

Identification de l'erreur de mesure par thermocouple de la température d'une surface soumise à différentes conditions d'échanges

C. BÉNARD, Y. BODY, M. DELISÉE, C. DEPOID et D. GOBIN

F.A.S.T., UA 871, CNRS-P6-P11, Campus Universitaire, Bât 502, 91405 Orsay Cedex, France

(Reçu le 2 Septembre 1988 et sous forme finale le 17 Avril 1989)

Résumé—Ce travail, à fois expérimental et numérique, concerne la mesure des températures de surface dans des conditions voisines de celles rencontrées dans l'habitat. Cette étude a permis d'analyser et d'interpréter les perturbations créées par des thermocouples collés sur un vitrage soumis à des conditions d'échanges variées. Une bonne définition du montage expérimental et des conditions aux limites d'une part, et un code numérique très fiable d'autre part, nous ont permis de vérifier les valeurs des paramètres thermophysiques du système ainsi que d'identifier la faible perturbation et surtout l'erreur du thermocouple. L'ordre de grandeur de l'écart entre mesure et, température de surface réelle a pu être retrouvé par un modèle simple du capteur.

1. INTRODUCTION

LA MESURE précise d'une température de surface est toujours une opération délicate que ce soit en régime permanent ou transitoire. Il est possible de distinguer deux types de mesures de température de surface : les mesures "non intrusives" basées sur l'analyse du rayonnement émis par la surface et les mesures "intrusives" utilisant des capteurs divers placés en contact avec la surface ou introduits dans des trous ou des rainures pratiqués sur cette surface. Dans le premier cas les difficultés sont dues à une connaissance imparfaite des propriétés radiatives du matériau examiné dans les conditions mêmes de la mesure et des caractéristiques de l'environnement. Dans le second les difficultés sont inhérentes au principe même de la mesure : l'équilibre thermodynamique local est toujours perturbé par la présence du capteur et c'est une température perturbée qu'indique le capteur. Les écarts sont dus aux échanges radiatifs conductifs et convectifs du système surface-capteur-environnement qui peut se révéler très complexe. De nombreuses études ont été effectuées pour tenter de calculer ces erreurs ou d'en effectuer une analyse expérimentale [1-8].

Nos travaux visent le cas particulièrement difficile d'une métrologie de surface bas niveau (faibles échanges) sur des surfaces semi-transparentes. En effet dans ce cas, aux effets radiatifs infra-rouge dus aux différences d'émissivité entre la surface étudiée et le capteur, s'ajoutent les effets radiatifs visibles liés principalement aux différences d'absorptivité entre la paroi et le capteur.

L'enjeu immédiat de notre étude est le suivant : disposer d'un montage de référence composé de deux cavités séparées par une paroi semi-transparente pour le visible et opaque au rayonnement infra-rouge

(verre). Ce montage doit permettre de soumettre la paroi semi-transparente à des conditions très bien contrôlées en température ($0,05^{\circ}\text{C}$) et flux (5 W m^{-2}), sur ses deux faces.

Le travail que nous avons réalisé et que nous présentons ici concerne la mise au point de ce montage en incluant sa modélisation numérique et l'identification de l'ensemble des paramètres qui le caractérisent, qu'il s'agisse de la paroi, des cavités ou des capteurs intrusifs faiblement perturbant que nous avons choisis pour cette mise au point : il s'agit de thermocouples de très faibles dimensions collés sur les surfaces de la paroi semi-transparente en cause.

On ne dispose, pour identifier ces paramètres qui sont en nombre élevé, que des mesures présentant une certaine incertitude (calibrage des capteurs) et de plus on cherche à caractériser un éventuel biais systématique de ces mesures. Pour résoudre ce problème d'identification, nous avons adopté la méthodologie suivante :

—Pour les paramètres thermophysiques de la paroi et des cavités : en faire une première détermination a priori par des mesures indépendantes de notre montage.

—Pour l'identification du montage, capteurs inclus, procéder en trois étapes de complexités progressives :

- (1) échanges purement conductifs et infra-rouges ;
- (2) échanges conductifs, infra-rouges et convectifs (convection naturelle) ;
- (3) échanges conductifs, infra-rouges, convectifs et avec rayonnement visible.

Ceci permet d'isoler certains paramètres afin de les identifier et de les utiliser ensuite comme données aux étapes suivantes.

Dans cet article nous abordons les étapes 1 et 2. L'étape 3 sera abordée dans un deuxième article.

NOMENCLATURE

a	diffusivité de la vitre	T_{TC}	température de soudure du capteur
C_p	chaleur spécifique de la vitre	T_{VR}	température vraie de la surface de la vitre (sans capteur)
e	épaisseur de la vitre de référence	n	indice de réfraction moyen de la vitre (visible)
H	coefficient d'échange équivalent entre les échangeurs avant et arrière	(x, y)	coordonnées du schéma bidimensionnel.
h_A	coefficient d'échange équivalent entre l'échangeur avant et la face avant de la vitre		
h_C	coefficient d'échange convectif du vitrage (et des parois de la cavité arrière)	Symboles grecs	
h'_C	coefficient d'échange convectif du capteur (colle)	α	diffusivité de l'air
$1/h_1$	résistance thermique d'une 1/2 épaisseur de soudure	β	coefficient de dilatation de l'air
$1/h_2$	résistance thermique d'une 1/2 épaisseur de soudure et de la couche de colle au contact avec l'air (y compris les fils)	Φ_C	flux conductif adimensionné (vitre)
h_R	coefficient d'échange radiatif infra-rouge dans la cavité arrière (parois)	Φ'_C	flux conductif adimensionné (capteur)
k	conductivité thermique de la vitre	Φ_R	flux radiatif infra-rouge adimensionné (absorbé par la vitre)
k_a	conductivité thermique de l'air	Φ'_R	flux radiatif infra-rouge adimensionné (absorbé par le capteur) masse volumique du vitrage
T_{air}	température de l'air de la cavité au voisinage du capteur	Σ	émissivité du vitrage
T_C	température de la face avant de l'échangeur arrière	Σ_P	émissivité des parois des cavités
T_{cx}	température ambiante extérieure à la cellule (chambre thermostatée)	Σ_{TC}	émissivité du capteur
T_F	température de la face arrière de l'échangeur avant	ν	viscosité cinématique de l'air
T'	température de la surface de la colle au dessus du capteur	κ	coefficient d'extinction moyen du vitrage (visible).
T_S	température de la surface de vitre sous le capteur		
		Indices	
		1, 2	face avant, arrière de la vitre de référence
		exp	indique que la quantité est mesurée expérimentalement
		sim	indique que la quantité est calculée par un processus de simulation numérique.

Notre méthodologie implique une très bonne définition du montage expérimental c'est à dire :

(a) Une reproductibilité des indications fournies par les capteurs de température avec une précision de quelques 1/100° de degré.

(b) Une modélisation numérique des résultats, permettant la même précision et mettant donc en évidence l'effet des perturbations des capteurs si celles-ci dépassent l'incertitude expérimentale définie en (a).

Pour que ceci soit possible, il faut :

- Un contrôle permanent des conditions limites du montage.

- Une très bonne connaissance des caractéristiques thermophysiques du matériau utilisé pour la paroi de référence.

- Une analyse expérimentale et numérique du comportement des capteurs utilisés.

