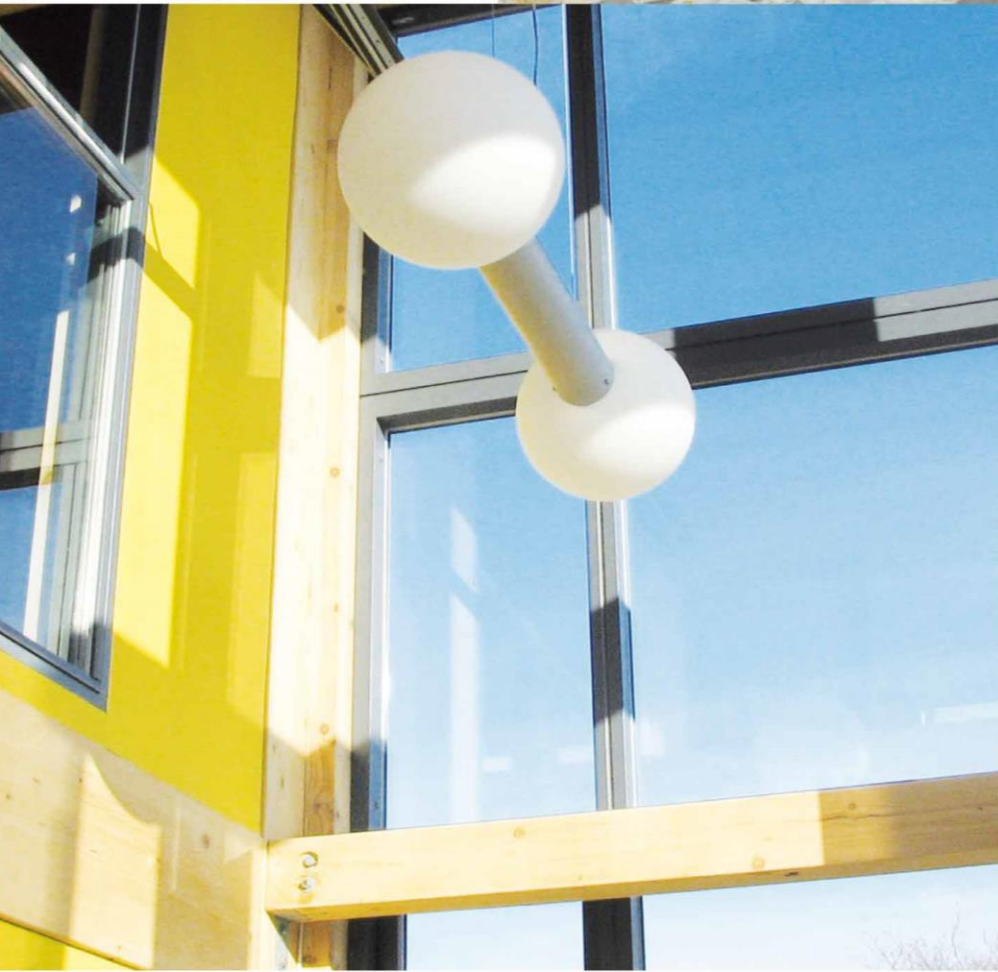




Université Lille Nord de France



Laboratoire
Génie Civil
et géo-Environnement
Lille Nord de France



Habitat

Géomatériaux

géo-Environnement

Conférence Francophone IBPSA France 2014



Instrumentation fluxmétrique pour la thermique des bâtiments Quelques applications

Didier DEFER
Stéphane LASSUE



Contexte général:

Alors que généralement son objectif est de diminuer, d'augmenter et/ou de contrôler les quantités de chaleur transférées,

Pourquoi le thermicien se contenterait-il des seules mesures de températures pour évaluer des flux?

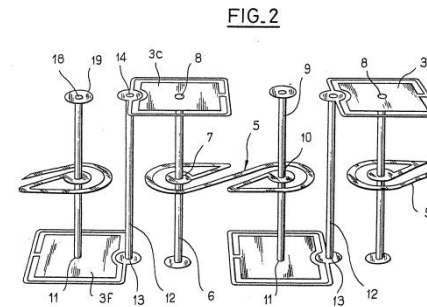
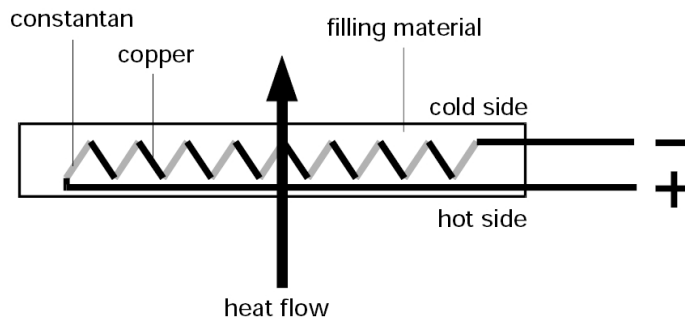
Est-ce que l'électricien se passe d'ampère-mètre pour mesurer les courants électriques.

L'appareil existe et il apprend à l'utiliser correctement



Dans le domaine du bâtiment, beaucoup de recherches à la fin des années 1970 pour mettre au point le capteur de flux ou « fluxmètre » « idéal ».

En général, le concept repose sur la mesure d'un gradient de température entre deux faces d'une résistance thermique,



Saint Gobain



hukseflux



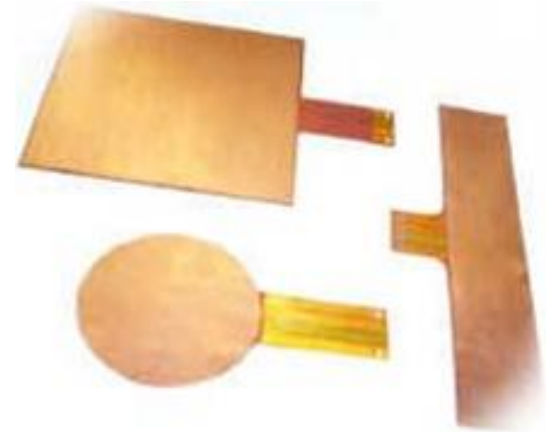
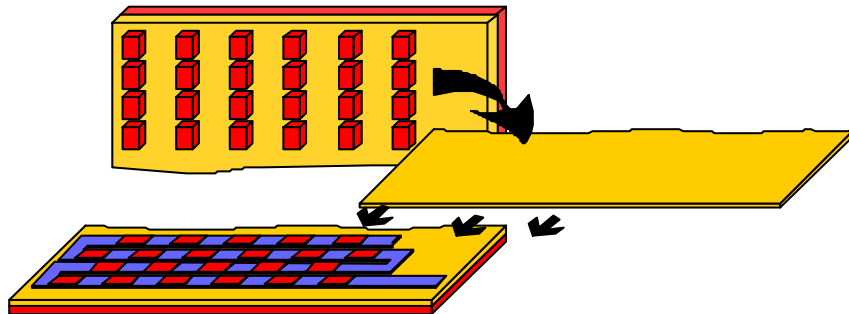
Thermal instrument compagny

Dans ces conditions le capteur est forcément perturbateur de la mesure dans de nombreuses situations



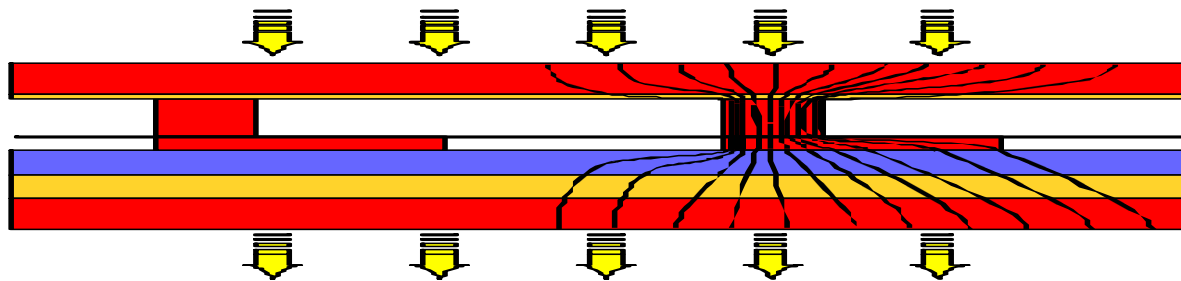
Fluxmètre à gradient tangential, né à Béthune dans les années 1980
Amélioré et optimisé lors d'échanges entre les chercheurs en
électronique et génie civil

Vue éclatée « de principe » du capteur

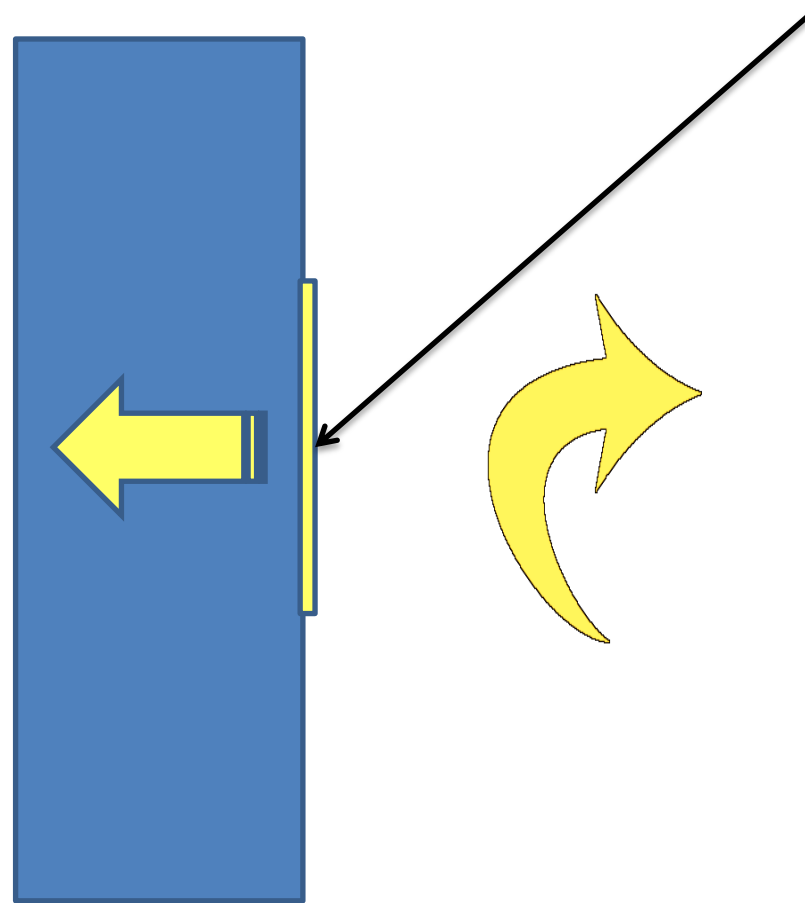


Constriction des
lignes de flux

Doc: CAPTEC



Dans la suite de l'exposé, un petit aperçu de travaux réalisés plus ou moins récemment avec des fluxmètres



Paroi

Ambiance



Caractérisation de matériaux et parois



Caractérisation in situ

- Spécificités
 - importance de la qualité de la mise en œuvre
 - évolution en fonction de temps
 - tassement
 - sensibilité des matériaux à la teneur en eau
 - long terme
- Diagnostic
 - diagnostic avant rénovation
 - Stratégie et optimisation des investissements
 - diagnostic après rénovation
 - Performance des parois rénovées



Objectifs de la caractérisation de parois

- Estimation des propriétés thermophysiques
- Performance en isolation thermique (réduction des déperditions)
- Stockage – inertie (confort thermique)
- Déphasage - optimisation des apports gratuits
- Données pour la simulation



Approches mises en œuvre

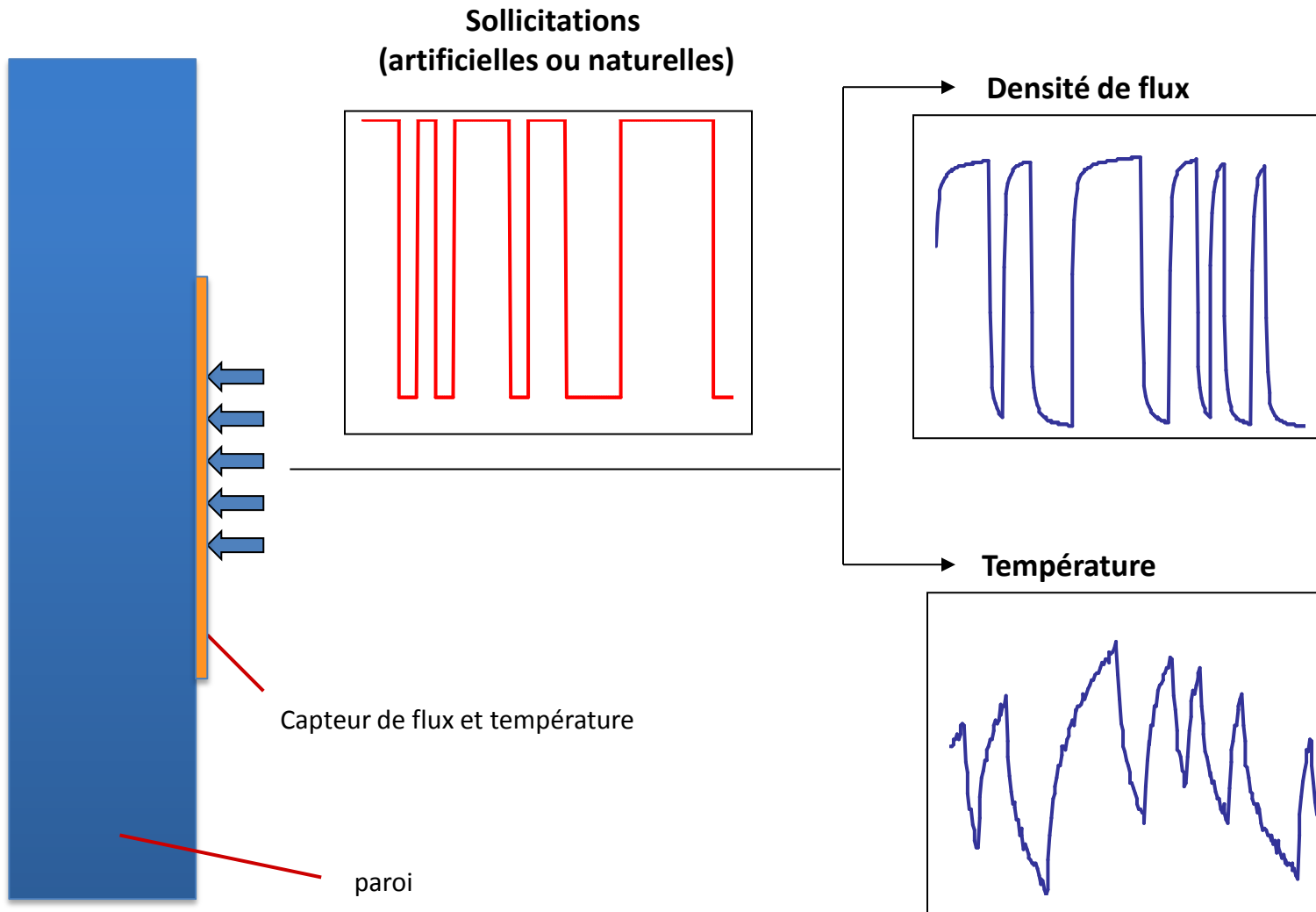
- Identification de caractéristiques thermophysiques et géométriques par études de fonctions de transfert.
 - Couplage flux/température dans une surface isotherme : formalisme de l'impédance thermique
 - Couplage grandeurs généralisées de flux et de températures dans deux plans isothermes : formalisme des impédances généralisées

Impédance

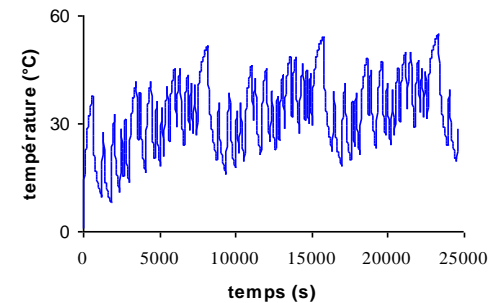
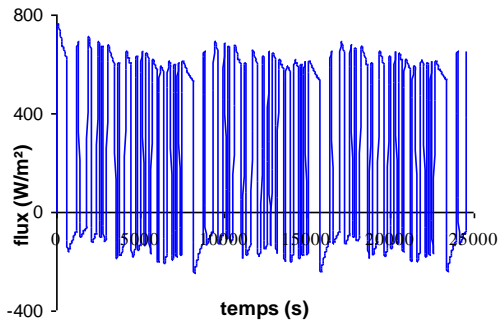
- Définition $Z_{th}(f) = \frac{\theta(f)}{\phi(f)}$
- Application :
 - Mesure de l'effusivité d'un matériau
 - Suivi de grandeurs corrélées (teneur en eau)
 - Mise en évidence et localisation d'anomalies structurelles



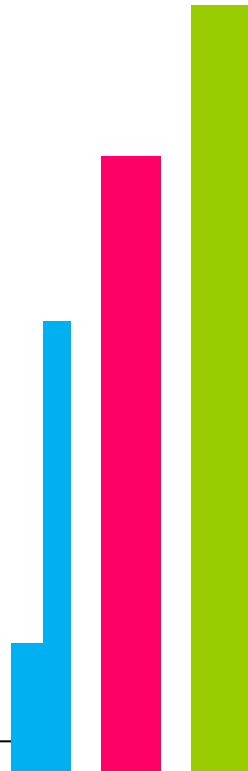
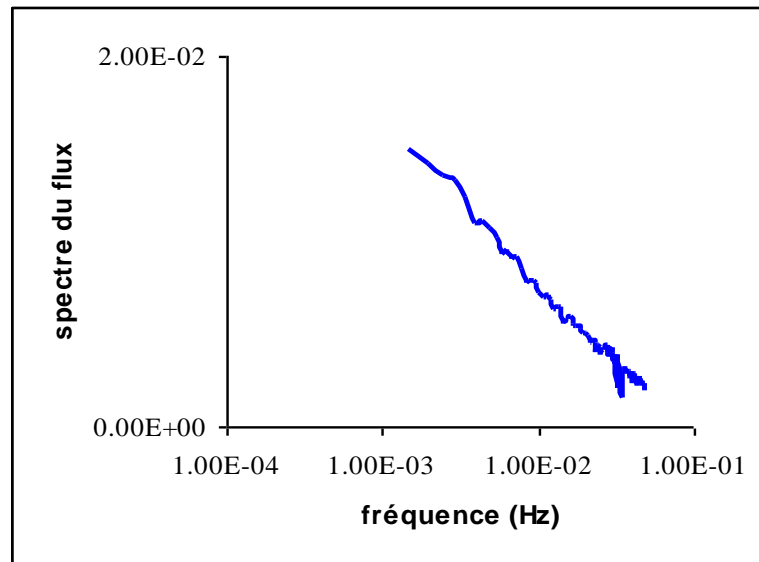
Mesure simultanée du flux et de la température à la surface d'une paroi



