

Présentation d'une procédure expérimentale pour la caractérisation d'un composant en régime dynamique

Application à un mur capteur solaire à air

par J.-L. DUFRESNE (*), L.-M. CHOUNET (*), D. PICARD (*),
P. GAILLARD (**) et J.-M. NOPPE (***)

Nomenclature

b	paramètre multiplicatif dans la loi du coefficient d'échange convectif absorbeur-fluide arrière et peau-fluide arrière
C	capacités thermiques par unité de surface de capteur
D_0	diamètre des tuyaux de l'échangeur analogue
H	conductances thermiques numéro de l'événement courant
L	longueur de référence
\vec{M}	vecteur des puissances extraites calculées, de dimension N
M_j	puissance extraite calculée à l'instant j
n	exposant de Re dans la loi du coefficient d'échange convectif absorbeur-fluide arrière et peau-fluide arrière
N	nombre d'événements de mesure utilisés pour l'ajustement
P_0	puissance thermique extraite par tranche de capteur
q_j	écart des puissances mesurées-calculées pondéré par les erreurs de mesures, à l'instant j
Q	flux solaire absorbé
Q^2	somme, sur l'ensemble des points expérimentaux, des écarts quadratiques pondérés mesure-modèle q_j^2 ; grandeur à minimiser par la procédure d'ajustement
R	résistance thermique ($R = 1/H$)
Re	nombre de Reynolds
T	température d'un nœud
V	vitesse du vent

Symboles grecs

α	coefficient d'absorption
ϵ_j	erreur, à l'instant j , sur la différence entre les puissances extraites mesurée et calculée, due aux erreurs de mesures des différentes grandeurs
λ	conductivité thermique de l'air
μ_j	puissance extraite mesurée à l'instant j
$\vec{\omega}$	vecteurs des paramètres

Indices supérieurs : type de transfert

c	échange thermique par convection
k	échange thermique par conduction
r	échange thermique par rayonnement

Indices inférieurs : composants et environnement

a	absorbeur
ar	local arrière
c	ciel (échange radiatif grande longueur d'onde)
e	air extérieur, devant le capteur
f	air caloporteur circulant entre l'absorbeur et le fond
i	isolant du fond
j	événement (ou instant) de mesure j
p	peau (ou surface intérieure) de l'isolant arrière
v	vitre

1. Introduction

Les méthodes expérimentales d'essai en thermique industrielle ont beaucoup évolué ces dernières années grâce au développement des micro-calculateurs.

Actuellement, en effet, les ingénieurs font largement appel à la simulation numérique lors de leurs études ; les modèles utilisés deviennent de plus en plus détaillés, ce qui exige une connaissance plus complète des composants élémentaires du système étudié. En thermique de l'habitat, par exemple, les besoins de chauffage d'une habitation ne pouvaient être déterminés — encore récemment — que de façon grossière à partir du coefficient de perte globale G [1]. Les codes de calcul récents, ou en cours de développement, permettent une analyse thermique plus précise par la prise en compte des régimes dynamiques et de phénomènes complexes (mouvements d'air entre pièces, transfert d'humidité, comportement des occupants, ...).

Parallèlement aux codes de calcul, les moyens expérimentaux ont également fortement évolué, les micro-calculateurs actuels permettant de piloter précisément les expériences, d'effectuer de nombreuses mesures et d'analyser d'importants volumes de données.

Le travail que nous présentons ici se situe dans le cadre de cette évolution des méthodes expérimentales en ingénierie thermique. Ce domaine en plein essor a, par exemple, suscité la journée d'étude de la S.F.T.

(*) Université Paris XI, U.P.R. 293 du CNRS (Equipe RAMSES), Bât. 508, 91405 Orsay Cedex (France).

(**) CETIAT (Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques), Plateau du Moulon, BP 19, 91402 Orsay Cedex (France).

(***) Université Paris XI, Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Bât. 200, 91405 Orsay Cedex (France).

Article reçu le 12.12.1988, accepté le 8.02.1990.

sur l'estimation des paramètres [2]. Dans le domaine de la thermique de l'habitat, des travaux sont effectués et se poursuivent pour identifier un modèle de pièce d'habitation à partir de la seule mesure de la température d'air de la pièce [3 et 4].

Notre étude porte sur l'identification d'un modèle dynamique de composant architectural : un *mur capteur solaire à air*. Cette recherche commune CETIAT-CNRS a démarré en 1982, à la demande de l'AFME, et avait pour but d'élaborer une norme d'essai de capteurs solaires à air adaptés à leur utilisation sous nos climats. La procédure d'identification développée a été appliquée avec succès à un composant de type industriel à partir d'expériences réalisées dans un environnement de centre technique [5].

Nous présenterons tout d'abord, dans cet article, les grandes lignes de la méthode adoptée (§ 2). Le dispositif expérimental étant un point-clé dans la réussite d'une identification, nous présentons sa conception et sa réalisation (§ 3) ainsi que l'analyse des erreurs de mesure (§ 4). Après l'exposé succinct de la procédure d'identification — développée par ailleurs [5 et 6] — nous montrerons (§ 6) quel type d'information celle-ci peut produire pour le concepteur de composants innovants : mise en évidence, soit des qualités du composant testé (ou d'une partie du composant), soit des défauts de conception ou de réalisation.

Au prix d'une complexité expérimentale certes accrue, un industriel développant un nouveau composant possède ainsi un outil permettant d'améliorer et de prévoir précisément les performances de son produit en situation réelle. Cela est typiquement impossible avec les normes d'essai des capteurs solaires actuels (par exemple [7]). Les propriétés statistiques de la procédure d'identification permettent par ailleurs au Centre Technique responsable des essais d'estimer l'incertitude sur les paramètres ajustés d'une part, de s'assurer que le modèle identifié et les expériences réalisées sont cohérents d'autre part.

2. Démarche adoptée

2.1. Définition de la procédure d'identification

Pour éviter certaine ambiguïté de langage, nous définirons tout d'abord le vocabulaire lié à la démarche.

Nous entendons par *identification d'un modèle* un processus dont les principales étapes sont les suivantes :

— élaboration (ou caractérisation) d'un modèle du système étudié et estimation a priori de la valeur des paramètres ;

— élaboration et réalisation d'expériences adaptées au domaine de fonctionnement du système ;

— détermination des paramètres à ajuster pour le modèle choisi et pour les expériences réalisées ;

— ajustement empirique des paramètres et adaptation éventuelle du modèle ;

— ajustement des paramètres par application d'un critère (minimisation d'un écart quadratique, recherche du maximum de vraisemblance, ...)

— vérification de la pertinence de la démarche, estimation de l'incertitude sur les résultats obtenus et du domaine de validité du modèle identifié.

Ce processus n'est pas du tout séquentiel dans la mesure où des résultats d'une étape donnée peuvent remettre en cause les hypothèses émises dans les étapes précédentes. La découverte, lors de l'ajustement des paramètres, d'un phénomène physique ignoré pourra par exemple conduire à la définition et à la réalisation de nouvelles expériences.

2.2. Objectifs de l'étude.

Définition de l'expérimentation

Nous nous plaçons dans le cadre de la caractérisation d'un système ou d'un composant industriel par un centre technique.

Dans le cas de capteurs solaires à air, l'industriel voudra — à un certain stade de développement de son produit — estimer de façon précise l'énergie thermique fournie par son composant en situation réelle et connaître les principaux phénomènes physiques entrant en jeu lors de la production de cette énergie afin, soit d'augmenter les performances, soit de diminuer les coûts, soit de l'adapter à un contexte d'utilisation particulier.

Ainsi, il est important non pas de connaître en détail l'ensemble des phénomènes physiques présents dans le capteur solaire, mais de quantifier les principaux phénomènes intervenant dans la production de l'énergie thermique.

Par ailleurs, un composant industriel résiste généralement à toute tentative de modélisation exhaustive détaillée (géométrie complexe, matériaux non homogènes, incertitude dans la fabrication, ...) ainsi qu'à une expérimentation intrusive fine (accès à l'intérieur du composant difficile, voire impossible, mesures très perturbantes ou perturbées,...).

Nous avons donc choisi d'ajuster des paramètres du modèle à partir de l'unique comparaison mesure-calcul de la puissance thermique extraite du capteur. De cette contrainte forte, liée aux objectifs de notre étude, découleront les principales exigences sur le dispositif expérimental, sur la modélisation du système, ainsi que sur le processus d'ajustement des paramètres.

3. Présentation du dispositif expérimental

3.1. Conception

Le banc d'essai doit d'abord reproduire les conditions usuelles de fonctionnement du capteur solaire ainsi que les conditions météorologiques auxquelles il est normalement soumis. Dans cette dernière perspective, nous avons mesuré, à Orsay, le flux solaire au pas de temps de la minute, sur une année, et avons fait une première analyse statistique afin de caractériser les fluctuations rapides de l'ensoleillement [5].

Par ailleurs, ce banc d'essai est également destiné à étudier des lois de commande en débit d'air circulant dans le capteur; cette grandeur doit donc être pilotable selon différents scénarios.

TABLEAU I

Récapitulatif de nos exigences pour le banc d'essai : plage et dynamique de variation des grandeurs d'entrée et précision de mesure requise. Ces résultats ont été obtenus à partir de résultats de simulations préliminaires

Grandeur	Plage de variation	Dynamique de variation	Ecart type de l'erreur de mesure
Eclairement	0 à 1 000 W/m ²	1 min	1 % ⁽⁴⁾
Débit d'air dans le capteur	0 à 260 m ³ /h	1 min	1 %
Température d'entrée de l'air dans le capteur	20 à 70 °C	quelques minutes	0,5 °C
Différence de température entrée-sortie			0,1 °C
Température de ciel	0 à 30 °C	quelques minutes	1 °C
Température de l'air devant le capteur	0 à 30 °C	quelques minutes	1 °C
Vitesse de l'air (vent)	0 à 4 m/s	1 min	0,2 m/s

Mais les exigences les plus fortes sur le dispositif expérimental proviennent de la démarche adoptée, l'identification reposant sur la mesure d'une seule grandeur. Les expériences à réaliser doivent compenser ce petit nombre de grandeurs mesurées par la richesse du spectre de variation des grandeurs d'entrée et par une bonne précision de mesure.

Pour quantifier de façon précise ces exigences, nous avons effectué différentes simulations numériques à partir de modèles de capteurs issus d'études antérieures [8 à 10]. Ces simulations nous ont permis d'établir un plan d'expérience adapté [5] et d'en déduire des exigences précises sur le dispositif expérimental concernant la plage et la dynamique de variation des grandeurs d'entrée d'une part, la précision de mesure d'autre part (Tableau I).

On peut tout d'abord remarquer, à partir de ce tableau, la grande précision de mesure requise.

De plus, par rapport aux simulateurs solaires existants [5 et 11], le dispositif expérimental ainsi défini possède diverses particularités [5 et 12] :

- la bonne reproduction du spectre solaire n'est pas un point critique pour l'essai des capteurs solaires usuels ;
- le flux solaire doit varier rapidement et dans une large gamme d'éclairement ;
- les échanges convectifs et radiatifs sur la face avant du capteur doivent être bien contrôlés et mesurés ;
- l'ensemble des grandeurs doit être précisément pilotable.

