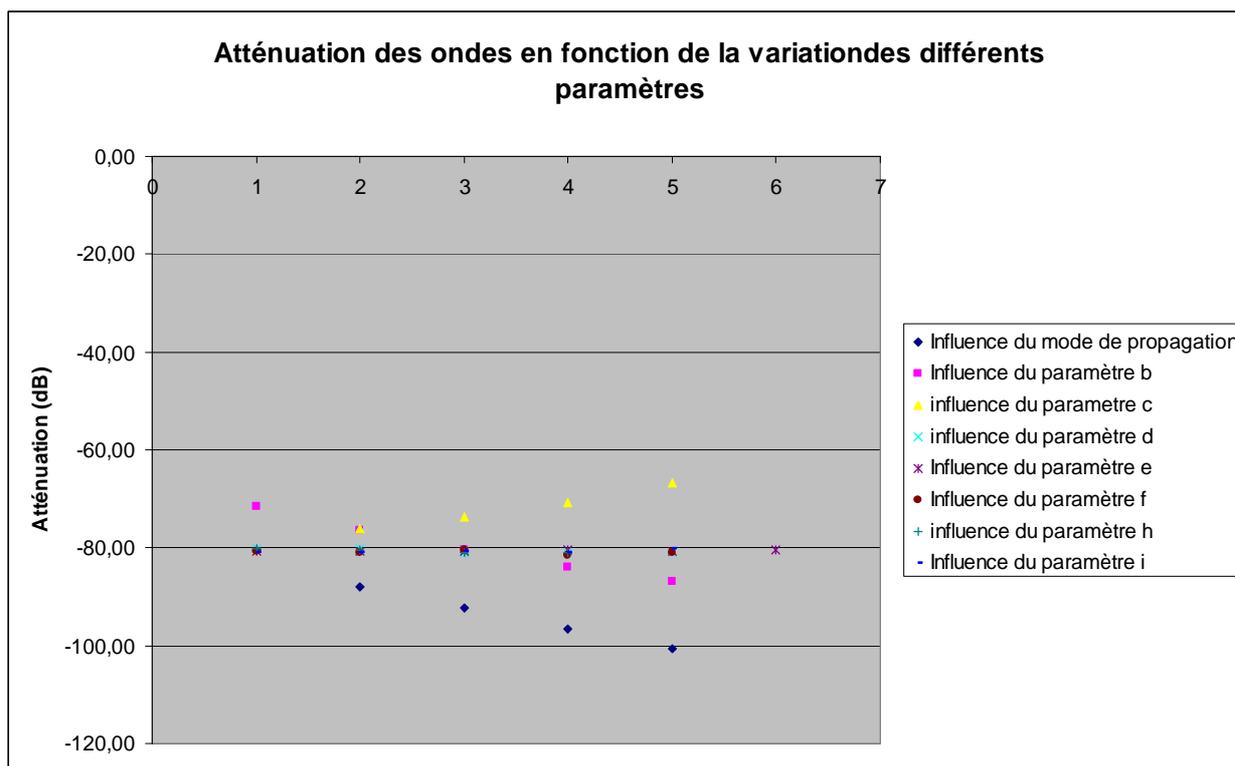
- **Le critère mesuré :**

L'atténuation de la puissance en dB est étudiée. La puissance générée par les micro-ondes est connue puisque c'est un paramètre qui est renseigné. En intégrant le flux de puissance sur la surface de sortie, il est possible de connaître la puissance qui fuit à l'extérieur. L'atténuation en dB est donnée par la formule suivante :

$$A=20 \log (P_{\text{entrante}}/P_{\text{sortante}})$$

- **Résultats :**

Il vient ci-dessous une courbe regroupant toutes les simulations. Les autres courbes sont toutes en annexes :



Ce graphique permet de montrer quels paramètres sont influents et lesquels ne le sont pas. Trois se dégagent, le mode de propagation, la largeur de l'ouverture entre le moufle et la porte c et la longueur de cette même ouverture b.

- **Etude du mode de propagation :**

Lors de l'étude du mode de propagation, il est possible de comparer différents modes allant du mode TE₁₀ au mode TE₅₀. Le but de cette étude est d'observer la tendance au niveau de la propagation des ondes. D'après la courbe en annexe, l'atténuation augmente avec le mode. Le mode qui passe le

mieux est le mode fondamental, TE_{10} , ce qui justifie l'hypothèse quant au mode de propagation étudié.

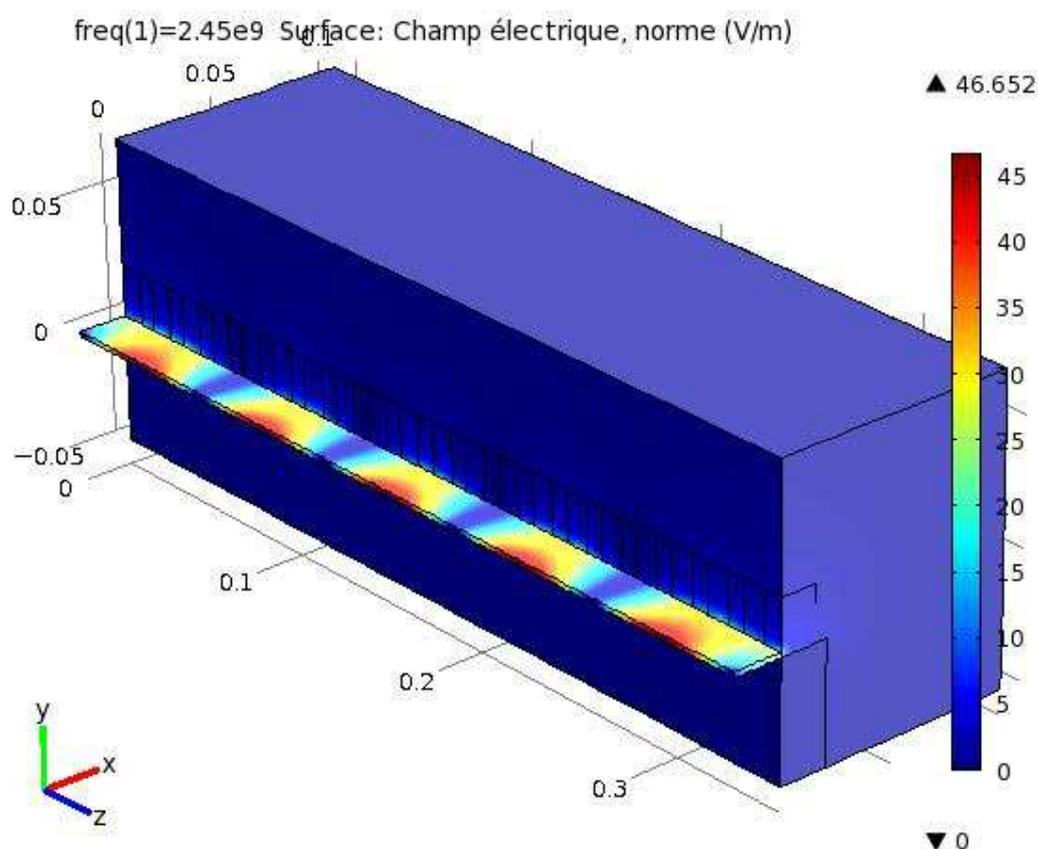


Figure 20: Etude du mode de propagation TE_{50}

- **Etude sur la sensibilité des dimensions :**

Une étude a été faite sur la sensibilité des dimensions du piège à ondes. Le but est de conclure quant aux tolérances de fabrication. Il a fallu varier les paramètres sur des distances très courtes autour des dimensions existantes du piège à ondes.

Il a été obtenu que des variations insignifiantes. Cette constatation est contraire à la théorie ce qui remet en cause la validité du modèle.

- **Etude de l'ouverture entre le moufle et la porte :**

Cette partie a été étudiée car elle permet de prendre des décisions quant au positionnement du piège à ondes. Il permettra ainsi de savoir quel est l'espace minimal à laisser sur les bords de la cavité pour mettre en œuvre cette technologie.

Les conclusions tirées de cette étude sont qu'il est nécessaire de conserver les dimensions actuelles de l'espace entre la porte et le moufle b et c. Cette conclusion nous oblige à déplacer le réservoir et de recouvrir le trou d'une tôle en inox.

2. Etude d'un modèle simple

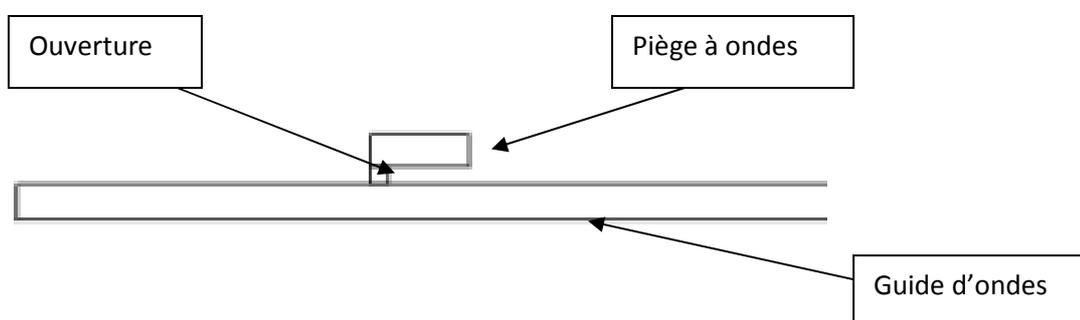
Pour étudier la validité de la modélisation, la construction d'un modèle d'un piège à ondes simple à été réalisé. Le but est de dégager des tendances quand aux conditions nécessaires à la conception d'un piège à ondes, mais également de conclure quand au bon fonctionnement du modèle.

- **Construction du modèle :**

a) Géométrie :

Le modèle est composé d'un guide d'ondes sur lequel vient se greffer un piège à ondes.

Le piège à ondes a une forme très simple, c'est celle qui est décrite dans la littérature.



b) Conditions limites :

Nous reprenons les conditions expliquées dans le modèle précédent :

- un générateur d'ondes à l'entrée crée une onde transverse plane.
- Les parois sont des conducteurs électriques parfaits
- La sortie est laissée libre vers l'extérieur.

c) Paramètres étudiés :

Voici le tableau des paramètres que l'on fait varier :

Nom du paramètre	Valeurs initiales (mm)
Hauteur du guide a	10
Largeur du guide b	86,8
Hauteur de l'ouverture c	5
Largeur de l'ouverture d	5
Hauteur du piège e	10
Longueur du piège f	28
Position du piège par rapport à l'origine g	100

d) Grandeurs mesurées :

Nous choisissons de s'intéresser au paramètre S. Ce nombre complexe exprime le rapport entre la tension complexe de l'onde émise et celle de l'onde réfléchi sur un générateur d'onde appelé port.

$$S_{11} = \frac{V_{inc}}{V_{ref}}$$

En prenant le module de ce paramètre, le coefficient de réflexion est obtenu. Pour obtenir le rapport des puissances électromagnétiques, il suffit de mettre ce coefficient au carré.

$$|S_{11}| = \rho$$

En regardant l'argument de ce nombre complexe, il est aisé d'avoir le déphasage entre l'onde incidente et réfléchi.

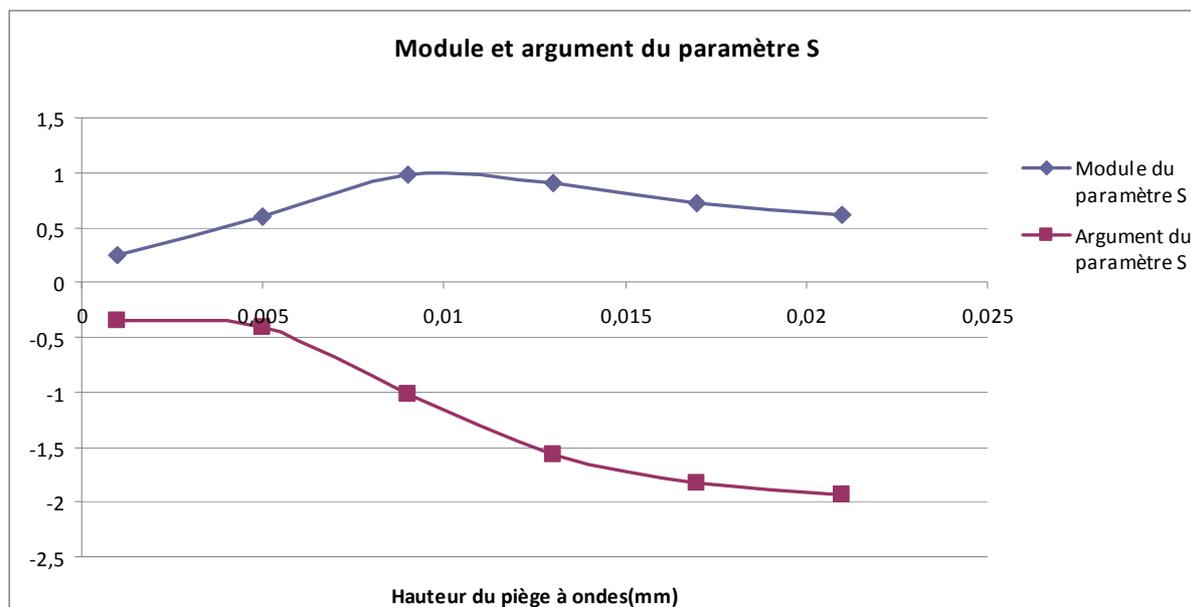
$$\text{Arg} \left(\frac{V_{inc}}{V_{ref}} \right) = \text{Arg}(S_{11})$$

L'atténuation s'obtient avec la formule suivante :

$$A = 20 \log(|S_{11}|)$$

• Résultats

Nous faisons d'abord varier les différents paramètres pour voir lesquels influent sur le module du paramètre S. Il apparaît que l'ensemble des paramètres touchant aux dimensions du piège à ondes et du guide d'ondes sont primordiales. A titre d'exemple, une courbe où la hauteur du piège varie est montrée ci-dessous :



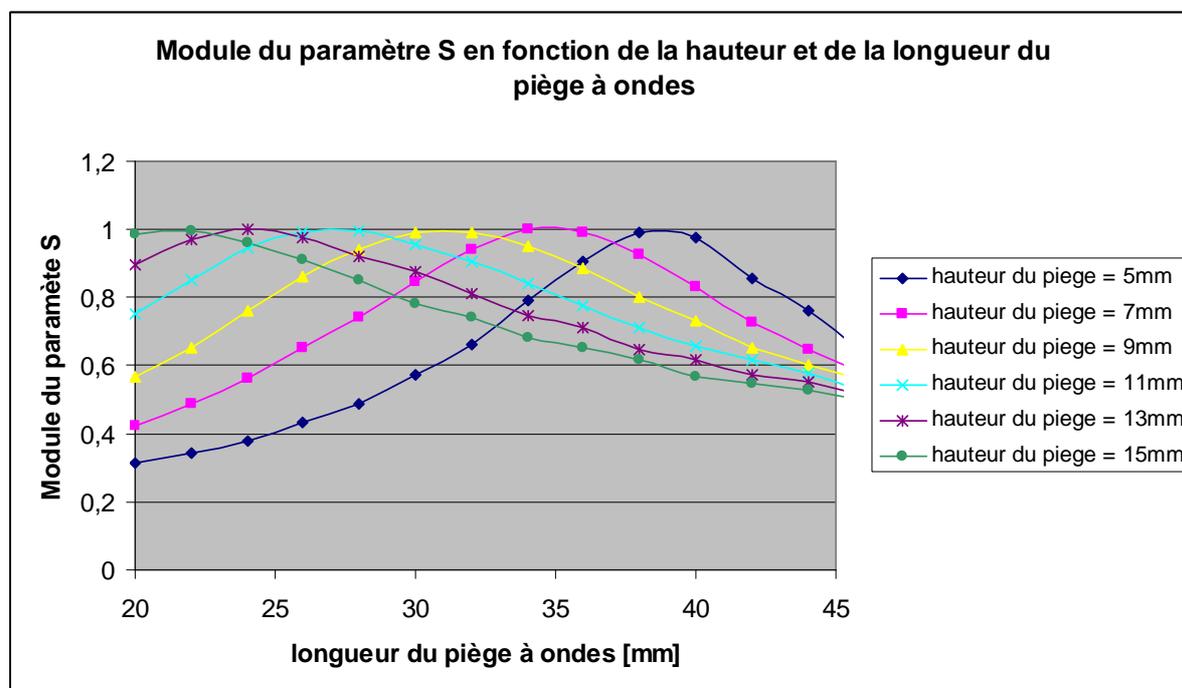
Les autres courbes se trouvent en annexe.

