

Etude magnétothermique d'un alliage à bas point de Curie en cuisson par induction

Alain DEMIER, Jérôme GIUSTI, Sébastien NAUDIN, Benjamin OVILLE, Pierre PERICHON, Frédéric PETIT, Thierry WAECKERLE, Thomas WERY

Centre de Recherche APERAM, Rue P. Chevenard, 58160 IMPHY

RESUME – Les nouveaux alliages FeNiCr Phytherm® permettent une régulation de température des récipients chauffés par induction, grâce l'approche du point de Curie. Cet article présente un important travail de caractérisation visant à mieux comprendre l'évolution magnétothermique de l'alliage à l'approche du point de Curie et son interaction avec l'inducteur.

Mots-clés—Alliage magnétique Fe-Ni, points de Curie, chauffage par induction, cuisson par induction, instrumentation .

1. INTRODUCTION

Le chauffage par induction magnétique est connu, décrit et modélisé depuis longtemps, appliqué à de nombreux domaines industriels ou domestiques tels que la fusion des métaux, la trempe superficielle ou la cuisson des aliments pour ne citer que les plus connus. C'est le terme $\sigma \cdot dB/dt$ (induction B, conductivité électrique σ) des équations de Maxwell qui est la source des phénomènes dissipatifs (d'énergie, de chaleur) : on en déduit qu'il faut être conducteur pour pouvoir dissiper de la chaleur sous l'effet d'un champ magnétique variable (dans le temps). En revanche point n'est besoin d'être (ferro)magnétique pour être la proie de courants induits importants : il suffit de rapprocher la dimension du matériau selon laquelle se produit le phénomène de diffusion ET l'épaisseur de peau la bien nommée. Ainsi à la fréquence minimale d'une plaque de cuisson par induction (20kHz) l'épaisseur de peau de l'aluminium (0,6mm) ne vaut que 4 fois celle de l'acier inox magnétique (Fe-17%Cr) qui garnit nombre de fonds de nos récipients ménagers compatibles avec l'induction. Ainsi il suffirait de quelques mm d'épaisseur d'aluminium (cas de beaucoup de poêles par exemple) et de champs magnétiques très forts ($B = \mu_0 H$ vaut seulement 0,1T pour un champ de 100 000A/m !) pour être apte à la cuisson par induction. Possible donc mais peu efficace. Aussi les inducteurs de cuisson sont-ils conçus pour ne reconnaître et accepter que les récipients à fond (ferro)magnétique. La perméabilité magnétique relative μ_r permet ainsi d'obtenir très vite des courants induits élevés dans le fond, pour des champs magnétiques raisonnables portant l'induction moyenne $\langle B \rangle$ dans l'épaisseur à plus de 1T avec un inox magnétique.

Ce décrochage de l'induction magnétique entre états ferro- et non ferro- magnétiques suggère que si les faibles pertes magnétiques générées dans l'état non magnétique P_{nm} (donc au dessus du point de Curie T_c) sont a minima évacuées par le récipient et l'environnement, et si les pertes magnétiques

ferromagnétiques P_{fm} ($T < T_c$) majoritaires sont aptes à chauffer les aliments à grande température, ALORS l'approche de T_c par le récipient doit voir baisser les pertes ferromagnétiques jusqu'à un niveau résiduel où elles sont évacuées avec P_{nm} par convection libre, jusqu'à un régime permanent thermique proche de T_c . On obtient ainsi une auto-régulation de température vers T_c et l'application de ce principe à la cuisson des aliments passe par des matériaux ayant un point de Curie dans le domaine de la cuisson alimentaire, soit $T < 300^\circ C$.

Cette idée d'autorégulation magnétothermique a plus de 50 ans dans son principe, mais est beaucoup plus récente dans son application car non seulement il faut mettre au point les alliages avec de tels T_c mais il faut aussi qu'ils soient compatibles en dilatation avec les autres matériaux, et en tenue à la corrosion avec les agressions culinaires. Ce challenge a été mené depuis près de 20 ans par Aperam [1-2], avec la mise au point des alliages Phytherm ($T_c < 270^\circ C$) pour permettre selon les alliages, aussi bien d'éviter l'inflammation de vapeurs d'huile, d'éviter de détériorer le revêtement antiadhésif, de stabiliser la température de cuisson à une valeur pré-établie (230-260°C : rissoler, saisir les viandes, crêpes... ; cuisson douce préservant les aliments à $< 200^\circ C$; cuisson basse température vers 100°C ; chauffage d'eau, lait, chocolat ...).