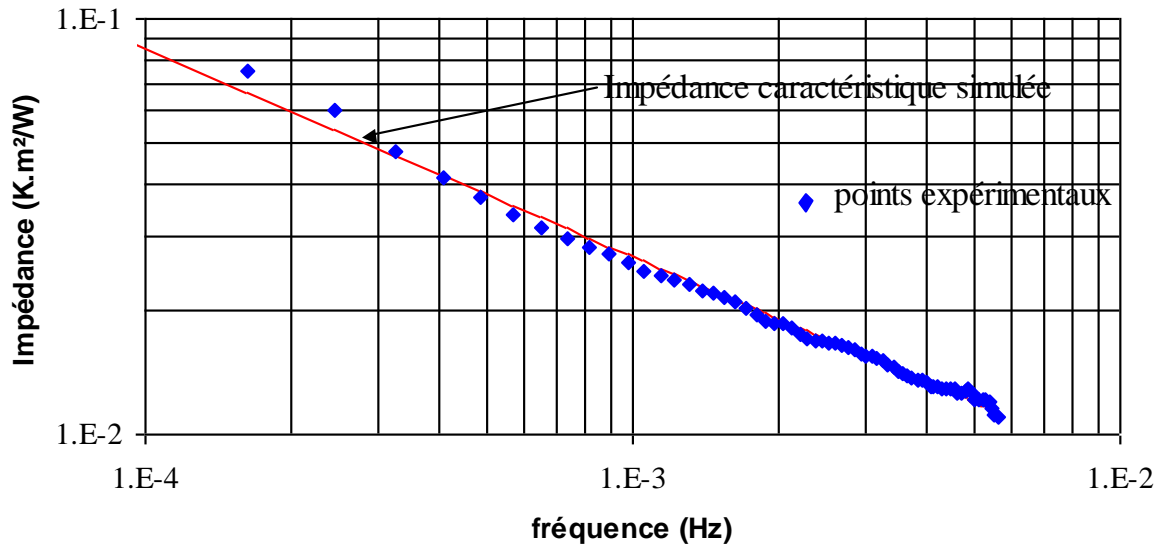
Cas du milieu semi-infini



fonction de transfert



Application : mesure de l'effusivité



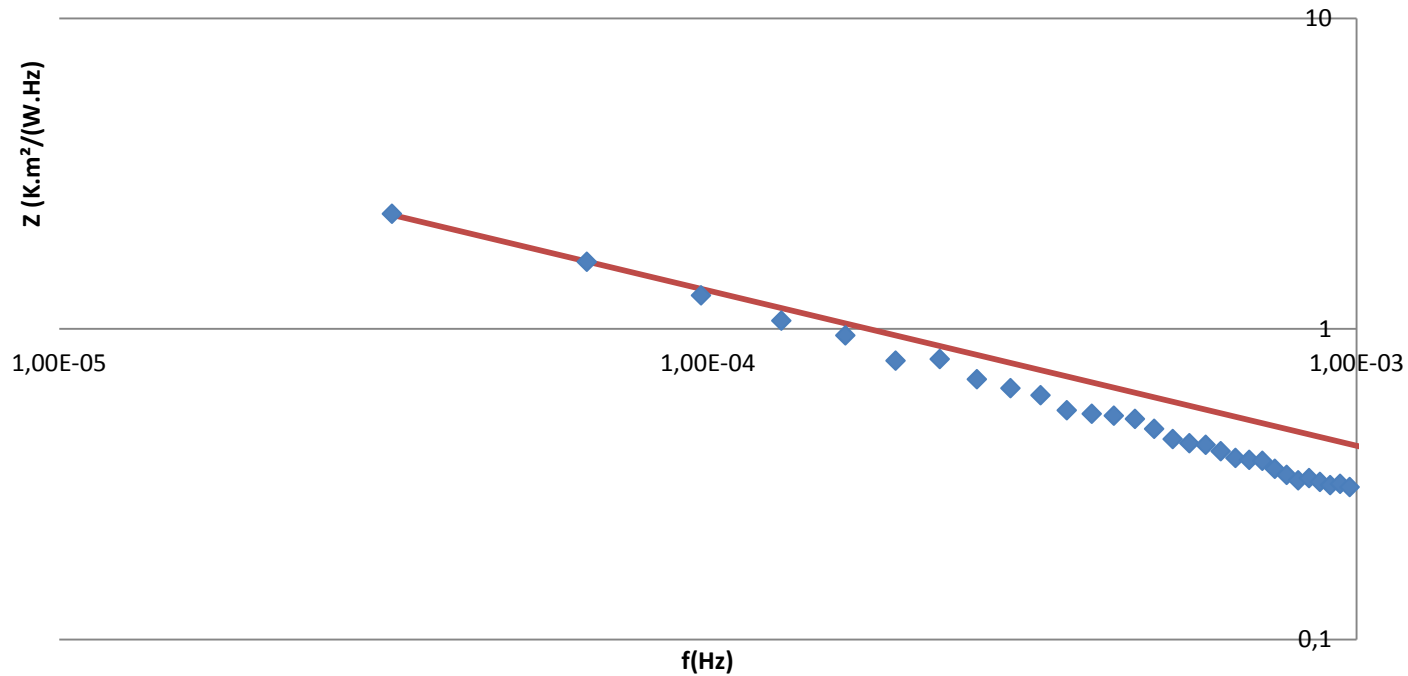
$$Z_c(f) = \frac{1}{b\sqrt{j2\pi f}}$$

effusivité : 483 J.K⁻¹.m⁻².s^{-1/2}

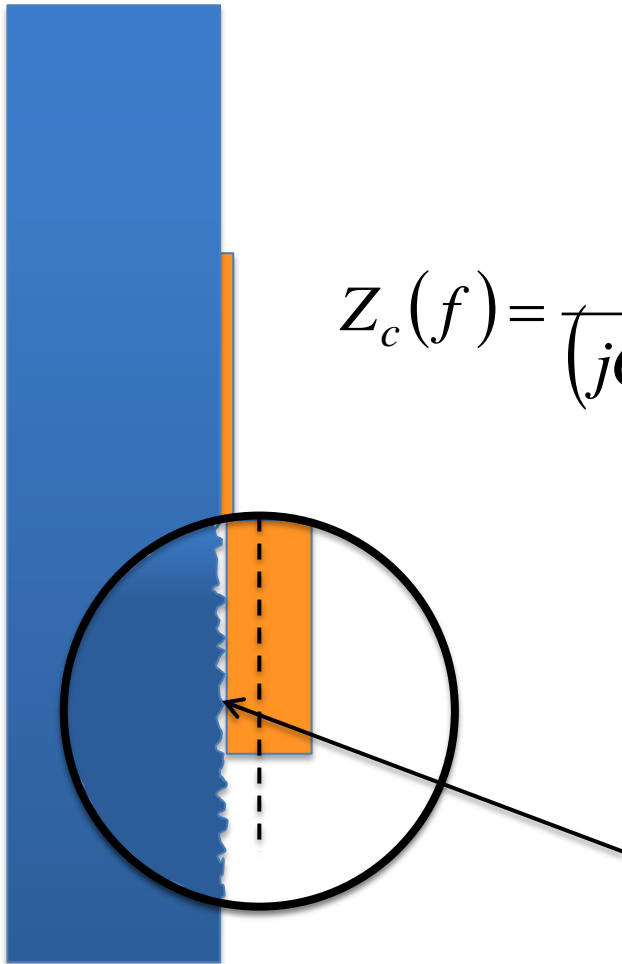


Application sur du polystyrène

Polystyrène : impédance expérimentale
et impédance caractéristique



$$Z_c(f) = \frac{(1 + b\sqrt{j2\pi f} \cdot R_c)}{(jC_f 2\pi f + b\sqrt{j2\pi f} \cdot (1 + jR_c C_f 2\pi f))}$$

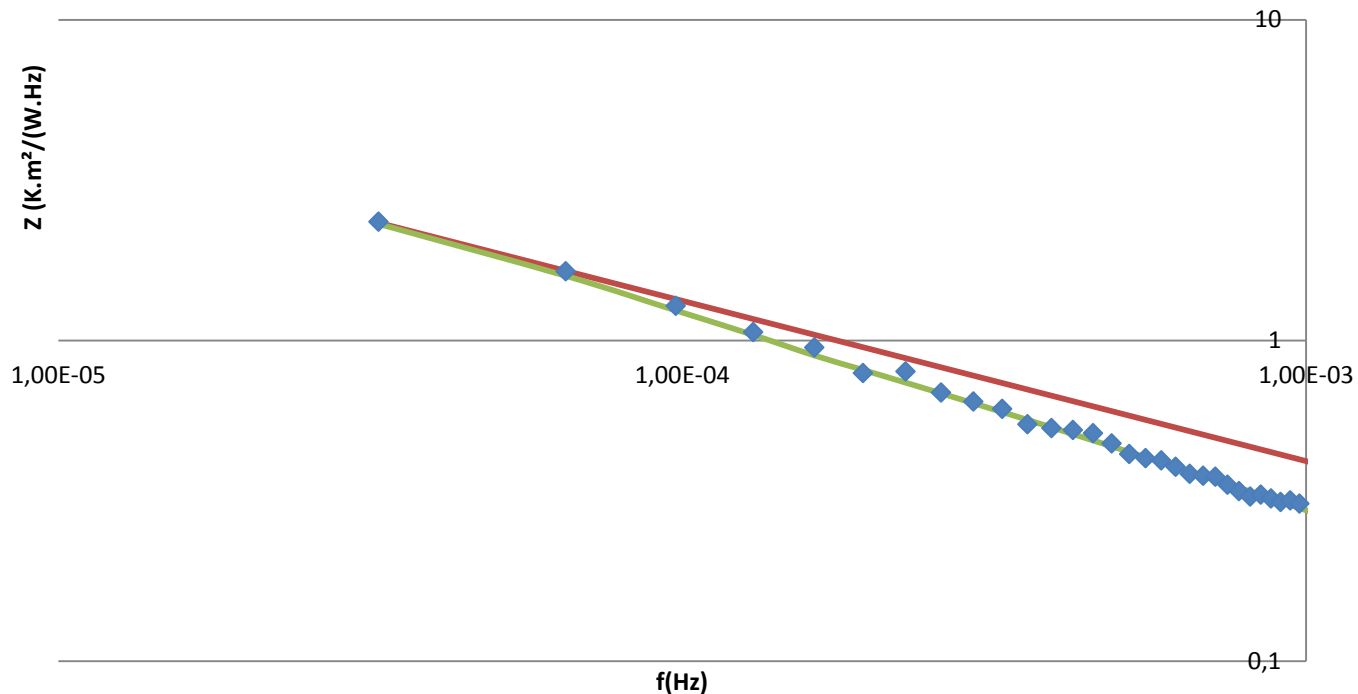


Résistance de contact



Application sur du polystyrène

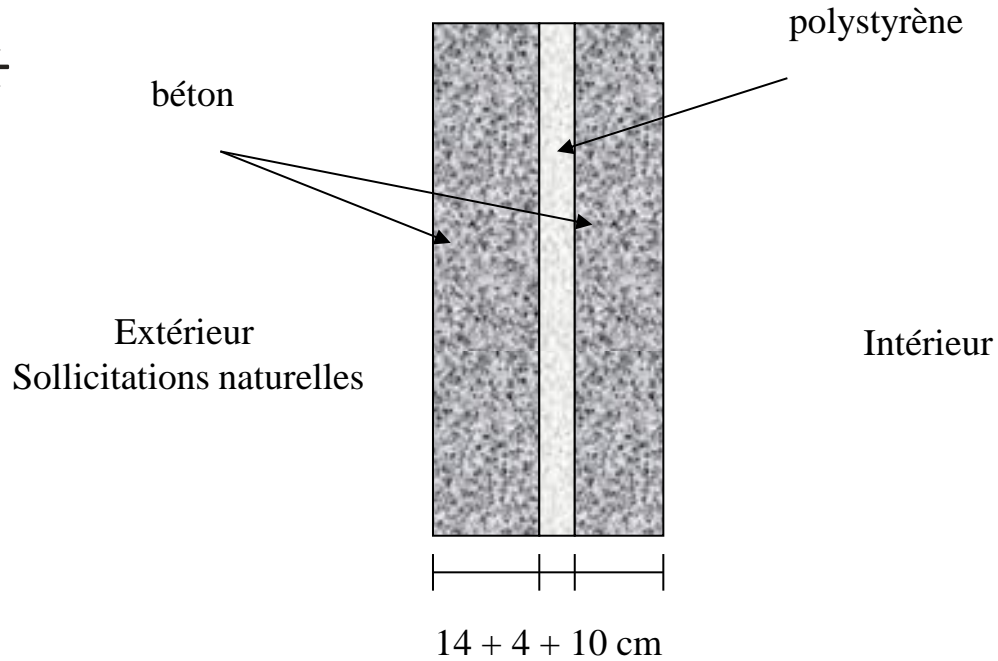
Polystyrène : impédances expérimentale,
caractéristique et tricouche



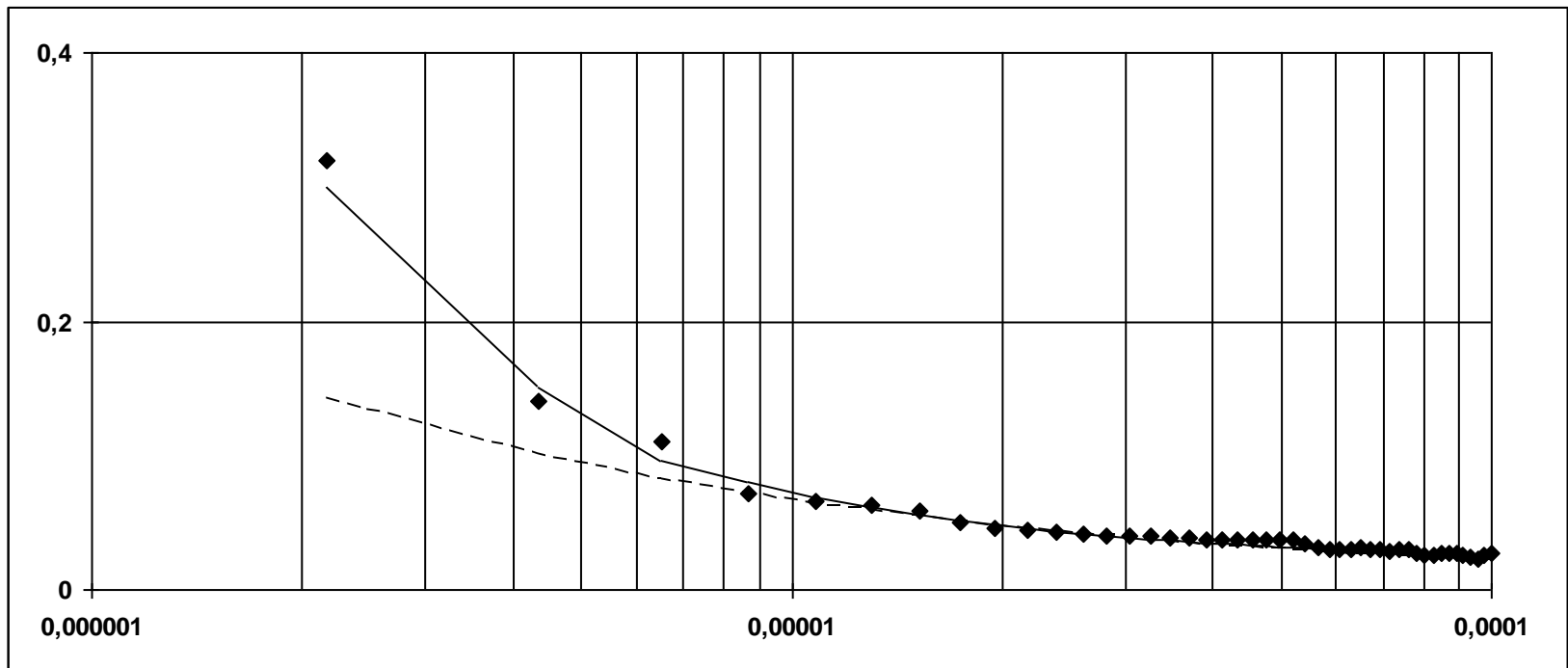
Effusivité : $38 \text{ J.K}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$
Capacité capteur = 630 J/K.m^2



Détection et localisation de défauts (vides, délaminations,...)



Détection et localisation de défauts (vides, délaminations,...)



