

matériel & PRODUITS

LA TECHNOLOGIE DES MICRO-ONDES

*dans la sintérisation
de la zircone
dentaire*



PAR

LES INGÉNIEURS

Du Centre Recherche et Développement de Mestra



La chauffe de matériaux céramiques par ondes électromagnétiques est une technique utilisée par l'industrie depuis le début des années 1980. Initialement, elle était utilisée dans les travaux de séchage des matériaux (essentiellement l'élimination de l'eau), et plus tard dans la cuisson d'éléments céramiques. Depuis, cette technologie est allée se perfectionnant et de plus en plus d'applications industrielles l'ont adoptée.

Pour le secteur dentaire, la sintérisation du ZrO_2 est probablement une des applications qui présente le plus d'intérêt. Pour le moment, seules quelques entreprises dans le monde maîtrisent cette technique au point de pouvoir proposer sur le marché des produits fiables, efficaces et économiques. Cependant, en raison de sa nouveauté et de son concept révolutionnaire, de nombreux doutes et incertitudes assaillent le prothésiste dentaire.

Cet article a pour ambition de clarifier les avantages de cette technologie en la comparant aux fours à résistance. Il s'adresse à un utilisateur intéressé par le sujet, et dont les connaissances scientifiques sont basiques.

Une analyse approfondie de la technologie de frittage par micro-ondes nous obligerait à aborder des problèmes qui sont enracinés, entre autres, dans la mécanique quantique, mécanique ondulatoire ou électrochimie.

Pour cette raison, dans un souci de clarté et de facilité de compréhension, il a été décidé de simplifier. Pour les professionnels plus studieux ou qui ont besoin d'une plus grande précision dans le raisonnement, l'équipe technique Mestra est à leur disposition pour élargir leurs connaissances ou résoudre toutes les questions ou commentaires afférents à cette technologie.

Fonctionnement des Micro-ondes

Peut-être que la meilleure façon d'aborder le monde des micro-ondes est d'analyser le fonctionnement d'un four à micro-ondes comme celui que nous avons tous dans notre cuisine. On sait qu'une molécule d'eau est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. L'ion hydrogène a une charge positive et l'ion oxygène une charge négative. En raison de cette asymétrie de la molécule, deux zones différenciées seront générées dans l'espace, une avec une charge positive et une autre avec une charge négative. Ce qui équivaut à un petit aimant.

D'autre part, nous savons que lorsqu'un aimant est placé dans un champ électromagnétique, il sera orienté telle l'aiguille d'une boussole qui suit les lignes du champ électromagnétique terrestre. Mais que se passerait-il si au lieu d'un champ statique comme celui de la Terre, l'aimant est immergé dans un champ électromagnétique qui oscille sans cesse ? Dans ce cas, il commencerait à vibrer au même rythme, essayant à tout moment de maintenir l'alignement avec le champ.

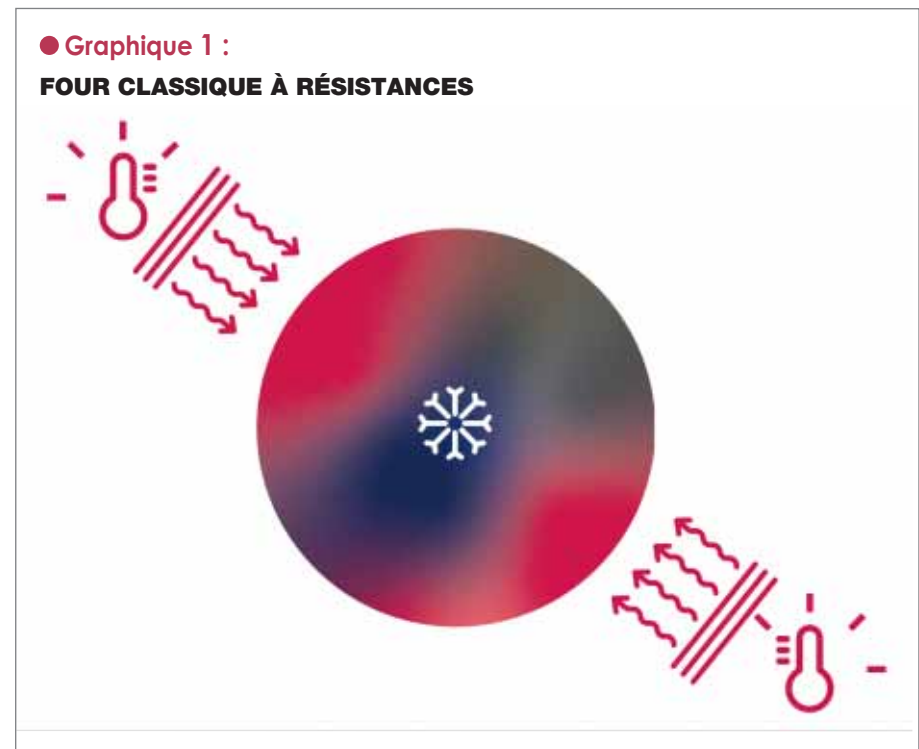
Les aliments que nous mettons au micro-ondes à la maison ont une teneur élevée en eau. Nous avons déjà vu qu'une des façons de comprendre la molécule d'eau serait de la comparer à un petit aimant. Lorsque vous démarrez le four, un appareil appelé « magnétron » génère une onde électromagnétique oscillante à haute énergie. Immédiatement, les minuscules « aimants à eau » commencent à vibrer en essayant de s'orienter dans le champ créé par le magnétron. Cette danse moléculaire effrénée produit le frottement des molécules de l'eau et, par conséquent, un échauffement des aliments.

