

Contribution à la modélisation numérique des phénomènes convectifs dans une enceinte chauffée.

Hiva SHAMSBORHAN (*) (1), Sébastien MENANTEAU (1), Fadi ABDEL NOUR (2)

CONTEXTE

Le confort thermique des personnes dans une enceinte chauffée peut parfois être problématique en raison de la stratification de la température et des mouvements d'air causés par la formation de cellules de convection. La modélisation numérique de ces phénomènes peut ainsi s'avérer intéressante dans le but de mieux appréhender leurs mécanismes ou de diagnostiquer d'éventuelles zones d'inconfort pour l'utilisateur. Pour autant, ces études numériques peuvent être complexes à mener, notamment en raison des sources d'incertitudes liées aux conditions limites souvent peu maîtrisées pour de tels espaces, les solutions obtenues pouvant en outre fortement dépendre des méthodes numériques sélectionnées.

Dans le but d'investiguer les performances des modèles numériques en convection naturelle, une maquette expérimentale aux conditions thermiques maîtrisées a ainsi été développée. Cette maquette positionnée dans une chambre climatique thermo-régulée, est chauffée au moyen d'un flux de chaleur constant et présente une ouverture afin d'engendrer un mouvement convectif d'air. Elle a été instrumentée de manière à obtenir une cartographie précise de la température intérieure en vue de comparer ces mesures à un ensemble de simulations numériques réalisées au moyen d'ANSYS Fluent.

L'aptitude de différentes approches de modélisation a ainsi pu être étudiée en vue de déterminer les meilleurs usages possibles de l'outil numérique pour prédire la thermique de l'écoulement.

APPROCHES EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE

Dispositif expérimental

La maquette expérimentale représente une pièce à échelle réduite et est constituée :

- d'une source de chaleur sous la forme d'une ampoule (12V-15W) de 35 mm de diamètre recouverte d'aluminium pour obtenir une densité de flux homogène et limiter le rayonnement direct du filament vers les parois.
- de parois latérales et basses bi-composant : PVC expansé (ép. 19 mm) et polystyrène (ép. 10 mm)
- d'une partie supérieure bi-composant: bois (ép. 25 mm) et polystyrène (ép. 20 mm)
- d'une ouverture vers l'enceinte climatique (simulant l'effet d'une porte ou d'une fenêtre ouverte)

La maquette est positionnée dans une enceinte régulée en température ($30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) et en humidité ($20\% \pm 5\%$ H.R) puis instrumentée à l'aide d'une grille de 10 thermocouples type K au préalable étalonnés (mesure $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$).

