

# Des particules instrumentées pour une mesure de flux de chaleur – illustration en convection de Rayleigh-Bénard

par Jean-François PINTON , Yoann GASTEUIL , Pascal METZ , Woodrow L. SHEW et Mathieu GIBERT

En hydrodynamique, des approches récentes montrent que les problèmes liés au mélange sont mieux appréhendés lorsque l'on suit le mouvement des particules de fluide. Expérimentalement, il est maintenant possible de faire faire des mesures en temps réel à des particules passivement entraînées avec l'écoulement, et qui retransmettent les données par radiofréquence. Le cas décrit ici est celui de la convection thermique, où la particule instrumentée mesure les variations de température du fluide.

**Jean-François PINTON** est directeur de recherche CNRS, laboratoire de physique de l'ENS-Lyon

**Yoann GASTEUIL** est doctorant au laboratoire de physique de l'ENS-Lyon

**Pascal METZ** est ingénieur CNRS, laboratoire de physique de l'ENS-Lyon

**Woodrow L. SHEW** est post-doctorant au National Institute for Health, Bethesda, USA

**Mathieu GIBERT** est post-doctorant au Max Planck Institute, Gottingen, Germany

considérons est celui de la convection thermique, comme cas d'école pour le transport (ici de chaleur) dans les écoulements complexes.

Le montage considéré est celui de la **convection de Rayleigh-Bénard** dans l'eau, en **régime turbulent** (le nombre de Rayleigh est supérieur à  $10^8$ ). La sonde instrumentée a la même densité que l'eau. Cette sonde mesure la température environnante, à l'aide de thermistances placées en surface à son équateur, et la transmet en temps réel au moyen d'une liaison radiofréquence. Nous avons également suivi (optiquement) sa position durant l'expérience et obtenu ainsi le flux thermique local le long de sa trajectoire. Un point de vue lagrangien a donc pu être développé pour analyser la convection de Rayleigh-Bénard, donnant lieu à des informations inédites.

## 1. Contexte

Les études expérimentales en mécanique des fluides se sont longtemps appuyées sur des mesures eulériennes, c'est-à-dire enregistrées par des capteurs fixes dans le référentiel du laboratoire. Cependant dans les problèmes liés au transport (au mélange), une approche plus naturelle est de se placer dans le **référentiel lagrangien**, c'est-à-dire en se déplaçant avec les particules de fluide. Les mesures expérimentales sont fort difficiles dans ce contexte. Le développement récent de méthodes acoustiques [1] et optiques [2] [3] [4] a permis le suivi de traceurs lagrangiens et a établi l'avantage de cette approche [5]. L'étape naturelle suivante consiste à effectuer des mesures dans le repère du fluide en mouvement. Nous avons ainsi développé une sonde instrumentée de petite taille, entraînée par le mouvement du fluide et permettant d'effectuer des mesures et de les transmettre. Le cas que nous

## 2. Descriptif des dispositifs expérimentaux

Dans un premier temps nous nous intéressons à la sonde elle-même en détaillant la technologie et les choix spécifiques adoptés lors de sa conception. Nous détaillons ensuite le dispositif de Rayleigh-Bénard utilisé puis la procédure expérimentale.

### 2.1 Sonde thermique

La sonde est présentée sous forme de diagramme fonctionnel, puis le transfert de données par radiofréquences est détaillé – avec une attention toute particulière à la gestion de l'énergie. Nous décrivons enfin la mesure simultanée de position et de température.

MAX7044 : composant de Maxim Integrated Products

## 2.1.1 Vue d'ensemble

La sonde est constituée des éléments suivants, représentés sur la figure 1 :

- des dispositifs de mesure thermique : ce sont des thermistances ;
- un émetteur radiofréquence : associé à une antenne, il permet la transmission de la mesure ;
- une pile : elle alimente le circuit d'encapsulation et d'émission ;
- un interrupteur magnétique : il permet de mettre en route la particule ou de l'éteindre à distance.

