

Analyse expérimentale de la dynamique générée par un fort gradient de température volumique dans un nanofluide

Experimental analysis of fluid dynamics driven by a large temperature gradient in a nanofluid

Léa CHERRY^{1*}, Julien MANHES², Mathieu LETZELTER², Gilles FLAMANT², Anita HAEUSSLER², Françoise BATAILLE¹

¹PROMES-CNRS (UPR 8521), Université de Perpignan Via Domitia
Rambla de la thermodynamique, 66100 Perpignan (France)

² PROMES-CNRS (UPR 8521), 7 rue du Four solaire, 66120 Font-Romeu, France

*(auteur correspondant : lea.cherry@promes.cnrs.fr)

Résumé - Les fluides caloporteurs des centrales solaires à concentration sont soumis à des forts gradients de température lors de leur passage dans les récepteurs solaires, mais les interactions entre fluide et gradient de température sont encore mal comprises. Nous présentons dans cet article un dispositif expérimental simple permettant d'étudier de manière fondamentale la dynamique d'un nanofluide semi-transparent générée par un fort gradient de température volumique. Ce gradient est créé par flash solaire. Nous mettons en évidence deux régimes de transferts thermiques selon l'énergie du flash solaire.

Abstract - The heat transfer fluids in concentrated solar power plants are subjected to high temperature gradients as they pass through the solar receivers, but the interactions between the fluid and the temperature gradient are still poorly understood. In this article, we present a simple experimental setup that allows for fundamental study of the dynamics of a semi-transparent nanofluid generated by a large volumetric temperature gradient. This gradient is created by a solar flash. We highlight two heat transfer regimes depending on the intensity of the solar flash.

1. Introduction

Les centrales solaires à concentration utilisent des miroirs afin de concentrer le rayonnement solaire direct sur un récepteur solaire. A l'intérieur de ce récepteur solaire s'écoule un fluide caloporteur, qui est chauffé et acheminé vers des systèmes de stockage thermique. L'énergie ainsi emmagasinée peut être valorisée directement sous forme de chaleur ou convertie en électricité. Les températures atteintes par le fluide caloporteur dépendent du type d'installation, et surtout de la nature du fluide : eau, huile thermique, sels fondus, air, lits fluidisés... Par ailleurs, les absorbeurs solaires peuvent être surfaciques (parois opaques) ou volumiques (milieux poreux ou nanofluides).

Pour tous les dispositifs solaires concentrés, il est essentiel de comprendre et de maîtriser finement le comportement du fluide caloporteur lors de son écoulement au sein du récepteur solaire, afin de maximiser les transferts thermiques entre le récepteur et le fluide et d'optimiser l'efficacité globale de la centrale solaire, tout en évitant les points chauds qui peuvent menacer l'intégrité structurelle du récepteur solaire. Cependant, les hautes températures et forts gradients thermiques rencontrés à l'intérieur des récepteurs solaire tendent à perturber les écoulements des fluides caloporteurs, selon des mécanismes d'interactions encore peu connus et peu étudiés.

Le transport de fluide et les instabilités induits par un gradient de température volumique ont été étudiés dans des contextes variés, et plusieurs mécanismes physiques d'interaction entre dynamique du fluide et transferts thermiques ont été mis en évidence dans des configurations très diverses. Ainsi, il a été montré qu'un gradient de température pouvait générer un gradient de tension superficielle à la surface d'un fluide, ce qui entraîne du mouvement par cisaillement [1], [2]; les phénomènes de convection naturelle ont été largement étudiés, et ont mis en évidence l'apparition d'instabilités générées par un différentiel de masse volumique au moyen de la poussée d'Archimède [3], [4]; la formation puis l'éclatement de bulles, parfois dues à un surplus d'énergie thermique, génèrent également des structures instables dans un fluide préalablement au repos [5].