- Quelques précisions s'imposent :**
- La fréquence de l'onde générée par le magnétron est extrêmement élevée. Elle oscille environ 2,4 milliards de fois par seconde (2 400 000 000). Le frottement moléculaire est très élevé.
 - L'onde électromagnétique pénètre dans l'aliment en atteignant son intérieur et en faisant vibrer non seulement les molécules d'eau de la croûte externe, mais aussi celles qui se trouvent à l'intérieur de l'aliment.
 - Puisque toutes les molécules d'eau de l'aliment oscillent en même temps, la chauffe se fait de manière homogène et simultanée sur toute la masse de l'aliment.
 - Le boîtier de l'appareil étant métallique et fermé, les ondes électromagnétiques ne peuvent pas s'échapper de l'intérieur (effet de

cage de Faraday), par conséquent, aucun gaspillage. Presque toute l'énergie est utilisée pour chauffer les aliments. À la fin du processus, les parois du micro-ondes sont froides.

Il existe une nette différence entre le chauffage dans un four à résistance classique et dans un four à micro-ondes : dans le four conventionnel, le rayonnement atteint la surface de l'aliment et de là, il est transmis à l'intérieur de l'aliment par conduction thermique. Pour cette raison, sa surface est grillée en raison de l'incidence directe du rayonnement qui est incapable de pénétrer à l'intérieur de l'aliment. Dans le cas du four à micro-ondes, le processus de chauffe empêche que la partie externe soit surchauffée et donc grillée (Graphique 1).

Graphique 1 :
Dans le four conventionnel, le rayonnement atteint la surface de l'aliment et de là, il est transmis à l'intérieur de celui-ci, la surface de l'aliment devient grillée en raison du rayonnement qui ne pénètre pas à l'intérieur.

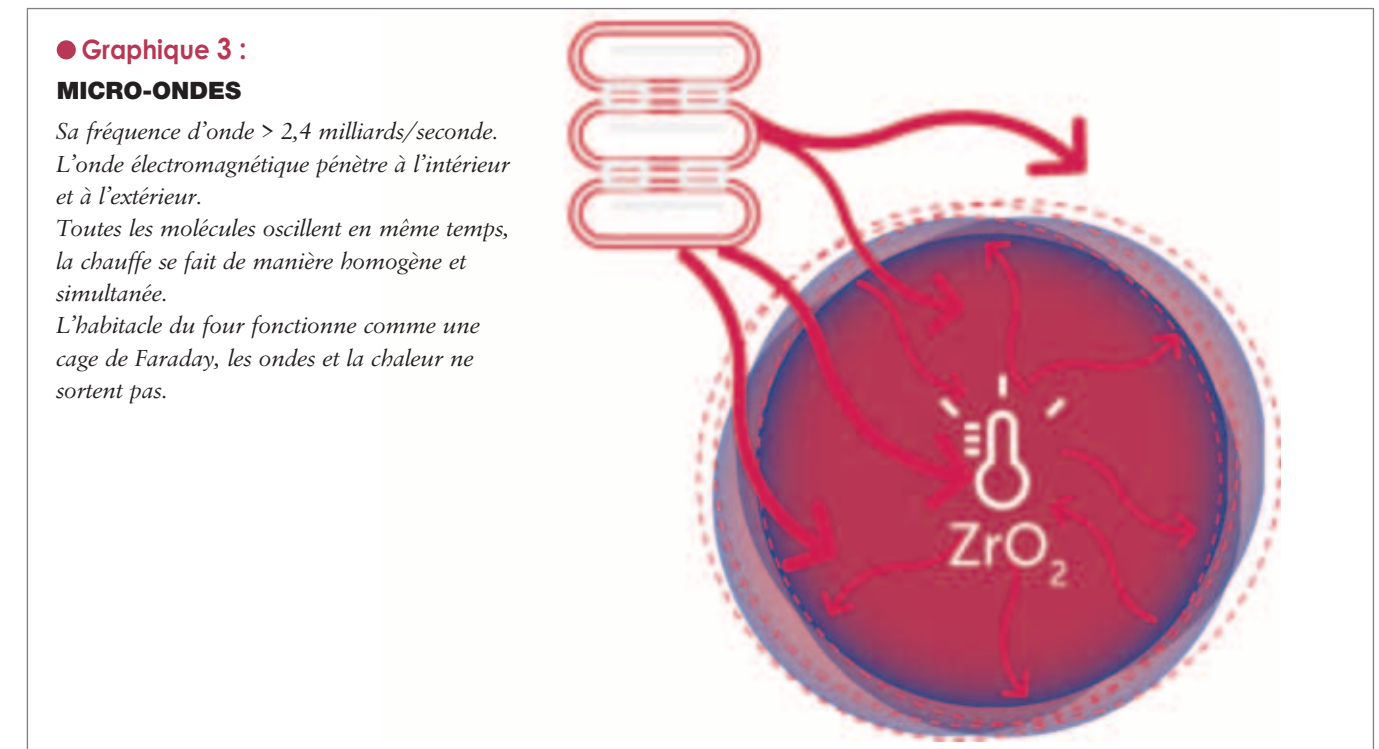
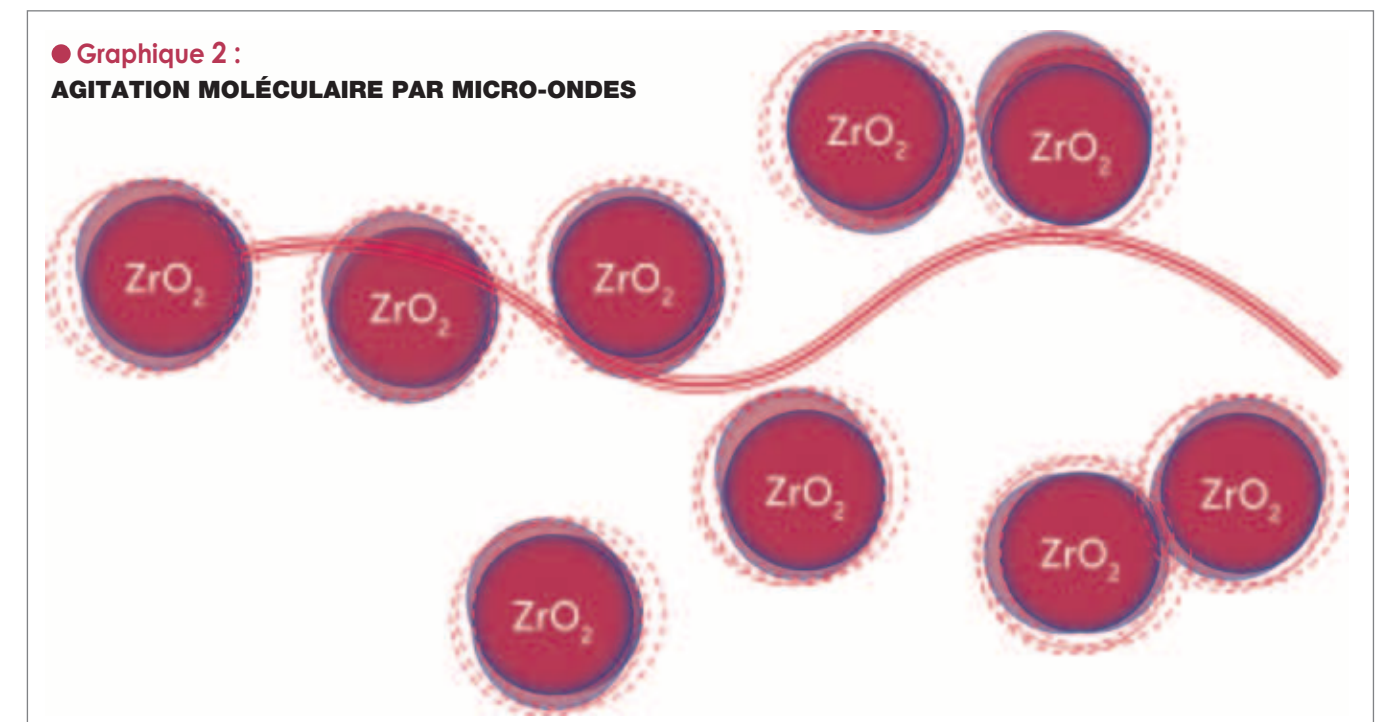


