

Journée Thématique SFT

- Méthodes inverses et thermique du bâtiment : réduction et identification de modèle

-

Identification des coefficients d'échanges thermiques de surface en extérieur (Radiatif et convectif) sur des données expérimentales acquises par bilan énergétique

Maxime DOYA (Tipee), Emmanuel BOZONNET (LaSIE)



TIPEE

<https://www.plateforme-tipee.com/>

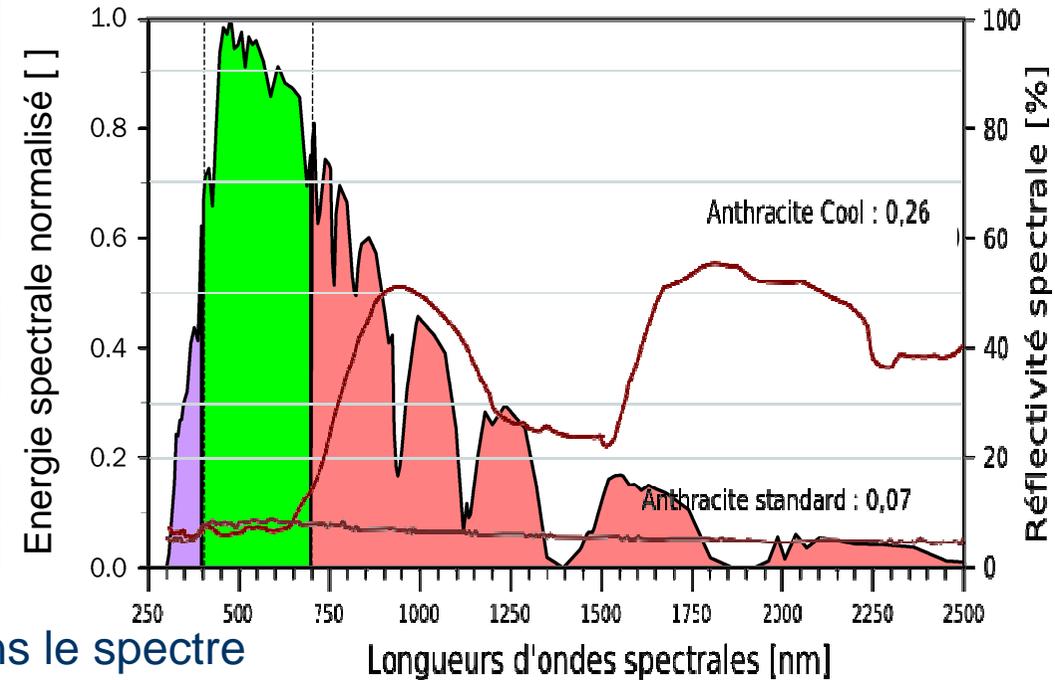


<http://lasie.univ-larochelle.fr/>

Méthodes inverses et thermique du bâtiment : réduction et identification de modèle

Distribution de l'énergie solaire

- 5% ultraviolets (300 – 400nm)
- 43% visibles (400 – 700nm)
- 52% proches IR (700 – 2500nm)



CONTEXTE : Impact de revêtements réfléchissants dans le spectre solaire sur les consommations énergétiques et sur l'îlot de chaleur urbain

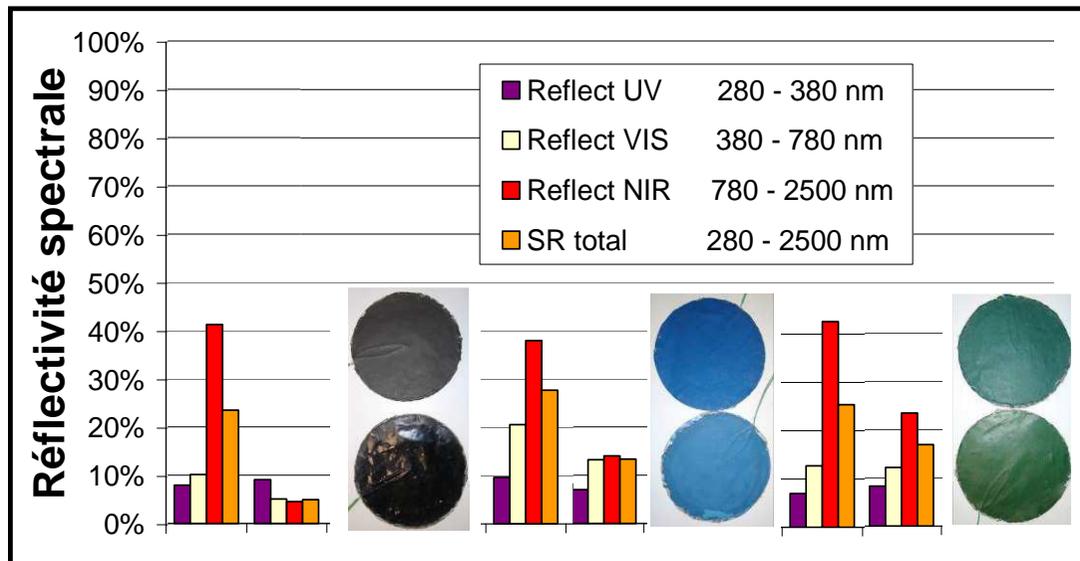
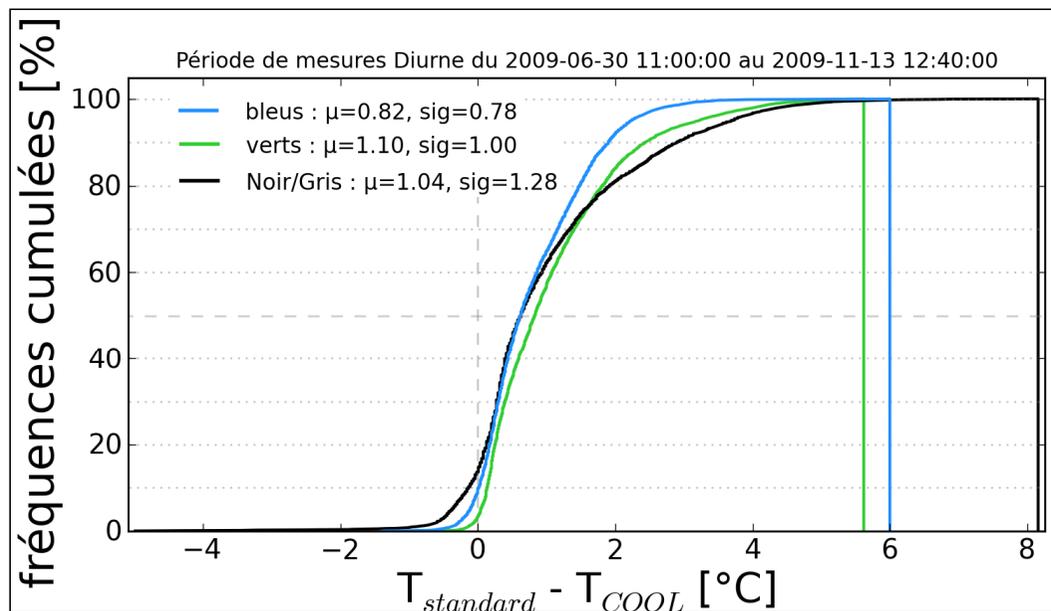
- Efficacité prouvée pour une utilisation en toiture
- Efficacité réduite pour les constructions hautes des centres urbains denses
- Stratégie de rénovation énergétique à moindre coût (travaux et de matière première)