Afin d'avoir des données assez riches pour permettre toutes les identifications nécessaires (para-

mètres thermophysiques mal connus caractérisant le montage et paramètres caractérisant les capteurs), le système est soumis à différents types d'entrées, en régime permanent ou variable avec des niveaux de températures et de flux variés.

Pour les situations relativement peu perturbées par les capteurs étudiées dans cet article, notre stratégie consistera à sélectionner les paramètres du montage les plus sensibles comme variables à identifier et à vérifier si, dans de telles conditions, un biais entre résultats numériques et expérimentaux sur les sorties apparaît, qui soit supérieur à l'incertitude expérimentale sur les sorties. Si tel est le cas, les paramètres caractérisant le capteur devront être introduits et leur rôle analysé.

Le plan de l'étude est le suivant :

—En Section 2 nous présentons le montage ainsi que les capteurs et les mesures préliminaires indépendantes effectuées sur les paramètres thermophysiques le caractérisant.

—En Section 3 nous abordons le problème de la modélisation du montage en 3 parties :

(a) Ensemble paroi et cavités en l'absence de capteurs avec conduction dans les parois et rayonnement infra-rouge dans les cavités.

(b) Perturbations dues aux capteurs (modèle et paramètres).

(c) Convection naturelle dans la cavité intérieure et du couplage avec la paroi.

—En Section 4 sont exploités les résultats des mesures et des simulations numériques pour les deux situations abordées dans cet article.

2. PRESENTATION DU MONTAGE, DES CAPTEURS ET DES MESURES

2.1. Description du montage

Nous avons réalisé une cellule de mesure parallélépipédique dont la face avant est constituée par un double vitrage. La vitre intérieure constitue la paroi de référence et la vitre extérieure sert à préciser les conditions limites de l'ensemble convection et rayonnement infra-rouge vis à vis de la face avant de la vitre de référence.

La face arrière de la cellule est constituée par un échangeur à plaque qui réalise une condition limite isotherme. Les faces latérales sont isolées de manière à limiter les échanges mais des mesures de températures sur ces faces sont introduites comme conditions limites.

Les dimensions de la cellule permettent de considérer le système comme bidimensionnel pour les deux petites dimensions (Figs. 1 et 2).

Toutes les faces latérales, y compris celles de la cavité formée par les deux vitres, ainsi que l'échangeur arrière, ont un revêtement noir d'émissivité connue.

L'ensemble est instrumenté par des thermocouples Chromel-Alumel répartis comme suit :

—63 thermocouples de diamètre 8/100^e mm répartis sur le double vitrage et collés en vis à vis (21 sur la face interne de la vitre de référence).

—Dans la cavité derrière le vitrage, un réseau de 70 thermocouples de diamètres 8 et 12/100^e mm (30 seulement sont scrutés dans les expériences présentées dans cet article) sont tendus horizontalement et permettent des mesures dans le plan de symétrie du système qui correspond au repère 2 dimensions des codes numériques.

—Une trentaine de thermocouples (diamètre 20/100^e mm) permettent de repérer les températures, sur les parois latérales (12), sur l'échangeur arrière (11) et en divers points du montage (12) suivant les besoins : la plupart de ces thermocouples étant amovibles.

Afin de pouvoir étudier deux régimes de convection dans la cavité arrière, un système de rotation permet de travailler avec le vitrage en position verticale (régime laminaire de convection naturelle) ou en position horizontale (régime purement conductif).

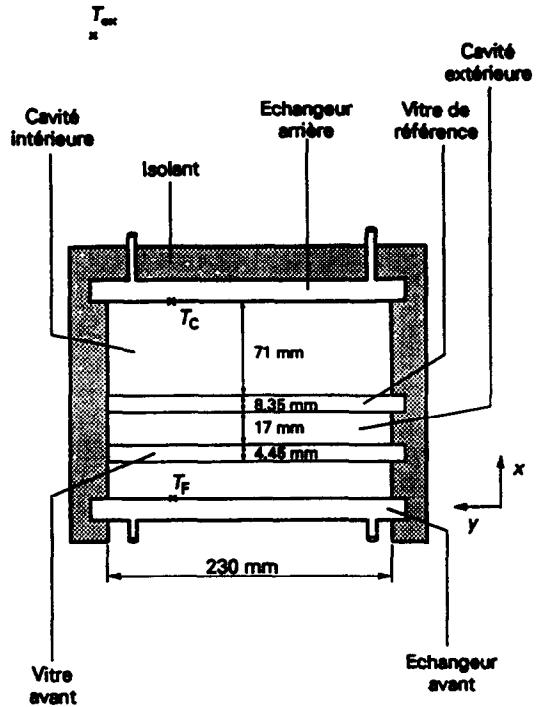


FIG. 1. Expériences en l'absence de flux visible et régime de conduction dans l'air : position de la cellule.

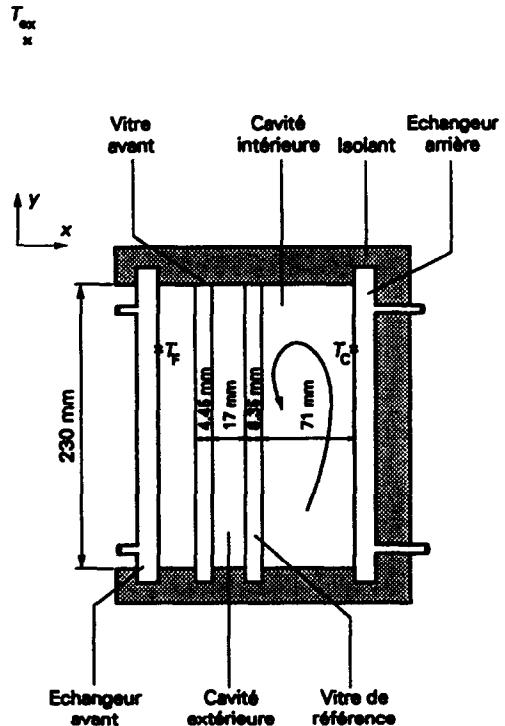


FIG. 2. Expériences en l'absence de flux visible et régime de convection naturelle dans l'air : position de la cellule.

De plus, afin de limiter les pertes extérieures l'ensemble est placé dans une chambre thermostatée.

2.2. Métrologie associée

Notre travail s'appuie sur une métrologie précise des températures utilisant des thermocouples.

Nous avons conçu et réalisé une acquisition de données bas niveau sur ordinateur PDP 11/23. Celle-ci comporte un multiplexage pour 128 voies de mesure avec une résolution meilleure que le microvolt ce qui correspond à $1/40^\circ$ de degré pour les thermocouples Chromel-Alumel utilisés. Ces thermocouples de diamètres 8, 12 et $20/100^\circ$ mm ont été étalonnés voie par voie. Cet étalonnage a été effectué avec deux points triples (eau à $0,001^\circ\text{C}$ et éthylène à $36,325^\circ\text{C}$) et un bain thermostaté au $1/20^\circ\text{C}$, au voisinage de 50°C , dont la température était repérée par une sonde de platine étalonnée. Ces trois mesures nous ont permis de déterminer les trois coefficients d'un polynôme de calibrage du second degré pour chaque thermocouple. Nous avons vérifié systématiquement la reproductibilité et la stabilité de chaque voie avec une précision de $\pm 0,5 \mu\text{V}$. Ceci permet d'assurer des différences de température à $\pm 0,025^\circ\text{C}$ ($\pm 1 \mu\text{V}$). Sur le montage final, nous avons assuré la parfaite stabilité de la "source froide" des 128 thermocouples en utilisant un bloc de cuivre (comportant les 256 soudures froides) plongé dans un bain d'huile, à forte constante de temps, thermostaté au voisinage de la température ambiante. La température du bloc de cuivre était repérée en permanence par une sonde platine étalonnée placée dans le bloc. Ce calibrage nous permet d'assurer des mesures en température avec une erreur absolue $< 0,04^\circ\text{C}$. Toutes les températures expérimentales que nous manipulerons dans cette étude présenteront donc une incertitude absolue de $0,05^\circ\text{C}$, indépendamment de tout biais introduit par la perturbation due à la présence du capteur.