Pour autant, bien que ce concept ait été dument testé, reproduit et développé par nombre de fabricants de récipients alimentaires, on est encore loin d'avoir bien compris ce phénomène magnétothermique d'autorégulation, ne serait ce que parce qu'il dépend étroitement du couplage avec les inducteurs commerciaux et notamment de leur mode de commande (inconnu) différent d'un constructeur à l'autre. Comment évoluent ces alliages en champ, induction, température in situ dans un récipient ? Quel est le champ de surface vu par le matériau soumis aux différents échelons de puissance d'un inducteur ? Quel est le champ émis autour d'une plaque lors d'une cuisson ? Quelles sont les distributions de pertes magnétiques et de température dans un fond de récipient ? Telles sont les questions auxquelles nous avons commencé à répondre dans cet article par des mesures normalisées, par l'instrumentation dédiée de récipient ou encore par une modélisation magnétothermique spécifique.

2. COMPORTEMENT MAGNETIQUE DU PHYTHERM260

Les alliages austénitiques ferromagnétiques Fe-Ni-Cr à moins de 50%Ni disposent de point de Curie T_c variant

continument avec la composition entre <0°C et 500°C tandis que leur dilatibilité varie entre 20 et 300°C de 1 (Invar) à 10 ppm/°C et que leur tenue à la corrosion peut s'approcher de celle des aciers inoxydables modestes [3-4]. Le Phytherm 260 est l'un de ces alliages, de composition Fe-50%Ni-9%Cr et T_c ~ 280°C dans le cas de la coulée étudiée.

Les mesures des performances magnétiques de ce matériau sont menées selon la norme IEC 60404, avec une mesure fluxmétrique sur tore constitué de rondelles empilées : par inversion de courant au bobinage primaire et intégration numérique au secondaire pour les mesures en Courant Continu (CC), par intégration numérique des courant primaire et tension secondaire à différentes températures T, fréquences f, inductions moyennes dans l'épaisseur ep. pour les mesures de pertes magnétiques W(f,,ep.,T).

La courbe d'aimantation (assimilée ici à l'induction B, vues les très faibles valeurs de μ₀H) B(H) décroît progressivement (Fig.1) au fur et à mesure que la température T se rapproche de T_c, et d'autant plus que T est proche de T_c. On notera par ailleurs que les perméabilités de ces matériaux sont élevées (μ de l'ordre de 20 000) ce qui favorise potentiellement la genèse des courants induits (source de chaleur) et le couplage entre fond magnétique et inducteur, pour peu que ces propriétés soient conservées une fois le matériau inséré dans le récipient.

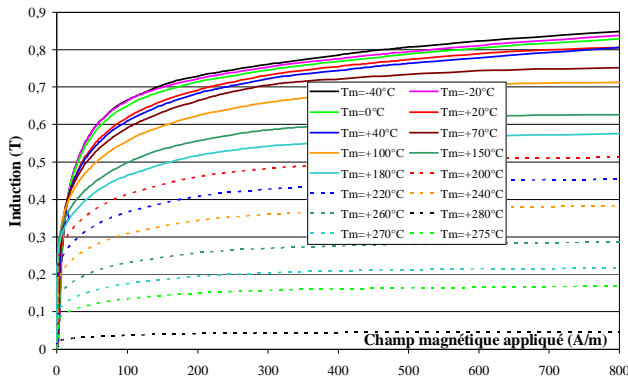


Fig.1 Courbes B(H) en courant continu et en fonction de la température de mesure du Phytherm260 - ép. 0.6mm - recuit à 1050°C.

En bonnes à très bonnes approximations les valeurs B(800A/m) sont très proches de la saturation magnétique J_s de l'alliage, et considérées comme telle. Dans le cas de matériaux au comportement ferromagnétique-type (Fer par exemple) la polarisation à saturation J_s(T) – assimilée ici à B(800A/m) – s'exprime par $J_s(T)/J_s^{0°K} = 1 - (T/T_c)^q$ où q peut être proche de 2. L'exploitation des mesures (Fig.2) du Phytherm260 montre une tangente non verticale en T_c (ferromagnétisme imparfait)

obéissant à la loi :
$$\frac{J_s(T)}{J_s^{0°K}} = a \cdot \left(1 - \left[\frac{T}{T_c} \right]^2 \right)^{0,5} \quad (1) \text{ avec } a=0,89$$

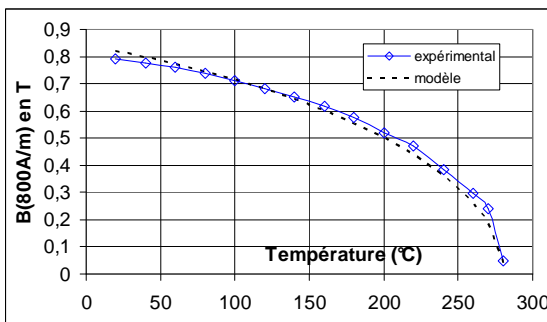


Fig.2 : Courbes B(800A/m) CC en fonction de la température de mesure du Phytherm260 - ép. 0.6mm - recuit à 1050°C.

