

# Suivi de particules et vélocimétrie par traitement d'images infrarouges. Application aux milieux granulaires.

Francisco Sepúlveda\*, Olivier Fudym

RAPSODEE UMR 2392 CNRS, Ecole des Mines d'Albi  
Campus Jarlard, route de Teillet, 81013 Albi Cédex 09

\* (auteur correspondant : [sepulved@mines-albi.fr](mailto:sepulved@mines-albi.fr))

**Résumé** – L'objectif de cette étude est d'adapter et analyser diverses techniques de reconnaissance de forme et suivi de particules pour la mesure de champs de vitesses dans des milieux granulaires en déséquilibre thermique dans un lit vibré, par traitement d'images infrarouges. On compare les performances obtenues en utilisant les transformées de Hough, les techniques de morphologie mathématique et la corrélation d'images. L'étiquetage des objets repérés permet ensuite de suivre les températures moyennes des particules en mouvement et de caractériser leurs échanges thermiques.

## Nomenclature

$Bi$	nombre de Biot	$T$	température, $K$
$c_p$	chaleur massique, $Jkg^{-1}K^{-1}$	$Y$	T en niveaux numériques, $DL$
$D$	diamètre, $m$	<i>Symboles grecs</i>	
$h$	coeff. d'échange convectif, $Wm^{-2}K^{-1}$	$\rho$	masse volumique, $kgm^{-3}$
$k$	conductivité thermique, $Wm^{-1}K^{-1}$	$\tau$	temps caractéristique, $s$
$S$	surface d'échange, $m^2$		

## 1. Introduction

Le traitement d'images infrarouges peut profiter très largement des nombreux développements algorithmiques faits dans le domaine du traitement d'images. Outre la caractérisation thermique des milieux observés, la thermographie infrarouge peut alors étendre son champ d'applications aux domaines où l'information obtenue dans le visible n'est plus pertinente, lorsque les matériaux étudiés ne permettent pas leur discrimination dans le visible, ou sont observés à travers une paroi opaque. Toutefois, les hypothèses de conservation des niveaux de gris ne sont plus réalistes en thermique où l'énergie est dissipée par les parois et dans l'environnement ou échangée entre les particules.

Les approches locales « continues » ou du moins discrétisées à l'échelle du pixel sont bien adaptées à l'étude de milieux constitués d'un très grand nombre de particules dont la dimension moyenne est inférieure ou au mieux du même ordre de grandeur que la résolution apparente de l'instrument de mesure. Une formulation « eulérienne » décrit alors le milieu de façon continue et macroscopique. Les techniques correspondant à ce type d'approches sont très développées, et on peut citer par exemple en premier lieu les techniques de corrélation d'images (CIN) pour l'analyse de champs de déplacements en mécanique du solide [1]. La vélocimétrie par imagerie de particules PIV [2], basée sur l'ensemencement de particules traceurs et l'utilisation de la CIN permet de mesurer des champs de vitesses au sein des fluides. Les méthodes de flux optiques permettent la mise en œuvre de méthodes d'estimation à partir de l'équation d'évolution liée au contraste lumineux. Cette approche a été utilisée en thermographie infrarouge par Haussecker [3], mais sans mesure de diffusivité thermique. Ces travaux ont été ensuite adaptés par Bamford [4] : l'analyse de texture de l'image est

remplacée par l'application d'un marqueur thermique spatial périodique pour l'estimation locale de la diffusivité thermique et des champs de vitesse. Un motif spatial aléatoire a également été proposé [5].

A l'opposé de cette première famille de méthodes, il peut-être intéressant d'opérer plutôt un suivi individuel des « particules » (de façon plus générale des objets ciblés) dans un repère mobile, afin de faciliter l'analyse thermique. Il est dans ce cas nécessaire de mettre en œuvre des techniques de reconnaissance de forme. Les techniques CIN peuvent être utilisées pour repérer les déplacements entre deux images successives, comme par exemple avec l'algorithme KLT [6]. On s'intéresse dans cette étude plus particulièrement à l'utilisation de la transformée généralisée de Hough [7] et à l'utilisation d'outils de morphologie mathématique [8] qui semblent adaptés au suivi thermique de particules mobiles. Ce type de traitement peut permettre d'aborder la problématique des écoulements granulaires, comme par exemple le cas du mélange et ségrégation en lits vibrés [9], ou les redistributions de contraintes mécaniques dans les milieux granulaires comprimés [10], mais aussi les écoulements réactifs de gouttes en microfluidique.

