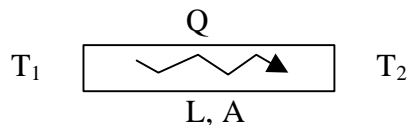


Les propriétés thermiques des matériaux.

Les propriétés thermiques regroupent les paramètres caractérisant le comportement des matériaux vis-à-vis de la chaleur, qui est la principale forme d'énergie dans la nature. Il existe des lois physiques régissant ce comportement et qui sont appelées les équations de la chaleur.

La conduction :

c'est le mode de transfert de chaleur dans un solide. La première équation de la chaleur permet de calculer le flux de chaleur qui traverse un solide dont la température n'est pas constante. Un exemple simple est celui d'un barreau de longueur L et de section A dont on chauffe une extrémité à une température T_1 supérieure au reste du barreau qui est à température T_2 .



Naturellement, la température va s'homogénéiser par l'apparition d'un flux de chaleur Q de la zone chaude vers la zone froide. L'équation du flux de chaleur constitue la

première équation de la chaleur : $Q = k A \frac{T_1 - T_2}{L}$

Le paramètre de proportionnalité k est la **conductivité** thermique du matériau qui s'exprime en $W/m.K$. Cette propriété thermique représente la vitesse à laquelle la température s'uniformise dans le barreau. On peut classer les matériaux en deux grandes catégories vis-à-vis de la conduction de chaleur : les conducteurs et les isolants. La plupart des métaux (acier, cuivre, aluminium, or, argent, ...) sont des conducteurs et cette propriété est utilisée dans des systèmes thermiques : échangeurs de chaleur (par exemple les tubes de chaudière) ou systèmes de refroidissement (par exemple les ailettes sur un microprocesseur). A l'inverse, les matériaux céramiques (brique, verre, porcelaine, ...) sont généralement isolants et leurs propriétés sont utilisées pour empêcher les déperditions d'énergie : isolation des maisons ou des systèmes de production d'énergie (par exemple dans les grosses chaudières ou les fours industriels, ...). Enfin, les matériaux polymères ou plastiques peuvent être au choix conducteurs ou isolants.

La première équation de la chaleur nous permet de calculer le flux de chaleur généré dans un barreau sous l'effet d'une différence de température. Ce dont les ingénieurs ont besoin, c'est de connaître la température de barreau en tout point et à chaque instant. L'évolution au cours du temps de la température d'un solide est donné par la

deuxième équation de la chaleur : $\rho c \frac{\Delta T}{\Delta t} = k \frac{d^2 T}{dx^2}$

qui fait intervenir la **conductivité**, la **masse spécifique ρ** et la **capacité calorifique c** . La masse spécifique représente la masse du matériau par unité de volume et elle s'exprime en kg/m^3 . La capacité calorifique représente la quantité de chaleur à fournir à 1 kg de matière pour élever sa température de 1 K; elle s'exprime en $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

La convection :

c'est le mode de transfert de chaleur par un fluide. Lorsqu'un fluide de température T_1 est placé en contact avec une surface S de température T_2 , il se crée un flux de chaleur de la zone chaude vers la zone froide qui est donné par la

troisième équation de la chaleur : $Q = h S (T_1 - T_2)$

qui fait intervenir la **conductance d'interface** entre le fluide et la paroi; celle-ci représente la puissance thermique échangée par unité de surface et par degré de température de différence et s'exprime en $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$. La conductance d'interface dépend principalement des propriétés du fluide.

Le rayonnement :

ce mode de transfert n'utilise aucun milieu matériel. C'est de cette façon que la chaleur émise par le soleil arrive jusqu'à nous à travers le vide spatial. Il s'agit de l'émission d'un rayonnement de longueur d'onde variable, qui peut parfois se marquer dans le visible : quand un objet est chauffé au rouge, c'est qu'il rayonne dans la longueur d'onde du rouge ($\sim 600 \text{ nm}$). Quelle que soit leur température, tous les corps émettent un rayonnement plus ou moins intense. La loi de *Stefan-Boltzmann* donne l'intensité du rayonnement en fonction de la température absolue T du corps :

Quatrième équation de la chaleur : $M = \epsilon \sigma T^4$ σ : constante de Stefan,

qui fait intervenir l'**émissivité** du corps. Cette propriété de la surface d'un corps exprime la capacité à absorber et à émettre de l'énergie. Plus une surface est noire et mate plus son émissivité est élevée. A l'inverse, une surface brillante et réfléchissante aura une faible émissivité et un coefficient de réflexion élevé.

Mesure des propriétés thermiques

La masse volumique :

Cette propriété ne se mesure pas directement, car elle fait intervenir deux mesures directes élémentaires : une mesure de poids et une mesure de longueur. Dans la pratique, on utilisera deux instruments différents : une **thermobalance** et un **dilatомètre**.