Caractérisation du bilan thermique des peintures à la surface de disques élémentaires

- 1 - Caractérisation des propriétés radiatives en laboratoire
- 2 - Mesures des composantes
du bilan énergétique de surface
in situ
- 3 - Observation de l'évolution
des performances thermiques dans le temps
- 4 - **Identification numérique des paramètres d'échanges thermiques**



Couleurs	$\Delta\rho_{SOL}$	$\Delta\varepsilon_{GLO}$
Noir	+0.18	-0.03
Bleu	+0.12	-0.03
Vert	+0.17	0.0



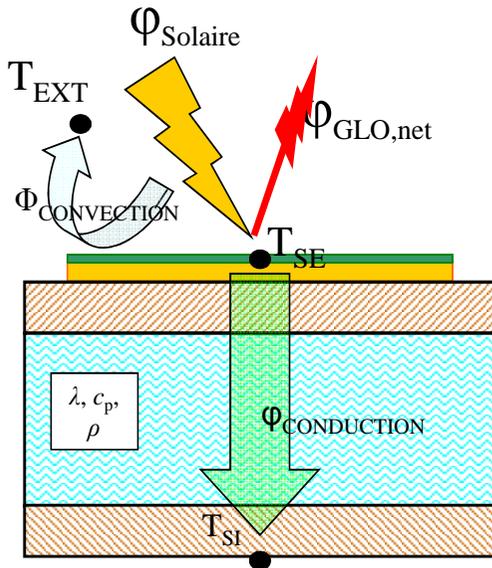
Pendant la période diurne (>7000 mesures) les produits colorés cool sont :

- Plus frais 80% du temps (0-2°C)
- Plus frais 19% du temps (2-5°C)
- Plus frais 1% du temps (5-8°C)

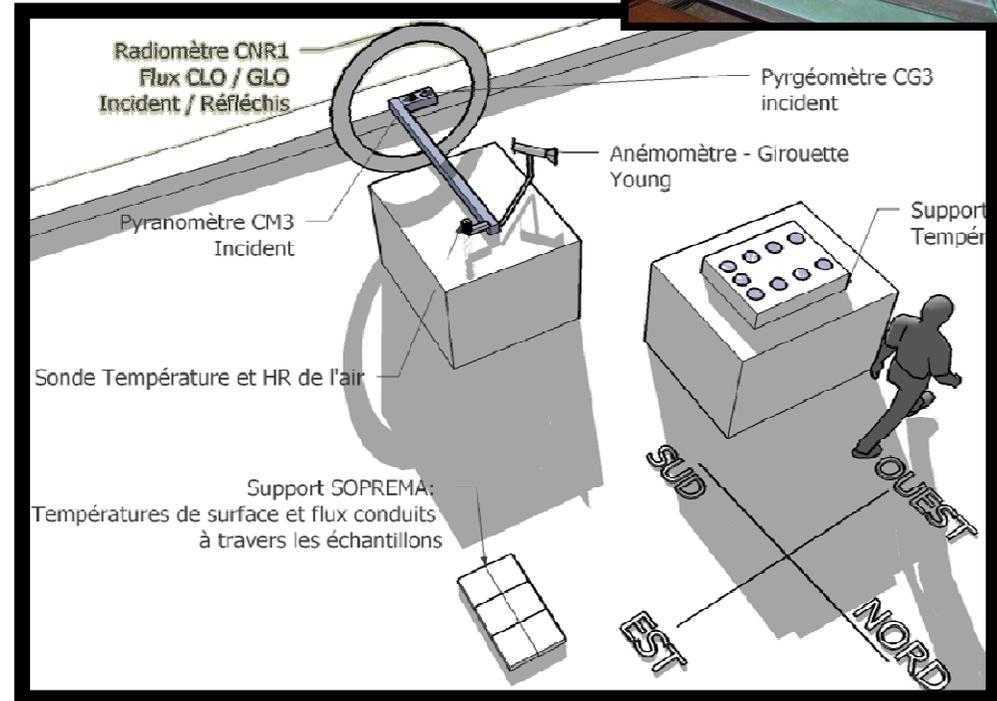
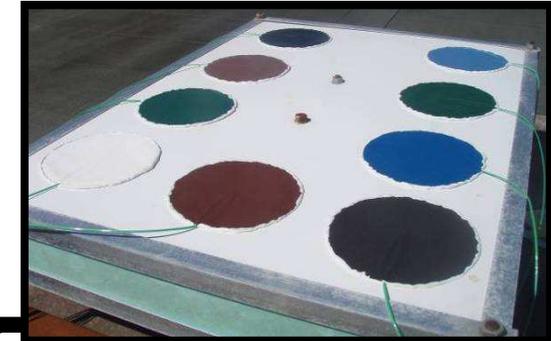
Conception d'un banc d'expérience : bilan thermique à la surface d'échantillons de peintures

$$(1 - \rho_{CLO}) \cdot E_{solaire} + \varepsilon_{GLO} \cdot \sigma (T_{ciel}^4 - T_S^4) = h_c (T_S - T_a) + \varphi_{COND}$$