2.3. Mesures effectuées

Deux grandes catégories de mesures ont été effectuées, correspondant à des régimes stationnaires et instationnaires.

—Pour les mesures stationnaires on a imposé plusieurs gradients de température dans la cellule, en fixant les températures des échangeurs avant et arrière.

—Pour les mesures instationnaires on commence par réaliser une condition isotherme dans toute la cellule, ce qui suppose plusieurs jours d'établissement du régime. Et à l'instant initial, l'échangeur arrière est soumis à un échelon.

Dans cet article, seule les mesures stationnaires, qui nous ont données les résultats les plus déterminants en l'absence de rayonnement visible, seront analysées.

2.4. Paramètre définissant le montage

Les paramètres du système sont ceux qui caractérisent le vitrage, l'air dans les cavités et les surfaces des parois des cavités.

Pour le vitrage les paramètres en régime stationnaire sont la conductivité, k , et l'émissivité infra-rouge Σ . La masse volumique π , la chaleur spécifique C_p , la diffusivité accessible directement ou par l'expression $k/\pi C_p$ n'interviennent qu'en régime instationnaire. La partie réelle n de l'indice moyen de réfraction dans le domaine des longueurs d'onde visible et le coefficient d'extinction moyen dans le visible κ doivent également être connus, en présence de rayonnement visible.

—Pour l'air on doit connaître la conductivité k_a , la viscosité cinématique ν , la diffusivité α et le coefficient de dilution β entre 10 et 40°C (convection naturelle).

—Pour les parois de la cavité il suffit de connaître l'émissivité infra-rouge Σ_p du revêtement noir utilisé. Les valeurs choisies pour ces paramètres sont définies dans le Tableau 1.

Les références qui apparaissent dans le Tableau 1 précisent l'origine des données utilisées ainsi que les valeurs mesurées spécialement pour ce travail.

On remarque sur ce tableau que, parmi les paramètres caractérisant le montage en l'absence de rayonnement visible et régime permanent, les paramètres k et Σ_p sont connus avec une précision plus modeste que les autres, de ce fait ils seront considérés comme les variables à identifier dans les étapes 1 et 3 de notre méthodologie (cf. Section 1).

3. MODELISATION DU MONTAGE

3.1. Modélisation de l'ensemble parois et cavités en l'absence de capteur

3.1.1. Code numérique [9–11]. Le code de calcul de conduction bidimensionnel dans le verre inclut dans ses conditions aux limites le couplage par conduction dans l'air et les échanges par rayonnement infra-rouge avec les parois des cavités entourant le vitrage. La géométrie bidimensionnelle (x, y) est caractérisée sur les Figs. 1 et 2). La 3ème dimension de la cellule est de l'ordre de $0,6$ m.

L'équation de la chaleur dans la vitre est discrétisée suivant un schéma de Patankar–Spalding avec maillage irrégulier qui permet de mailler plus finement les zones de plus forte variation de température. Le traitement en temps est semi-implicite (Crank–Nicholson).

Le rayonnement infra-rouge est échangé entre les faces du vitrage et les parois des cavités, l'air contenu dans ces dernières étant supposé transparent. Les parois sont grises et isotropes mais peuvent être d'émissivités différentes. Les parois n'étant pas isothermes elles sont découpées en un certain nombre de zones isothermes plus ou moins grandes suivant le degré de précision souhaité et l'importance des inhomogénéités en température. Pour les résultats numériques utilisés dans cette étude, le nombre de zones a été optimisé de façon à ce qu'il soit minimal tout en n'introduisant pas d'erreur, sur les sorties en température qui nous intéressent, d'un ordre supérieur à 10^{-3°C . Les

Tableau 1.

Paramètres	Valeurs fournies par la littérature ou par des mesures indépendantes du montage utilisé dans cette étude	Identification
<i>Vitre</i>		
Conductivité k	1,16(1 ± 0,03) W m ⁻¹ K ⁻¹ (St. Gobain, 1984)	inchangé
Emissivité IR Σ	0,90(1 ± 0,01) (Bonduelle, 1975)	imposé
Masse spécifique π	2530(1 ± 0,001) kg m ⁻³ (St. Gobain, 1984)	imposé
Chaleur massique C_p	795(1 ± 0,05) J kg ⁻¹ K ⁻¹ (St. Gobain, 1984)	inchangé
$k/(\pi C_p)$	0,577(1 ± 0,08) 10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹	inchangé
Diffusivité a (mesure directe)	0,52(1 ± 0,04) 10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹ (Degiovanni, 1987)	
Indice de réfraction moyen n	1,150 (St. Gobain, 1987)	imposé
Coefficient d'extinction moyen κ	22(1 ± 0,025) m ⁻¹ (St. Gobain, 1987)	inchangé
<i>Air</i>		
Conductivité k_a entre 10 et 40°C	0,026 W m ⁻¹ K ⁻¹	imposé
Viscosité cinématique ν	[16,04 + 0,98(T°C - 30)] × 10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹	imposé
Diffusivité α	23,7 × 10 ⁻⁶ m ² s ⁻¹	imposé
Coefficient de dilatation β	3,31 × 10 ⁻³ K ⁻¹	imposé
<i>Parois</i>		
Emissivité IR Σ_p	0,915(1 ± 0,04) (Cerutti, 1987)	0,94(1 ± 0,01)

échanges de chaque zone avec les autres sont traités par la méthode des éclaircissements-radiosités. Les paramètres du système sont ceux précédemment définis dans le Tableau 1.

Les incertitudes d'origine purement numériques liées à la méthode de discrétisation et au maillage employés dans ce code ($< 10^{-4}$), à conditions aux limites et paramètres parfaitement connus, correspondent pour les gammes de température où nous nous plaçons dans cette étude à des valeurs inférieures à 10⁻³°C sur les températures calculées.

3.1.2. *Conditions limites en haut et en bas de la cavité.* Les parois constituant le couvercle et le fond de la cavité ne sont pas parfaitement isolantes et les conditions aux limites sont définies à partir des moyennes des répartitions de température mesurées sur ces parois, et non pas par des hypothèses en flux qui seraient trop éloignées de la réalité.

L'influence d'une modification de 2 ou 3 dixièmes de degré sur ces températures de couvercle et de fond est sans conséquence sensible ($< 10^{-3}$ °C) sur les températures de la vitre de référence.

3.1.3. *Conditions limites en haut et en bas de la vitre.* La vitre de référence est encadrée dans le fond de la cellule mais isolée du couvercle, situation dont nous avons vérifié qu'elle peut être décrite par les conditions limites suivantes :

—Température imposée, au bas de la vitre déterminée par extrapolation des valeurs des températures expérimentales mesurées sur la paroi inférieure et sur la vitre.

—Adiabaticité pour le haut de la vitre.