La thermobalance consiste à mesurer la variation de la masse d'un échantillon en fonction de la température; on parle alors de thermogravimétrie ou TG. En théorie, il doit y avoir conservation de la masse pour autant que l'échantillon soit dans une atmosphère chimiquement neutre.

Le dilatomètre mesure l'allongement de l'échantillon en fonction de la température. Cet allongement provient de l'éloignement des atomes les uns par rapport aux autres sous l'effet de la température. A partir de la dilatation dans une direction, il est possible de déterminer la dilatation volumique.

Lorsque l'évolution de la masse et du volume est connue, il suffit de diviser l'une par l'autre pour obtenir l'évolution de la masse volumique. La figure 1 montre le principe d'un dilatomètre.

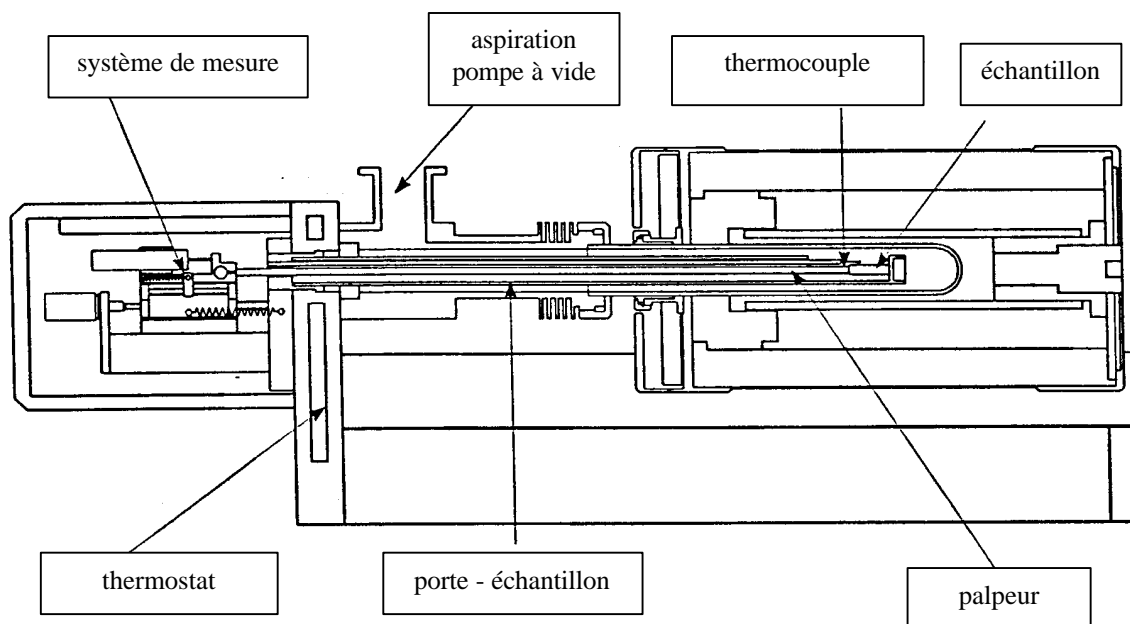


Figure 1 : principe du dilatomètre

La capacité calorifique :

Cette propriété se mesure directement à l'aide d'un **calorimètre**. Celui-ci enregistre toutes les variations d'énergie d'un échantillon par rapport à une référence connue; on parle alors de calorimétrie différentielle par balayage de température ou DSC (**Differential Scanning Calorimetry** en anglais). Elles peuvent être endo-énergétiques lorsque l'échantillon reçoit de la chaleur ou exo-énergétique lorsqu'il en cède.

