



**UNIVERSITAS INDONESIA**



**UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE**

**KARAKTERISASI EKSPERIMENTAL SIFAT-SIFAT TERMO-  
OPTIK PELAPISAN ATAP TERAS DAN STUDI DAMPAK  
SIFAT-SIFAT RADIATIF TERHADAP KENYAMANAN  
INTERIOR BANGUNAN**

**TESIS**

**WENDY TRIADJI NUGROHO**

**0906579374**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE**

**KARAKTERISASI EKSPERIMENTAL SIFAT-SIFAT TERMO-  
OPTIK PELAPISAN ATAP TERAS DAN STUDI DAMPAK  
SIFAT-SIFAT RADIATIF TERHADAP KENYAMANAN  
INTERIOR BANGUNAN**

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Magister  
Teknik**

**WENDY TRIADJI NUGROHO**

**0906579374**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**KEKHUSUSAN KONVERSI ENERGI**

**DEPOK**

**JULI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Wendy Triadji Nugroho

NPM : 0906579374

Tanda tangan : 

Tanggal : 29 Juli 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh

Nama : Wendy Triadji Nugroho  
NPM : 0906579374  
Program studi : Teknik Mesin  
Judul tesis : Karakterisasi eksperimental sifat-sifat termo-optik pelapisan atap teras dan studi dampak sifat-sifat radiatif terhadap kenyamanan interior bangunan

Telah berhasil dipertahankan dihadapan dewan penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Master 2 Université de La Rochelle (Perancis) dan Magister Teknik Progran Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Patrick Salagnac

(*Salagnac*)

Pembimbing : Dr. Emmanuel Bozonnet

(*Bozonnet*)

Penguji : Prof. Olivier Millet

(*O Millet*)

Penguji : Prof. Patrick Salagnac

(*Salagnac*)

Penguji : Dr. Karim Limam

K. Limam  
(*Limam*)

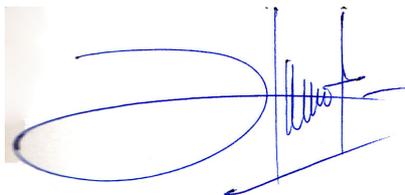
Penguji : Dr. Emmanuel Bozonnet

(*Bozonnet*)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 2 Agustus 2011

Mengetahui Kepala Departemen Teknin Mesin UI



Dr. Ir. Harinaldi, M. Eng

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT, atas segala nikmat yang diberikan-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan laporan ini. Dan tidak lupa saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Prof. Patrick Salagnac dan DR. Emmanuel Bozonnet atas kebaikannya yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk mempelajari sifat-sifat termo-optik (reflektivitas dan absorptivitas) material atap terase yang merupakan komponen utama dalam penyelesaian tesis ini
2. DR.Ing. Abdelkrim Trabelsi yang telah meluangkan waktu untuk berdiskusi dan memberikan arahan tentang pengetahuan dasar studi eksperimental
3. Keluargaku yang tercinta atas segala dukungan yang diberikan kepada saya selama belajar di Perancis
4. Teman-teman DDIP 2009/2011 atas segala kerjasama dan dukungannya

Depok, 29 Juli 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Wendy Triadji Nugroho  
NPM : 0906579374  
Program studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : **Karakterisasi eksperimental sifat-sifat termo-optik pelapisan atap teras dan studi dampak sifat-sifat radiatif terhadap kenyamanan interior bangunan** beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 29 Juli 2011

