

# Expertise de la voie solaire pour l'étude de nouveaux points fixes de température dans la gamme 2 000 K – 3 000 K

Daniel HERNANDEZ et Gabriel OLALDE  
PROMES-CNRS\*

## Résumé

Cette communication rend compte des travaux effectués dans le cadre de deux actions d'incitations successives mandatés par le BNM auprès de l'IMP-CNRS. Elle présente les résultats obtenus pour expertiser les méthodes solaires d'obtention de plateau de congélation en vue de l'étude de points fixes de température à très haute température (2 000 K – 3 000 K). Les matériaux retenus sont quatre oxydes réfractaires :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2 326 K),  $\text{Ho}_2\text{O}_3$  (2 688 K),  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (2 707 K),  $\text{HfO}_2$  (3 075 K).

## Abstract

*This paper describes the studies carried out in the framework of two research contracts between the BNM and the IMP-CNRS. It presents the results obtained to analyze solar methods used for freezing plateau obtaining in the purpose of the study of new temperature fixed points at high temperature (2 000 K – 3 000 K). The selected products are four refractory oxides:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2 326 K),  $\text{Ho}_2\text{O}_3$  (2 688 K),  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (2 707 K),  $\text{HfO}_2$  (3 075 K).*

---

\* PROMES-CNRS (Procédés, Matériaux et Energie Solaire),  
BP 5, Odeillo, 66125 Font-Romeu Cedex, France,  
daniel.hernandez@promes.cnrs.fr.

## I. Introduction

L'Echelle Internationale de Température fixe des points de références en température, principaux et secondaires. Les références à hautes températures faisant cruellement défaut, nous avons choisi, parallèlement aux travaux actuellement conduits par plusieurs instituts nationaux de métrologie dans le domaine des eutectiques métal-carbone [1], d'expertiser le changement de phase liquide-solide des oxydes réfractaires en utilisant l'énergie solaire comme vecteur énergétique non polluant, instantanée et facile d'emploi.

Les travaux présentés relèvent de la démonstration de faisabilité et non point d'une proposition de points secondaires satisfaisants aux critères d'exactitude des points de EIT-90. Ils rendent compte des possibilités d'obtention de paliers de congélation reproductibles pour trois oxydes sélectionnés dans la liste de l'EIT-90 [2] :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2 053 °C),  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (2 434 °C),  $\text{HfO}_2$  (2 802 °C) et pour un quatrième :  $\text{Ho}_2\text{O}_3$  (2 415 °C) issu de l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) [3].

Dans un premier temps nous nous sommes attachés à améliorer des techniques et des méthodes existantes. Dans un second temps nous avons développé une nou-

velle méthode d'obtention de paliers à durée contrôlée qui a été testée uniquement sur Al2O3.

Les instruments de mesures de température sont des pyromètres industriels travaillant à  $1,6 \mu\text{m}$  (détecteur de type photodiode) et dans la bande  $8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$  (détecteur de type pyroélectrique). Leur condition d'utilisation et l'incertitude des mesures données par les fabricants ( $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $1,6 \mu\text{m}$  et  $\pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$ ) ne nous permettent pas d'analyser la répétabilité et l'exactitude avec des conditions métrologiques initiales favorables. En conséquence, nous nous limiterons ici à évaluer, essentiellement, la reproductibilité des méthodes.

## 2. Moyens expérimentaux

### 2.1. Moyens solaires

Les moyens expérimentaux s'appuient sur un four solaire à axe horizontal utilisé au laboratoire pour la caractérisation des matériaux, notamment pour l'étude des diagrammes de phases.

L'installation, présentée sur la figure 1, comprend un concentrateur parabolique fixe (3) de 2 m de diamètre et de 0,85 m de focale. Sa puissance est de l'ordre de 2 kW, concentrés sur un disque de 0,01 m de diamètre. Il dispose, en son centre, d'une ouverture de 0,2 m de diamètre pour permettre des mesures de température par voie optique depuis l'arrière du miroir et selon son axe (4).