La mesure des pertes magnétiques moyenne fréquence montre peut de différence avec la température, de sorte que indépendamment de celle-ci les pertes massiques W_m peuvent s'exprimer avec assez de précision (<20% lorsque f ≥ 5kHz) en fonction de f et B sous la forme d'une loi de Steinmetz :

$$W_m (W/m^3) = k \cdot f^p \cdot B^n \text{ avec } p=1,68 ; n=2 ; k = 1,27 \cdot 10^{-14} \quad (2)$$

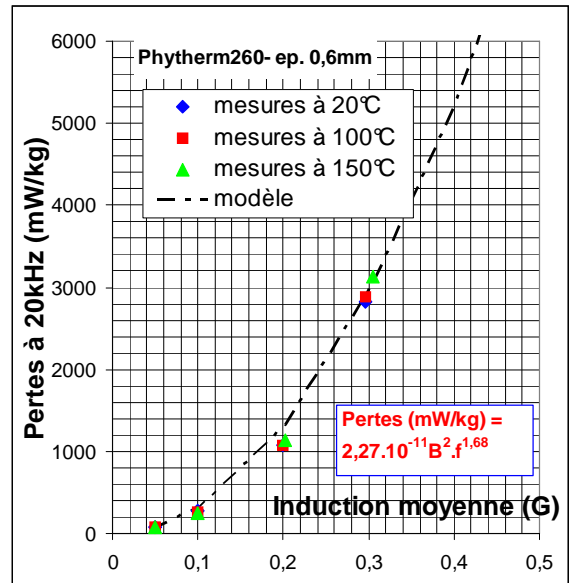


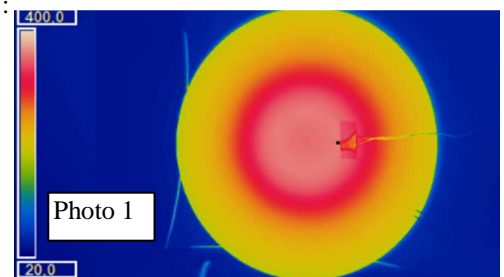
Fig.3 : Pertes magnétiques massiques du Phytherm260 en fonction de l'induction moyenne dans l'épaisseur

Le coefficient k varie de plusieurs ordre de grandeur selon que matériau est écroui, « adouci » (recristallisation primaire plus ou moins complète) ou fortement recuit (croissance de grain poussée). La plage de fréquence fondamentale est réduite dans les inducteurs du commerce : de 20 à 70kHz pour l'ensemble, mais chaque inducteur varie bien moins selon sa conception. L'induction magnétique de travail B(H,T) est donc la principale grandeur qui contrôle les pertes magnétiques et donc la cuisson des aliments : la qualité des matériaux magnétiques et de leur intégration dans les récipients, la qualité du couplage entre inducteur et induit, la géométrie du récipient relativement au foyer de l'inducteur sont autant d'éléments fortement influents sur la performance de la cuisson.

3. MESURES INSTRUMENTEES DE RECIPIENT

Il est aisé de mesurer les performances magnétiques d'un échantillon torique dans une étuve tandis qu'il est beaucoup moins simple de connaître le régime magnétothermique d'un récipient soumis à un inducteur. Nous avons mesuré les grandeurs suivantes :

- la distribution de température transitoire puis permanente du dessus du récipient (casserole) par une caméra thermique de précision (photo 1 ci-contre)
- la température de dessous le fond magnétique du récipient, par thermocouple (TC) soudé
- la déformation en altitude du dessus de la casserole, par un comparateur placé au centre



- la mesure du champ magnétique appliqué $H_a=H(z=0)$ à la surface SOUS le fond magnétique, de préférence à mi-rayon du fond, par des bobines extraplates bobinées en fil fin autour d'un support mince (Photo ci-dessous). Ces bobines de H_a extraplates sont étalonnées (section équivalente) dans des bobines de Helmholtz, et peuvent être placées à différents endroits r sur le rayon R du fond (Fig.4), pour la mesure de $H(0,r,t)$.

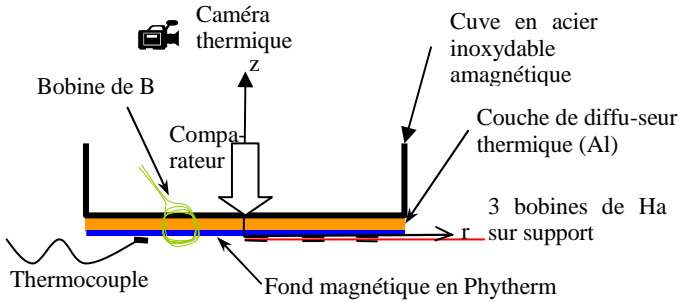
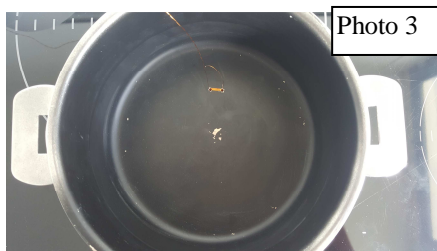


Figure 4 : schéma d'instrumentation magnétothermique et déformation des récipients de cuisson, chauffé par induction magnétique.

