

PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DES MÉTAUX LIQUIDES : AVANCÉES RÉCENTES

M. BOIVINEAU
CEA - Valduc

Depuis 40 ans, les techniques de chauffage impulsif ont été largement utilisées pour étudier les propriétés thermophysiques des métaux à l'état solide et surtout liquide. Celles-ci viennent en complément des techniques de chauffage statique limitées par leur domaine de température ($T < 2\ 000\ K$) et par la réactivité chimique des métaux liquides. Nous décrivons ici quelques avancées récentes en termes de développements technologiques et de nouvelles données expérimentales obtenues à l'aide de ces techniques de chauffage dynamique.

Outre les dispositifs "milliseconde" consacrés à l'étude des matériaux à l'état solide jusqu'au point de fusion (typiquement $3\ 000\ K$), les techniques de chauffage "microseconde" permettent l'étude des métaux liquides. Leur intérêt est l'accès au domaine des très hautes températures, tout en restant à l'équilibre thermodynamique. Parmi les moyens expérimentaux de ce type, notons celui de l'expérience de dilatation isobare (EDI) (ou "fil liquide") [1], [2]. Elle consiste à chauffer, par effet Joule, des matériaux métalliques, en appliquant un courant intense de courte durée (quelques dizaines à quelques centaines de μs) au sein de l'échantillon (classiquement, un fil de 0,5 à 1 mm de diamètre, et de quelques centimètres de longueur). Bien que destructive, une telle expérience est néanmoins très riche d'informations, dont quelques exemples sont donnés ci-après [2], [3].

Conductivité et diffusivité thermique

La conductivité thermique λ_T de métaux liquides, et leur diffusivité thermique, qui s'en déduit, ont été déterminées à l'aide de techniques de chauffage dynamique en utilisant l'équation de Wiedemann-Franz :

$$\lambda_T(T) = \frac{L T}{\rho_{el}(T)}$$

où T est la température, L le nombre de Lorentz, ρ_{el} la résistivité électrique. La pertinence de cette équation, signifiant le rôle dominant des électrons dans le transport de chaleur, a été démontrée assez récemment pour les métaux liquides [3].

Mesures de température et émissivité

Les avancées les plus spectaculaires de cette dernière décennie sont relatives à la mesure de la température. C'est l'une des difficultés majeures, car du fait de la courte durée de ces expériences, dites "rapides", il n'est pas possible d'utiliser des techniques de mesures de température classiques (thermocouples, etc.). Ceci a conduit à utiliser la pyrométrie optique, pour mesurer la température de luminance T_R de l'échantillon à une longueur d'onde donnée, et en déduire la température "vraie" T , selon la loi de Wien :

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} = \frac{\lambda}{c_2} \log \varepsilon_{n,\lambda}$$

où λ est la longueur d'onde d'analyse, $\varepsilon_{n,\lambda}$ l'émissivité normale spectrale à la longueur d'onde λ , et c_2 la seconde constante de Planck.

Depuis peu, la polarimétrie laser est utilisée pour pallier la méconnaissance de l'émissivité, cruciale pour mesurer la température (Cf. l'équation précédente). Cette technique consiste à analyser, au cours du chauffage, le changement d'état de polarisation à l'issue de la réflexion par l'échantillon d'un faisceau laser parfaitement polarisé. La polarimétrie laser a été principalement développée en chauffage "microseconde" à l'Université de Graz en Autriche, sur une série de métaux, et appliquée à des expériences sous choc au LANL (USA) [3].

La **figure 1** montre la variation de l'émissivité en fonction de la température de luminance, pour l'alliage de titane TA6V (Ti 90 % - Al 6 % - V 4%) (la mesure d'émissivité est effectuée à $\lambda = 684,5$ nm, et la température de luminance T_R est mesurée à $\lambda = 650$ nm sur tout le domaine de température étudié pour les phases solide et liquide) [4]. Cette figure indique clairement le passage à la fusion par la chute brutale de l'émissivité. La température de luminance à la fusion, T_{Rm} , observée à 1 788 K, correspond à une température "vraie" $T_m = 1 928$ K. Notons qu'une élévation de température additionnelle d'environ 200 K (passage solidus-liquidus) est nécessaire pour atteindre complètement l'état liquide.

Vitesse du son

Les mesures de la vitesse du son dans les métaux liquides sont très pertinentes pour calculer leurs paramètres d'équation d'état [2], [3]. Toutefois, seuls quelques laboratoires aux USA – LLNL, LANL – puis au CEA, ont entrepris de telles mesures. Elles fournissent de nombreuses données sur les métaux liquides [3].