Le rayonnement solaire incident (9) est réfléchi par un héliostat (6) de 3 m sur 3 m. Il peut être modulé par l'intermédiaire d'écrans d'obturation (8) situés entre l'héliostat et le concentrateur.

Le matériau à étudier est disposé au foyer de l'installation, au sein d'une cavité cylindrique tournante (1 et fig. 2). Le flux solaire est concentré sur son ouverture

(2) et peut être rapidement occulté par un diaphragme mobile (5) dont l'orifice permet la poursuite de la mesure de température après une brève interruption.

Le flux solaire concentré assure la fusion des oxydes réfractaires en moins d'une minute. Le déplacement du diaphragme d'occultation déclenche un processus rapide de refroidissement du matériau fondu qui, au changement de phase, présente un plateau en température.

### 2.2. Réacteur de fusion et obtention de l'auto creuset de mesure

Le contenant utilisé pour l'obtention de l'auto creuset est un réacteur tournant, réfrigéré à l'eau, de géométrie cylindrique (diamètre  $D = 0,03 \text{ m}$ , longueur  $H = 0,04 \text{ m}$ ) ayant une ouverture de 0,012 m (fig. 2). La vitesse de rotation est variable entre 0 tr/min et 1 200 tr/min.

Les produits utilisés sont des poudres d'oxydes de haute pureté (99,999 % - 99,999 9 %) préalablement fondus et broyées sous forme de grains. Lorsque le flux solaire est concentré sur l'ouverture du réacteur, un front de fusion apparaît instantanément et, du fait de la rotation, progresse dans la masse du matériau pour former une cavité. L'auto creuset ainsi obtenu dispose d'une paroi interne fondue entourée de grains (fig. 2). Ses dimensions varient avec l'aptitude du matériau à absorber l'énergie solaire ; typiquement son diamètre,  $d$ , est de l'ordre de 0,01 m et sa profondeur,  $h$ , oscille entre 0,005 m et 0,03 m.

La méthode est exempte de pollution ; il n'existe pas de source de contamination : les parois du contenant restent froides, le matériau est identique de part et d'autre de l'interface liquide solide et la source thermique est non polluante.

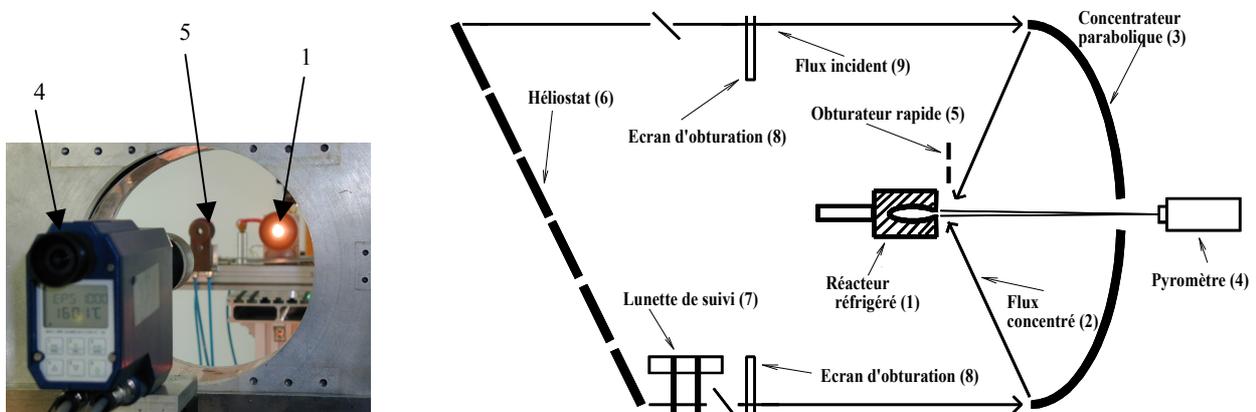
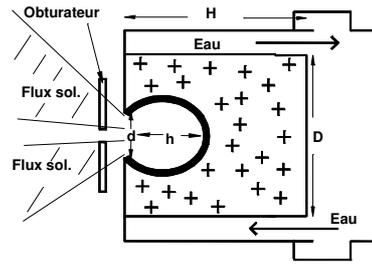


Fig.1. - Schéma et photographie de l'installation solaire.