Seule la position du piège à ondes n'influe pas le module du paramètre S.

Certaines dimensions sont optimales pour obtenir un argument égal à 1. Pour essayer de déterminer les paramètres importants, il faut varier plusieurs dimensions simultanément pour essayer d'extraire des corrélations entre eux.

Il a donc fallu varier avec la hauteur et la longueur du piège à ondes.

La courbe suivante est obtenue :



Pour chaque courbe, le module du paramètre S s'approche de 1. En isolant tous ses points, le but est de trouver un lien entre eux.

Voici le tableau regroupant les points dont le module du paramètre S est le plus proche de 1 pour chaque courbe :

longueur du piège [mm]	hauteur du piège [mm]	Module	Diagonale du piège [mm]
38,00	5,00	0,99	38,33
34,00	7,00	1,00	34,71
30,00	9,00	0,99	31,32
28,00	11,00	1,00	30,08
22,00	15,00	1,00	26,63

Malheureusement, il n'y a pas de conditions sur les dimensions qui apparaissent de cette étude. Que ce soit la diagonale ou la longueur du piège à ondes, aucune ne semble conditionnée par le quart de longueur d'ondes.

Il y a là aussi une contradiction avec la théorie.

- **Conclusion :**

A cause de ces contradictions, il a été impossible de s'appuyer sur les résultats de la modélisation pour concevoir ce moufle. Cette approche reste intéressante dans l'approche d'un phénomène peu connu qu'il est difficile d'appréhender par l'expérience.

D'un point de vue de la conception, il a fallu choisir de conserver les dimensions d'un piège à ondes étudié, celui du four à micro-ondes Panasonic.

- **Limites de cette étude et perspectives d'avancée :**

Les résultats obtenus par la modélisation ne sont pas satisfaisant d'un point de vue conception. La poursuite de cette modélisation a dû être abandonnée faute de temps. Quelques hypothèses peuvent être avancées et il faudrait travailler dans ce sens dans le cas d'une poursuite de cette étude.

D'une part, il n'est pas possible d'imposer un déphasage à notre système. Les conditions limites sont telles qu'un réflecteur parfait impose une phase à l'onde alors que pour représenter la réalité, il faudrait que le générateur d'ondes puisse imposer une phase. Les calculs ont été effectués en régime stationnaire. Lors du calcul, on tend vers une solution stable. Un déphasage pourrait donner des calculs complètement différents. La solution se trouve peut-être dans un mode de calcul transitoire.

Le maillage est trop limité dans le cas de l'étude des pièges à ondes « escargot ». Il est cependant difficile d'augmenter le maillage au risque d'augmenter démesurément le temps de calcul. Les études sur les faibles variations des dimensions perdent un peu de leur sens.

3. Conception de la porte :

La conception de la porte comprend la création du piège à ondes, du support de celui-ci, et la modification de l'ensemble des pièces existantes qui en ont besoin. Un tableau récapitulatif de l'ensemble des modifications apportées à la porte se trouve en annexe.

- **Conception du piège à ondes :**

Le piège à ondes existant sur le four Panasonic sera un appui pour concevoir le prototype. Les dimensions de l'escargot sont conservées. Une pièce qui regroupe à la fois la grille et le piège à ondes sera préférée à un assemblage de ces deux éléments. La vitre interne est collée avec de la silicone devant la grille. Le joint s'appuyant dessus, elle impose les dimensions de la partie plate intérieure.

Le maillage de la grille est le même que celui présent sur le four Panasonic.

- **La vitre interne :**

La vitre interne pouvait-elle contribuer à l'étanchéité des micro-ondes ? Il existe des revêtements qui réfléchissent les ondes infrarouges. La solution mise en œuvre permet de tester les différents revêtements. Pour se faire, trois types de vitres ont été commandées, une sans revêtement, la deuxième avec une couche anti-infrarouge et la troisième avec un revêtement de chaque côté.

L'influence de ce paramètre sera déterminée expérimentalement. C'est pourquoi la vitre est actuellement fixée avec un système provisoire.

- **Le support du piège à ondes :**

Ce support fait le lien entre le cadre de porte et le piège à ondes. Il doit permettre d'ajuster le parallélisme du piège à ondes par rapport au moufle. Un support en tôle d'une épaisseur d'un millimètre avec un pli sur l'extérieur pour le rigidifier, a été choisi. Ce support est relié en six points au cadre. Aux quatre angles, la liaison est assurée par un ressort qui travaille en compression. A mi-hauteur, deux tiges filetées fixées au cadre permettent de faire varier la position du piège à ondes. Il est ainsi possible de régler le parallélisme et la distance entre le piège à ondes et le moufle.

Dans le cadre de l'étude par la modélisation, la possibilité de faire varier ce jeu permet de faire le lien avec la réalité

- **Réalisation des pièces :**

Le piège à ondes est réalisé en trois étapes. La première est la découpe laser de son contour, la seconde est l'emboutissage et la troisième est la création du maillage central. Ce maillage devait initialement être réalisé au laser, mais il a posé des problèmes au niveau du temps machine. Il a donc fallu reprendre un maillage existant qui fut assemblé par soudure par point. Cette solution n'est vraiment pas parfaite mais dans le cadre d'une solution série, le maillage est réalisé par poinçonnage.

- **Éléments existants à modifier :**

La mise en place du piège à ondes oblige à modifier un certain nombre de pièces, le cadre, la position de l'écran, le cache le protégeant des ondes et la façade.

a) Le cadre :

Il a été fraisé pour accueillir le piège à ondes. Ce trou laisse un espace de 10 millimètres autour du piège à ondes. Il a aussi été percé pour accueillir le support, le système de sécurité et décaler l'écran.

b) L'écran :

L'écran étant un composant électronique, il a paru important de le protéger des ondes électromagnétiques. Cette fonction est réalisée avec un étui en tôle pliée qui crée une enceinte hermétique en s'appuyant sur le cadre de l'écran en zamak. Le tout étant relié au cadre par l'intermédiaire de cales en aluminium pour assurer une continuité électrique.

D'autre part, il est à une distance très faible du piège à ondes, il est donc impératif de le décaler. C'est pourquoi l'écran du prototype sera légèrement décalé vers le haut et l'extérieur.

c) La façade :

Le trou du réservoir a été remplacé par une tôle pour assurer une tôle plane en vis-à-vis du piège à ondes. Cette modification oblige à externaliser le réservoir. Nous lui construisons un boîtier qui viendra se clipper sur le côté de notre prototype.

d) Mise en place du système de sécurité :

Le système de sécurité est repris sur le four Panasonic. Il sera relié à l'électronique de la fonction micro-ondes. Il permet d'empêcher le fonctionnement du magnétron si la porte s'ouvre. Il est fixé derrière la façade. En face, au niveau de la porte, il y a des crochets qui viennent faire le contact lorsque la porte se ferme.

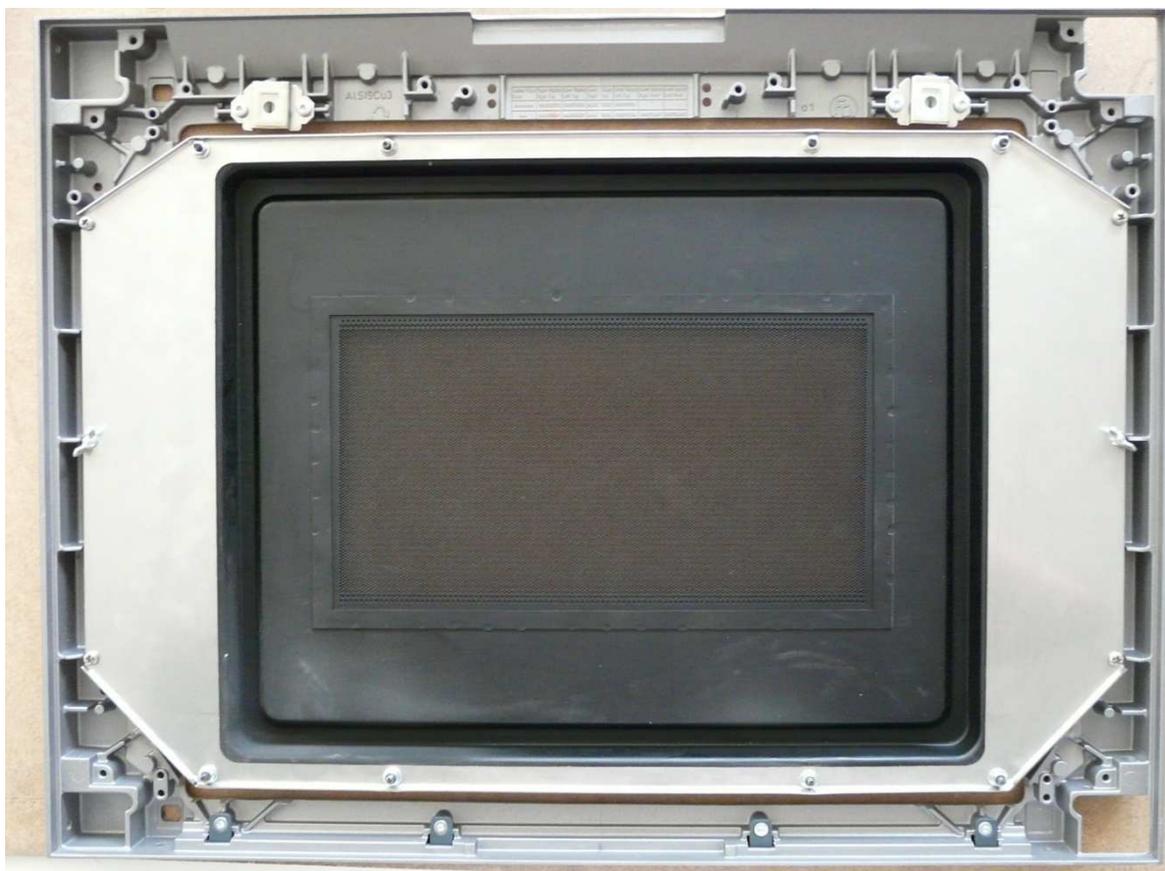


Figure 21: Photo de l'assemblage du piège à ondes

X. Etanchéité de la lampe

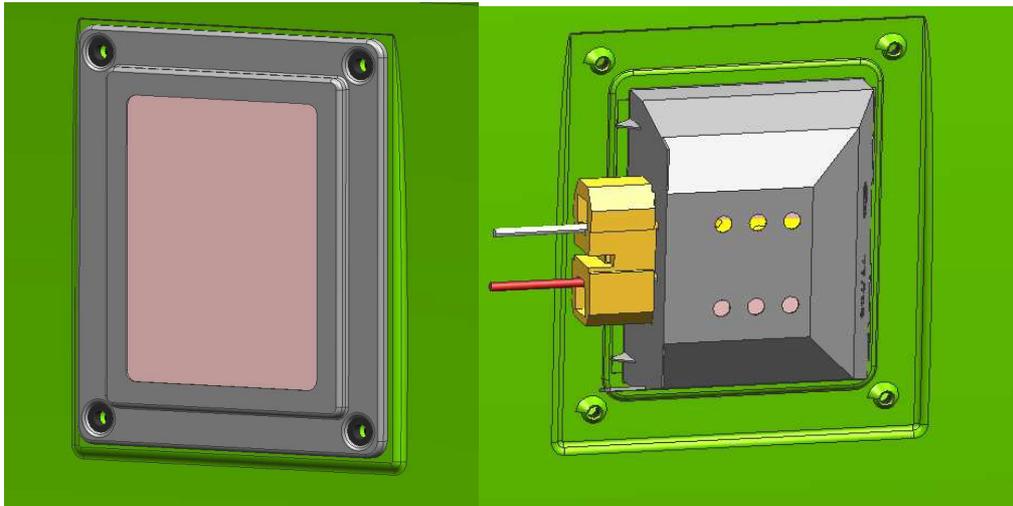
1. Présentation de la lampe :

La lampe fait partie des éléments à l'intérieur du moufle. Elle laisse des ouvertures dans le moufle et surtout la fragilité de l'ampoule oblige d'étanchéifier cette partie. Elle est composée d'un boîtier dans lequel vient se monter l'ampoule, une vitre, un joint plat en silicone et un couvercle qui permet de relier la vitre et le joint au moufle. Le joint plat permet de réaliser l'étanchéité avec la vitre et le moufle. Cependant, le boîtier de la lampe est aussi collé au moufle car le joint ne suffisait pas à cet endroit. Cette opération alourdit le procédé de fabrication. Les ondes peuvent actuellement passer au niveau de la vitre et de la fixation avec le moufle.

2. Cahier des charges

La lampe dans ce prototype doit satisfaire aux exigences suivantes :

- L'ampoule ne doit pas être endommagée par les ondes.
- La lampe doit être étanche à la vapeur.
- La lampe doit résister à la température présente dans le four, soit 240°C.
- Le système d'étanchéité doit permettre au maximum de lumière d'aller dans le moufle.