L'ensemble est contenu dans une capsule de PVC sphérique, de 21 mm de diamètre, scellée hermétiquement. Sa masse est ajustée ainsi que, très légèrement, celle du fluide (par ajout d'une vingtaine de millilitres de glycérol) pour être isodense. Cette étape est cruciale pour ne pas introduire de biais. Dans les mesures rapportées ici, la densité effective,  $d$ , de la particule est de 1,005.

Les thermistances sont placées dans le réseau d'impédance d'un oscillateur en tension, de sorte que la fréquence du signal soit l'image de la température mesurée par les capteurs. Ce signal est

ensuite utilisé comme modulante de l'émission radiofréquence, l'onde porteuse étant générée par l'émetteur *via* un cristal. L'ensemble est alimenté par une pile bouton, commandé par l'interrupteur magnétique.

## 2.1.2 Transfert de données radiofréquence

Le transmetteur radiofréquence employé est le MAX7044. La technique utilisée ici est la transmission par modulation d'amplitude digitale OOK (*On-Off Keying*). La porteuse présente une fréquence de 315 MHz, sa stabilité est assurée par l'usage d'un cristal dans la boucle à verrouillage de phase du composant. La fréquence de la modulante est comprise entre 20 et 35 kHz, ce qui entre dans la plage de travail de l'émetteur. L'antenne utilisée est une antenne boucle de petite taille, permettant de la placer dans la capsule. Elle est moins efficace qu'une antenne de type  $\frac{1}{4}$  d'onde, mais a un encombrement largement inférieur (à cette fréquence, la longueur d'onde est de 1 m environ). Le tout consomme environ 5 mA et demande une tension d'alimentation comprise entre 2,1 et 3,6 V. C'est de loin le composant le plus gourmand en énergie du circuit, et la sonde émet en permanence.

## 2.1.3 Gestion d'énergie

La taille de la pile est un paramètre déterminant pour la sonde. Elle doit rentrer à l'intérieur de la coque et fournir suffisamment d'énergie pour alimenter le circuit. Notre choix s'est porté sur les piles boutons au lithium, de type CR1616. Ces piles font 16 mm de diamètre et 1,6 mm d'épaisseur, pour un meilleur compromis (actuel) entre capacité et volume. Dans les conditions d'un fonctionnement en continu, telles qu'adoptées lors de la mesure, elles donnent à la particule instrumentée une autonomie d'une heure environ. Une autre donnée importante est la masse de la pile. Il faut que la masse de l'ensemble capsule, circuit et pile soit inférieure à la masse d'eau équivalente.

Dans l'expérience, la durée de thermalisation (c'est-à-dire le temps nécessaire à l'établissement d'une convection turbulente en régime stationnaire) est de l'ordre de 48 heures. Or la mesure n'est effectuée qu'à partir de ce moment, et il faut donc pouvoir mettre la particule en marche à distance. Le dispositif employé ici est un interrupteur à effet Hall. Il se compose d'un capteur à effet Hall, relié à une bascule de type D. Lorsqu'un aimant est approché du circuit, le capteur Hall change sa sortie vers un état logique haut, ce qui fait changer l'état de l'entrée CP de la bascule. En connectant la sortie D à l'entrée Q de la bascule, on obtient un interrupteur pilotable par un champ magnétique extérieur. En position éteinte, le circuit consomme moins d'une centaine de microampères.