- la mesure du champ magnétique émis autour du récipient, par un mesureur (champ-mètre) adapté
 - la mesure d'induction magnétique moyenne $\langle B \rangle(t)$ dans l'épaisseur du fond magnétique, par des bobines réalisées via des perçages traversant la cuve du récipient, placés sur un même cercle circonscrit dans le récipient (figure ci-dessous). Cette mesure est souvent faite à mi-rayon, lieu de la plus forte concentration de champ magnétique, et donc d'induction, de pertes et de chaleur comme l'illustre l'anneau rouge de la photo 1. Cette mesure est faite de façon synchrone avec la mesure de champ appliqué (la bobine plate de H_a) et pour des lieux (z,r) équivalents de mesure.



L'acquisition temporelle est réalisée à une fréquence de 500kHz et permet de visualiser les tensions générées aux bornes des bobines de H_a et de B (Figure 5) : des trains d'impulsion de courant de l'inducteur sont émis avec une fréquence de 100Hz environ et chacun de ces « trains » est composé de signaux périodiques d'une fréquence de 50µsec (20kHz) dont le maximum évolue de façon grossièrement sinusoïdal à l'intérieur du « train » (Figures 5 et 6). On constate (Figure 6) que chaque signal périodique est loin d'être sinusoïdal, ce qui va générer des pertes harmoniques et d'excès supérieures à celles qu'on peut avoir en onde B-sinus 20kHz.

La construction numérique des cycles d'hystérésis dynamiques (Figure 7) témoigne effectivement qu'on ait assez loin des cycles d'hystérésis dynamiques conventionnels en $\langle B \rangle$ -sinus (type ellipseïde).

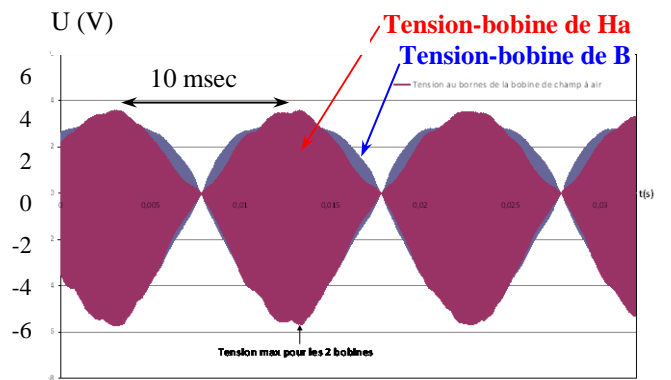


Figure 5 : Tensions aux bornes des bobines de H_a et de B , respectivement SOUS et AU TRAVERS du fond de Phytherm : train d'impulsion

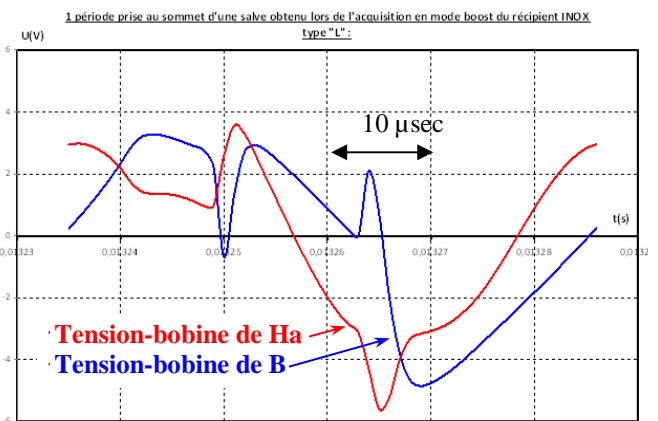


Figure 6 : Tensions aux bornes des bobines de H_a et de B , respectivement SOUS et AU TRAVERS du fond de Phytherm : ondes périodiques élémentaires.