3. La recherche de solutions :

Nous avons dégagé deux types de solutions, des solutions prototypes et une solution qui serait réalisable en série.

- **La solution série :**

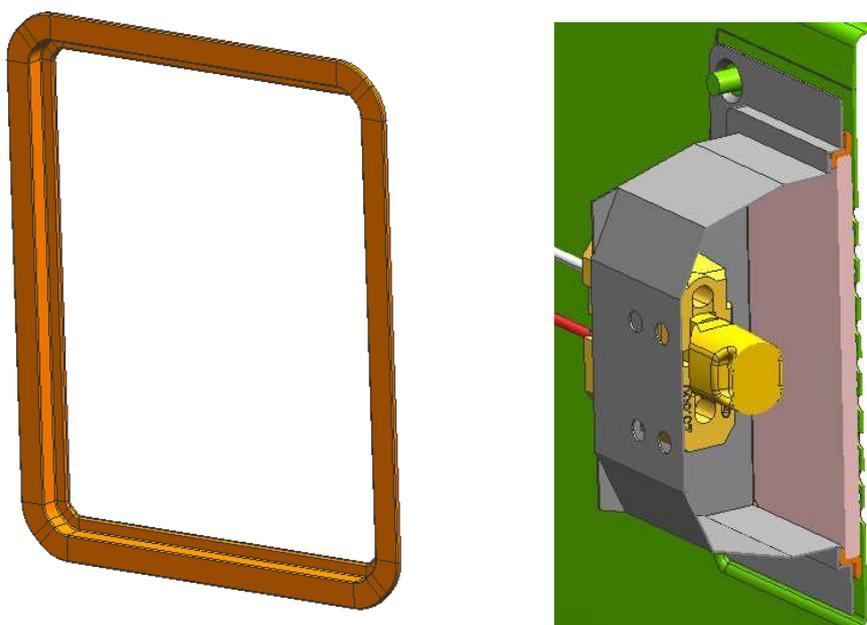
Dans le cas d'une solution série, la solution où la lampe est fixée entièrement à l'extérieur du moufle sera envisagée. Cette solution est réalisable en apportant peu de modifications aux pièces existantes. La conception d'un nouveau joint serait néanmoins nécessaire et empêche sa réalisation en prototype.

a) *Etanchéité micro-ondes :*

Le moufle est directement troué, ce qui permet de garder une cage hermétique aux micro-ondes et de ne pas rajouter de pièces pour l'étanchéité aux micro-ondes.

Pour rendre étanche à la vapeur, la vitre est directement derrière le moufle. Elle obstrue les trous du moufle et limite au maximum le passage de la vapeur.

Il est nécessaire de réaliser un nouveau joint pour cette solution. Il devra réaliser l'étanchéité entre la vitre et le couvercle et entre le couvercle et le moufle ainsi qu'être facile à monter. La forme du joint serait la suivante :



La suppression du cordon de collage autour de la lampe est un des gros avantages. C'est actuellement un problème que cherche à résoudre Gaggenau. Le défaut de cette solution est qu'il faut ouvrir le four par l'extérieur lors d'une réparation du service après vente. L'impact de cet inconvénient sera réduit dans le futur car les ampoules seront remplacées par des LED.

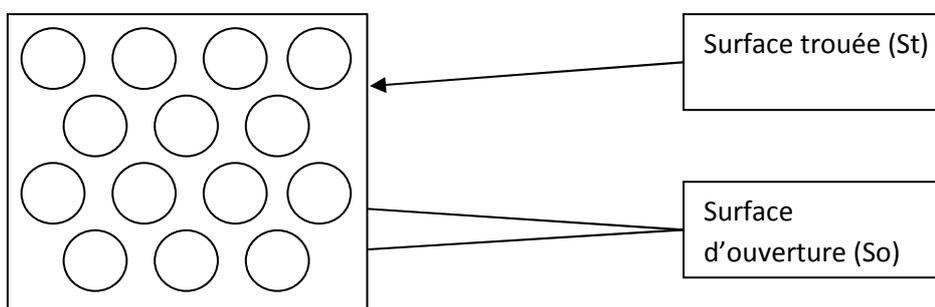
- **La solution prototype :**

b) *L'étanchéité aux micro-ondes :*

Comme expliqué plus haut, il faut réaliser l'étanchéité aux micro-ondes à deux endroits. Pour traiter l'étanchéité entre le couvercle et le moufle, Il est nécessaire de rajouter des points de fixation réguliers de manière à ne pas laisser passer d'espaces supérieurs au quart de longueur d'ondes. Nous rajoutons des goujons pour obturer le chemin de fuite sur le bord du couvercle. Ses goujons laissent un espace maximal entre eux de 27mm sur la hauteur et de 23mm sur la largeur.

L'étanchéité au niveau de la vitre est réalisée grâce à une tôle trouée. Cette tôle est assemblée par soudure par point avec le couvercle. Ne connaissant pas la taille optimale des trous pour avoir une bonne étanchéité tout en laissant passer le maximum de lumière, il a été décidé de le déterminer par

l'expérience. Quatre couvercles de lampe différents ont été réalisés. Ils offrent à chaque fois un rapport surface d'ouverture (S_o) sur surface trouée (S_t).



Nous avons ci-dessous le tableau qui récapitule les solutions testées :

Essai	Forme	Dimensions trou (mm)	Dimensions entre les trous (mm)	Ratio S_o/S_t (%)
Type piège à ondes	Cercle	0,7	0,25	49
Type maillage lampe	Cercle	3	1	51
Type hexagonaux	Hexagone	3	1	56
Grands trous	Cercle	7	1	69

Il en découlera des essais qui détermineront le flux de puissance électromagnétique de fuite et la luminosité pour chacun des couvercles de lampe. Ce taux sera mesuré sans la lampe pour avoir une mesure plus précise de la puissance. La luminosité sera mesurée à l'aide d'un luxmètre.



Figure 22: Les quatre couvercles de lampe testés

c) L'étanchéité à la vapeur :

Pour réaliser l'étanchéité vapeur, le joint plat existant a été conservé. La même solution technique que celle existante a été reprise, c'est-à-dire que les vis et les goujons traversent le joint plat.

Les défauts que présentent cette solution est principalement la difficulté de montage et d'entretien avec de nombreux goujons. Le risque d'arcs électriques est aussi beaucoup plus important avec cette solution qu'avec une solution série où l'ensemble lampe serait externalisé.

4. La réalisation des pièces :

Les couvercles ont été réalisés en deux pièces qui ont été soudées par point. La base du couvercle existant a été conservée puis les tôles trouées avec chacun des motifs souhaités ont été découpées au laser. Ce mode de fabrication n'est pas optimal par rapport au risque d'arcs électriques. L'idéal est d'avoir un couvercle en une seule pièce.

XI. Etanchéité de la chaleur tournante

1. Présentation de la chaleur tournante

La chaleur tournante est une des fonctions principale du four. Elle permet au four de monter en température, d'uniformiser la cuisson et permettre à l'utilisateur de cuire sur plusieurs niveaux. Elle est composée d'une contre-plaque, d'un moteur actionnant un ventilateur et une résistance. La contre-plaque est trouée pour permettre une circulation d'air autour du ventilateur, du centre vers l'extérieur. La position de ces trous a été déterminée expérimentalement. La tôle arrière du moufle est elle aussi trouée pour permettre le montage des éléments constituant la chaleur tournante.



Figure 23: Photo de la chaleur tournante

La solution à développer doit répondre aux exigences suivantes :

- L'appareil doit respecter la norme quant à l'étanchéité aux ondes.
- L'étanchéité à la vapeur doit être maintenue.
- Le flux d'air étant très sensible aux variations, il doit être perturbé le moins possible.
- La solution résiste à son environnement. On atteint à cet endroit les températures maximales du four soit 270°C et l'air peut être saturé en vapeur.

2. Recherche de solutions

Différents moyens de réaliser cette étanchéité ont été cherchés.

Il se dégage des solutions qui seraient possibles en série et d'autres que l'on utilisera qu'en prototype pour une réalisation rapide sans répondre à toutes les contraintes de design ou de qualité de cuisson.

- **Solutions série :**

Les solutions présentées dans cette partie ont été envisagées car elles offrent des avantages très intéressants dans le cas d'une conception d'un four combiné en série. Elles n'ont cependant pas été creusées car la difficulté de leur mise en œuvre dépassait le cadre de notre étude.

a) Chaleur tournante à l'extérieur du moufle

La première des solutions est de sortir la chaleur tournante du moufle pour que l'intérieur du moufle devienne une cavité étanche aux ondes. Elle permet de séparer les lieux où sont réalisés l'étanchéité à la vapeur et aux micro-ondes et d'agrandir l'espace à l'intérieur du moufle.

Par contre, elle engendre certains problèmes au niveau de l'évacuation de la vapeur de la cavité créée et de l'encombrement à l'arrière du moufle. Ce dernier point sous-entend une reconception complète de l'emplacement des composants qui se trouvent à l'arrière du moufle ; le moteur de la chaleur tournante, le ventilateur et dans le cas de ce prototype, le magnétron, la carte électronique et la ventilation du magnétron.

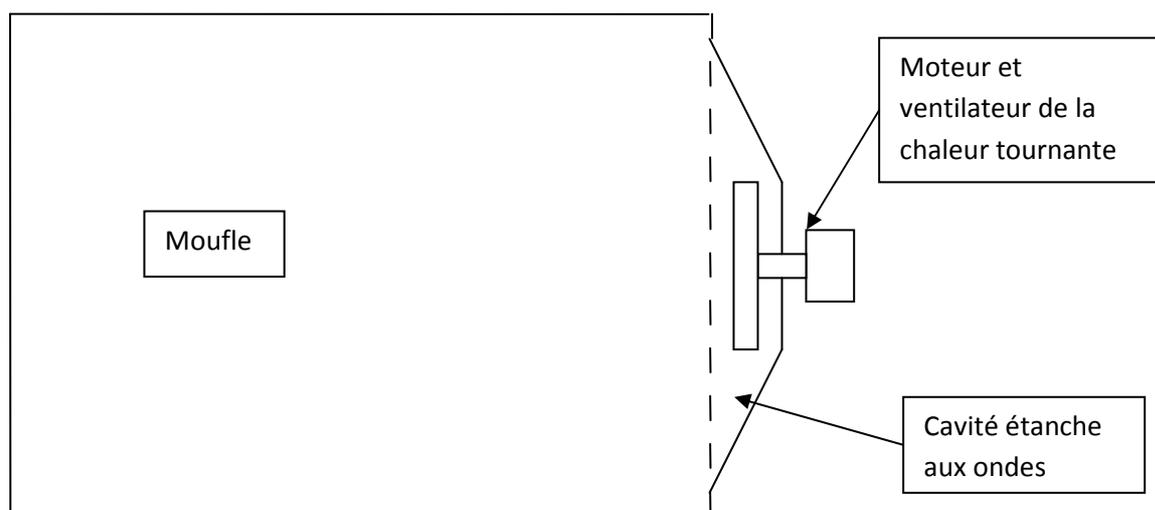


Figure 24: Externalisation des éléments de la chaleur tournante

b) Etanchéité autour des trous de la tôle arrière

Cette solution consiste à réaliser l'étanchéité autour des trous dans la tôle arrière du moufle. L'axe du moteur du ventilateur et les trous qui laissent passer la résistance sont tous deux des points importants.

Etanchéité de l'axe du moteur

Techniquement, il existe des solutions pour étanchéifier un axe de moteur soumis à des ondes électromagnétiques.

Il existe des pièces métalliques entourant l'axe qui sont des pièges à ondes axiaux. Cette pièce est solidaire de l'axe, de matériau conducteur et atténue le phénomène d'antenne créé par l'axe.

L'axe peut être lui-même en matériau non-conducteur pour éviter les phénomènes d'antennes. Il est utilisé traditionnellement des plastiques résistants à la température comme le téflon. Le trou permettant le passage de l'axe ne pose alors plus problème car il a une dimension suffisamment petite, inférieure au dixième de la longueur d'onde, 12mm. (Voir techniques de l'ingénieur)

L'étanchéité autour de la résistance peut être réalisée par en remplaçant le trou oblong par une série de trou circulaires bien plus petits rendant les ondes évanescentes.

- **Solutions prototypes**

Ces solutions sont envisagées pour obtenir une solution rapide. Elles sont en général moins efficaces ou pratiques que les solutions série mais elles permettent de faire fonctionner l'appareil et de réaliser des mesures exploitables.

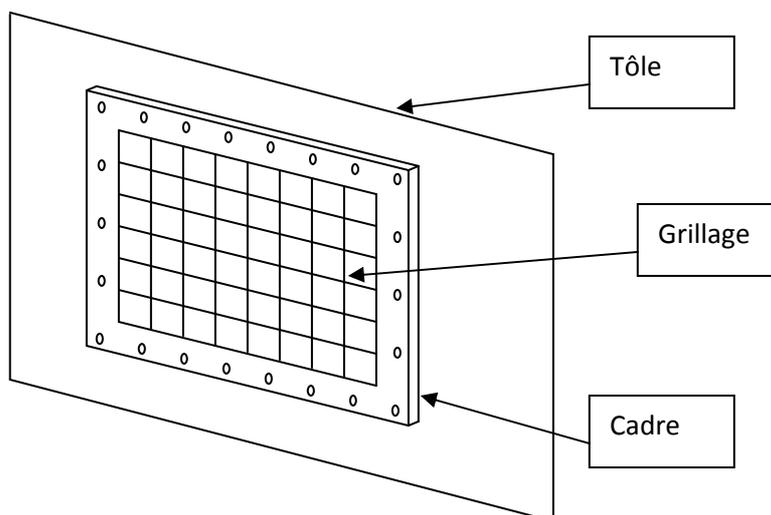
c) Etanchéité par grillage

Cette solution utilise un grillage de fils métalliques fins permettant de minimiser les perturbations du flux d'air. Leur mise en place nécessite de les relier à la contre-plaque de manière étanche aux micro-ondes et sans générer d'arcs électriques. Ceci est possible grâce à la soudure par point. Il faut ajouter une pièce encadrant le grillage venant le plaquer contre la tôle. Espacés de deux centimètres, les points de soudures assurent un contact étanche entre le cadre du grillage et la contre-plaque.

L'ensemble des ouvertures seraient obstruées par des grillages de ce type.

Cette solution n'a pas été retenue car elle multipliait le nombre de pièces nécessaires à sa réalisation.

Schéma de principe de l'étanchéité d'un trou :



d) Etanchéité par une contre-plaque trouée

La solution réalisée sur le prototype est une nouvelle contre-plaque dont les ouvertures ont été modifiées.

3. Réalisation de cette solution

- **Etanchéité aux ondes :**

Les ouvertures ont été remplacées par des maillages de trous comme ceux réalisés habituellement sur les fours micro-ondes. Les coins sont brasés.