En effet, le choix de ces conditions est confirmé par les allures très voisines des répartitions suivant y des

températures d'origine numérique et expérimentale, sur les 2 faces de la vitre de référence (Fig. 6).

3.1.4. *Sensibilité du code.* L'ensemble des précautions énoncées ci-dessus nous autorise à affirmer que les grandeurs qui permettront de caler le code sont :

—Les valeurs exactes des températures prises en entrée (conditions aux limites sur les parois de part et d'autre de la vitre) et en sortie (températures de surface de la vitre).

—Les paramètres thermophysiques énumérés au Tableau 1.

Ces derniers ne pourront prendre leurs valeurs que dans les fourchettes définies au Tableau 1. Les premières n'auront a priori comme latitude de variation que l'incertitude expérimentale en entrée et en sortie. Et si le calage est impossible dans ces conditions, cette impossibilité mettra en évidence l'existence d'une erreur systématique en sortie. Il sera alors nécessaire de modéliser la perturbation du capteur (Section 3.2), de l'introduire dans le modèle numérique et d'estimer les paramètres qui la caractérisent par comparaison avec les résultats expérimentaux.

3.2. Modélisation des perturbations dues aux capteurs

3.2.1. *Modèle.* En l'absence de perturbation due au capteur, la condition aux limites sur la face interne de la vitre de référence peut être décrite par le schéma électrique de la Fig. 3. Les échanges convectifs ou conductifs peuvent être introduits soit par le coefficient adimensionné h_c soit par le flux conductif d'échange adimensionné Φ_c . Les échanges radiatifs infra-rouge avec l'ensemble des parois de la cavité sont représentés par le flux adimensionné Φ_R (infra-

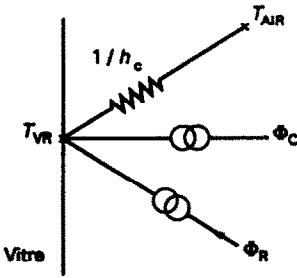


FIG. 3. Schéma électrique de la condition aux limites sur la vitre de référence.

rouge). Le flux Φ_R est calculé en prenant en compte 2 réflexions successives sur les parois de la cavité intérieure et celle de la vitre de référence [9].

Le capteur collé en surface est assimilable à une soudure de thermocouple incluse dans une goutte de colle. Celle-ci assure un contact imparfait avec la surface de la vitre. Le schéma représentatif correspond à la Fig. 4. La température mesurée par le thermocouple est T_{TC} (milieu de soudure). La résistance $1/h_1$ correspond à une demie épaisseur soudure et une couche de colle (et éventuellement une résistance de contact colle-vitre). La résistance $1/h_2$ correspond à une demie épaisseur de soudure et une couche de colle en contact avec l'air de la cavité. Elle inclue également les pertes par fils du thermocouple. La température de surface de la colle est T' . Les échanges conductifs et convectifs sont décrits par le coefficient d'échange h'_C ou le flux Φ'_C . Les échanges radiatifs infra-rouge correspondent au flux Φ'_R . Nous supposons, compte tenu de la faible importance du défaut géométrique que constitue le thermocouple, qui dans tous les cas que nous traiterons sera inférieure au dixième de l'épaisseur de la couche limite, que les phénomènes conductifs dans l'air ne sont pas modifiés par la présence du capteur et nous admettrons $h_C = h'_C$. De plus la faiblesse du défaut thermique $T' - T_{VR}$ comparé à l'écart de température engendrant la convection naturelle dans l'air

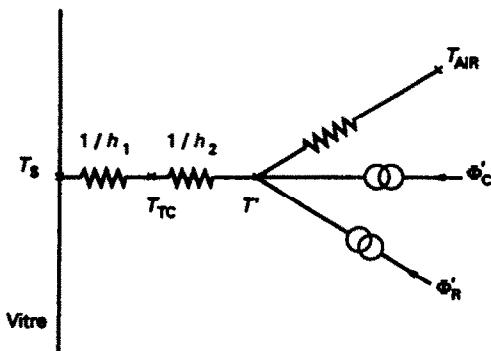


FIG. 4. Schéma électrique de la perturbation créée par un capteur collé sur la vitre de référence.

$T_C - T_F$ (Fig. 7) est telle que $(T' - T_{VR})(T_C - T_F) < 0,01$, ce qui nous permettra d'admettre, à la précision du centième, que $\Phi'_C = \Phi_C$.

Par contre on ne peut faire a priori la même hypothèse sur l'émissivité Σ_{TC} du capteur que nous supposons donc différente de celle de la vitre. Les échanges infra-rouge seront donc modifiés.

Le code de calcul étant basé sur un programme de conduction bidimensionnelle, la perturbation introduite dans le code simulé de fait une perturbation linéaire dans la 3ème dimension, et non pas une perturbation ponctuelle. Ceci reproduit correctement la réalité car les fils des thermocouples sont parallèles à cette dimension, et introduisent une perturbation sur toute leur longueur.

Notons que, dans le schéma décrivant les capteurs on n'introduit aucune capacité : le temps de réponse du capteur est supposé négligeable par rapport à ceux qui caractérisent le montage.

3.2.2. *Paramètres du modèle.* La réalisation individuelle du collage des thermocouples sur les vitrages entraîne des épaisseurs de colle variables (0,3 à 0,7 mm) et une impossibilité de localiser avec précision la position de la soudure du thermocouple dans la colle. Pour la plupart des cas le diamètre de la tache de colle est de l'ordre de 2 mm.

Les résultats d'une étude numérique préliminaire de sensibilité à l'émissivité du capteur Σ_{TC} montre que si celle-ci passe de 0,9 à 0,1 l'indication du capteur chute de 0,05°C. Compte tenu de cette faible sensibilité toutes les estimations de ce paragraphe ont été faites avec $\Sigma_{TC} = 0,9$, qui maximise l'erreur.

Plusieurs simulations numériques nous ont permis d'étudier les variations de température du thermocouple en fonction de son épaisseur et de la position de la soudure. Les configurations étudiées sont présentées sur la Fig. 5 et les résultats numériques en régime stationnaire sont rassemblés sur le Tableau 2.

Ces résultats correspondent à des conditions aux limites en flux de surface sur le vitrage de référence de l'ordre de 45 W m⁻² et à des températures de surface de la vitre voisines de 10,6°C. Ces valeurs correspondent à 0°C sur la vitre avant et 15°C sur l'échangeur arrière.

On constate sur le Tableau 2 que la température de la surface de référence est peu perturbée par la présence du capteur ($\leq 0,004^\circ\text{C}$). Par contre les différences entre la température du thermocouple T_{TC} et la température du vitrage sans capteur T_{VR} sont beaucoup plus importantes.

Pour une épaisseur de colle donnée, cet écart croît avec la distance de la soudure à la vitre. Pour une position de soudure donnée, cet écart augmente lorsque l'épaisseur de colle au dessus de la soudure diminue.

Cette étude numérique préliminaire permet de retenir :

— que nos capteurs ne créent qu'une faible perturbation ($\leq 0,004^\circ\text{C}$) ;

—que pour ces capteurs l'erreur entre l'indication du thermocouple T_{TC} et la température réelle de surface T_{VR} reste $\leq 0,10^\circ\text{C}$.

Ces estimations d'erreurs systématiques sont à comparer à l'incertitude de mesure due au calibrage des thermocouples ($\pm 0,04^\circ\text{C}$).