3.2. Présentation générale du banc d'essai réalisé

Le simulateur solaire, qui a été construit à partir de 1982 par l'équipe RAMSES et le CETIAT d'Orsay dans un hall de cet établissement, peut être schématisé par les principaux éléments suivants (voir figures 1 et 2) :

- un *insolateur vertical* de 12 m², composé de 429 lampes tungstène de 150 W fortement ventilées, permet de créer 17 niveaux d'éclairement de 130 à 1 150 W/m², spatialement homogènes, sur une sur-

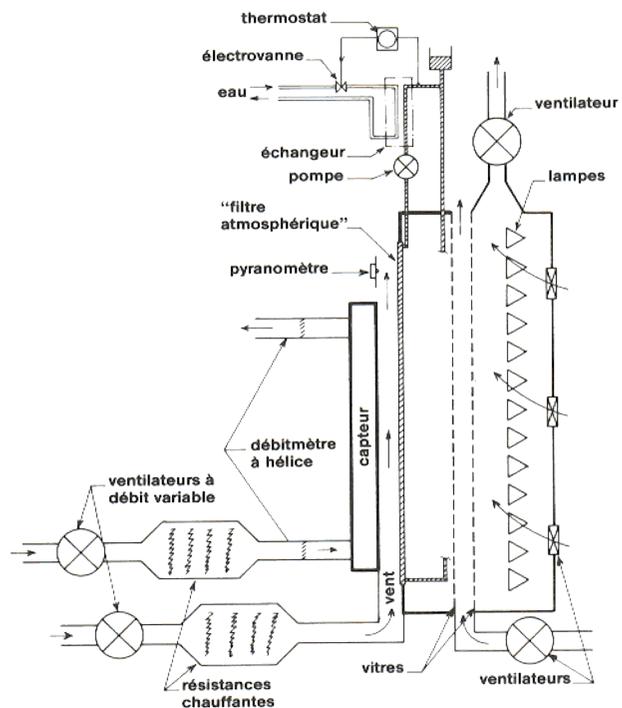


Fig. 1. — Coupe schématique du banc d'essai

face également verticale de 6 m² ; cette surface d'essais est verticale car, sous nos climats, on conçoit essentiellement des systèmes avec capteurs à air comme composants de façade ou en toiture très aiguë (utilisation d'hiver) ;

- un *séparateur thermique*, constitué de deux vitres fortement ventilées, absorbe et évacue une partie du rayonnement infrarouge thermique émis par les lampes ;

- un *filtre atmosphérique* (rideau d'huile) totalement opaque aux rayonnements I.R. thermiques, situé entre ces vitres et le capteur, permet de contrôler les échanges radiatifs de grande longueur d'onde avec la face avant du capteur ; l'huile silicone circulant dans ce rideau atmosphérique est thermostatée ; ce dispositif est une des originalités fortes de notre banc d'essai ;

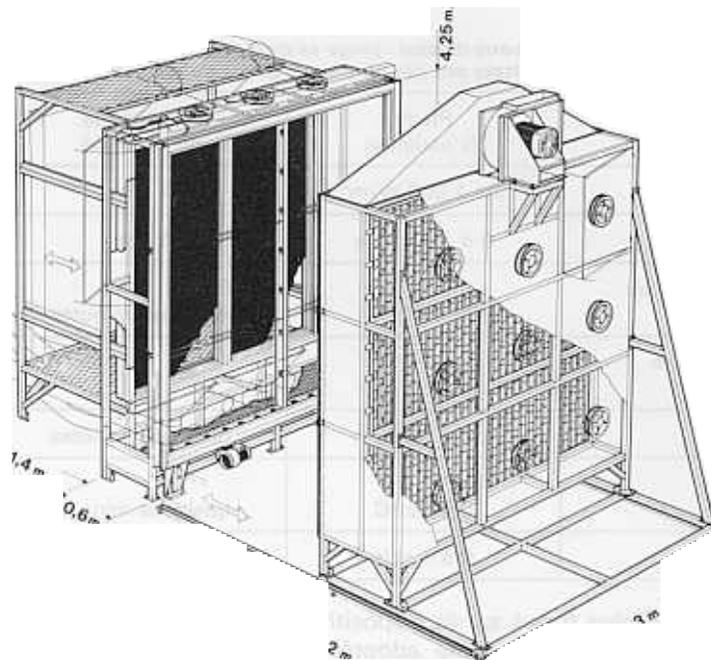


Fig. 2. Vue en perspective du banc d'essai, d'après les plans d'exécution

— un ventilateur et une batterie de chauffe permettent de faire varier la vitesse et la température de l'air circulant devant le capteur testé (simulation du vent) ;

— un système d'acquisition évolué permet de piloter l'éclairement, le débit et la température d'air à l'entrée du capteur ;

— pour la sécurité de l'installation, des mesures de température sont effectuées en une vingtaine de points du simulateur solaire par un système de contrôle indépendant du système d'acquisition et de pilotage du banc d'essai ; un arrêt d'urgence est déclenché en cas de surchauffe.

3.3. Réalisation d'un éclairement à fluctuations réalistes

Nous souhaitons réaliser un éclairement qui soit variable dans le temps tout en restant spatialement homogène sur toute la surface du capteur.

Les principales réalisations, existant dans d'autres laboratoires et permettant des éclairements variables, ainsi que certains détails de la nôtre, sont présentées en Annexe.

Pour des raisons de simplicité de mise en œuvre et de faible coût, nous avons choisi de simuler l'éclairement solaire à l'aide d'un grand nombre de lampes tungstène à réflecteur incorporé et de faible puissance. L'extinction d'une partie d'entre elles permet de faire varier l'éclairement dans le temps (17 niveaux d'éclairement régulièrement croissant) tout en conservant une bonne homogénéité spatiale et sans changement de spectre. Nous présentons sur la *figure 3* un exemple de cartographie de l'écart relatif entre l'éclairement mesuré en chaque point et l'éclairement moyen. Pour chacun des 17 niveaux d'éclairement, nous avons calculé l'écart type de cet écart relatif et avons trouvé une valeur toujours inférieure à 8 % ; cela est conforme aux recommandations des normes d'essais actuelles de capteurs solaires à eau.

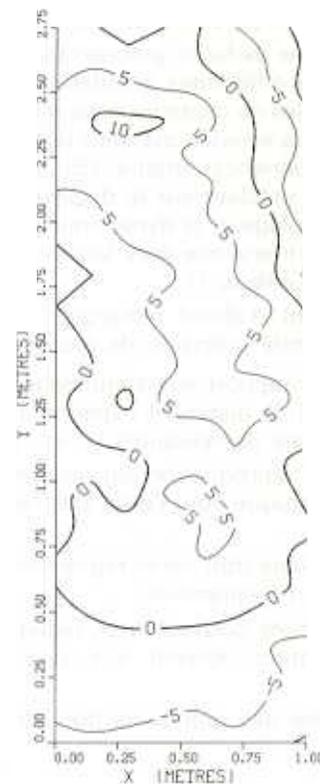


Fig. 3. — Cartographie de l'éclairement sur une moitié de l'insolateur. Ecart relatif mesuré, en %, entre le flux ponctuel et le flux moyen (de 940 W/m^2)

3.4. Contrôle des échanges radiatifs de grande longueur d'onde (température de ciel)

La température de *ciel* des insolateurs existants n'est pas contrôlée et les résultats des mesures de cette grandeur sont souvent contradictoires : certains la

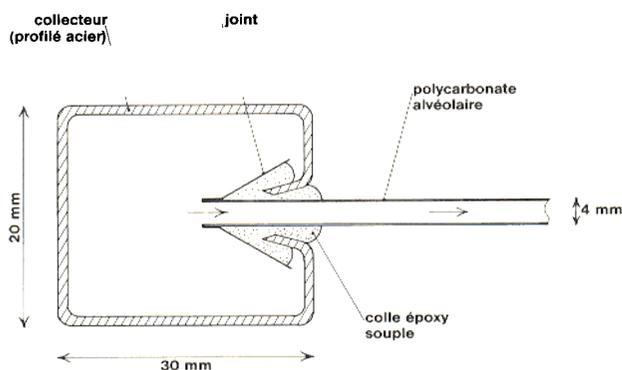


Fig. 4. — Schéma de la liaison collecteur-polycarbonate du rideau atmosphérique

négligent; d'autres trouvent une valeur élevée (cf. rapport CCE [11]). Cette mesure est par ailleurs délicate à mettre en œuvre [13].

Une analyse détaillée de différents travaux d'essais de capteurs solaires [14 à 16] nous a amenés à supposer que les insolateurs actuels simulent correctement le rayonnement solaire (c'est-à-dire les apports d'énergie), mais de façon non satisfaisante les échanges thermiques avec l'environnement (c'est-à-dire les pertes d'énergie), et en particulier les échanges radiatifs grandes longueurs d'onde.

Une vitre (ou un filtre opaque aux rayonnements I.R. thermiques), refroidie par de l'air et dont on mesure la température, est parfois placée devant le capteur pour réduire les échanges radiatifs grande longueur d'onde [17 et 18]. Ce dispositif ne permet toutefois ni un contrôle ni une mesure précis.

En nous basant sur ce même principe, nous avons réalisé un *filtre atmosphérique* en remplaçant la vitre précédente par un panneau de polycarbonate alvéolaire dans lequel circule de l'huile silicone régulée en température (figure 1). Le tout est transparent aux rayonnements visible et proche I.R., et opaque aux I.R. thermiques. La température de surface du *filtre atmosphérique* est proche de la température moyenne de l'huile en circulation rapide. Le filtre que nous avons réalisé est constitué de 3 panneaux de 1 m² chacun. Une opération délicate à réaliser fut la liaison par collage de la plaque de polycarbonate alvéolaire au collecteur reliant ce panneau au reste du circuit hydraulique (figure 4).

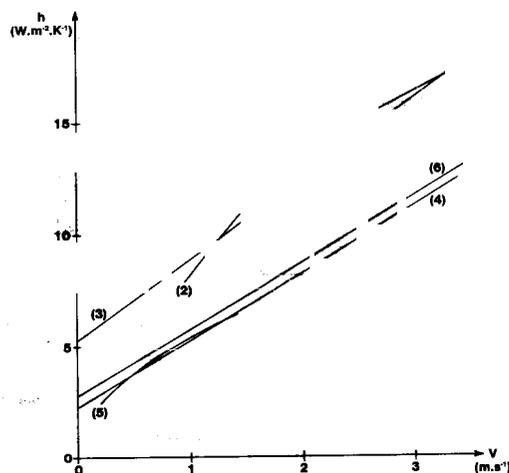
Ce dispositif nous permet donc de simuler une température de *ciel* réaliste, facilement mesurable et pilotable indépendamment des autres grandeurs météo.

3.5. Contrôle des échanges convectifs devant le capteur

Les expressions du coefficient d'échange convectif $H_{e,v}^c$ entre la vitre et l'air extérieur sont très diverses suivant les auteurs. Six lois expérimentales tirées de la littérature sont représentées sur la figure 5; trois d'entre elles proviennent d'expériences réalisées en climat extérieur et sont proposées respectivement par TEST *et al.* [19], SOLTAU *et al.* [20] et JURGES (et reprises par DUFFIE et BECKMANN [21]) :

$$H_{e,v}^c = 8,55 + 2,6 \cdot V \quad (1)$$

$$H_{e,v}^c = 8,2 \cdot V^{0,75} \quad (2)$$



Les chiffres entre parenthèses affectés à chaque courbe correspondent aux équations (1) à (6) du paragraphe 3.5

Fig. 5. — Variation du coefficient d'échange convectif entre la vitre du capteur et l'air extérieur en fonction de la vitesse du vent, d'après six lois expérimentales tirées de la littérature

$$H_{e,v}^c = 5,7 + 3,8 \cdot V \quad (3)$$

avec V , vitesse du vent en m/s

Les autres sont issues d'expériences réalisées en soufflerie, respectivement par ROWLEN (et reprises par HONARBAKHSI [22]), SPAROW *et al.* [23] et OLIPHANT [24] :

$$H_{e,v}^c = 2,3 + 3 \cdot V \quad (4)$$

$$H_{e,v}^c = 0,86 \lambda / L \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}$$

avec $2 \cdot 10^4 < Re < 10^5$

Cela donne pour de l'air à 10 °C et une longueur de référence de 1 m :

$$H_{e,v}^c \approx 6,0 \cdot V^{0,5} \quad (5)$$

$$H_{e,v}^c = 2,8 + 3 \cdot V \quad (6)$$

On remarque qu'il y a une grande différence entre ces deux groupes de lois d'une part, qu'il y a une forte dispersion des lois déterminées en extérieur d'autre part.

Outre les difficultés expérimentales, l'hypothèse généralement retenue pour expliquer ces différences est que la turbulence de l'écoulement n'est pas du même type à l'extérieur et en soufflerie. En climat naturel, il existe des tourbillons de grande dimension et la vitesse instantanée ainsi que la direction de l'air varient rapidement (quelques secondes). Différents travaux sont en cours pour estimer plus précisément ce coefficient d'échange, en recherchant par exemple une relation non plus uniquement avec la vitesse du vent, mais également avec son irrégularité [20].