ZIRCONE ET MICRO-ONDES

En pratique, le mécanisme d'agitation des molécules céramiques (par exemple ZrO₂) au sein du champ électromagnétique n'est pas du type dipolaire comme dans l'eau (aimant).

Il est en fait produit par l'agitation du couple électron libre/trou, avec un espace d'oscillation et sans choc intermoléculaire. Pour se dynamiser, une molécule peut vibrer, se déplacer et entrer en collision avec d'autres molécules,

tourner sur l'un de ses atomes, ou ce qui est plus probable, une combinaison de toutes ces actions. Pour des raisons de clarté et de simplicité dans l'exposé, nous continuerons d'aborder le sujet en suivant la même philosophie initiale (Graphiques 2 et 3).



Problèmes de la sintérisation classique

FISSURES ET DÉFORMATIONS DANS LES FOURS À RÉSISTANCE

Imaginons une sphère creuse qui à l'intérieur contient une autre sphère du même matériau. Il n'y a initialement aucune séparation entre les deux sphères. À partir de ce postulat, supposons maintenant que nous ne chauffons que la sphère extérieure tout en gardant la sphère intérieure au frais. La sphère extérieure commencera à se dilater en raison de l'effet de la chaleur et peu à peu, une scission entre les deux sphères se créera et ira grandissant au fur et à mesure que la différence de température augmentera.

Si nous supposons maintenant que les deux sphères sont fortement soudées, la sphère extérieure tirera sur la sphère intérieure et un étirement du matériau se produira. Son élasticité tentera d'absorber la séparation entre les deux sphères.

“ Suivant la géométrie de la pièce, l'homogénéité et la différence de températures, la fissure peut être visible, ou à l'intérieur de la pièce sans que personne ne puisse la voir. ”

Évidemment, lorsque la limite élastique du matériau est dépassée et que la contrainte de rupture est atteinte, le matériau se déchirera, produisant une fissure.

Si, au contraire, la couche extérieure refroidit, on assiste au même phénomène, les différences de dilatation entre ces différentes couches imaginaires qui composent un matériau doivent être absorbées par leur élasticité. Sinon, des fissures se produiront pendant la chauffe ou le refroidissement (Graphique 4).

Il est important de souligner qu'en fonction de la géométrie de la pièce, de l'homogénéité du matériau et de la différence de température subie par ce matériau, une fissure peut apparaître à l'extérieur (visible), ou pire encore, se former à l'intérieur même du matériau, invisible à l'œil nu et être à l'origine d'une fracture lorsque la pièce sintérisée sera soumise à des contraintes.

Il peut également arriver que la contrainte « traction/compression » provoquée par la différence de température ne crée pas de fissure mais provoque une déformation appelée déformation plastique, qui rendrait dans certains cas la pièce sintérisée inutilisable.

Particularités de la zircone dentaire

En ce qui nous concerne, ces phénomènes sont d'autant plus accentués si l'on prend en compte trois particularités de la zircone dentaire :

● Isolant thermique remarquable.