Points critiques

Le principe de la mesure consiste, par accroissement progressif de la pression, à sonder la ligne spinodale, correspondant à la limite de stabilité thermodynamique du liquide surchauffé métastable (Cf. le diagramme de van der Waals dans le plan P, V), pour atteindre le point critique. Cette région est aisément accessible en raison des vitesses de chauffage élevées mises en jeu. La traversée de la ligne spinodale s'accompagne, en général, de très fortes variations de volume et de résistivité électrique (interruption complète de conductivité), ainsi que de la génération d'une onde de choc. L'observation de la disparition de tels phénomènes à l'approche du point critique constitue une méthode élégante pour déterminer ses coordonnées. Un exemple, très parlant, sur l'or (Au) [5] est donné en **figure 2**. Elle montre clairement une très forte variation de la dilatation radiale de l'échantillon à une pression $P = 405$ MPa – nous parlons "d'explosion de phase" – alors qu'à $P = 524,8$ MPa, sa géométrie reste stable, phénomène annonçant le point critique.

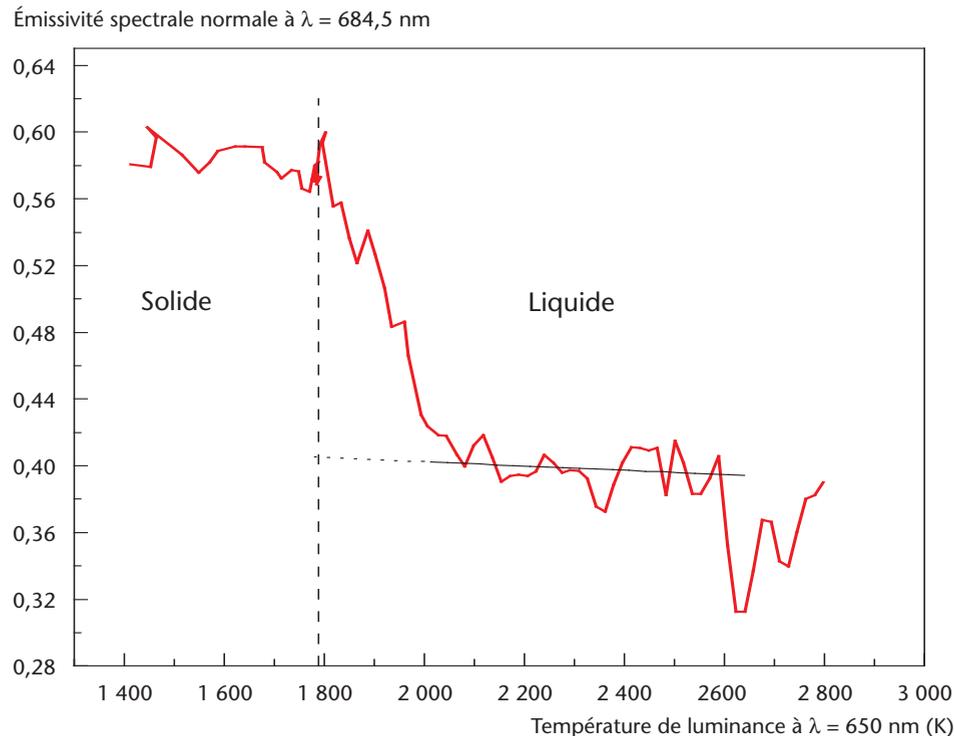


Figure 1 Émissivité normale spectrale du TA6V (alliage Ti 90 % - Al 6 % - V 4 %) à $\lambda = 684,5$ nm, en fonction de la température de luminance T_R , à $\lambda = 650$ nm [4].

Conclusion

La connaissance de la thermodynamique des métaux liquides est de première importance pour beaucoup d'applications métallurgiques, telle que la simulation des procédés de fonderie. De nombreuses études sur les métaux liquides ont été menées ces dernières décennies, en faisant appel aux techniques de chauffage dynamique. Nous avons montré quelques avancées récentes dans ce domaine, donnant lieu à une abondance de données expérimentales sur les métaux liquides, surtout purs. Le réel potentiel des techniques dynamiques a conduit récemment à des études sur les alliages métalliques. Celles-ci, complétées par des travaux théoriques et par le développement de nouveaux diagnostics pertinents, constituent une voie prometteuse d'investigations.

Remerciements

Cet article est dédié à Ared Cezairliyan (1934-1997) pour sa contribution immense à la thermophysique subseconde. Par ailleurs, l'auteur remercie très chaleureusement G. Pottlacher pour sa part active dans ce travail de synthèse.