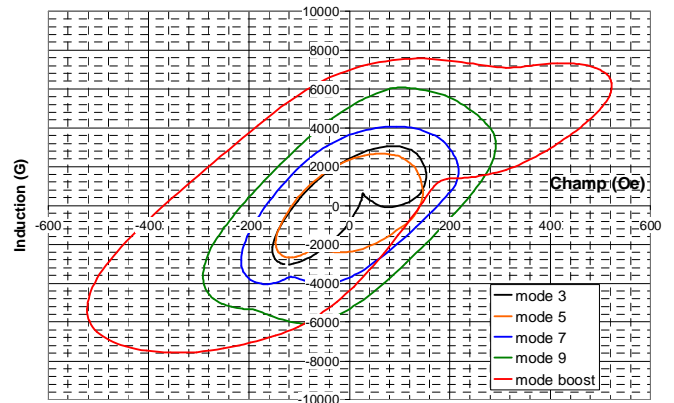


Figure 7 : Cycles d'hystérésis $\langle B \rangle(H_a)$ sur onde périodique d'amplitude maximum, à mi-rayon du fond, pour différents « modes », c'est à dire appels de puissance commandé à l'inducteur.

Pour la puissance appelée P_{ap} la plus forte (booster), on voit que le champ appliqué par l'inducteur à mi-rayon du fond de récipient peut amener l'induction moyenne $\langle B \rangle$ dans l'épaisseur de environ 7000-7500G à 20kHz soit environ 80-85% de l'aimantation à saturation du Phytherm (8600G). Hors si on se base sur les mesures normalisées (partie 2) et qu'on exploite les données de la Figure 1, il vient par exemple que la perméabilité relative max μ_{maxCC} à 20°C est de 38000, atteignant 160 000 à 150°C, ce qui correspond à des épaisseurs de peau de respectivement 17 et 8 µm, pour une épaisseur de fond Phytherm de 0,6mm (600µm) : on s'attendrait donc selon le modèle « boîte » de l'épaisseur de peau δ ($J=J_s$ si $0 < z < \delta$, 0 au delà) à une induction moyenne $\langle B \rangle$ de l'ordre de $(\delta/Ep) \cdot J_s = 120$ à 250G $\ll J_s$ et donc très loin des valeurs de $\langle B \rangle$

constatées expérimentalement (Figure 7), 30 à 40 fois plus élevées !

Il apparaît utile de mesurer les performances magnétiques du Phytherm tel qu'il est, inséré dans le récipient de cuisson : différentes rondelles prélevées en cours de production du Phytherm, et d'autres découpées dans le récipient (donc en multicouche Phytherm+Alu+inox amagnétique) sont mesurées en CC (tableau 1) pour une épaisseur de 0,6mm et comparé à l'inox F17 utilisé couramment pour les fonds magnétiques de récipient.

Matériau	Etat métallurgique/recuit	$\mu_{max,r}^{CC}$	B(2400A/m) en T
Phytherm260	écroui	490	0,625
Phytherm260	Adouci	1020	0,73
Phytherm260	800°C-1h	2100	0,847
Phytherm260	1100°C/4h	40500	0,875
Phytherm260	Adouci, dans récipient	730	0,656
Inox F17	Adouci	380	0,939
Inox F17	Adouci, dans récipient	340	0,85

Tableau 1 : caractéristiques du Phytherm260 sur rondelles prélevées dans différents états métallurgiques, avant ou après insertion du matériau dans un récipient pour cuisson.

Il apparaît clairement que la valeur de $\mu_{max,r}^{CC}$ utile (dans le récipient) n'est pas de 40 000 comme supposé, mais de l'ordre de 700 pour un Phytherm, 300 pour un inox magnétique, soit des valeurs d'épaisseur de peau δ et $(\delta/Ep).J_s$ de respectivement 0,125mm et 0,18T pour le Phytherm, 0,15mm et 0,214T pour l'inox F17. Comparé à 0,7T de $\langle B \rangle$ -max de mesure, il y a encore un rapport de 3 à 4 qui devra être expliqué dans les travaux futurs. On retiendra qu'il est indispensable de tenir compte de la perméabilité réelle du matériau dans le récipient final, celle-ci pouvant perdre 1 à 2 ordres de grandeurs par les différentes opérations industrielles non optimisées vis à vis de μ . On notera aussi que le passage du dernier « mode » « normal » au mode Booster fait doubler le champ appliqué H_a pour atteindre des niveaux de l'ordre de 500 Oe, soit 0,05T d'incrément d'induction mesurée par le simple fait de la source de champ.

L'inducteur peut ainsi atteindre des émissions de champ élevé, et il devient important de connaître le niveau de H émis au voisinage, voire trouver des solutions pour l'atténuer. La

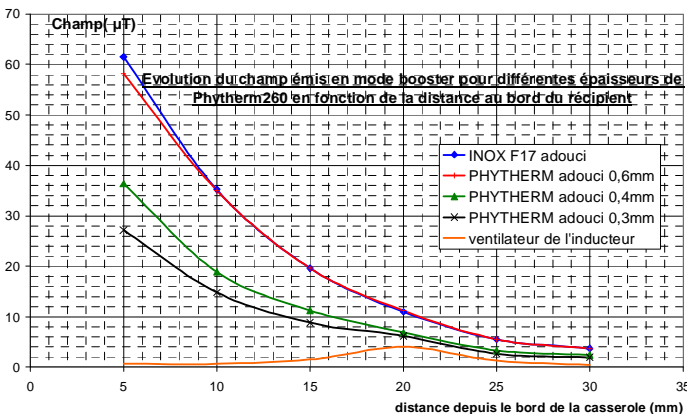


Figure 8 : Champ magnétique émis par un inducteur dans le plan du fond de récipient (z=0), en fonction de la distance à partir du bord de récipient, dans le cas de différentes casseroles à fond en inox F17 ou en Phytherm260 de différentes épaisseurs.