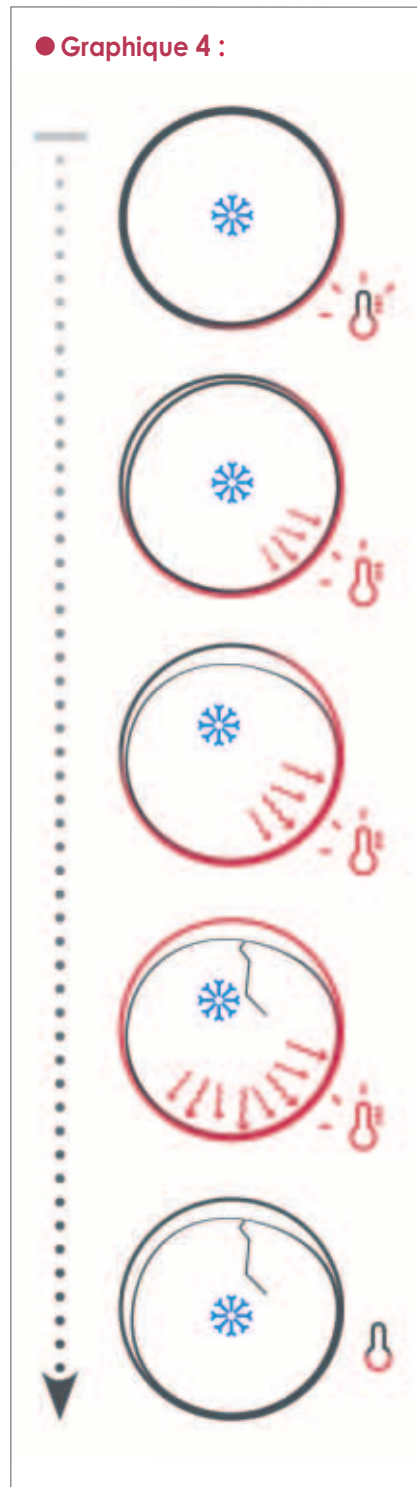
Pour cette raison, les processus « chauffe/refroidissement » par simple conduction thermique prennent beaucoup de temps si l'on veut éviter les écarts de température.

Il est difficile de conduire la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur de la pièce en raison de la réactance thermique élevée du matériau.

● Matériau avec une élasticité très limitée.

Toute contrainte produite par une différence de température peut provoquer une fissure ou une déformation.

● Graphique 4 :



● Matériau fritté extrêmement fragile.

Le ZrO₂ que nous introduisons dans le four de sintérisation n'est pas un matériau homogène : c'est de la « poudre pressée ».

Ce sont de minuscules particules de matière rendues très faiblement cohésives par un procédé de compression. Lors du traitement au four, ces particules fondent, générant un produit de plus grande résistance.

Évidemment, avant que le frittage complet ne soit réalisé, ce sera un matériau très cassant, car la résistance à la « traction/compression » de la « poudre pressée » est très limitée. Toute contrainte minimale due à une différence de température provoquerait des fissures. Lorsque l'on chauffe un morceau de ZrO₂ avec un four conventionnel, le rayonnement thermique produit par les résistances frappe la surface externe du matériau qui transmettra la chaleur à la partie interne par conduction.

Le caractère réfractaire de la zircone ne facilite pas ce processus de transfert de chaleur.

Si nous augmentons la puissance de rayonnement pour réduire les temps de processus, on finira par « griller » la croûte externe de la pièce tout en gardant l'intérieur froid.

“ En résumé, les temps de « chauffe / refroidissement » avec les fours de frittage conventionnels doivent rester élevés. ”

Ou pire, on générera une différence de température entre la croûte et le cœur si élevée qu'elle provoquera une fissure.

En résumé, les temps de « chauffe/refroidissement » avec les fours de frittage conventionnels doivent rester élevés.

Intérêt des micro-ondes

AVANTAGES DES MICRO-ONDES

Les micro-ondes quant à elles sont capables de pénétrer dans la zircone de 30 à 40mm. L'oscillation moléculaire, et donc le chauffage du matériau, sera uniforme dans tous les points de la pièce. Le risque de fissure ou de déformation dues à la différence de température entre les zones est pratiquement inexistant lors de la chauffe (Graphique 5).

RÉDUCTION SIGNIFICATIVE DES TEMPS DE TRAITEMENT

En utilisant la technologie micro-ondes, les temps de traitement sont considérablement réduits :

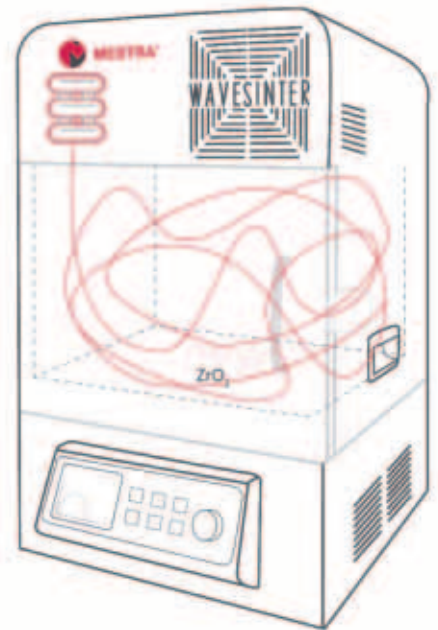
En éliminant le besoin d'une chauffe lente et progressive pour éviter la rupture et la déformation de la zircone, il n'est pas nécessaire de prolonger le temps de chauffe ni de faire des paliers, car il n'y a pas de différences de température significatives entre l'intérieur et l'extérieur de la pièce.