Fig.2. - Schéma du réacteur de fusion et photographie de l'auto creuset et du produit de remplissage.



### 3. Méthode de base d'obtention du plateau de fusion et résultats de faisabilité

La méthode d'obtention de palier de fusion par voie solaire ayant été utilisée lors de travaux antérieurs [4], nous avons, dans un premier temps, tenu à l'évaluer [5].

#### 3.1. Description de la méthode

La température du creuset fondu est mesurée à l'aide d'un pyromètre optique situé dans l'ouverture aménagée au centre du concentrateur (fig. 1). Il s'agit d'une température de luminance à la longueur d'onde des filtres monochromatiques sélectionnables qui équipent le radiomètre.

La figure 3 est un exemple d'enregistrement obtenu au cours d'un essai réalisé sur un creuset d' $Al_2O_3$  pour une longueur d'onde de mesure de  $1,6 \mu m$ .

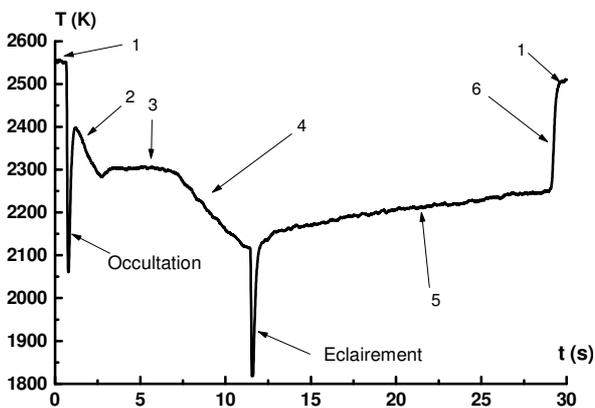


Fig. 3. - Exemple expérimental d'obtention de palier de solidification sur  $Al_2O_3$ .

Lorsque la paroi intérieure de l'auto creuset à l'équilibre thermique est fondue, la température mesurée (1) est supérieure à la température de fusion théorique  $T_f$  du fait des réflexions du rayonnement solaire et de la surfusion. Lorsque le diaphragme d'obturation est déplacé pour bloquer le rayonnement solaire (occultation), il coupe temporairement le faisceau de la mesure qui devient invalide quelques dixièmes de secondes, pour

rendre compte ensuite du refroidissement du liquide (2). Le changement de phase est ensuite marqué par un plateau de congélation (3) précédé d'un phénomène de surfusion caractéristique de l'alumine. Lorsque la phase liquide a disparu, le processus de refroidissement reprend en phase solide (4).

Suite à un second déplacement du diaphragme d'obturation pour concentrer à nouveau l'énergie dans le creuset (éclairage), une phase de réchauffement s'amorce en phase solide (5) après un temps de mesure invalide. La paroi intérieure du creuset se tapisse de liquide de façon inhomogène, depuis son orifice jusqu'à son fond. Lorsque la fusion atteint la zone observée par le pyromètre, on observe un brusque changement de pente (6) lié à la surfusion et à la réflexion de rayonnement solaire amplifiée par la réflectivité spéculaire du liquide. De ce fait, le palier de fusion n'est pas observable. Le creuset à l'équilibre thermique retrouve un niveau de température supérieur à la température de fusion théorique du produit (1).

#### 3.2. Résultats expérimentaux

La méthode décrite plus haut est la même pour tout les essais réalisés sur les oxydes réfractaires étudiés. Ils ont été conduits avec le souci de répondre aux critères de sélection des points de l'EIT-90 : reproductibilité, multiplicité et accord des mesures, connaissance d'incertitude de la mesure, informations précises et complètes sur les méthodes et moyens expérimentaux.