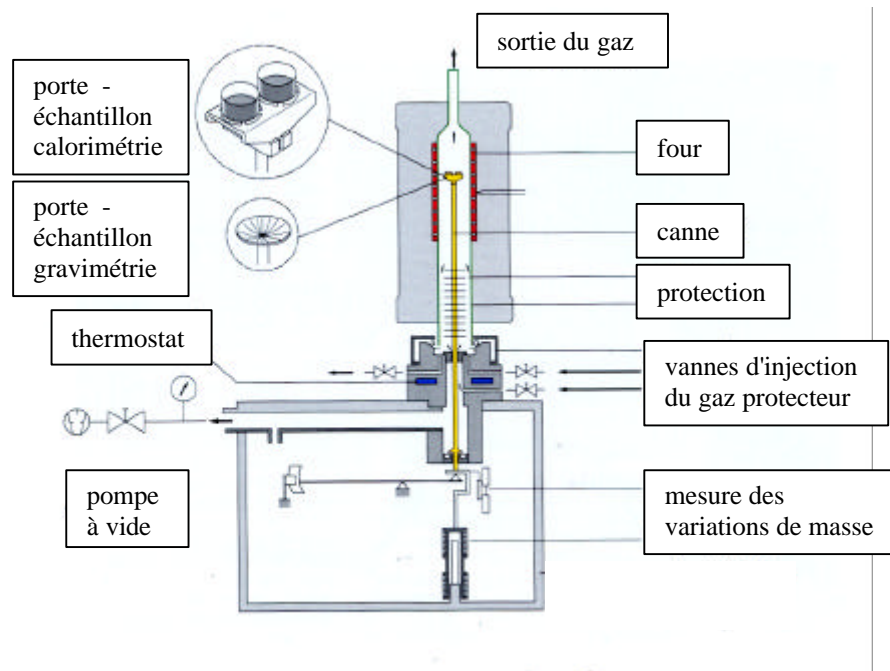


Figure 2 : principe du calorimètre

La figure 2 montre le schéma de principe du calorimètre : il est constitué d'un four tubulaire en graphite pouvant chauffer jusqu'à 1650 °C dans lequel une canne supportant l'échantillon et la référence est introduite. Le porte-échantillon est constitué par deux thermocouples enregistrant la température de l'échantillon et la référence. Par un traitement mathématique, un logiciel calcule les énergies émises ou absorbées par l'échantillon en comparant avec la référence et en se basant sur un calibrage préalable.

Le même appareil permet également de réaliser la thermogravimétrie simultanément.

La conductivité thermique :

Cette propriété est difficilement accessible directement. On mesurera plutôt la **diffusivité thermique** qui représente la capacité d'un échantillon à transmettre la chaleur plutôt qu'à l'absorber. La diffusivité s'exprime comme le rapport de la conductivité par le produit de la masse volumique et de la capacité calorifique :

$$\alpha = \frac{k}{\rho c}$$

Après avoir mesuré la masse volumique, la capacité calorifique et la diffusivité, on peut calculer la conductivité. La diffusivité peut se mesurer à l'aide d'un **diffusimètre** par la méthode du "laser flash". Cette méthode consiste à envoyer sur une face d'un échantillon d'épaisseur connue une impulsion laser de grande intensité (quelques centaines de Volt) mais pendant un temps très court (de l'ordre de la milliseconde). Ensuite, on enregistre sur l'autre face l'évolution de la température. La diffusivité est inversement proportionnelle au temps mis par l'impulsion de chaleur pour traverser l'échantillon.

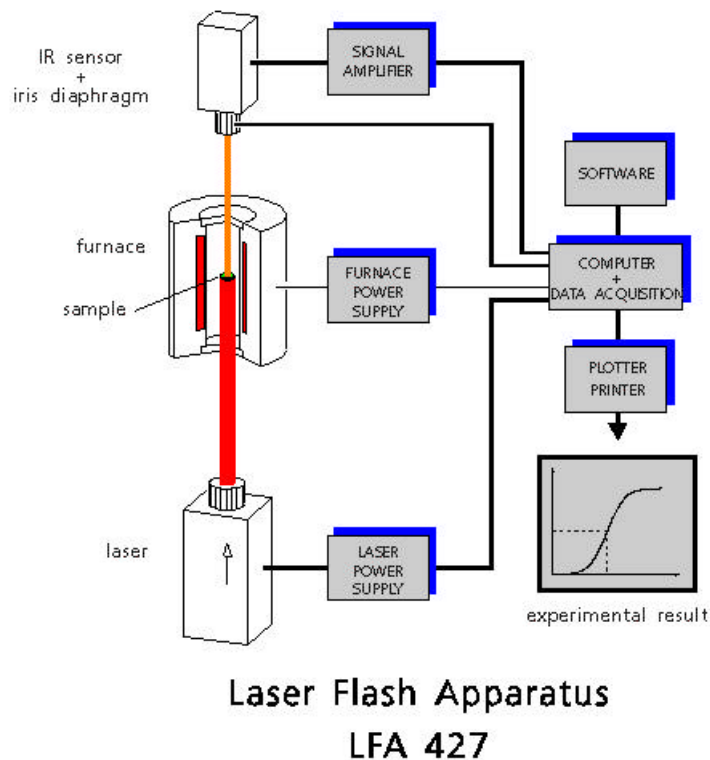


figure 3 : principe de la mesure de diffusivité par la méthode du laser flash

L'émissivité :

Par définition, l'émissivité d'un corps se mesure en comparant le rayonnement émis par l'échantillon à celui émis par un corps noir à la même température. Le corps noir est un corps idéal qui absorbe tout rayonnement et n'en réfléchit aucun. Cette comparaison se réalise à l'aide d'un **radiomètre**, qui est l'instrument permettant de mesurer un rayonnement. Si ce rayonnement est enregistré dans la gamme infrarouge (0.8 à 20 μm), on parle de radiomètre infrarouge. Ce radiomètre peut enregistrer le rayonnement suivant une trame déterminée et restituer une image de la scène thermique; on parle alors d'**imageur thermique** (caméra) infrarouge. Enfin, connaissant le rayonnement émis, on peut déterminer la température absolue de la surface; on parle alors de **thermographie** infrarouge.