Dans ce contexte, nous nous sommes fixés comme objectif non pas de simuler des conditions réelles, mais des conditions reproductibles et pilotables. Pour cela, nous soufflons de l'air entre le capteur et le filtre atmosphérique, de bas en haut (figure 1). Des écrans transparents, disposés de chaque côté du capteur, ferment ce conduit; la vitesse de l'air est alors constante sur toute la surface vitrée du capteur. Nous avons pu identifier expérimentalement le coefficient d'échange dans ces conditions [5]; la valeur obtenue est concordante avec les résultats des essais en soufflerie cités précédemment.

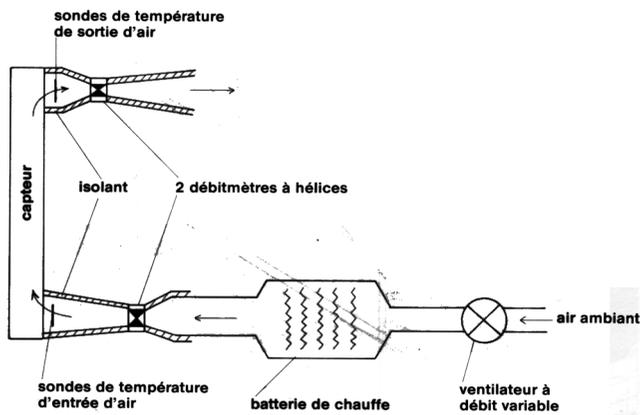


Fig. 6. — Schéma de la boucle aéraulique alimentant les capteurs testés

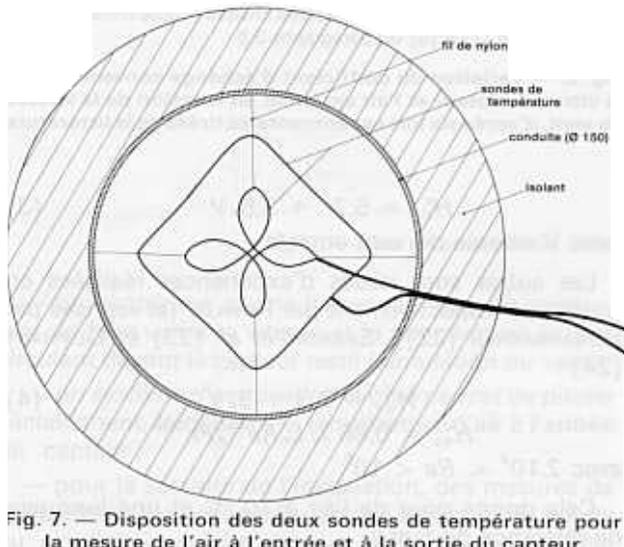


Fig. 7. — Disposition des deux sondes de température pour la mesure de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur

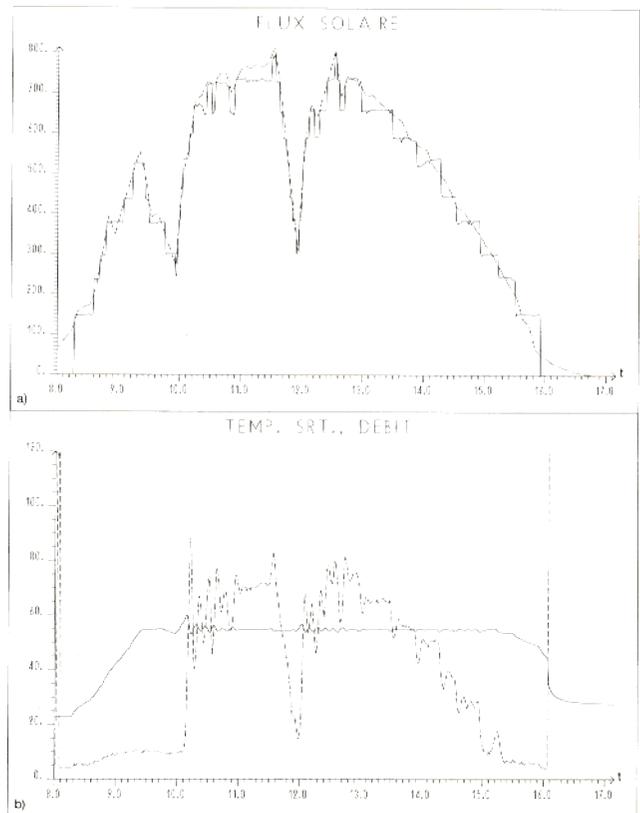
3.6. Choix de la boucle aéraulique

Dans le cadre d'une opération de la CCE, un capteur à air a été testé dans différents laboratoires européens. Les publications sur ce sujet [25] montrent une forte dispersion des résultats, en tout cas beaucoup plus importante que pour les capteurs à eau. Cela proviendrait [16 et 25] :

- d'une mauvaise mesure du débit,
- d'une forte incertitude sur la mesure de la différence de température entrée-sortie de l'air circulant dans le capteur,
- d'une mauvaise prise en compte des fuites d'air.

La métrologie des grandeurs aérauliques (mesure du débit et des températures) doit donc être traitée avec un soin particulier. De plus, les fuites d'air sont un problème majeur pour de nombreuses études de chauffage solaire aéraulique [16, 25 et 26] ; souvent non mesurées, elles sont parfois dangereusement interprétées (on a par exemple pu conclure que, avec des conditions très particulières, les fuites d'air augmentent le rendement du capteur [27]).

Le CETIAT d'Orsay a réalisé et commercialisé un débitmètre à hélice de très bonne précision (mieux que 0,5 %), à faible perte de charge (10 Pa à 160 m³/h) et permettant une mesure en continu du débit d'air de 10 à 300 m³/h. En plaçant un débitmètre à l'entrée et à la sortie du capteur (figure 6), nous avons pu ainsi



Le temps, exprimé en heures, est en abscisses
En ordonnées :

- (a) ——— mesure de l'éclairement simulé sur le banc d'essai (W/m²)
- mesure de l'ensoleillement de la journée réelle (W/m²)
- (b) ——— mesure de la température de sortie d'air du capteur (°C)
- mesure du débit d'air à l'entrée du capteur (m³/h)

Fig. 8. — Simulation de l'éclairement d'une journée réelle avec une consigne en température de sortie d'air constante

mesurer en continu et avec précision les débits entrant et sortant du capteur et en déduire le débit des fuites d'air (cf. § 4.4).

Pour la mesure de température, nous avons placé (figure 7) deux sondes filiformes en platine, d'une longueur de 30 cm, (fabriquées par la Société Comptoir-Lyon-Allemand-Louyot), dans les conduites d'air à l'entrée et à la sortie du capteur, selon une géométrie nous permettant d'intégrer spatialement la température de l'air. Nous avons pu apprécier à l'usage sa très bonne précision (cf. § 4.3).

3.7. Système d'acquisition de données et de commande

Nous avons construit un système d'acquisition de données évolué, géré par microprocesseur, permettant d'effectuer de nombreuses mesures (jusqu'à une centaine) toutes les minutes, et de piloter l'expérience, c'est-à-dire :

- de piloter l'éclairement : on peut soit fixer la consigne de flux, soit simuler une journée météo pré-enregistrée sur fichier ;
- d'asservir le débit d'air dans le capteur à une loi de commande ; on peut, par exemple, fixer soit une consigne en débit, soit une consigne en température de sortie d'air ; dans ce dernier cas, la consigne en

débit est recalculée en permanence pour satisfaire la consigne en température de sortie ;

— de commander la température d'entrée d'air dans le capteur.

Certaines possibilités de pilotage sont illustrées sur la *figure 8* : après avoir mesuré l'éclairement d'une journée particulière, en climat naturel, nous l'avons programmé sur notre insolateur (*figure 8a*). Par ailleurs, le système de commande pilote le débit de façon à maintenir la température de sortie d'air du capteur constante (*figure 8.b*).

4. Analyse des erreurs de mesure

Nous présentons ici la méthode adoptée pour la détermination des erreurs de mesure et l'illustrons par quelques résultats (cf. [5] pour les résultats complets). En effet, si toute analyse expérimentale rigoureuse ne saurait être envisagée sans une estimation correcte des erreurs de mesure, le critère d'ajustement adopté renforce, comme on le verra, cette exigence.

Nous appellerons ici *erreur de mesure* la loi de probabilité de la différence entre la valeur étalon et la mesure réalisée. L'écart type de cette fonction sera calculé. Nous parlerons parfois simplement de *l'erreur sur X* pour signifier l'écart type de la distribution de l'erreur sur X.

La détermination des erreurs, autres que celles de calibrage, est basée sur l'étude statistique de la différence entre plusieurs mesures simultanées d'une même grandeur physique, par des appareils différents. Ces mesures sont effectuées sur notre banc d'essai toutes les minutes, pendant toute la durée des expériences.

4.1 Erreur de calibrage des appareils

L'ensemble des appareils de mesure ont été calibrés avec soin : l'écart type de cette erreur est estimé à 0,02 K pour les sondes platine étalonnées par nos soins, à 0,2 % pour les débitmètres étalonnés par le CETIAT, à 1 % pour les pyranomètres étalonnés à notre demande par la Météorologie Nationale. Cette dernière erreur de calibrage est la seule qui ne soit pas négligeable, mais ne nous gêne pas pour cette étude préliminaire : une erreur de calibrage de 1 % entraînera une erreur de 1 % sur la valeur du coefficient d'absorption identifié, mais la différence puissance extraite mesurée-simulée n'en sera pas affectée tant que les expériences sont réalisées sur le même banc d'essai.

4.2. Erreur due à la perturbation des signaux électriques

Nous avons déterminé l'erreur pour un signal électrique de tension très faible tel celui provenant d'une différence de température. Cette erreur peut provenir de parasites électriques, de mauvais contacts, etc. Pour cela, nous avons placé deux résistances étalons de 100 ohms à l'emplacement habituel des sondes de température, les avons mesurées pendant toute la

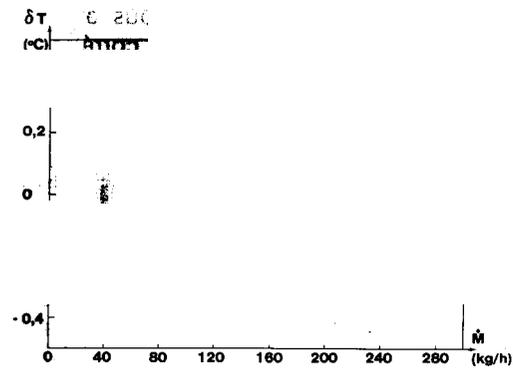


Fig. 9. — Diagramme de corrélation de la différence des deux mesures de température d'air à l'entrée du capteur (ordonnées) en fonction du débit-masse d'air dans le capteur (abscisses)

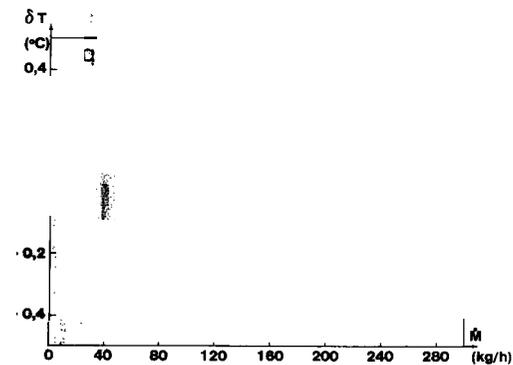


Fig. 10. — Même diagramme que celui de la figure 9, mais pour deux sondes de température d'air à la sortie du capteur

durée des expériences et avons tracé un histogramme de la différence entre ces deux résistances, convertie en Kelvins d'après la loi des sondes Pt 100. L'écart type de cette différence est de 0,02 K et il n'existe aucun point de mesure (sur plus de 10 000 points) pour lequel cette différence soit supérieure à 0,2 K). Ces résultats confirment donc la qualité des appareils utilisés et du montage réalisé (blindage des câbles, convertisseur analogique-numérique double rampe, etc.).