## 2.1.4 Mesure de température

À l'extérieur de la capsule, se trouvent quatre thermistances, placées au niveau de l'équateur. La tête sensible de ces capteurs dépasse de la capsule de 0,5 mm. Ces quatre thermistances sont introduites dans le réseau d'impédance d'un oscillateur fonctionnant en mode astable. L'oscillateur retenu ici est le LMC555 de *National Semiconductor*. À sa sortie,

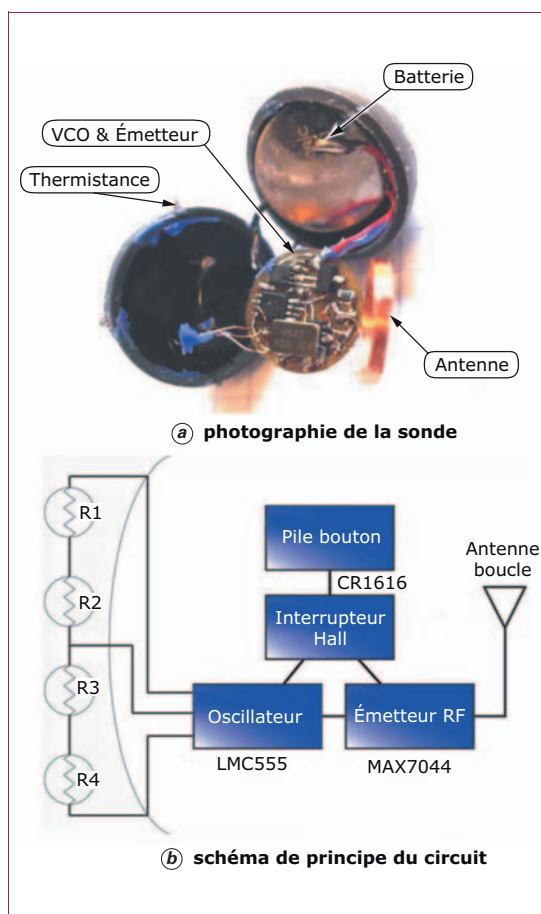


Figure 1 - Sonde [6] [7]

on obtient un signal carré, dont la fréquence est égale à :

$$1/f = (R_1 + R_2 + 2(R_3 + R_4)) C / 1,44$$

avec  $R_i$  résistance des thermistances,  
 $C$  capacité du condensateur fixe du circuit ( $C = 47$  pF).

Les thermistances font 0,8 mm, avec une résistance nominale de 230 k $\Omega$  (référence EPCOS B 57540G0234). Le temps de réponse est d'approximativement de 0,06 s dans ces conditions, ce qui est plus court que le temps de réponse le plus petit de l'expérience. Dans la gamme de températures (26-34 °C) et de fréquences correspondantes (22-26 kHz), la relation est linéaire à 2 % près entre les deux grandeurs.

Une fois le signal émis, il est capté par une antenne de réception (antenne commerciale LINX), amplifié de 26 dBm environ par une paire d'amplificateurs adaptés MAX2640. Le signal radio est ensuite démodulé par un récepteur superhétérodyne MAX1473. À sa sortie, l'acquisition est faite à l'aide d'une carte d'acquisition 14 bits à haute vitesse, NI-PXI5621. La fréquence moyenne est mesurée à la volée par un logiciel développé avec LabVIEW, et enregistrée à une fréquence de 10 Hz.

### 2.1.5 Mesure de position

Afin d'obtenir optiquement la position de la particule instrumentée, les parois latérales de la cuve de Rayleigh-Bénard sont transparentes. Une simple webcam est utilisée pour faire l'image du mouvement de la particule. En effet, vu la taille de la sonde et sa vitesse caractéristique, de l'ordre du centimètre par seconde, les résolutions spatiale et temporelle des modèles commerciaux courants sont suffisantes. Pour des mouvements plus intenses, l'emploi de caméras rapides serait nécessaire.

La cellule est éclairée au travers d'un verre dépoli, ce qui assure un éclairage homogène. La camera est interfacée par un ordinateur et le logiciel Matlab utilisé pour implémenter un algorithme de suivi en temps réel de la position de la sonde, à une vitesse de 5 Hz.