Impédances généralisées

Somme des températures :

$$\Sigma\theta(t) = \theta_e(t) + \theta_s(t)$$

Différence des températures :

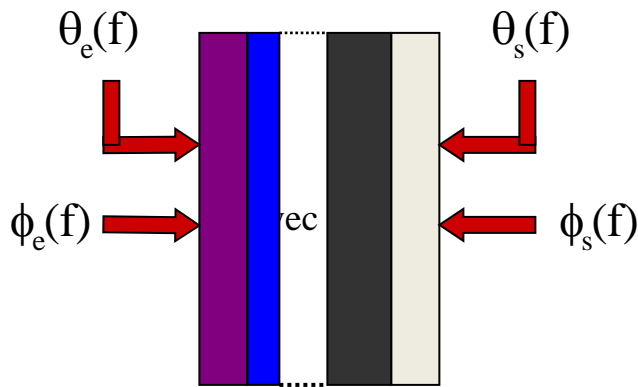
$$\Delta\theta(t) = \theta_e(t) - \theta_s(t)$$

Somme des flux :

$$\Sigma\varphi(t) = \varphi_e(t) + \varphi_s(t)$$

Différence des flux :

$$\Delta\varphi(t) = \varphi_e(t) - \varphi_s(t)$$



$$\begin{bmatrix} \Sigma\varphi(j\omega) \\ \Delta\varphi(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ H_2 & H_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta(j\omega) \\ \Sigma\theta(j\omega) \end{bmatrix}$$

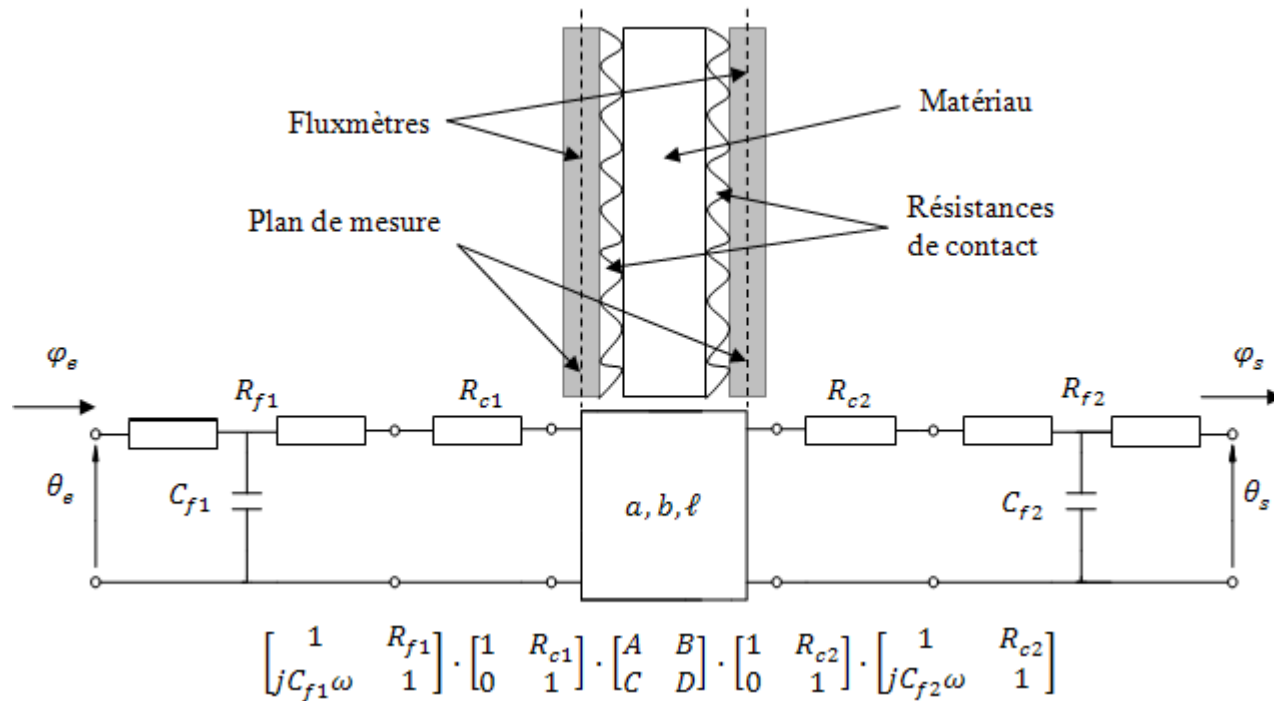
$$[M] = \begin{bmatrix} E & G \\ H & F \end{bmatrix} \text{ et } H_1 = \frac{1 + \frac{E+F}{2}}{G}, H_2 = \frac{F-E}{2G}, H_3 = \frac{-1 + \frac{E+F}{2}}{G}$$

Système symétrique : 2 modes découplés

$$\Sigma\phi(f) = H_1 \Delta\theta(f)$$

$$\Delta\phi(f) = H_3 \Sigma\theta(f)$$

Configuration correspondant à une paroi homogène



Fonctions H dans le cas de la paroi homogène

$$R_{f1} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{f2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$$

$$C_{f1} = 800 \text{ J} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

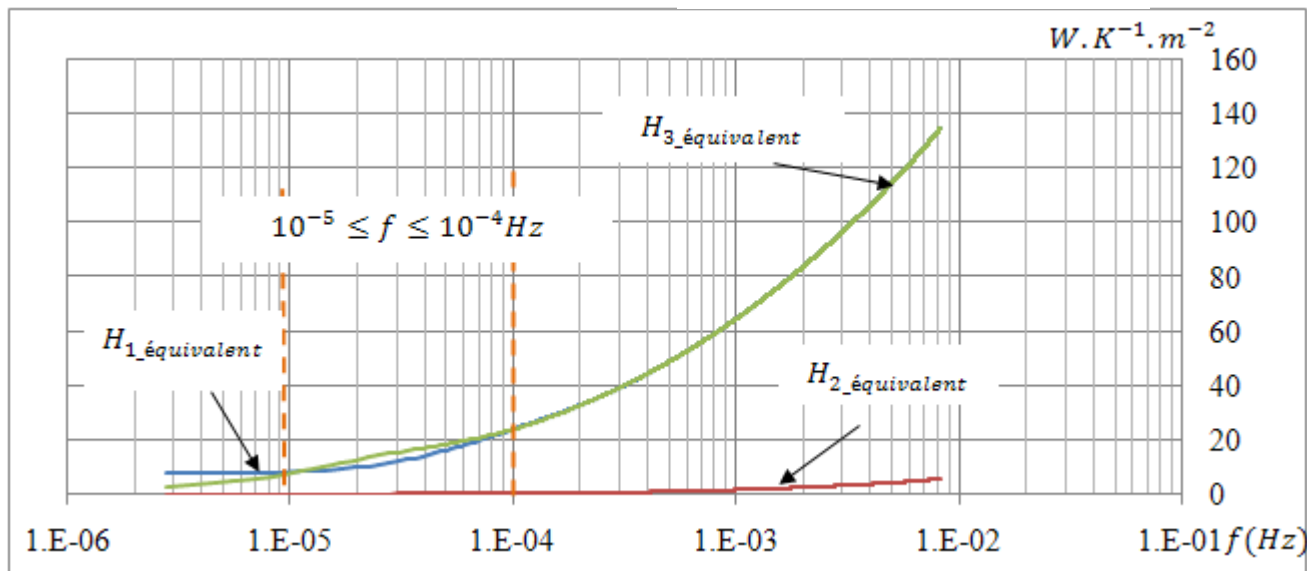
$$C_{f2} = 600 \text{ J} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$R_{c1} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{c2} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$$

$$a = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$b = 2000 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$$



Expressions de H_1 et H_3

$$R_{f1} = R_{f2} = R_f$$

$$C_{f1} = C_{f2} = C_f$$

$$R_{c1} = R_{c2} = R_c$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma\varphi(j\omega) \\ \Delta\varphi(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 & 0 \\ 0 & H_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta(j\omega) \\ \Sigma\theta(j\omega) \end{bmatrix}$$

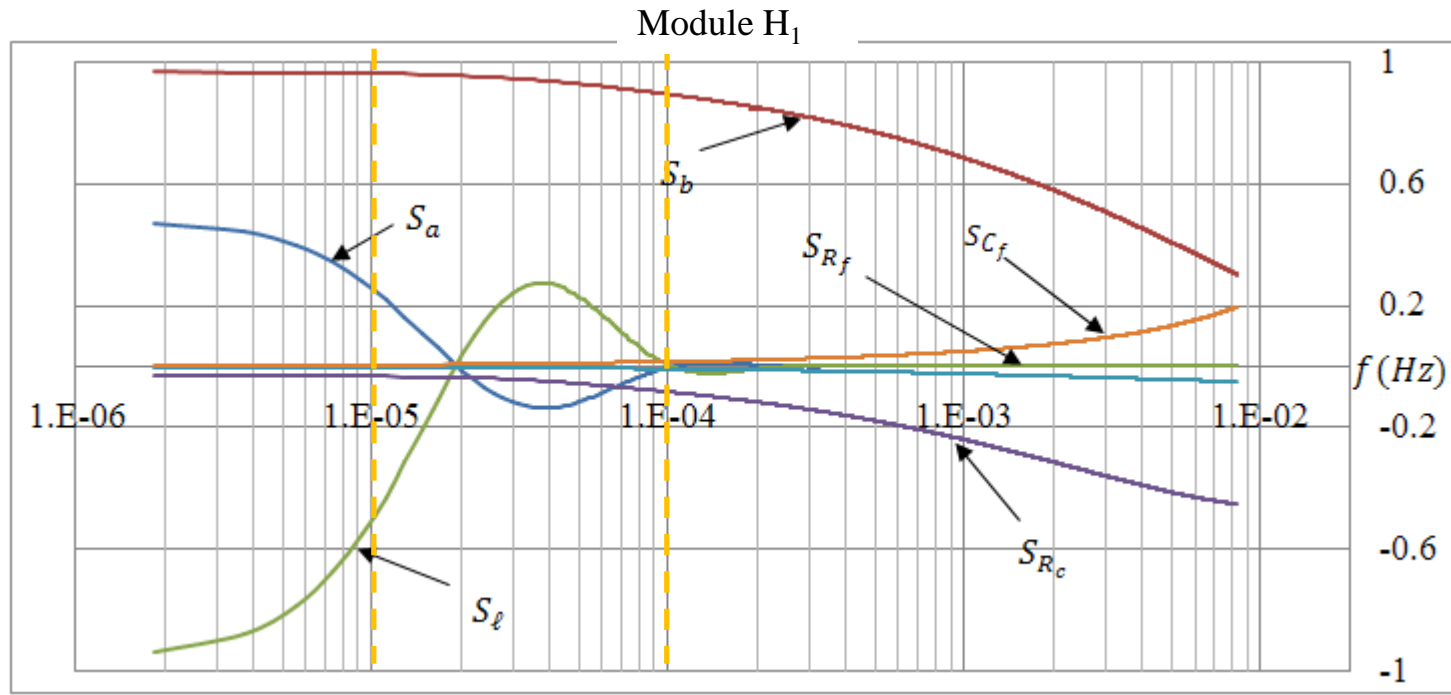
$$X = \ell \sqrt{\frac{j\omega}{a}}$$

$$H_1 = \frac{1 + \cosh(X) \left(1 + jC_f\omega \left(R_f + 2R_c + \frac{\tanh(X)}{b\sqrt{j\omega}} \right) + (R_f + R_c)(1 + R_c \cdot jC_f\omega)b\sqrt{j\omega} \cdot \tanh(X) \right)}{\cosh(X) \left((R_f + R_c) \left(2 + (R_f + R_c)b\sqrt{j\omega} \cdot \tanh(X) \right) + \frac{\tanh(X)}{b\sqrt{j\omega}} \right)}$$

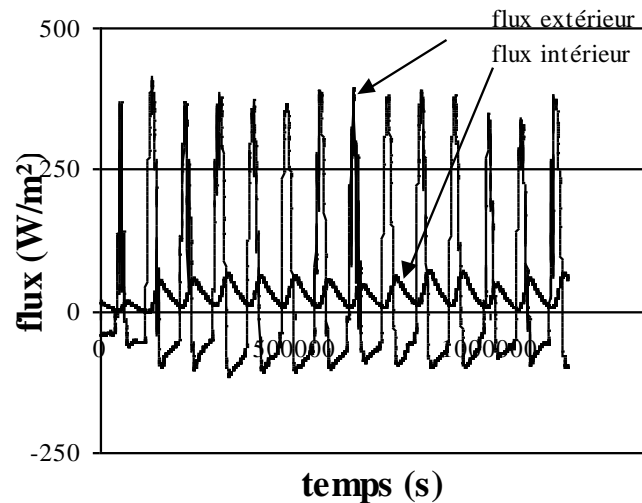
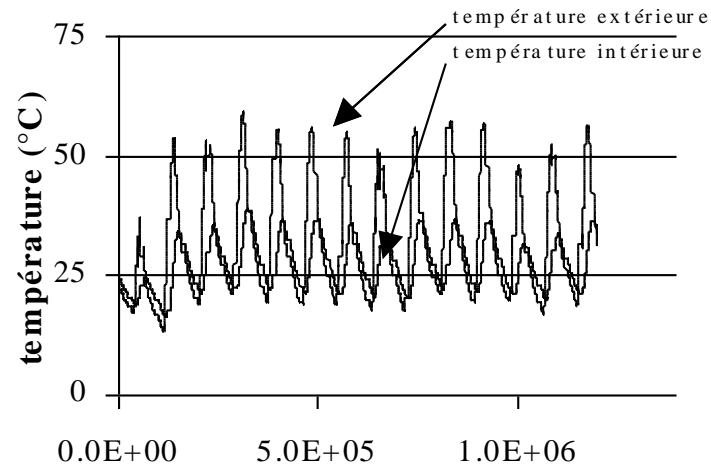
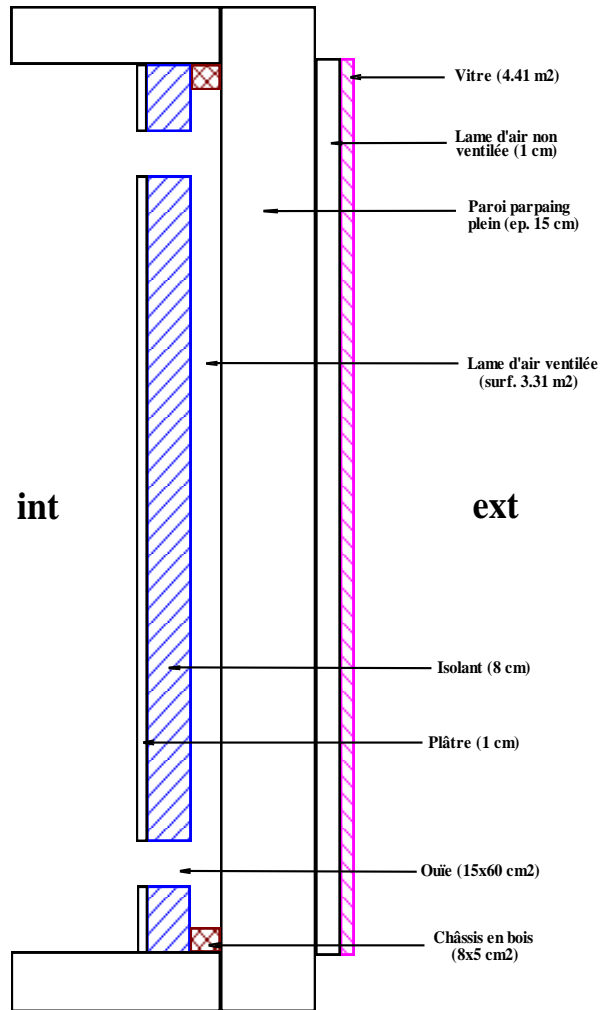
$$H_3 = \frac{-1 + \cosh(X) \left(1 + jC_f\omega \left(R_f + 2R_c + \frac{\tanh(X)}{b\sqrt{j\omega}} \right) + (R_f + R_c)(1 + R_c \cdot jC_f\omega)b\sqrt{j\omega} \cdot \tanh(X) \right)}{\cosh(X) \left((R_f + R_c) \left(2 + (R_f + R_c)b\sqrt{j\omega} \cdot \tanh(X) \right) + \frac{\tanh(X)}{b\sqrt{j\omega}} \right)}$$

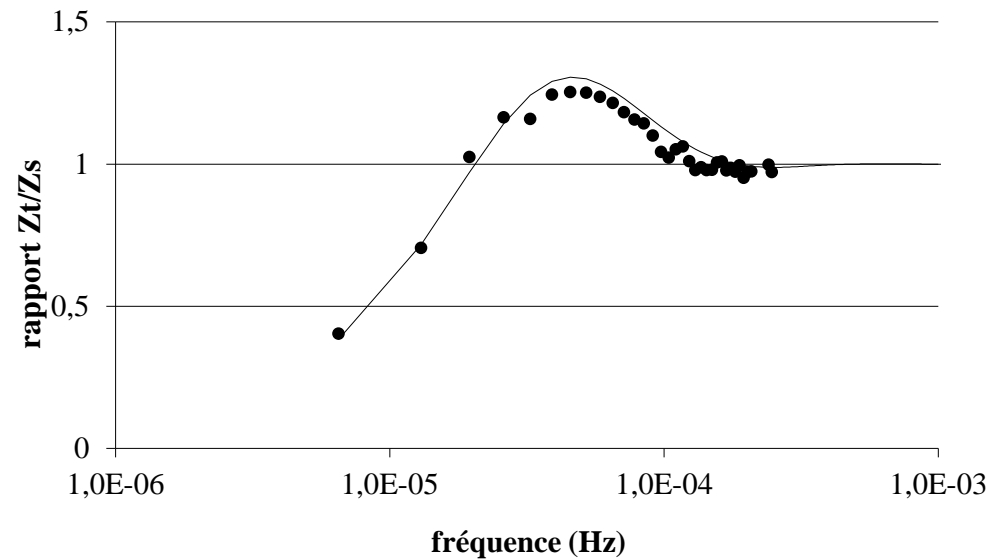
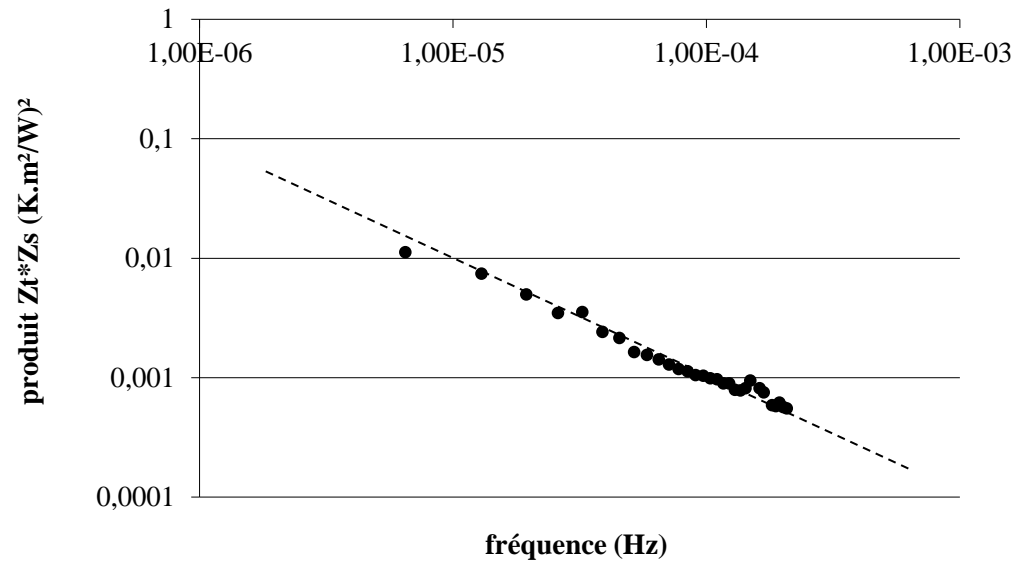
Etude de sensibilité

$$S_{p_i}(f) = \frac{\frac{\delta H(p_1, p_2, \dots, p_n, f)}{H(p_1, p_2, \dots, p_n, f)}}{\frac{\delta p_i}{p_i}}$$