4.3. Erreur de mesure de la température d'air à l'entrée et à la sortie du capteur

A l'entrée et à la sortie du capteur, la température d'air est mesurée à l'aide de deux sondes de température filiformes (*figure 7*). L'une de ces sondes est plutôt représentative de l'air au milieu du conduit, l'autre de l'air aux environs des parois. Chaque minute, la température de ces deux sondes est mesurée ; leur différence comprend, à priori, un terme d'origine purement aléatoire et un terme dû à l'existence d'un gradient dans le fluide.

Pour la température d'entrée, nous avons tracé (*figure 9*) le diagramme de corrélation entre la différence de mesure des deux sondes et le débit d'air. Nous avons pu vérifier, d'une part, que la moyenne de cette différence est quasi nulle ($\approx 0,002$ K) et, d'autre part, que son écart type ne dépend pas du débit et vaut 0,04 K.

Pour la température de sortie, nous avons tracé (figure 10) le même diagramme de corrélation que précédemment mais en ne retenant que les expériences pour lesquelles la dynamique (1) est moyenne. La largeur de la distribution est faible mais une dissymétrie entre les mesures des deux sondes apparaît pour les faibles débits. Au-delà de 50 m³/h, la moyenne de cette distribution est quasi nulle ($\approx 0,015$ K) et l'écart type reste faible ($\approx 0,05$ K). Le diagramme de corrélation obtenu avec les expériences dont la dynamique est forte conserve la même allure que précédemment mais sa largeur est plus grande; pour des débits supérieurs à 50 m³/h, l'écart type est de 0,1 K.

Il n'y a donc pas de biais systématique entre les deux sondes de température pour les débits supérieurs à 50 m³/h (plage de débit pour laquelle le capteur étudié a été conçu); on peut considérer l'erreur de mesure comme purement aléatoire, à la fois pour la température d'entrée et pour celle de sortie.

Pour les faibles débits, nous avons vu apparaître un biais entre les sondes de sortie, illustration probable soit d'un gradient thermoconvectif dans l'écoulement, soit d'un défaut dans la protection des sondes contre les échanges radiatifs. Les sondes de température d'air à l'entrée du capteur sont moins sensibles à ces effets grâce au brassage de l'air par le débitmètre à hélice situé en amont, et à une dynamique plus faible.

4.4. Détermination des erreurs de mesure du débit et des fuites d'air d'un capteur

La détermination des erreurs de mesure du débit et des fuites d'air a été réalisée pour deux capteurs solaires: un capteur de référence (de géométrie simple et dont la construction a été bien contrôlée) et le capteur dont nous présentons l'étude détaillée dans cet article (capteur ACRET, de type industriel et pour lequel de nombreuses inconnues existent quant aux détails de réalisation). En dehors de ce paragraphe-ci, il ne sera plus fait allusion au capteur de référence.

Deux débitmètres à hélice sont disposés, l'un à l'entrée, l'autre à la sortie du capteur. Leurs très faibles pertes de charge modifient peu la pression dans le capteur et ne perturbent donc pas sensiblement les fuites. Ces deux débits-volumes, mesurés chaque minute pendant toute la durée des expériences, sont convertis en débits-masses à partir de la température locale de l'air, de la pression atmosphérique et des propriétés thermophysiques de l'air. D'après la figure 11a, où nous avons tracé le diagramme de corrélation entre la différence relative de ces deux débits-masses et le débit d'entrée pour le capteur de référence, nous pouvons faire plusieurs observations:

— pour les débits supérieurs à 100 kg/h, l'écart type de cette différence est faible (0,3 % environ);

— l'écart type de cette différence relative augmente lorsque le débit diminue, et nous avons pu ajuster une loi de variation empirique;

(1) Nous entendons par *dynamique d'une grandeur* son évolution temporelle (ou dérivée par rapport au temps). Par exemple, une dynamique faible correspond à une évolution temporelle lente.

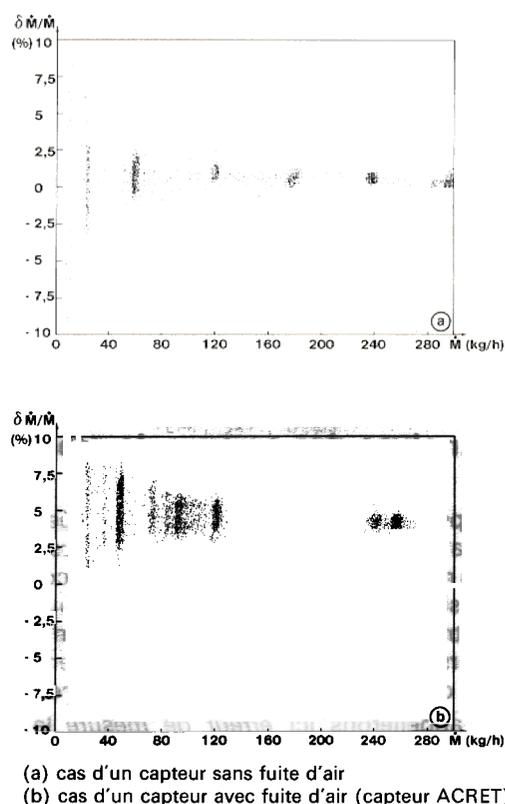


Fig. 11. — Diagramme de corrélation de la différence relative des débits-masses à l'entrée et à la sortie du capteur en fonction du débit-masse à l'entrée

— les fuites d'air, c'est-à-dire la moyenne de la différence entrée-sortie du débit, sont très faibles (0,5 % environ).

Nous avons fait la même analyse pour les mesures provenant du capteur dont nous présentons l'étude dans cet article (capteur ACRET). On peut noter sur la figure 11b deux différences par rapport au cas précédent:

— d'une part, les fuites du capteur ne sont plus négligeables; la moyenne de la différence de débit entrée-sortie est d'environ 4,5 %;

— d'autre part, l'écart type de cette différence de débit est plus élevé que dans le cas précédent. Comme ce sont les mêmes débitmètres, utilisés dans les mêmes conditions, c'est donc qu'il y a également une erreur aléatoire sur le débit des fuites lui-même. Une analyse détaillée nous a permis d'ajuster une loi de variation de la dispersion des fuites en fonction du débit d'entrée [5].

4.5. Tableau récapitulatif

Cette analyse des erreurs a été effectuée pour l'ensemble des grandeurs physiques que nous avons mesurées. Pour certaines d'entre elles (température d'entrée et de sortie d'air, débit-masse et fuite d'air), l'écart type de l'erreur aléatoire dépend de la valeur du débit. Dans le tableau II, nous donnons sa valeur pour un débit de 60 kg/h.

Nous avons vérifié que les erreurs de mesures sont indépendantes entre elles et que leur distribution est quasi normale [5].

TABLEAU II

Récapitulatif des principales caractéristiques de l'insolateur : plage et pas élémentaire de variation, temps de réponse de la commande, homogénéité spatiale et précision de mesures des principales grandeurs

Grandeur	Plage de variation	Pas élémentaire du pilotage	Temps de réponse	Homogénéité spatiale	Erreur de mesure
Eclairement	130 à 1 150 W/m ²	65 W/m ²	quelques secondes	6 %	1,3 %
Débit d'air dans le capteur	0 à 260 m ³ /h	1 m ³ /h	quelques secondes		0,5 %
Fuite d'air dans le capteur					0,5 %
Température d'entrée de l'air dans le capteur	20 à 80 °C	1 °C	5 min		0,04 °C
Différence de température entrée-sortie					0,06 °C
	Température de ciel	1 °C	5 min	1,5 °C	0,2 °C
Température de l'air devant le capteur	20 à 40 °C	5 °C	2 min	0,5 °C	0,5 °C
Vitesse de l'air (vent)	0 à 2 m/s	continu		0,2 m/s	0,1 m/s

5. Mise en œuvre de la procédure d'identification

5.1. Présentation du capteur

Le capteur plan à air dont nous présentons ici les résultats d'étude (capteur ACRET) a été conçu comme composant de façade. Positionné verticalement, ce capteur est autoporteur et intègre les trois fonctions suivantes : capteur solaire, mur extérieur et isolant de façade. Cela a pu se faire grâce aux propriétés thermophysiques de l'isolant utilisé (dit *Phenoperl*) : résistance aux contraintes, aux chocs, au feu et matériaux moulables. L'inertie thermique est toutefois assez élevée.

Pour améliorer les performances de ce capteur (représenté sur la *figure 12*), l'absorbeur et le fond ont une forme ondulée, ce qui augmente le coefficient d'échange paroi-fluide. L'absorbeur est en aluminium assez fin (0,6 mm), peint en noir au pistolet.

5.2. Modèle physique choisi

Un des objectifs de notre étude étant l'interprétation des résultats de l'identification en vue d'une amélioration des performances du composant testé, nous avons choisi d'élaborer un modèle physique du composant étudié et non un modèle purement mathématique tels ceux utilisés couramment en automatique. De même, nous avons choisi une modélisation nodale parce qu'elle peut être interprétée physiquement : un élément nodal représente en effet le résultat supposé d'une intégration volumique de lois locales. Les paramètres globaux associés pourront dépendre de l'état du système, et conduire à un modèle non linéaire.

Nous présentons ici un modèle qui explicite les transferts thermiques principaux pour un capteur simple, avec des hypothèses classiques [5]. Ce modèle de capteur est quasi bidimensionnel : il est constitué d'un assemblage en série de plusieurs modèles élémentaires, monodimensionnels. Chaque modèle est basé sur une discrétisation nodale d'une *tranche*

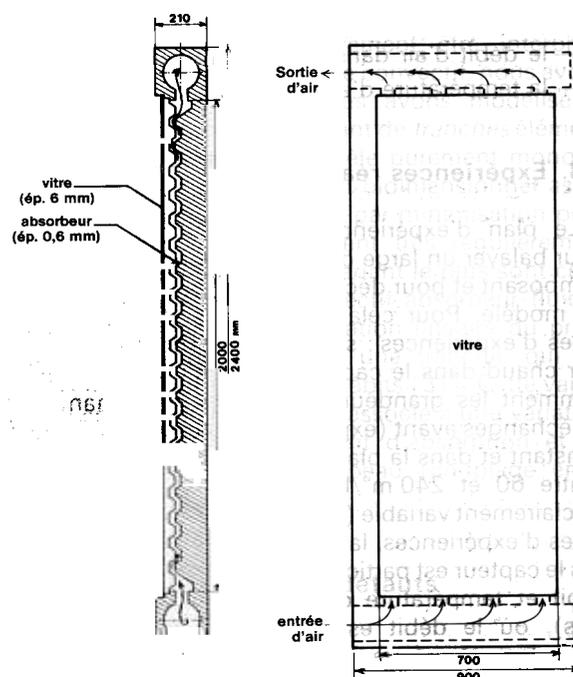


Fig. 12. — Coupe longitudinale et vue de face du capteur étudié (ACRET)

simplifiée de capteur. Une coupe schématique et le modèle correspondant sont représentés sur la *figure 13* pour un capteur à enceinte avant figée (circulation nulle entre la vitre et l'absorbeur).

En résolvant les équations de ce modèle analogique, on obtient directement l'expression de la température en chacun des nœuds du modèle en fonction des grandeurs d'entrée. Le nœud correspondant à la température de sortie d'air du capteur nous permet de calculer la puissance extraite du capteur et sera utilisé lors de l'identification.