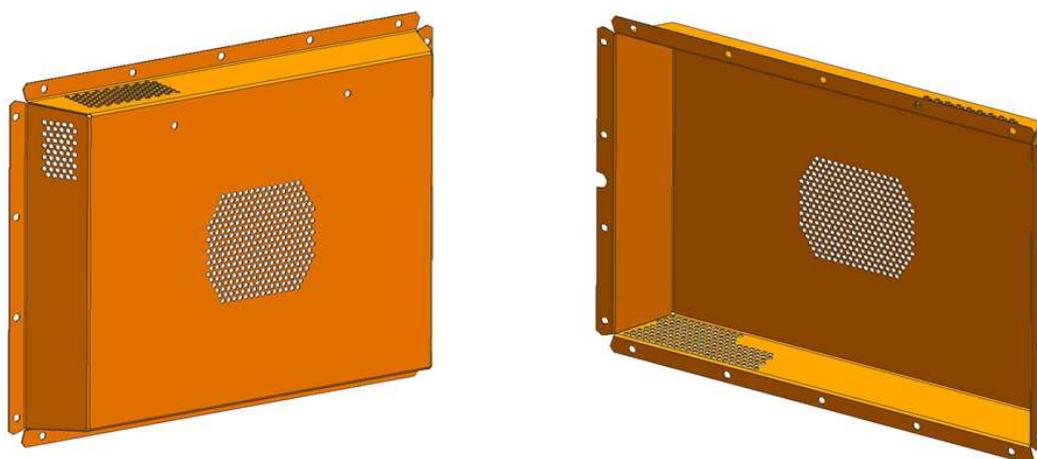


Figure 25: Contre-plaque trouée

- **Modification des ouvertures :**

Le maillage réalisé permet d'avoir une surface d'ouverture d'environ 60% de l'ensemble de la surface trouée.

Pour réduire la perturbation du flux d'air, nous avons choisi de conserver l'emplacement des ouvertures. Le flux d'air étant très sensible à leur disposition, il est préférable de les laisser en place. Nous avons donc décidé de réduire de manière proportionnelle l'ensemble des surfaces ouvertes, soit une diminution de 60%. L'ouverture centrale qui avait déjà des perçages obstruant 60% de sa surface sera réduite. Le tableau ci-dessous montre les surfaces des différentes ouvertures avant et après obstruction en mm².

Ouverture	Surface ancien pièce (mm ²)	Surface nouvelle pièce (mm ²)	Nombre de trous
Gauche haut	1260	763.4	108
Gauche côté	540	353.4	50
Droite bas	1965	1131	160
Centrale	4046	2311.4	327

- **Assemblage des pièces :**

Pour réaliser un assemblage étanche aux ondes, il faut assurer un appui tous les quarts de longueur d'ondes soit trois centimètres. En prenant une marge de sécurité, seuls deux centimètres entre chaque point d'appui seront laissés. La solution la plus simple est de mettre des vis sur chacun de ces appuis, soit 48 vis.

Pour réduire le nombre de vis, il est possible d'en remplacer deux sur trois par un bossage circulaire d'une profondeur de 5 dixièmes qui viendrait faire le contact entre les deux pièces.



Figure 26: Bossage entre deux trous

Cette solution permet de ne réaliser plus qu'un vissage sur trois. Nous réduisons le nombre de vis à 18. Cette solution pouvant engendrer des problèmes lors de la mise en pratique (risques d'arcs électriques), plusieurs scénarios sont réalisables.

- **Les scénarios possibles de cette solution :**

Trois solutions ont été envisagées :

La première est constituée de deux pièces, la contre-plaque telle qu'elle est dessinée au-dessus et un cadre qui l'entoure. Les bossages sont tapés dans le cadre.

La seconde est réalisée par la contre-plaque seule dans laquelle sont directement tapés les bossages.

La troisième consiste à remplacer l'ensemble des bossages par des vis.

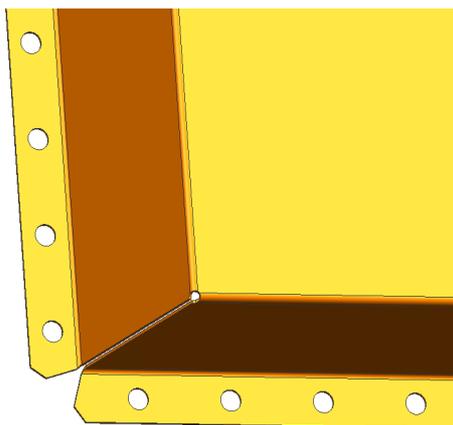


Figure 27: Scénario tout vissé

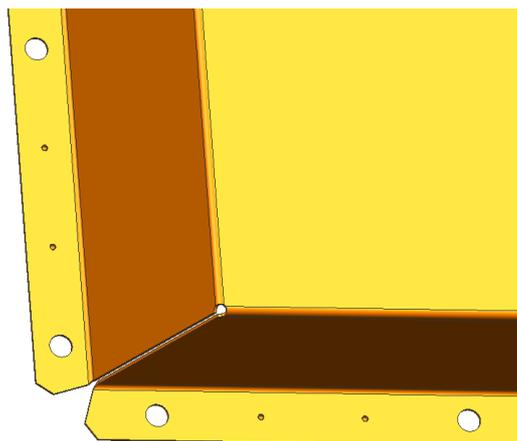


Figure 28: Scénario bossage dans la contre-plaque

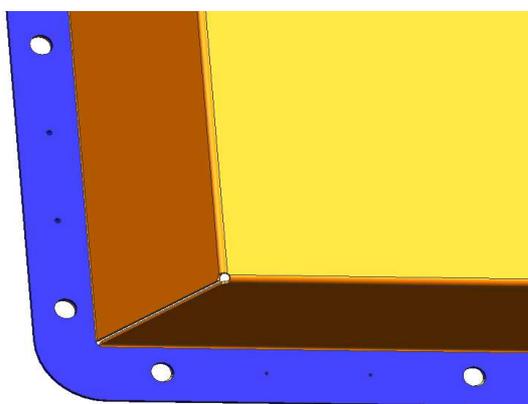


Figure 29: Scénario cadre et contre-plaque

Le tableau ci-dessous récapitule l'ensemble des avantages et inconvénients de chaque scénario :

	Avantages	Inconvénients
Scénario cadre et contre-plaque	<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'espace entre la contre plaque et le moufle donc le flux d'air n'est pas perturbé - Nombre de vis réduit 	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution de l'effort de contact entre la contre-plaque et le moufle - Risque d'étanchéité moyenne aux ondes - Risque d'arcs électriques
Scénario bossage dans la contre-plaque	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre de vis réduit - Augmentation de l'effort entre la contre-plaque et le moufle 	<ul style="list-style-type: none"> - Perturbation du flux d'air par apparition d'espaces latéraux supplémentaires - Risque d'étanchéité moyenne aux ondes - Risques d'arcs électriques
Scénario tout vissé	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne étanchéité aux ondes - Pas de perturbation du flux d'air 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté de montage

- **Choix de la solution prototype :**

Pour faire le choix entre les différentes variantes, les deux critères étudiés seront le risque d'arcs électriques et le flux de puissance qui sort de la contre-plaque. La mesure sera effectuée avec un mesureur de puissance électromagnétique au niveau du trou laissant passer l'axe du moteur du ventilateur de la chaleur tournante. Le moteur de la chaleur tournante sera démonté pour la mesure.

- **La réalisation des pièces :**

Les pièces sont réalisées en inox comme actuellement, ce matériau est le même que dans l'ensemble du moufle. Il résiste à la vapeur et aux températures maximales.

Le cadre et la contre-plaque auront respectivement une épaisseur de 1 et 0,6 millimètre.

La découpe est réalisée au laser (Voir plans des pièces en Annexe)

XII. Tests à réaliser sur le prototype :

Dans le cadre du PFE, le manque de temps à empêcher la réalisation des tests qui permettraient de valider un certain nombre de choix techniques. Le détail des différents tests qu'il serait intéressant de faire sur notre prototype a tout de même été élaboré.

Ces tests se répartissent en plusieurs catégories :

- Les tests de sécurité
- Les tests énergétiques
- Les tests sur les solutions conçues

Tous les protocoles expérimentaux sont joints en annexe.

1. Les tests de sécurité :

Ce sont les plus importants. S'ils ne sont pas validés, le prototype ne peut pas être mis en fonctionnement. Le premier test porte sur l'étanchéité aux ondes, d'abord avec l'ensemble des composants montés puis avec la tôlerie démonté. Ce deuxième test est important pour savoir si lors de ces études, il est obligatoire de remonter toute la tôlerie.

Le deuxième test de sécurité porte sur le risque d'arcs électriques. Il est nécessaire qu'il n'y en ait pas pour ne pas mettre en danger le matériel.

2. Les tests énergétiques :

Ces tests ont pour but de valider les conclusions du PRT. Ils seront aussi accompagnés d'une série de tests culinaires pour valider l'intérêt d'un mode de cuisson combiné.

Il faut insérer une charge dans le moufle. Celle-ci sera isolée d'abord de la vapeur et, la température sera ensuite augmentée grâce aux micro-ondes avec et sans la vapeur. Cette expérience permet de mesurer l'influence de la vapeur sur les micro-ondes.

Le même test peut être réalisé en isolant la même charge des micro-ondes et en étudiant l'influence des micro-ondes sur la cuisson vapeur.

Le troisième test énergétique se déroulera sur une charge dans l'environnement normal du prototype. La vapeur fonctionnera puis les micro-ondes et enfin les deux ensemble pour mesurer l'interaction des deux d'un point de vue énergétique lors d'une cuisson standard.

3. Les tests sur les solutions conçues :

Ses tests permettent des choix technologiques par l'expérimentation.

Le premier test porte sur les différents revêtements à la surface de la vitre interne. Les trois variantes de vitres détaillées dans le paragraphe seront testées.

Le second test porte sur le maillage qui recouvre la vitre de la lampe. Le but est de mesurer la variation de la fuite micro-ondes selon la taille des maillages.

XIII. Bilan de mon stage

1. Bilan professionnel :

Dans la première partie de mon bilan, je tiens à parler de l'entreprise dans laquelle j'ai évolué.

J'ai évolué au sein du pré-développement. C'est un service qui a pour vocation de développer des concepts et de les mettre en place pour répondre à des exigences techniques. Il a été créé parce que la recherche de solutions est plus difficile dans une démarche de développement lorsque des échéances courtes sont posées. Je travaillais en binôme avec un autre stagiaire de l'INSA sur ce projet. Cette coopération a été très enrichissante. C'est très intéressant de travailler avec une personne du même niveau hiérarchique. Il s'instaure une vraie entraide sans la pression hiérarchique que l'on peut avoir avec un supérieur.

Le bureau d'études fonctionne par groupe géré par des chefs de projet. Le principal travail effectué est le développement et le suivi de produits. L'ambiance au travail est très agréable. La bonne humeur est présente et la volonté d'entraide se manifeste régulièrement. Chaque personne a une spécificité propre qu'il fait partager dès qu'il en a l'occasion.

Gaggenau est une entreprise qui développe des produits haut de gamme. On sent à tous les niveaux de l'entreprise un amour de qualité, que ce soit dans les conditions de travail, dans les prises de décisions ou dans les rapports entre les personnes.

De par son histoire, elle amène une étroite collaboration franco-germanique. Au quotidien, nous collaborons avec des collègues allemands. Cette expérience fut très enrichissante. Si le contexte de l'étranger en entreprise ne m'est pas inconnu, je trouve que la collaboration entre les deux cultures est parfaitement maîtrisée. La quasi-totalité des employés parle les deux langues et les contacts entre des personnes des deux nationalités sont omniprésents.

Notre projet était très ambitieux avec un manque d'appui au niveau connaissance que ce soit de notre côté ou celui de l'entreprise. Ce contexte est à la fois une motivation et un frein. Il nous est souvent arrivé de manquer de temps et surtout de savoir pour parfaire nos choix.

2. Acquis de stage

Ce stage m'a permis de développer de nombreux savoirs et savoir-faire.

En premier lieu, j'ai appris à me servir de deux nouveaux logiciels, Unigraphics et Comsol. Unigraphics est un logiciel de CAO. La gestion des fichiers de pièces à travers un réseau est une chose nouvelle pour moi.

Comsol est un logiciel de modélisation de phénomènes physiques. Cette approche qui m'était inconnue m'est apparu très intéressante. Je ne suis pas encore très à l'aise avec ce type de raisonnement mais j'ai dépassé la phase prise en main du logiciel. Les erreurs que j'ai faites dans l'approche, à savoir le manque de rapprochement entre le modèle et la réalité et une remise en question trop tardive, ont changés mon approche de ce type de problèmes.

Ce projet m'a permis aussi d'acquérir de nombreuses connaissances en conception mécanique. C'est un point sur lequel j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler.

Un point que j'ai beaucoup apprécié à travers ce stage est la participation aux travaux d'autres personnes même en temps que spectateur. Ca a pu être à travers des brainstormings, des expériences ou des rencontres. Les méthodes de travail observées ont été nombreuses et toutes des expériences enrichissantes.

Il était aussi très enrichissants d'être intégré à un service. Ce cadre permet une collaboration à taille humaine. A travers des réunions hebdomadaires, nous avons des retours sur notre travail.

XIV. Bibliographie

HELIER, Marc, NEY, Michel et PICHOT, Christian. 2003. Structures de guidage HF. *Techniques de l'ingénieur*. [En ligne]. E 1170.

MEREDITH, Roger. 1998. *Engineer's Handbook of Industrial Microwave Heating*. London : The Institution of Electrical Engineers. 0 85296 916 3. .

ROUSSY, Georges, ROCHAS, Jean-François et OBERLIN, Claude. 2003. Chauffage Dielectrique. *Techniques de l'ingénieur*. [En ligne]. D 5940.

PEREZ, José-Philippe, CARLES, Robert et FLECKINGER, Robert. Electromagnétisme, Fondements et applications. Paris : Dunod, 2002. 2 10 005574 7.

Union Technique de l'Electricité et de la Communication (UTE). 2003. Norme NF EN 60335-2-25 Règles particulières pour les fours à micro-ondes, y compris les fours à micro-ondes combinés. Fontenay-aux-Roses : s.n. C 73-825.

POZAR, David. Microwave Engineering. s.l. : John Wiley & Sons, Inc. 0 471 17096 8.
Wärmebehandlung von Lebensmitteln durch Mikrowellen und Dampf. s.l. : Giessen Forchung-Institut.