figure 8 en donne une idée grâce au mesureur de champ. La réduction d'épaisseur de 0,6 à 0,3mm apparaît comme une voie efficace de réduction du champ émis, à l'instar de son effet sur la réduction des courants induits et du facteur ep/δ qui doit être

le plus faible possible. De façon attendue le champ émis décroît significativement avec l'éloignement du récipient (en $1/r^2$) et peut être perturbé à certaine distance par le simple champ émis par le ventilateur de l'inducteur.

Les normes européennes NF EN 61000-6-x propose différents seuils d'immunité minimum vis à vis du champ magnétique émis : 3,77µT à 50Hz en environnement résidentiel et 37,7µT en environnement industriel, 126µT entre 100kHz et 1MHz dans le cas de champs oscillatoires amortis, 1mT jusqu'à 150kHz dans le cas de stimulateurs cardiaques implantés et enfin 188µT dans le cas de dispositifs médicaux implantables actifs. Ainsi avec au plus 60µT à 20kHz à 5cm du bord du récipient, la cuisson par induction – dans ces 2 cas de matériau – ne semble pas pouvoir interférer avec la santé publique.

L'exploitation des essais instrumentés sur Booster – tel que ceux de la Figure 7 – montrent qu'à différentes températures l'induction moyenne $\langle B \rangle$ mesurée à mi-rayon atteint au plus 80% de la valeur à saturation J_s . Compte tenu de la décroissance de $J_s(T)$ (cf Figure 2 et eq.1), les pertes magnétiques du fond de récipient en alliage Phytherm260 décroissent très fortement (Figure 2) vers 0 lorsque T se rapproche de T_c , permettant ainsi le phénomène d'autorégulation de température vers T_c (Figure 9) : ceci a été calculé en imposant arbitrairement que le niveau d'induction moyen $\langle B \rangle(0,R/2,t)$ restait égal à 80%. $J_s(T)$ dans toute la plage transitoire de température $[20^\circ C - T_c]$. En réalité le niveau de $\langle B \rangle$ constaté est au plus 0,8. J_s et dépend en réalité du champ appliqué H_a vu par le matériau, donc dépend de la zone « r » du fond, du « mode » de cuisson (c'est Booster pour atteindre les champs H_a les plus élevés) et principalement de l'épaisseur de peau δ du matériau. Ce qui est donc calculé à 0,8. J_s est donc les pertes magnétiques/la puissance calorifique développée la plus élevée accessible à 20kHz.

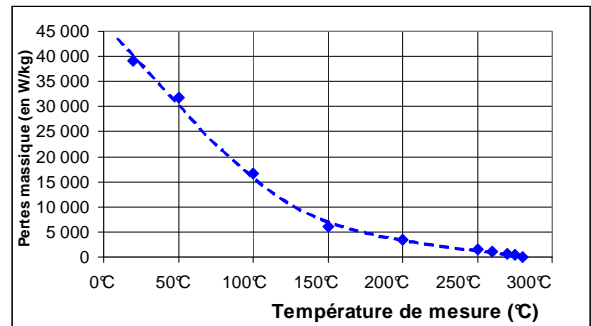


Figure 9 : Evolution calculée des pertes magnétiques dans un Fond de Phytherm260 au cours de la chauffe jusqu'au point de Curie, en astreignant l'induction moyenne $\langle B \rangle(R/2,0,t)$ à égalé 80%. $J_s(T)$.

Pourtant un point important a encore été oublié : **la symétrie du champ magnétique H_a** . LE comportement et la loi de Steinmetz des pertes magnétiques illustrées en Figure 3 ont été obtenues par mesures fluxmétrique sur rondelles empilées entourées classiquement d'un bobinage primaire et d'un secondaire. Le champ est donc appliqué symétriquement sur les 2 faces de chaque rondelle et il en découle une loi des pertes (Fig.3) $W_1 = k_1 \cdot f_p^2 \cdot \langle B \rangle^2$ sous champ symétrique $H_{a,sym}$. On suppose alors qu'à 20kHz : $\delta \ll ep$. et donc les profils de diffusion de $H(z)$ et $B(z)$ issus de chaque face ont très peu d'influence l'un sur l'autre. On sépare alors le matériau en 2 demi-matériau d'épaisseur $Ep/2$ (Figure 10) : il reste la diffusion magnétique et les courants induits correspondant que de l'une des 2 faces, mais aussi que la moitié du matériau, donc la densité massique des pertes (en W/kg) reste identique à W_1 à $\langle B \rangle$ donné pour chaque demi-matériau, et de plus chacun des 2 cas générés devient un cas à champ asymétrique $H_{a,asym}$, de pertes

$W_1(\langle B \rangle)$ et cela nécessite grossièrement le même champ périodique sur chaque face (ici $H_{a,sym} = H_{a,asym}$).

