



HAL
open science

Écoulements laminaires de convection naturelle en cavités triangulaires

Marie-Christine Duluc, Stéphanie Pellerin, Vincent Bourdin

► **To cite this version:**

Marie-Christine Duluc, Stéphanie Pellerin, Vincent Bourdin. Écoulements laminaires de convection naturelle en cavités triangulaires. Congrès Français de Thermique (SFT 2019), Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes, Laboratoire Génie des Procédés - Environnement et Agroalimentaire de l'Université de Nantes, Jun 2019, Nantes, France. pp.127-134. hal-04420414

HAL Id: hal-04420414

<https://hal.science/hal-04420414>

Submitted on 26 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Écoulements laminaires de convection naturelle en cavités triangulaires

Marie-Christine DULUC^{1,2*}, Stéphanie PELLERIN³, Vincent BOURDIN¹

¹ LIMSI, CNRS, Université Paris-Saclay,

Bât 507, rue du Belvédère, Campus Universitaire, F-91405 Orsay

² CNAM,

292, rue Saint-Martin - 75141 Paris Cedex 03

³ LIMSI, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay,

Bât 507, rue du Belvédère, Campus Universitaire, F-91405 Orsay

*(auteur correspondant : duluc@limsi.fr)

Résumé - Des écoulements bi-dimensionnels de convection naturelle, générés à l'intérieur de cavités triangulaires, sont étudiés numériquement. Le fluide est de l'air. Une cavité triangulaire isocèle est tout d'abord étudiée, considérant deux valeurs du rapport d'aspect (défini comme la hauteur de la cavité divisée par la demi-base), proches de 0,5 et 2. Le nombre de Grashof est compris entre 10^3 et 10^7 . La seconde étude porte sur une cavité non symétrique, caractérisée par deux rapports d'aspect, dont les valeurs sont identiques à celles précédemment étudiées en cavités isocèles. Les valeurs moyennes du nombre de Nusselt sur le plan horizontal de base, de l'énergie cinétique et de la température ont été évaluées pour les différentes valeurs du nombre de Grashof. Les fonctions de courant et les isothermes obtenues pour différentes valeurs de Grashof permettent d'analyser la structuration des écoulements pour les différentes géométries.

Nomenclature

Gr	nombre de Grashof $\frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu^2}$, -	t	temps, -
h	coefficient d'échange, $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$	x, y	abscisse, ordonnée, -
H	hauteur de la cavité, m	A	rapport d'aspect H/L , -
$L_{1,2}$	Longueurs à la base de la cavité, m	T	température, K
Nu	nombre de Nusselt $\frac{hH}{k}$, -	<i>Symboles grecs</i>	
P	déviations par rapport à la pression hydrostatique, -	α	angle, rad
Pr	nombre de Prandtl $Pr = \mu c_p/k$, -	ν	diffusivité cinématique, m^2s^{-1}
u, v	composantes horizontale et verticale de la vitesse, -	Θ	température adimensionnée $\frac{T-T_c}{T_h-T_c}$
U	norme du vecteur vitesse, -	<i>Indices</i>	
		c	relatif à la paroi chaude
		f	relatif à la paroi froide

1. Introduction

Une étude récente [1] a montré que l'ajout de miroirs plans (représentés schématiquement par le segment SB_2 sur la figure 1), intercalés entre les rangées successives d'une installation de modules photo-voltaïques en incidence sur le plan horizontal (segment B_1S) permet un renforcement de l'éclairage et par suite un gain de production électrique d'environ 20 %. Cependant un accroissement de la température du panneau dégrade ce rendement électrique d'environ $-0,5\%/^{\circ}\text{C}$. Comprendre et maîtriser le comportement thermique de ces systèmes permettra de mieux prévoir la production électrique, d'améliorer le rafraîchissement estival des modules en optimisant la géométrie, mais aussi d'exploiter la production hybride photo-voltaïque-thermique. La simulation numérique est un outil adapté pour déterminer quantitativement les coefficients d'échange et les températures de « points chauds » dans le cas de

géométries et des conditions thermiques variées.