## 2. Montage expérimental

Des billes d'acier, couvertes d'une peinture noire à haute emissivité, sont placées sur un plateau oscillant, fermé par des parois élastiques, et soumis à des vibrations verticales (17 Hz pour les essais présentés ici) fournies par l'intermédiaire d'un haut-parleur alimenté par un générateur de fonctions. Les billes sont préalablement chauffées sur un rail alimenté par des éléments Peltier. Le fond du récipient peut-être au choix recouvert d'un matériau isolant ou conducteur thermique. Le montage est présenté sur la Figure 1. On obtient ainsi un mouvement désordonné des sphères. La scène est observée par une caméra Titanium CEDIP dotée d'une matrice de détecteurs InSb de 540 x 612 pixels. Le plateau oscillant est connecté à un accéléromètre DeltaTron 4507 (Brüel & Kjaer) qui permet la visualisation sur un oscilloscope de l'accélération du récipient ainsi que des impacts des billes.

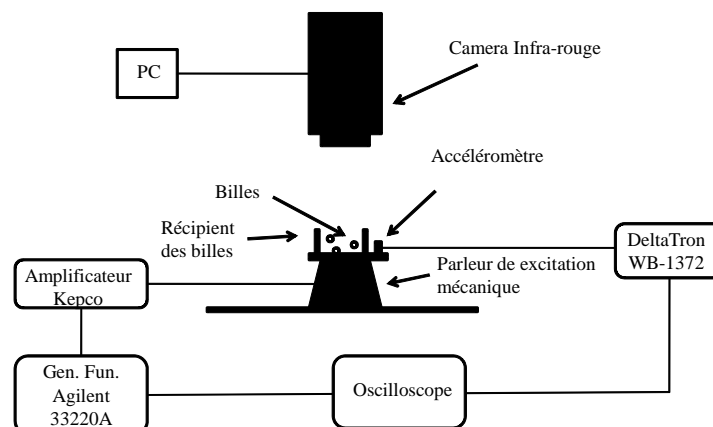


Figure 1 : Montage expérimental

## 3. Détection et étiquetage des particules

Les techniques CIN permettent, en maximisant le produit de corrélation entre deux images successives, de retrouver des objets similaires et d'en déduire leur déplacement relatif. Les

algorithmes de base, tels que nous les avons utilisés, sont plutôt adaptés à des déplacements faibles. Du fait qu'ils ne fournissent que le déplacement et non la position des objets suivis, le traitement d'un grand nombre d'images est dégradé par le cumul d'erreurs sur la position.

L'utilisation de la transformée généralisée de Hough est efficace pour la reconnaissance d'objets prédéterminés (ici des cercles de rayons connus). Après une étape de détection de contours, un accumulateur permet de trouver le centre le plus probable. Les « faux » cercles sont éliminés par filtrage. L'avantage est d'identifier la position du barycentre, et d'en permettre l'étiquetage. Cette méthode s'est montrée très adaptée pour détecter automatiquement des formes statiques, mais sa mise en œuvre dynamique s'avère coûteuse en temps de calcul, du fait que le seuil de filtrage doit être adapté à chaque image de la séquence, en raison de la diminution des contrastes thermiques.

La morphologie mathématique [8] fournit des outils bien adaptés au filtrage et à la segmentation des images. Les opérations de base, érosion et dilatation, consistent à filtrer l'image binarisée à l'aide d'un élément structurant. Le principal intérêt est que l'on peut retrouver des formes complexes et procéder à un étiquetage des objets.

#### 4. Résultats

Seuls les résultats obtenus avec les outils de morphologie mathématique, qui se sont montrés les plus performants pour le suivi dynamique, sont présentés ci-dessous. L'utilisation d'un masque binaire adapté à la forme des cibles (ici des cercles de rayon légèrement inférieur à celui des sphères) fournit la température moyenne de surface.