Si ce même champ $H_{a,asym}$ est appliqué à cette fois toute l'épaisseur Ep et comme $\delta \ll ep$, alors les pertes du cas précédent se répartissent sur un volume 2 fois plus grand, et donc la densité de pertes magnétiques devient dans ce cas (en rouge sur Fig.10) $W_1/2$ (en W/kg) tandis que $\langle B \rangle$ est calculé sur le profil $B(z,t)$ prolongé vers de très basses valeurs dans la zone rajoutée, opposée à $H_{a,asym}$, passant donc de $\langle B \rangle$ à $\langle B \rangle/2$.

Il en résulte qu'on est parti d'un matériau d'épaisseur Ep se comportant sous $H_{a,sym}$ selon $W = k_1 f^p \langle B \rangle^2$ et sous $H_{a,asym}$ selon une autre loi de Steinmetz du type $W_2 = k_2 f^p \langle B \rangle^2$ (il n'y a pas lieu de changer les exposant de la fréquence f et de l'induction $\langle B \rangle$ puisque c'est le même matériau soumis au même type d'onde électromagnétique) et nous venons de montrer que $W_2 = W_1/2$. On en déduit que :

$$k_2 (\langle B \rangle/2)^2 = W_1/2 = k_1 \langle B \rangle^2/2 \quad \text{d'où } k_2 = 2 \cdot k_1$$

On en conclut qu'à $\langle B \rangle$ donné, on dissipera 2 fois plus de pertes (par kg) sous $H_{a,asym}$ par rapport au cas $H_{a,sym}$. La Figure 9 ayant été calculé en imposant $\langle B \rangle(T) = 80\% Js(T)$ sous $H_{a,sym}$ c'est donc une densité de pertes magnétiques 2 fois plus élevée qui sera induite par les courants de Foucault sous $H_{a,asym}$.

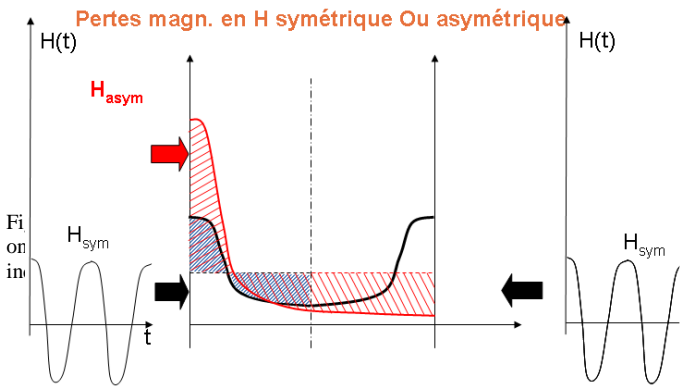


Figure 10 : représentation schématique des profils de diffusion de $H(z)$ à un instant donnée pour des champs magnétiques appliqués symétrique ou asymétrique.

4. MODELISATION MAGNETOTHERMIQUE

En restant dans une approche phénoménologique des phénomènes, délaissant les descriptions perfectionnées et précises des codes de calcul magnétothermique (utiles dans un second temps après une bonne évaluation des mécanismes mis en jeu), nous proposons ici d'évaluer grossièrement le transitoire thermique lié à l'utilisation du Phytherm260.

L'équation de la chaleur est définie ici selon la direction axiale « z » du fond : $k \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} + \sigma = \rho \cdot c \cdot \frac{\delta T}{\delta t}$ c'est à dire qu'on néglige les effets de bord et la dissipation thermique des parois du récipient. Vis à vis des 20'' à 2min que prennent les phénomènes modélisés, le temps de diffusion de l'onde thermique dans les matériaux et même dans l'eau est négligeable, et donc $dT/dx \approx 0$ dans ces matières condensées. On en profite pour prendre en compte l'échauffement de l'aluminium, de l'inox amagnétique du récipient côté aliment, et même l'eau à chauffer, en définissant la chaleur massique cm par une moyenne des cm respectives pondérées des épaisseurs respectives, et aussi en répartissant la dissipation de source volumique s de chaleur (pertes magnétiques) entre les différentes matières condensées considérées. Le système est considéré comme adiabatique (pas de dissipation thermique).