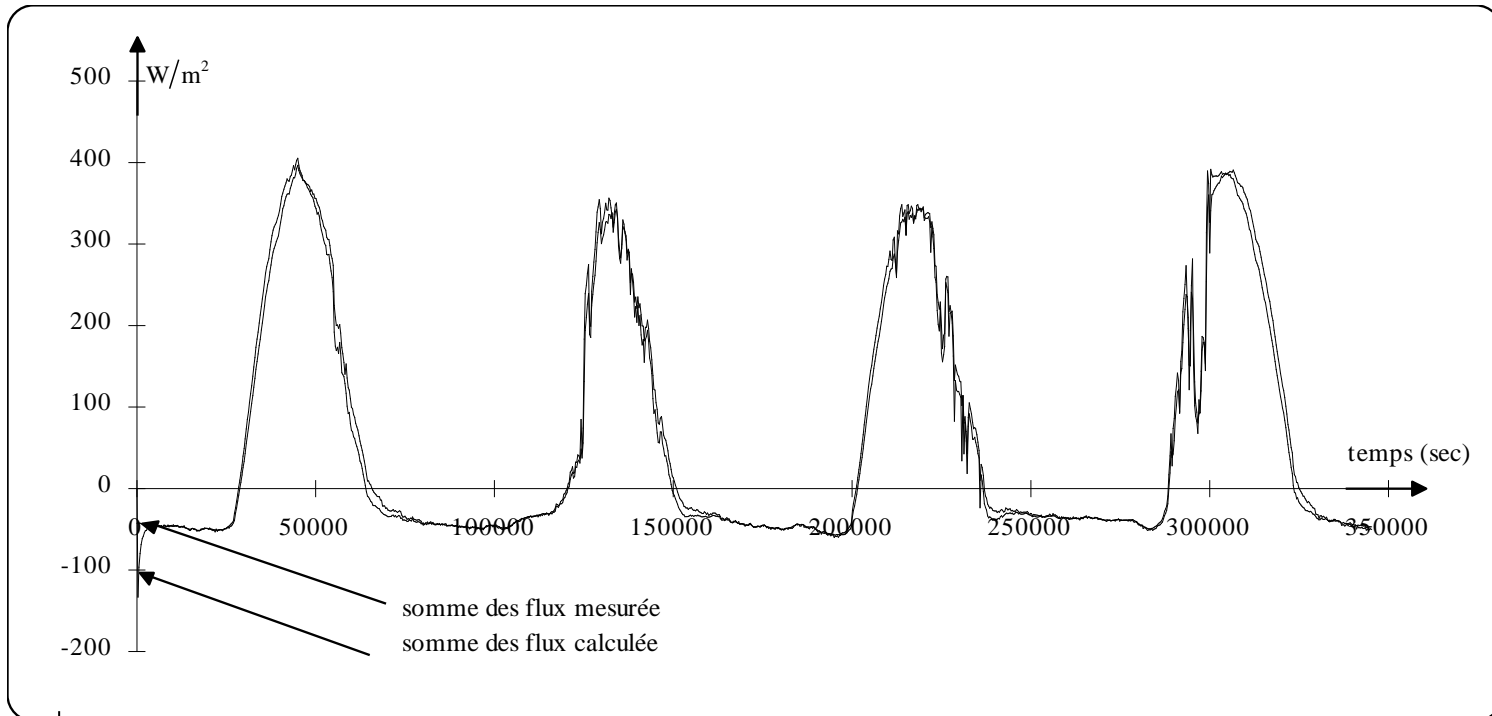
Caractérisation de l'élément stockeur d'un mur solaire passif



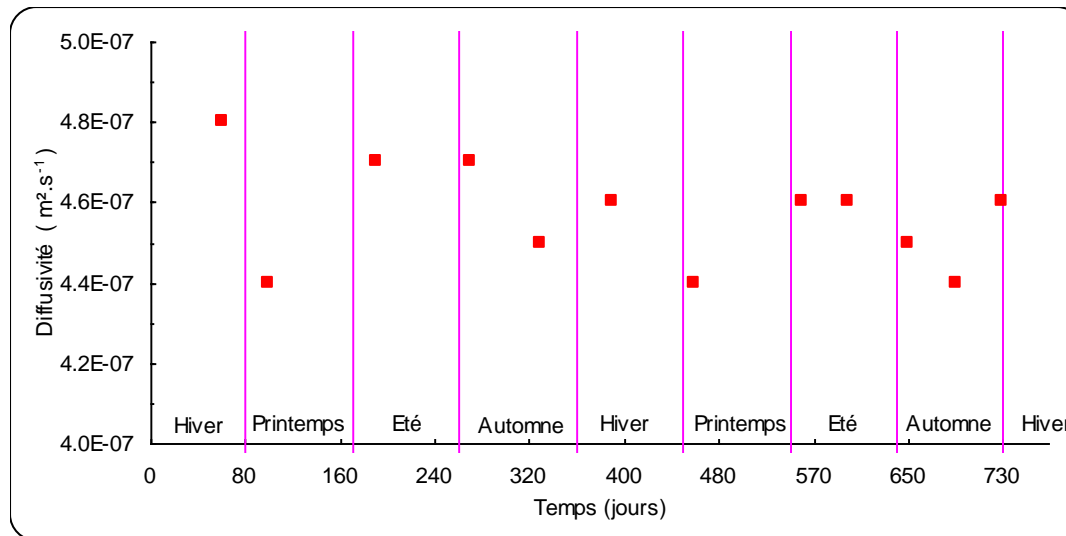
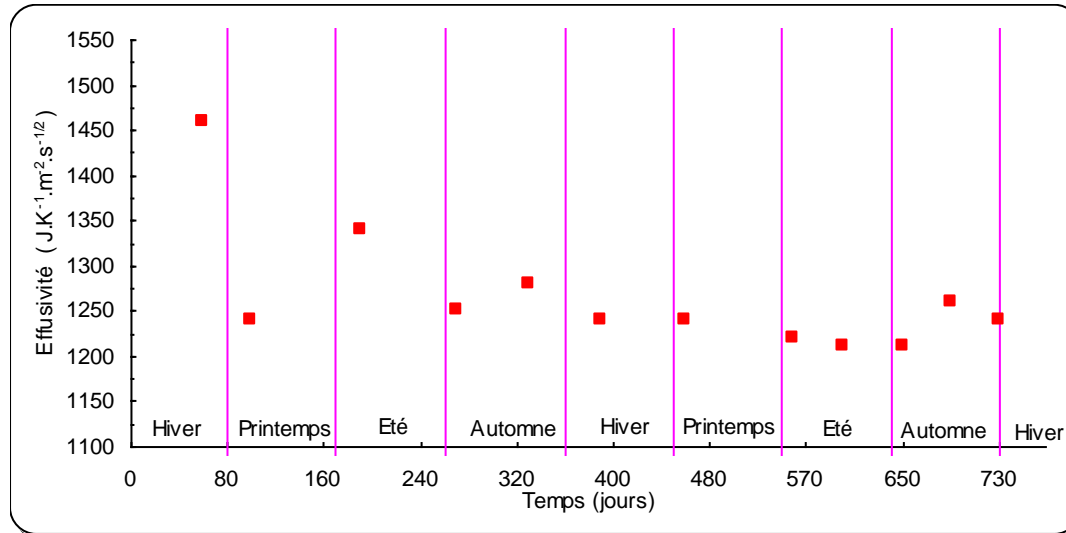


Vérification par calcul de la somme des flux

$$\Sigma\phi(t) = \frac{2\lambda}{e} \cdot \left[1 + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} e^{\frac{-4ak^2\pi^2t}{e^2}} \right] \otimes \frac{d\Delta\theta(t)}{dt}$$



Suivi des propriétés thermophysiques



Paroi en pierre

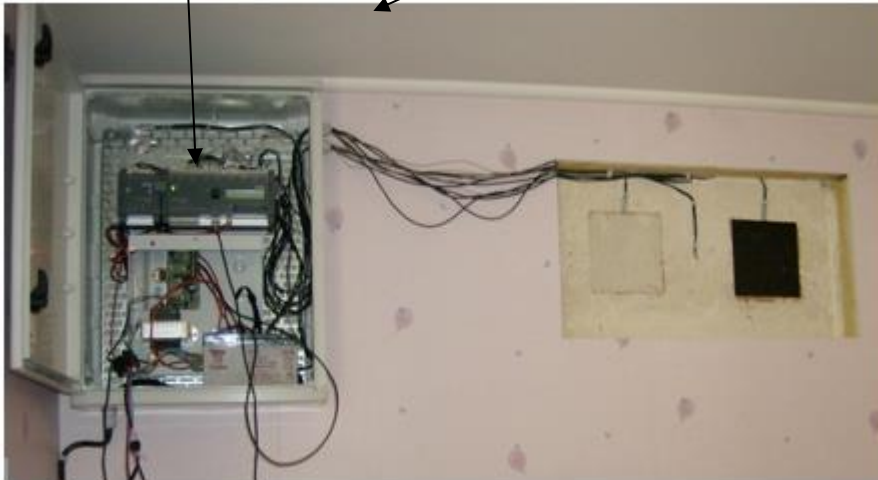


Intérieur



Extérieur

Centrale d'acquisition



Etude d'une paroi en bois



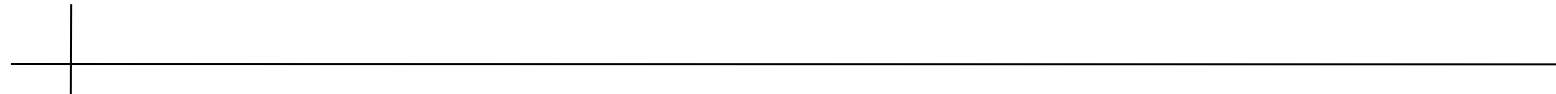


Etude d'une paroi en adobe terre- bois

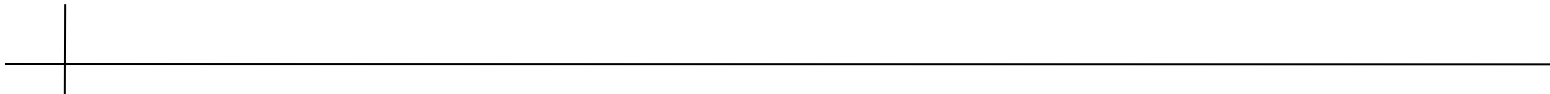


Variation des propriétés thermophysiques équivalentes de la paroi pendant la période de suivi

Date	effusivité équivalente (J.K-1.m-2.s-1/2)	diffusivité équivalente m ² .s-1	lambda équivalent W.m-1.K-1	ρc équivalent J.K-1.m-3 *1e7
29/04	645	8.36E-07	0.59	7.06E+05
10/08	630	7.09E-07	0.53	7.48E+05
19/10	519	5.35E-07	0.38	7.10E+05
20/12	456	4.34E-07	0.30	6.92E+05

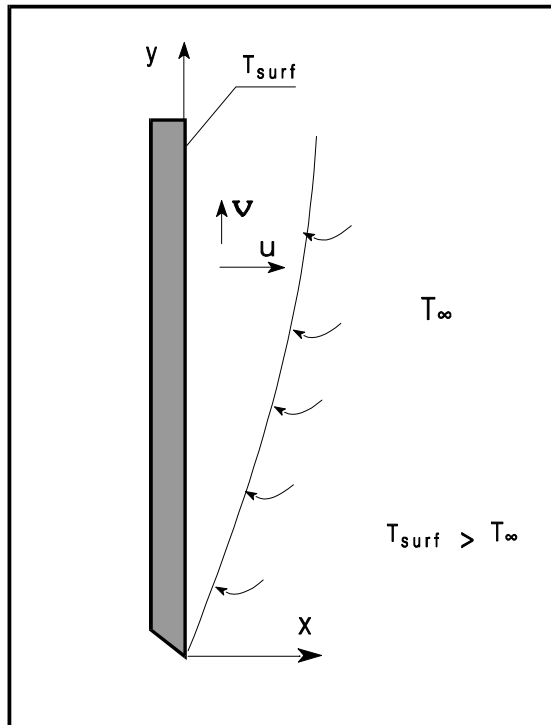


Séparation, mesure des transferts thermiques couplés à la surface d'une paroi



Mesures des échanges convectifs

Cas « académique » de la plaque plane verticale



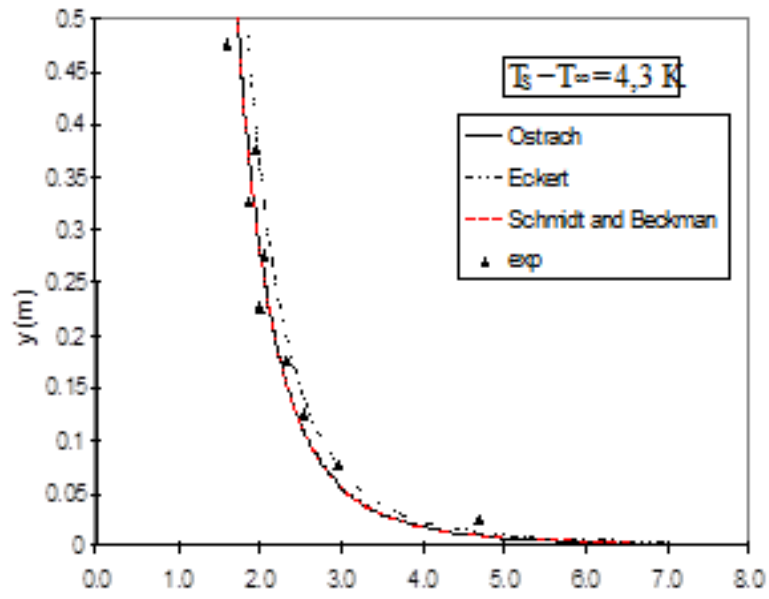
$$\phi_y = hc_y \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad Nu = \frac{hc \cdot D}{\lambda}$$

$$Nu_y = 0,536 \cdot (.Gr_y / 4)^{1/4} \quad \text{GREGG et SPARROW}$$

$$Nu_y = 0,505 \cdot (Gr_y / 4)^{1/4} \quad \text{ECKERT}$$

$$Nu_y = 0,387 \cdot (Pr \cdot Gr_y)^{1/4} \quad \text{OSTRACH}$$

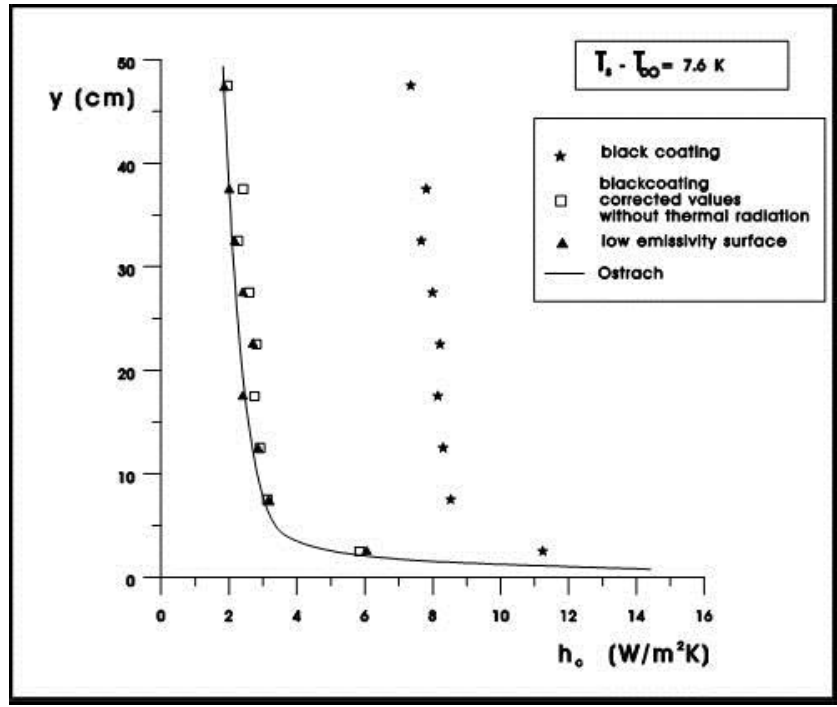
$$hc_y = 4,20 \cdot \left[\frac{T_s - T_{\infty}}{y \cdot T_{\infty}} \right]^{1/4} \quad \text{SCHMIDT et BECKMANN}$$

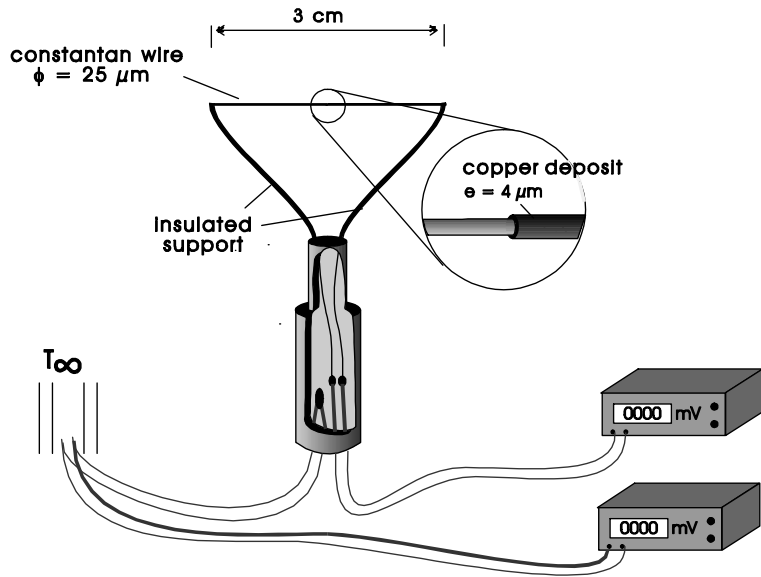


Comparaison des mesures avec
 les références
 capteur faiblement émissif

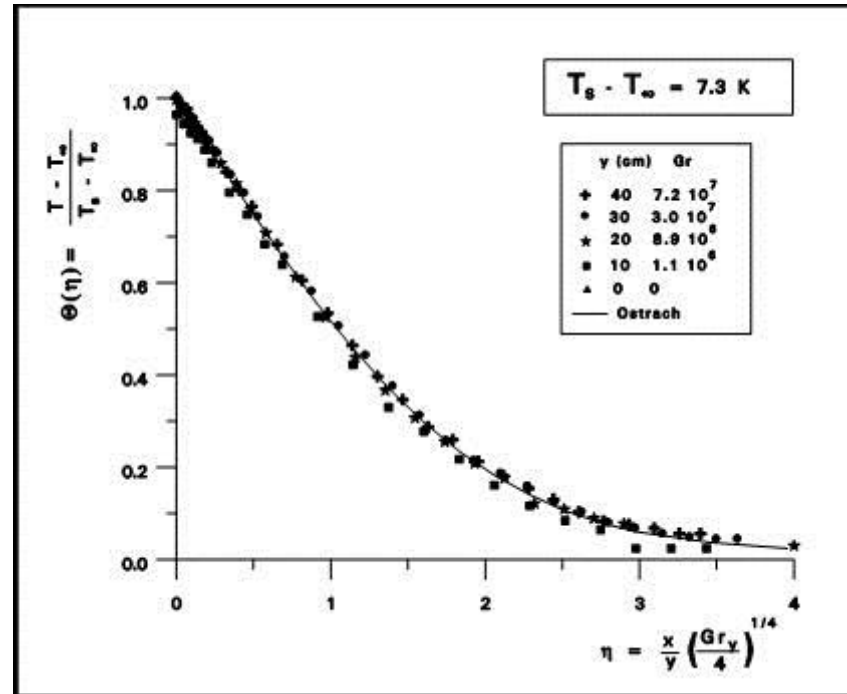


Résultats avec différents revêtements de surface





Pour comparer avec une autre référence: Conception d'un capteur de température d'air en couche limite et calcul de la pente des profils obtenus