La Figure 2 permet de comparer l'évolution de la température moyenne d'une bille de 5 mm de diamètre lorsque celle-ci est immobile ou au contraire soumise à des déplacements désordonnés provoqués par les oscillations du plateau oscillant. La Figure 3 montre des résultats similaires pour une bille de 11 mm de diamètre, avec des températures initiales différentes. Les comportements thermiques sont très proches, et on peut noter le faible niveau de bruit obtenu pour les billes mobiles, ce qui semble confirmer à ce stade la fiabilité de l'algorithme de suivi (on ne "sort" pas de l'objet repéré).

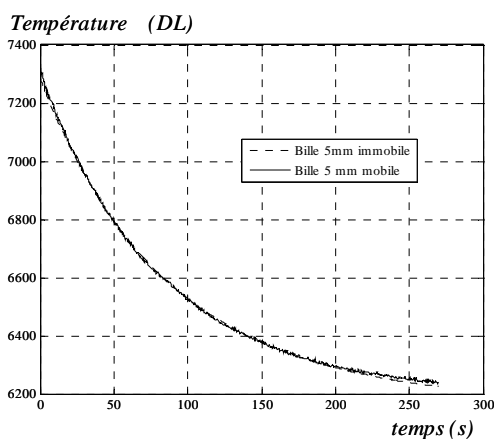


Figure 2 : Température moyenne avec et sans mouvement – billes de 5 mm

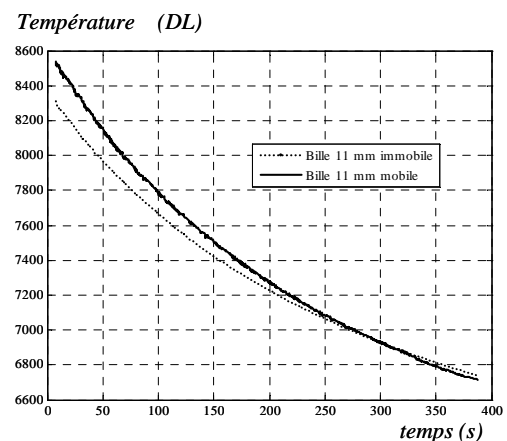


Figure 3 : Température moyenne avec et sans mouvement - billes de 11 mm

Ces courbes présentent l'allure d'une exponentielle décroissante typique d'une capacité thermique se déchargeant dans l'environnement à travers une résistance thermique. On peut donc rechercher pour chacune un temps caractéristique  $\tau$  correspondant à l'équation :

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} = -hS(T - T_\infty) \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{\rho c_p V}{hS} \quad (1)$$

On considère que le nombre de Biot reste faible. Cette équation en température moyenne est valide tant que les flux échangés ponctuellement lors des chocs entre particules ou contre les bords élastiques restent négligeables, et que l'ensemble des échanges thermiques avec le plateau et l'air ambiant peuvent être considérés globalement. Cette hypothèse peut être confirmée par la forte corrélation entre les termes de l'équation (1), représentée à titre illustratif sur la Figure 4 pour des résultats expérimentaux obtenus avec une bille de diamètre 5 mm en mouvement. L'écart au comportement linéaire correspond à l'effet du bruit de mesure sur l'opération de différenciation, mais aussi à de possibles échanges thermiques ponctuels lors de chocs.

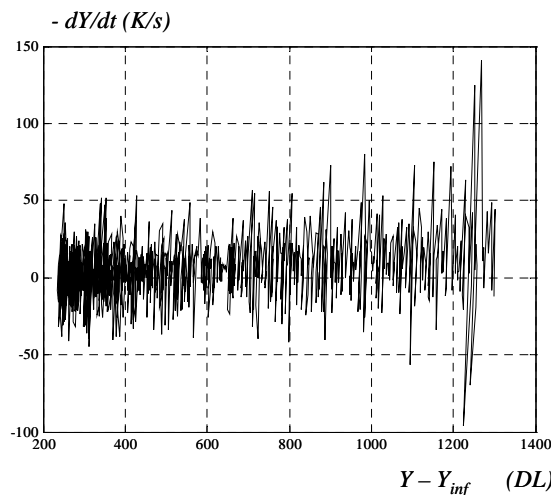


Figure 4 : corrélation entre dérivée temporelle et température ( bille mobile de 5 mm )