- 10 mesures de températures de surface simultanées
- Mesures des caractéristiques de l'air
- Mesures des flux radiatifs incidents solaire et GLO



02/05/2018



Journée Thématique SFT

Détermination du coefficient de convection sur la période nocturne

À partir de l'équation de bilan thermique de surface pour chaque disque i :

$$\varepsilon_{GLO,i} \cdot (E_{atm} - \sigma \cdot T_{Si}^4) - h_C \cdot (T_{Si} - T_{air}) = \varphi_{cd,i}$$

soit

$$h_C = \frac{\varphi_{cd,i} + \varepsilon_{GLO,i} \cdot (\sigma \cdot T_{S,i}^4 - E_{atm})}{(T_{air} - T_{S,i})}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{Y_{fit}}$

On détermine:

- le coefficient de convection h_C

$$\text{Avec, } h_C = A_h \times (V_{vent})^{m_h} + B_h$$

- B_h , coefficient lié à la convection naturelle issu d'une corrélation

- A_h , coefficient lié à la convection forcée

Par minimisation de la fonction suivante pour ~3500 mesures:

$$résidu = \sum_i \left(\sum_t \left((A_h \cdot V_{vent}^{m_h}(t) + B_h - Y_{fit}(t))^2 \right) \right)$$

METHODES DE MINIMISATION UTILISEES

fmin :

algorithme simplexe de Nelder-Mead

Ou

fmin | bfgs | b :

méthode de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (quasi-Newton)

Expression de h_c :

+

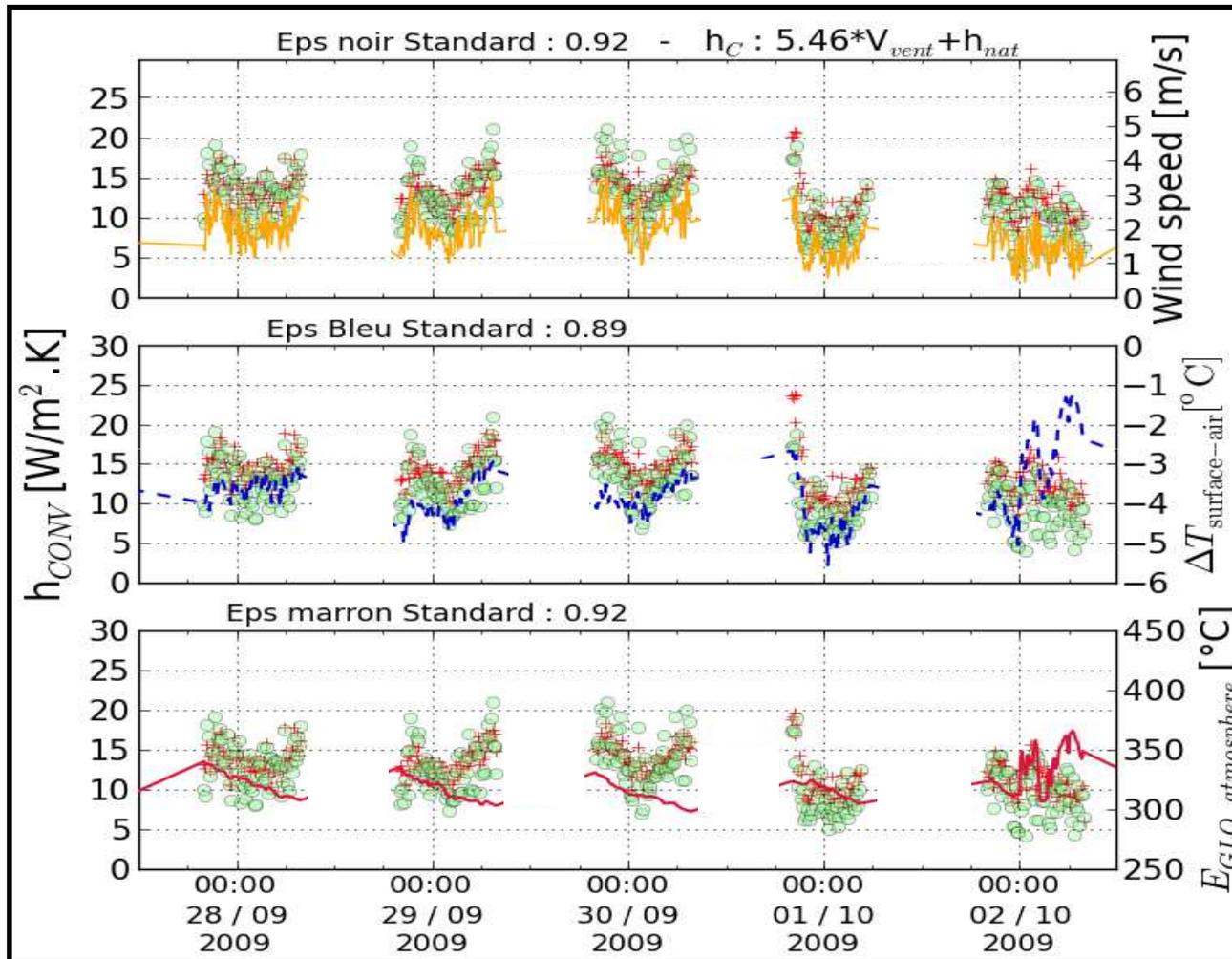
- À partir des mesures expérimentales (bilan)

$$\frac{\phi_{cd,i} + \epsilon_{GLO,i} \cdot (\sigma \cdot T_{S,i}^4 - E_{atm})}{(T_{S,i} - T_{air})}$$