Pour une soudure voisine (0,05 mm) de la surface du vitrage, l'écart $T_{TC} - T_{VR}$ reste faible ($\leq 0,015^\circ\text{C}$) et toujours inférieure à l'incertitude de mesure: l'indication du thermocouple est alors une bonne évaluation de la température de surface du vitrage.

Pour un capteur plus éloigné de la surface (0,4 mm), l'écart est plus important et devient de l'ordre de l'incertitude de calibrage et même supérieur, il faut alors tenir compte de cet écart comme terme correctif systématique pour évaluer correctement la température de surface recherchée.

La prochaine phase de ce travail consiste, évidemment, à vérifier si ces ordres de grandeur des perturbations de mesure sont effectivement atteints expérimentalement dans des conditions analogues à celles envisagées ici. C'est à cette analyse que sera consacrée la Section 4 qui vient après la Section 3.3.

3.3. Modélisation de la convection naturelle dans la cavité intérieure et du couplage avec la paroi

Le phénomène de convection naturelle qui se développe dans la cavité intérieure en position verticale a été modélisé en couplant un code de convection naturelle développé au laboratoire [10] avec le code de conduction-rayonnement décrit ci-dessus.

Le code de convection naturelle existant utilisé ici repose sur les hypothèses suivantes :

- Le fluide est Newtonien et incompressible.
- La dissipation par frottement visqueux est négligée.
- Le régime est laminaire.
- Les propriétés physiques du fluide sont constantes et indépendantes de la température.

Le problème ainsi défini est décrit par le système d'équations classiques qui traduisent la conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement du fluide (Navier-Stokes). Dans le code existant initialement, la résolution [11] est effectuée avec les conditions limites de première ou de seconde espèce sur les parois de la cavité. Ce code, en variables primitives, utilise la discrétisation de Patankar-Spalding avec schéma hybride d'une part, et traitement de la correction de pression par l'algorithme SIMPLE, d'autre part. Son maillage est irrégulier. Il est fait pour être particulièrement rapide et ne donner que le régime établi de convection naturelle correspondant à des conditions limites imposées invariantes au cours du temps. Pour les maillages utilisés dans cette étude sa précision est supérieure à 10^{-4} . Le couplage de ce code avec le code décrivant la conduction dans la paroi de référence et ses échanges radiatifs avec la cavité, repose sur la grande différence de constante de

temps entre les transferts conductifs dans la vitre, et convectifs dans l'air [12, 13]. Autrement dit, à chaque pas de temps, on calcule le régime de convection naturelle *stationnaire* imposé par la répartition des températures des parois à l'instant précédent ; le flux convectif ainsi calculé est ensuite utilisé en entrée du code de conduction pour déterminer les nouvelles températures dans la paroi, en régime instationnaire. Celles-ci seront utilisées au pas suivant comme conditions aux limites pour la cavité en convection naturelle. La convergence de ce procédé est assurée par l'adaptation du pas de temps afin de ne pas dépasser un écart maximum sur l'incrément des flux de surface.

4. EXPLOITATION DES EXPERIENCES

4.1. Expériences avec régime de conduction dans la cavité intérieure

4.1.1. *Description des expériences.* La cellule est en position horizontale (Fig. 1) et le gradient de température dirigé de telle façon que le régime est conductif.

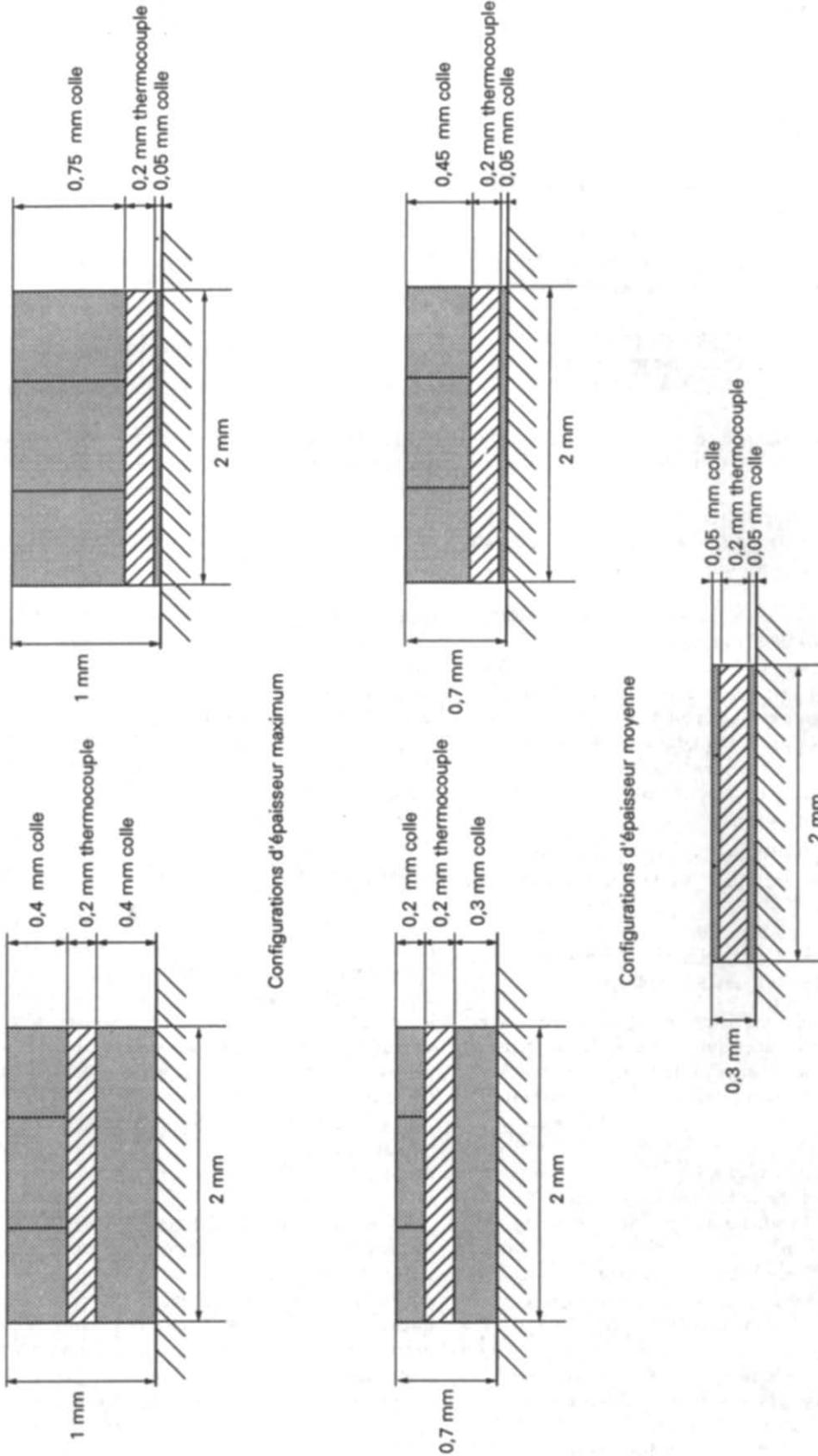
Chaque expérience consiste à réaliser un régime stationnaire établi ce qui demande plusieurs jours de stabilisation. Ensuite, à l'instant $t = 0$ initial, on réalise un échelon de température sur l'échangeur arrière et on attend l'établissement d'un nouveau régime stationnaire.