Le temps caractéristique  $\tau$  peut être estimé par l'estimateur des moindres carrés ordinaires, en opérant directement sur les mesures repérées en niveaux numériques, sans qu'il soit nécessaire de prendre en compte la sensibilité de la caméra ou l'émissivité de la cible :

$$\hat{\tau} = \frac{\langle (Y - Y_\infty), -dY/dt \rangle}{\|Y - Y_\infty\|_2^2} \quad (2)$$

Plusieurs essais ont été menés avec un plus grand nombre de sphères en mouvement aléatoire. A titre illustratif, la Figure 5 présente les champs de déplacements correspondant à quelques images successives prises avec une fréquence d'acquisition de 5 Hz.

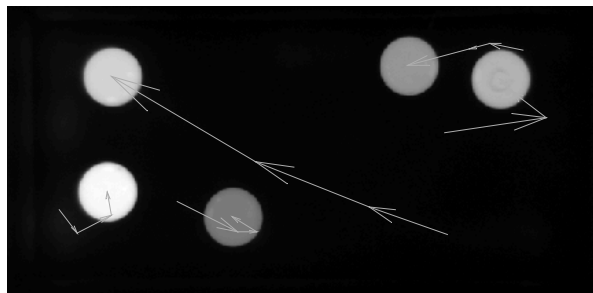


Figure 5 : Déplacements des billes (D = 8 mm)

On ne représente ici qu'un petit nombre d'images pour des raisons de clarté, l'image devenant rapidement illisible en raison du mouvement rapide et stochastique des billes. On peut remarquer que les cibles sont correctement suivies malgré certains déplacements importants. L'identification univoque des objets suivis n'est garantie que pour des températures moyennes différentes, même pour de faibles écarts. Lorsque les contrastes sont trop faibles, le suivi requiert l'utilisation des moments spatiaux d'ordre 2 ou 3 au lieu d'une simple moyenne.

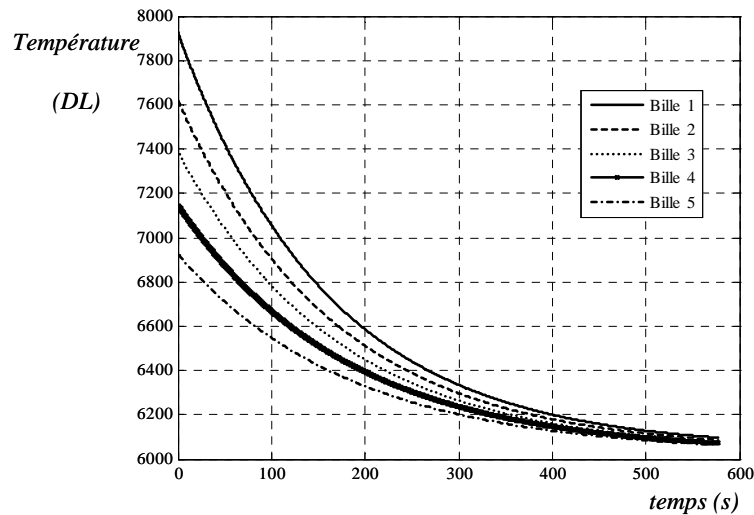


Figure 6 : Température moyenne de billes de 8 mm mobiles (en niveaux numériques)

L'évolution de la température moyenne des billes suivies sur la Figure 5 est présentée Figure 6, en niveaux numériques. On remarque encore un très faible niveau de bruit malgré les mouvements rapides et désordonnés des objets suivis.

Les résultats d'estimation correspondant aux figures précédentes sont synthétisés dans le Tableau 1 qui présentent le coefficient d'échange convectif estimé dans chaque cas, ainsi que le temps caractéristique, le nombre de Nusselt et le nombre de Biot correspondant. Les nombres de Biot estimés sont très faibles, ce qui valide le modèle utilisé dans ce cas, mais minimise également les erreurs de l'algorithme de suivi. En effet dans le cas d'objets à température non uniforme, les écarts liés aux erreurs de segmentation (lorsque l'on « sort » de l'objet) se traduiraient par des fluctuations plus importantes des températures moyennes.