Références

- [1] A. BERTHAULT et Al., "High-pressure, high-temperature thermophysical measurements on tantalum and tungsten", *Int. J. Thermophys.*, **7**, p. 167-179 (1986).
- [2] M. BOIVINEAU, "Propriétés thermophysiques des matériaux dans les états solide et liquide", *Chocs*, numéro spécial sur les équations d'état et les lois de comportement, p. 42-51 (2005).
- [3] M. BOIVINEAU, G. POTTLAGHER, "Thermophysical properties of metals at very high temperature obtained by dynamic techniques: recent advances", *International Journal of Materials Product and Technology. Special Issue: Challenges in Materials Properties Measurements*, **26(3/4)**, p. 217-246 (2006).
- [4] M. BOIVINEAU et Al., "Thermophysical properties of the solid and liquid Ti90%-Al6%-V4% (TA6V) alloy", *Int. J. Thermophys.*, **27(2)**, p. 507-529 (2006).
- [5] K. BOBORIDIS et Al., "Determination of the critical point of gold", *Int. J. Thermophys.*, **20(4)**, p. 1289-1297 (1999).

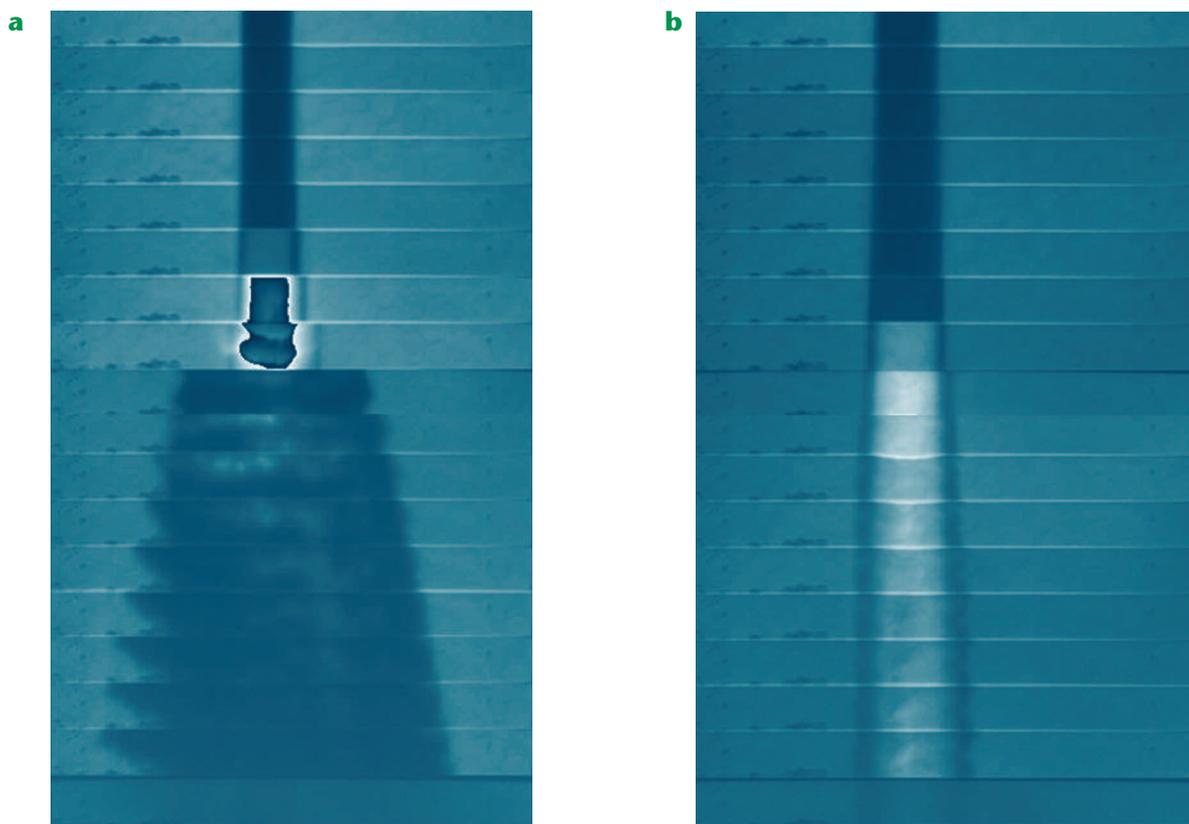


Figure 2
Dilatation radiale d'un échantillon (fil) d'or en fonction du temps (axe vertical), pour la détermination des paramètres critiques [5]. Les clichés sont réalisés à l'aide d'une caméra CCD rapide (le temps entre deux clichés consécutifs est de 10,13 μ s).

a Explosion du fil à $P = 405$ MPa. Ce phénomène peut être observé sur le 9^e cliché en partant du haut.
b Le fil retrouve une géométrie stable à $P = 524,8$ MPa, indiquant la proximité de la pression critique estimée à $P_c = 530 \pm 20$ MPa.