Le tableau 1 rassemble l'ensemble des résultats obtenus par cette méthode.

Les matériaux ont une pureté chimique élevée (données fabricant) qui n'a pas été vérifiée ni avant ni après les expérimentations. Notons toutefois que les produits ont été utilisés plusieurs fois sans qu'aucun effet sur la reproductibilité n'ait été mis en évidence dans les limites de l'incertitude de la méthode.

La durée des plateaux observés est régie, notamment, par la masse de produit fondue. Bien que courte elle permet de déduire leur valeur, mais elle peut s'avé-

Tableau 1  
Synthèse des résultats obtenus avec la méthode initiale.

Matériau	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	HfO <sub>2</sub>	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Pureté	99,9 %	99,9 %	99,9 %	99,9 %
Rapport moyen $h/d$ de la cavité	1 à 1,5	1	1,5	1 à 1,5
$T$ (K) de congélation	2 326 <sup>+</sup>	2 707 <sup>+</sup>	3 075 <sup>+</sup>	2 688 <sup>++</sup>
Durée des plateaux (s)	5	2	4	2
(2) Reproductibilité en °C	10*	10	10	5
Plage de la transition en °C	3<	3<	3<	3<
(2) Nombre de tests	>20	>5	>10	>5
(2) $\epsilon_{c,\lambda}$ déduite pour la cavité	0,87	0,93	0,98	0,95
(2) $\epsilon_{\lambda}$ calculée pour le matériau	0,58	0,73	0,89	0,75
(3) Reproductibilité en °C	5	5	5	5
Plage de la transition en °C	3<	3<	3<	3<
(3) Nombre de tests	>10	>5	>10	>5
(3) $\epsilon_{c,\lambda}$ déduite pour la cavité	0,98	0,98	0,97	0,98
(3) $\epsilon_{\lambda}$ calculée pour le matériau	0,9	0,89	0,81	0,86

(2) Mesures effectuées à 1,6  $\mu\text{m}$  avec une incertitude de l'ordre de 5 K ;  
 (3) Mesures effectuées à 8  $\mu\text{m}$  – 12  $\mu\text{m}$  avec une incertitude de l'ordre 15 K ;  
 $T^+$  : données EIT-90 ;  $T^{++}$  : données IUPAC ;  
 $\Delta T^*$  : Reproductibilité relative à des creusets de rapport  $h/d = 1,5$ .

rer insuffisante pour des procédures d'étalonnage par comparaison.

Les mesures effectuées à 1,6  $\mu\text{m}$  présentent une dispersion significative sans que l'on sache si ce résultat est lié aux propriétés émissives « non noire » de la cavité dont la géométrie n'est pas constante. Ce phénomène est accentué pour l'alumine. Pour ce produit la dispersion est de l'ordre de 50 °C pour des rapports  $h/d$  variant de 0,5 à 1,5 et se réduit à 10 °C pour les creusets dont le rapport  $h/d = 1,5$ .

Les mesures à 8  $\mu\text{m}$  – 10  $\mu\text{m}$  bénéficient de l'émissivité élevée des matériaux pour ce domaine de longueur d'onde [6] qui minimise la dispersion. A l'inverse, elles sont pénalisées par l'incertitude sur la mesure.

L'émissivité spectrale donnée pour la cavité  $\epsilon_{c,\lambda}$  est déduite de la température de luminance mesurée au cours du palier en considérant que la température de fusion  $T_f$  est la température réelle.

L'émissivité spectrale calculée pour le matériau est obtenue en tenant compte des corrections liées à la

forme de la cavité [7]. Les valeurs sont globalement en accord avec les données bibliographiques.

En aucun cas, on ne peut considérer que les cavités obtenues ont un rapport  $h/d$  qui permet d'approcher des conditions géométriques de type « corps noir ».

De façon générale, après cette phase de faisabilité, on peut conclure que cette technique par voie solaire, qualifiée ici « de base », est une voie intéressante pour obtenir facilement des plateaux de congélation à des niveaux de température attractifs pour les points secondaires à haute température. On peut tout particulièrement souligner la faible dérive de la température au cours de l'observation du palier dont la plage de transition est inférieure à 3 °C.