Les études de convection naturelle disponibles dans la littérature pour les cavités triangulaires, sont principalement des simulations en régime laminaire et régime de transition pour des cavités dont la section est un triangle isocèle ([2], [3], [4]). Divers rapports d'aspect ont été étudiés ainsi que l'impact de conditions aux limites de type été (température chaude en haut et froide en bas) ou hiver (température chaude en bas et froide en haut). Cette dernière catégorie est naturellement la plus riche en terme d'écoulements de convection naturelle. Il n'existe pas, à notre connaissance, de données disponibles pour des cavités triangulaires non isocèles. L'étude présentée dans cette communication porte sur une cavité de ce type. La géométrie 2D prise en compte, présentée schématiquement sur la figure 1, est similaire à celle de l'installation expérimentale de l'étude [1].

2. Modélisation

La présente étude porte sur des écoulements de convection naturelle générés à l'intérieur d'une cavité triangulaire non symétrique bidimensionnelle, représentée schématiquement sur la figure 1. Une fois la hauteur H fixée (26 cm sur le dispositif expérimental), la géométrie est intégralement définie par deux rapports d'aspect, $A_1 = H/L_1$ et $A_2 = H/L_2$. La configuration d'intérêt correspond à des angles $\alpha_1 = 66^\circ$ et $\alpha_2 = 24^\circ$ correspondant respectivement à $A_1 = 2,25$ et $A_2 = 0,45$. L'angle entre les deux plans inclinés est ainsi un angle droit. Le

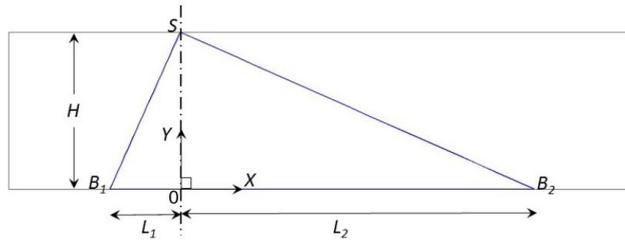


Figure 1 Représentation schématique de l'installation [1] et domaine de calcul.

fluide considéré est de l'air ($Pr = 0,71$), modélisé comme un fluide newtonien de viscosité dynamique μ . L'écoulement est régi par les équations de Navier-Stokes couplées à l'équation de l'énergie, sous l'hypothèse de Boussinesq. On choisit d'adimensionner ces équations selon une méthode similaire à celle proposée par Holtzmann *et al.* [2] soit : $x = X/H$, $y = Y/H$, $u = U/(\nu/H)$, $v = V/(\nu/H)$, $p = P/(\rho(\nu/H))^2$, $\Theta = (T - T_f)/(T_c - T_f)$, $t = t'/(H^2/\nu)$. Ces équations adimensionnées (1) font apparaître deux paramètres qui sont les nombres de Prandtl $Pr = \mu c_p/k$ et de Grashof $Gr = g\beta(T_c - T_f)H^3/\nu^2$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + Gr\Theta \\ \frac{\partial \Theta}{\partial t} + u \frac{\partial \Theta}{\partial x} + v \frac{\partial \Theta}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right). \end{array} \right. \quad (1)$$

Toutes les cavités dont l'étude est présentée dans cette communication ont en commun la hauteur H (prise égale à l'unité). Ce choix permet la comparaison, à nombre de Grashof identique,

des résultats obtenus d'une cavité à l'autre, notamment pour le nombre de Nusselt. Les longueurs L_1 et L_2 sont par conséquent calculées à partir des relations $L_1 = H/A_1$ et $L_2 = H/A_2$. Dans ces conditions, la paroi inférieure est repérée par les coordonnées x et y définies par $(-A_1 = -L_1/H \leq x \leq A_2 = L_2/H, y = 0)$. Le plan vertical de hauteur H (confondu avec le plan vertical médian pour une cavité isocèle), est repéré par l'abscisse $x = 0$ et l'ordonnée y telle que $0 \leq y \leq 1$. Une vitesse nulle est imposée sur les parois. Les conditions aux limites thermiques sont de type Dirichlet, $\Theta = 1$ sur la paroi inférieure, et $\Theta = 0$ sur les parois inclinées droite et gauche.