DEGAUQUES, Pierre, DEMOULIN Daniel.2000. Blindages électromagnétiques. *Techniques de de Ingénieur*. [En ligne]. D 1304

Da SILVA. 2001. *High frequency and Microwave engineering*. London

Annexes

XV. Annexe 1 : Mise en plan des principales pièces réalisées

Page 1 : Piège à ondes

Page 2 : Support du piège à ondes

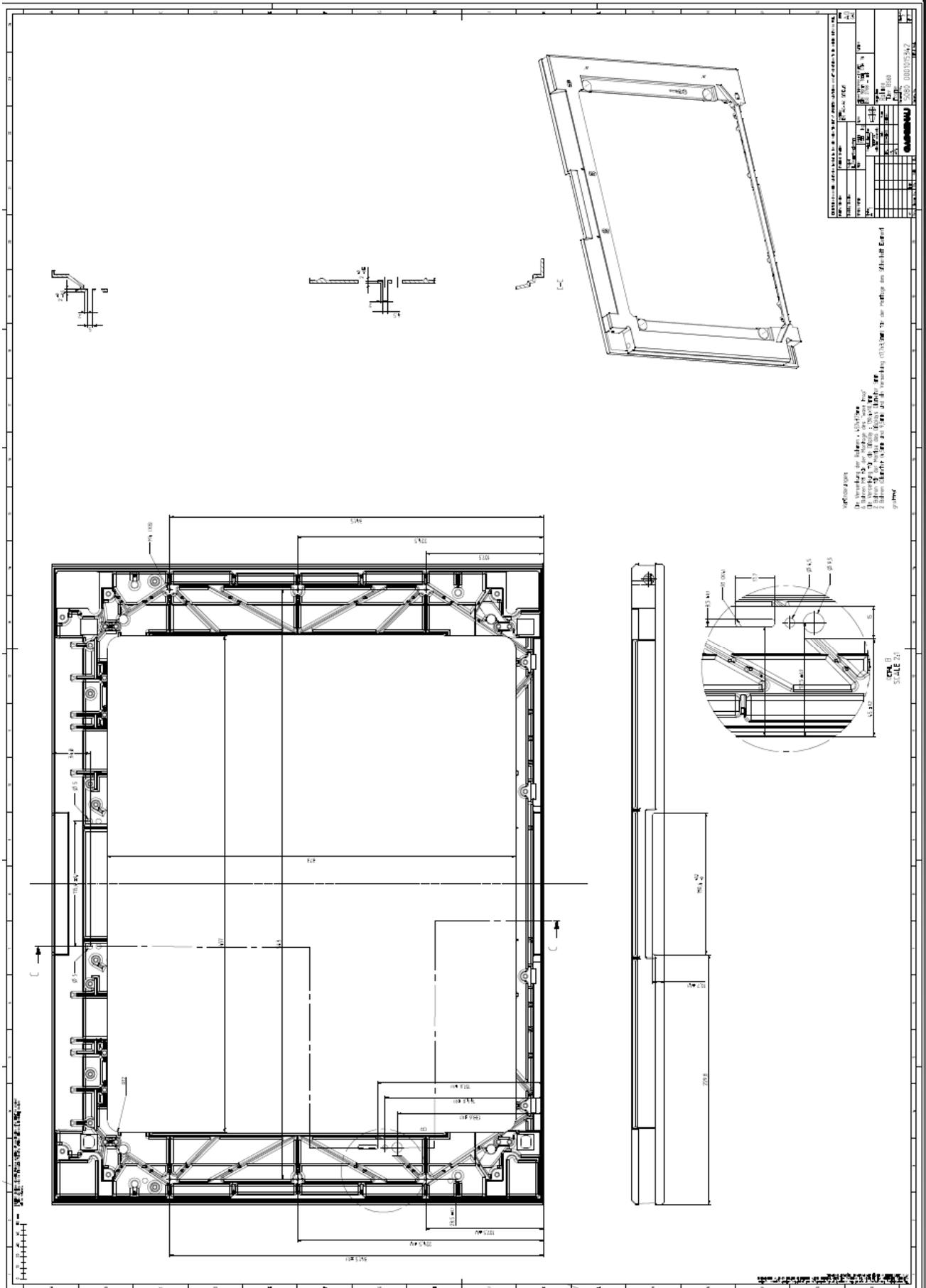
Page 3 : Boitier du réservoir

Page 4 : Cadre de la porte

Page 5 : Les différents couvercles de lampe

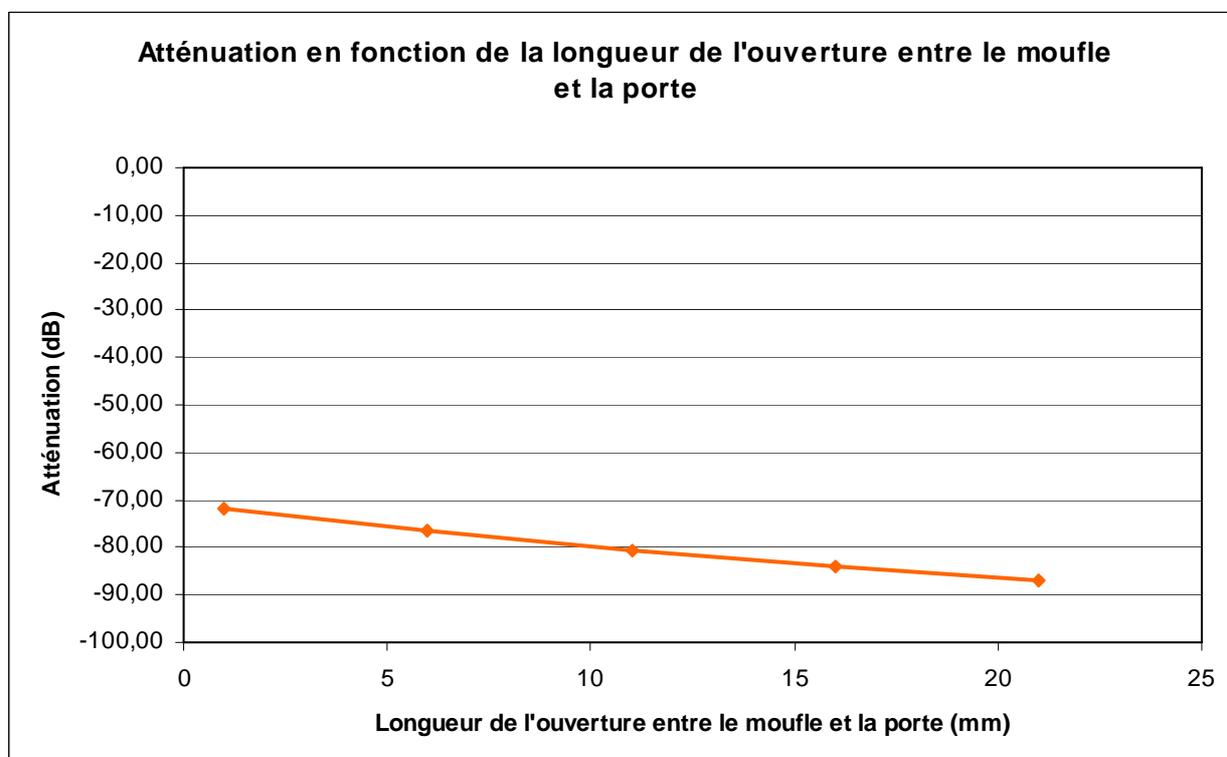
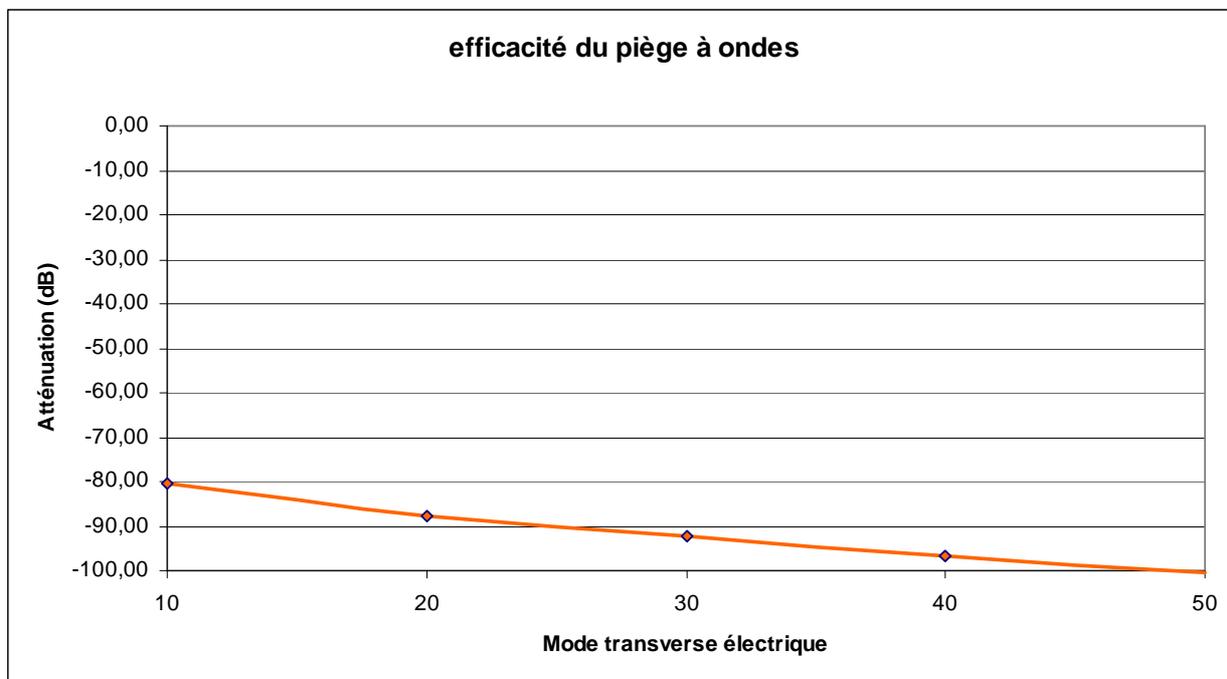
Page 6 : Les différentes contre-plaque

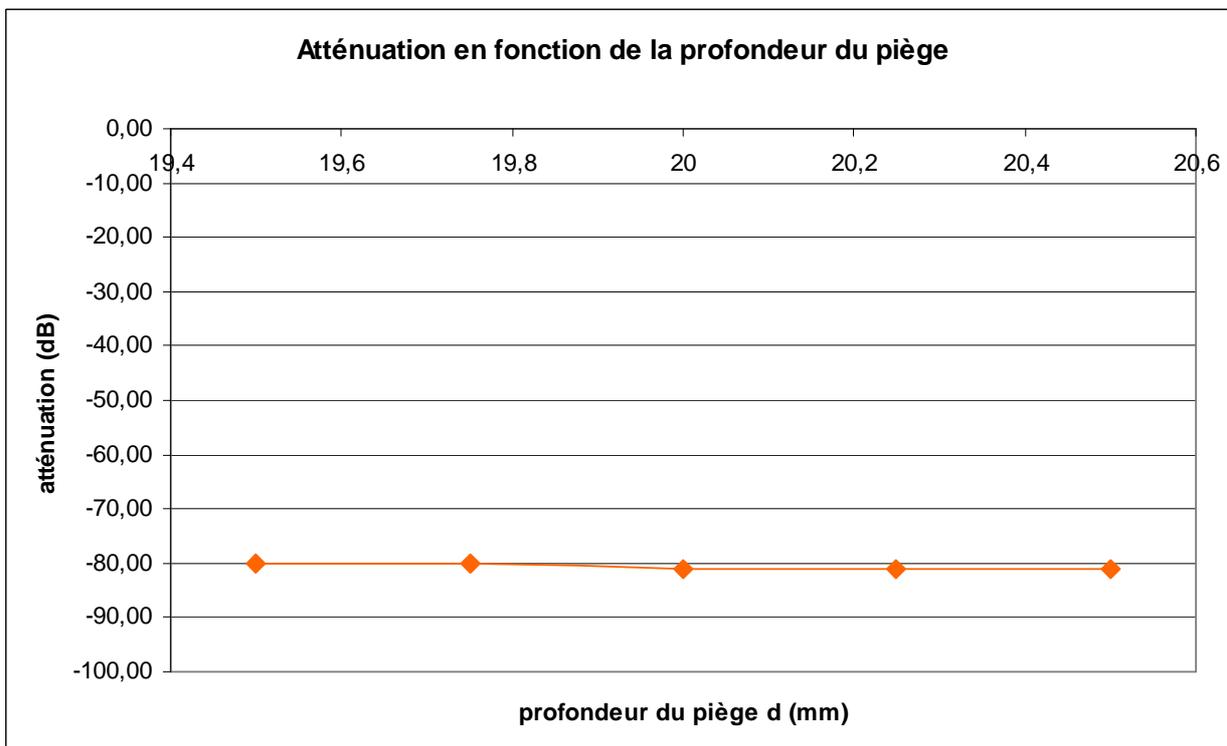
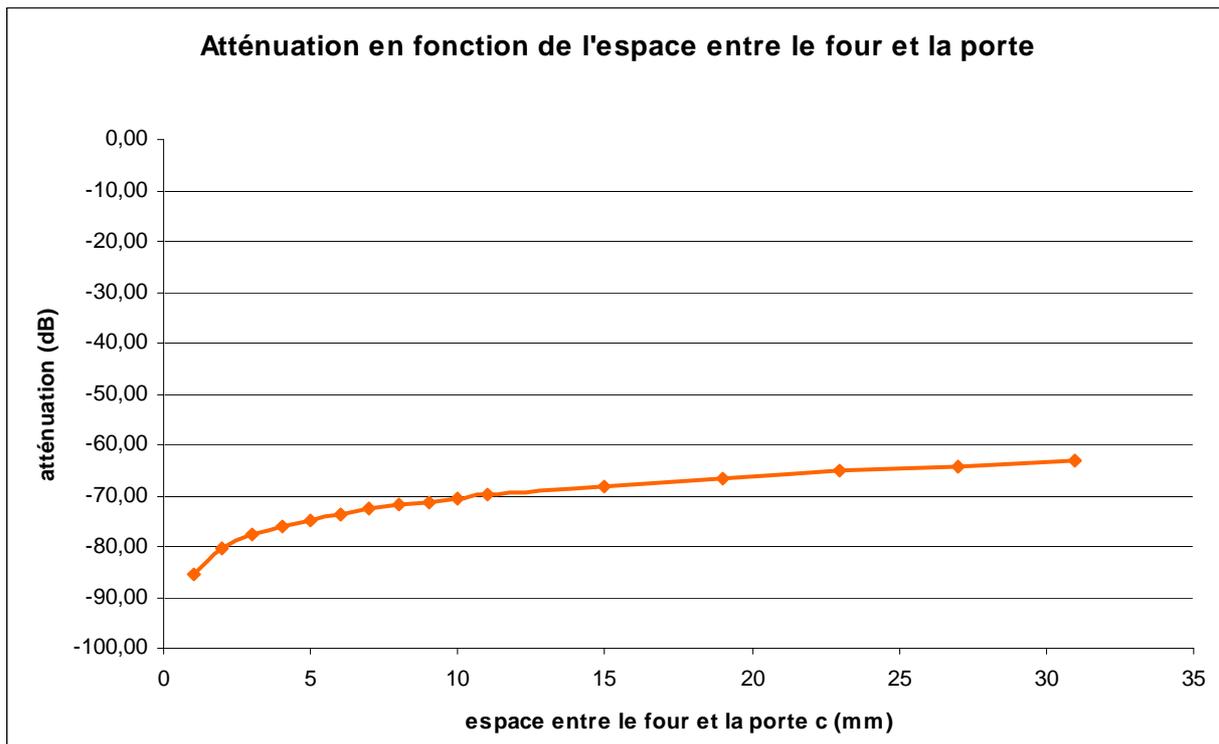
Page 7 : Cadre de la contre-plaque