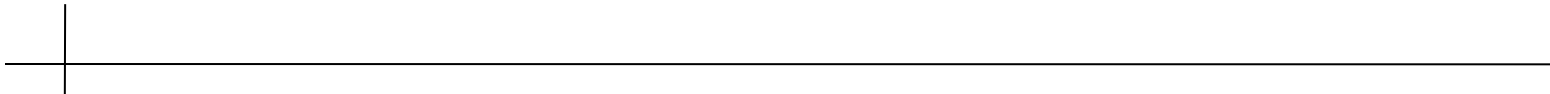


Profils expérimentaux adimensionnalisés comparés aux valeurs analytiques de référence

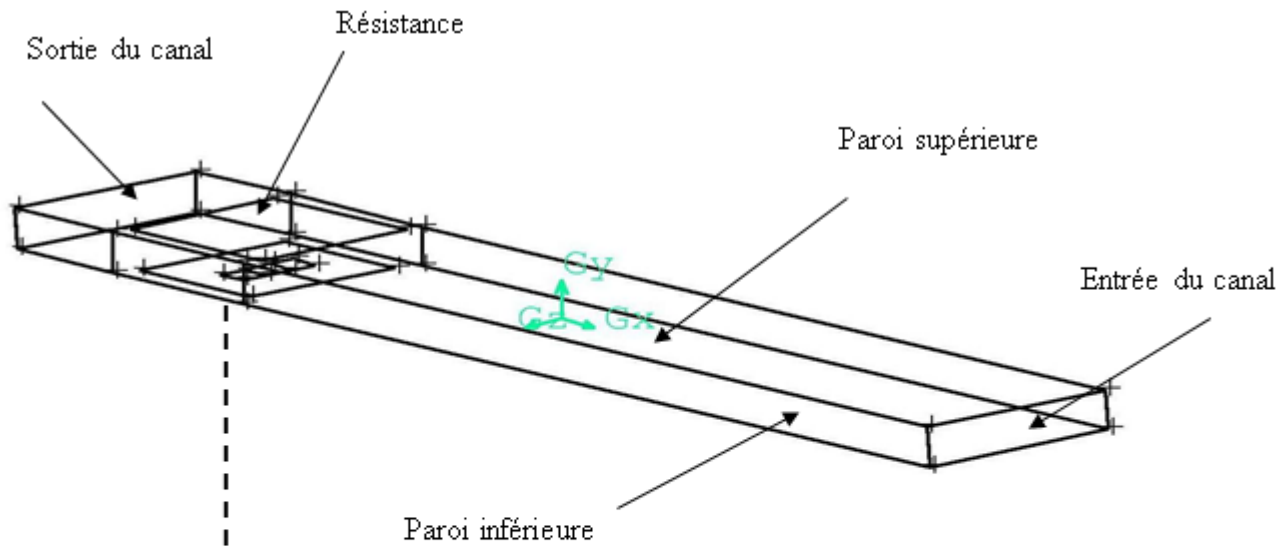


Résultat: Validation du principe de la mesure d'un flux convectif ou de coefficients d'échanges à l'aide de fluxmètres

	$T_s - T_\infty = 2,8K$				$T_s - T_\infty = 7,2K$		
y	hc_y^*	hc_y	hc_y	y	hc_y^*	hc_y	hc_y
(cm)	Heat flux	reference	Tprofile	(cm)	Heat flux	reference	Tprofile
		(W/m ² K)				(W/m ² K)	
40	2.16	2.10	2.11	40	1.7	1.63	1.82
30	2.30	2.25	2.24	30	1.83	1.77	1.69
20	2.48	2.49	2.39	20	2.02	1.98	1.96
10	3.01	2.95	2.91	10	2.34	2.37	2.32



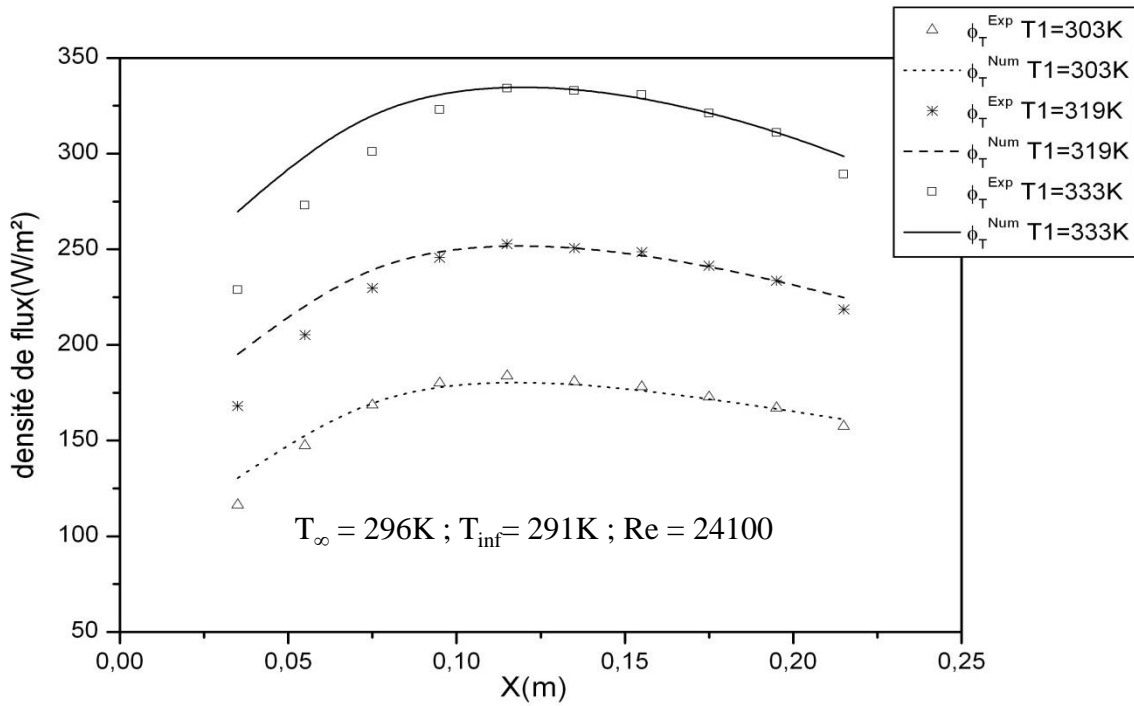
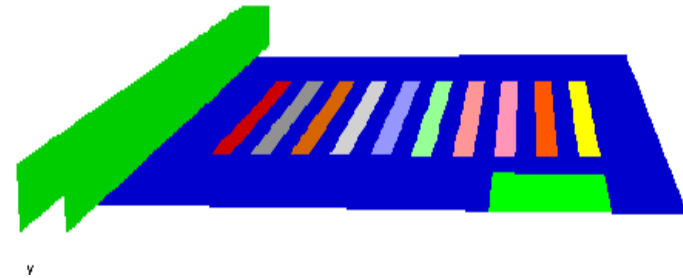
Écoulement forcé d'air dans un canal horizontal



plaque échangeuse

fluxmètres

Evolution du flux total dans le sens de l'écoulement en présence d'un obstacle de section $2 \times 2 \text{ cm}^2$



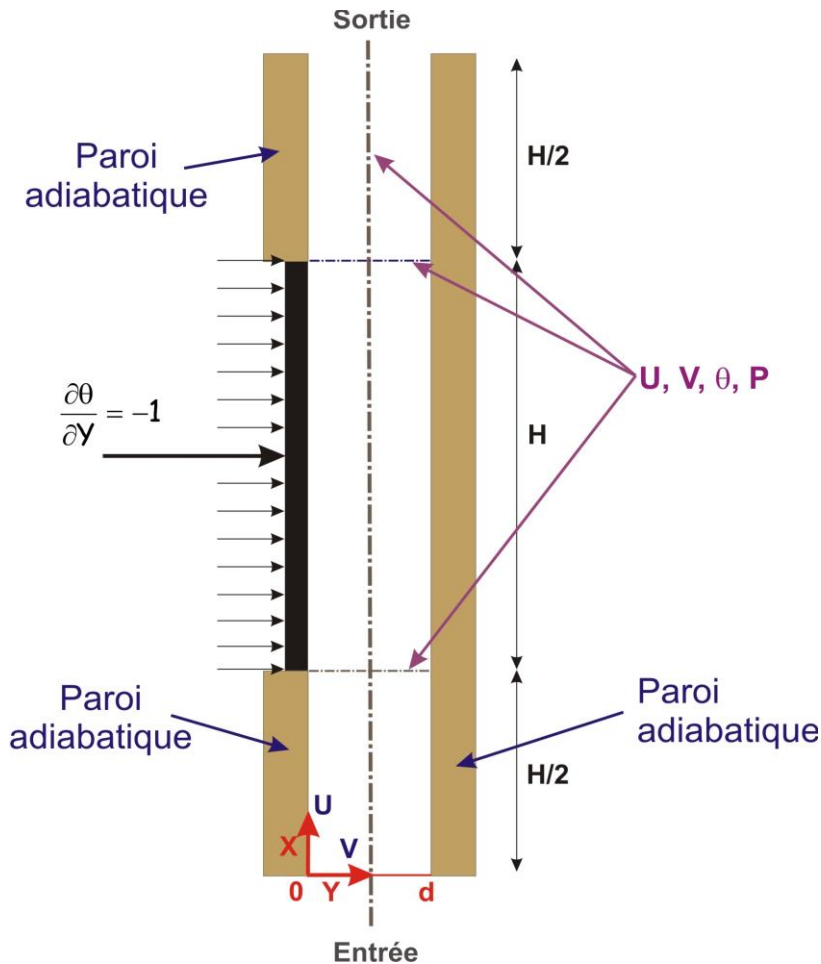
Mer 14, 2005
FLUENT 6.0 (3d, segregated, sfc)



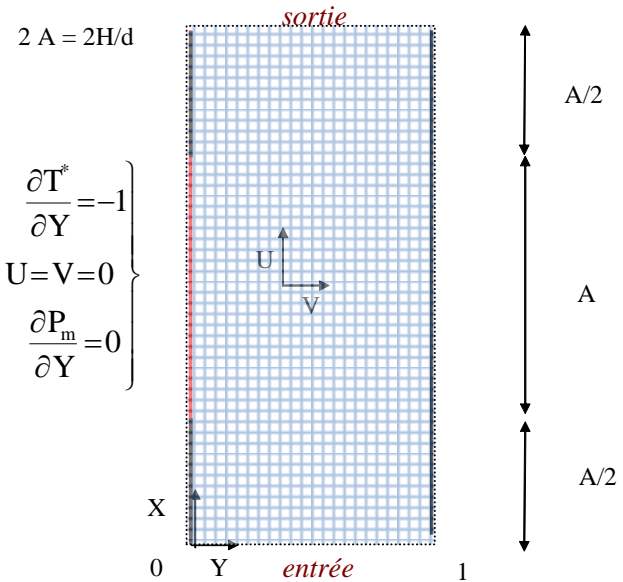
Canal chauffé asymétriquement à flux constant

Benchmark

$Pr = 0.71 ; Ra^* = 10^5, 10^7, A = 5$ avec $Ra^* = Ra/A$



$$\frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial V}{\partial X} = 0 \quad \frac{\partial T^*}{\partial X} = 0 \quad P_m = 0$$

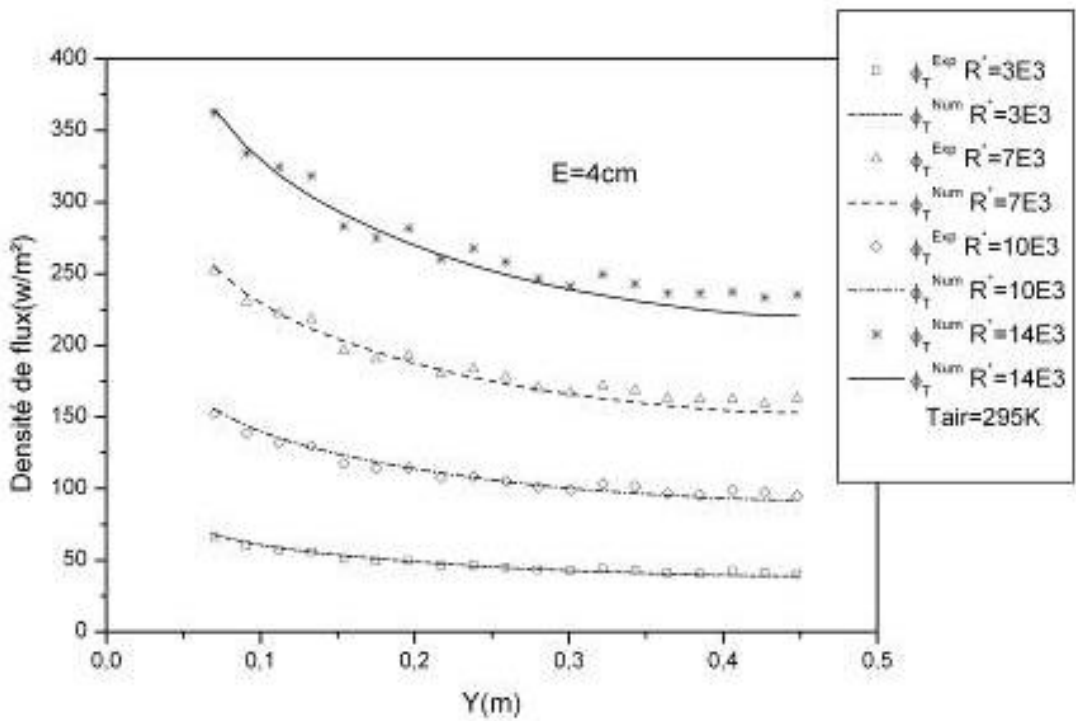


$$\frac{\partial U}{\partial X} = 0 \quad V = 0 \quad T^* = 0 \quad P_m = -0.5 G^2$$

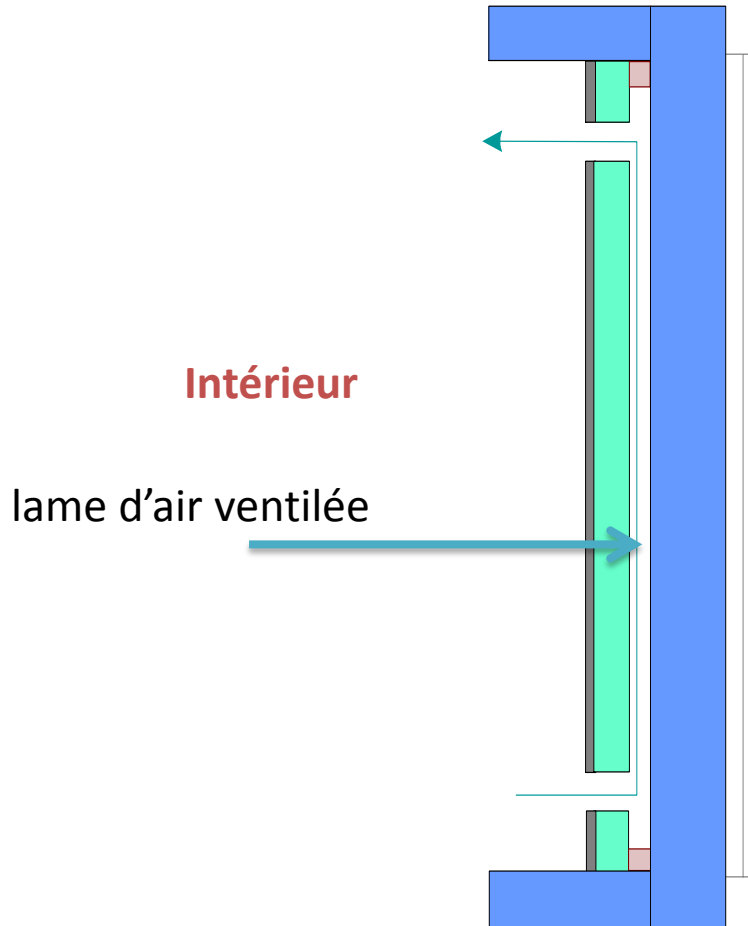
G : Débit massique

Résultats expérimentaux

Cas d'une paroi « isotherme »



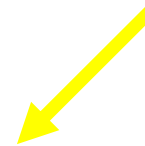
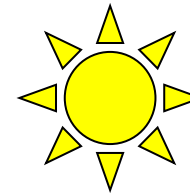
Etude d'un mur solaire composite