3. Simulations numériques

3.1. Outil numérique

Le logiciel de simulation numérique COMSOL Multiphysics® utilise la méthode des éléments finis. Une seule interface permet de modéliser le problème (géométrie, modèle physique, propriétés physiques, maillage et paramètres numériques,...), d'effectuer les calculs et le post-traitement des résultats. Afin de capturer les couches limites dynamique et thermique, le maillage est raffiné et adapté avec des cellules de type quadrilatères à proximité des parois. L'intérieur de la cavité est maillé par des cellules triangulaires pour une convergence plus rapide des calculs par optimisation du nombre total de cellules. La convergence en maillage a été vérifiée pour la cavité symétrique de rapport d'aspect $A = 0,5$ ($10^3 \leq Gr \leq 10^6$) en évaluant deux quantités adimensionnées, l'énergie cinétique $\langle E_c \rangle$ et la température $\langle \Theta \rangle$, prises en valeur moyenne sur la surface de la cavité :

$$\langle E_c \rangle = \frac{1}{S} \int_S (u^2 + v^2) dS \quad \langle \Theta \rangle = \frac{1}{S} \int_S \Theta dS \quad (2)$$

Cette convergence est réalisée avec un nombre total de mailles égal à 13865 (311 sur la base, 174 sur chaque plan incliné), un nombre de mailles total multiplié par 2,6 conduisant à une variation relative de 0.01 % sur $\langle \Theta \rangle$ et de 0.04 % sur $\langle E_c \rangle$. Le maillage utilisé pour la cavité isocèle $A_1 = 2.25$ est de 35556 mailles au total (138 sur la base, 178 sur chaque plan incliné). Pour la cavité scalène ($A_1 = 2.25, A_2 = 0.45$), le maillage est de 37265 mailles au total (385 base, 159 plan incliné gauche, 512 plan incliné droit).

3.2. Cas-test de validation $A = 0,5$ soit $\alpha_1 = 26,6^\circ$

Afin de valider notre approche, une comparaison est effectuée dans un premier temps avec des données de la littérature. Des résultats soignés et très détaillés sont disponibles dans l'article de Holtzman *et al.* [2]. Issus de simulations numériques réalisées à l'aide du code commercial éléments finis FIDAP, ces résultats portent sur des écoulements stationnaires de convection naturelle générés à l'intérieur d'une cavité isocèle ($A_1 = A_2 = A = H/L$). Trois rapports d'aspect y sont étudiés : $A = 0,2, 0,5$ et 1. Le fluide est de l'air. La paroi inférieure de la cavité est portée à la température $T_c = 1$ tandis que les deux plans inclinés sont maintenus à la température $T_f = 0$. La comparaison présentée ici, se limitera à $A = 0,5$.

3.2.1. Isothermes et fonctions de courant

Les surfaces isothermes et les fonctions de courant obtenues par nos simulations numériques sont présentées sur la figure 2. Les surfaces isothermes correspondent à $\Theta = [0, 2 : 0, 2 : 0, 8]$. Pour $Gr = 10^5$ (figure 2), on observe une cellule centrale principale. La figure présentée en haut à droite montre un panache thermique ascendant, décalé dans la partie gauche de la cavité

tandis qu'un panache thermique descendant est visible dans la moitié droite de la cavité. On notera ici que notre solution (ligne inférieure) est le miroir de celle obtenue par Holtzman *et al.* [2]. Les isolignes montrent un très bon accord entre nos résultats et ceux de Holtzman *et al.*