○

- À partir du modèle empirique

$$A_h \times (V_{vent}) + (B_h)$$



Ecart type moyen sur h_c :
 (Valeur résidu / nombre de point ajustés)^{1/2} = +/- 3
 W/m².K

Détermination des absorptivités solaires effectives sur une longue période

À partir de l'équation de bilan thermique de surface pour chaque disque i :

$$(\alpha_i) \cdot E_{sol} + \varepsilon_{GLO,i} \cdot (E_{atm} - \sigma \cdot T_{Si}^4) - h_C \cdot (T_{Si} - T_{air}) = \varphi_{cd,i}$$

soit

$$\underbrace{\alpha_i \cdot \frac{E_{sol}}{(T_{S,i} - T_{air})} - h_C}_{\text{Loi de comportement}} = \underbrace{\frac{\varphi_{cd,i} + \varepsilon_{GLO,i} \cdot (\sigma \cdot T_{S,i}^4 - E_{atm})}{(T_{S,i} - T_{air})}}_{Y_{fit}}$$

On détermine :

- le coefficient de convection h_C
- les absorptivités solaires α_i

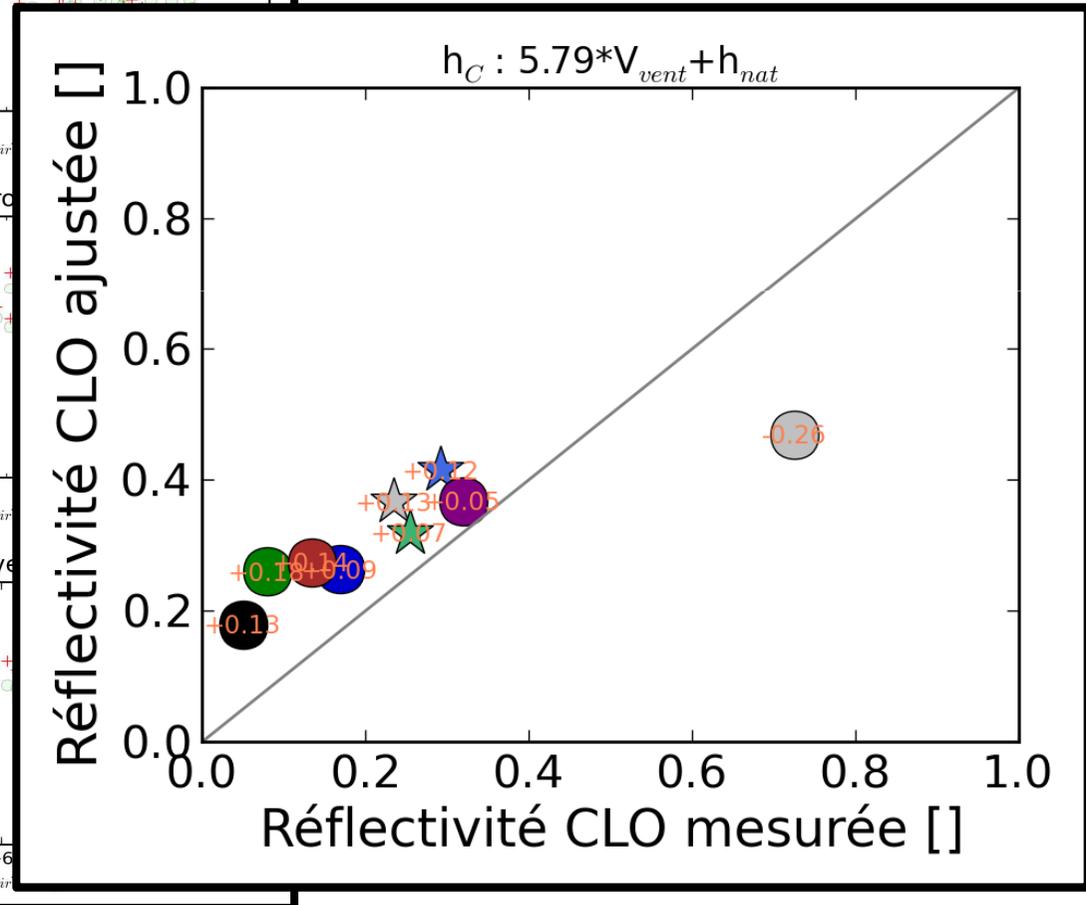
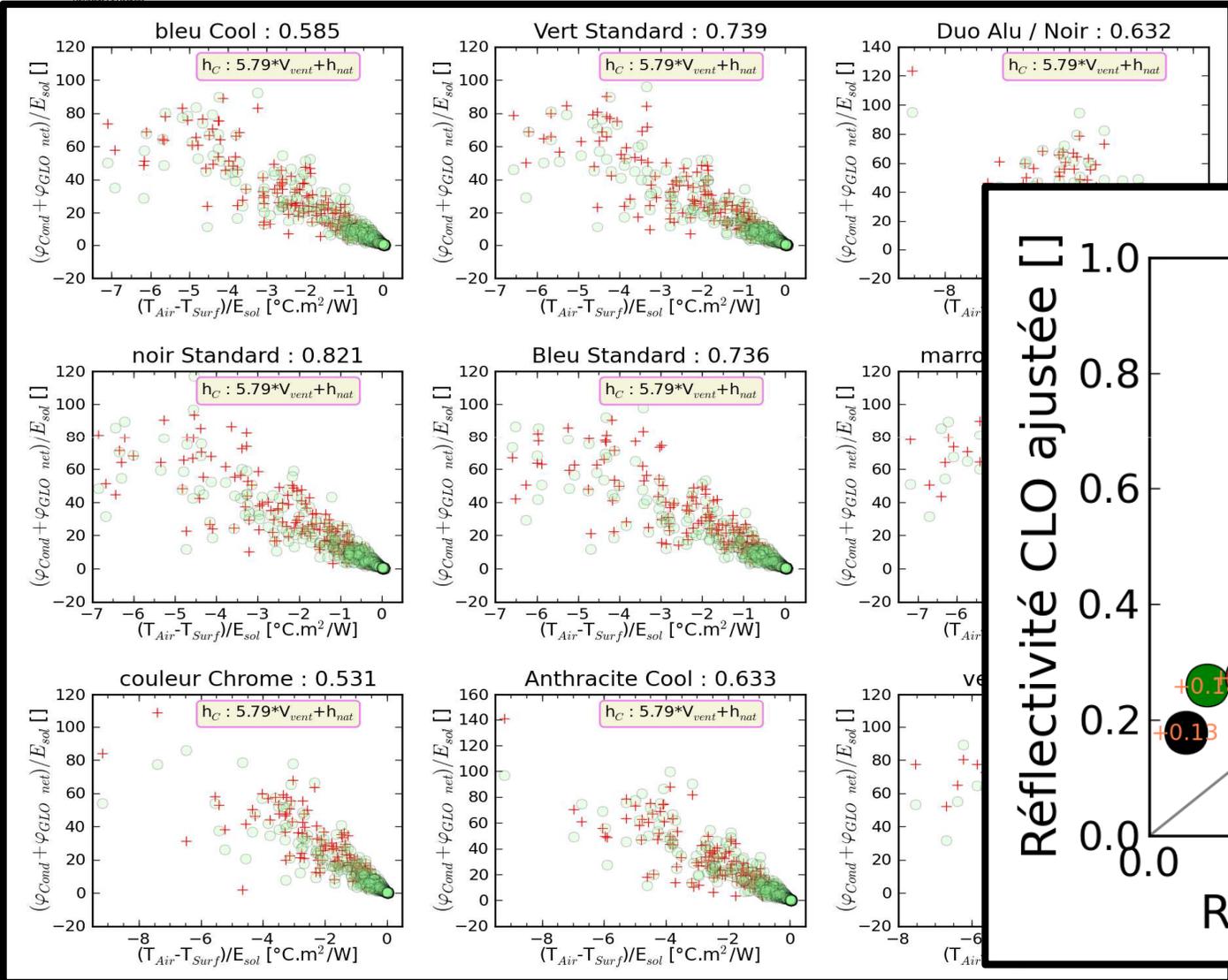
Avec, $h_C = A_h \times (V_{vent})^{m_h} + B_h$ Où,