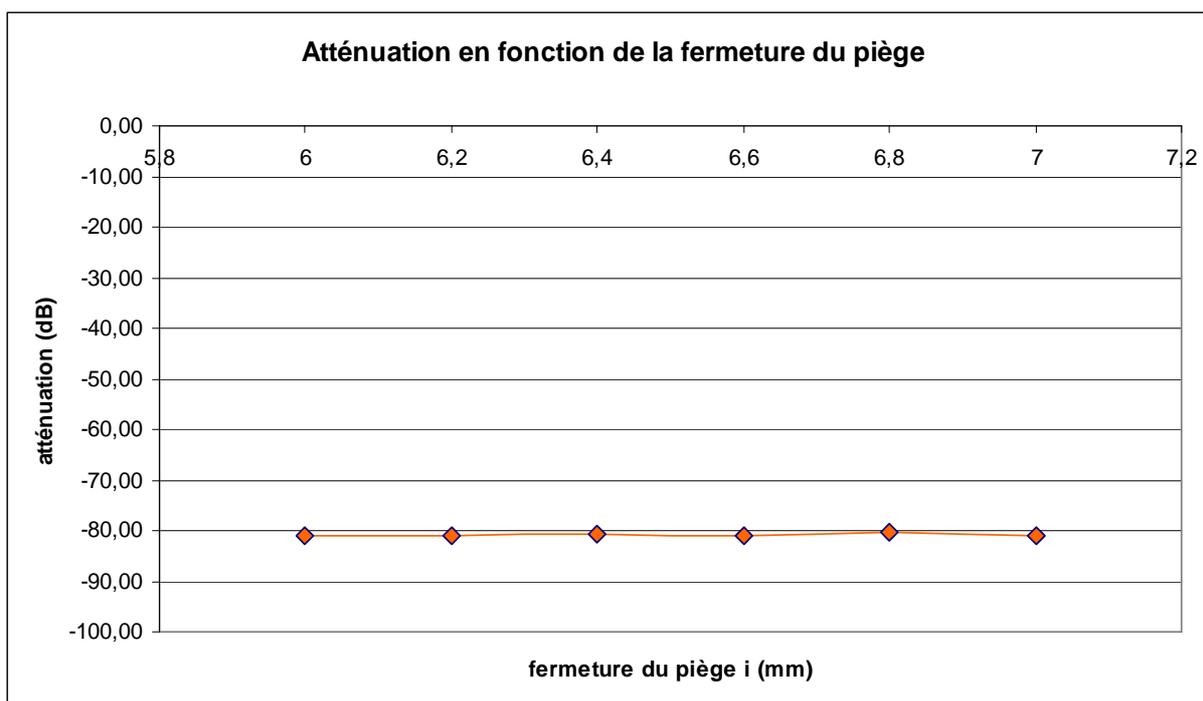
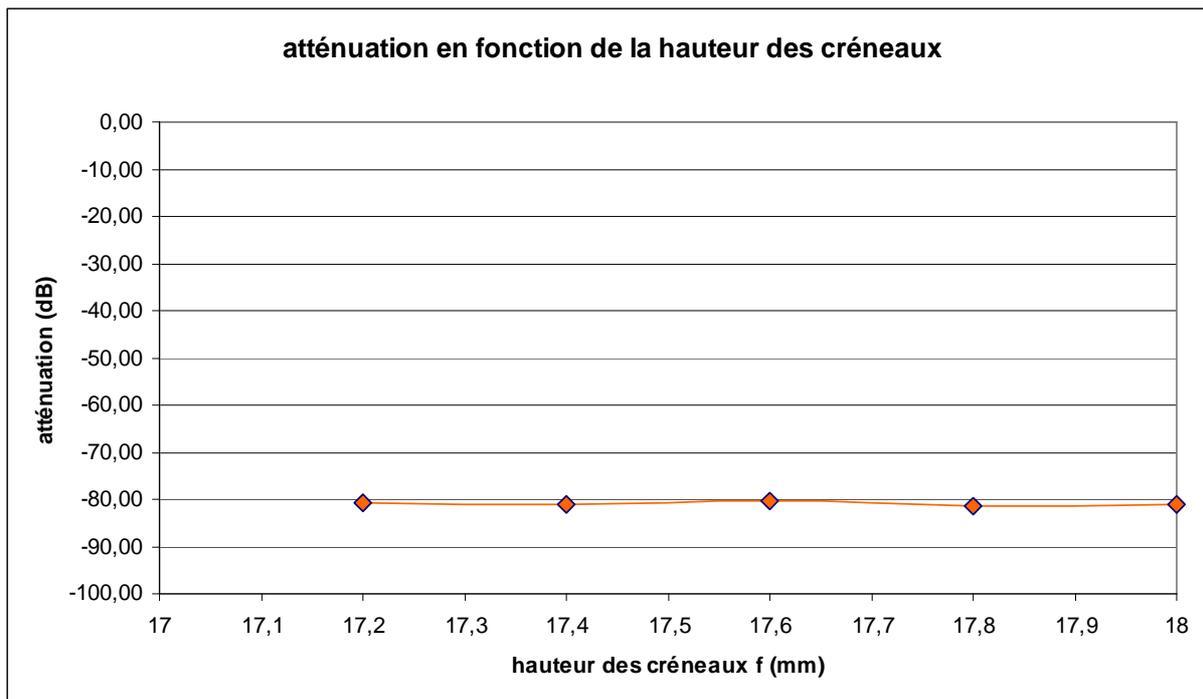


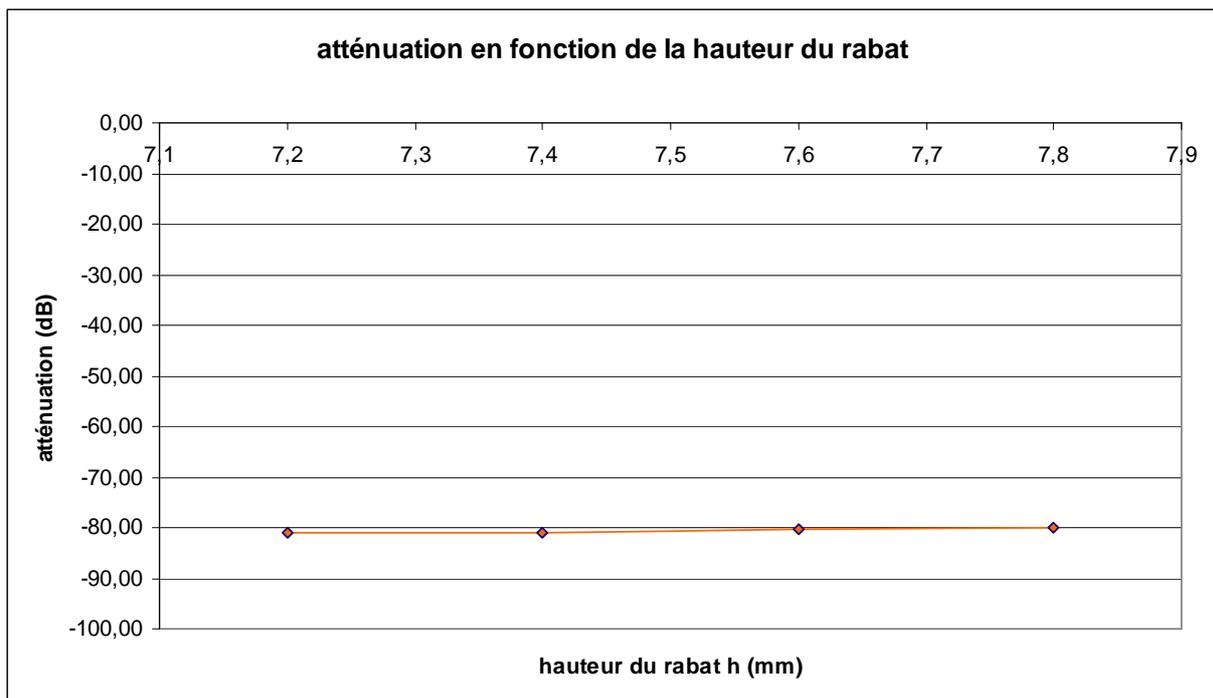
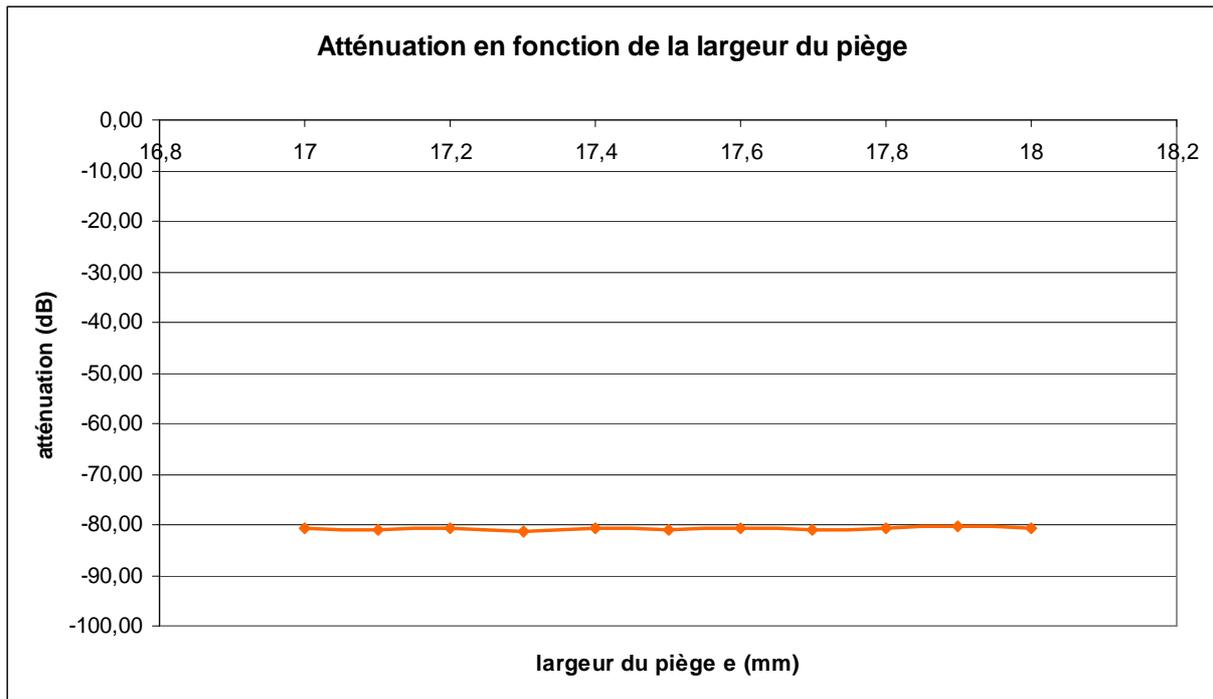
XVI. Annexe 2 : Résultats de la modélisation d'un piège à ondes escargot

Dans cette partie sont jointes l'ensemble des courbes obtenues par la modélisation sur le piège escargot. D'abord, il y a la courbe relative aux différents modes de propagation, ensuite, les courbes relatives à l'espace entre le moufle et la porte et enfin les courbes relatives à l'étude de sensibilité des dimensions du piège.



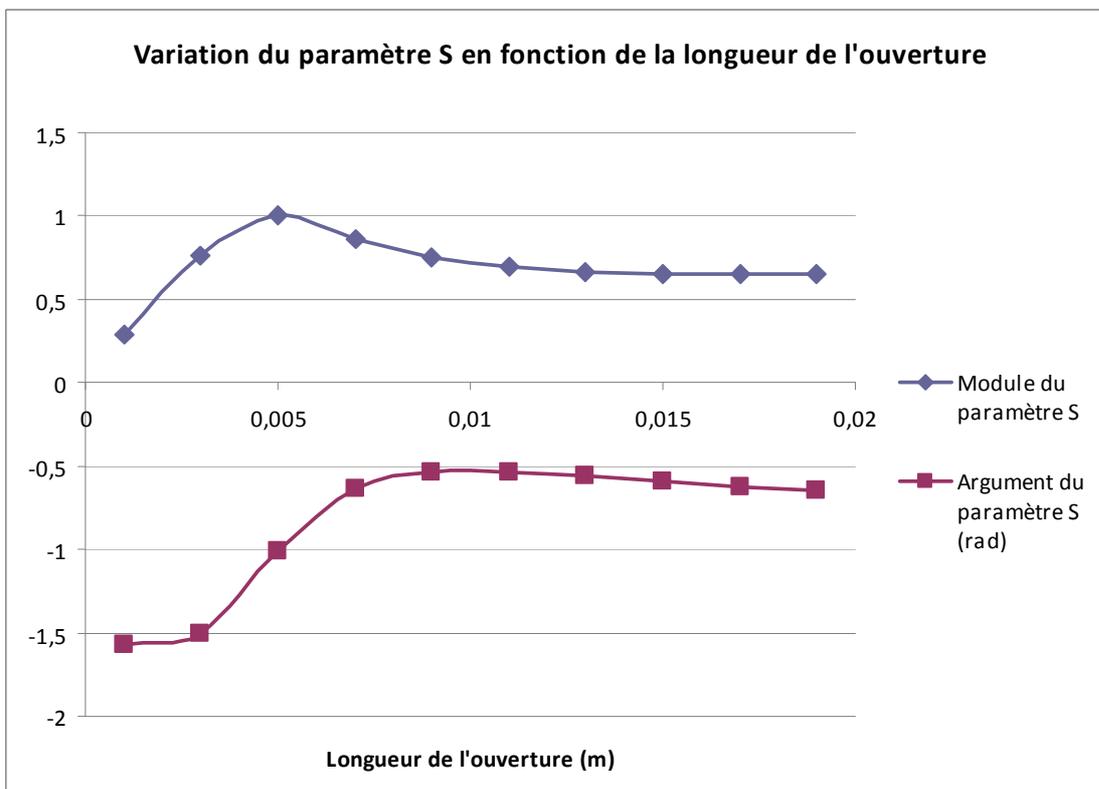
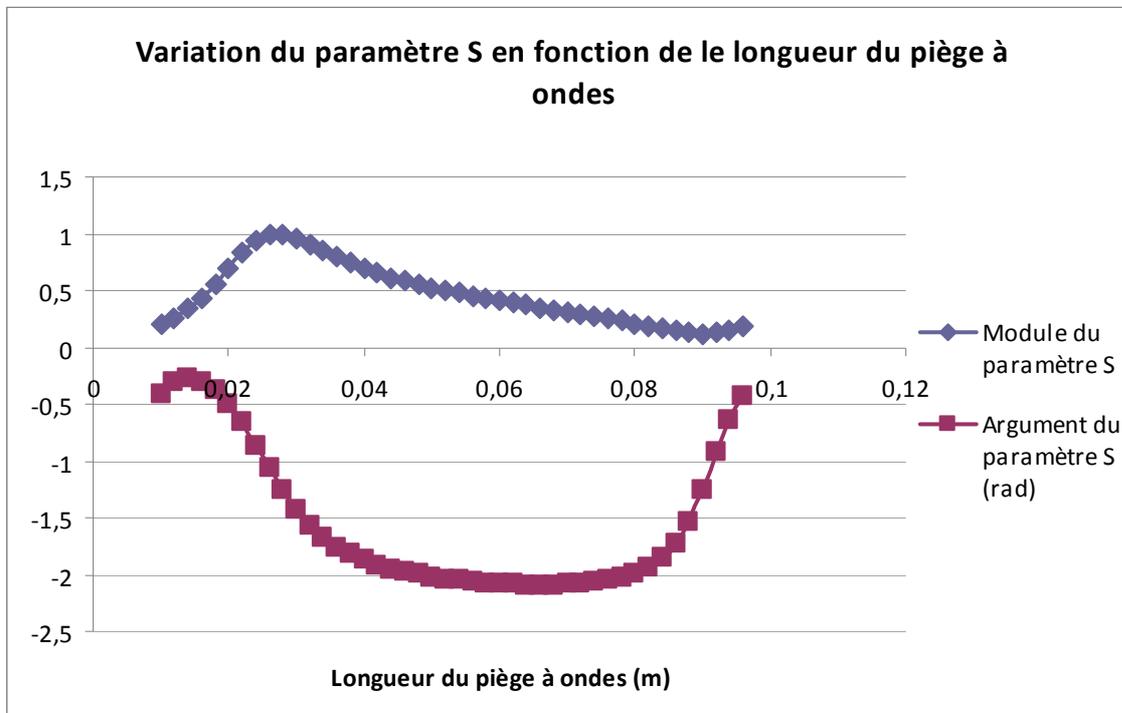