#### Approche lagrangienne en turbulence

À l'origine, il est plus naturel de décrire le mouvement turbulent d'un fluide à partir des mouvements de petites parties de ce fluide, isolées mentalement. Ces parties sont généralement nommées « **particules de fluide** ». Leur taille est très faible par rapport à la grande échelle de mouvement du fluide, tout en restant très grande devant les échelles moléculaires, permettant ainsi une description continue de la matière. Le mouvement d'un fluide au-dessus d'une cheminée, visualisé par l'ensemble des particules en suspension dans la fumée, correspond à cette manière de décrire un fluide. En admettant que les poussières de fumée aient le même mouvement que les particules de fluide dont elles occupent la place, on a alors directement accès au mouvement du fluide en suivant ces objets. C'est la description lagrangienne du fluide.

■ **Motivations** : dans de nombreux problèmes, dont ceux liés au mélange et au transport, il est intéressant de caractériser le mouvement individuel des particules de fluide. Du point de vue de la modélisation, les premières approches pour les mouvements turbulents ont décrit ce mouvement comme une marche au hasard, une particule de fluide étant soumise à une force aléatoire – un bruit blanc sans corrélation temporelle. Les vérifications expérimentales ont tardé car les mesures lagrangiennes sont très difficiles : il faut suivre des particules de taille micronique (elles doivent être plus petites que toutes les échelles du mouvement pour être des traceurs) avec une résolution temporelle de l'ordre de la milliseconde. Ce n'est qu'au début des années 2000 que cela a été possible par des méthodes acoustiques [1] et optiques [2]. Les mesures ont montré deux effets inattendus :

- les forces s'exerçant sur les particules de fluides sont extrêmement intermittentes, avec une probabilité très significative d'observer des événements à plusieurs dizaines d'écart types de la valeur moyenne ;

- ces forces possèdent en outre une importante corrélation temporelle : il en résulte une mémoire dans la dynamique aux temps longs des particules.

Ces deux observations sont en contradiction avec les propriétés du bruit blanc gaussien de la marche au hasard. Elles ont conduit à un ré-examen de nombreuses propriétés [5] de la turbulence.

■ **Réalisation pratique** : il faut s'assurer du mimétisme de comportement entre une particule de fluide théorique et l'objet qui la représente. Cela revient à considérer les forces qui s'exercent sur l'objet dans l'écoulement. Ces forces peuvent venir de sa masse (si la densité du fluide est différente de celle de l'objet), de sa vitesse (si elles sont différentes, alors il va y avoir création d'une traînée perturbant le reste du fluide et le mouvement), etc. En pratique, la condition sur les forces s'exerçant sur un objet pour qu'il soit lagrangien implique souvent une taille très faible par rapport à l'écoulement. Lorsque la taille du « traceur » est significative (en restant de même densité que le fluide), il échantillonne le mouvement du fluide avec un filtrage temporel et spatial.

MAX2640 : composant de Maxim Integrated Products

MAX1473 : composant de Maxim Integrated Products

## 2.2 Dispositif de Rayleigh-Bénard

Le dispositif expérimental de convection de Rayleigh-Bénard se présente comme un réservoir de 16 L, de forme parallélépipédique. Il est plus amplement décrit dans les références [8] [9]. Ses dimensions sont de 40 x 10 cm<sup>2</sup> de section, sur une hauteur  $H$  de 40 cm. Les parois sont en Plexiglas, et épaisses de 25 mm. Les plaques du haut et du bas sont en cuivre. Par la plaque du bas, un chauffage par résistance chauffante impose un flux thermique de 230 W. La plaque du haut est maintenue à une température constante de 19 °C, au moyen d'un bain thermique. La température moyenne mesurée est de 30 °C environ, et un écart de température  $\Delta T$  de 20,3 °C s'installe en régime établi. L'ensemble est mesuré par des capteurs statiques de température.