Ce modèle donné en exemple prend en compte les sept grandeurs physiques d'entrée suivantes :

- le flux solaire ;
- la température de l'air devant le capteur ;
- la vitesse de l'air devant le capteur (vent) ;

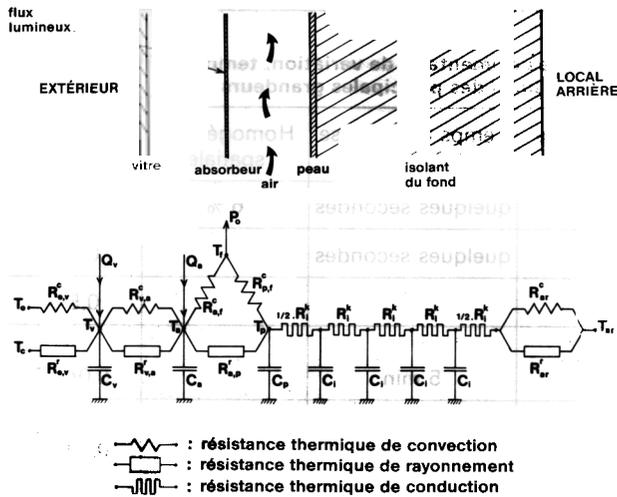


Fig. 13. — Coupe schématique d'un capteur solaire à air plan, à enceinte avant figée, et discrétisation nodale correspondante

- la température du filtre atmosphérique (*température de ciel*) ;
- la température ambiante derrière le capteur ;
- le débit d'air dans le capteur ;
- la température d'entrée de l'air dans le capteur.

5.3. Expériences réalisées

Le plan d'expérience a été déterminé à la fois pour balayer un large domaine de fonctionnement du composant et pour découpler au mieux les paramètres du modèle. Pour cela, nous avons réalisé plusieurs types d'expériences : sans éclairage, on souffle de l'air chaud dans le capteur et on fait varier indépendamment les grandeurs physiques intervenant dans les échanges avant (expériences types *A* et *B*) ; à débit constant et dans la plage normale de fonctionnement (entre 60 et 240 m³/h), on génère des séquences d'éclairage variable (expériences *C*) ; pour les autres types d'expériences, la dynamique à laquelle est soumis le capteur est particulièrement élevée (éclairage, débit et température d'entrée d'air fortement variables), où le débit est plus faible que les valeurs normalement prévues (expériences *E* et *D*).

L'ensemble totalise environ 150 h d'expériences, avec des mesures réalisées au pas de temps de la minute.

Pour identifier les paramètres du modèle, nous avons utilisé des expériences type *A*, *B* et *C*. Ces expériences totalisent 42 h de mesure. Les autres séquences expérimentales ont été utilisées pour tester le domaine de validité du modèle calibré.

5.4. Choix des paramètres libres

Les paramètres libres (paramètres à ajuster) ont été choisis en fonction de deux critères de sensibilité et d'indépendance suivants :

- l'incertitude a priori de la valeur du paramètre a une influence non négligeable sur la puissance thermique extraite du capteur pour les expériences réalisées ;

— le paramètre n'est pas totalement corrélé aux autres paramètres libres.

Lors de l'identification, en appliquant cette démarche, nous avons été amenés à faire évoluer légèrement le nombre de paramètres libres en fonction des expériences et du modèle utilisé. Dix paramètres ont généralement été laissés libres :

- α_v, α_a coefficients d'absorption de la vitre et de l'absorbeur
- C_p, C_i capacité thermique de la peau intérieure et de l'isolant du fond
- b, n paramètres de l'expression du coefficient d'échange convectif paroi-fluide ; nous avons choisi l'expression donnée par McADAMS pour un échangeur à tubes disposés en quinconce [28] : $H_{a,f}^c = \lambda / D_0 \cdot b_0 \cdot Re^n$ [λ : conductivité de l'air ; D_0 : diamètre des tubes de l'échangeur équivalent (dans notre cas 4 cm) ; Re : nombre de Reynolds calculé par rapport à ce diamètre ; b et n : constantes dont la valeur théorique est respectivement 0,3 et 0,6 pour l'air] ; par la suite, nous avons utilisé cette loi d'échange en la mettant sous la forme :

$$H_{a,f}^c = [b \cdot Re_{120}^{(0,6-n)}] \cdot [b_0 \cdot \lambda / D_0 \cdot Re^n]$$

(avec Re_{120} , valeur de Re pour une température d'air de 40 °C et un débit de 120 m³/h, c'est-à-dire le débit moyen de nos expériences) ; les paramètres b et n ont, pour le modèle référencé, une valeur théorique de 1 et 0,6 respectivement

- $H_{e,v}$ coefficient d'échange convectif avant (vitre-air extérieur), pour une vitesse d'air (ou vent) constante
- H_i conductance de l'isolant du fond
- H_{ar} coefficient d'échange global (convectif-radiatif) arrière
- $H_{a,v}$ coefficient d'échange global (convectif-radiatif) absorbeur-vitre.

Dans la phase finale de l'ajustement, trois paramètres ont été ajustés empiriquement ($\alpha_v, H_{a,v}, H_{ar}$) tandis que les sept autres paramètres ont été ajustés par minimisation en même temps (donc les corrélations entre paramètres sont bien prises en compte). Sauf mention explicite, on fera toujours référence à cette configuration dans les paragraphes suivants.

5.5. Ajustement des paramètres

Nous ne traiterons pas dans cet article de l'ajustement des paramètres, que nous avons traité par ailleurs [5 et 6].

Nous évoquerons, à l'occasion de l'analyse des résultats (§ 6), l'estimation a priori de la valeur des paramètres ainsi que l'ajustement empirique.

En ce qui concerne l'ajustement des paramètres par application d'un critère, nous avons choisi de minimiser l'écart quadratique moyen (Q^2) sur la puissance extraite mesurée et calculée, pondéré par les erreurs de mesure.

$$Q^2 = (1/N) \int_{j=1}^N q_j^2$$

avec : $q_j = (M_j - \mu_j) / \varepsilon_j$

Nombre de tranches élémentaires	α_a	$H_{e,v}^c$	b	n	C_i	C_p	H_i	Q^2
	$\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{L}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	$[\text{H}_{a,r}^c]$		$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	
1	0,944	7,5	0,69	0,68	6 500	7 600	12,0	1,5
2	0,931	7,4	0,90	0,64	6 800	7 100	12,2	1,1
3	0,928	7,4	0,95	0,65	6 900	6 900	12,1	1,1
5	0,927	7,4	0,96	0,64	6 900	6 800	12,1	1,1
10	0,927	7,4	0,96	0,64	6 900	6 800	12,1	1,1

M_j : puissance extraite calculée à l'instant j

ε_j : erreur de mesure sur la puissance extraite à l'instant j

N : nombre d'instant de mesure (dans notre cas, les mesures sont effectuées toutes les minutes).

On voit ainsi qu'avec ce choix, les mesures ont un poids statistique d'autant plus grand que leur incertitude est faible.

Pour ce critère, il est donc important de déterminer correctement les erreurs de mesure et de répercuter leurs effets sur la différence de la puissance extraite mesurée-calculée (propagation des erreurs).

Lorsque les erreurs de mesure sont gaussiennes, indépendantes, et que le modèle est linéaire (c'est-à-dire $\vec{M} = A\vec{\omega} + \vec{B}$), on dispose d'une théorie complète sur cette méthode de minimisation : la variable aléatoire Q^2 a la distribution d'une fonction χ^2 (c'est pourquoi ce critère d'ajustement est souvent appelé *minimisation de χ^2*) et les propriétés statistiques de cette distribution permettent d'analyser la cohérence de la procédure d'identification d'une part, d'interpréter rigoureusement les résultats d'autre part.

Ces hypothèses ne sont pas vérifiées pour le capteur étudié (modèle non linéaire). La méthode de minimisation de χ^2 est toutefois suffisamment robuste pour être utilisée. L'interprétation des résultats statistiques ne sera par contre pas directe.

Pour ajuster les paramètres par minimisation de l'écart Q^2 , nous avons utilisé le programme *MINUIT* développé par le CERN [29 et 30]. Ce programme — qui utilise un algorithme de type gradient conjugué — fournit à l'utilisateur, outre les valeurs des paramètres qui minimisent Q^2 , les incertitudes sur ces valeurs et les coefficients de corrélation entre paramètres.

6. Analyse et interprétation des résultats de l'identification

6.1. Mise en évidence d'une qualité attendue pour le composant testé

De façon classique, on montre que pour un capteur tel celui étudié (capteur solaire plan à air, à enceinte avant figée), un facteur important pour obtenir de bonnes performances thermiques est d'avoir un coefficient d'échange convectif absorbeur-fluide calorpor-

teur élevé ; c'est le but de la forme ondulée de l'absorbeur et du fond du capteur testé (figure 12).

Pour modéliser l'échange convectif entre les parois ondulées et l'air, nous avons fait l'analogie entre ces parois et un échangeur à tubes ovales disposés en quinconce (cf. § 5.4). La loi du coefficient d'échange obtenue par ajustement correspond à 10 % près à la loi issue de l'analyse physique ; elle est environ trois fois plus élevée que la loi d'échange pour une plaque plane et le but du fabricant a donc bien été atteint.

Pour mieux se convaincre que le coefficient obtenu par ajustement peut effectivement être interprété comme un coefficient d'échange convectif, nous avons effectué le test suivant : nous avons modélisé le capteur avec un nombre croissant de *tranches* élémentaires, passant ainsi d'un modèle purement monodimensionnel à un modèle quasi bidimensionnel assez complet. Les valeurs obtenues par minimisation pour chacun de ces modèles varient très régulièrement (*tableau III*). Les paramètres variant le plus sont ceux du coefficient d'échange convectif absorbeur-fluide ; cela s'explique par l'approximation linéaire du profil de température du modèle à une tranche, qui est incorrecte, surtout aux faibles débits [31]. Cette variation du coefficient d'échange s'associe à une variation — plus faible — du coefficient d'absorption et de la capacité thermique de la peau (couplage entre phénomènes).

6.2. Mise en évidence de défauts

6.2.1. Défauts dans la réalisation du composant

Lors de l'ajustement empirique, les mesures provenant des expériences où l'on souffle de l'air chaud dans le capteur dont on a isolé la face avant (expérience A) ont fait apparaître, pour la capacité et la conductance thermique du fond, des valeurs beaucoup plus élevées que prévu. Cela a été confirmé par l'ajustement par minimisation sur l'ensemble des expériences.

La valeur irréaliste de ces coefficients nous a conduits à supposer que les caissons de répartition d'air à l'entrée et à la sortie du capteur étaient plus lourds et moins bien isolés que prévu, c'est-à-dire qu'ils ne correspondaient pas au plan d'exécution. Le démontage destructif du capteur à la fin des expériences a confirmé cette hypothèse et nous a amenés à modifier leur modélisation.

Avec ce nouveau modèle, les valeurs de l'inertie et de la conductance du fond, obtenues en ajustant les paramètres par minimisation, sont réalistes bien que

TABLEAU IV									
Sensibilité de la valeur ajustée des paramètres libres à une modélisation différente des caissons de répartition d'air à l'entrée et à la sortie du capteur									
	α_a	$H_{e,v}^c$ W.m ⁻² .K ⁻¹	b [H _{a,f} ^c]	n	C_i J.m ⁻² .K ⁻¹	C_p J.m ⁻² .K ⁻¹	H_i W.m ⁻² .K ⁻¹	Q^2	
Surface réelle des caissons	0,927	7,4	0,96	0,64	6 900	6 800	12,1	1,1	
Surface moitié des caissons	0,927	7,7	0,99	0,70	8 500	6 900	18,4	1,4	

dans la limite supérieure des valeurs attendues. Cela tend à confirmer les difficultés de mise en œuvre qu'avait le fabricant du capteur (problème de polymérisation dans un four H.F. d'une mousse phénolphtalique).

Dans le *tableau IV*, nous récapitulons la sensibilité du modèle à la présence des caissons à travers l'évolution des valeurs des paramètres libres obtenus par ajustement : pour le modèle complet incluant les caissons, sans caissons et avec des caissons dont la taille a été réduite de moitié. On remarque que les deux paramètres qui varient principalement sont l'inertie de la peau du fond et de sa conductance, ce qui correspond à une compensation physique logique.

6.2.2. Défaut d'étanchéité interne du capteur

Lors de l'ajustement empirique, l'analyse différentielle des expériences où l'on souffle de l'air chaud dans le capteur lorsque la face avant est isolée (expérience A) et lorsque celle-ci n'est pas isolée (expérience B) permet d'estimer les pertes thermiques de la face avant du capteur.