Billes	$\tau$ (s)	$h$ $Wm^{-2}K^{-1}$	Nbre de Nusselt	Nbre de Biot
5 mm immobile	86.87	33.9	6.3	0.0036
5 mm mobile	81.22	36.2	6.7	0.0039
11 mm immobile	245.49	26.4	10.7	0.0062
11 mm mobile	239.58	27.0	11.0	0.0063
n° 1 - 8 mm mobile	160.98	29.3	8.7	0.0050
n° 2 - 8 mm mobile	166.37	28.3	8.4	0.0048
n° 3 - 8 mm mobile	170.47	27.6	8.2	0.0047
n° 4 - 8 mm mobile	179.04	26.3	7.8	0.0045
n° 5 - 8 mm mobile	184.22	25.6	7.6	0.0044

Tableau 1 : Temps caractéristiques, coefficients d'échange et nombre de Biot estimés

Le nombre de Nusselt estimé croit légèrement lorsque la bille est mobile. Ces variations peuvent s'expliquer par les différences de flux échangés lors de chocs aux parois ainsi qu'aux

effets de la vitesse. Le nombre de Nusselt croit également avec le diamètre des billes.

## 5. Conclusion

Ces premiers essais ont permis de tester et valider un algorithme de suivi d'objets mobiles. Les outils de morphologie mathématique s'avèrent bien adaptés à la détection, au suivi et à l'étiquetage d'objets par thermographie infrarouge, en tenant compte des échanges thermiques avec leur environnement.

Des cas plus sévères doivent maintenant être abordés, pour des matériaux moins conducteurs, pour des objets plus petits, de taille et forme très différentes. Les perspectives à plus long terme concernent l'étude du mélange des milieux granulaires, mais aussi l'estimation des résistances de contacts entre grains et leur corrélation à la distribution des contraintes mécaniques dans le milieu, ainsi que l'évaluation de l'enrobage de particules.

## Références

- [1] Sutton M, Wolters W, Peters W, McNeill S (1983) Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image Vis Comput* 1:133–139
- [2] Raffel M., Willert C., Kompenhans J., *Particle Image Velocimetry: A practical guide*, Springer, 1998, 253 p, ISBN 3-540-63683-8.
- [3] Haussecker H.W., "Simultaneous estimation of optical flow and heat transport in infrared image sequences", IEEE Workshop on Computer Vision Beyond the Visible Spectrum: Methods and Applications, 2000. Proceedings, 2000, p. 85 – 93. DOI 10.1109/CVBVS.2000.855253.
- [4] Bamford M., Batsale J.C., Reungoat D., Fudym O., Simultaneous velocity and diffusivity mapping in the case of 3-D transient heat diffusion: Heat pulse thermography and IR image sequence analysis. *QIRT Journal*, 5 1 97-126, 2008. doi:10.3166/qirt.5.97-126.
- [5] O. Fudym, H.R.B. Orlande, M. Bamford, J.C. Batsale, Bayesian approach for thermal diffusivity mapping from infrared images with spatially random heat pulse heating, *J. Phys.: Conf. Ser.* 135 012042 (8pp) doi: 10.1088/1742-6596/135/1/012042, 2008.
- [6] Rosner, M, A fixed point Kanade Lucas Tomasi tracker implementation for smart cameras, *Proc. SPIE*, Vol. 6764, 67640B (2007); DOI:10.1117/12.734151.
- [7] Duda, R. O. et P. E. Hart, « Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures », *Comm. ACM*, Vol. 15, pp. 11 - 15 (janvier 1972).
- [8] Jean Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology (vol.1)*, Academic Press, Londres, 1982.
- [9] S.C. Yang, Density effect on mixing and segregation processes in a vibrated binary granular mixture, *Powder Technology* 164 (2006) 65–74.
- [10] Hsiau S.S., Wu M.H., Chen C.H., Arching phenomena in a vibrated granular bed, *Powder Technology* 99 (1998) 185–193.
- [11] Filali M., Ladevie B., Fudym O., De Ryck A., Effet des contraintes mécaniques sur les propriétés thermophysiques d'un milieu granulaire, *Journées Internationales de Thermiques (JITH2005)*, Tanger 2005.