Avec ces caractéristiques, on peut calculer les grandeurs adimensionnées suivantes, qui caractérisent le régime atteint par la convection :

— **le nombre de Rayleigh** : il caractérise le forçage, c'est-à-dire l'intensité de la force d'Archimède comparée aux effets diffusifs ;  $Ra = g\beta\Delta TH^3/\nu\kappa$  où  $\beta$  est le coefficient d'expansion thermique de l'eau,  $\kappa$  la diffusivité thermique et  $\nu$  la viscosité de l'eau. Ici, le nombre de Rayleigh vaut  $3 \cdot 10^{10}$  indiquant un régime de convection turbulente ;

— **le nombre de Nusselt** : il caractérise la réponse du système, par le rapport du flux de chaleur effectivement observé au flux de chaleur purement conductif qu'il y aurait si le fluide était immobile. Ici, le nombre de Nusselt vaut 168.

Dans ces conditions, l'écoulement s'organise traditionnellement en un large mouvement d'ensemble, auquel se superposent les fluctuations turbulentes. Ce mouvement d'ensemble a la forme d'un « rouleau » dont la taille est celle de la cellule (dans les conditions où le rapport d'aspect est 1, comme ici). Ce mouvement est tel que le fluide parcourt la cellule en environ 100 s (se chauffant le long de la plaque du bas, montant sous l'action des forces d'Archimède, se refroidissant au contact de la plaque du haut et redescendant vers la plaque du bas puisque devenu plus lourd que le fluide ambiant). On peut évaluer deux longueurs associées à cet écoulement : la hauteur de la couche limite turbulente vaut aux environs de 2 mm, et celle de la couche limite thermique vaut 1,2 mm. Ces épaisseurs sont largement plus petites que le diamètre de la particule qui sonde ainsi la zone de mélange plutôt que la zone de « production » des fluctuations de chaleur.

### 3. Description des mesures

Nous rapportons d'abord les mesures et leur exploitation avant de discuter leur apport par rapport aux techniques eulériennes.

#### 3.1 Mesures de température et de position

La mesure de température est présentée sur la figure 2. Les mesures de position montrent un mouvement d'ensemble assez régulier, avec une oscillation des coordonnées qui correspond au parcours de la particule dans le rouleau de convection principal. La température enregistrée au cours du déplacement est beaucoup plus fluctuante. Une meilleure façon de regarder les signaux est de représenter la trajectoire de la sonde, et de colorer chaque point en fonction de la mesure de température effectuée. On obtient la figure 2a. On voit ainsi que le fluide qui se réchauffe sur la plaque inférieure acquiert une densité plus faible que son environnement, s'élève ensuite vers la plaque supérieure froide où la chaleur est échangée ; le fluide devenu plus froid (et donc plus dense) coule ensuite vers la plaque du bas. C'est ce mouvement principal qui crée ce que l'on appelle le « **rouleau de convection** ». On peut aussi distinguer dans les coins supérieur droit et inférieur gauche des petits rouleaux secondaires de recirculation.

Naturellement, dans la gamme élevée de forçage de cette expérience, ce mouvement est irrégulier (« turbulent »). À partir de déviation standard de la vitesse