Utilisation des propriétés thermiques.

Une fois les propriétés thermiques des matériaux connues, l'ingénieur va pouvoir modéliser le comportement de ce matériau dans toutes les situations. Cela va de la mise à forme du matériau à haute température à son comportement lors de l'utilisation à haute température.

Mise à forme des matériaux

La mise à forme est l'étape la plus importante dans l'élaboration du matériau. En effet, c'est généralement la dernière étape avant la mise en service. Aussi, doit-elle être convenablement réalisée pour garantir les propriétés de fonctionnement requises par la conception. Pour s'en assurer, on modélise le procédé et on réalise des essais permettant de valider le modèle.

Emploi des matériaux

Dans la majorité des procédés industriels, l'énergie joue un rôle primordial. Les matériaux sont soumis à l'influence de toutes les formes d'énergie possible : électrique (fils conducteurs d'une ligne haute tension), électromagnétique (antenne GSM), thermique (parois d'un four), chimique (chambre de combustion), nucléaire (gaine du combustible dans les réacteurs nucléaires), solaire (capteurs photovoltaïques), ... En outre, certaines applications industrielles requièrent des températures de plus en plus élevées. On a alors développé des matériaux spécifiques pour les hautes températures.

Matériaux pour hautes températures.

On a vu que les propriétés thermiques des matériaux sont influencées par la température. Il en est de même des propriétés mécaniques, qui diminuent avec la température. Cette diminution est due à l'écartement des atomes sous l'effet de la température et de la dilatation. En outre, au-delà d'une température de l'ordre de la moitié de la température absolue de fusion (~600 °C pour le fer), on voit apparaître le **fluage**. Le fluage est caractéristique d'une augmentation des déformations au cours du temps sous contrainte constante. La figure 4 montre la réduction de la résistance d'une pièce soumise à un effort constant pendant un temps donné et pour différentes températures :

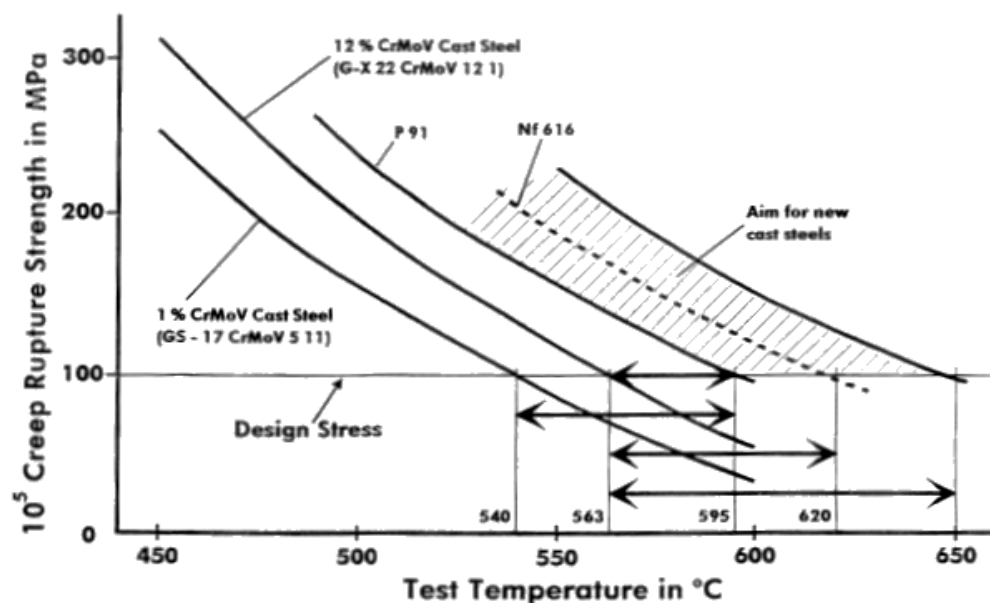


Figure 4 : résistance au fluage de différents matériaux.

Cette figure montre la résistance mécanique d'un alliage pour échangeur de chaleur à haute température, pour une période de fluage de 100 000 (10^5) heures et pour des températures allant de 450 à 650 °C. Pour le niveau de résistance de 100 MPa, on peut atteindre près de 600 °C pour l'alliage P91.