Partant des équations (1) et (2) ainsi que de l'éq. De la chaleur simplifiée précédemment, il vient simplement :

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\delta T}{\delta t} = 2 \cdot k_1 \cdot f^p \cdot \left(\frac{J_s^{0^\circ K}}{a} \right)^2 \cdot \rho \cdot \left[\frac{T_c^2 - T^2}{T_c^2} \right] \quad (3)$$

Et en intégrant pour $t < T_c$:

$$t = \frac{a^2 \cdot c_m \cdot T_c}{4k_1 \cdot f^p \cdot (J_s^{0^\circ K})^2} \cdot \ln \left(\frac{T_c + T}{T_c - T} \right) \quad \text{ce qui peut s'inverser}$$

$$\text{en : } T = T_c \cdot \frac{\exp\left(\frac{t}{\alpha}\right) - 1}{\exp\left(\frac{t}{\alpha}\right) + 1} \quad \text{avec } \alpha = \frac{a^2 \cdot c_m \cdot T_c}{4k_1 \cdot f^p \cdot (J_s^{0^\circ K})^2}$$

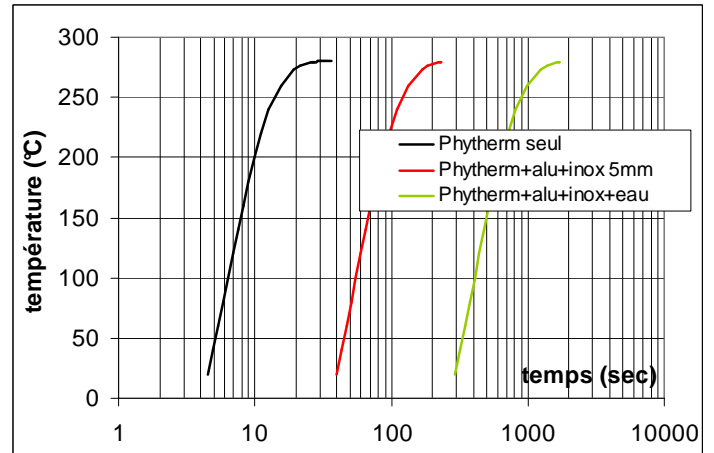


Figure 11 : cinétique de chauffe adiabatique 1D, à homogénéisation thermique immédiate, dans le cas d'un fond en Phytherm seul (noir), de ce fond surmonté d'aluminium et d'inox amagnétique (rouge), de ces 3 éléments chauffant 1 litre d'eau.

Le calcul a ici été appliqué à un récipient de diamètre 20cm, constitué d'une cuve en inox austénitique (amagnétique) d'ép. 0,6mm contenant 1 litre d'eau (32mm de hauteur d'eau), surmontant un fond constitué d'un disque de 0,6mm de Phytherm260 ($T_c = 280,5^\circ C$) et d'un disque d'aluminium de 4mm d'ép., et considérant les chaleurs massiques de chacune de ces matières. Le calcul est mené dans le cas du disque de Phytherm seul, du disque tri-matériau Phytherm/aluminium/inox seul ou de la casserole contenant 1l d'eau. Les résultats du calcul sont assez proches de ce qui peut être observé dans la réalité : 10-20sec pour approcher le Phytherm de son point de Curie, passant à 1min. environ si le récipient est vide (cas Phytherm+alu+inox) puis 4-5min si on veut faire bouillir 1 litre d'eau (Figure 11).

5. CONCLUSIONS

Dans le prolongement du développement industriel innovant d'alliages à bas point de Curie (PHYTHERM) permettant l'autorégulation en température du fond de récipient chauffé par induction, les premiers travaux de caractérisations magnétothermiques in situ ou normalisée ont permis de beaucoup mieux approcher l'évolution du champ, des pertes locales et de l'induction moyenne qui s'établissent à différents endroits d'un récipient en fonction de la puissance injectée. Des premières modélisations thermiques dédiées permettent de rendre cohérentes les mesures de pertes magnétiques réparties et la dynamique d'élévation de température.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans la collaboration et la réalisation de récipients à base de Phytherm260 de la société CRISTEL que nous tenons à remercier vivement.

7. REFERENCES

- [1] P. Chevenard, **Rev. Métallurgie 25 (1928) p 14**
- [2] R. M. Bozorth, "*Ferromagnetism*" **p 146 Ed Van Nostrand - 1951**
- [3] T. Waeckerlé and H. Fraisse, "New alloys for induction heated cookware with self regulated T^{rc} – **J.M.M.M. 304 (2006) 304, p844**
- [4] T. Waeckerlé et al, New alloys and multilayer configuration of them to get self regulated temperature cookware (SRTC) in induction heating, **proc. of HES conf. (Heating by Electromagnetic Sources) 23-26 June 2004, Padua, Italy**, organized by IEEE/UIE/AE.