Les expériences effectuées dans ce cas sont résumées dans le Tableau 3(a). Les flux traversant le vitrage de référence dans les expériences en cause ici vont de 40 W m^{-2} pour les expériences 1 et 2 à 80 W m^{-2} pour l'expérience 3. Ils correspondent aux ordres de grandeur des flux perdus par les vitrages des bâtiments. La différence de température entre l'échangeur arrière et la face arrière de la vitre avant est ici de l'ordre de 15°C .

4.1.2. *Analyse des résultats en régime stationnaire.* Pour la simulation de ces expériences le code de calcul utilise comme entrées les températures, mesurées par thermocouples, dans les parois des cavités entourant le vitrage de référence, supposées non biaisées (les soudures des thermocouples sont à quelques centièmes de millimètres de la surface dans un trou borgne).

Le calage du code de calcul et des résultats expérimentaux est bien sûr effectué avec les mêmes valeurs de paramètres thermophysiques (Tableau 1) pour toutes les expériences.

Conformément à la méthode exposée en introduction, l'identification consiste à faire varier les paramètres les plus sensibles dans la marge des valeurs possibles (données du Tableau 1), pour obtenir un accord optimal entre les résultats numériques T_{VR} obtenus dans un premier temps sans introduire de perturbations dues aux capteurs et les résultats expérimentaux (températures T_{TC} mesurées par les capteurs) : si résultats numériques et expérimentaux se recourent avec une marge de précision correspondant aux incertitudes expérimentales, aucune erreur systé-



Epaisseur minimum
 Fig. 5. Configurations des capteurs.

Tableau 2.

	Epaisseur minimum	Epaisseur maximum		Epaisseur moyenne	
		Soudure au milieu de la colle	Soudure près de la vitre	Soudure au milieu de la colle	Soudure près de la vitre
Vraie température de surface T_{VR} (°C)	10,603	10,603	10,603	10,603	10,603
Température de surface sous le capteur T_s (°C)	10,603	10,599	10,600	10,600	10,601
Température du capteur T_{TC} (°C)	10,616	10,704	10,613	10,680	10,614
Perturbation $T_s - T_{VR}$ (°C)	0,000	-0,004	-0,003	-0,003	-0,002
Erreur de mesure $T_{TC} - T_{VR}$ (°C)	0,013	0,101	0,010	0,077	0,011

Tableau 3.

	$t < 0$	$t > 0$
(a) Echanges conductifs et infra-rouge dans la cavité. Pas de convection naturelle. Pas de flux visible. Vitrage horizontal.		
Exp 1	$T_C = T_F = T_{ex} = 20,1^\circ\text{C}$	$T_F = T_{ex} = 20,1^\circ\text{C}$ $T_C = 39,0^\circ\text{C}$
Exp 2	$T_C = T_F = 20,1^\circ\text{C}$ $T_{ex} = 30,0^\circ\text{C}$	$T_F = 20,1^\circ\text{C}$ $T_{ex} = 30,0^\circ\text{C}$ $T_C = 39,0^\circ\text{C}$
Exp 3	$T_C = T_F = T_{ex} = 9,3^\circ\text{C}$	$T_F = T_{ex} = 9,3^\circ\text{C}$ $T_C = 47,0^\circ\text{C}$
(b) Echanges conductifs, convectifs et infra-rouge dans la cavité. Pas de flux visible. Vitrage vertical.		
Exp 4	$T_C = T_F = T_{ex} = 21,3^\circ\text{C}$	$T_F = T_{ex} = 21,3^\circ\text{C}$ $T_C = 39,4^\circ\text{C}$

matique n'est à prendre en compte. Au contraire, s'il existe un écart systématique supérieur à l'incertitude des mesures, il découle obligatoirement de l'erreur de mesure due à la présence des capteurs.

Dans le cas du régime permanent, les paramètres du système sont k et Σ_p et ceux des capteurs $h_1 h_2 \Sigma_{TC}$. Les deux paramètres les plus sensibles sont Σ_p et k car d'eux dépend l'état thermique global du système. C'est donc eux que l'on commencera par identifier, à $1/h_1 = 1/h_2 = 0$ et $\Sigma_{TC} = \Sigma$.

A entrées T_C et T_F connues la sortie T_{VR} dépend de k et Σ_p de la façon suivante (approximation à une seule dimension) :

$$(h_R + h_C)(T_C - T_{2VR}) = H(T_C - T_F) = (T_{2VR} - T_{1VR})k/e = h_A(T_{1VR} - T_F).$$

On a $k/e \gg (h_R + h_C)$ et donc $(T_{2VR} - T_{1VR}) \ll (T_C - T_{2VR})$. Ceci entraîne que d'une l'incertitude sur T_{VR} liée à k :

$$\delta_k T_{VR} = \frac{1}{2}(T_{VR} - T_V) \frac{\delta k}{k}$$

et d'autre part l'incertitude sur T_{VR} liée à h_R

$$\delta_h T_{VR} = (T_C - T_{VR}) \frac{\delta(h_R + h_C)}{h_R + h_C}$$

vérifient l'inégalité

$$\delta_h T_{VR} \gg \delta_k T_{VR}$$

à erreur relative du même ordre, sur les paramètres (Tableau 1).

T_{VR} peut donc être calée, dans un premier temps, en faisant varier Σ_p (h_R), à k donné et donc à $(T_{2VR} - T_{1VR})$ invariant. On peut ainsi établir que (Fig. 6) $0,93 < \Sigma_p < 0,95$. Les bornes correspondent au calage de T_{2VR} sur T_{2TC} d'une part et de T_{1VR} sur T_{1TC} d'autre part.

Ces bornes se situent dans les limites imposées par les mesures préliminaires (Tableau 1).

On remarque que pour ces expériences l'écart $(T_{2TC} - T_{1TC})$ mesuré est toujours supérieur à l'écart $(T_{2VR} - T_{1VR})$ simulé, indépendant de Σ_p (Fig. 6). Deux origines possibles à cette différence :

- le coefficient k introduit dans la simulation est trop grand ;
- les températures T_{2TC} et T_{1TC} mesurées sont entâchées d'une erreur systématique.

Les écarts relatifs

$$|(T_{2TC} - T_{1TC}) - (T_{2VR} - T_{1VR})| / (T_{2TC} - T_{1TC})$$

sont de l'ordre de 10%, on pourrait donc les corriger en augmentant la conductivité k de 10% ; mais k est connu à mieux que 10% [13] ; cet écart est donc nécessairement dû à une erreur systématique de mesure. L'étude 3.2 permet de justifier cet écart : en effet celle-ci prédit que les températures perturbées diffèrent de 0,01 à 0,07°C des températures simulées en l'absence de capteur. Or les différences systématiques observées entre $(T_{2TC} - T_{1TC})$ et $(T_{2VR} - T_{1VR})$ varient de 0,03 à 0,06°C. Elles correspondent bien à l'ordre de grandeur de la somme de deux écarts de mesure

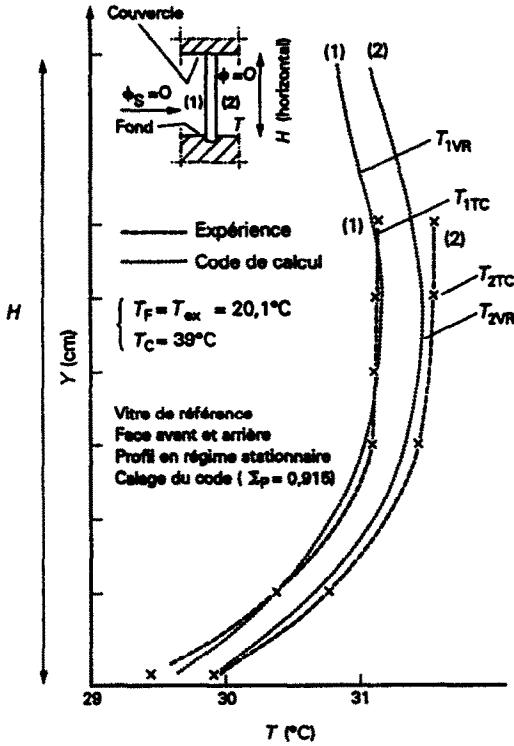


FIG. 6. Profil de température en régime stationnaire. Vitre de référence, faces avant et arrière.