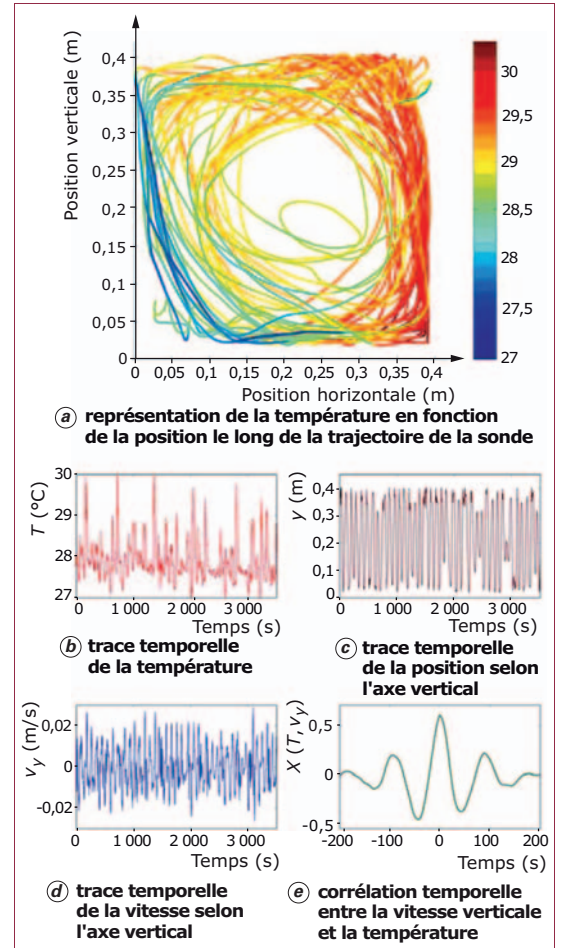


Figure 2 – Résultats des mesures de température et de vitesse de la sonde

mesurée ( $u_{rms}$ ) et en définissant une échelle de longueur caractéristique  $\ell$  de la turbulence comme l'écart du mouvement instantané à la trajectoire moyenne, on obtient un nombre de Reynolds turbulent :

$$Re^T = u_{rms}\ell / \nu \approx 60$$

en très bon accord avec les estimations eulériennes traditionnelles dans cet écoulement. On s'attend donc à ce que les grandeurs mesurées montrent un large spectre de fluctuations spatiales et temporelles et on est conduit à faire une analyse statistique des mesures.

#### 3.2 Statistique des variations de vitesse et de température

Les spectres de puissances des signaux de vitesse et de température sont représentés sur la figure 3.

■ Un large pic est visible à basse fréquence, correspondant au mouvement d'ensemble du rouleau de convection principal ( $T_R \approx 100$  s). En deçà, les spectres sont plats car le mouvement principal est peu corrélié sur des temps longs.

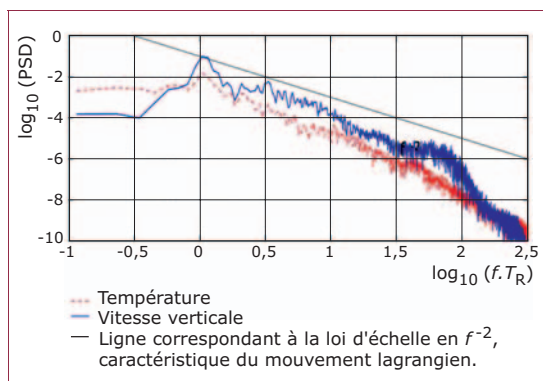


Figure 3 – Densité spectrale de puissance pour les enregistrements de la température et de la vitesse verticale de la sonde

■ Au-delà, le comportement spectral provient des fluctuations turbulentes. Le spectre de la vitesse est proche de celui qui est attendu pour un traceur lagrangien dans un écoulement turbulent. En effet, pour une turbulence développée on fait souvent l'hypothèse que les forces agissant sur une particule de fluide sont complètement aléatoires, autrement dit que l'accélération lagrangienne est bien représentée par un bruit blanc. Le spectre d'accélération est ainsi plat (une densité spectrale indépendante de la fréquence,  $a^2(\omega) \approx \omega^0$ ), soit un spectre de vitesse décroissant en  $v^2(\omega) \approx \omega^{-2}$ . C'est ce que l'on observe sur une plage de fréquence couvrant une décade et demie de fréquences.

■ Aux plus hautes fréquences, les fluctuations de vitesse sont filtrées par la taille de la particule qui ne peut suivre les mouvements turbulents aux échelles plus petites que sa taille. Pour la température, les fluctuations les plus rapides sont enregistrées par les petites thermistances, et le spectre est en accord, dans son extension fréquentielle, avec les mesures eulériennes par des sondes fixes [9]. De même, on voit que la dynamique des fluctuations de température est résolue sur plus de 70 dB (SNR) d'amplitude et 3 décades de fréquences.