Intérieur

lame d'air ventilée

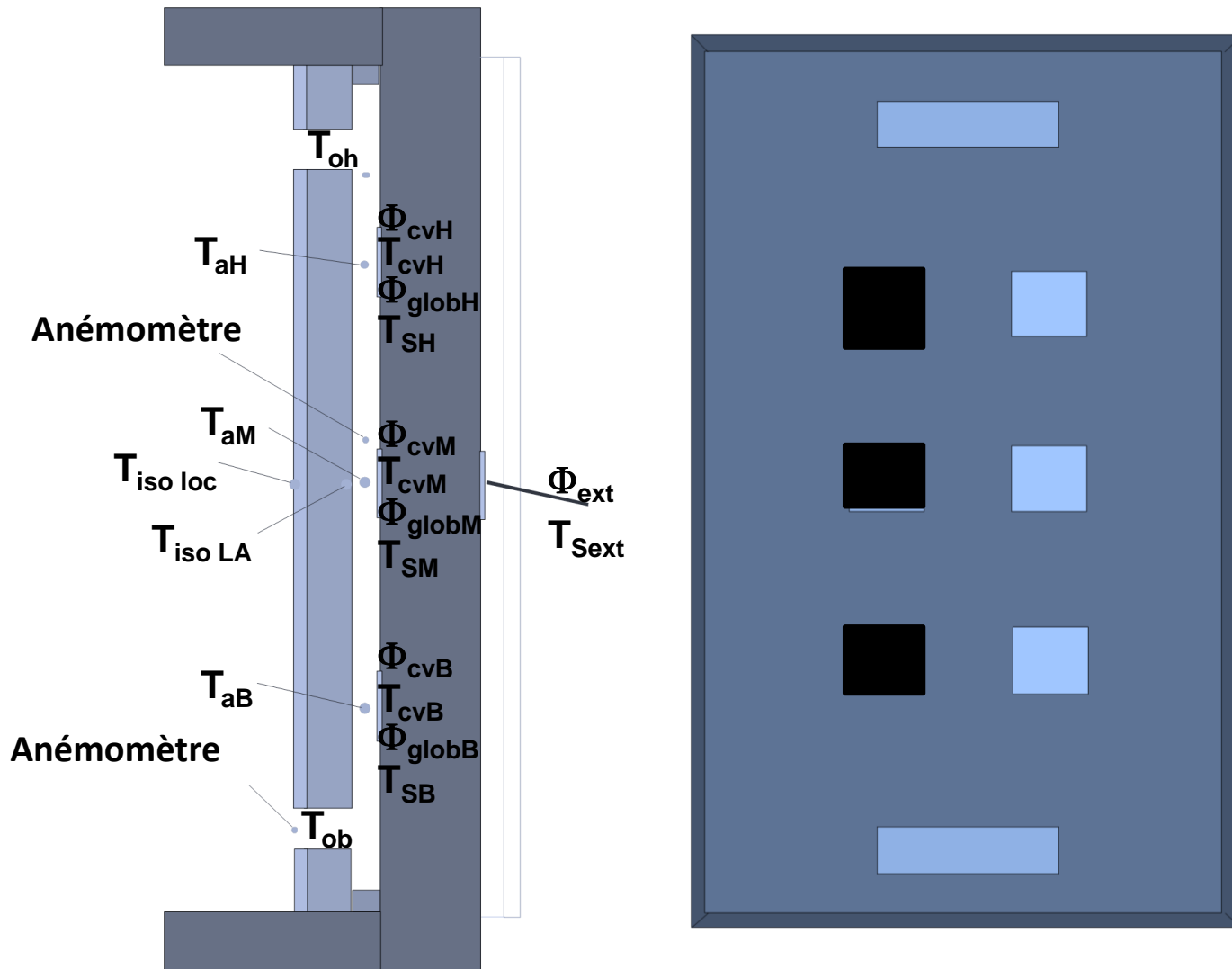
Extérieur



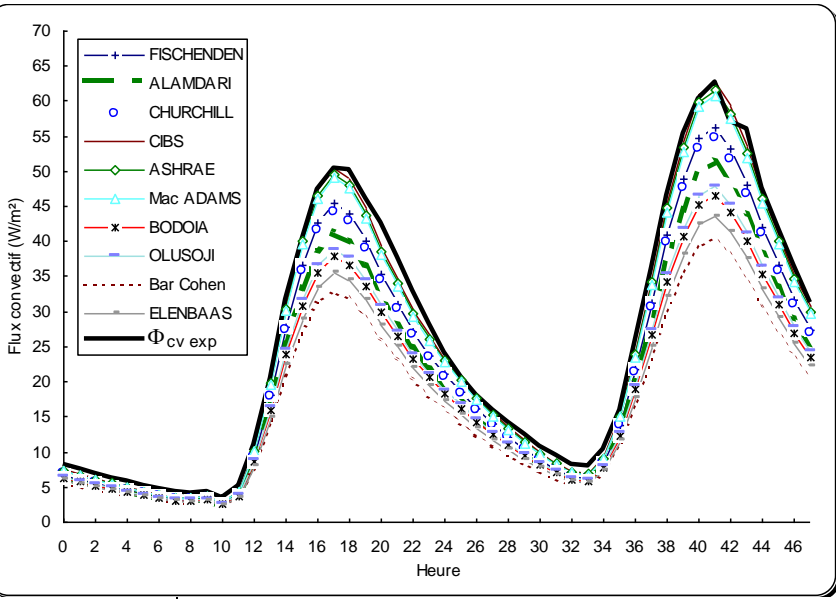
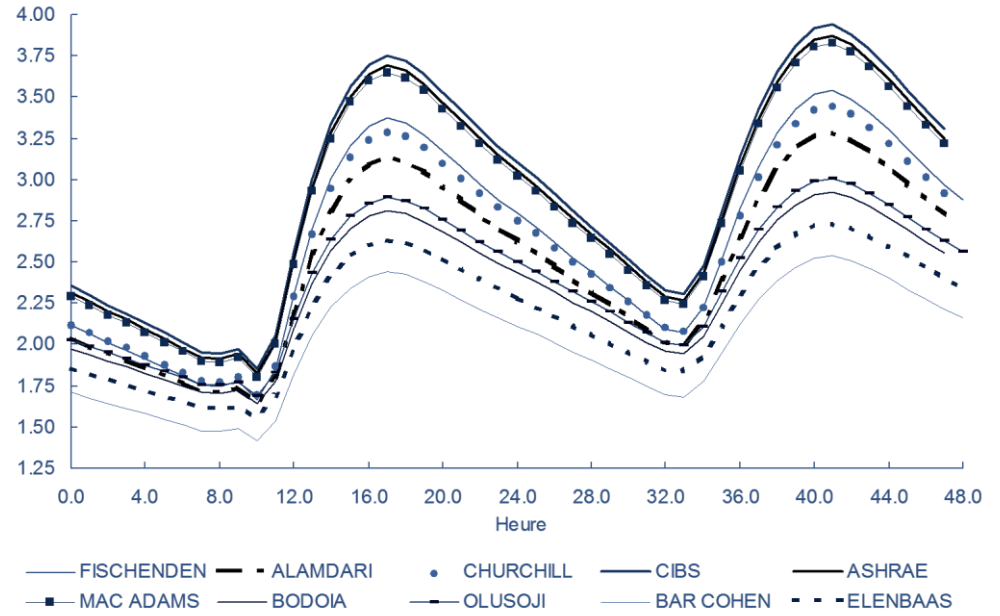
Premières études du
laboratoire dans les années 90
en collaboration avec le GENEC
du CEA Cadarache



Instrumentation du mur



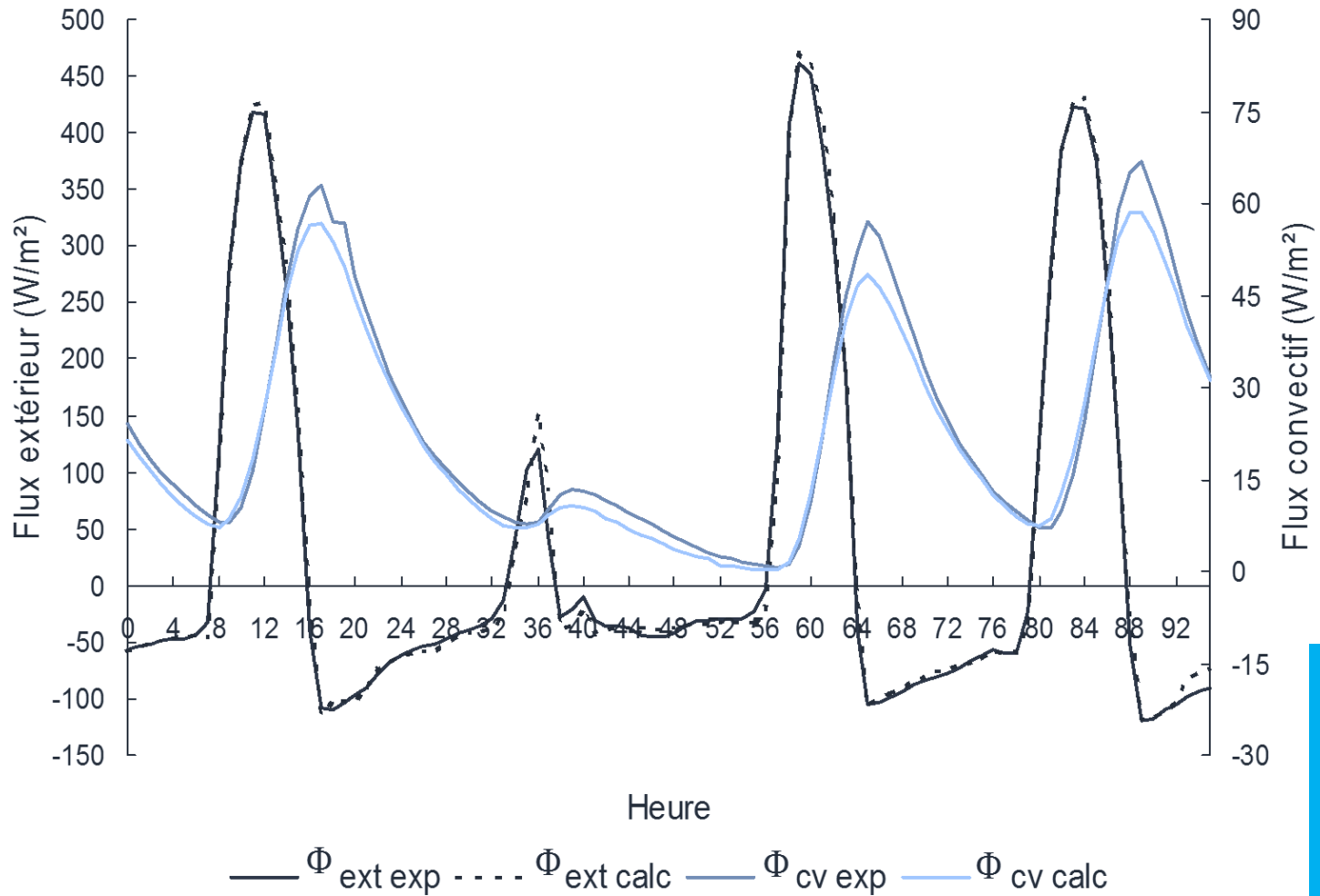
Coefficients d'échange convectif dans la lame d'air



Variations temporelles
 de la densité de flux
 transmise par la paroi
 stockeuse à la lame
 d'air ventilée



Résultats: Elaboration d'un modèle permettant différentes simulations et l'optimisation des performances du mur solaire

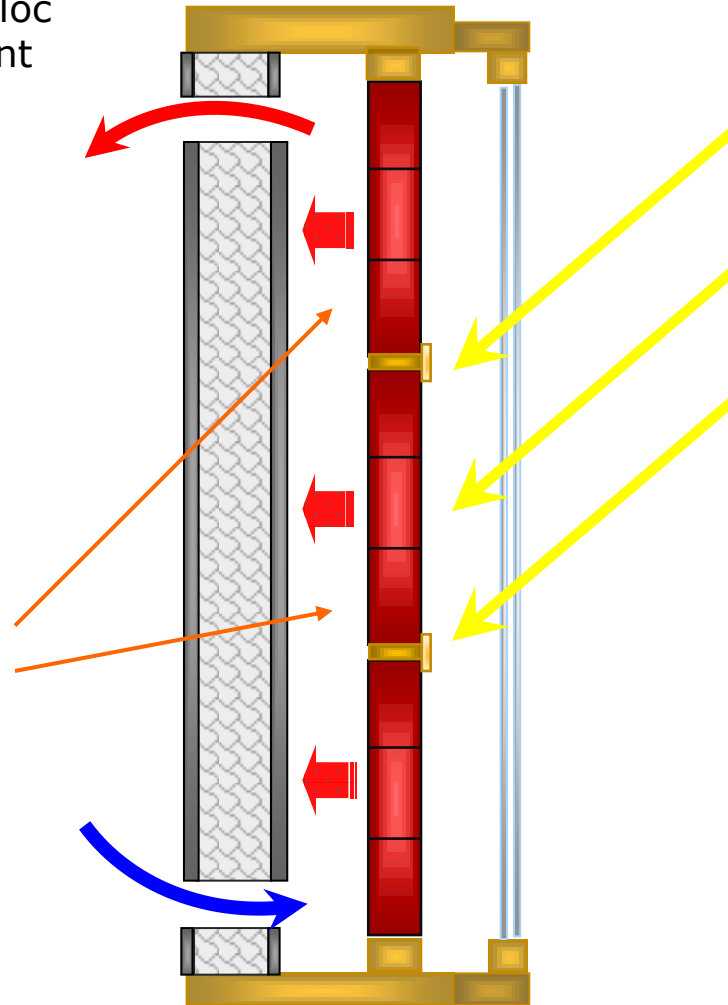


(Petite parenthèse)

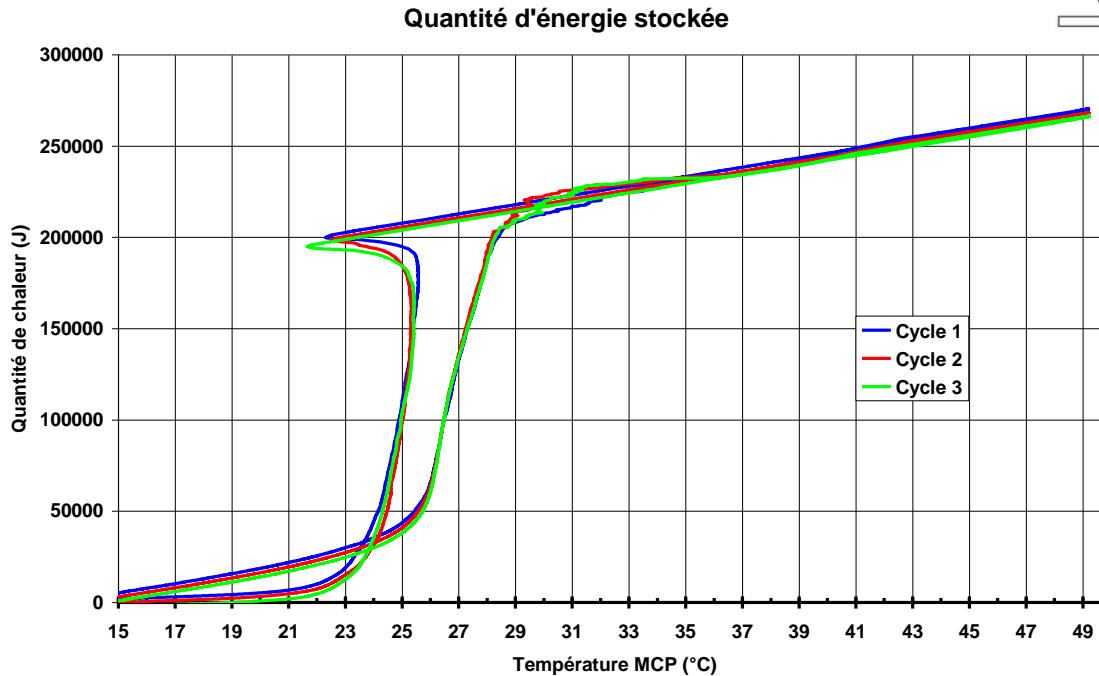
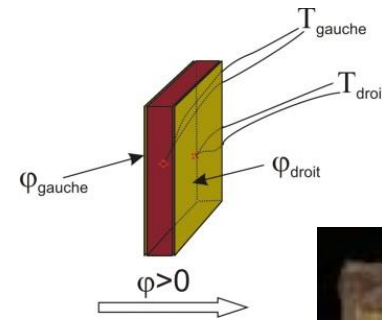
Intégration de Matériaux à changement de phase

La conception d'un composant monobloc impose la réduction de l'encombrement et du poids du mur...

Une piste ... les MCP



Caractérisation des matériaux à changement de phase



⇒ Chaleur latente

Des problèmes..

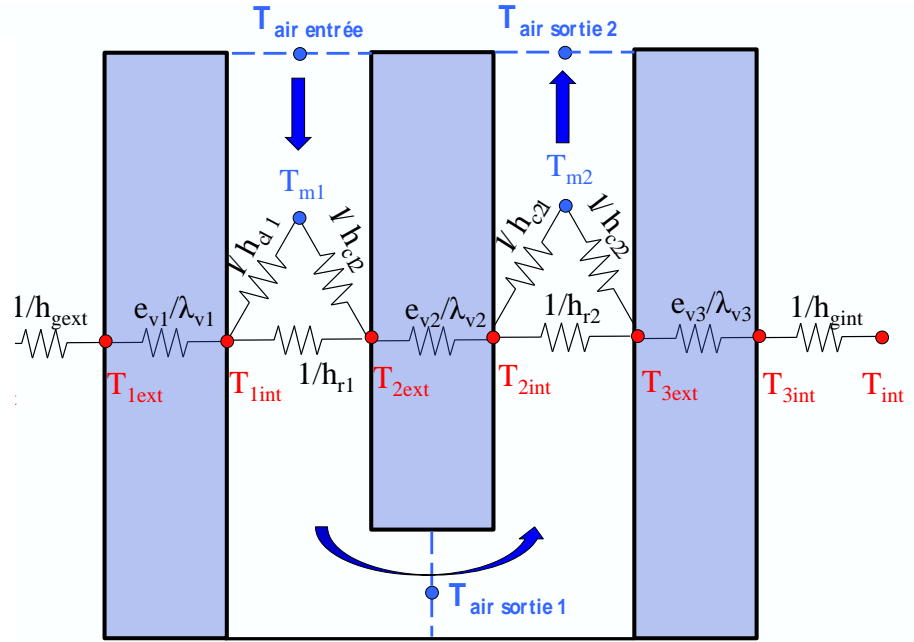
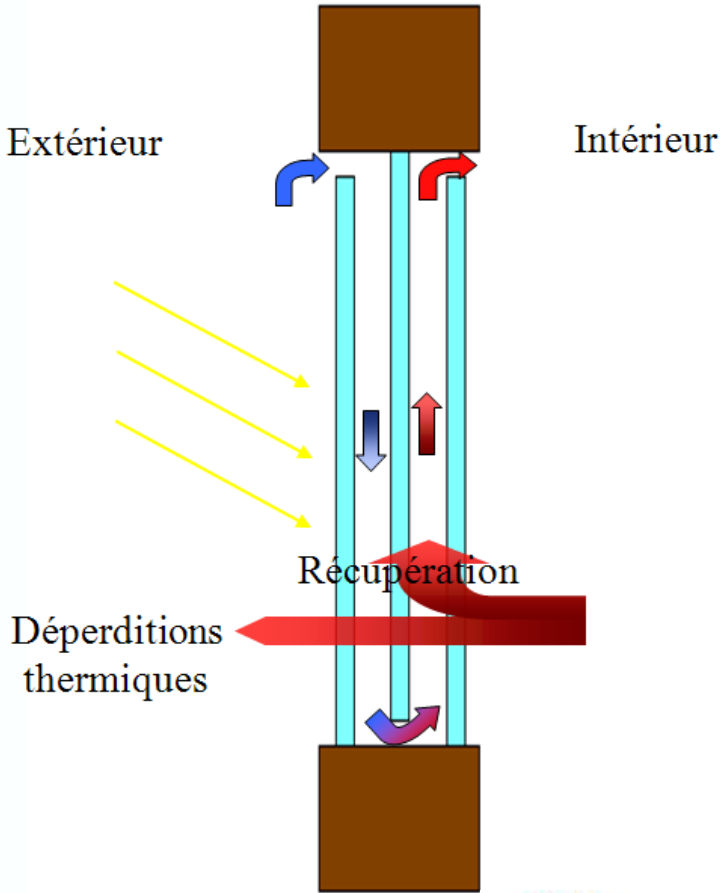
De surfusion, de ségrégation, de dégradation des performances en cas de surchauffe, de modélisation du comportement, etc..... en cours le projet ANR StockE - MICMCP