L'estimation empirique de ces pertes avant à partir de l'analyse de ces expériences nous a donné une valeur supérieure à sa valeur attendue.

Par ailleurs, si l'on fixe ces pertes aux valeurs prévues et que l'on effectue un ajustement de tous les autres paramètres libres sur les expériences avec éclaircissement (expérience C), on obtient une valeur du coefficient d'absorption α_a plus faible que prévue. Cette sous-estimation du coefficient α_a peut s'expliquer par un artefact de compensation dû à l'ajustement qui conduit à sous-estimer les pertes avant.

Nous avons donc été amenés à supposer l'existence d'une circulation parasite d'air entre la vitre et l'absorbeur, circulation qui entraîne une augmentation importante des pertes avant. Un ajustement empirique nous a amenés à fixer le débit de circulation de l'air parasite à 10 % du débit d'air d'entrée [5] (*figure 14*). En modifiant le modèle pour tenir compte de ce nouveau phénomène, nous avons obtenu un meilleur ajustement sur l'ensemble des expériences : baisse de l'écart quadratique, valeurs paramétriques plus réalistes.

Le démontage destructif du capteur, en fin d'expérience, a fait apparaître des défauts d'étanchéité au niveau de l'absorbeur, confortant notre hypothèse.

6.3. Mise en évidence de la non cohérence du modèle avec certaines séquences expérimentales

Lors de l'ajustement par minimisation et afin de mieux interpréter nos résultats, nous avons effectué

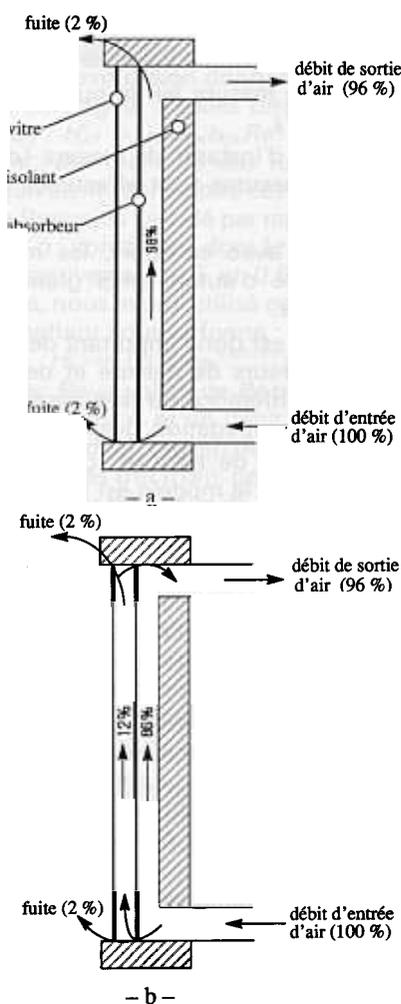
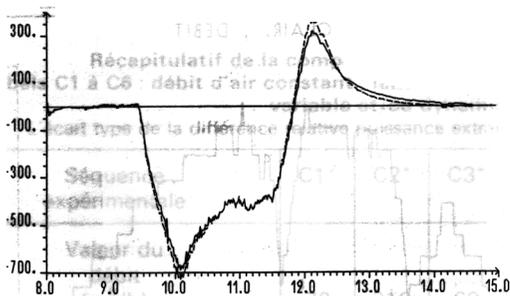


Fig. 14. — Répartition des différents débits d'air dans le capteur suivant que l'on tient compte (b) ou pas (a) de la circulation parasite d'air dans l'enceinte avant

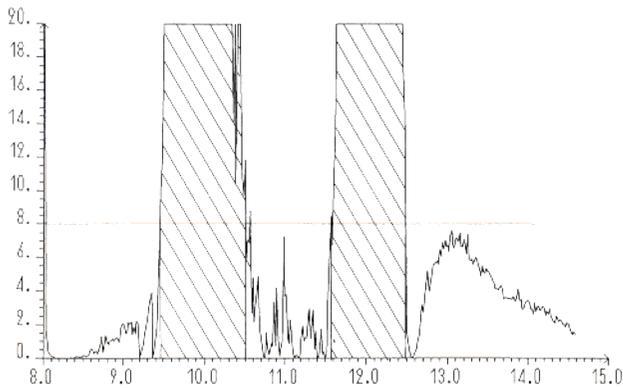
un ajustement par étapes : d'abord sur les expériences A, puis sur les B et enfin sur les C. Nous avons alors pu observer en particulier que le coefficient d'échange paroi-fluide arrière $H_{a,f}^c$ et surtout l'exposant n de son expression (cf. § 5.4) varient beaucoup selon les expériences utilisées. Par ailleurs, pour les expériences A, le coefficient n prend une valeur non réaliste puisqu'il vaut 1,1 alors que l'analyse physique du problème nous fait atteindre une valeur de 0,6 (ou 0,8 au maximum).

Pour comprendre l'origine de ce problème, nous avons utilisé certaines propriétés statistiques de l'ajustement par moindre χ^2 .

Nous avons, dans un premier temps, effectué un ajustement avec coupure de χ^2 . C'est-à-dire qu'en partant de la valeur des paramètres au minimum, nous



(a) valeurs calculée (—) et mesurée (---) de la puissance thermique extraite du capteur (W/m^2) en fonction du temps (h)



(b) valeur de l'écart quadratique pondéré par point (q_i^2) en fonction du temps ; les zones hachurées regroupent les points de mesures exclus de la minimisation avec coupure de χ^2

Fig. 15. — Mise en évidence de la non-cohérence mesure-modèle pour une expérience de type *B* dont la dynamique est forte

avons effectué un nouvel ajustement par minimisation en supprimant cette fois du calcul de Q^2 tous les événements pour lesquels q_i^2 est supérieur à une valeur-seuil. Celle-ci a été calculée en utilisant le fait que la distribution de la variable aléatoire q_i^2 est un χ^2 à 1 degré de liberté.

Lors de la mise en œuvre de cette minimisation avec coupure de χ^2 , nous avons pu observer que de nombreux points expérimentaux des expériences *A* et *B* sont exclus. Ces points sont regroupés dans les périodes expérimentales où la dynamique est forte (figure 15). On peut en conclure que, pour les expériences où l'on souffle de l'air chaud dans le capteur (expériences *A* et *B*), le modèle n'est pas valable lorsque la dynamique de variation de la température d'entrée d'air est trop forte. Cela a été mis en évidence pour toutes les expériences *A* et pour une *B*.

Pour expliquer cette non cohérence mesure-modèle pour certaines expériences, nous avons émis l'hypothèse suivante : la dynamique des expériences *A* et *B* a été calculée par simulation avant la réalisation des expériences et à partir des valeurs attendues des paramètres. Les résultats de ces simulations préalables

ont montré que la dynamique de ces expériences devait être assez forte si l'on voulait bien découpler les paramètres. Avec des caissons de répartition d'air plus lourds et moins bien isolés que prévu (comme nous venons de le voir au § 6.2.1), les résultats précédents ne sont plus valables. Avec les nouveaux modèles de caissons, les résultats de simulation ont montré que ceux-ci ont une grande importance pour les expériences *A* et *B* lorsque la dynamique est forte. Or ces caissons restent grossièrement modélisés vu la complexité des phénomènes physiques existants. A ce stade il faut donc, soit améliorer le modèle des caissons, soit ne pas tenir compte des expériences pour lesquelles ceux-ci ont une grande influence (expériences *A* et certaines *B*). Ces expériences ne faisant pas partie du domaine de fonctionnement normal du capteur, nous avons choisi la deuxième solution et avons supprimé, lors de l'ajustement par minimisation finale, toutes les expériences *A* et deux expériences *B*. Cela illustre concrètement ce que nous entendions par test de cohérence modèle-expérience.

6.4. Incertitude sur la valeur des paramètres. Définition d'un nouveau plan d'expérience

La méthode des gradients conjugués, utilisée pour l'ajustement des paramètres par minimisation, nécessite le calcul de la matrice des dérivées secondes de Q^2 en fonction des paramètres. A partir de cette matrice Heissienne, on peut facilement calculer l'incertitude sur l'estimation des paramètres d'une part, les coefficients de corrélation entre paramètres d'autre part [5, 6, 29, 30 et 32].

Notons que, par cette théorie, l'incertitude de chaque paramètre est telle que l'erreur de modélisation est égale à l'erreur de mesure.

Dans le cas traité en exemple, les incertitudes paramétriques (tableau V) sont élevées à cause de la très forte corrélation entre paramètres : la moitié environ des coefficients de corrélation ont une valeur absolue supérieure à 0,5.

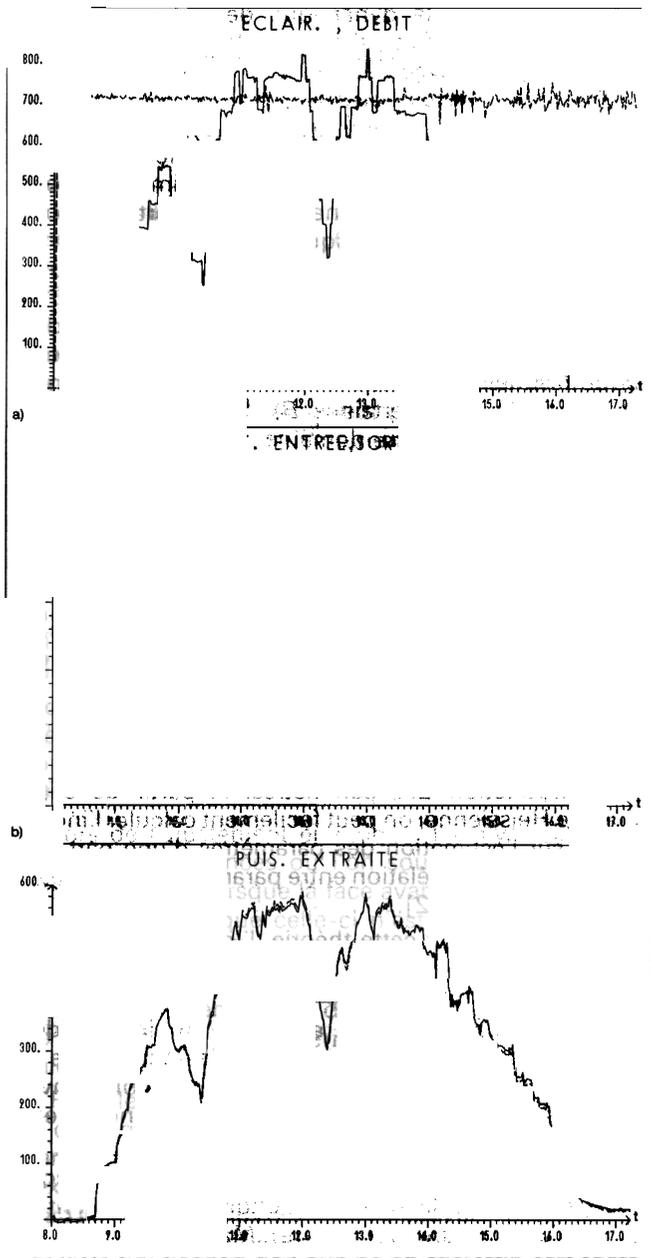
Les paramètres resteront toujours relativement corrélés du fait de la démarche choisie (ajustement à partir d'une mesure aval unique). Mais le capteur testé étant très différent de ce que l'on pensait initialement (cf. les mises en évidence de défauts), certaines expériences qui avaient pour but de bien découpler les paramètres n'ont pu être utilisées pour la phase finale de l'ajustement (cf. § 6.3). Pour obtenir des résultats plus précis, il eut fallu réaliser de nouvelles expériences mieux adaptées au capteur testé (ou tester un autre composant moins défaillant, ...).