Notre objectif est donc de créer un dispositif expérimental simple qui permette d'émuler certaines des caractéristiques d'un récepteur solaire, pour mettre en évidence la génération de différents régimes dynamiques par application d'un gradient de température volumique. Pour cela, nous utilisons un nanofluide de graphène prometteur pour des applications comme fluide caloporteur dans les récepteurs solaires [6] ou dans d'autres configurations [7]. Nous irradiions le nanofluide de graphène au repos par des flashes solaires très courts générés par une parabole solaire. En observant l'évolution du champ de température au sein du fluide grâce à une caméra thermique, nous cherchons à déterminer les phénomènes physiques prépondérants à l'origine des interactions entre gradients thermiques générés par l'absorption volumique du rayonnement et la dynamique du fluide.

Nous présentons donc dans cet article le dispositif expérimental développé, ainsi que la caractérisation des différents éléments qui le composent; nous proposons ensuite une description et une analyse des résultats qui contribuent à répondre à la problématique énoncée ci-dessus.

2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure 1. Un nanofluide de graphène est positionné dans un récipient métallique de 20 centimètres de diamètre, sur une hauteur de 1 cm au foyer d'une parabole de 1,5 m de diamètre. Nous irradiions ensuite le nanofluide au moyen d'un flash solaire qui dure entre 0,6 et 1,5 secondes. Le diamètre de la tâche focale est d'environ 10 mm. Un boîtier électronique permet de contrôler les volets mobiles situés entre le miroir plan primaire qui suit le soleil et la parabole qui concentre le rayonnement réfléchi. Il permet de piloter précisément (à 30 ms près) les temps d'ouverture, de palier et de fermeture de l'obturateur. Ce boîtier de contrôle permet également de régler la puissance du flash, en imposant l'ouverture maximale des obturateurs, comprise entre 0 et 100 %.

La surface du nanofluide est observée à l'aide de deux caméras, l'une infrarouge et l'autre visible. La caméra infrarouge nous permet de mesurer les champs de température au sein du nanofluide, et de suivre leur évolution pendant une dizaine de secondes après le flash. D'un autre côté, la caméra visible permet d'observer la surface du fluide et ses déformations mécaniques, comme des ondes ou bulles. Les différents éléments de ce dispositif expérimental ont été caractérisés précisément, comme exposé dans les parties suivantes.

Nous avons identifié plusieurs paramètres de contrôle : la température du fluide au repos, l'épaisseur optique du nanofluide, les temps d'ouverture, de fermeture et de palier des volets de l'obturateur, ainsi que le pourcentage d'ouverture des volets, le DNI (Direct Normal Irradiance) incident, qui conditionne la puissance et la distribution du flux solaire, la température de l'air ambiant. Nous avons ensuite déterminé des séries d'essais expérimentaux à effectuer afin de déterminer l'influence de chacun de ces paramètres. Chaque série devait ne faire varier qu'un

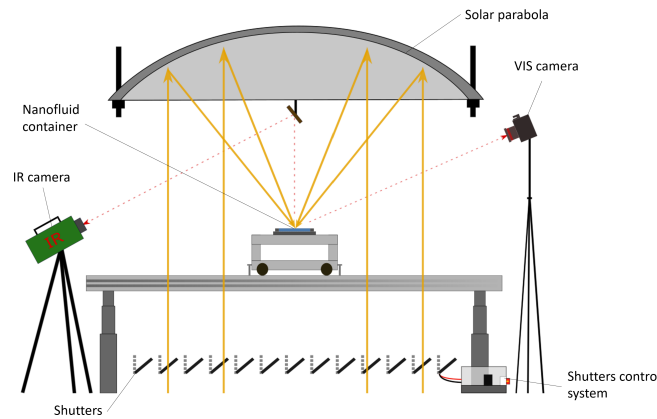


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental

seul paramètre pour une dizaine de valeurs, et chaque série était effectuée deux à trois fois afin de garantir la répétabilité des résultats. Après plusieurs tests avec diverses configurations, il a été décidé de faire des flashes solaires espacés d'environ une minute trente secondes, où le fluide est homogénéisé après chaque flash. En effet, pour des flashes de forte intensité, le nanofluide peut localement atteindre la température d'ébullition dans la zone irradiée, ce qui peut affecter les résultats du flash suivant. A noter qu'à chaque homogénéisation, la température du fluide loin de la zone d'irradiation est mesurée et monitorée. L'élévation de température au cours d'une série de douze flashes est comprise entre 0,2 et 0,4 degrés Celsius, soit 2 à 5 % de différence. Cette élévation de température au cours d'une série est considérée comme négligeable.