Réalisations in-situ à Croisilles (62)



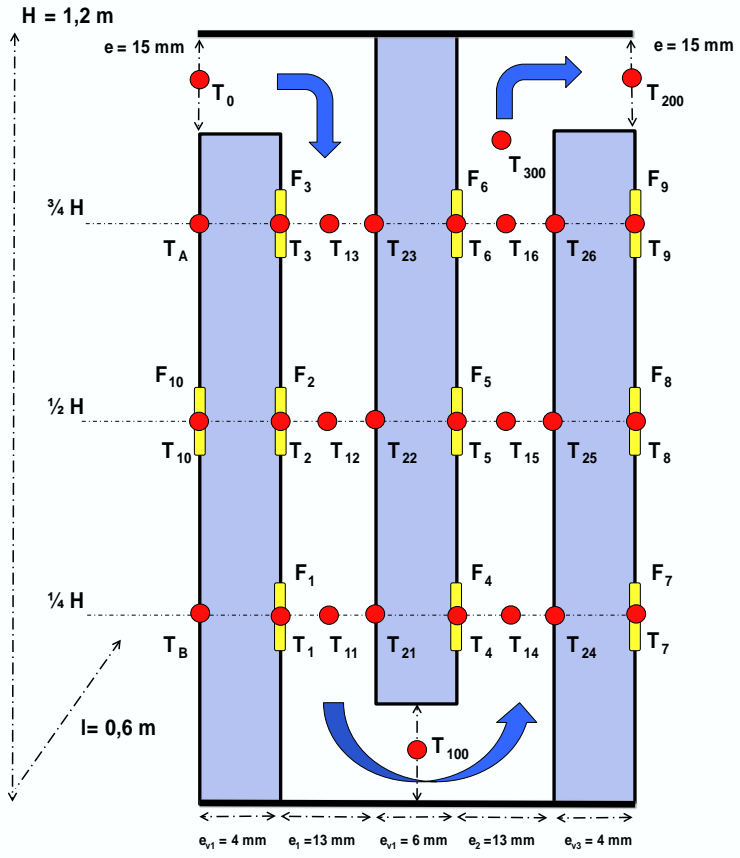
Modélisation d'une fenêtre pariéto-dynamique (Paziaud®)

Approche basée sur une modèle analogique pour une connexion future à un outil de simulation dynamique de bâtiment



Problème: les coefficients h_{cij} ne sont pas connus,
Différentes approches analytiques et en CFD ont permis d'avancer sur le problème

Mise en place d'une expérimentation: fenêtre pariéto-dynamique (Paziaud)

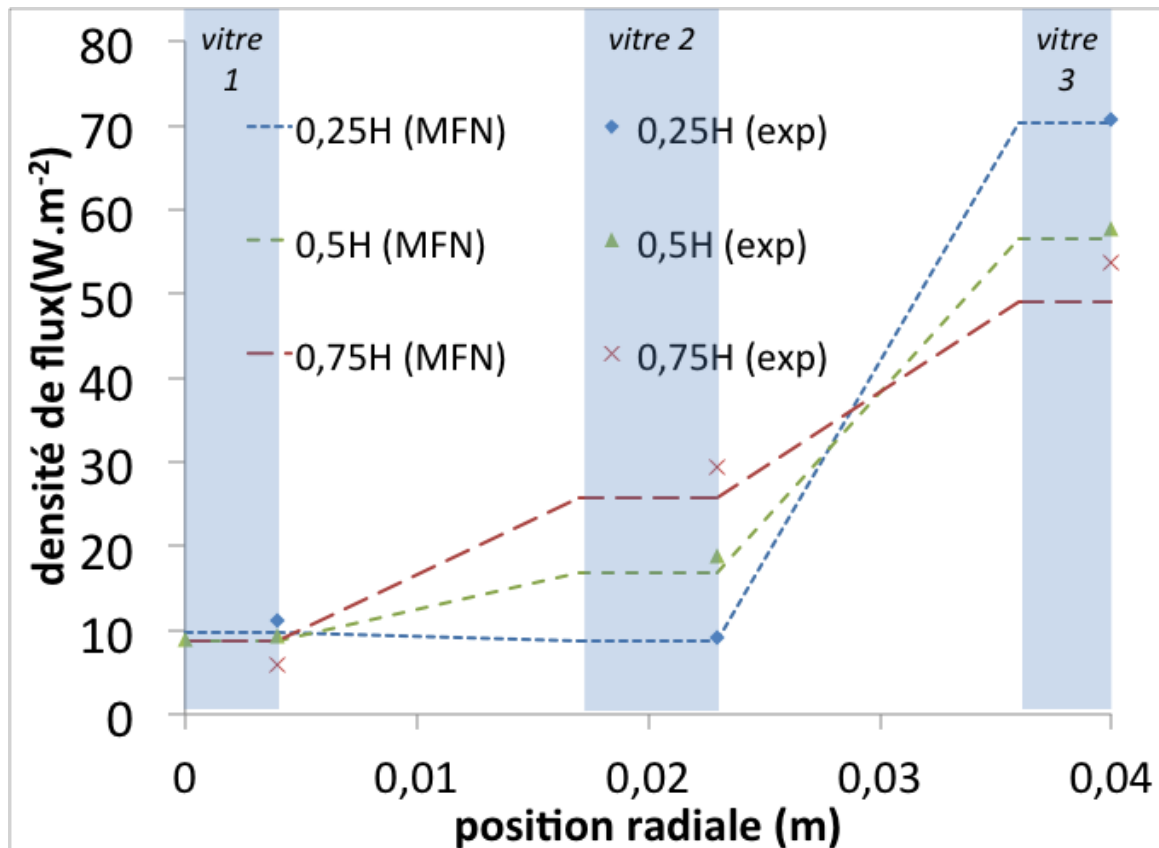


- parois faiblement émissives $\epsilon = 0,17$
- fluxmètres
- thermocouples
- sens de l'écoulement



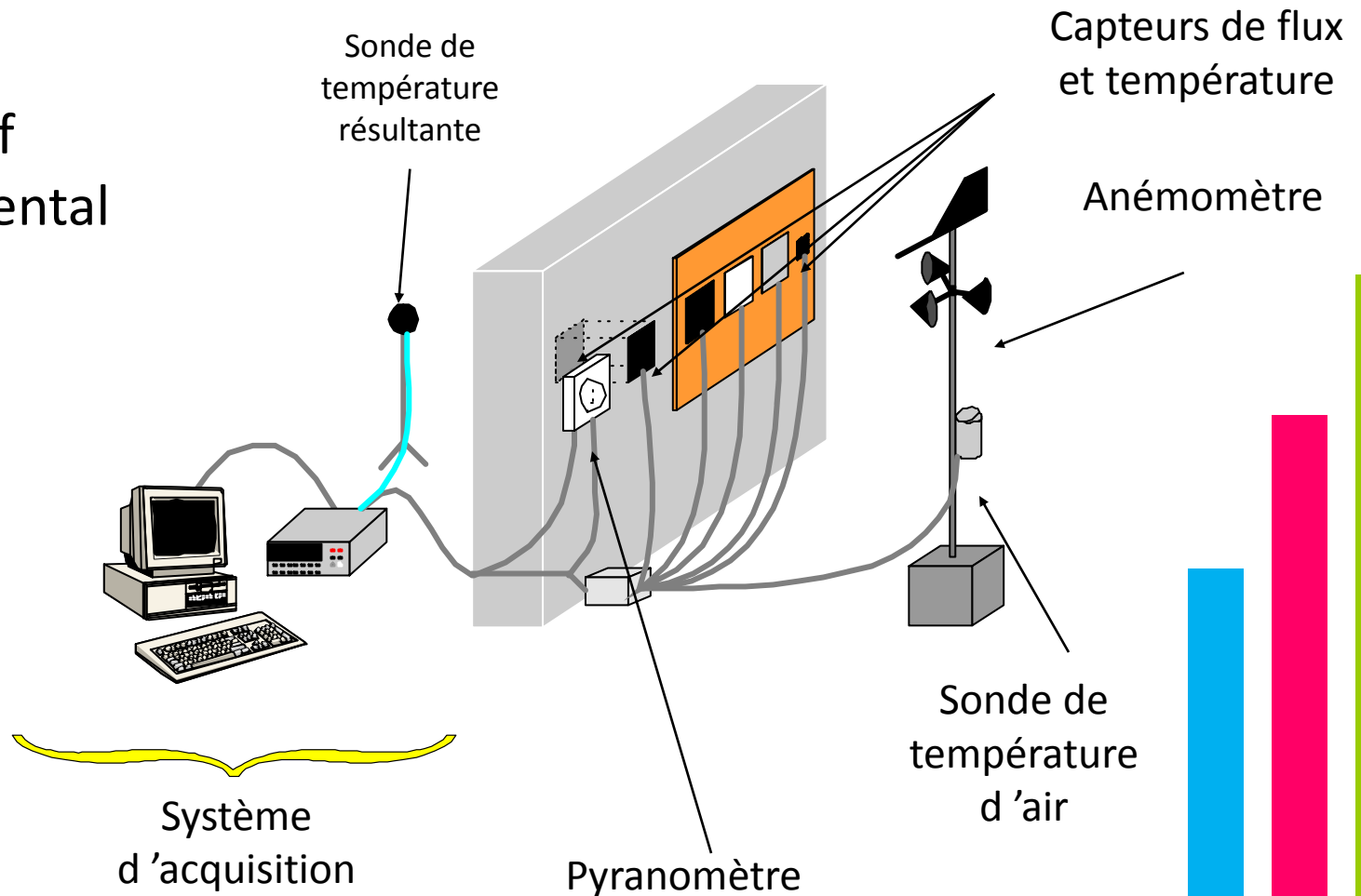
Les mesures fluxmétriques permettent la mesure directe du flux échangé en bon accord avec les résultats de la simulation.

Les mesure de températures sur les deux faces des lames de verre sont inexploitables pour l'évaluation des valeurs des flux thermiques

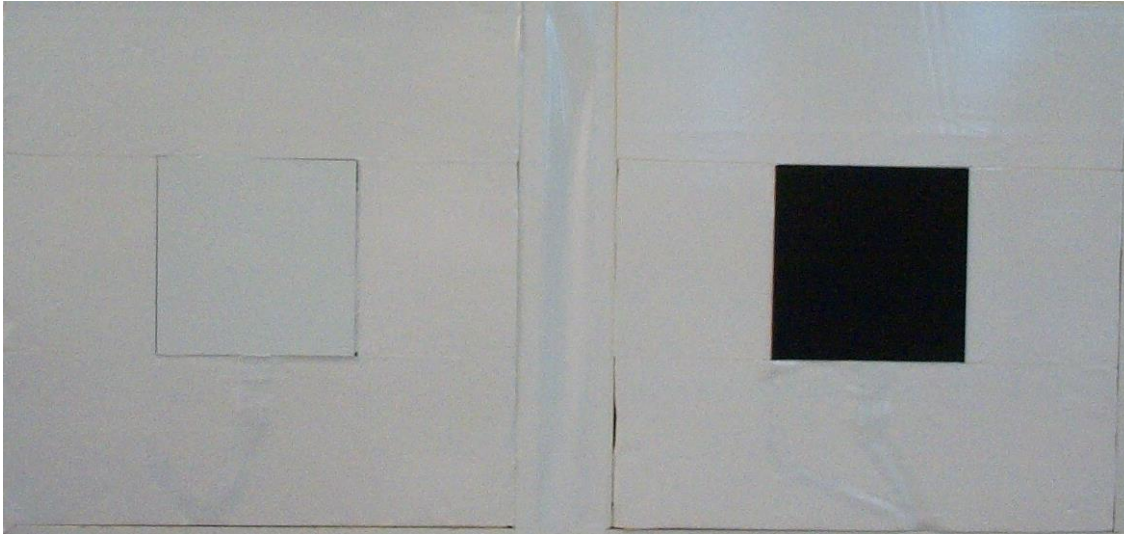


Séparation des échanges à la surface extérieure d'une paroi de bâtiment

Dispositif
expérimental



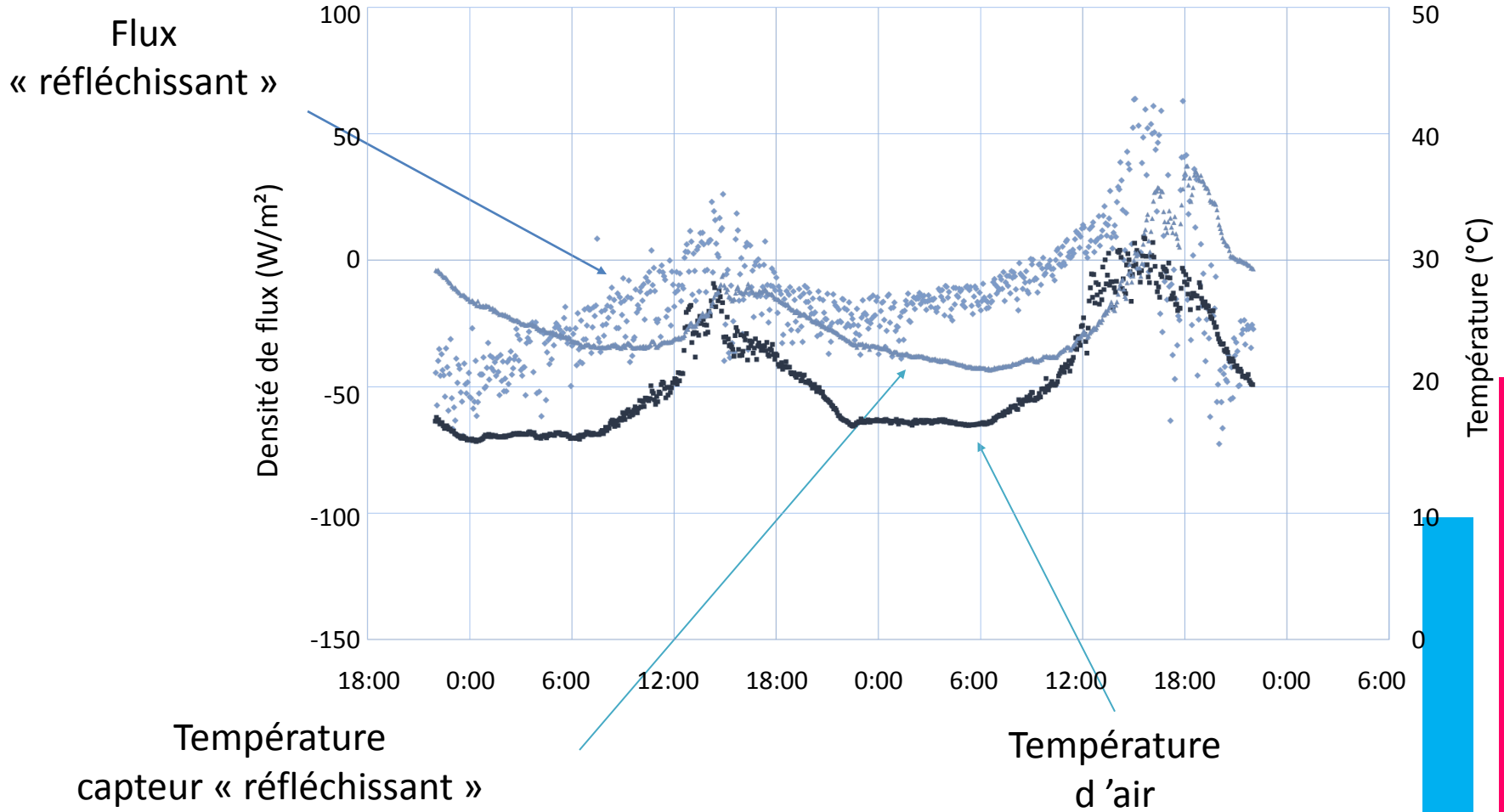
Séparation des échanges à la surface extérieure d'une paroi de bâtiment



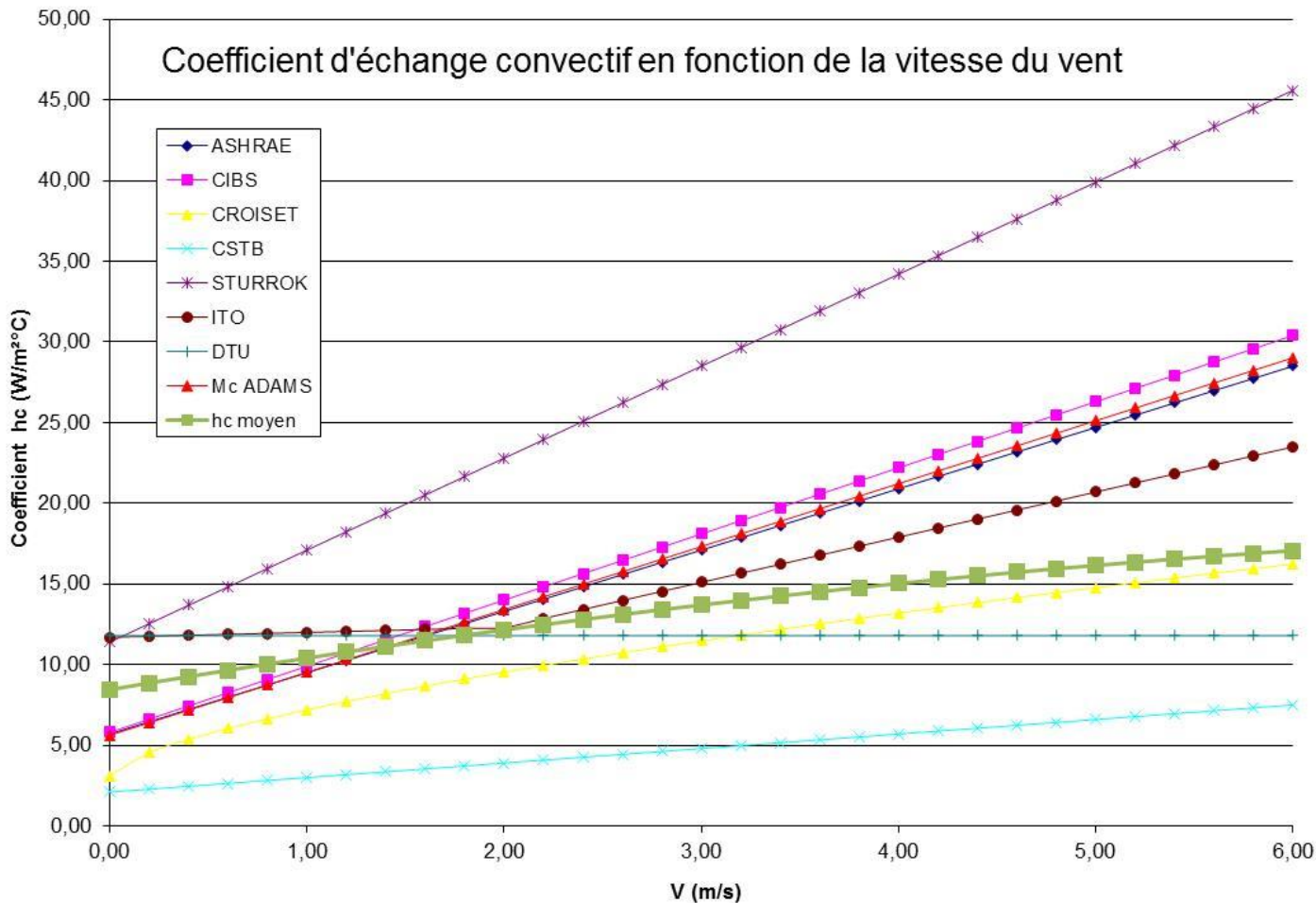
$$h_c = \frac{\phi_{total} - \phi_{IR} + \alpha_S G}{(T_S - T_{air})}$$