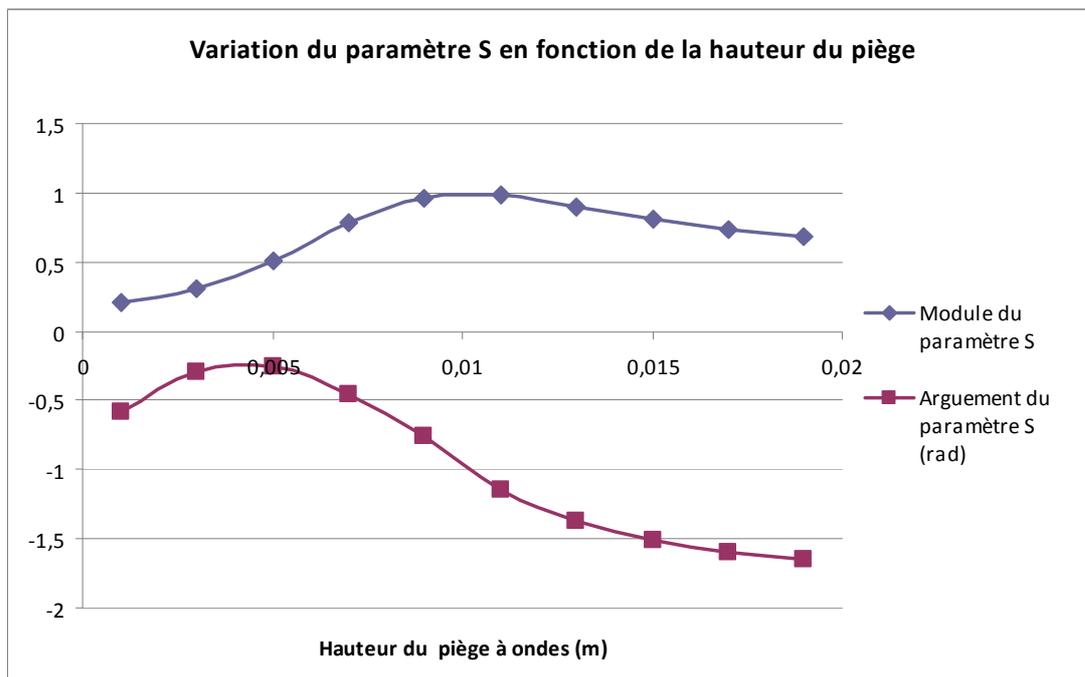
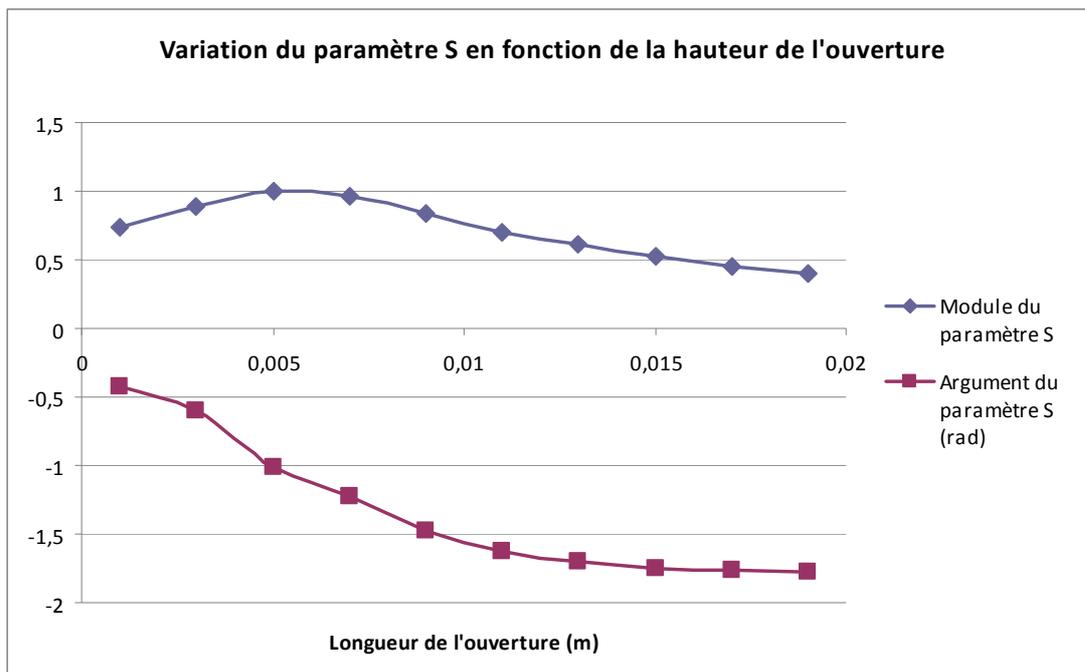


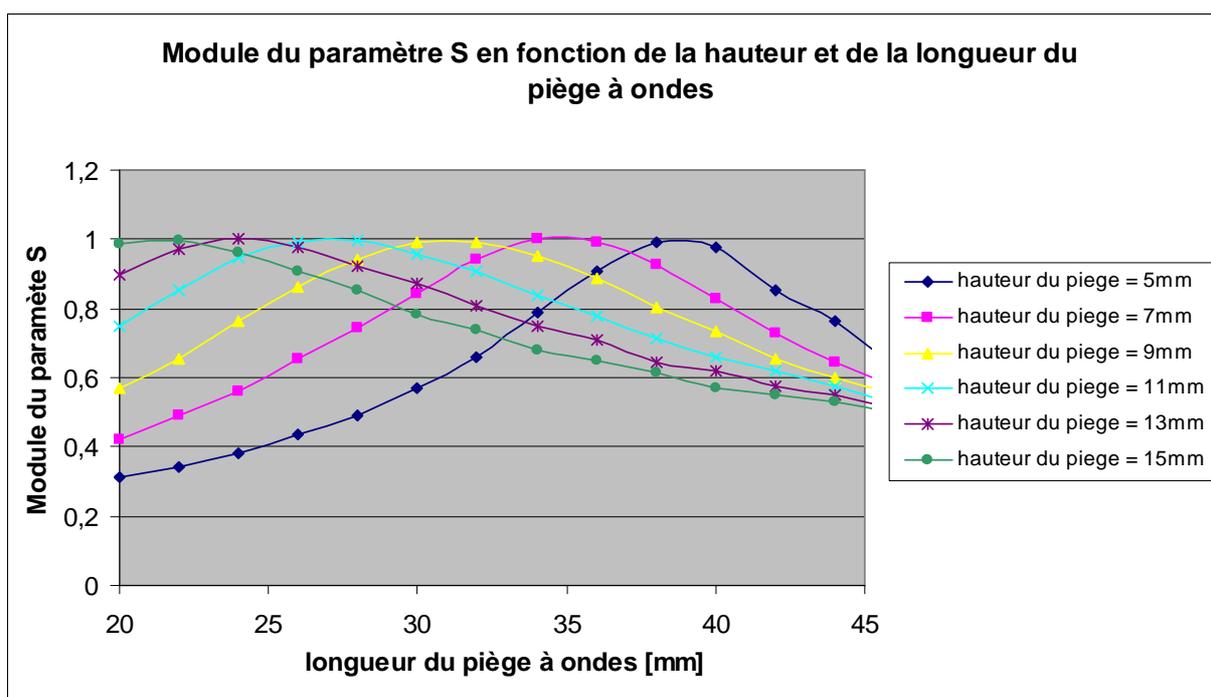
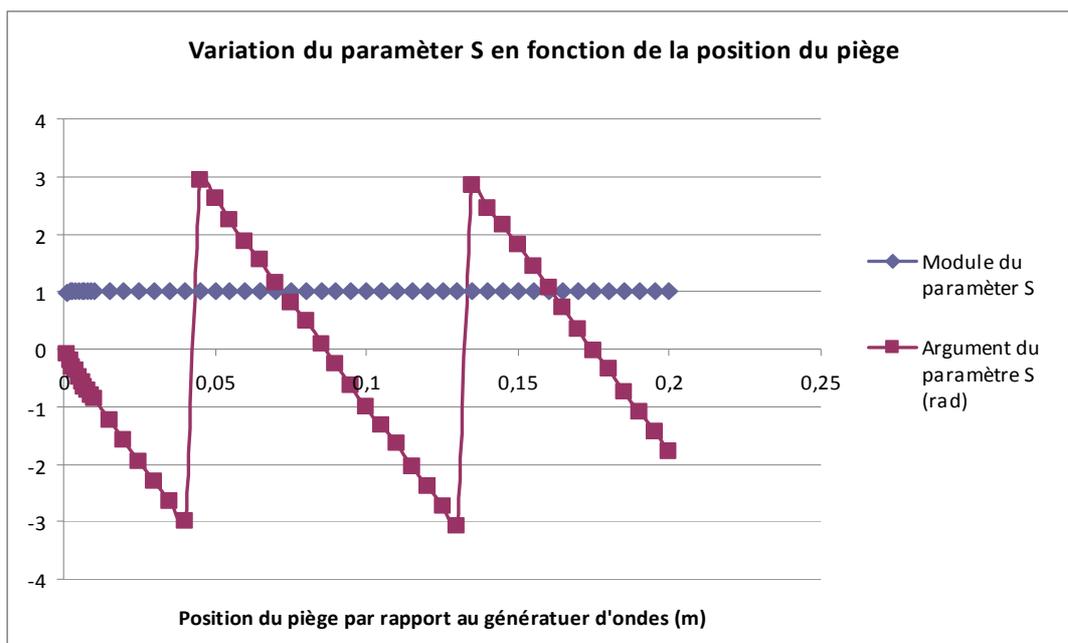


XVII. Annexe 3 : Résultats sur la modélisation d'un piège à onde simple

Dans cette annexe apparaissent toutes les courbes obtenues lors de la modélisation d'un piège à ondes simple. D'abord, il y a toutes les courbes où l'on fait varier les paramètres un par un puis une courbe où l'on fait varier deux paramètres à la fois







XVIII. Annexe 4 : Protocoles expérimentaux

Dans cette partie, on retrouve le détail des différents protocoles expérimentaux élaborés pour l'analyse du prototype et la vérification de certaines hypothèses

Cette expérience est celle qui est nécessaire pour la vérification de l'étanchéité aux ondes.

Sécurité		
Etanchéité au four aux ondes électromagnétiques		
<u>Protocole d'expérimentation :</u>		
	Placer l'appareil fermé dans une cage de Faraday avec les toles extérieures retirées	
	Placer dans l'appareil une charge standard pour cet essai normatif (275g d'eau à une température de 20°C)	
	Positionner un appareil de mesure des ondes électromagnétiques	
	Revêtir une combinaison de sécurité	
	Allumer l'appareil à sa puissance maximale	
	Effectuer une mesure à distance	
	<i>Si la mesure d'énergie est inférieure à la norme :</i>	
	Refaire une série de mesure autour de tout l'appareil afin de s'assurer que l'énergie électromagnétique ne dépasse pas le seuil maximal autorisé	
	Refaire une série de mesure autour de tout l'appareil avec les toles extérieures fixées	
<i>Sinon :</i>		
	Vérifier les serrages de toute la visserie	
	Refaire une mesure à distance	
	<i>Si la mesure d'énergie est encore supérieure à la norme :</i>	
	Remplacer les éléments de visserie par des éléments soudés	

		Refaire une mesure à distance
	<i>Sinon</i> :	
		Refaire une série de mesure autour de tout l'appareil afin de s'assurer que l'énergie électromagnétique ne dépasse pas le seuil maximal autorisé

Cette expérience vérifie le bon fonctionnement du système de verrouillage.

Sécurité	
Système de verrouillage de la porte	
<u>Protocole d'expérimentation :</u>	
Placer l'appareil dans une cage de farraday	
Revêtir une combinaison de sécurité	
Allumer l'appareil et ouvrir la porte pendant le fonctionnement	
<i>Si le micro-onde s'éteint :</i>	
	OK
<i>Sinon :</i>	
	Vérifier le câblage de la sécurité de fermeture

Cette expérience vérifie l'absence d'arcs électriques dans le four micro-ondes.