Nous présentons dans cet article les résultats extraits de séries expérimentales effectuées en faisant varier l'énergie du flash solaire. L'énergie du flash solaire est contrôlée en faisant varier deux paramètres, la puissance et la durée du flash. La puissance du flash dépend du pourcentage d'ouverture de l'obturateur. Nous l'avons fait varier de 10 à 100 % par intervalles de 5 % en maintenant les temps d'ouverture, de fermeture et de palier constants. Nous avons étudié l'influence de la durée du flash entre 0 à 1200 ms par intervalle de 100 ms pour une ouverture fixe de l'obturateur de 70 %, et un temps d'ouverture et de fermeture de 300 ms chacun. Nous avons également réalisé des tests en faisant varier les temps d'ouverture et de fermeture de l'obturateur, c'est à dire la vitesse de chauffage et de refroidissement. Ces essais ont montré qu'il est préférable de minimiser ces durées afin d'obtenir des résultats reproductibles. Des séries expérimentales portant plus spécifiquement sur l'épaisseur optique — c'est-à-dire la concentration du fluide et son épaisseur — sont actuellement en cours de réalisation et d'analyse, et feront l'objet de communications ultérieures.

2.1. Parabole solaire

La parabole a été caractérisée au moyen d'une étude fluxmétrique et calorimétrique, permettant de déterminer la distribution de l'éclairement au foyer (figure 2), puis la puissance reçue par le nanofluide pour différentes ouvertures des obturateurs (figure 3). Cette puissance est obtenue par intégration surfacique de la densité de puissance au point focal mesurée pour différents pourcentages d'ouverture des obturateurs.

La figure 2 montre que la tâche focale est circulaire, d'environ un centimètre de diamètre en prenant comme référence l'isoplète de densité de puissance 1900 kW/m^2 . De plus, l'éclairement n'est pas uniforme dans toute la tâche focale : la densité de puissance suit une distribution gaus-

sienne, avec un pic de densité de puissance très local qui atteint environ 10 000 kW/m² au centre de la tâche focale.

Ce graphique permet de mettre en évidence clairement les différences entre l'utilisation d'une parabole et l'utilisation d'un laser dans des dispositifs expérimentaux visant à provoquer une élévation de température locale. En effet, la tâche focale est très large, le rayonnement est polychromatique et non uniforme dans la tâche focale. Ces différences limitent les possibilités de comparaison avec la littérature, et ce d'autant plus quand les lasers utilisés sont de faible puissance [1].

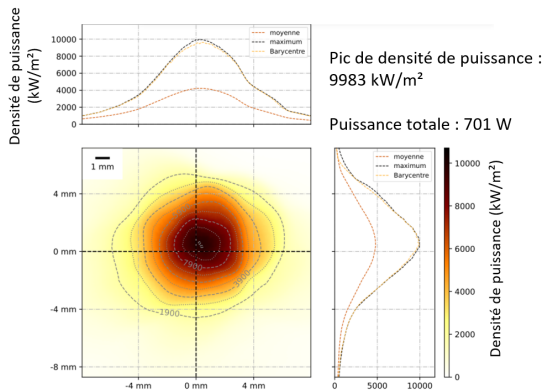


Figure 2 : Caractérisation de la parabole au point focal

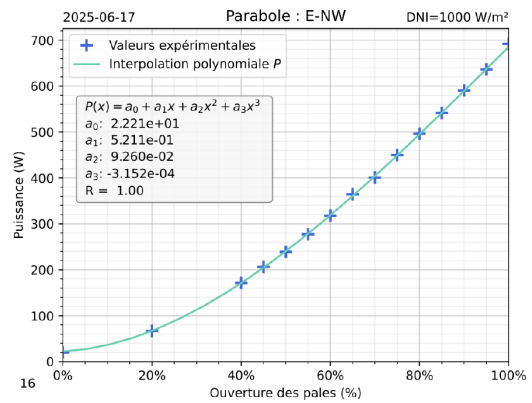


Figure 3 : Puissance du flash thermique en fonction de l'ouverture des obturateurs