Ces observations, associées à d'autres tests statistiques sur le comportement multi-échelle des signaux [7], montrent que la mesure par la particule instrumentée est effectivement lagrangienne : sa statistique de vitesse est celle du mouvement du fluide qui l'advection, avec la signature turbulente attendue.

### 3.3 Flux thermique local

Le mouvement de convection répond à un impératif de transport de la chaleur, et c'est donc cela qu'il faut analyser. Nous définissons le flux thermique local, dont l'étude permet de mieux comprendre la nature de la convection turbulente.

#### 3.3.1 Définition et mesures

D'un point de vue dynamique, ce qui compte dans le transport c'est à la fois sa rapidité et le volume qui peut être embarqué. Pour la chaleur, il s'agit donc du produit de la vitesse par la variation de température (par rapport à la température moyenne). L'ensemble

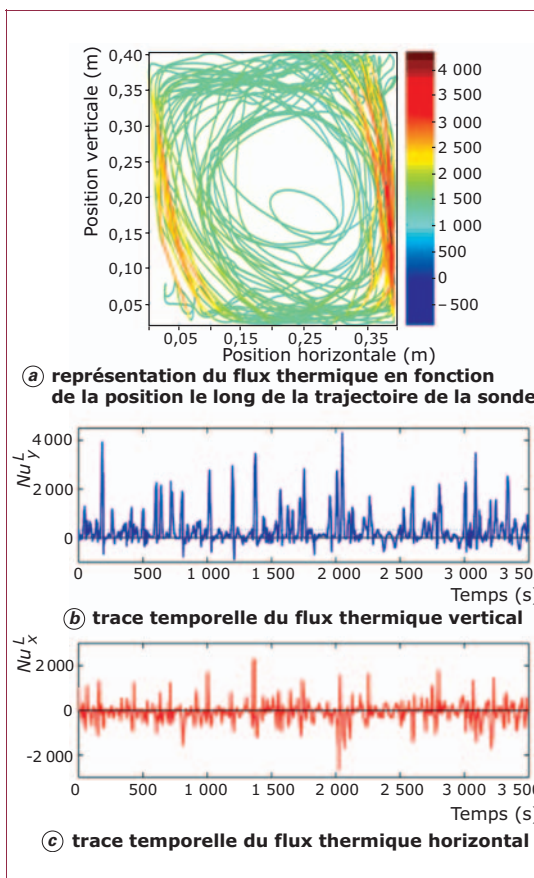


Figure 4 – Flux thermique local

est rendu non dimensionnel en divisant par le flux uniformément conductif :

$$Nu_{x,y}^L(t) = 1 + (H/\kappa\Delta T)v_{x,y}(t)\theta(t)$$

avec  $v_{x,y}(t)$  vitesse horizontale ou verticale,  
 $\theta(t)$  écart à la température moyenne.

La composante verticale  $Nu_y(t)$  est naturellement la plus importante. Les traces temporelles sont montrées sur la figure 4. On observe une grande variabilité pour les flux horizontaux et verticaux. Le flux horizontal est bien sûr de moyenne nulle (le transport est vertical dans l'expérience), mais il montre néanmoins de très grandes fluctuations. Celles-ci sont également présentes sur le flux vertical qui détermine l'efficacité du transport de chaleur. On observe que celui-ci vaut en moyenne  $\langle Nu_y \rangle = 328$ , environ le double du flux global moyen. De plus, la trace temporelle  $Nu_y(t)$  montre des pics très intenses, jusqu'à plus de 10 fois la valeur moyenne.