Les paliers de fusion ne sont pas obtenus du fait de l'inhomogénéité de la température de la cavité en phase solide lors du chauffage.

Les paliers de congélation s'avèrent courts et la température de luminance difficile à relier à la température réelle.

Enfin, les matériaux testés se sont montrés plus ou moins adaptés à la fusion solaire du fait de leurs propriétés d'absorption et ce, indépendamment du niveau de leur température de fusion. Ainsi l'alumine ne favorise pas la formation de cavités, alors que l'hafnie présente des aptitudes tout à fait intéressantes.

#### 4. Méthode mise au point pour l'obtention de paliers à durée contrôlée

Dans la méthode « de base », les paliers de congélation étant obtenus par occultation totale de l'énergie solaire concentrée, leur durée est régie par la masse fondue.

Pour obtenir des paliers à durée contrôlée, nous avons choisi de travailler en maintenant l'équilibre thermique traduit par l'équation (1) et qui implique un apport permanent d'énergie solaire.

$$\Phi_S = \Phi_R(T_f) + \Phi_C(T_f) \quad (1)$$

avec  $\Phi_S$  : flux solaire concentré,  $\Phi_R(T_f)$  et  $\Phi_C(T_f)$  : pertes radiatives et conductives de l'auto creuset à la température d'équilibre du palier de congélation (la convection est négligée).

Ce choix implique un apport permanent d'énergie solaire  $\Phi_S$  qui induit :

- la nécessité d'éliminer le flux solaire réfléchi ;
- la reconnaissance de l'équilibre thermique relatif au palier de congélation.

Ces points sont développés dans les sous-chapitres ci-après.

##### 4.1. Mesure de la température en présence du rayonnement solaire concentré

Malgré l'existence de nombreuses techniques pyrométriques, il n'existe pas, à ce jour, de solution universelle pour la mesure de température au foyer des fours solaires.

Si l'on ne tient pas compte de la technique de modulation du rayonnement solaire, inadaptée à l'observation en continu de plateaux, de telles mesures sont accessibles selon trois méthodes générales :

- (i) l'utilisation des bandes d'absorption de l'atmosphère pour lesquelles le rayonnement solaire est totalement absorbé,  $\tau_a(\lambda) = 0$  ;
- (ii) l'interposition de composants réflecteurs ou transmetteurs agissant en tant que filtres bloquants du rayonnement solaire pour la longueur d'onde de mesure ;

- (iii) l'utilisation des propriétés émissives du matériau et leur caractérisation spectrale afin d'adapter la longueur d'onde de mesure pour  $\epsilon(\lambda) = 1$ .

Ces configurations ont été évaluées et testées avec succès [8]. Nous nous limiterons dans cet article aux résultats correspondants, pour l'alumine, à la troisième solution [9].

##### 4.2. Méthode d'observation du plateau de congélation à l'équilibre thermique

Les voies de mesures exemptes d'erreurs liées à la réflexion du rayonnement solaire ayant été identifiées, la méthode expérimentale peut être mise au point. Deux points doivent être résolus :

- (i) l'identification du niveau du palier de congélation ;
- (ii) la modulation du rayonnement solaire pour satisfaire à l'équation de l'équilibre thermique (1).

Le premier point est solutionné par une observation préliminaire du plateau en utilisant la méthode de base, c'est-à-dire, en coupant complètement le rayonnement solaire.

Le second est géré par l'observation de l'évolution du rapport  $\Delta T(t)/\Delta \Phi_S(t)$  en fonction du temps. Ainsi, lorsqu'il n'y a pas d'évolution de la température mesurée alors que le flux solaire varie, l'on peut considérer que l'équilibre est lié au plateau de congélation : la masse de liquide compensant le refroidissement ou le chauffage du matériau.

Les figures 4, 5, et 6 sont des exemples qui illustrent clairement la méthode.