Application : la turbine à gaz (TAG)

L'utilisation la plus connue de la turbine à gaz est le moteur d'avion. Le moteur d'avion est constitué de trois parties distinctes :

- le compresseur
- la chambre de combustion
- la turbine proprement dite

Le profil de température et de pression est le suivant :

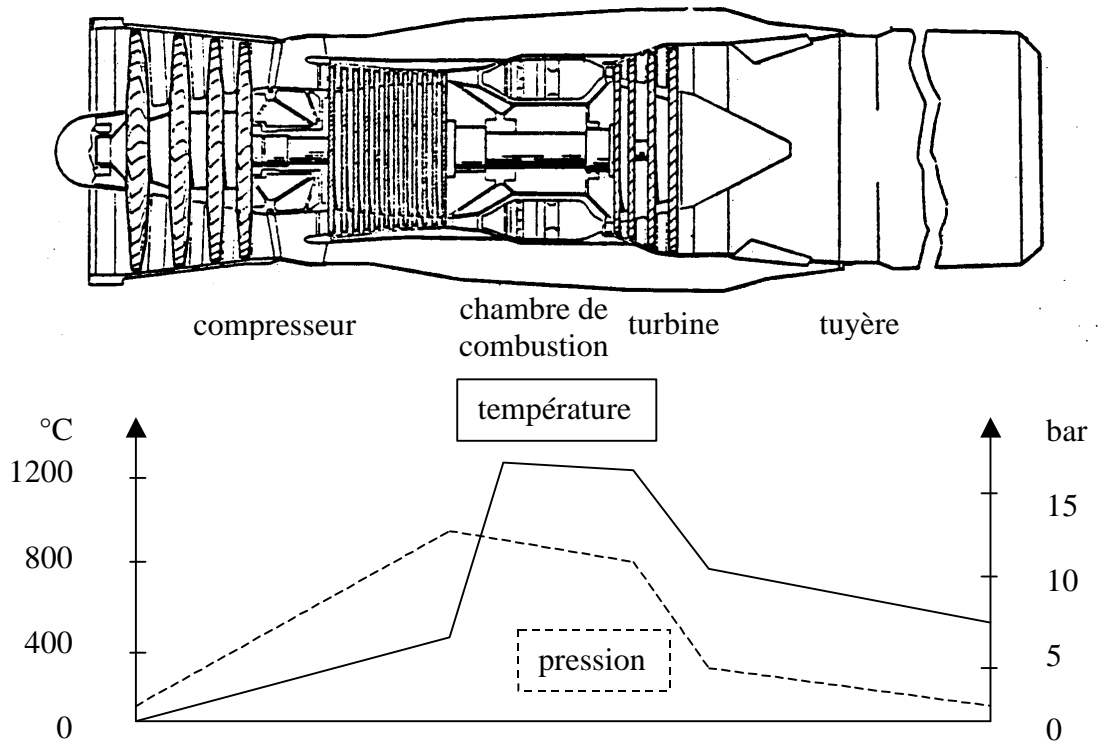


Figure 5 : pression et température dans une turbine à gaz

Le paramètre le plus important est la température d'entrée de la turbine qui détermine la puissance et le rendement du moteur. Cette température doit être la plus élevée possible et de nouveaux matériaux sont nécessaires pour sans cesse améliorer les performances. A l'heure actuelle, ce sont les superalliages de Nickel qui possèdent les meilleures propriétés à chaud; l'INCONEL 713 par exemple, possède des propriétés de fluage satisfaisantes jusqu'à 900 °C. Afin d'augmenter encore la température, les aubages de la turbine seront refroidis de l'intérieur par un gaz froid prélevé au compresseur. Afin de permettre le passage du gaz, l'aubage doit comporter des canaux et ne peut être réalisé

dans le cadre du Printemps des Sciences 2002

<http://www.ulg.ac.be/sciences>

Université de Liège Haute Ecole Charlemagne Hemes

Les métiers de l'énergie - Ingénieurs de l'énergie

qu'à l'aide de la **fonderie de précision**, car la forme n'est pas réalisable par usinage ou forgeage.

Ayant constaté que les joints de grains constituaient une faiblesse vis-à-vis du fluage, et afin d'augmenter encore la résistance, les ingénieurs ont développé des aubages monocristallins (constitués d'un seul grain ou cristal et donc sans joint). Le gain de résistance est représenté à la figure 6 :