- B_h , coefficient lié à la convection naturelle
- A_h , coefficient lié à la convection forcée

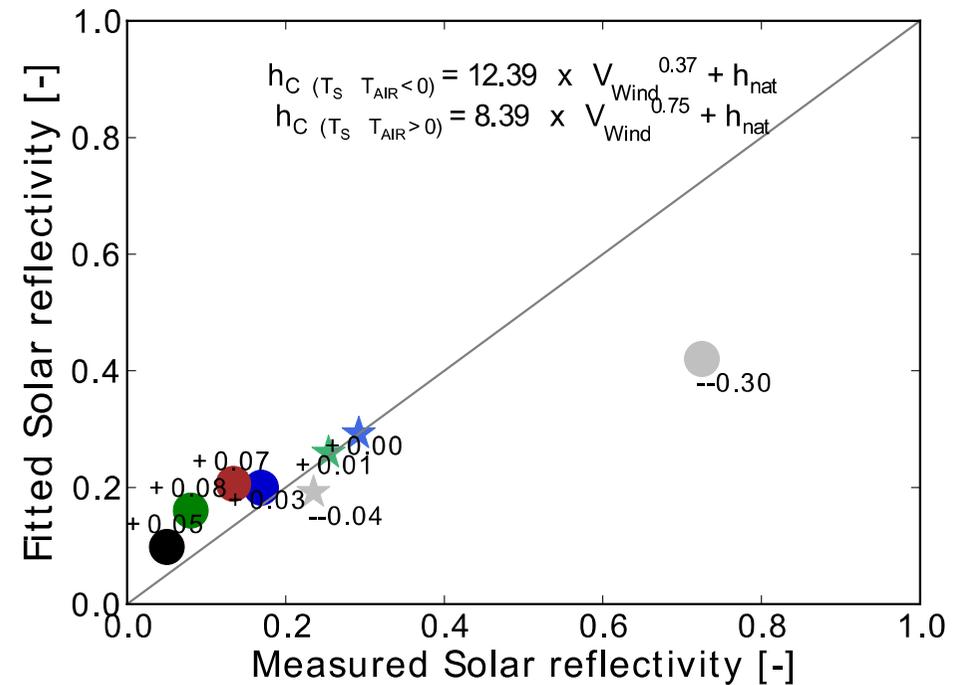
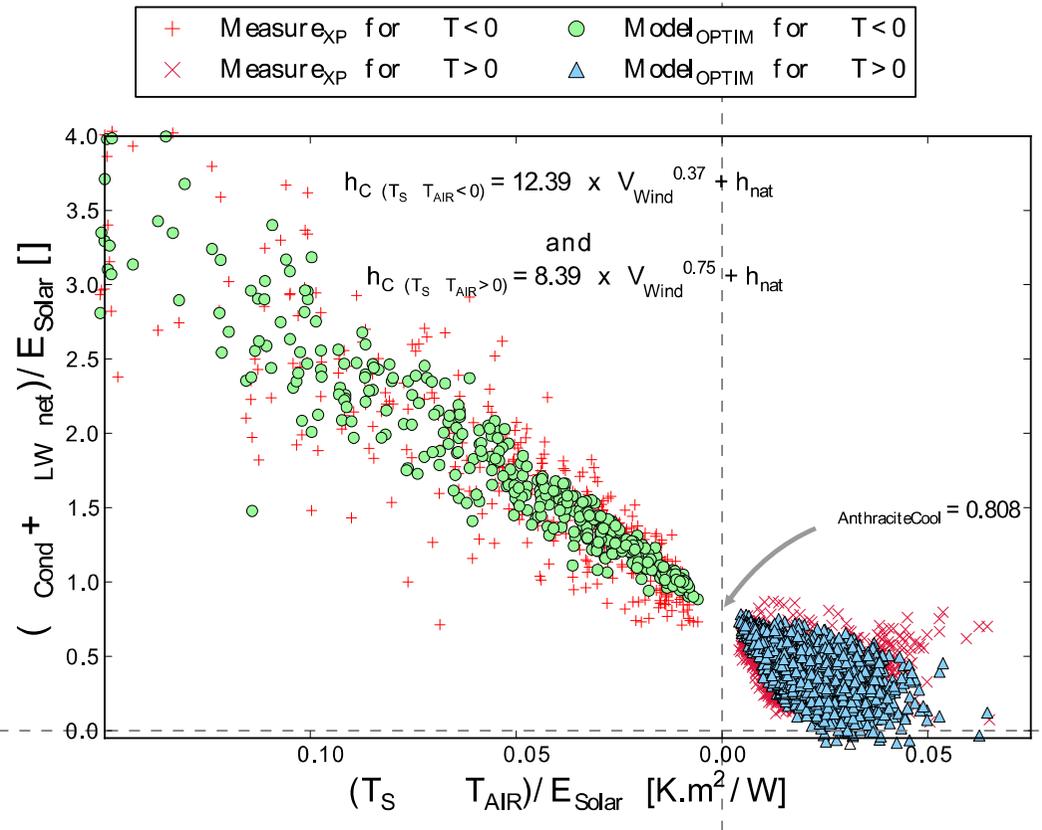
Par minimisation de la fonction suivante :