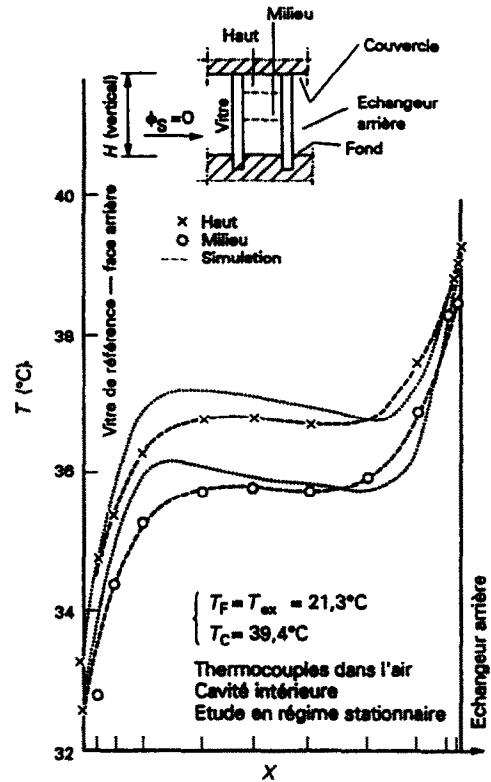


FIG. 7. Etude en régime stationnaire. Thermocouples dans l'air, cavité intérieure.

capteur-surface prédit par le calcul de perturbation de 3.2.

La conclusion de cette analyse est la suivante : avec des thermocouples de diamètre 8×10^{-2} mm soigneusement étalonnés ($\Delta T \leq 0,04^\circ\text{C}$) collés en surface (épaisseur 0,3 à 0,7 mm), on peut observer une très faible erreur systématique $T_{TC} - T_{VR}$ (voir Tableau 2) qui reste dans la fourchette de l'incertitude d'étalonnage. Le signe de $T_{TC} - T_{VR}$ dépend du signe du flux traversant le vitrage : quand le vitrage est chauffé de l'extérieur la température perturbée sous le capteur T_S est inférieure de quelques centièmes de $^\circ\text{C}$ et l'erreur systématique est positive.

4.2. Expériences avec convection dans la cavité intérieure

4.2.1. *Description des expériences.* La cellule est en position verticale (Fig. 2) : Il se développe un régime de convection naturelle dans la cavité intérieure. Dans la cavité extérieure (entre les 2 vitres) les dimensions sont telles que le régime est purement conductif dans l'air.

L'expérience réalisée est définie dans le Tableau 3(b). Les paramètres du système sont les mêmes que pour les expérience (a) (Tableau 3) avec en plus ceux de l'air pour la convection : coefficient de dilatation β , viscosité cinématique ν , diffusivité thermique α .

Ces paramètres supplémentaires sont bien définis,

aussi le principal enjeu des expériences (b) est de vérifier si tous les paramètres identifiés pour les expériences (a) restent corrects pour les nouvelles expériences. Corrélativement le deuxième but est de vérifier que le modèle décrivant la perturbation des capteurs introduit en Section 3.2 reste valable.

Malgré la présence de thermocouples soigneusement calibrés tendus dans l'air de la cavité suivant la troisième dimension, il est certain qu'une comparaison simulation-expérience sur la seule cavité d'air en convection naturelle, à entrées en condition aux limites en température sur l'échangeur (incertitude $\approx 0,025^\circ\text{C}$) et sur la vitre (incertitude $\approx 0,025^\circ\text{C} + \text{biais} \leq 0,1^\circ\text{C}$) risque d'être peu convaincante. En effet les mesures de température dans l'air sont a priori largement autant entachées d'erreur que les mesures de surface. C'est ce que nous avons effectivement vérifié. Seule l'estimation des flux de surface (gradient de température d'air au voisinage des parois présente un intérêt (Fig. 7)).

4.2.2. *Analyse numérique des résultats expérimentaux obtenus pour le système couplé vitre-cavité.* Nous avons donc préféré l'étude du système couplé vitre-cavité avec conduction dans la vitre et convection naturelle plus rayonnement infra-rouge dans la cavité intérieure. Les conditions limites sont : la température de la face arrière de la vitre avant et celle de l'échangeur arrière, qui présentent des incertitudes

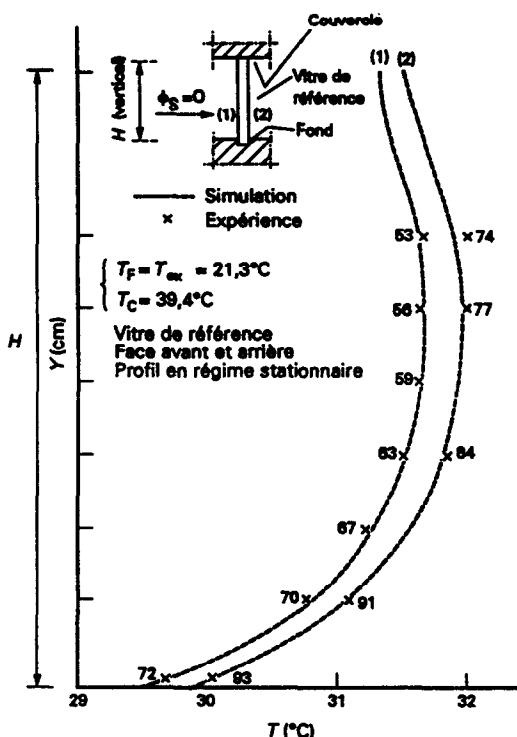


FIG. 8. Profil de température en régime stationnaire. Vitre de référence, faces avant et arrière.

de l'ordre de $0,025^{\circ}\text{C}$, ainsi que les températures des parois latérales.

L'analyse des résultats montre que la comparaison simulation expérience (Fig. 8) est très satisfaisante pour les variables de sorties étudiées ici. On remarque que dans la zone centrale de la vitre de l'une quelconque des faces, les écarts entre les températures mesurées et calculées sont toujours $\leq 0,1^{\circ}\text{C}$. D'autre part entre les 2 faces du vitrage, l'écart $\Delta(T_{TC} - T_V)_{\text{exp}}$ est légèrement supérieur à celui obtenu par le calcul ΔT_{sim} (sans capteurs). L'analyse du comportement des capteurs 3.2 permet de justifier cette différence. En effet, elle met en évidence en régime permanent, des écarts de l'ordre de $0,1^{\circ}\text{C}$ entre la température du thermocouple et celle de la vitre sans capteur.