Le caractère réfractaire de la zircone n'a pas un tel impact sur le cycle, puisque la chauffe se fait sur tous les points du matériau. La radiation thermique n'a pas besoin d'être transférée de l'extérieur vers l'intérieur de la prothèse.

Le four a une masse moins importante que celle d'un four traditionnel. Par conséquent, l'inertie thermique est beaucoup plus faible dans le four à micro-ondes.

● Graphique 5 :

Chauffe homogène, élimine le risque de fissure entre la zone interne et externe et les déformations plastiques, besoin de moins d'énergie.



“ Les micro-ondes sont capables de pénétrer d'environ 30 à 40 mm la zircone : l'oscillation moléculaire, et donc le chauffage du matériau, se fera de manière homogène sur tous les points de la pièce. ”

Ce point est particulièrement important pendant la phase de refroidissement : la température ambiante sera atteinte en moins de temps qu'avec un four conventionnel.

La vitesse de transmission d'énergie d'une onde électromagnétique dans la matière est supérieure à celle de l'énergie par rayonnement thermique.

Intérêt des micro-ondes

Selon les lois de la mécanique quantique, les mécanismes d'absorption des photons sont différents dans les deux cas et influent également sur la vitesse de changement de température.

ÉCONOMIE D'ÉNERGIE

Les fours à zircone conventionnels sont construits avec des résistances qui rayonnent de l'énergie dans toutes les directions.

Pour éviter qu'elle ne se perde à travers les parois du four, il est nécessaire d'utiliser des systèmes d'isolation thermique épais : de toute l'énergie émise par les résistances, seule une fraction est absorbée par la pièce chauffée. Le reste est perdu sous forme de chaleur dans le moufle et dans l'équipement. Les consommations électriques sont élevées.

Cependant, à l'aide de micro-ondes, l'énergie produite par le magnétron se concentre presque exclusivement sur le matériau à chauffer. Nous avons dit qu'après un cycle de chauffe dans un micro-ondes domestique, les parois restent froides. Les utilisateurs de notre four à micro-ondes confirment que la réduction des coûts sur leur facture d'électricité est significative et que le four transmet peu de chaleur.

ENTRETIEN FACILE

Les résistances d'un four classique de sintérisation doivent atteindre des températures qui en certains cas dépassent 1800 °C.

Ces résistances sont généralement construites en MoSi2, un matériau coûteux et délicat (il est très fragile et cassant), utilisé uniquement pour des applications très spécifiques et limitées, et susceptible de produire une contamination par la vapeur à l'intérieur du moufle.

De plus, elles ont une grande conductivité électrique, c'est pourquoi l'utilisation de courant très élevé est nécessaire (il peut dépasser 100 Ampères), avec des tensions faibles.

“ le magnétron est un élément compact facile à remplacer en cas de panne, il ne peut produire aucun type de contamination à l'intérieur de la chambre, il est peu coûteux et rarement défaillant ”

Cette caractéristique oblige à utiliser des systèmes de commande et d'alimentation électroniques sophistiqués. De plus, les résistances se dégradent avec le temps et doivent être remplacées, avec un coût très élevé.

Pour sa part, le magnétron d'un four à micro-ondes est un élément compact : facile à remplacer en cas de panne, il ne peut produire aucun type de contamination à l'intérieur du moufle. C'est une pièce peu coûteuse et rarement défaillante.

Dans des conditions de travail normales, sa durée de vie est pratiquement illimitée. Hautement testé dans tous les types de systèmes industriels.

AUTRES AVANTAGES

Les avantages particuliers du four de frittage micro-ondes Wavesinter ne se limitent pas à ceux décrits précédemment, on pourrait ajouter :

- **Modèle compact qui prend peu de place dans le laboratoire.**

Les dimensions de l'équipement sont similaires à celles d'un petit four de chauffe de cylindre classique. Il ne pèse que 32 Kg contre près de 60 Kg pour un four de sintérisation classique.

- **Grande capacité de production.**

Avec la technologie conventionnelle, un cycle de frittage prend beaucoup de temps. Il est difficile d'en effectuer plus d'un en une journée. Comme la technologie micro-ondes est beaucoup plus rapide, il est possible de lancer deux, et même trois cycles.

- **Utilisation simple et intuitive.**

Il n'y a pas de courbe d'apprentissage. L'équipement est fourni avec une série de programmes préenregistrés, il suffit donc d'appuyer sur un bouton pour démarrer et terminer un cycle. Il est à noter que l'opérateur peut faire lui-même son propre programme. Le résultat sera là.

- **Amélioration drastique de la qualité de la sintérisation.**

Parfois, les fissures et les déformations d'un matériau dentaire fritté n'apparaît pas à l'extérieur de la pièce. Cependant, cela ne signifie pas qu'il n'y a pas un risque potentiel de casse. Il peut arriver qu'une prothèse se fracture en bouche en raison d'un défaut interne qui n'a pas été détecté lors de l'inspection visuelle après sintérisation. Ce risque est considérablement réduit grâce à l'utilisation de la technologie de chauffe par micro-ondes.

L'ensemble de ces avantages fait tout l'intérêt de cette technologie (Graphique 6).

● Graphique 6 :

Résumé des avantages liés à la cuisson de la zircone par micro-ondes.



ON ÉVITE DES FRACTURES



GAIN DE TEMPS



ÉCONOMIE D'ÉNERGIE



ÉCONOMIE D'ENTRETIEN



GAIN D'ESPACE



FACILE À UTILISER



GRANDE CAPACITÉ DE PRODUCTION



SINTÉRISATION DE QUALITÉ

Rôle des suscepteurs

CRÉER UN EFFET DE SERRE

Une question récurrente fréquemment posée est la fonction des suscepteurs. Ce sont les plaques réfractaires qui tapissent l'intérieur des parois de la chambre. Nous essaierons de l'expliquer comme une curiosité. Pour cela, nous devons introduire deux concepts de base : l'effet de serre et le mécanisme de rayonnement énergétique.