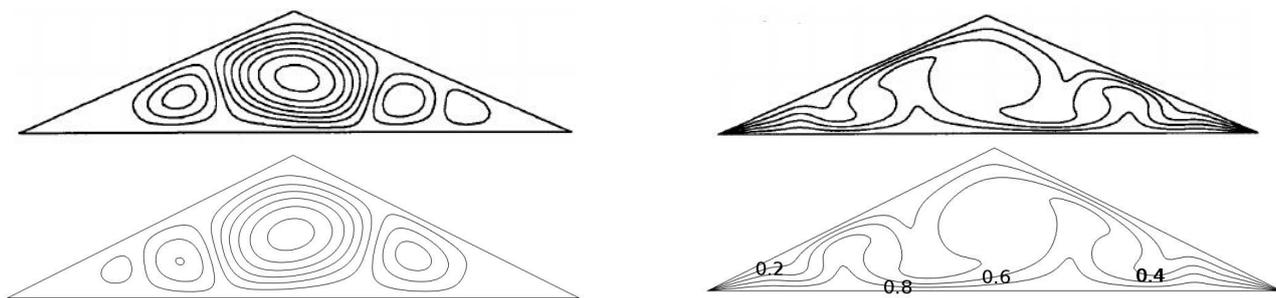


Figure 2 $Pr = 0,71$, $A = 0,5$, $Gr = 10^5$: Fonctions de courant (gauche) et surfaces isothermes (droite). Les deux figures de la ligne supérieure sont extraites de l'article de Holtzman *et al.* [2]. Les résultats obtenus dans ce travail sont présentés sur les deux figures de la ligne inférieure.

Les valeurs de fonctions de courant ne sont pas indiquées mais une comparaison quantitative est effectuée sur le profil de vitesse horizontale (u) relevé dans le plan vertical médian ($x = 0$, $0 \leq y \leq 1$) pour une valeur du nombre de Grashof égale à 10^5 . Le résultat, présenté sur la figure 3, montre un très bon accord.

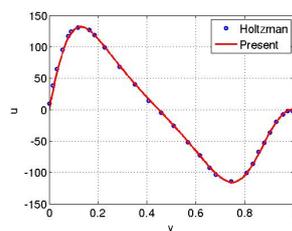


Figure 3 $Pr = 0,71$, $A = 0,5$, $Gr = 10^5$: Comparaison du profil de vitesse horizontale dans le plan vertical médian avec les données de la littérature.

3.2.2. Nombre de Nusselt

La comparaison est enfin effectuée sur une dernière grandeur, la valeur moyenne du nombre de Nusselt calculée sur la base de la cavité. Afin de réduire l'impact des deux points singuliers (B_1 et B_2 sur la Fig. 1) situés à l'intersection de la base de la cavité (portée à la température T_c) et des parois inclinées (portées à T_f), Holtzman *et al.* [2] ont proposé une méthode de calcul du nombre de Nusselt selon :

$$\langle Nu \rangle = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L Nu(x) dx = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L \frac{q''(x, 0)}{q''_0(x, 0)} dx \quad (3)$$

dans laquelle $q''(x, 0)$ est la densité de flux locale, transmise en un point de la paroi inférieure repéré par $(x, y = 0)$. La grandeur $q''_0(x, 0)$, située au dénominateur, correspond à cette même quantité, obtenue pour une valeur particulière du nombre de Grashof, égal à zéro, soit en l'absence de convection. Cette approche renvoie à la définition même du nombre de Nusselt qui est une mesure de l'intensité de l'échange convectif rapportée à l'intensité de l'échange conductif. Les valeurs obtenues pour $10^3 \leq Gr \leq 10^5$, indiquées dans le tableau 1, présentent un écart

inférieur à 1% avec les résultats précédemment obtenus par Holtzman *et al.* [2]. En conclusion, l'outil numérique utilisé est adapté au type d'études présentées dans cette communication.

4. Etude préliminaire en cavités triangulaires isocèles

Avant d'aborder la cavité non symétrique définie par les angles $\alpha_1 = 66^\circ$ et $\alpha_2 = 24^\circ$, on cherche dans un premier temps à identifier les écoulements associés à deux cavités isocèles, l'une d'angle $\alpha_1 = 66^\circ$ et l'autre de $\alpha_2 = 24^\circ$. Des congés, dont l'implémentation est simple dans l'environnement COMSOL Multiphysics $\text{\textcircled{R}}$, ont été ajoutés aux deux points singuliers B_1 et B_2 (Figure 1). Ils comportent 10 mailles. La condition aux limites thermique imposée sur ces congés est un flux nul afin de réduire l'impact de la singularité.

4.1. Cavité 1 : $A_1 = 2,25$ soit $\alpha_1 = 66^\circ$

Des simulations numériques ont tout d'abord été réalisées en conditions stationnaires ($\partial_t = 0$). Des résultats ont pu être obtenus jusqu'à une valeur du nombre de Grashof égale à $6,3 \times 10^6$. Tous correspondent à un écoulement symétrique.