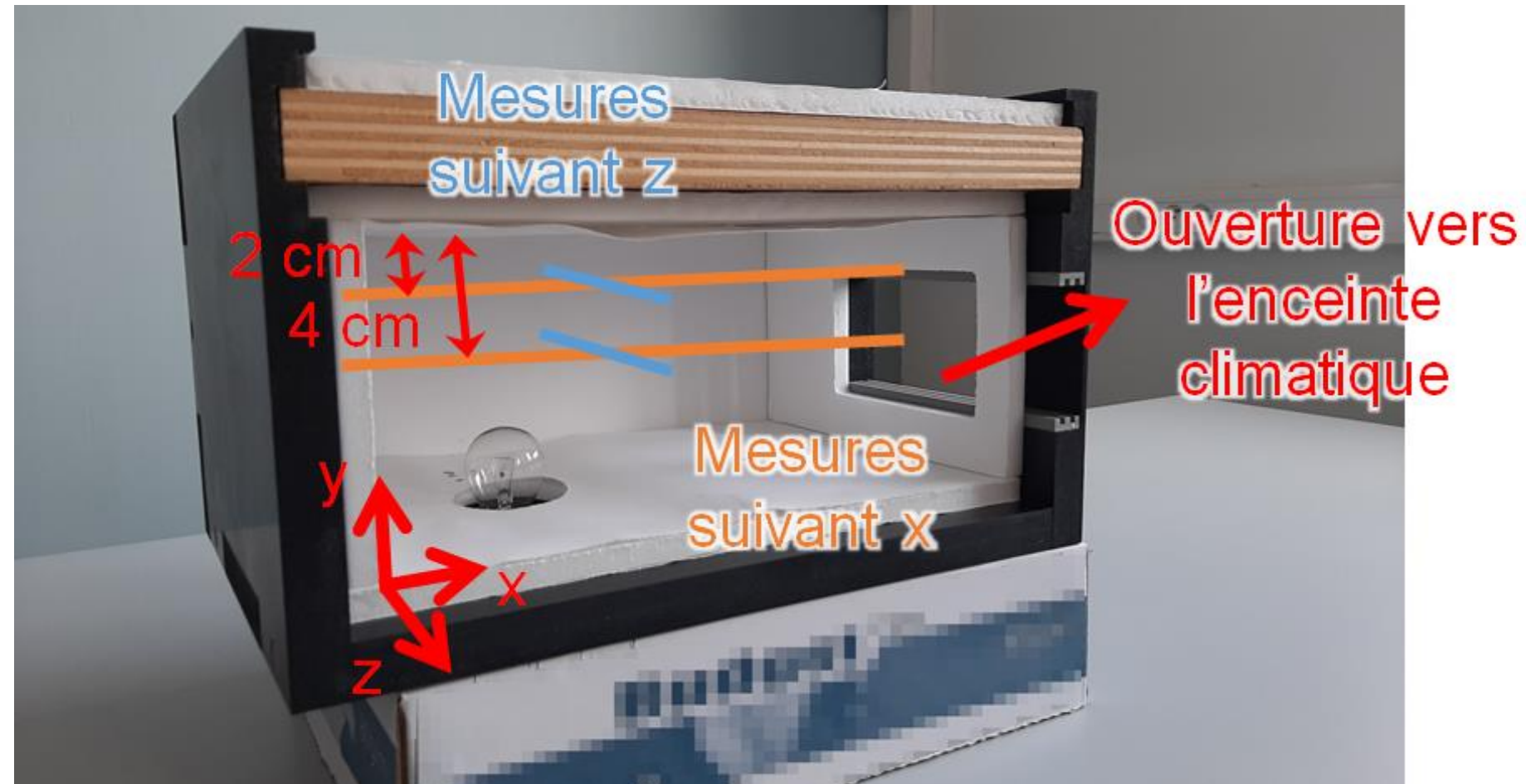


Figure 1 : vue intérieure de la maquette et présentation des lignes de mesures par thermocouple

Modèle numérique

La configuration numérique reproduit le plus fidèlement possible les conditions thermiques de la maquette expérimentale. L'écoulement est par ailleurs considéré comme étant laminaire ($Ra=9,2 \cdot 10^6$) régi par la convection naturelle (gravité fixée à $9,81 \text{ m.s}^{-2}$).

Après avoir mené une étude de sensibilité au maillage indiquant une absence de variation des résultats au-delà de $1,416 \cdot 10^3$ mailles tétraédriques, une étude paramétrique a ensuite été conduite en tenant compte :

- du caractère stationnaire ou non de la solution (une sensibilité au pas de temps ayant conduit à retenir une valeur de 1 s)
- de l'intégration ou non du rayonnement thermique au moyen d'un modèle de rayonnement Surface-To-Surface (S2S)
- de l'imposition de parois adiabatiques ou soumises à un phénomène convectif avec l'air ambiant tel que $h=1,54 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $T_{\infty}=303 \text{ K}$
- de propriétés de l'air (viscosité cinématique et conductivité thermique) constantes ou variables selon des fonctions polynômiales de la température