$$résidu = \sum_i \left(\sum_t \left(\left(\left(\alpha_i \cdot \frac{E_{sol}(t)}{(T_{S,i}(t) - T_{air}(t)}) - (A_h \cdot V_{vent}^{m_h}(t) + B_h) \right) - Y_{fit}(t) \right)^2 \right) \right)$$

$$h_C \cdot \frac{(T_{air} - T_{S,i})}{E_{sol}} + \alpha_i = \frac{\varphi_{cd,i} + \varepsilon_{GLO,i}(\sigma \cdot T_{S,i}^4 - E_{atm})}{E_{sol}}$$



Autre modèle de convection pour la minimisation simultanée des absorptivités et de h_C



Vérification de l'évolution de la réflectivité solaire mesurée par spectrophotométrie

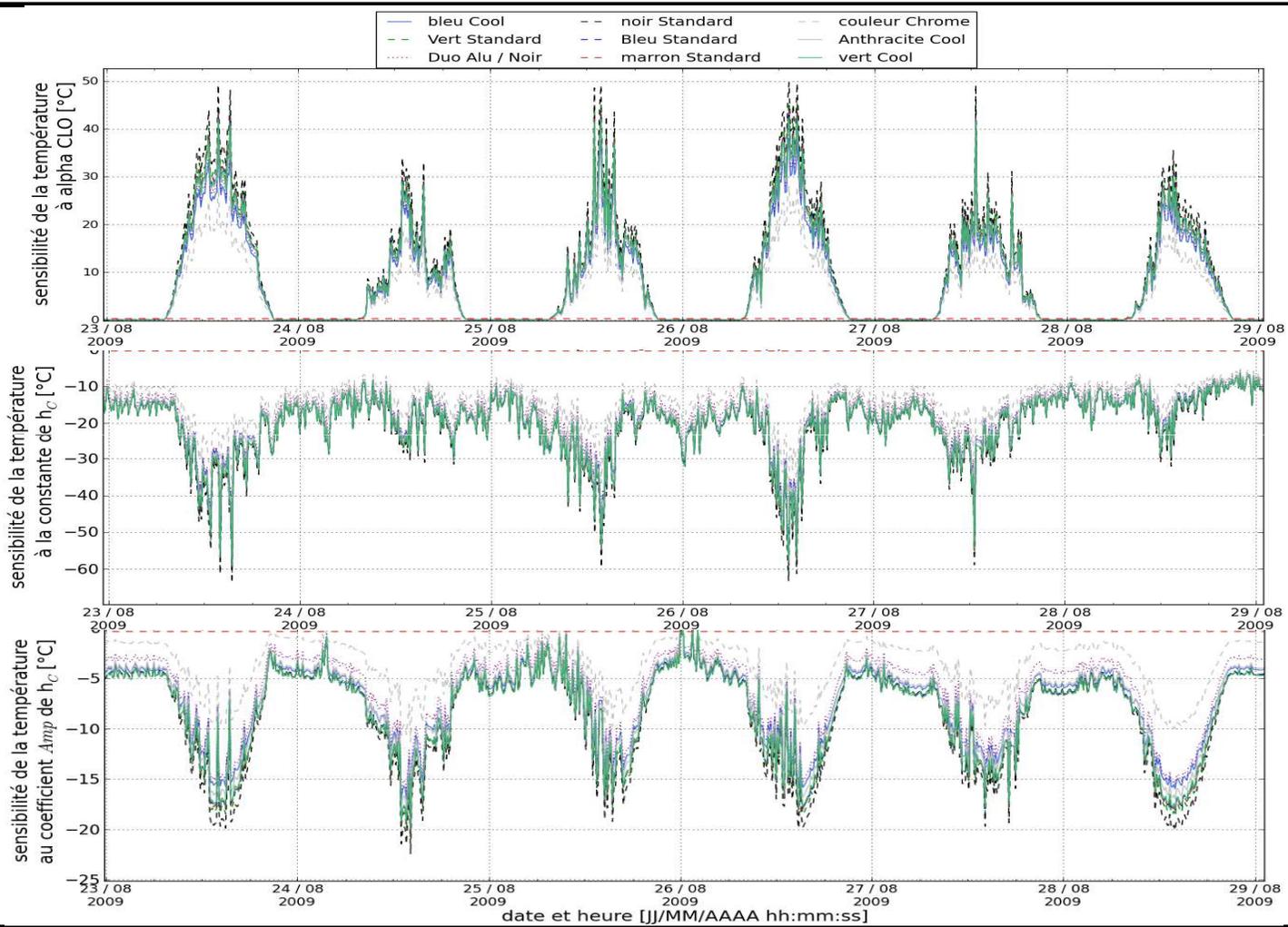
La réflectivité solaire :