Sécurité	
Présence d'arcs électriques dans le moufle	
<u>Protocole d'expérimentation :</u>	

	Faire fonctionner le four à micro-onde à vide (sans charge) pendant un certain temps
	Démonter les éléments du four à micro-onde et contrôler la présence d'impacts électriques
	<i>S'il n'y a pas d'impacts :</i>
	Remonter le four
	<i>Sinon :</i>
	Corriger les éventuels endroits à risques et remonter le four

Cette expérience permet de contrôler l'étanchéité de la coupelle et de voir si les micro-ondes contribuent au chauffage de l'eau qu'elle contient.

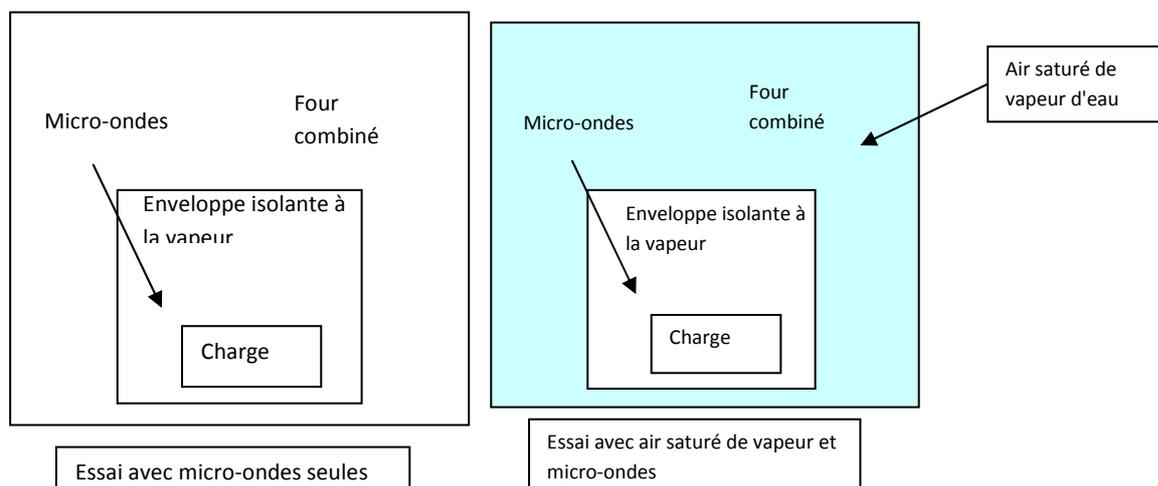
Influence des micro-ondes sur le fonctionnement du four vapeur	
Perturbation de la génération de vapeur	
<u>Protocole d'expérimentation :</u>	
	Remplir la coupelle avec de l'eau à la température ambiante
	Enlever le réservoir
	Mesurer la température de l'eau avant allumage du four micro-ondes
	Faire fonctionner les micro-ondes à la puissance maximale pendant une minute sans charge
	Mesurer la température de l'eau après le fonctionnement des micro-ondes
	Mesurer la puissance émise par le micro-ondes
	Mesurer le volume d'eau dans la coupelle
	Si la température est inférieure à 100°C
	Calculer l'énergie reçue par l'eau par la formule suivante
	$E = M_{vol} * V * C_p * (\theta_{final} - \theta_{initial})$

	Si la température est proche de 100°C (<95°C)
	Recommencer l'essai sur un temps plus court pour éviter le phénomène d'évaporation
	<u>Grandeur étudiée</u>
	:
	Puissance de chauffe de l'eau par les micro-ondes
	Comparaison de cette puissance par rapport à celle par la résistance chauffante
	Si les micro-ondes ont de l'influence
	Vérifier la fixation du système d'étanchéité
	Refaire une mesure
	Sinon
	Prendre en compte cette influence dans le réglage des puissances

Cette expérience permet d'étudier l'interaction entre l'humidité et le rendement du chauffage par micro-ondes.

Interractions micro-ondes et vapeur d'eau	
Mesure de l'influence de l'humidité sur le chauffage par micro-ondes	
<u>Protocole expérimental :</u>	
	Placer une charge standard dans une enveloppe thermiquement isolante (boite en plastique) dans l'appareil
	Effectuer une chauffe de 30 secondes avec les micro-ondes
	Mesurer la température atteinte par la charge

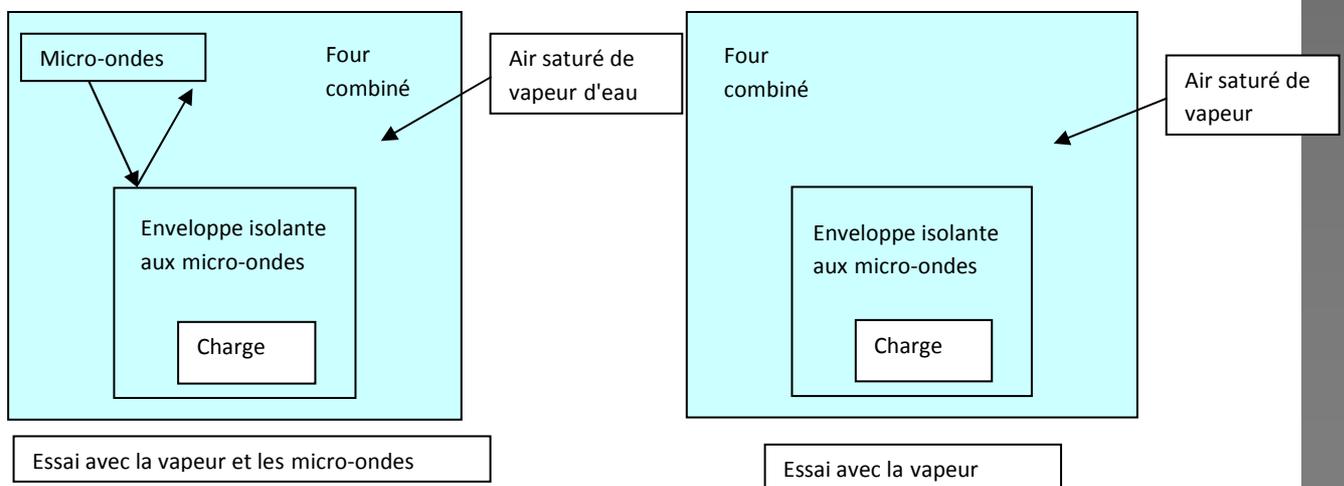
Saturer l'air de vapeur d'eau
Placer une charge standard dans une enveloppe thermiquement isolante (boite en plastique) dans l'appareil
Effectuer une montée en température de 30 secondes par les micro-ondes
Mesurer la température atteinte par la charge
Saturer l'air de vapeur d'eau
Placer une charge standard dans une enveloppe thermiquement isolante (boite en plastique) dans l'appareil
Laisser la charge 30 secondes
Mesurer la température atteinte par la charge
<u>Grandeurs mesurées :</u>
Energie reçue par la charge lors de chaque essai
Rendement lors des différents essais
Observer si l'air saturé en vapeur d'eau influe sur le chauffage micro-ondes



Cette expérience permet d'étudier l'influence des micro-ondes sur le rendement d'une cuisson vapeur.

Interactions micro-ondes et vapeur d'eau

Mesure de l'influence des micro-ondes sur la cuisson vapeur	
<u>Protocole expérimental :</u>	
Préchauffer le four vapeur à 80°C	
Placer une charge standard dans une enveloppe isolante aux micro-ondes (type passoire métallique) dans l'appareil	
Effectuer une chauffe d'une minute par la vapeur	
Mesurer la température atteinte par la charge	
Placer une charge standard dans une enveloppe isolante aux micro-ondes (type passoire métallique) dans l'appareil	
Effectuer une chauffe d'une minute par la vapeur en allumant les micro-ondes	
Mesurer la température atteinte par la charge	
<u>Grandeurs mesurées :</u>	
Energie reçue par la charge lors de chaque essai	
Rendement lors des différents essais	
Observer si les micro-ondes influe sur le chauffage par vapeur	



Cette expérience permet d'étudier les rendements d'un mode de cuisson combiné.

Interactions micro-ondes et vapeur d'eau	
Mesure de l'influence de l'interaction vapeur/micro-ondes sur les différents modes de cuisson	
<u>Protocole expérimental:</u>	
	Placer une charge à l'intérieur du micro-ondes
	Aménager trois points de mesure à différentes profondeurs dans l'aliment
	Faire une montée en température par micro-ondes
	Mesurer la température à chaque point
	Placer une charge standard à l'intérieur du micro-ondes
	Faire une montée en température par vapeur
	Mesurer la température à chaque point
	Placer une charge standard à l'intérieur du micro-ondes
	Faire une montée en température par chauffage combiné micro-ondes/vapeur
	Mesurer la température à chaque point
<u>Grandeurs étudiées :</u>	
	Température en chacun des points de mesures
	Répartition des températures
	Rendement des différents modes de cuisson

Cette expérience permet de comparer la modélisation avec la réalité. On fait varier un paramètre étudié précédemment et l'on compare son influence réelle avec celle calculée.

Analyse des solutions mise en place sur le prototype
Mesure des fuites d'ondes en fonction de la position du piège à onde par rapport au moufle

<u>Protocole expérimental :</u>	
	Verifier en toute sécurité (comme décrit sur l'essai 1) que l'appareil ne dépasse pas la puissance de fuite maximale autorisée lorsque le piège à ondes est dans la position la plus éloignée du moufle
	Faire fonctionner le four micro-ondes avec une charge standard (275g d'eau)
	Faire varier la distance entre le piège à ondes et le moufle
<u>Grandeur étudiée:</u>	
	Puissance de fuite micro-ondes maximale sur le contour

L'expérience qui suit a pour but d'étudier la performance de différents maillages.

Analyse des solutions mise en place sur le prototype	
Mesure des performances des maillages	
<u>Protocole expérimental :</u>	
	Démonter la lampe.
	Monter le couvercle de la lampe avec le maillage le plus fin.
	Mettre le micro-ondes en fonctionnement.
	Faire une mesure du flux électromagnétique.
	Mesurer le point où le flux est maximum.
	Répéter la mesure avec tous les maillages.
	Si la mesure s'approche de la valeur limite autorisée ($3\text{mW}/\text{cm}^2$)

Remonter la lampe.
Faire fonctionner la lampe sans mettre en marche le magnétron.
Mesurer l'intensité lumineuse à l'intérieur du moufle en plaçant le luxmètre sur la paroi opposée à la lampe.
Répéter avec tous les différents maillages.
<u>Grandeurs mesurées :</u>
Intensité lumineuse à l'intérieur du moufle
Flux de puissance de fuite

La dernière expérience présentée compare trois solutions différentes quand à la réalisation de l'étanchéité de la contre-plaque.

Analyse des solutions mise en place sur le prototype
Mesure des performances de l'étanchéité de la contre-plaque
<u>Protocole expérimental :</u>
S'assurer que le prototype est étanche aux micro-ondes comme décrit dans l'essai plus haut avec tous les maillages.
Démonter le moteur de la chaleur tournante
Mettre en fonctionnement le magnétron
Mesurer le flux de puissance de fuite au niveau du trou de la chaleur tournante
Répéter l'essai avec l'ensemble des technologies
<u>Grandeurs mesurées :</u>
Flux de puissance de fuite

XIX. Annexe 6: Photos des différentes parties du projet

Voici une série de photos qui présente des éléments de ce stage

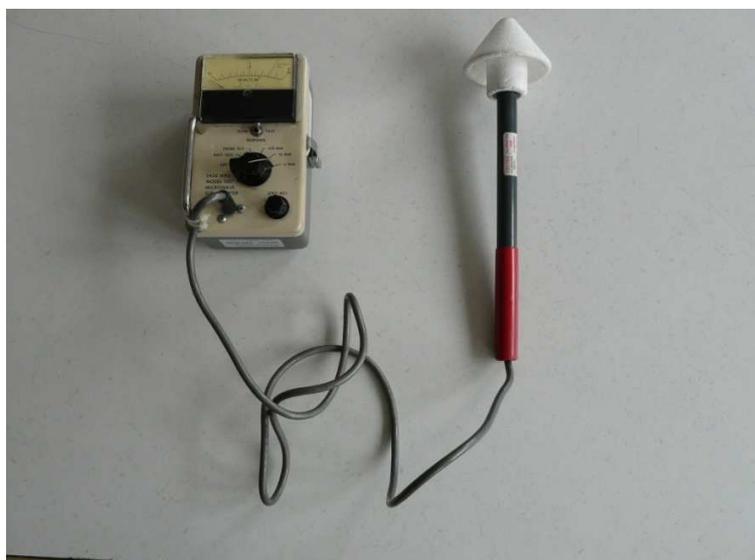


Figure 30: Appareil de mesure de flux de puissance électromagnétique



Figure 31: Mesure des fuites électromagnétiques sur la grille d'un four micro-ondes



Figure 32: le moufle du prototype

On peut y voir les modifications apportées au niveau du côté supérieur, de la tôle arrière et sur les contours de la lampe.



Figure 33: Four entouré de son isolation



Figure 34: Prototype équipé du diffuseur et du guide d'ondes

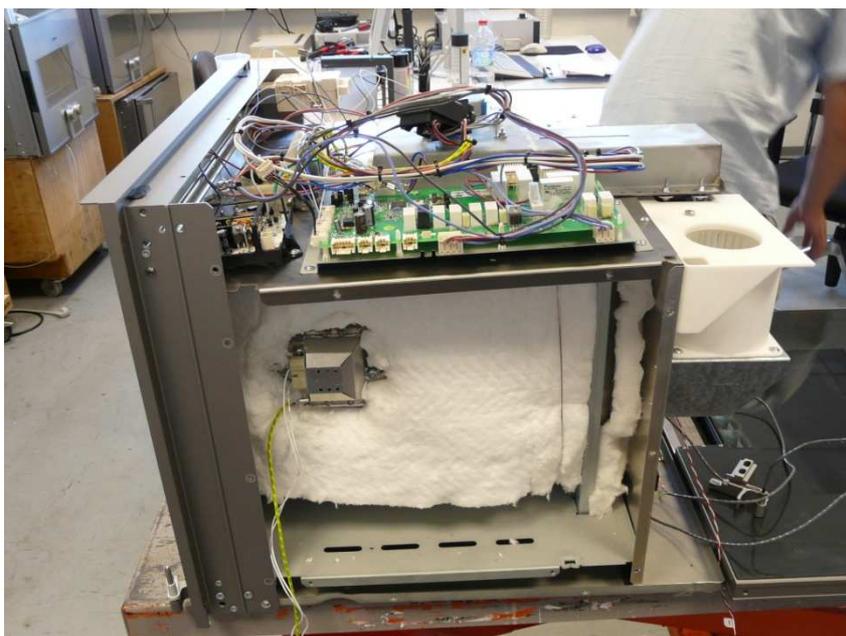


Figure 35: Prototype avec sa ventilation, son système de génération d'ondes, sa lampe et son électronique.



Figure 36: Porte équipée du piège à ondes et de son support