2.2. Nanofluide de graphène

Le nanofluide utilisé est de l'eau de graphène, produit par la société CarbonWater. Ce fluide est identique à celui utilisé par [6], et nos essais font donc suite à une caractérisation expérimentale de ce nanofluide en tant que fluide caloporteur d'un récepteur solaire à absorption volumique. Ce nanofluide est décrit comme un fluide semi-transparent gris sombre. Il possède une viscosité allant de 0,05 à 0,2 Pa.s (à 20°C et 1 g/L) avec un comportement rhéologique non-newtonien de rhéofluidifiant. De plus, les nanoparticules ont des tailles comprises entre 0,1 et 6 μm . Ces données ont été fournies par le fabricant. La température d'ébullition du nanofluide est de 95°C, prise égale à celle de l'eau à une altitude de 1600 m.

Nous nous sommes intéressés aux propriétés optiques du nanofluide, car elles conditionnent l'absorption du rayonnement solaire concentré et l'élévation de température qui en résulte, à l'origine de la dynamique observée dans le fluide. Nous utilisons ici un fluide dilué, à une concentration de 0,75 g/L. Nous avons caractérisé l'absorptivité du nanofluide à l'aide d'un spectrophotomètre à sphère intégrante (figure 4), ce qui nous a permis de calculer le coefficient d'absorption de nanofluide, égal à 140 m⁻¹. Ce coefficient d'absorption est bien plus élevé que celui de l'eau (40 m⁻¹), ce qui met en évidence les qualités optiques du nanofluide et sa forte capacité d'absorption volumique.

Nous avons également testé la stabilité de la suspension de graphène dans l'eau. En effet, les flashes solaires importants en particulier peuvent causer de l'ébullition, ce qui aurait pu déstabiliser la suspension de graphène et diminuer les propriétés d'absorbance du nanofluide. Nous pouvons cependant constater sur la figure 4 qu'au contraire, l'absorptivité du nanofluide augmente légèrement après les séries expérimentales. L'ébullition du nanofluide mène donc à une évaporation qui concentre légèrement le fluide, sans le déstabiliser.

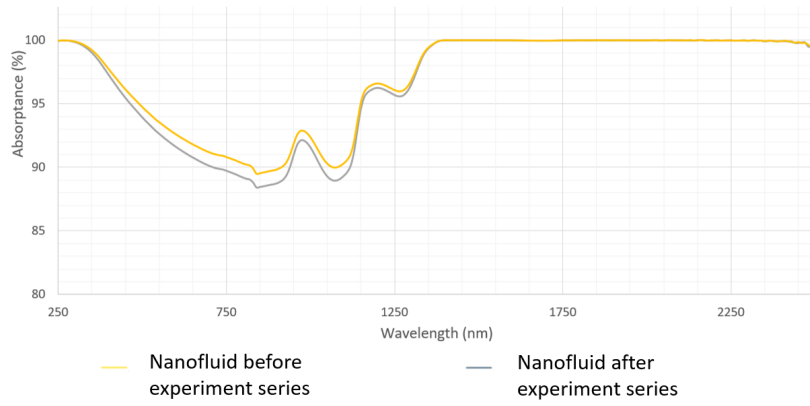


Figure 4 : Graphe d'absorptivité du nanofluide pour une épaisseur de fluide de 10mm

2.3. Analyse des résultats

La caméra infrarouge permet l'enregistrement de données pour des durées arbitrairement longues. Les données brutes sont produites sous la forme de fichiers au format *nvf*, spécifiques à la caméra. Un code de post-traitement a ensuite été développé sous Python afin de convertir ces données en images exploitables au format *jpeg*. Chaque image est acquise à trois temps d'exposition distincts (1850, 620 et 240 μ s). Chaque temps d'exposition permet de capturer une gamme de température, et la combinaison des trois temps d'exposition permet donc d'obtenir des images sans saturation qui donnent un niveau de précision équivalent tout le long de la gamme de température traitée, de 15 à 95°C. Un travail conséquent a été fourni afin de reconstituer une seule image non saturée en température à l'aide de ces trois images. Nous avons ainsi obtenu des images très peu saturées, ce qui permet à la fois d'analyser qualitativement les champs de température et de mesurer quantitativement des quantités comme la vitesse de propagation du front de température.