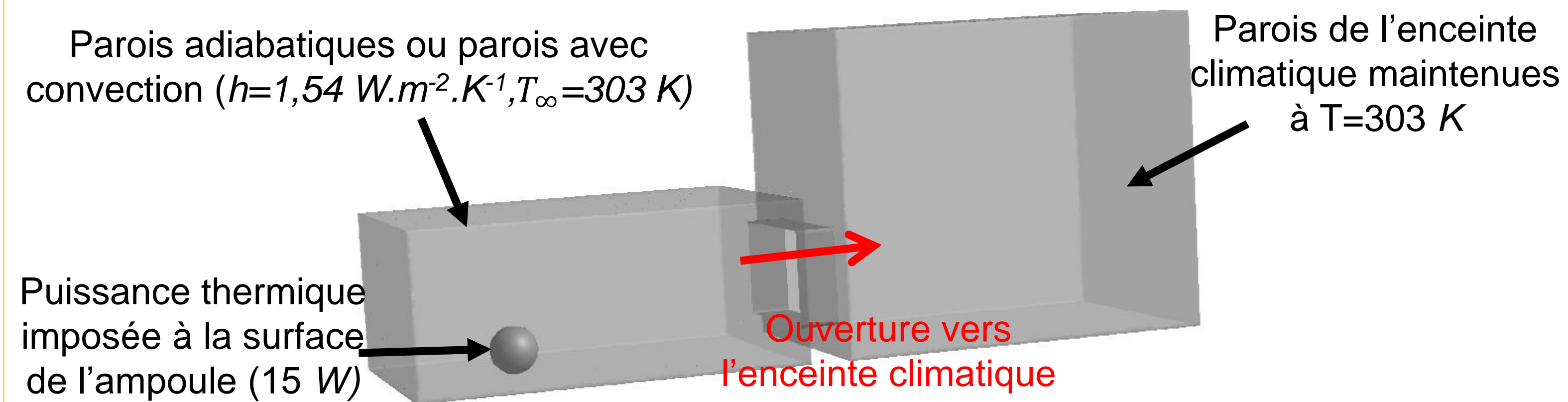


Figure 2 : conditions limites thermiques de la maquette numérique

RÉSULTATS ET COMPARAISONS

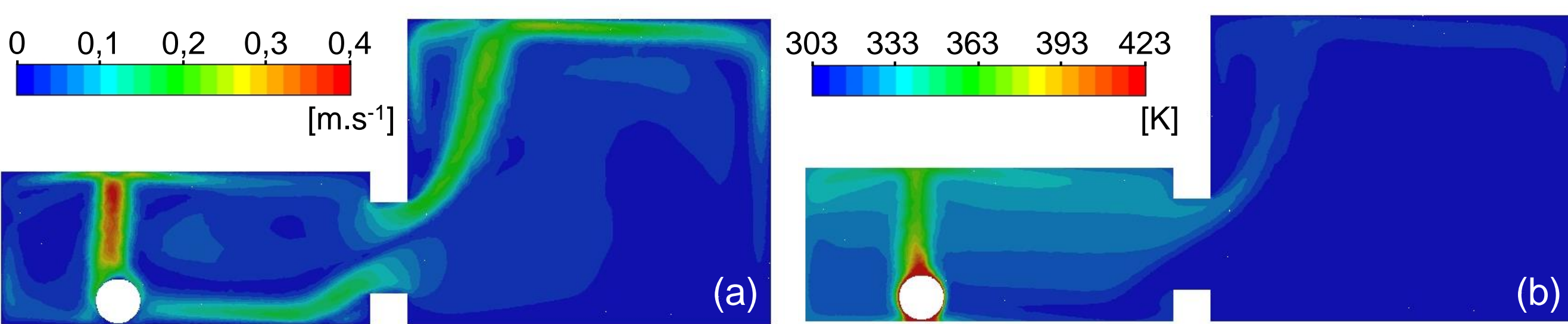


Figure 3 : observation des champs moyens de vitesse (a) et de température (b) dans le plan médian de la maquette numérique