#### 3.3.2 Panaches thermiques

L'ensemble de ces comportements s'interprète de manière cohérente si on attribue le transport thermique majoritairement aux mouvements de panaches thermiques (ou encore plumes thermiques) qui se

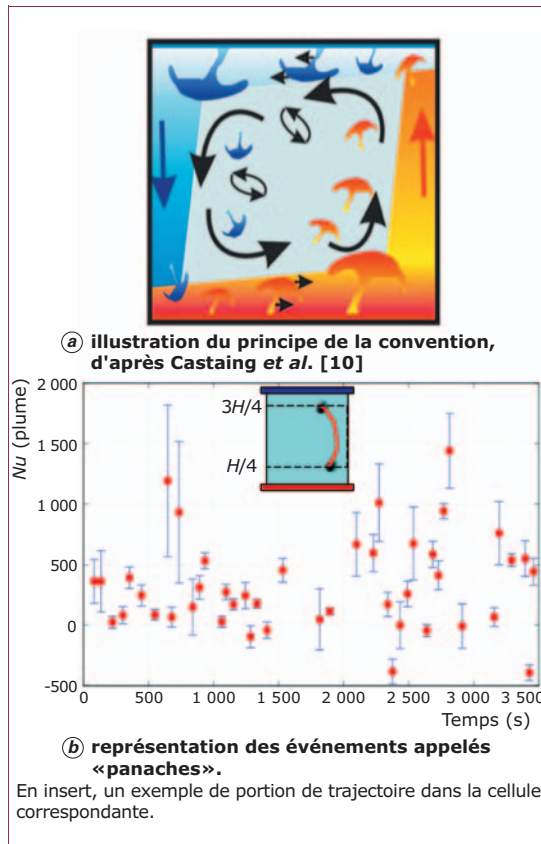


Figure 5 – Caractère particulier du flux thermique local

détachent d'une paroi pour aller vers l'autre. Ces événements se produisent alors que de la chaleur s'accumule dans les couches limites thermiques et hydrodynamiques pour former des sous-volumes de fluide qui se détachent ensuite des couches limites puis se meuvent de manière cohérente. Ces mouvements de fluide transportent d'importantes quantités de chaleur. C'est l'image de la convection thermique proposée par

Kadanoff et son équipe [10] et confirmée dans cette étude et dans d'autres, plus indirectes [11] [12] [13].

Pour mieux illustrer le rôle des panaches thermiques, nous avons isolé dans la trajectoire de la particule les événements correspondant à un mouvement compris entre  $H/4$  et  $3H/4$  (les mouvements ascendants et descendants des panaches). Sur chacun de ces événements, on a calculé la moyenne du flux thermique et sa variance. Sur la figure 5, on représente ces moyennes avec des points rouges et la variance par une barre d'erreur. On voit que la quantité moyenne de chaleur transportée par un panache varie considérablement d'un événement à l'autre. Cependant, la valeur moyenne de ces événements est  $\langle Nu_{y, \text{panache}} \rangle \approx 866$ , presque trois fois le transport lagrangien moyen ! Il devient alors clair que le contrôle du flux thermique en convection passe par celui de l'émission des panaches thermiques. Dans ce type d'expérience, il est possible de l'augmenter en utilisant une plaque inférieure très rugueuse, à même de favoriser le développement de points chauds pouvant nucléer des panaches thermiques [14] [15]. D'un point de vue plus fondamental, il semble que la structure sous-jacente de ces panaches soit autosimilaire, permettant d'envisager une modélisation statistique originale du flux de chaleur.

#### 4. Conclusions et perspectives

L'utilisation d'une mesure lagrangienne, telle que celle que réalise la particule instrumentée utilisée ici, a permis de mettre en évidence le rôle essentiel joué par les panaches thermiques dans le transport de chaleur. Si leur rôle et leur existence ont été très largement discutés dans la littérature, notre approche d'une mesure dans le référentiel du fluide en mouvement en donne une illustration et une mesure directes.

Ce type de sonde, autonome et délivrant en temps réel une mesure intrinsèque au transport peut être utilisée dans de nombreux domaines. Les progrès constants de la micro-électronique permettent d'espérer obtenir des sondes de plus en plus petites, et de moins en moins gourmandes en énergie. La variété de capteurs qu'il est possible d'embarquer s'accroît sans cesse avec les progrès de la micro-électronique.