Pour des valeurs supérieures du nombre de Grashof, des simulations numériques ont été réalisées en instationnaire ($Gr \leq 10^7$). Toutes ont conduit, après adaptation de l'excursion en temps, à l'obtention d'un état stationnaire. La durée du régime transitoire a été identifiée à partir du profil de vitesse horizontale dans le plan vertical d'abscisse nulle ($X = 0$ sur la figure 1).

Ce même profil est également utilisé pour repérer la bifurcation d'un écoulement symétrique vers un écoulement asymétrique. Le nombre de Grashof critique associé, obtenu pour cette cavité, est de l'ordre de 8×10^5 (Pour $A = 0,5$, la valeur $Gr_{critique} \simeq 9000$ a été obtenue, en bon accord avec [2]). Cette valeur peut, de prime abord, paraître élevée. Elle se révèle toutefois cohérente si l'on extrapole la valeur du nombre de Grashof critique, égale à 16200, obtenue par Holtzman *et al.* [2] pour une cavité isocèle de rapport d'aspect égal à l'unité. Pour un nombre de Grashof égal à 10^5 (figure 4 gauche), un écoulement stationnaire s'établit, organisé en deux cellules symétriques, contra-rotatives et de forme ovoïde. Les isothermes, symétriques par rapport au plan vertical médian, ont l'apparence d'un bulbe.

Pour $Gr = 10^6$, supérieur au nombre de Grashof critique, trois états peuvent être obtenus. L'un est symétrique, semblable à celui décrit pour $Gr = 10^5$; il est observé uniquement lorsque la simulation est menée en conditions stationnaires. Les deux autres états sont des solutions miroir et correspondent à un écoulement dissymétrique (figure 4 milieu). L'une des deux cellules (celle de gauche sur la figure) occupe un espace plus important que l'autre. La cellule opposée (à droite sur la figure) se contracte également de l'autre côté, contrainte par la présence de la paroi. Cet agencement permet à la cellule majoritaire de gagner de l'espace en hauteur. En conséquence, le bulbe formé par les surfaces isothermes, bien que dissymétrique, occupe presque toute la hauteur de la cavité.

On observe donc, dans cette cavité, une bifurcation fourche supercritique, comparable à celle qui a été rapportée par Holtzman *et al.* [2] dans le cas de cavités isocèles de rapport d'aspect inférieur ou égal à l'unité.

Lorsque $Gr = 10^7$ (figure 4 droite), l'écoulement stationnaire obtenu à la fin de la simulation présente une structure différente : une cellule principale occupe presque intégralement l'espace inférieur de la cavité. La rotation s'effectue ici dans le sens horaire. Le panache thermique est ainsi fortement incliné vers la paroi gauche de la cavité (effet Coanda). Cette cellule s'est renversée par rapport à celles observées pour les deux valeurs précédentes du nombre de Grashof ($Gr = 10^5, 10^6$) : l'axe principal de cette cellule (caractérisé par la plus grande longueur) n'est plus quasiment vertical mais forme, avec la base de la cavité, un angle environ égal à la moitié