6.5. Précision de la puissance extraite calculée

Pour les expériences utilisées lors de l'identification, l'écart entre les puissances extraites mesurée et calculée

TABLEAU V
Erreur théorique (calculée à partir de la matrice de covariance paramétrique) pour les sept paramètres libres ajustés par minimisation

Paramètres libres	α_a	$H_{e,v}^c$ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	b	n $[H_{e,v}^c]$	C_i $J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	C_p $J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	H_l $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Valeur au minimum	0,927	7,4	0,96	0,64	6 900	6 800	12,1
Erreur théorique	0,11	4,6	0,89	0,92	3 700	4 800	5,6



(a) ——— éclairage (W/m^2)
 - - - débit-masse $\times 10^4$ (kg/s)
 (b) ——— température d'entrée d'air ($^{\circ}C$)
 - - - température de sortie d'air ($^{\circ}C$)
 (c) ——— calcul de la puissance thermique extraite du capteur (W/m^2)
 - - - mesure de cette même puissance (W/m^2)

Fig. 16. — Visualisation de quelques grandeurs pour l'expérience C.2, pour laquelle le débit est constant

lée est très faible : il est à la limite de la précision instrumentale. Sur la figure 16 par exemple, nous avons représenté une expérience (notée C.2) qui reproduit les conditions météorologiques d'une journée réelle. On peut y apprécier le très faible écart mesure-calcul (difficilement discernable sur le dessin) ; l'écart type relatif de cette différence est d'environ 1,4 % (tableau VI).

Nous avons représenté sur la figure 17 l'expérience E.1, réalisée avec le même éclairage que précédemment mais pour laquelle le débit varie afin de maintenir

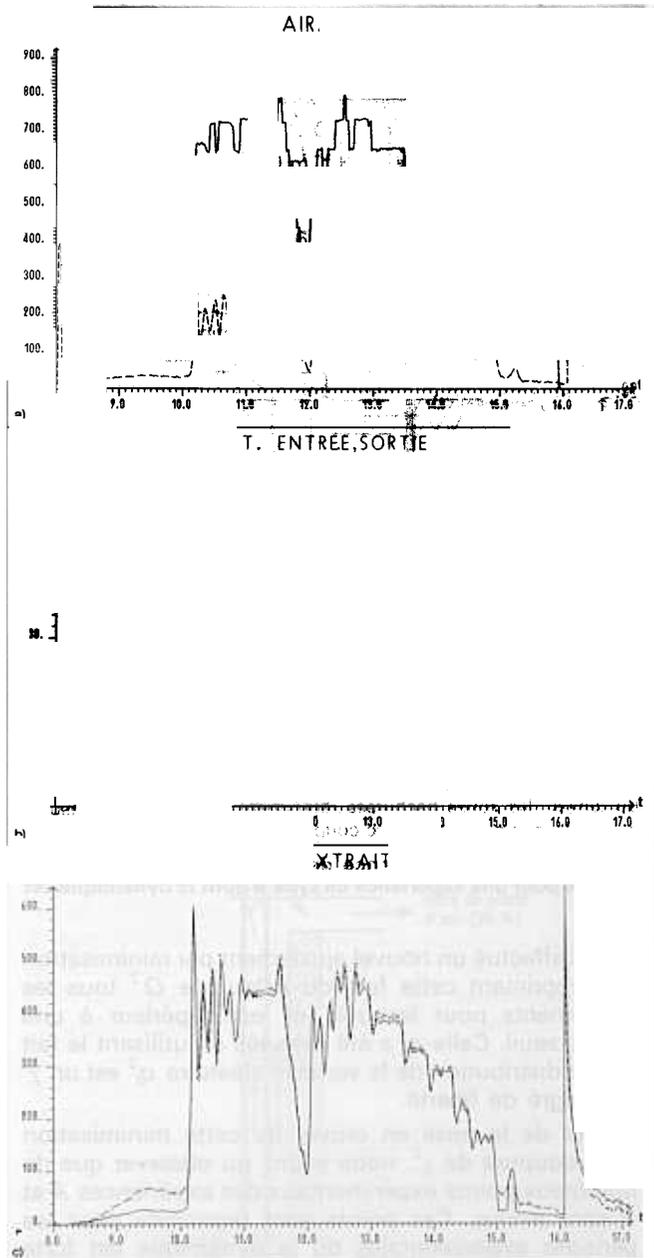


Fig. 17. — Même représentation que figure 16, mais pour une autre expérience (E.1). Cette nouvelle expérience est identique à la précédente, sauf que le débit est piloté afin de maintenir constante la température de sortie d'air du capteur ($55^{\circ}C$)

la température de sortie d'air constante ($55^{\circ}C$). Les puissances extraites mesurée et calculée sont là encore très proches, sauf lorsque le débit devient faible. On peut supposer une transition vers un écoulement non turbulent qui requerrait une autre loi d'échange. La concordance mesure-modèle est tout aussi satisfaisante pour l'ensemble des autres expériences. Dans le tableau VI, nous avons résumé les résultats pour les séquences avec éclairage (notées C, D et E) qui totalisent 90 h de manipulation et couvrent un très large domaine de fonctionnement. La précision du modèle calibré permet donc d'envisager d'autres études à la fois pour des équipes de recherche et des bureaux d'études : dimensionnement, loi de commande optimale, sensibilité à différents effets, etc.

TABLEAU VI

Récapitulatif de la comparaison expérience-calcul pour l'ensemble des séquences avec éclaircissement
Labels C1 à C6 : débit d'air constant ; labels D1 à D4 : débit d'air constant mais faible (< 50 m³/h) ; labels E1 à E3 : débit variable et/ou dynamique de l'expérience particulièrement forte

L'écart type de la différence relative puissance extraite simulée-mesurée est calculé pour les puissances supérieures à 50 W/m²

Séquence expérimentale	C1*	C2*	C3*	C4*	C5*	C6	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	
Valeur du débit (m ³ /h)	70	210	60	120	240	60	40	40	10 et 30	60, 40 et 25	0 à 80	0 à 240	0 à 150	
Ecart type de la différence relative entre les puissances extraites mesurée et simulée (%)	1,4	1,4	1,5	2,0	1,8	2,5	2,2	0,8	7,0	3,7	3,0	5,0	4,5	
Energie totale extraite (kWh)	mesurée	2,940	3,614	0,358	0,553	0,729	0,341	2,163	2,097	0,205	1,082	1,898	2,041	2,465
	simulée	2,946	3,622	0,354	0,559	0,725	0,342	2,222	2,163	0,220	1,117	2,163	2,086	2,495
Différence relative des énergies totales mesurée et simulée (%)	- 0,2	- 0,2		1	0,6	- 0,3	- 2,7	- 3,2	- 7,3	- 3,2	- 3,2	- 2,2	- 1,2	

Séquences expérimentales utilisées pour l'identification inclusive

7. Conclusions

Dans cet article, nous avons essayé de montrer, en nous appuyant sur un cas concret d'étude, ce que pourrait être une procédure d'essai évoluée, capable de caractériser précisément un composant complexe en régime dynamique et avec des effets non linéaires. Dans le domaine de la thermique de l'habitat, cela est nécessaire pour pouvoir alimenter les nouvelles générations de logiciels de conception thermique, tel celui développé par le Groupement d'Etude et de Recherche ALMETH ⁽¹⁾ auquel nous participons.

Si nous n'avons pas développé ici le détail de la mise en œuvre de l'ajustement (qui est encore assez lourde et délicate à mettre en œuvre), nous avons en revanche détaillé quel type de dispositif expérimental doit être réalisé pour mener à bien ce type d'essai d'une part et montré à quels types de résultats le fabricant de composants innovants peut s'attendre d'autre part.

En ce qui concerne le centre technique qui mettrait en œuvre les essais, nous avons montré :

- l'importance d'expériences bien adaptées ; à la limite, des expériences spécifiques à chaque composant testé pourraient être établies, suivant une même méthodologie mais en utilisant un modèle de composant et des valeurs initiales des paramètres fournis par le fabricant ou élaborés avec lui ;

- l'importance d'un banc d'essai, souple d'emploi et facilement pilotable, afin de permettre la réalisation des expériences requises ; nous avons présenté le dispositif expérimental que nous avons réalisé dans le cas particulier d'essais de capteurs solaires ou de composants de façade ;

- la nécessité d'une bonne précision de mesure, ainsi que d'une estimation correcte des erreurs de mesures ;

(1) ALMETH : Atelier Logiciel pour la Maîtrise de l'Energie dans le Tertiaire et l'Habitat (projet piloté par l'AFME et regroupant des équipes du CNRS, du CSTB, de l'EMP, de l'ENPC et de la FNB).

- l'intérêt des tests statistiques, liés à la méthode d'ajustement utilisée, qui permettent de vérifier si les essais réalisés sur le composant sont bien cohérents avec le modèle identifié.

Pour le fabricant, les résultats de cette procédure d'identification permettent :

- de mettre en évidence des qualités et des défauts du composant ; si les différents défauts que nous avons pu mettre en évidence lors de notre étude nous ont parfois causé des soucis, ils nous ont permis de montrer par l'exemple l'intérêt de la méthode ;

- d'interpréter correctement les résultats de l'ajustement des paramètres grâce à l'estimation de leurs incertitudes et de leur inter-corrélation ;

- de guider le concepteur dans l'amélioration du composant grâce à l'analyse de sensibilité des paramètres nécessitée par l'ajustement empirique initial.

Pour l'utilisateur enfin, l'obtention d'un modèle précis dans toute la gamme de fonctionnement normal du composant permet d'optimiser des lois de commande d'une part, d'estimer correctement les apports et l'intérêt du composant d'autre part, sans coût de calcul exorbitant, le modèle global identifié restant numériquement simple.

La méthodologie que nous avons définie pourrait être appliquée à d'autres domaines. Nous l'avons utilisée, en collaboration avec GDF, pour l'étude d'un stockage souterrain de gaz pour lequel nous disposons de vingt années de mesures hebdomadaires de la pression en tête du puits et du volume de gaz stocké (ou soutiré). Nous avons montré les limites du modèle initialement proposé, montré comment les informations fournies par la procédure d'identification permettaient de suggérer des améliorations du modèle, et finalement nous avons pu identifier un modèle physique simple, non linéaire, à six paramètres libres [33].

REMERCIEMENTS

Cette expérience, qui s'est déroulée de 1982 à 1986 au Centre CETIAT d'Orsay, a pu être réalisée grâce au

soutien scientifique et financier de l'AFME, du CETIAT et du CNRS. Nous tenons spécialement à remercier MM. Olivier DECELLE, Responsable du Service Essais de l'AFME, Michel DOUCHEZ, Président du CETIAT, et Maurice CLAVERIE, Directeur du PIRSEM/CNRS, pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce travail. Enfin, nous sommes très redevables à l'IN2P3/CNRS et au Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire de leur soutien pour la construction du banc d'essai.

Annexe

Principaux bancs d'essai de capteur solaire permettant un éclairage variable dans le temps. Comparaison des solutions mises en œuvre

Pour les insolateurs *classiques*, on peut généralement faire évoluer l'éclairage autour de sa valeur nominale par variation de la tension d'alimentation des lampes, de la distance lampes-capteur ou de l'angle d'incidence du flux lumineux [34]. Néanmoins, cette variation de l'éclairage est souvent lente et on trouve peu de renseignements sur ce sujet dans les articles, ces bancs étant essentiellement utilisés pour des essais en régime stationnaire.

Par opposition à ces insolateurs *quasi statiques*, les insolateurs dynamiques permettent une variation rapide et dans une large gamme de l'éclairage et ont pour objectif d'étudier les capteurs en régime instationnaire. Les principaux insolateurs de ce type que nous avons pu répertorier dans la littérature ont les caractéristiques suivantes :

— dans un laboratoire hollandais, le banc d'essai est constitué de lampes au mercure et la variation de l'éclairage est réalisée en masquant l'ensemble des projecteurs ; le rapport masque/éclairage est variable [35] ;

— pour un banc d'essai canadien qui utilise un unique gros projecteur de 100 kW (lampe à décharge, argon haute pression), on peut faire varier continûment l'éclairage, de 20 à 100 % de la puissance nominale, en faisant varier la tension d'alimentation. Il y a peu de renseignements sur l'utilisation dynamique effective de ce banc [36] ;

— pour un insolateur japonais qui utilise des lampes tungstène, et reproduit donc mal le spectre solaire, l'éclairage varie par extinction de certaines lampes et peut prendre six valeurs discrètes de 330 à 830 W/m² [37] ;

— enfin, pour un insolateur du même type que le précédent (Philips, Hollande), on utilise des lampes tungstène halogène à miroir dichroïque possédant un spectre proche de celui de la lumière [38].