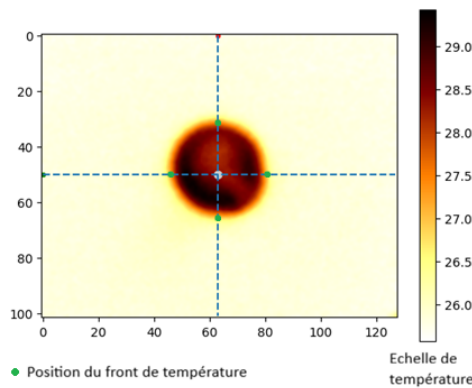


Figure 5 : Tracking de la position du front de température dans quatre directions

L'exploitation quantitative des images obtenues nécessite le suivi du front de température. Il a été décidé de définir le front de température comme le lieu du fluide où la température est 5 % supérieure à la température loin du foyer. La vitesse de propagation du front de température est alors obtenue en traquant la position du front de température X_n à un temps t_n , puis la vitesse au temps n est égale à $\frac{X_{n+1}-X_n}{t_{n+1}-t_n}$. L'évolution de la vitesse est ensuite suivie pendant

les dix secondes enregistrées. Elle est souvent relativement stable durant les quelques secondes suivant le flash, ce qui nous permet de faire une moyenne glissante sur quelques secondes pour réduire le bruit associé au calcul de la vitesse. La vitesse est également calculée suivant quatre directions de l'image comme illustré en figure 5, ce qui permet de faire une moyenne des quatre directions dans le cas où les transferts de chaleur sont isotropes, et de comparer les vitesses dans les différentes directions dans le cas contraire.

3. Résultats

Nous observons deux régimes distincts : un régime stable et un régime instable. Le régime est stable pour de faibles énergies, et il est caractérisé par un mode de transfert thermique isotrope au sein du nanofluide après le flash solaire, ainsi que l'absence de phénomènes visibles en surface du nanofluide. Le régime instable apparaît pour des énergies plus importantes, et il se caractérise par l'apparition de panaches thermiques horizontaux à la surface du nanofluide ainsi que l'apparition de bulles au foyer au moment de l'irradiation solaire et d'ondes à la surface du fluide. Le nombre et la direction des panaches sont variables et aléatoires : nous en avons observé entre un et six pour les flashes solaires les plus importants. Nous avons également mis en évidence l'existence d'un régime de transition entre ces deux régimes, caractérisé par l'absence de panaches mais l'apparition d'au moins une bulle au foyer lors du flash solaire. L'apparition de bulles au foyer précède donc l'apparition de panaches, donc le régime instable ne peut apparaître que si il y a formation de bulles dans la zone éclairée.

L'enjeu de notre travail a ensuite été d'analyser plus finement les champs de température pour chaque régime. Pour cela nous avons calculé la vitesse de propagation du front de chaleur dans le cas du régime stable, et nous avons classifié les apparitions de divers panaches pour le régime instable.

3.1. Régime stable

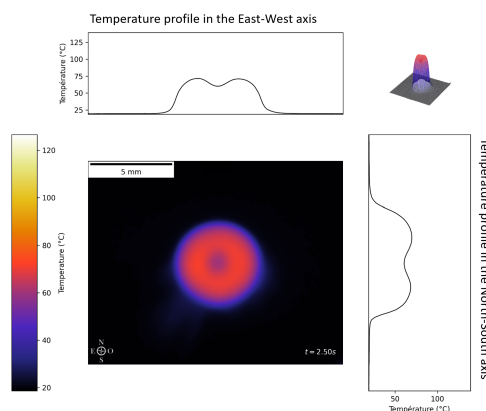


Figure 6 : Température de surface du nanofluide 2,5 s après un flash solaire de 250 J