Sur la courbe 1 de la figure 4, le plateau est observé dans un premier temps en coupant totalement le rayon-

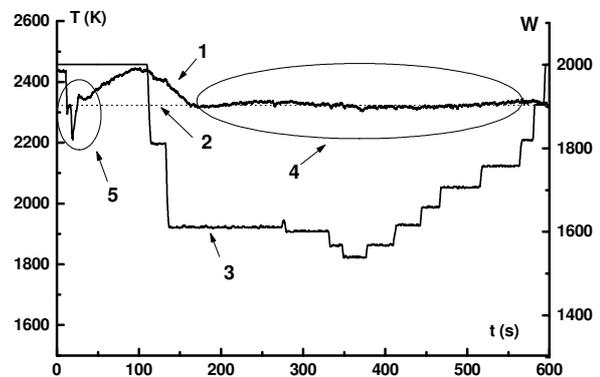


Fig. 4. - Plateau à durée contrôlée pour  $Al_2O_3$  à la longueur d'onde de mesure  $8 \mu m - 12 \mu m$ .  
1 : Température mesurée ; 2 : Niveau du plateau ; 3 : Flux solaire ; 4 : Plateau contrôlé ; 5 : Plateau préliminaire.

nement solaire (5). On peut voir sur l'agrandissement de la figure 5 que la durée du plateau est seulement de l'ordre de 3 s mais qu'il est suffisamment marqué pour que son niveau soit correctement repéré. Après cette opération, le flux solaire est modulé, la courbe 3 indiquant sa valeur. On constate qu'après  $t = 200$  s, la température de la paroi interne de l'auto creuset est stabilisée autour de celle du plateau préalablement observé à  $T = 2\,318$  K alors que le flux solaire varie de 8,5 %. La durée de cet équilibre thermique peut être maintenue aussi longtemps que souhaité.

La figure 6 présente un autre exemple de plateau à durée contrôlée et permet de visualiser d'autres phénomènes.

Le niveau du plateau de solidification est déterminé préliminairement au niveau (5) de l'enregistrement. Avant  $t = 650$  s, la température de l'auto creuset est dépendante du niveau de flux solaire. Un plateau est approché entre  $200\text{ s} < t < 350$  s mais pendant cet intervalle, le flux solaire est stable et il n'est pas donc possible de conclure.

Par contre, après  $t = 650$  s et jusqu'à  $t = 850$  s, la température mesurée est stable autour de  $T = 2\,323$  K alors que le flux solaire décroît de 15 %.

Au vu des exemples présentés, le rayonnement solaire concentré ne parasite pas la mesure et l'on peut conclure à la validité de la méthode d'obtention des paliers de congélation à durée contrôlée.

Notons que l'observation de paliers de fusion n'a pas été possible, même si l'on peut observer (fig. 6) au cours des phases de chauffage (augmentation de l'éclairement solaire) des changements de pente sur la courbe 1 coïncidant avec le niveau du palier.

#### 4.3. Conditions d'obtention de l'équilibre thermique dans la zone de mesure

Les résultats obtenus montrent sans ambiguïté la validité de la méthode de l'équilibre thermique, il est cependant intéressant de souligner certaines de ses conditions d'obtentions.

Le pyromètre positionné sur l'axe horizontal du concentrateur vise un disque de 6 mm de diamètre dans le fond du creuset. Pour l'observation d'un palier stable, cette zone doit correspondre à un mélange intime de solide et de liquide. Dans le cas contraire, des masses de liquide surchauffé ou de solide en voie de refroidissement perturbent l'équilibre thermique.