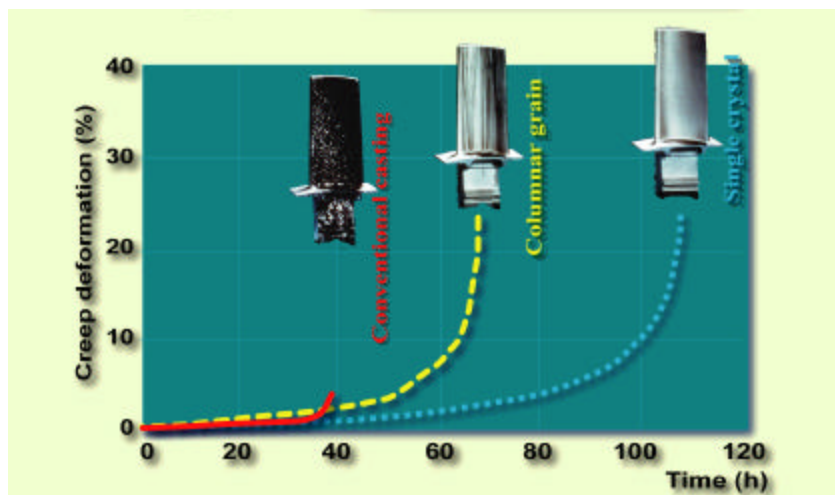


Figure 6 : gain de résistance au fluage pour les aubages monocristallins

Le premier aubage possède plusieurs grains sans orientation particulière; sa résistance au fluage est médiocre (déformation puis rupture pour une faible utilisation). Le deuxième possède quelques grains colonnaires, sans joint dans la direction de l'effort qui coïncide avec la direction longitudinale. Enfin, le dernier ne possède pas de joint de grain du tout et présente la résistance au fluage la plus importante.

Enfin, la dernière amélioration apportée aux aubages de turbine est la barrière thermique. Cette barrière consiste en un revêtement céramique réfractaire de faible épaisseur (quelques dizaines de micromètres) qui va isoler le métal des gaz chauds. Ainsi, on peut encore augmenter la température des gaz chauds sans élever la température du métal.

Caractérisation de barrières thermiques basée sur la mesure de conductivité

Il existe différentes barrières thermiques et différentes façons de les appliquer sur les aubages. La majorité des matériaux utilisés sont des intermétalliques à base d'Yttrium, d'aluminium et de chrome (on le représente par $MCrAlY$, où M représente un ou plusieurs métaux). Etant donné la faible épaisseur de la barrière thermique, celle-ci est appliquée en une couche mince à l'aide d'un plasma, d'un canon à électron ou par électro-déposition. Ces différentes techniques donnent des propriétés différentes qui peuvent être caractérisées par leurs propriétés thermiques.

En effet, la conductivité thermique est fortement influencée par la présence de défauts dans un solide, tels que des porosités ou des fissures, qui sont néfastes pour la durée de vie de l'ensemble aubage - barrière thermique.

On mesure la conductivité de la barrière et on la compare à la conductivité d'un étalon du même alliage sans porosité. En outre, on peut évaluer le vieillissement de la barrière thermique, car sous l'effet de la température élevée (1400 °C), la matière a tendance à densifier et la microstructure se modifie. Sachant que la conductivité thermique est fort influencée par la microstructure, l'essai de caractérisation consiste à chauffer l'échantillon et à le maintenir à haute température, puis à mesurer la conductivité lors du refroidissement. On peut constater aux figures 7 et 8 l'augmentation de la diffusivité après un traitement de densification.

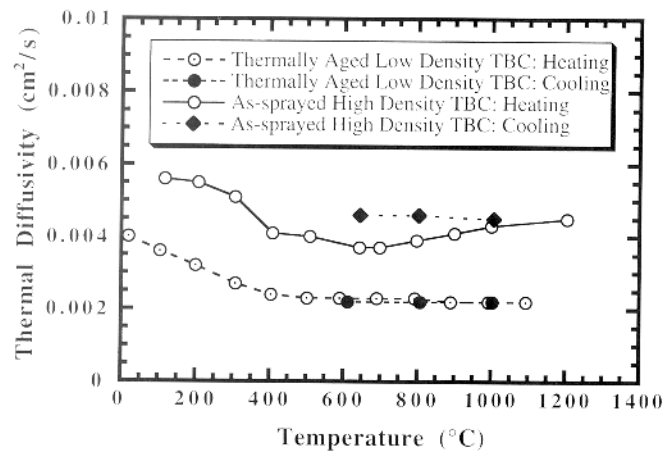


Figure 7 : mesure de diffusivité sur deux barrières thermiques

Le comportement des deux barrières thermiques est tout à fait différent : la première se détériore après avoir été chauffée, tandis que la seconde reste intacte.

Sur la figure 7, on constate une augmentation de la conductivité due à la densification de la barrière thermique avec le temps de maintien à haute température.