Le régime stable est observé pour des énergies faibles, ce qui conduit à l'absence de bulles et un transfert isotrope de la chaleur au sein du nanofluide. Il n'y a pas de bulle observée, ce qui implique que la température d'ébullition de 95°C n'est pas atteinte. Le gradient de température entre le fluide loin du flash solaire et le foyer du flash augmente donc avec l'énergie du flash solaire, allant de 20°C pour les flashes les plus faibles à 80°C lorsque la température d'ébullition est atteinte. Nous avons pu mesurer la vitesse de propagation du front de température pour

chacun des deux scénarios testés : augmentation de l'énergie du flash par la puissance (figure 7) et par la durée (figure 8). Dans tous les cas, la vitesse mesurée est de l'ordre du mm/s.

Nous pouvons observer que dans la figure 7, la vitesse de propagation du front de température augmente linéairement avec l'énergie du flash, tandis que dans le second cas (figure 8), la vitesse de propagation du front de température est sensiblement constante lorsque l'énergie du flash augmente. Ces différences de résultats montrent que la puissance du flash solaire est le moteur du processus thermique.

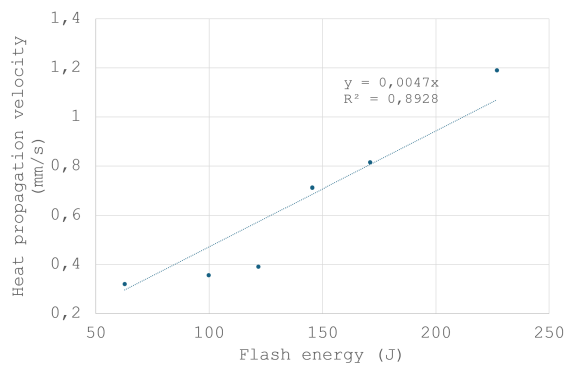


Figure 7 : Vitesse de propagation du front de température en fonction de l'énergie du flash solaire en régime stable, à durée de flash constant et puissance variable

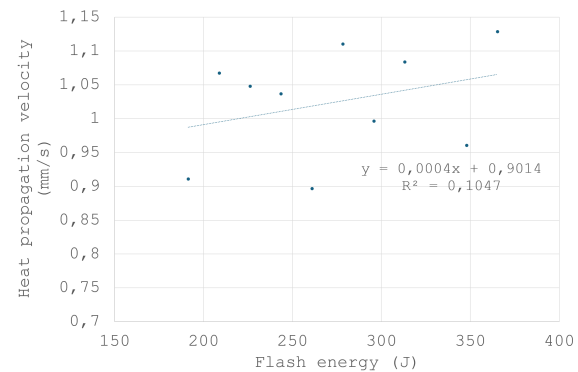


Figure 8 : Vitesse de propagation du front de température en fonction de l'énergie du flash solaire en régime stable, à durée de flash variable et puissance solaire constante

Des analyses plus détaillées seront nécessaires afin de développer un modèle physique permettant de rendre compte de ces observations, et de déterminer quels sont les phénomènes physiques prépondérants dans la mise en mouvement du fluide.

3.2. Régime instable

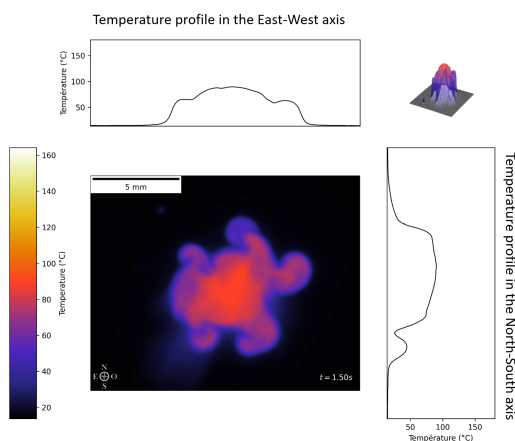


Figure 9 : Température de surface du nanofluide 1,5 s après un flash solaire de 750 J