La figure 7 est un exemple d'observation de ce type de phénomène. Le plateau de congélation est correctement identifié dans la phase préliminaire (étape 5 de l'enregistrement) mais le niveau du plateau est instable

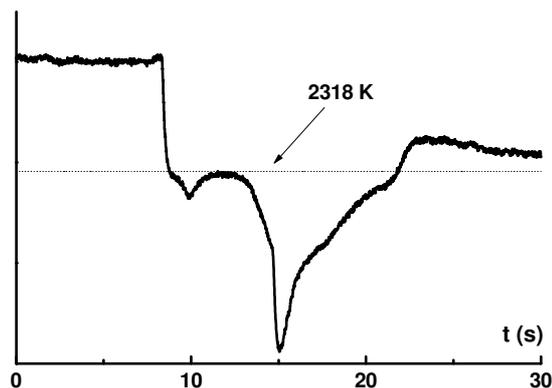


Fig. 5. - Plateau préliminaire correspondant à la figure 4 (zone 5).

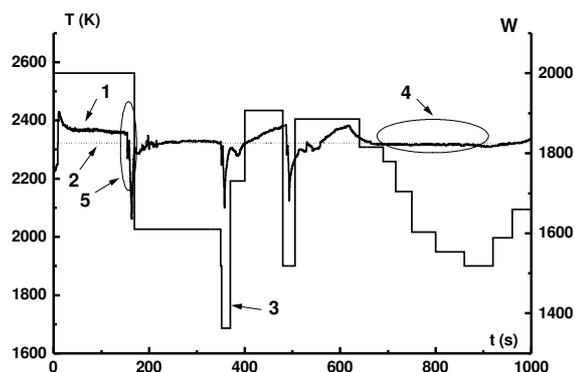


Fig. 6. - Plateau à durée contrôlée pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$  à la longueur d'onde de mesure  $8\ \mu\text{m} - 12\ \mu\text{m}$ .

1 : Température mesurée ; 2 : Niveau du plateau ; 3 : Flux solaire ; 4 : Plateau contrôlé ; 5 : Plateau préliminaire.

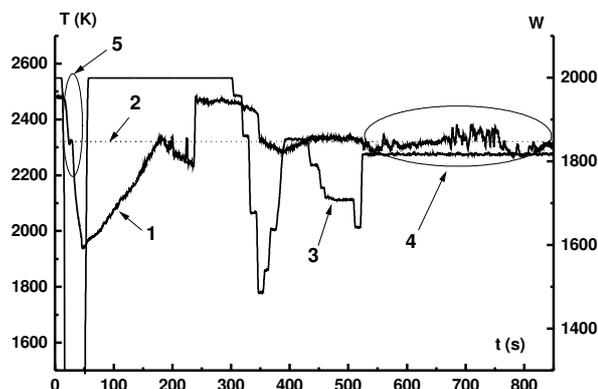


Fig. 7. - Plateau à durée contrôlée pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$  à la longueur d'onde de mesure  $8\ \mu\text{m} - 12\ \mu\text{m}$ .

1 : Température mesurée ; 2 : Niveau du plateau ; 3 : Flux solaire ; 4 : Plateau contrôlé ; 5 : Plateau préliminaire.

alors que le flux solaire est constant (étape 4 de l'enregistrement).

Pour l'alumine, produit choisi pour cette partie de l'étude, les conditions favorables sont obtenues pour des creusets dont la profondeur  $h = 1,5\ d$ .

## 5. Conclusions

Les résultats présentés démontrent clairement la faisabilité de l'obtention de plateaux de congélation d'oxydes réfractaires dans la gamme de température 2 000 K – 3 000 K par voie solaire. A l'inverse, l'obtention de plateaux de fusion est très délicate.

La pureté des matériaux est garantie par la fusion résultante du rayonnement concentré combinée à une mise en forme du produit en auto creuset.

Dans un premier temps, sur la base de travaux antérieurs, la méthode a été validée avec succès sur une large gamme d'oxydes réputés pour leur stabilité chimique  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2 326 K),  $\text{Ho}_2\text{O}_3$  (2 688 K),  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (2 707 K) et  $\text{HfO}_2$  (3 075 K).

Les mesures ont montré que les paliers obtenus étaient de courte durée, de l'ordre de 5 s, et que les auto creusets fondus ne pouvaient en aucun cas être considérés comme de géométrie « corps noir ».