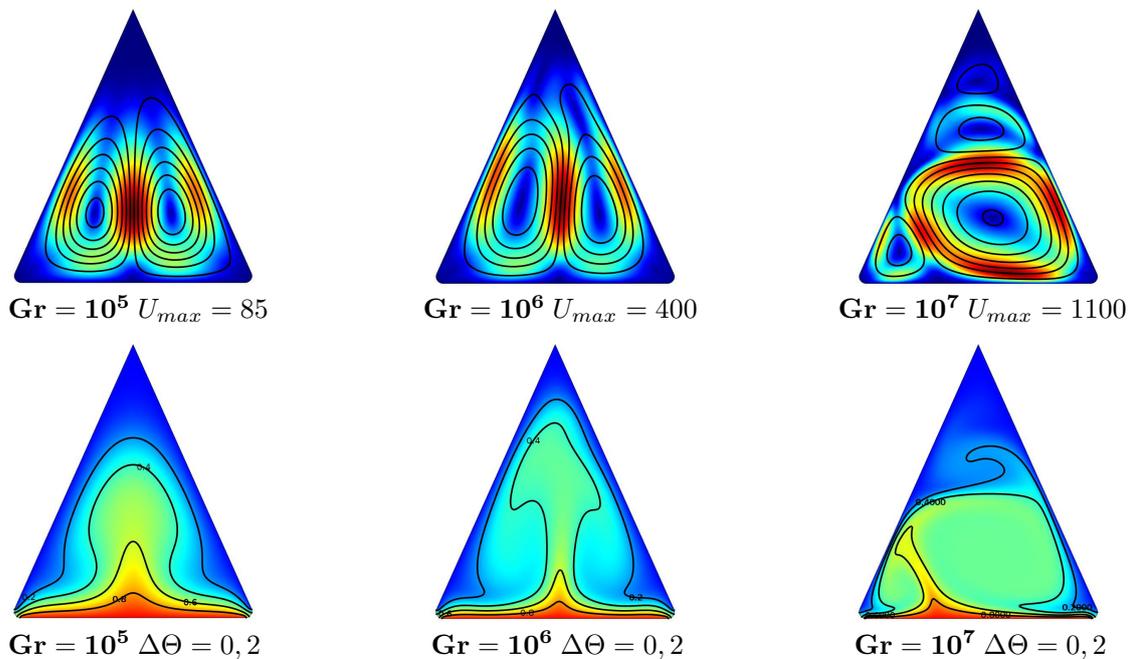


Figure 4 *Ecoulements dans la cavité symétrique $A_1 = 2.25$ ($\alpha_1 = 66^\circ$). Ligne supérieure : Fonctions de courant et norme de la vitesse (U_{max} est la limite supérieure de l'échelle de vitesse, indiquée par la couleur rouge ; La couleur bleue est la vitesse nulle). Ligne inférieure : Surfaces isothermes correspondant à $\Theta = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$.*

de l'angle inférieur α_1 .

L'espace supérieur de la cavité, de forme très pointue, est difficilement compatible avec un écoulement en raison de l'importance des frottements, induite par le confinement. Les vitesses y sont par conséquent très faibles. La température du fluide est quasiment uniforme, voisine de celle des parois.

4.2. Cavité 2 : $A_2 = 0.45$ soit $\alpha_1 = 24^\circ$

Le rapport d'aspect de cette cavité, égal à 0,445, est très proche de la valeur 0,5, étudiée au paragraphe 3.2. Ce cas ne sera donc pas présenté ici et on s'appuiera sur les résultats et conclusions présentés dans ce paragraphe.

5. Etude en cavité triangulaire scalène ($A_1 = 2, 25$; $A_2 = 0, 45$)

Pour cette cavité, des simulations numériques stationnaires ont pu être réalisées jusqu'à une valeur du nombre de Grashof égale à $1,17 \times 10^5$. Les résultats présentés au delà de cette valeur, correspondent à un état stationnaire obtenu à partir de simulations numériques instationnaires. Un régime purement conductif est observé pour $Gr = 10^3$. Une convection peu intense apparaît pour $Gr = 10^4$ avec des surfaces isothermes formant un bulbe légèrement dévié vers la paroi inclinée gauche. Pour des valeurs supérieures du nombre de Grashof (figure 5), une cellule principale est visible dans la partie la plus haute de la cavité. Selon la valeur du nombre de Grashof, une ou plusieurs cellules secondaires sont visibles dans l'espace restant, à droite. Ces circulations contra-rotatives sont associées à des panaches thermiques ascendants et descendants dont le nombre augmente avec la valeur du nombre de Grashof. La vitesse du fluide augmente également tandis que l'épaisseur des couches limites diminue, laissant place à de larges zones isothermes au centre des cellules.