- En partant du premier concept, nous dirons qu'une serre est une enceinte en verre exposée à l'action du soleil.

Les rayons du soleil traversent le verre car il est transparent à la fréquence d'émission solaire. Ce rayonnement chauffe l'intérieur, augmentant la température. L'intérieur de la serre émet à son tour de l'énergie vers l'extérieur.

- Il faut maintenant mentionner un détail important : le rayonnement solaire a une fréquence d'émission très élevée car il a été produit par un élément, le soleil, qui est à une température énorme.

Au contraire, le rayonnement émis par l'intérieur de la serre est à faible consommation d'énergie, car la température est également basse.

Les rayons du soleil passent facilement à travers le verre et chauffent l'intérieur de la serre, mais ce même verre empêche le rayonnement réfléchi de s'échapper. L'énergie entre, mais ne sort pas, augmentant la température à l'intérieur.

- Le deuxième concept a été introduit par le physicien autrichien Ludwig Boltzman, qui a démontré que l'énergie émise par un corps chaud était proportionnelle à sa température élevée à la puissance quatre $E = \Sigma T^4$.

Le soleil est à une température de plusieurs millions de degrés. Si nous élevons cette température à

la puissance quatre, il est facile de comprendre l'énorme quantité d'énergie qui rayonne dans l'espace et la raison pour laquelle elle est reçue par notre planète alors qu'il se trouve à plusieurs millions de kilomètres de distance. Au contraire, un corps à basse température aura une capacité d'émission d'énergie très limitée.

- Compte tenu de ces deux concepts, lors du chauffage d'un aliment dans un micro-ondes domestique, la température ne dépasse généralement pas 100 °C, de sorte que l'énergie rayonnée est très faible. Mais si l'on parle de zircone dentaire, la température de frittage est d'environ 1530 °C, soit 15 ou 16 fois plus élevée que celle d'un micro-ondes de cuisine. En élevant cette valeur à la puissance quatre, l'énergie rayonnée par un bloc de zirconium à 1550 °C sera environ 50000 fois plus élevée que celle des aliments que nous chauffons habituellement dans nos fours à micro-ondes domestiques.

Une telle quantité de chaleur pourrait endommager les mécanismes et systèmes internes du four. Ce serait également un gaspillage d'énergie. Pour cette raison, nos ingénieurs ont choisi de créer une « petite serre » (Graphique 7).

N'oublions pas que la lumière du soleil, les ondes radio, les micro-ondes, les rayons X etc. sont des ondes électromagnétiques qui répondent aux mêmes principes et équations. Poursuivant la comparaison, l'intérieur du moufle formerait une serre. Les suscepteurs rempliraient la fonction du verre de la serre, qui

laisse passer les micro-ondes générées par le magnétron, mais très opaque au rayonnement émis par le zirconium chauffé.

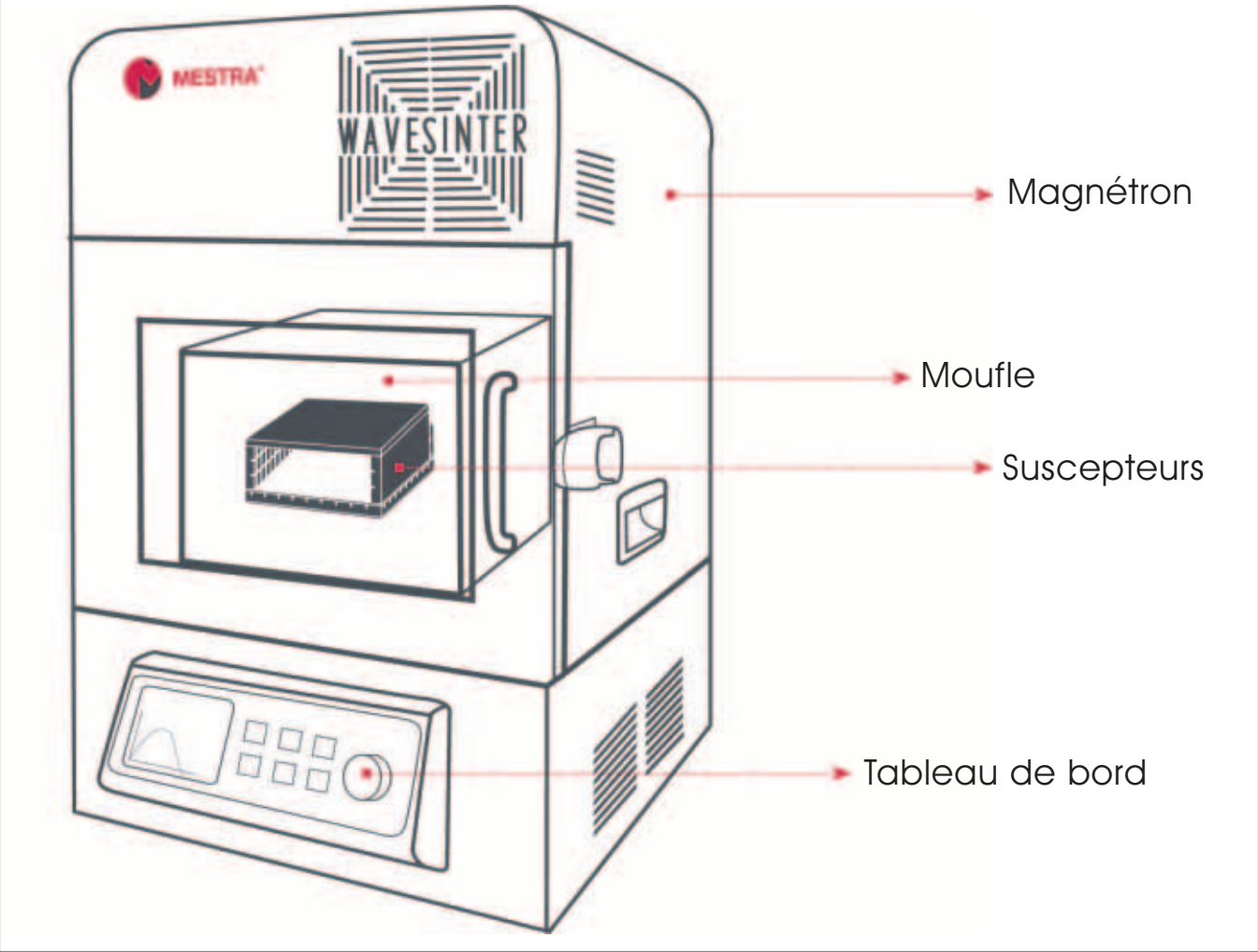
Les ondes peuvent pénétrer dans la chambre du four à travers les suscepteurs, mais ils empêchent la chaleur de sortir, entraînant la concentration de l'énergie au centre du moufle en évitant sa dispersion. (Graphique 8).