Dans un second temps, la méthode initiale a été améliorée, d'une part pour s'affranchir des perturbations liées au rayonnement solaire concentré et, d'autre part pour minimiser l'écart à la température réelle systématiquement induit par l'émissivité. Ces études ont abouti à la maîtrise de la mesure de la température en présence de rayonnement solaire et, ainsi, à l'obtention de paliers à durée contrôlée. De plus, la caractérisation des propriétés émissives des matériaux, notamment la détermination des zones spectrales pour lesquelles la réflectivité est nulle (Point de Christiansen) a permis de s'approcher des conditions « corps noir ».

La dispersion des résultats est de l'ordre de 15 °C, ce qui s'explique notamment par la qualité des instruments de mesure utilisés. D'autres raisons peuvent être invoquées comme l'inhomogénéité thermique du milieu ou des propriétés d'émission variables selon la forme du creuset.

La largeur minimale de la plage de transition (< 3 °C) est quand à elle un point fort de la méthode.

Au vu du manque de référence en température au delà de 2 000 K et de la flexibilité de la méthode, la voie solaire s'avère séduisante et mérite des efforts supplémentaires pour en améliorer la précision notamment dans le domaine de la métrologie pure, composante complémentaire de la phase de faisabilité présentée ici. L'utilisa-

tion d'instruments de mesure de température de qualité supérieure est une condition préliminaire à l'étude de l'exactitude de la méthode. En ce sens, un pyromètre spécifique est développé car n'existant pas au niveau industriel. Il utilise un détecteur InAs qui allie les performances des photodiodes (stabilité, temps de réponse) et une longueur d'onde de travail de 2,7  $\mu\text{m}$  correspondant à une bande d'absorption du rayonnement solaire.

## Références

- [1] SADLI M., MACHIN G., LOWE D., HARTMANN J. et MORICE R., "Realisation and comparison of metal-carbon eutectic points for radiation thermometry applications and W-Re thermocouple calibration", *Proceedings of 8<sup>th</sup> International Symposium on Temperature and Thermal Measurement in Industry and Science, Tempmeko 2001*, Eds. B. Fellmuth, J. Seidel and G. Scholz, VDE-Verlag GmbH, Berlin, 1, 2002, 507-512.
- [2] BEDFORD R.E., BONNIER G., MAAS H. et PAVESE F., "Recommended values of temperature on the International Temperature Scale of 1990 for a selected set of secondary reference points", *Metrologia*, **33**, 1996, 133-154.
- [3] COUTURES J.P. et RAND M.H., Melting temperatures of refractory oxides: Part II Lanthanoid sesquioxides, *Pure & Appl. Chem.*, **61-8**, 1989, 1461-1482.
- [4] FOEX M., "Mesure des points de solidification des oxydes réfractaires", *Rev. Hautes Températures*, **3**, 1976, 309-326.
- [5] HERNANDEZ D., OLALDE G., BONNIER G., LE FRIOUS F. et SADLI M., "Evaluation of solar furnace application to study the ability of metal oxides to be used as secondary reference points in the range of 2000-3000 °C", *Measurement*, **34**, 2003, 101-109.
- [6] PIRIOU B., "Mise au point sur les facteurs d'émission", *Rev. Int. Htes. Temp. Refract.*, **10**, 1973, 283-298.
- [7] GOUFFÉ A., "Transmission de la chaleur par rayonnement", *Eyrolles*, 1968.
- [8] HERNANDEZ D., OLALDE G., GINESTE J.M. et GUEYMARD C., "Analysis and Experimental Results of Solar-Blind Temperature Measurements in Solar Furnaces". *J. of Solar Energy Eng.*, **126**, 2004, 645-653.
- [9] ROZENBAUM O., DE SOUSA MENESES D., AUGER Y., CHERMANNE S. et ECHEGUT P., "A spectroscopic method to measure the spectral emissivity of semi-transparent materials up to high temperature", *Rev. Scientific Instruments*, **70-10**, 1999, 4020-4025.