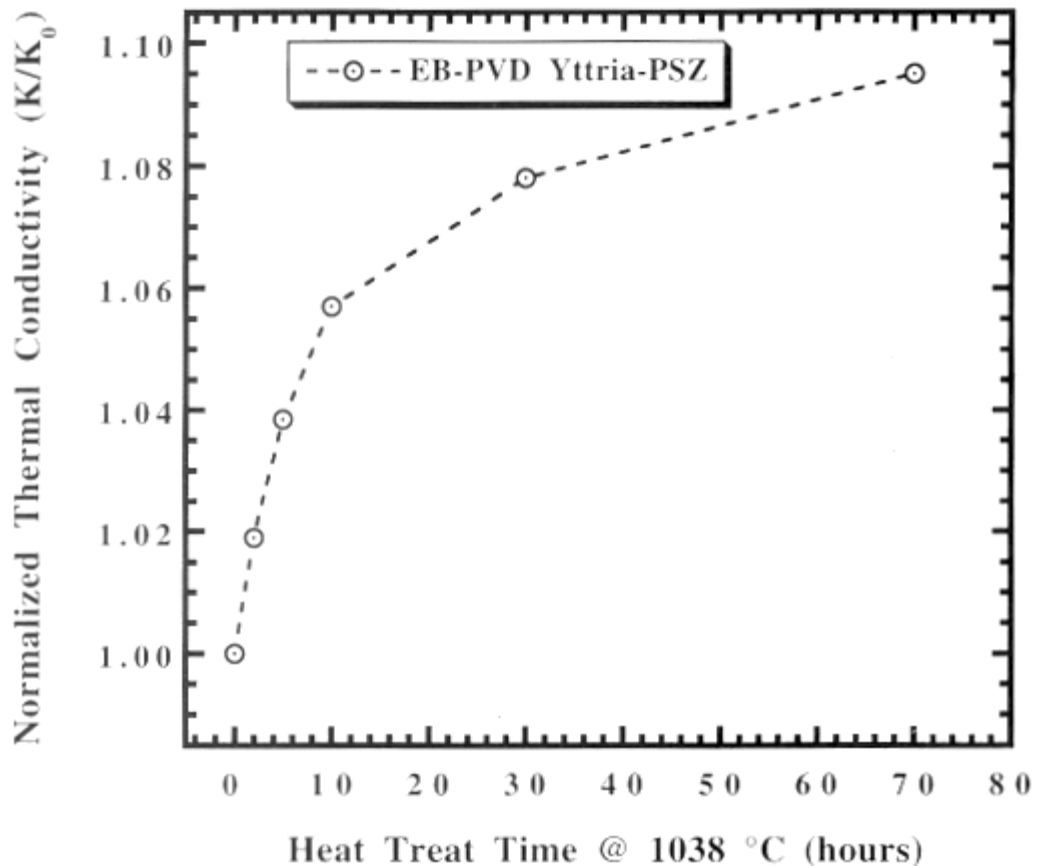


Figure 8 : augmentation de la conductivité avec le temps de maintien à 1038 °C

Caractérisation de barrières thermiques basée sur la thermographie

Le contrôle non destructif (CND) est un outil très puissant car il permet de vérifier des pièces sans les endommager. En aviation, par exemple, lors des entretiens des moteurs, on sélectionne quelques aubages à des endroits critiques du moteur et on les inspecte sous toutes leurs coutures. Si aucun défaut n'est détecté, on suppose que statistiquement les autres pièces ne sont pas endommagées et le moteur est remonté. Evidemment, si on devait détruire les pièces pour vérifier leur santé interne, on aurait une perte de matière importante et inutile.

Parmi les différentes techniques de contrôle non destructif on trouve : l'échographie ultrasonique, la thermographie ou encore la radiographie par rayons X. Le principe est le même et consiste à envoyer un signal (du son, de la chaleur ou des rayons X) et à observer la réponse de la pièce à ce signal. Si la réponse est homogène, c'est-à-dire qu'elle est la même partout, alors la pièce est saine. Si il existe un défaut, la matière ne réagit pas de la même façon à l'endroit du défaut et celui-ci devient visible. Dans l'exemple de la figure 8, on a chauffé la pièce tout en observant sa surface à l'aide d'une caméra infrarouge. Si la pièce était intacte, la chaleur diffuserait à l'intérieur de la pièce de façon homogène. Dans ce cas, on voit une tache plus claire et donc plus chaude au centre de l'image qui indique une délamination de la barrière thermique.