Yang menyatakan



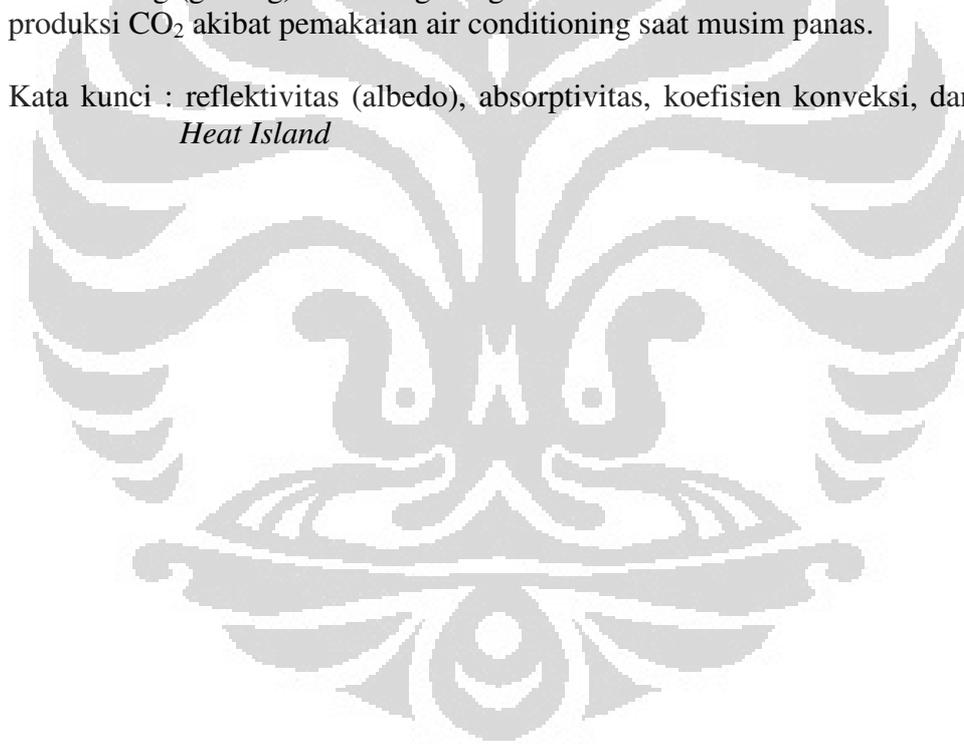
(Wendy Triadji Nugroho)

## ABSTRAK

Nama : Wendy Triadji Nugroho  
Program studi : Teknik Mesin  
Judul : Karakterisasi eksperimental sifat-sifat termo-optik pelapisan atap teras dan studi dampak sifat-sifat radiatif terhadap kenyamanan interior bangunan

Tesis ini berisi studi eksperimental sifat-sifat termo-optik (*reflektivitas* dan absorptivitas) material atap teras terhadap pancaran sinar matahari. Ada dua metode yang diterapkan untuk menghitung nilai reflektivitas (albedo) material. Yang pertama adalah menentukan koefisien konveksi lebih dahulu kemudian mencari albedo. Sedangkan metode kedua adalah menetapkan nilai reflektivitas dahulu dan selanjutnya menentukan nilai koefisien konveksi. Hasil dari kedua metode tersebut dibandingkan dengan nilai reflektivitas dan absorptivitas bahan standar produksi. Semakin tinggi nilai albedo akan meningkatkan kenyamanan di dalam ruang (gedung) dan mengurangi efek *Urban Heat Island* serta menurunkan produksi CO<sub>2</sub> akibat pemakaian air conditioning saat musim panas.

Kata kunci : reflektivitas (albedo), absorptivitas, koefisien konveksi, dan *Urban Heat Island*



## ABSTRACT

Name : Wendy Triadji Nugroho  
Study Program : Teknik Mesin  
Title : Experimental Characterization of Thermo-optical Properties of Coated Flat Roofs and Study the Impact of these Radiative Properties of the Building

This thesis contains experimental studies the properties of thermo-optical (reflectivity and absorptive) material roof terrace on the sun's rays. There are two methods that are applied to calculate the reflectivity (Albedo) material. The first is to determine the convection coefficient first and then look for Albedo. While the second method is to set the reflectivity value first and then determine the value of convection coefficient. Results from both methods were compared with the value of the reflectivity and absorptive of the standard material production. The higher the Albedo value will increase comfort in the room (building) and reduces the Urban Heat Island effect and decrease the production of CO<sub>2</sub> resulting from the use air conditioning during the summer.