Pour des raisons de simplicité de mise en œuvre et de faible coût, nous avons choisi — comme les deux derniers insolateurs présentés — la solution d'un grand nombre de lampes de faible puissance, à réflecteurs incorporés ; l'extinction d'une partie d'entre elles permet de faire varier l'éclairage dans le temps, tout en conservant une bonne homogénéité spatiale. Nous avons donc exclu les lampes à arc, telle la *classique* lampe CSI 1000 [39 et 40], dont l'allumage n'est pas instantané.

Une solution intéressante est de choisir une lampe tungstène halogène à réflecteur dichroïque incorporé.

Avec ce type de lampe, la variation de l'éclairage peut être réalisée en panachant l'extinction d'une partie des lampes et la variation de la tension d'alimentation des autres, le spectre du rayonnement émis par les lampes variant peu en fonction de cette tension [41].

Pour des raisons de coût, nous avons choisi des lampes à filament de tungstène, à réflecteur ordinaire. De même, pour des raisons pratiques, nous n'avons pu envisager de faire varier l'incidence de l'éclairage sur le capteur ; ce facteur, non nécessaire à l'étude de faisabilité présentée ici, peut éventuellement devenir important pour certaines géométries de capteurs.

Le choix de lampes tungstène ordinaires peut sembler surprenant, vu leur décalage spectral important par rapport au soleil. Nous avons montré [5 et 12] que ce décalage n'a pas d'effet sensible pour les capteurs plans usuels.

Une fois le banc d'essai réalisé, nous avons mesuré l'homogénéité spatiale de l'éclairage pour chacun des 17 niveaux à l'aide d'un panneau de 36 cellules au silicium de 10 × 10 cm. Chaque cellule a été calibrée avec l'éclairage d'une lampe, et un circuit d'eau permet de maintenir le panneau à température constante afin de ne pas modifier les caractéristiques photoélectriques des cellules. La tension d'alimentation des lampes est mesurée au même moment que l'éclairage pour pouvoir compenser la variation du spectre et du flux émis [toutes les mesures de flux ont été rapportées à une tension secteur de référence (220 V)], [5]. Différentes séries de mesures nous ont permis d'estimer la précision de cette mesure de l'éclairage en chaque point à 2 %.

Un exemple de cartographie de l'écart relatif entre l'éclairage mesuré en chaque point et l'éclairage moyen a été présenté sur la figure 3.

Une analyse détaillée des résultats nous a montré que l'inhomogénéité spatiale de l'éclairage est due davantage à la dispersion entre lampes (erreur de parallaxe, dispersion du flux émis) qu'à la disposition géométrique des lampes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DTU règles Th-G77. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Paris, novembre 1977.
- [2] Comptes rendus de la Journée d'Etude *Estimation des paramètres et problèmes inverses en conduction*, mai 1986, édité par la Société Française des Thermiciens.
- [3] NEVEU (A.), BACOT (P.) et REGAS (R.). — *Modèle d'évolution thermique des bâtiments. Conditions pratiques d'identification*. Rev. Gén. Therm. Fr., n° 296-297, août-septembre 1986, p. 413-420.
- [4] NEIRAC (F.P.). — *Approche théorique et expérimentale des modèles réduits du comportement thermique des bâtiments*. Thèse de l'Ecole des Mines de Paris, spécialité Energétique, 16 mars 1989.
- [5] DUFRESNE (J.L.). — *Etude et développement d'une procédure expérimentale pour l'identification des paramètres d'un modèle thermique de capteurs solaires à air en régime dynamique*. Thèse de Doctorat, Université Paris VII, juin 1987.
- [6] DUFRESNE (J.L.), LAHELLEC (A.) et CHOUNET (L.M.). — *Procédure d'identification d'un système thermique. Etude de cas : caractérisation d'un capteur solaire à air en régime dynamique*. Article soumis pour publication dans la Revue de Physique Appliquée.

- [7] AFNOR. — *Capteurs solaires à circulation de liquide. Mesure des performances thermiques*. Ed. AFNOR, 1980.
- [8] DUFRESNE (J.L.), LAKHSASSI (A.), LAHELLEC (A.) et PICARD (D.). — *Problème de commande d'un champ de capteur solaire à air en climat tempéré (semi-océanique)*. Comptes rendus des 2^e Journées Internationales de Thermique (JITH-85), Rabat, 2-5 avril 1985, Ed. CNRS (PIRSEM), 1986, p. 1035-1045.
- [9] AUGER (J.L.), ALEXANDRE (A.) et MARTINET (J.). — *Fonctionnement de capteurs solaires plans en régime variable*. Rev. Gén. Therm. Fr., n° 239, novembre 1981, p. 811-824.
- [10] LETZ (T.) et LALLEMAND (M.). — *Système de chauffage solaire aérodynamique en régime dynamique : modélisation*. Rev. Gén. Therm. Fr., n° 298, octobre 1986, p. 457-467.
- [11] *Proceedings of the Workshop on solar simulator*. Ispra (Italie), 9-11 février 1982. ARANOVICH (E.) et GILLET (B.) Edit., publié par la Commission des Communautés Européennes, établissement commun de Recherche d'Ispra.
- [12] DUFRESNE (J.L.), PICARD (D.) et TLILI (M.). — *Réalisation et essais d'un insolateur à flux modulable et à échange radiatif contrôlé pour la caractérisation de capteurs solaires à air*. Comptes rendus des 3^e Journées Internationales de Thermique (JITH-87), Lyon, 13-16 avril 1987, Ed. CNRS (PIRSEM), p. 785-792.
- [13] COOPER (P.I.), CHRISTIE (E.A.) and DUNKLE (R.V.). — *A method of measuring sky temperature*. Solar Energy, vol. 26, 1981, p. 153-159.
- [14] DOKOS (W.). — *Presentation of some U.S. solar simulator characteristics*. Voir Référence [11], p. 51-61.
- [15] GILLET (W.B.) and MOON (J.E.). — *Results from solar simulators in the CEC collaborative collector testing program*. Voir Référence [11], p. 130-137.
- [16] GILLET (W.B.) and MOON (J.E.). — *Eight years of collector testing in Europe. What have we learned?* Proceedings of the First E.C. Conference on Solar Heating, Amsterdam, mai 1984, Den Ouden C. et Reidel D. Pub. Cy.
- [17] FIEBIG (M.) and LEY (W.). — *Comparison and evaluation of indoor/outdoor tests*. Proceedings of the Workshop on Solar Simulators, Ispra (Italie). Voir Référence [11], p. 145-149 et p. 207-208.
- [18] LEINER (W.) and ALTFELD (K.). — *Design of a solar simulator with reduced thermal radiation to be used as a component of a test facility for air heating collectors*. Voir Référence [11], p. 88-97.
- [19] TEST (F.C.) and LESSMANN (R.C.). — *Heat transfer during wind flow over rectangular bodies in the natural environment*. Trans. of the ASME J. of Heat Transfer, vol. 103, 1980, p. 262-267.
- [20] SOLTAU (H.) and ANGERMEIER (G.). — *The wind related coefficient at a rectangular plate in the natural environment*. Working document n° 261 of I.E.A. Task 3 *Performance testing of solar collector*, Department of Mechanical Engineering and Energy Studies, University of Cardiff (U.K.), 1987.
- [21] DUFFIE (J.A.) and BECKMAN (W.A.). — *Solar energy thermal processes*. Wiley-Interscience Ed., New York, 1974.
- [22] HONARBAKHSI (A.). — *On the importance of wind velocity and ambient temperature to the performance of flat-plate collectors*. Proceedings of the first E.C. Conference on Solar Heating, Amsterdam, mai 1984, Reidel Pub. Cy., p. 696-706.
- [23] SPAROW (E.M.) and TIEN (K.K.). — *Forced convection heat transfer at an inclined and yawed square plate*.  *Application to solar collectors*. Trans. of ASME J. of heat Transfer, vol. 99, 1977, p. 507-512.
- [24] OLIPHANT (M.V.). — *Measurement of wind speed distributions across a solar collector*. Solar Energy, vol. 24, n° 4, 1980, p. 403-405.
- [25] GREEN (A.A.) and MOON (J.E.). — *Computer model of the Nobels Peelman air heating solar collector used in the CEC6 robin test series*. Proceedings of the first E.C. Conference on Solar Heating, Amsterdam, mai 84, Reidel Pub. Cy., p. 504-508.
- [26] BRETHERWATER (D.E.). — *The performance of air cooled collector systems in Dutch field tests*. Proceedings of the First E.C. Conference on Solar Heating, Amsterdam, 30 avril-4 mai 1984, D.Reidel Pub. Cy (Dordrecht), p. 78-82.
- [27] CLOSE (D.J.) and YSOFF (M.B.). — *The effects of air leaks on solar air collector behaviour*. Solar Energy, vol. 20, n° 6, 1978, p. 459-463.
- [28] McADAMS (W.H.). — *Transmission de la chaleur*. Ed. Dunod, 1961.
- [29] JAMES (F.) and ROOS (M.). — *MINUIT : a system for function minimization and analysis of the parameters errors and correlations*. CERN computer center program library, 1983.
- [30] JAMES (F.). — *Function minimization*. Proceedings of the 1972 CERN computing and data processing school, Document CERN 72-21, Edition CERN, Genève, 1972
- [31] RIVET (P.). — *Analyse élémentaire de l'équation simplifiée du capteur-plan à air en régime stationnaire*. Revue de Physique Appliquée, vol. 15, 1980, p. 977-983.
- [32] TAUPIN (D.). — *Probabilities data reduction and error analysis in the physical sciences*. Les Editions de Physique (Les Ulis - France), 1988.
- [33] DUFRESNE (J.L.), CHOUNET (L.M.) et LAHELLEC (A.). — *Développement d'un outil pour l'identification de modèles physiques réduits : application à un modèle simple de stockage souterrain de gaz*. Rapport de contrat entre l'équipe RAMSES (SPI-CNRS) et le DAS (DETN-GDF), novembre 1989.
- [34] GILLET (W.B.) and KENNA (J.P.). — *Recent developments in solar simulators for collector testing*. Proceedings of the I.S.E.S. Congress Solar World Forum, Brighton, Angleterre, août 1981, Pergamon Press Ed., p. 914-918.
- [35] de RON (A.J.). — *Dynamic modelling and verification of a flat-plate solar collector*. Solar Energy, vol. 24, 1980, p. 117-128.
- [36] CANN (D.M.), RICHARDS (S.L.F.) and ALBACH (G.C.). — *A large area solar simulator construction and performance*. Proceedings of the ISES Congress Solar World Forum, Brighton, Angleterre, août 1981, Ed. Pergamon Press, p. 926-933.
- [37] SAITO (A.), UTAKA (Y.), TSUCHIO (T.) and KATAYAMA (K.). — *Transient response of flat plate solar collector for periodic solar intensity variation*. Solar Energy, vol. 32, n° 1, 1984, p. 17-23.
- [38] PHILIPS (D.H.W.). — *System testing at Philips Laboratories*. Proceedings of Solar Collector and Systems Testing Group, Athènes, 4-7 juin 1985, p. 291-294 ; édité par E.ARANOVITCH, D.GILLIABERT et W.B.GILLET, Centre de recherche commun, Commission des Communautés Européennes, Ispra, Italie.
- [39] BEESON (E.J.G.). — *The CSI lamp as a source of radiation for solar simulation*. Lighting Research and Technology, vol. 10, n° 3, 1978, p. 164-166.
- [40] KRUSI (P.) and SCHMID (R.). — *The CSI 1000 W lamp as a source for solar radiation simulation*. Solar Energy, vol. 30, n° 5, 1983, p. 455-462.
- [41] RUEB (R.A.). — *Quartz halogen dichroic mirror lamps for solar simulation*. [Voir Référence 11], p. 20-35.