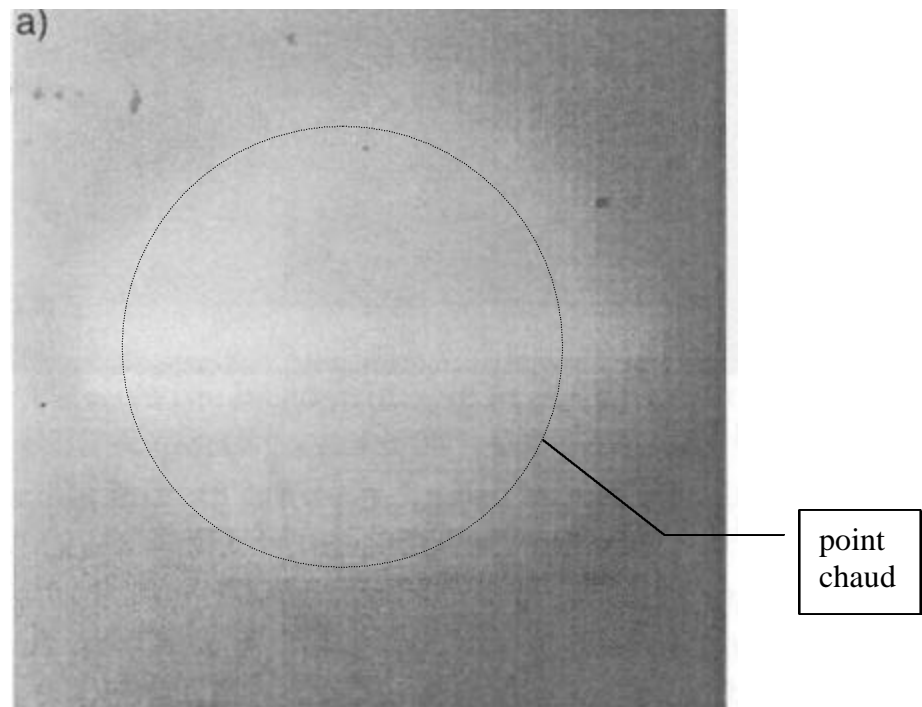


Figure 9 : détection de défaut par thermographie IR

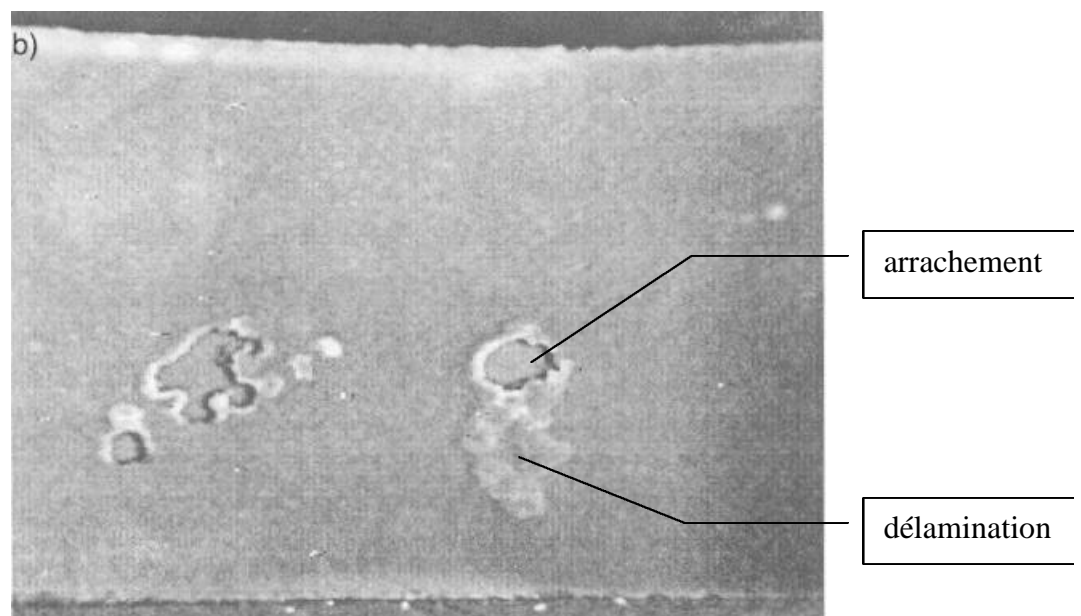


Figure 10 : image IR d'un aubage de turbine montrant la délamination consécutive à un arrachement de matière

La figure 10 est une image prise par thermographie infrarouge sur un aubage de turbine. Cet aubage a subi un endommagement local suite à des arrachements de matière. Ces arrachements sont visibles à l'œil nu, mais la délamination consécutive de la barrière



Propriétés thermiques; matériaux pour haute température
Faculté des Sciences Appliquées, Département ASMA, Science des Matériaux
Jacqueline LECOMTE-BECKERS & Yann GREDAY

thermique n'est pas visible a priori. L'utilisation du contrôle non destructif par thermographie a permis de la mettre en évidence.

Pour nous contacter :
Métallurgie et Science des Matériaux
Université de Liège
Institut de Mécanique et du Génie Civil, Bât B52/3
Chemin des chevreuils, 1
B-4000 Liège
Tél. : +32 4 366 91 18
Fax : +32 4 366 91 13
<http://www.ulg.ac.be/metaux>