Keywords : reflectivity (Albedo), absorptive, convection coefficient, and Urban Heat Island

## DAFTAR ISI

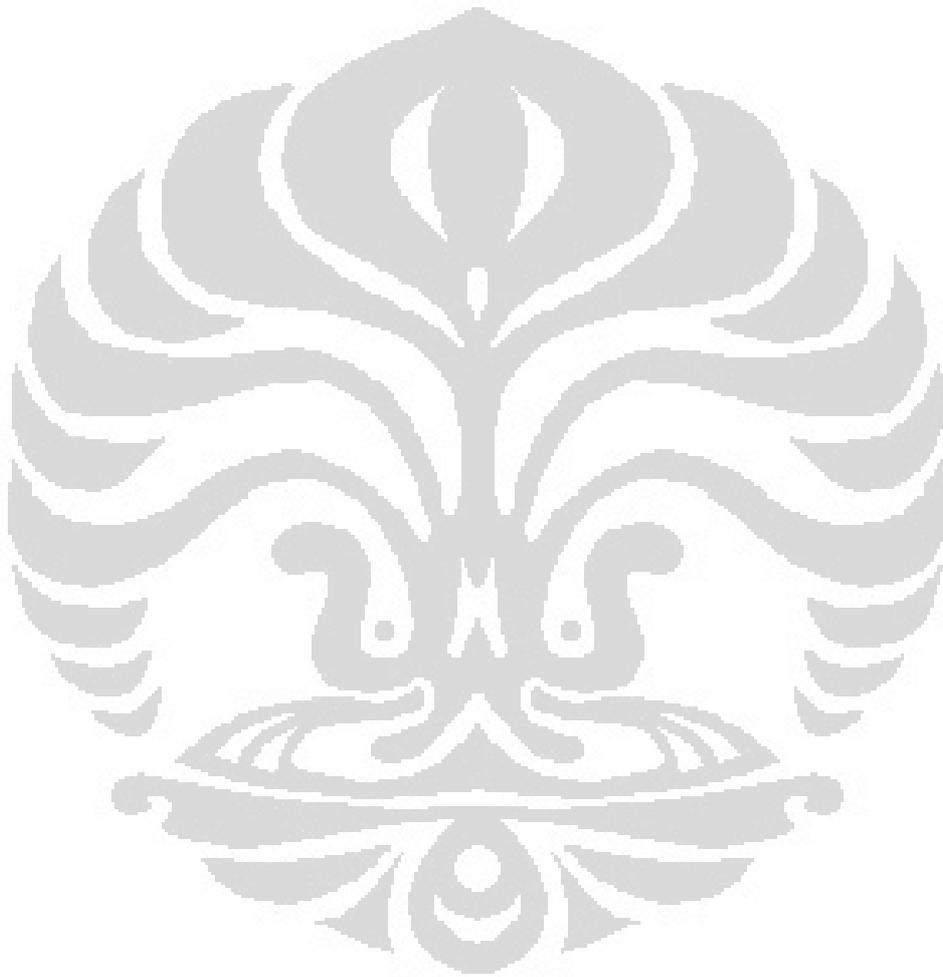
HALAMAN JUDUL .....	i
PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACK .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	x
<b>1. Introduction : Problématique de l'utilisation des cool roofs en milieu urbain</b>	<b>1</b>
<b>2. Contexte</b> .....	<b>3</b>
<b>3. État de l'art sur les techniques de mesure des propriétés radiatives des surfaces de toitures terrasses</b> .....	<b>4</b>
3.1. Méthodes de détermination l'albédo et de l'absorptivité solaire	4
3.2. La mesure de l'émissivité grande longueur d'onde.....	7
3.3. Incertitudes sur les propriétés radiatives mesurées.....	8
<b>4. Protocoles de mesures d'échantillons de revêtements de toiture</b>	<b>11</b>
4.1. Présentation du banc de mesure en toiture.....	11
4.2. Traitement des données par bilan thermique de surface.....	15
<b>5. Détermination par la mesure de la réflectivité et de l'absorptivité solaire</b>	<b>19</b>
5.1. Présentation du programme de traitement des mesures.....	19
5.2. Résultats et analyse.....	20
<b>6. Conclusion et perspectives</b> .....	<b>32</b>
<b>Référence</b> .....	<b>33</b>