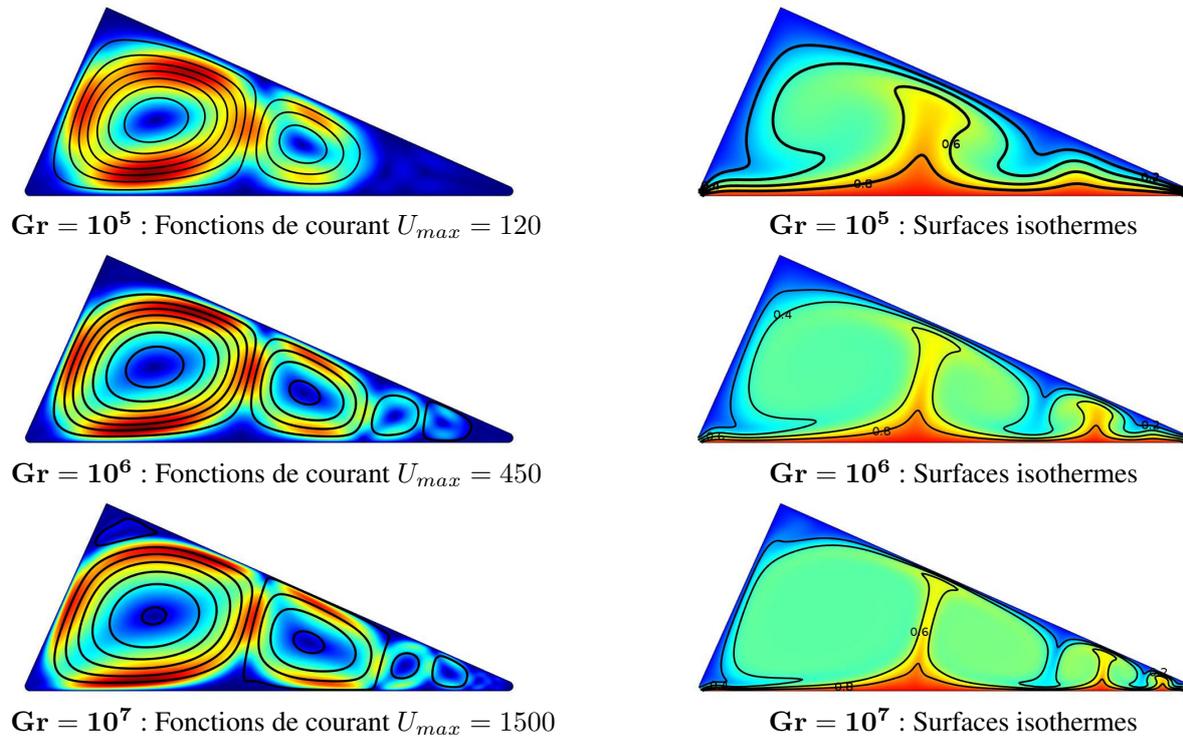


Figure 5 *Écoulements dans la cavité non symétrique pour $10^5 \leq Gr \leq 10^7$. Colonne gauche : Fonctions de courant et norme de la vitesse (U_{max} est la limite supérieure de l'échelle de vitesse, indiquée par la couleur rouge ; la couleur bleue correspond à la vitesse nulle). Colonne droite : surfaces isothermes correspondant à $\Theta = [0, 2 : 0, 2 : 0, 8]$.*

	Gr	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
Nu[Cavité symétrique $A_1 = 0,5$]		0,98	1,2	2,19	-	-
Nu[Cavité symétrique $A_1 = 2,25$]		1	1	1,46	2,5	4
Nu[Cavité non symétrique]		1	1,13	1,88	3,52	5,73

Tableau 1 *Nusselt moyen sur la paroi inférieure*

5.1. Comparaison énergétique entre les trois cavités

Une comparaison quantitative entre les trois cavités est réalisée à partir de trois grandeurs adimensionnées. La première est le nombre de Nusselt moyen à la base de la cavité, défini comme $Nu = hH/k$, avec pour longueur de référence la hauteur H , identique pour les trois cavités. Ce nombre, calculé selon l'équation 3, est présenté pour les différentes cavités dans le tableau 1 ainsi que sur la figure 6 (gauche). Le nombre de Nusselt de la cavité non symétrique est légèrement inférieur à celui obtenu pour la cavité isocèle de rapport d'aspect $A = 0,5$ et systématiquement supérieur à celui obtenu dans la cavité définie par $A = 2,25$. Un résultat semblable est observé sur la figure 6 (milieu) pour la valeur moyenne de l'énergie cinétique. On notera que cette dernière grandeur, définie par l'équation (2) est indépendante de la superficie de la cavité. Pour une valeur comparable du nombre de Grashof, la taille et la vitesse de la cellule principale sont plus importantes dans la cavité non symétrique que dans la cavité de rapport d'aspect $A_1 = 2,25$. En particulier, pour $Gr = 10^7$, la zone morte observée dans la partie supérieure de la cavité lorsque $A = 2,25$ (figure 4), n'apparaît pas dans la cavité non symétrique. Cette géométrie « hybride » conduit par conséquent à un transfert de chaleur plus intense que dans la cavité $A_1 = 2,25$. L'évolution de la température moyenne (quantité