5. CONCLUSION

La précision des résultats expérimentaux a été obtenue grâce à une grande rigueur dans la mise au point du montage et de son instrumentation.

La première série d'expériences, présentée ici, où les couplages entre vitres, cavités et parois sont dus uniquement à la conduction et au rayonnement infrarouge, a permis :

- de tester l'importance des inhomogénéités de température dans la vitre de référence ;
- d'identifier par simulation numérique les paramètres contrôlant le système ;

— d'évaluer les erreurs créées par des conditions de températures courantes ($5^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$) et de faibles flux ($40 < \Phi < 80 \text{ W m}^{-2}$).

Le deuxième type d'expériences a introduit un couplage supplémentaire par convection naturelle dans la cavité intérieure. Il a permis :

- de confirmer l'identification des paramètres faite précédemment ;
- d'estimer les flux surfaciques (rayonnement + convection naturelle) avec une précision $< 5\%$;
- de mettre en évidence que l'erreur de mesure des capteurs de température de surface est la même avec et sans convection naturelle, à l'incertitude de nos mesures près, et qu'elle reste inférieure à $0,1^{\circ}\text{C}$.

Par conséquent, dans les conditions d'utilisation des vitrages pour l'environnement humain, un travail soigné de mesure de température de surface, en l'absence de rayonnement visible, permet une identification précise des paramètres caractérisant la paroi concernée et ses échanges extérieurs et garantit des erreurs systématiques de mesures de températures de surface, dues à la perturbation de mesure, inférieures au dixième de degré.

La suite de ce travail consiste, en s'appuyant sur les résultats acquis dans cette première partie de l'étude, à analyser des expériences avec introduction d'un flux visible sur les vitrages.

BIBLIOGRAPHIE

1. J. P. Leroux, Etudes sur la détermination des températures de surface de 0°C à 400°C par l'intermédiaire de minces revêtements photoluminescents, PST Ministère de l'Air No. NT 119 (1962).
2. C. E. Moeller, Special surface thermocouples, *Instrum. Control Syst.* 36, 97–103 (May 1963).
3. G. G. Watson, Techniques for measuring surface temperature, Part 2, *Instrum. Pract.* 20, 335–341 (1966).
4. M. Delisee, Détermination par photométrie des températures de surface aux basses températures, *Proc. XIIIth Int. Congress of Refrigeration*, Washington, DC, Vol. 1 (1971).
5. R. Gery et M. Laurent, Un exemple de mesure de température de surface en régime transitoire, *Journées SFT* 149–156 (1975).
6. P. Satyamurthy, R. K. Marwah, N. Venkatramani and V. K. Rohatgi, Estimation of error in steady-state temperature measurement due to conduction along thermocouple leads, *Int. J. Heat Mass Transfer* 22, 1151–1154 (1979).
7. Ch. Souroullas et J. Huetz, Perturbation du champ de température provoquée par la présence d'un couple de surface en contact parfait avec le milieu, *Revue Gén. Thermique* 296–297, 397–406 (1986).
8. C. Benard, M. Delisee et C. Depoid, Métrologie des températures et flux de surface : analyse expérimentale et numérique des perturbations de mesure et mise au point d'une paroi de référence, *Journée SFT Températures de surface* (1987).
9. C. Depoid, Couplage entre paroi semi-transparente et cavité d'air par conduction convection et rayonnement : mesure des températures d'interface, Thèse doctorat de l'Université Paris VI, Paris (1988).
10. D. Gobin, Changement d'état solide-liquide : évolution temporelle du couplage entre la convection naturelle

dans la phase liquide et la conduction dans la phase solide. Etude numérique et expérimentale, Thèse doctorat d'Etat Université Paris VI, Paris (1984).

11. S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer in Fluid Flows*. Hemisphere/McGraw-Hill, New York (1980).
12. G. N. Ivey, Experiments on transient natural convection in a cavity, *J. Fluid Mech.* 144, 389–401 (1984).
13. St. Gobain, Vitrage "Memento technique" (1984).
14. A. Degiovanni, Mesures effectuées pour l'ARC Métrologie, LEMTA Ecole des Mines, Nancy, France (1987).
15. T. Honda, M. Fujii and T. Fujii, Free convection around vertical arrays of two horizontal wires, *Proc. ASME/JSME Thermal Engng Joint Conf.*, Honolulu (March 1983).
16. J. R. Parsons, Jr. and M. L. Arey, Jr., Development of convective heat transfer near suddenly heated vertically aligned horizontal wires, *Trans. ASME* 109, 912–918 (November 1987).
17. J. Lieberman and B. Gebhart, Interactions in natural convection from an array of heated elements, experimental, *Int. J. Heat Mass Transfer* 12, 1385–1396 (1969).
18. J. R. Parsons, Jr. and J. C. Mulligan, Transient free convection from a suddenly heated horizontal wire, *J. Heat Transfer* 100, 423–428 (1978).

IDENTIFYING THE MEASUREMENT ERROR OF A THERMOCOUPLE STUCK ON A SURFACE, UNDER DIFFERENT HEAT EXCHANGE CONDITIONS

Abstract—This paper deals with surface temperature measurements under the condition generally met in human environmental problems. It is both experimental and numerical. It consists in a thorough analysis of the disturbances created by measuring a surface temperature with a thermocouple stuck on the surface, under different heat exchange conditions. A very precise experimental set-up, with well-defined boundary conditions, and a very reliable numerical code could allow us to check the values of the thermophysical parameters of the system and to identify the weak disturbance created by the thermocouples as well as the measurement error of the thermocouple. The order of magnitude of the discrepancy between measurement and real value of the surface temperature could be verified with the help of a simple model of the sensor.

BESTIMMUNG DES MESSFEHLERS EINES AN EINER OBERFLÄCHE ANGEKLEBTEN THERMOELEMENTS BEI UNTERSCHIEDLICHEN RANDBEDINGUNGEN

Zusammenfassung—Die Arbeit behandelt die Messung von Oberflächentemperaturen unter Bedingungen, wie sie häufig in unserer Umgebung angetroffen werden. Die Untersuchung ist sowohl experimentell als auch numerisch. Die Störungen, die bei der Messung der Oberflächentemperatur mit einem auf diese Oberfläche aufgeklebten Thermoelement entstehen, werden bei verschiedenen Randbedingungen gründlich analysiert. Ein äußerst präziser Versuchsaufbau mit exakt definierten Randbedingungen und ein sehr zuverlässiges numerisches Berechnungsverfahren erlauben die Bestimmung der thermophysikalischen Parameter des Systems. Geringste Störungen durch die Thermoelemente wie auch der Meßfehler der Thermoelemente können damit festgestellt werden. Die Größenordnung der Abweichung zwischen dem Meßwert und dem richtigen Wert der Oberflächentemperatur läßt sich mit Hilfe eines einfachen Modells des Sensors bestätigen.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕРМОПАРОЙ, УСТАНОВЛЕННОЙ НА ПОВЕРХНОСТИ, ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА

Аннотация—Экспериментальным расчетным путем определяется температура поверхности при различных условиях теплообмена. Тщательно анализируются возмущения, возникающие из-за заделок в поверхность термопары. Применение прецизионной экспериментальной установки, характеризуемой определенными граничными условиями, а также надежного расчетного метода позволили проверить значения теплофизических параметров системы, установить слабое возмущение, вносимое термопарой и измерить ее погрешность. Порядок величины расхождения между измеренным и истинным значением температуры поверхности можно проверить с помощью простой модели датчика.