Evaluation du coefficient d'échange convectif local
en fonction de la vitesse du vent

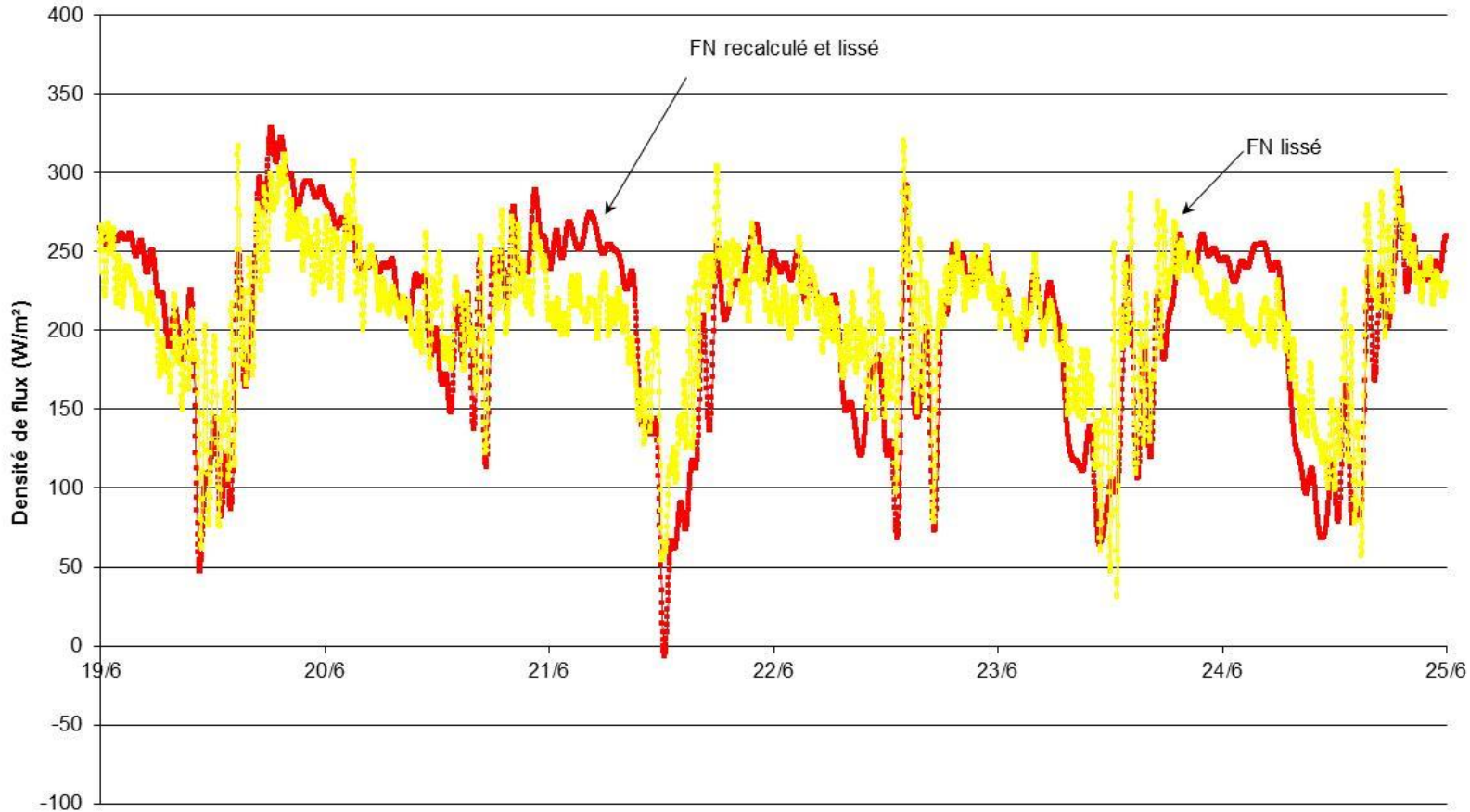
Mesures des flux et températures dans le cas d'un capteur fluxmétrique « réfléchissant »



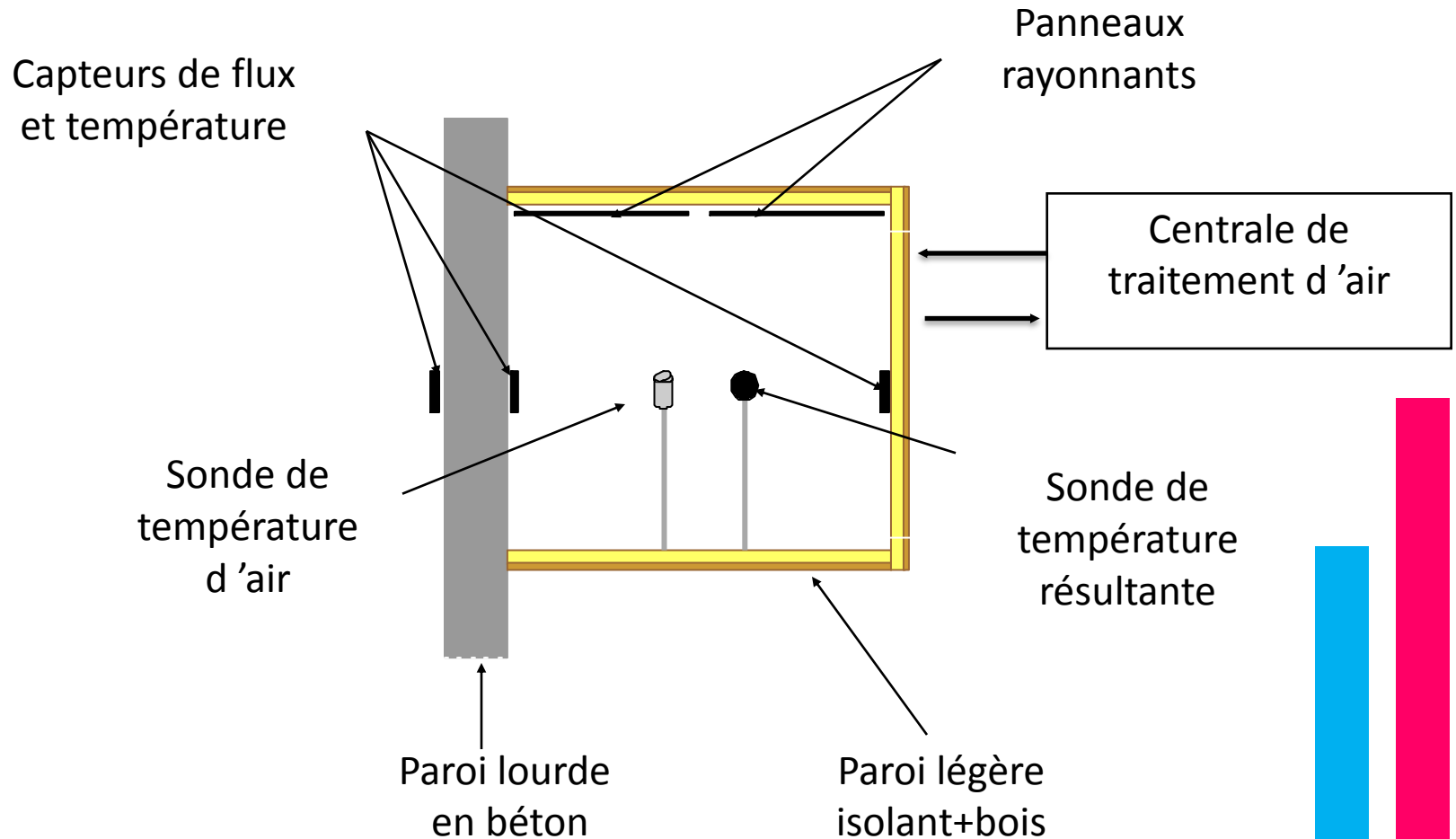
Résultat, après filtrage des données mesurées...élaboration d'une corrélation pour la détermination du coefficient d'échange convectif local



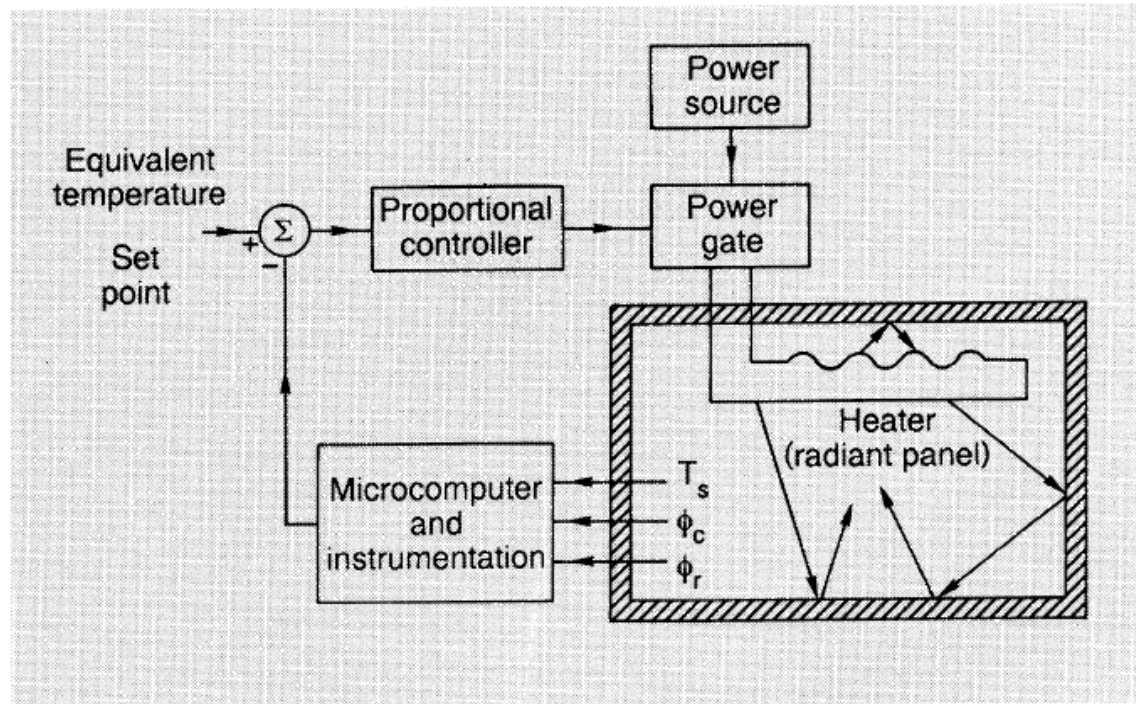
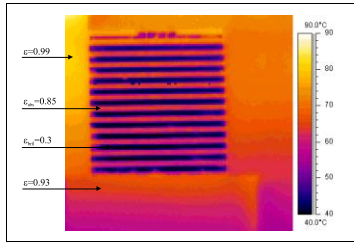
Flux mesuré, comparé au flux « noir » reconstitué à partir de la corrélation, des températures et des paramètres météorologiques



Maîtrise du confort thermique basée sur le contrôle de la température résultante sèche



- Séparation et contrôle d'apports convectifs et/ou radiatifs
- Gestion d'ambiances de Confort (prise en compte des sources radiatives équipements ou effet d'apports solaires)



Température « résultante sèche »

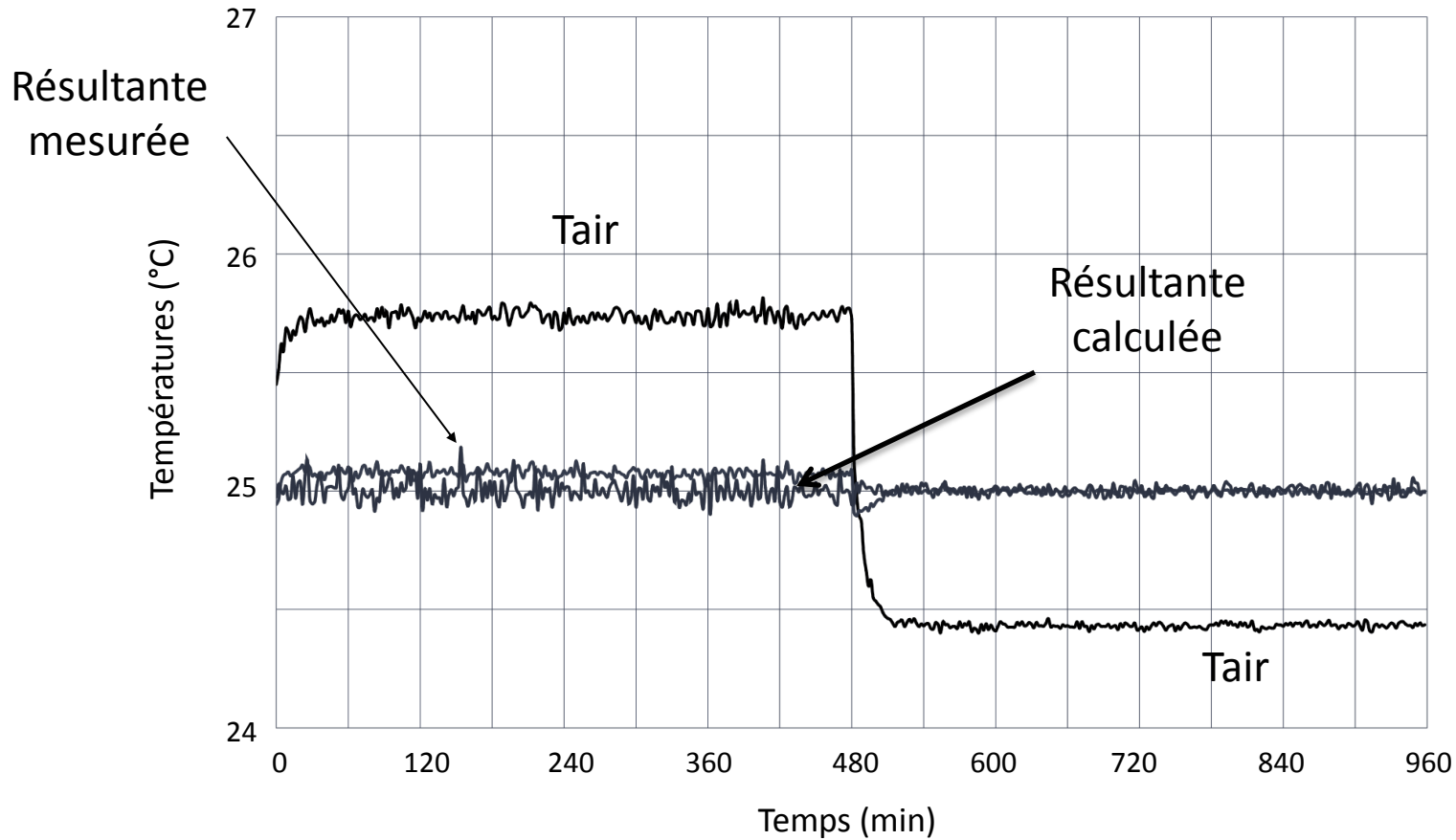
$$T_{rs} = \frac{h_c \cdot T_{air} + h_r \cdot T_{rm}}{h_c + h_r}$$



$$T_{rs} = \frac{1}{2} \left(T_{air} + \left(Fcs \cdot T_s + C \cdot (1 - Fcs) \cdot \left(T_s + \frac{\varphi_r}{h_r} \right) \right) \right)$$

- ✦ Fcs facteur de forme avec un facteur correctif géométrique C (constant, fonction de la position des capteurs)
- ✦ *Flux radiatif* mesuré directement ou « différence » entre *Flux « noir »* et *Flux « réfléchissant »*

Résultats: Compensation d'une perturbation convective (chute de la température d'air) par des sources radiatives (l'inverse est aussi possible)

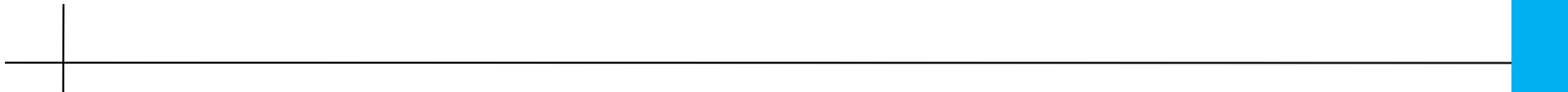


Conclusions:

Le capteur de flux dans des situations variées peut permettre la détermination de coefficients d'échange et de corrélations.

Dans ces conditions, la mesure directe du flux permet même de s'affranchir de ces coefficients pas toujours satisfaisants.

Les contrastes des propriétés radiatives des surfaces (émissivités et/ou de coefficients d'absorption) permettent de mettre en œuvre des méthodes de séparation des échanges (*selon les conditions d'expérimentation*).





Merci pour votre attention



Confort thermique

Objectifs:

- Gestion d'ambiances de Confort (sources radiatives)
- Séparation et contrôle d'apports convectifs et radiatifs