En réalité, les suscepteurs ne sont pas 100% transparents à l'énergie produite par le magnétron, une partie de cette énergie est absorbée par eux, ce qui les fait chauffer.

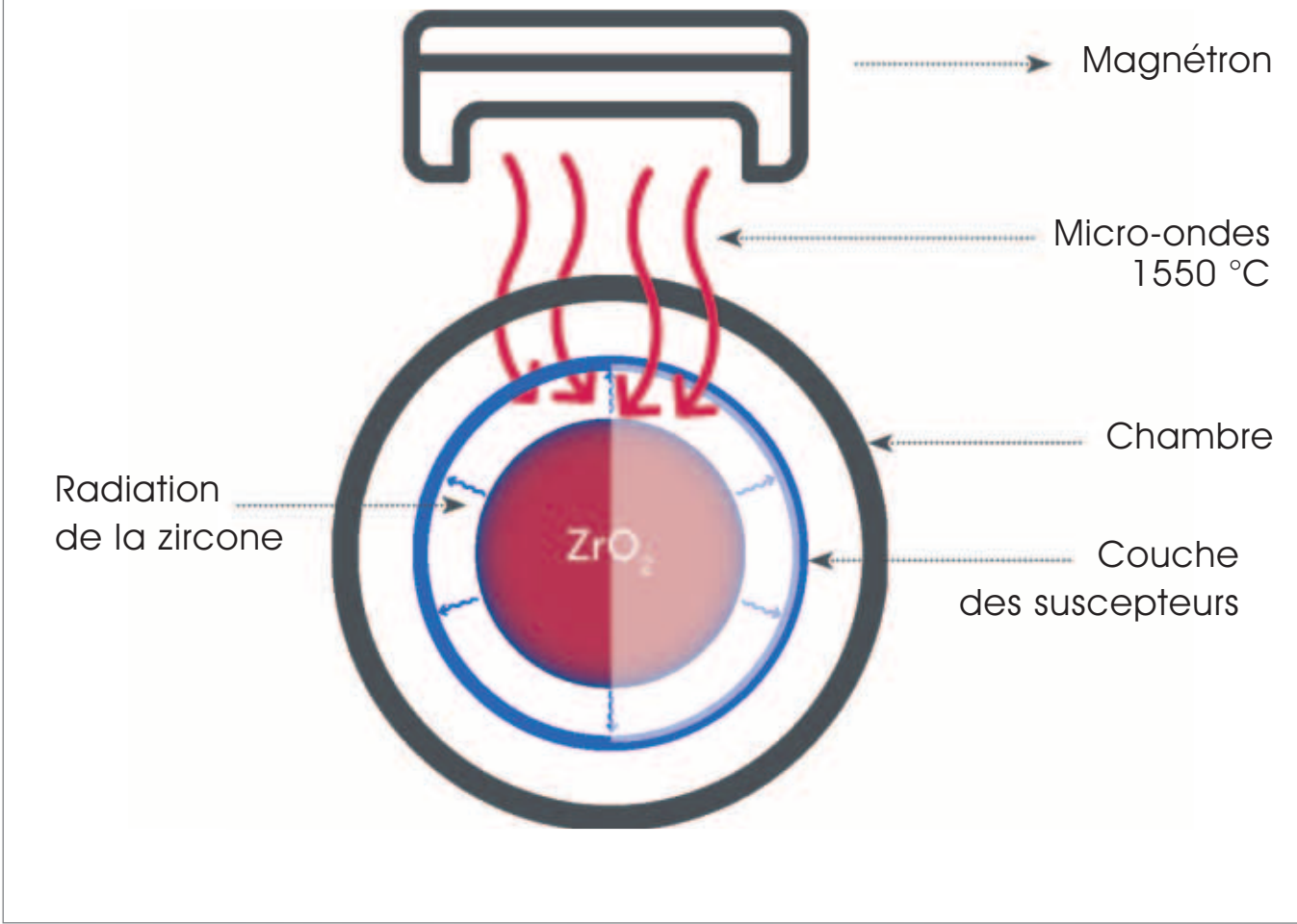
“ l'air entourant la pièce en zircone à fritter est chauffé, ce qui réduit la différence de température entre la zircone et l'air ”



● Graphique 7 : Les suscepteurs créent un effet de serre autour des pièces à sintériser.