définie par l'équation (2), indépendante de la superficie de la cavité) présentée à droite de la figure 6 confirme ce point. On notera les valeurs numériques très élevées de l'énergie cinétique, dues au choix de la vitesse de référence égale à ν/H . Par la suite, l'utilisation d'une vitesse de référence identique à celle classiquement admise en cavités différentiellement chauffées, $v_{ref} \propto (Gr \times Pr)^{0,5}$, permettra d'obtenir des vitesses de l'ordre de l'unité.

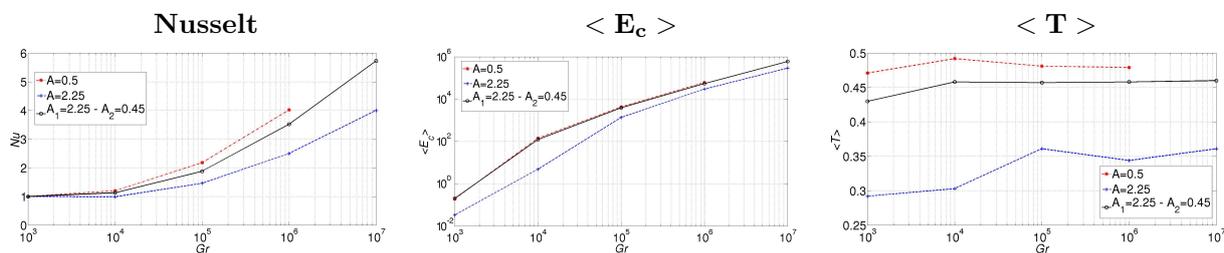


Figure 6 Comparaison pour les trois cavités du nombre de Nusselt moyen à la base de la cavité (gauche), de l'énergie cinétique moyenne (milieu) et de la température moyenne (droite), en fonction du nombre de Grashof.

6. Conclusion

L'étude en cavités isocèles de rapport d'aspect 0,5 et 2,25 confirme la présence d'une bifurcation fourche supercritique pour des valeurs respectives du nombre de Grashof proches de 9×10^3 et 8×10^5 . L'écoulement initial caractérisé par deux cellules symétriques est remplacé par une cellule principale dont l'axe le plus long est incliné selon un angle environ égal au demi-angle inférieur de la cavité. Le ou les panaches thermiques induits par cet écoulement sont déviés vers l'une ou l'autre des parois inclinées (effet Coanda). Une cellule principale similaire est systématiquement observée dans la cavité non symétrique. Elle occupe la quasi-totalité de l'espace correspondant au plus grand des deux rapports d'aspect. L'espace restant est le siège de cellules secondaires associées à des panaches thermiques ascendants, dirigés vers la paroi inclinée correspondant au rapport d'aspect le plus faible. Les valeurs du nombre de Nusselt moyen calculé sur la base de la cavité non symétrique sont bornées par celles obtenues pour les deux cavités isocèles de rapport 0,5 et 2,25. Les travaux futurs viseront à étudier l'impact de conditions aux limites représentatives de l'installation expérimentale décrite dans [1].

Références

- [1] M. Pavlov et al., Experimental and Numerical Study of the Influence of String Mismatch on the Yield of PV Modules Augmented By Static Planar Reflectors, *IEEE J. Photovoltaics*, 5 (6) (2015) 1686-1691.
- [2] G.A. Holtzman, R.W. Hill et K.S. Ball, Laminar Natural Convection in Isosceles Triangular Enclosures Heated From Below and Symmetrically Cooled From Above, *J. Heat Transf.*, 36 (2000) 485-491.
- [3] E. H. Ridouane, A. Campo, M. McGarry, Numerical computation of buoyant airflows confined to attic spaces under opposing hot and cold wall conditions, *Int. J. Thermal Sciences*, 44 (2005) 944-952.
- [4] S. C. Saha, M. M. K. Khan, A review of natural convection and heat transfer in attic-shaped space, *Energy and Buildings*, 43 (10) (2011), 2564-2571.