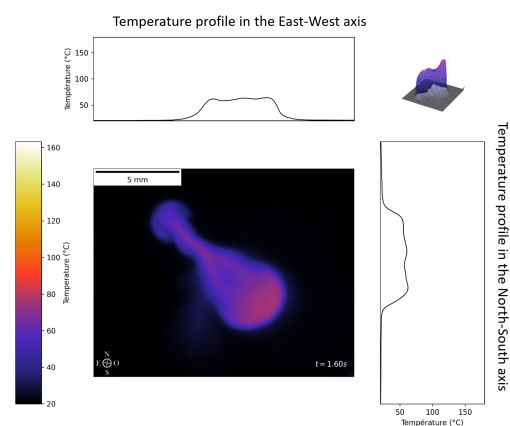


Figure 10 : Température de surface du nanofluide 1,6 s après un flash solaire de 400 J

Le régime instable est observé pour des énergies élevées, pour des flashes intenses ou longs. On observe l'apparition de bulles au niveau du point focal de la parabole lors du flash, d'autant plus nombreuses que le flash est intense. Nous observons également des vagues concentriques

à la surface du fluide suite à l'apparition de bulles au point focal de la parabole. L'observation à la caméra thermique permet de mettre en évidence la présence de panaches thermiques horizontaux à la surface du fluide, dont le nombre augmente avec l'énergie du flash (voir figures 9 et 10).

Nous remarquons également que la vitesse de propagation du front thermique au niveau des panaches est deux à trois fois plus grande que dans le régime stable. Il est cependant plus difficile de suivre le front thermique dans le cas des panaches, de part leur nombre et directions aléatoires.

Le phénomène observé est très inhabituel, puisque les panaches généralement rencontrés dans la littérature sont verticaux, par exemple dans le cadre d'une instabilité de Rayleigh-Bénard provoquée par la poussée d'Archimède [4]. Le développement de ces panaches horizontaux pourrait être lié à la présence de bulles au moment du flash solaire, car les panaches thermiques n'apparaissent que lorsque des bulles sont observées. Ils pourraient être dus à l'éclatement de ces bulles lorsque l'énergie de flash solaire est suffisamment importante, comme étudié numériquement dans [5].

4. Conclusion

En conclusion, nous avons présenté dans cet article un dispositif expérimental simple qui permet d'étudier de façon fondamentale la génération d'instabilités dans un fluide au repos par un fort gradient de température. Nous avons soumis un nanofluide de graphène à des flashes de puissance et durée variable, puis nous avons étudié l'évolution des champs de température au sein du nanofluide à l'issue des flashes solaires. Nous avons pu mettre en évidence deux régimes de transferts thermiques : un régime stable et un régime instable, pour lesquels nous avons analysé les vitesses de déplacement du front de température.

Les données collectées et analysées vont servir de base à de futurs travaux, qui permettront d'attribuer les phénomènes observés à des mécanismes physiques et ainsi mieux comprendre par quels mécanismes un gradient de température peut générer de la dynamique et des instabilités dans le fluide.

Références

- [1] N.-A. Goy et al, Thermal Marangoni trapping driven by laser absorption in evaporating droplets for particle deposition, *Soft Matter* 18 (2022) 7949-7958.
- [2] J. P. Longtin, K. H. Jikata, K. Ogawa, Laser-induced surface-tension- driven flows in liquids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 42 (1999) 85-93.
- [3] Y. Fan et al, Natural convection over vertical and horizontal heated flat surfaces : A review of recent progress focusing on underpinnings and implications for heat transfer and environmental applications, *Phys. of Fluids*, 33 (2021) 101301
- [4] O. Shishkina, Mean flow structure in horizontal convection, *J. Fluid Mech.*, 812 (2017), 525-540.
- [5] V. Sanjay, D. Lohse, M. Jalaal, Bursting bubble in a viscoplastic medium, *J. Fluid. Mech.*, 922 (2021) A2
- [6] M. Sainz-Manas et al, On-sun performance and stability of graphene nanofluids in concentrating direct absorption solar collectors, *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 83 (2025) 104605.
- [7] A. Vierron, C. Abid, Experimental investigation of Rayleigh-Bénard convection patterns in low-concentration nanofluids, *Phys. Rev. Fluids* (2025).

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le programme français « Investissements d'Avenir » géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) sous le contrat ANR-10-LABX-22-01 (labex SOLSTICE).