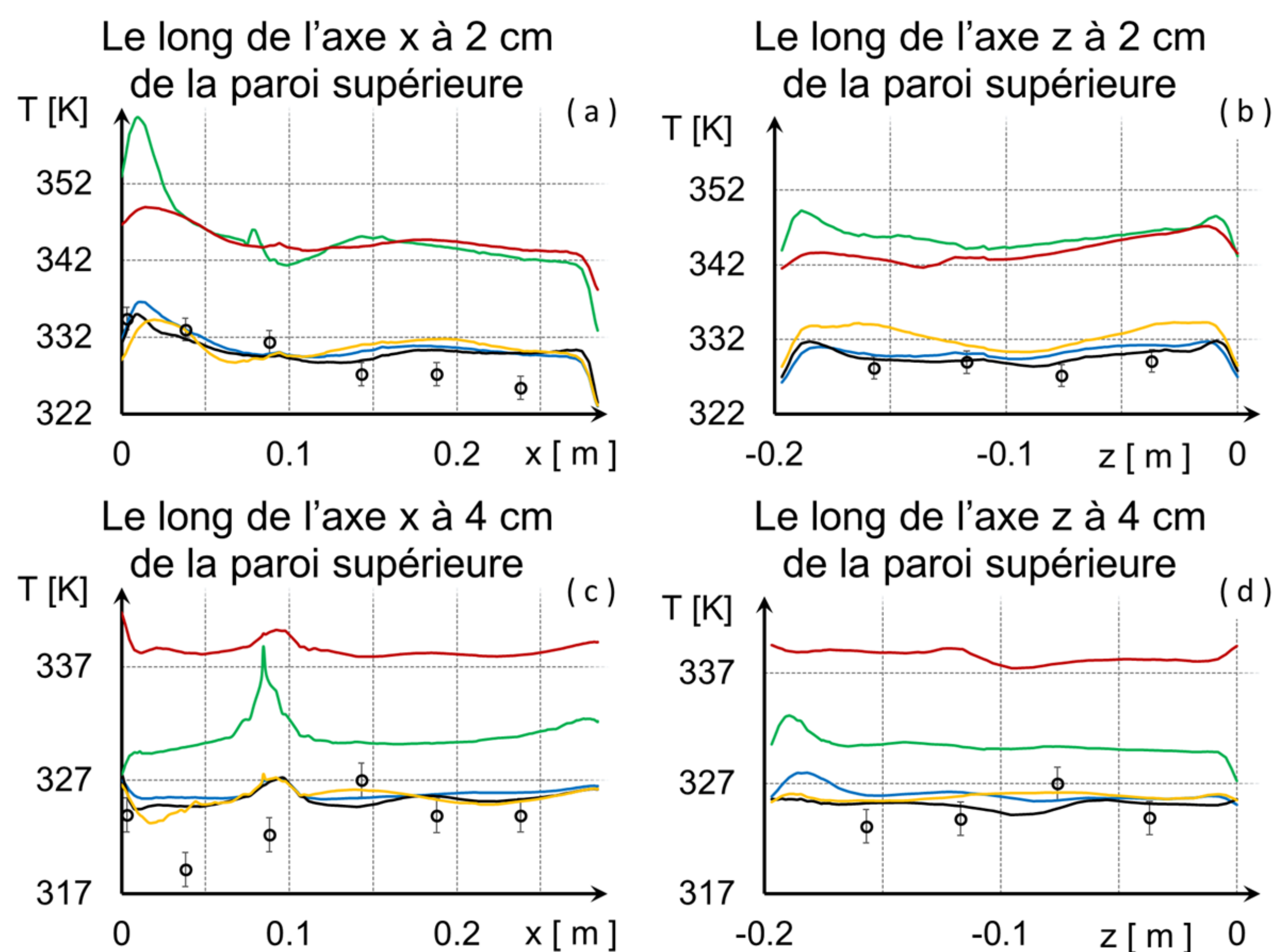


Figure 4 : comparaison des mesures de température expérimentales aux résultats modélisés

Observations qualitatives faites à partir des figures 3.a et 3.b :

- Des cellules convectives formées en raison des écarts de température sont observées au-dessus de la source de chaleur et dans l'enceinte climatique
- Un panache présentant de fortes valeurs de température est présent au-dessus de la source de chaleur ainsi qu'une zone de stratification thermique très marquée, comme on pouvait s'y attendre
- Les tendances qualitatives sont néanmoins similaires quelles que soient les paramètres de modélisation intégrées à la simulation et ne permettent pas d'évaluer la pertinence d'un résultat plutôt qu'un autre

Observations faites à partir des figures 4.a à 4.d :

- La configuration avec parois adiabatiques se révèle inadaptée pour prédire les niveaux moyens de température : l'absence de transfert de chaleur au niveau des parois conduit à une surévaluation significative de la température, contrairement à une configuration avec ne serait-ce qu'un très faible transfert convectif tel que celui implémenté (avec $h=1,54 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $T_{\infty}=303 \text{ K}$)
- De même, une modélisation sans intégration du rayonnement conduit à une surestimation des températures moyennes et s'avère inadaptée
- Une modélisation instationnaire de l'écoulement ne permet pas prédire des niveaux moyens ou locaux de température meilleurs que ceux observés à l'issue d'une simulation stationnaire. Compte-tenu de l'absence de plus-value des résultats instationnaires, les cellules convectives formées étant très stables par ailleurs (sur des durées physiques de simulations instationnaires de 3600 s), une modélisation en régime permanent paraît suffisante en vue de réduire les temps de calcul.
- La prise en compte de la dépendance des propriétés thermophysiques de l'air en fonction de la température permet de simuler des niveaux moyens de température plus proches des valeurs expérimentales

Conclusion : Les phénomènes dynamiques et thermiques régis par la convection naturelle sont difficiles à appréhender. L'analyse qualitative a mis en évidence des résultats dynamiques et thermiques cohérents vis-à-vis des phénomènes physiques attendus et ce quelle que soit la configuration numérique. L'étude paramétrique a ensuite permis d'observer une meilleure caractérisation numérique des niveaux moyens de température mesurés en incluant des conditions limites thermiques convectives aux parois, un modèle de rayonnement et une variabilité des propriétés de l'air en fonction de la température du milieu. Pour autant, aucune des configurations simulées n'a été capable de prédire localement les mesures expérimentales, soulignant de fait la nécessité d'approfondir ces investigations.