- des peintures Marron, bleu et vertes standard a augmenté (VIS)
- des peintures cool a baissé de moins d'1% et d'environ 25% pour la peinture alu

Wavelength (nm)	Samples state	R% measurement Mode	anthracite cool (Cu)	Noir standard (Cu)	Standard brown ClimaBat	Marron Standard (Cu)	Bleu cool (Cu)	bleu standard (Cu)	Vert Cool (Cu)	vert standard (Cu)	Alu Spray (Cu)
UV Reflectance 280 - 380	UNEXPOSED	Reduced slit	8.0%	9.1%	13.5%	7.0%	19.7%	8.3%	6.9%	6.5%	43.5%
	6mths Exposed	Reduced slit	7.3%	6.5%	11.2%	7.3%	17.1%	9.3%	7.2%	7.2%	44.5%
VIS Reflectance 380 - 780	UNEXPOSED	Reduced slit	10.2%	4.9%	11.5%	13.2%	22.3%	12.1%	12.7%	6.0%	71.8%
	6mths Exposed	Reduced slit	10.0%	4.8%	16.3%	13.9%	22.9%	16.3%	12.6%	8.7%	44.2%
NIR Reflectance 780 - 2500	UNEXPOSED	Reduced slit	41.3%	4.3%	12.3%	14.0%	38.3%	23.4%	42.6%	10.7%	71.1%
	6mths Exposed	Reduced slit	38.7%	4.5%	17.2%	14.0%	40.7%	23.2%	40.8%	19.4%	49.0%
Total Solar Reflectance 280 - 2500	UNEXPOSED	Reduced slit	23.5%	4.9%	11.9%	13.4%	29.2%	16.9%	25.4%	8.0%	73.8%
	6mths Exposed	Reduced slit	22.3%	4.7%	16.5%	13.7%	30.4%	19.0%	24.6%	13.2%	46.3%

+0,3 à +5,2%

-0,3 à -27,2%



$\alpha_{(sol, vert Cool)}$, $A_{(hc)}$ et $B_{(hc)}$:

matrice de variances et covariances :

$$\begin{bmatrix} 94.50 & -35.74 & -52.05 \\ -35.74 & 19.10 & 8.73 \\ -52.05 & 8.73 & 62.72 \end{bmatrix}$$

$$C_{ij} = \frac{\text{cov}(X_i, X_j)}{\sqrt{\sigma_i \cdot \sigma_j}}$$

matrice de corrélation normalisée:

$$\begin{bmatrix} 1. & -0.84 & -0.68 \\ -0.84 & 1. & 0.25 \\ -0.68 & 0.25 & 1. \end{bmatrix}$$

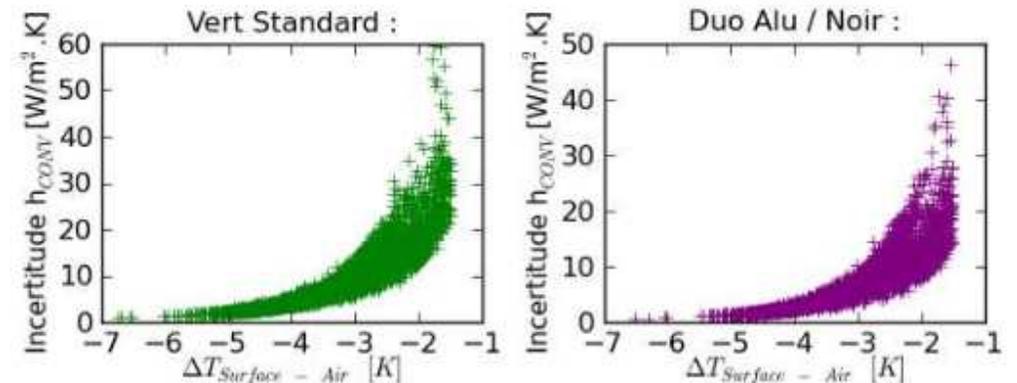
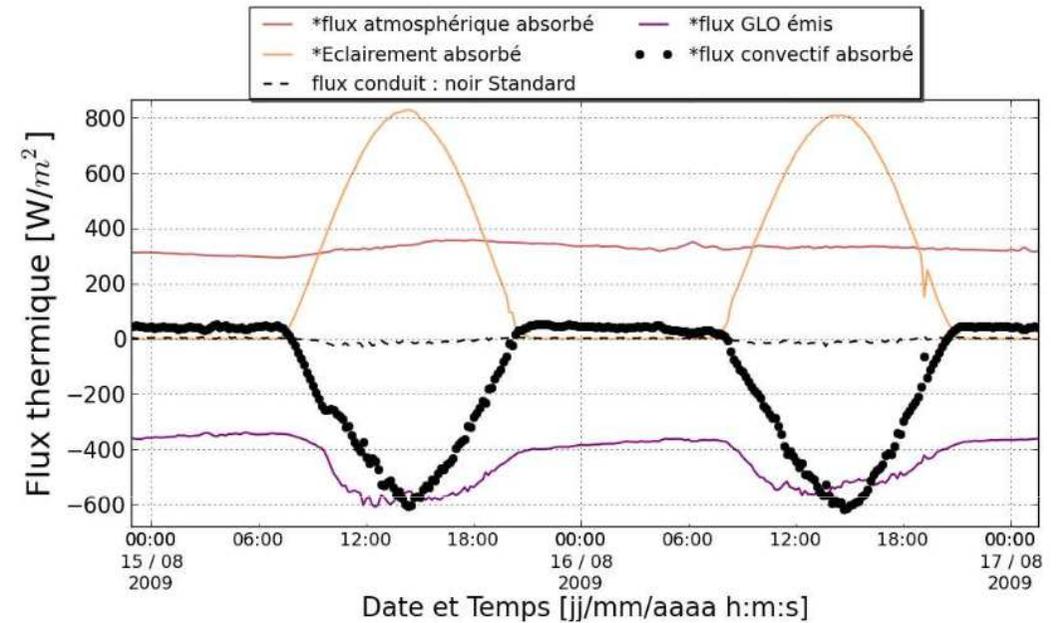
Incertitudes sur le coefficient d'échange convectif déterminé par bouclage du bilan énergétique

L'incertitude absolue de chaque coefficient h_c , soit la variance u_c^2 :

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

Termes équations	Incertitudes associées
Données météo	Données constructeurs
Facteur d'émissivité IR	± 0.03
Facteur de réflexion solaire	± 0.03
Flux conduit	$\pm 10 \%$

Les coefficients de convection déterminés expérimentalement présentent une incertitude de +/- 3 à 10 W/m².K pour les plus faibles valeurs, durant la nuit où l'incertitude sur l'éclairement solaire est nulle et de +/- 12 à 26 W/m².K durant la journée.