● Graphique 8 : Les micro-ondes traversent les suscepteurs mais la chaleur dégagée est retenue par eux.



Cette chaleur produit deux effets positifs :

- Tout d'abord, l'air entourant la pièce en zircone à fritter est chauffé, ce qui réduit la différence de température entre la zircone et l'air. N'oublions pas que le frittage se fait en présence d'air et que l'air est transparent aux micro-ondes, donc il ne chauffe pas. S'il y a une grande différence de température entre l'air et le zirconium, des fissures pourraient se produire. Au début de la chauffe, lorsque les électrons libres du zirconium sont dans leur état d'agitation le plus bas, le rayonnement des suscepteurs aide à la vibration du binôme électrons libres / trous. Au fur et à mesure que la zircone gagne de l'énergie, cet effet est atténué.

- L'autre effet des suscepteurs est de protéger les composants du four des rayonnements émis par le zirconium lorsqu'il est à haute température (environ 1530°C).

Les suscepteurs étant des éléments qui ne subissent pas d'usure, leur durée est en principe illimitée. Cependant, il est recommandé de les remplacer périodiquement car ils peuvent subir des chocs et des frottements lors de la manipulation.

De plus, il peut exister une dégradation due à la contamination chimique et aux montées fréquentes à haute température.

Leur coût est toutefois raisonnable et équivaldrait à celui d'une résistance d'un four conventionnel.

“ le rayonnement des suscepteurs aide à la vibration du binôme électrons libres / trous au fur et à mesure que le zirconium gagne de l'énergie, cet effet est atténué. ”



En pratique

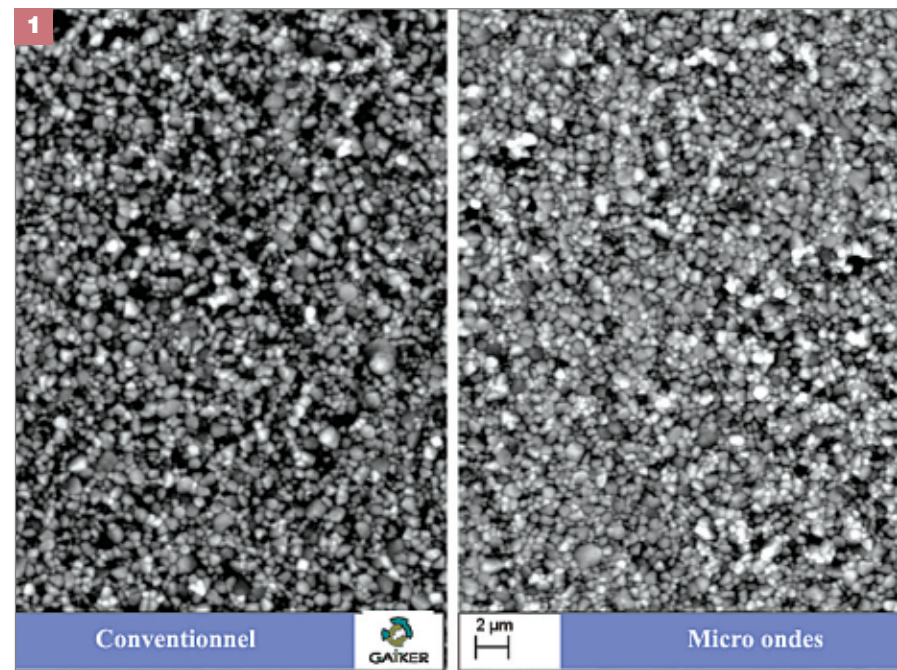
Après cet apport théorique dans la technologie de la sintérisation par micro-ondes, voici quelques illustrations qui montrent les possibilités et les performances offertes au prothésiste grâce à ce four.

FIABILITÉ ET PRÉCISION

Si l'on compare au microscope électronique deux pastilles de zircone sintérisées, l'une avec un four conventionnel et l'autre avec le four à micro-ondes Mestra, il en ressort une granulométrie légèrement plus fine avec la technologie au micro-ondes (photo 1).

Pour la réalisation d'un bridge complet sur barre implantaire, il ne sera pas nécessaire de réaliser un renfort de cuisson stabilisateur.

L'homogénéité de la sintérisation par micro-ondes évite les déformations



La granulométrie est légèrement plus fine avec les micro-ondes.

souvent dues au tirage qui survient en raison des différences de température pendant la sintérisation dans un four à résistances (photos 2 et 3).

L'absence de stabilisateur permettra également une économie de zircone. Comme on pourra le constater après

sintérisation, l'ajustage sur la barre usinée est idéal (photo 4).

Sur le plan de l'esthétique, ce procédé respecte totalement la teinte et la translucidité du matériau, comme on peut l'observer en sortie de sintérisation (photo 5).



Disque en sortie d'usage, pas besoin de préparer un renfort stabilisateur.

Pièce sintérisée sans renfort stabilisateur.



Ajustage idéal sur la barre usinée.



La teinte et la translucidité sont totalement fidèles après sintérisation.



Précision d'ajustage et esthétique après glaçage. Pièce monolithique.



Esthétique, précision et risque de microfissure quasi inexistant.



De même, après les opérations de glaçage, on obtient un résultat esthétique idéal, mais avec un excellent ajustage et un temps de sintérisation réduit de moitié (photos 6 et 7)

Nul doute que la technologie du micro-ondes représente l'avenir de la sintérisation de la Zircone dentaire.

Les ingénieurs
du Centre de Recherche et
Développement de Mestra
Bilbao Espagne
Traduction : Roger Sentis

Photos 2 à 7 réalisées par Jose Carlos Gomez Parrilla
Prothésiste à Lucena Espagne