Conclusion

Méthode de détermination des coefficients de l'équation bilan :

- Développement d'une méthode d'appréciation d'absorptivité solaire effective
- Différence de 5 à 20% avec les valeurs initiales en laboratoire
 - Dégradation des propriétés de surface
 - Prise en compte des variations du spectre solaire
 - Incertitudes de mesures des composantes du bilan

Perspectives

- Code énergétique avec des valeurs de réflectivité solaire plus détaillées
- Évaluation/minimisation des incertitudes sur le coefficient de convection
- Insertion d'un terme de dérive au fil du temps des propriétés radiatives
- Insertion d'une dépendance à l'angle solaire

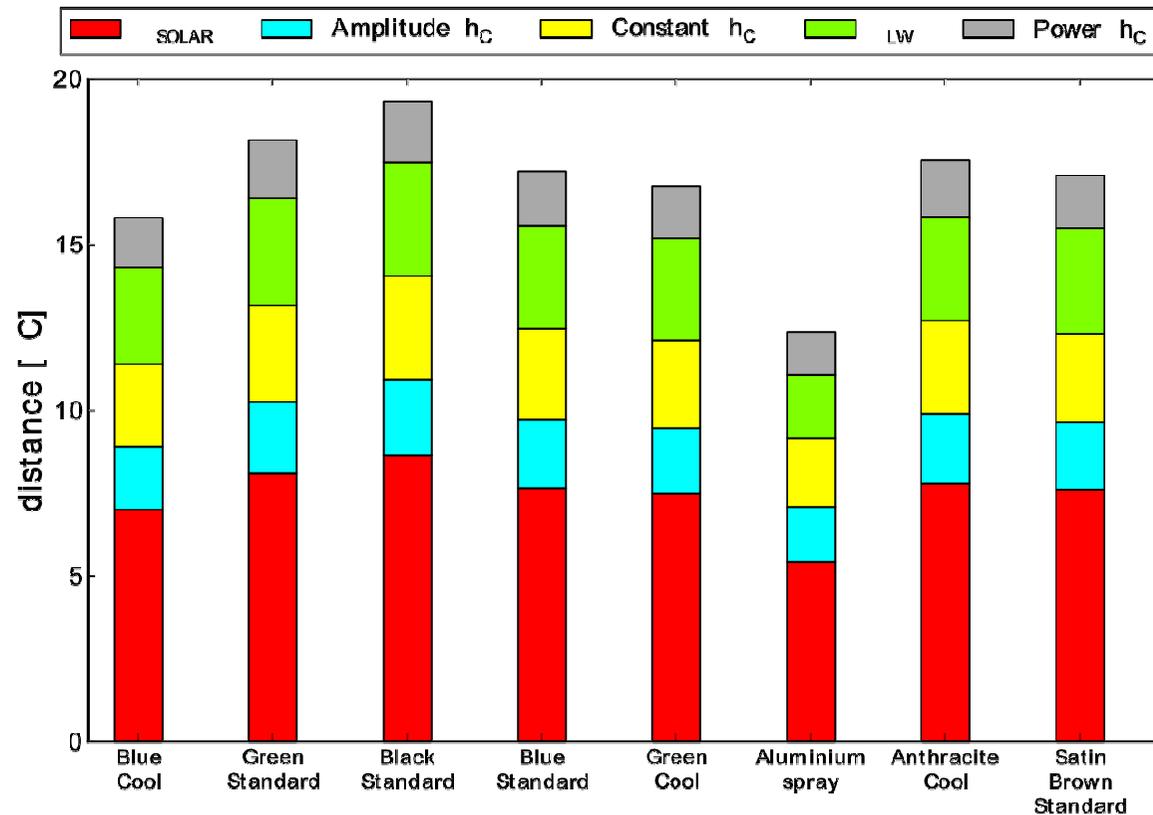
La sensibilité est notée : $S_i(t) = X_i \frac{\partial y_k(t)}{\partial X_i}$ Approximée numériquement par :

$$S_i(t) = X_i \frac{\Delta y_k(t)}{\Delta X_i} = X_i \frac{[Y(X_1, X_2, \dots, X_i + \Delta_i, \dots, X_k) - Y(X_1, X_2, \dots, X_i - \Delta_i, \dots, X_k)]}{2\Delta X_i}$$

Où X_i , la valeur nominale du paramètre $i^{\text{ème}}$, ΔX_i , la valeur de la perturbation pour ce paramètre. Les paramètres du modèle actif montrent des indices de sensibilité élevés. L'effet du paramètre X_i sur la sortie Y du modèle peut être interprété au moyen de l'indice suivant appelé distance :

$$d_i = \sqrt{\mu_i^2 + \sigma_i^2}$$

Où μ_i et σ_i sont, respectivement, la valeur moyenne du temps et l'écart-type de $S_i(t)$. Chaque paramètre est dit actif lorsque ses indices de sensibilité sont supérieurs à la mesure d'incertitude sur la température de surface ($d_i > 0,25^\circ\text{C}$).



Corrélation entre les paramètres du modèle pour l'échantillon d'aluminium

	α_{SOLAR}	h_C amplitude	h_C constant	ϵ_{LW}	h_C power
α_{SOLAR}	1				
h_C amplitude	-0.98	1			
h_C constant	-0.97	0.95	1		
ϵ_{LW}	-0.84	0.76	0.81	1	
h_C power	-0.68	0.77	0.54	0.41	1