## DAFTAR GAMBAR

Figure 1. Spectres solaires de référence appartenant à la norme ASTM-173-03	5
Figure 2. Émissiomètre Modèle AE avec son voltmètre digital.....	7
Figure 3. Photographies du montage réalisé en toiture de l'Université de La Rochelle .....	12
Figure 4. Schéma de bilan thermique sur la surface du matériel d'essai .....	12
Figure 5. Disposition du matériel expérimental du banc XP1.....	13
Figure 6. Reconnaissance des ciels clairs par ratio de l'éclairement solaire mesuré sur l'éclairement solaire calculé .....	16
Figure 7. Épisode de condensation .....	17
Figure 8. Les étapes de détermination des valeurs de $\alpha$ .....	19
Figure 9. La méthode 2 .....	20
Figure 10. Évolution de la vitesse du vent sur le coefficient d'échange par convection .....	21
Figure 11. Évolution de la vitesse du vent sur le coefficient convectif ...	22
Figure 12. Détermination l'absorptivité solaire.....	23
Figure 13. Évolution du bilan thermique en fonction du temps.....	24
Figure 14. Évolution de la vitesse du vent sur le coefficient convectif...	25
Figure 15. Détermination l'absorptivité solaire.....	26
Figure 16. Bilan thermique en fonction du temps.....	27
Figure 17. Bilan thermique en fonction du temps.....	28
Figure 18. Évolution de la vitesse du vent sur le coefficient d'échange par convection en période nocturne.....	30
Figure 19. Évolution du bilan thermique en fonction du temps.....	31

**DAFTAR TABEL**

Tableau 1. Précision des mesures.....	15
Tableau 2. Résultat de calcul.....	29



## 1. Introduction : Problématique de l'utilisation des cool roofs en milieu urbain

Dans de nombreuses zones urbaines, les trottoirs et les toits constituent plus de 60% des surfaces urbaines (Akbari et al., 2003; Rose et al., 2003 Akbari and Rose 2001a; Akbari and Rose 2001b). De nombreuses études ont démontré les économies bâtiments cooling-energy de plus de 20% à élever le toit d'une réflectivité de 10-20% actuels à environ 60%. Nous estimons un potentiel d'épargne américaine de plus de 1 milliard de dollars par an en facture d'énergie annuelle nette (refroidissement des économies d'énergie de moins d'énergie de chauffage des pénalités). L'augmentation de l'albédo des surfaces urbaines (toits et des trottoirs) peut réduire la température estivale urbaines et améliorer la qualité de l'air urbain (Taha, 2002; Taha 2001; Taha et al., 2000; Rosenfeld et al 1998; Akbari et al., 2001, Pomerantz et al., 1999). Les économies d'énergie et qualité de l'air résultant de l'augmentation albédos surface urbaine dans les seuls États-Unis peuvent dépasser 2 milliards de dollars par an. Accroître les résultats urbaine albédo en reflétant davantage l'énergie solaire entrant mondiale rayonnement et de contrer une certaine mesure les effets du réchauffement climatique (Kaarsberg et Akbari, 2006). Ici, nous quantifier l'effet d'augmenter l'albédo des zones urbaines en termes d'émission de CO<sub>2</sub> compensées.

Par la définition dans le monde du commerce et de bâtiments industriels, un toit *cool* (cool roof) est un système de toiture qui peut fournir de haute réflectivité solaire (la capacité de réfléchir les visibles, infrarouges et ultraviolettes longueurs d'onde du soleil, réduisant le transfert thermique du bâtiment) et de grande émissivité thermique (la capacité à rayonner absorbé, ou non réfléchi de l'énergie solaire). La plupart des toits sont blancs frais ou d'autres couleurs claires.

Les principales propriétés d'un matériau d'un point de vue des transferts radiatives sont la réflectivité solaire (CLO) et l'émissivité thermique à la grande longueur d'onde (GLO). La modification de ces propriétés impacte directement sur les apports solaires et la température de surface des bâtiments. Du point de vue de la performance énergétique des bâtiments, l'augmentation de ces

caractéristiques en été permet de diminuer les besoins en rafraîchissement et améliore le confort. En hiver, la diminution de ces propriétés permet de diminuer les besoins en chauffage (Synnefa et.al, 2007). Au niveau urbain, l'augmentation de la réflectivité et/ou de l'émissivité implique des températures de surface de bâtiment plus faibles, ce qui a pour conséquence de diminuer les échanges de chaleur par convection entre les bâtiments et la canopée urbain. Par ailleurs, l'augmentation de la réflectivité solaire engendre l'augmentation des pertes radiatives globales de la ville (S.Bretz et.al, 1998). La modification de ces propriétés radiatives permet ainsi d'influer directement sur les performances (consommation, confort thermique) des bâtiments et sur le microclimat urbain.

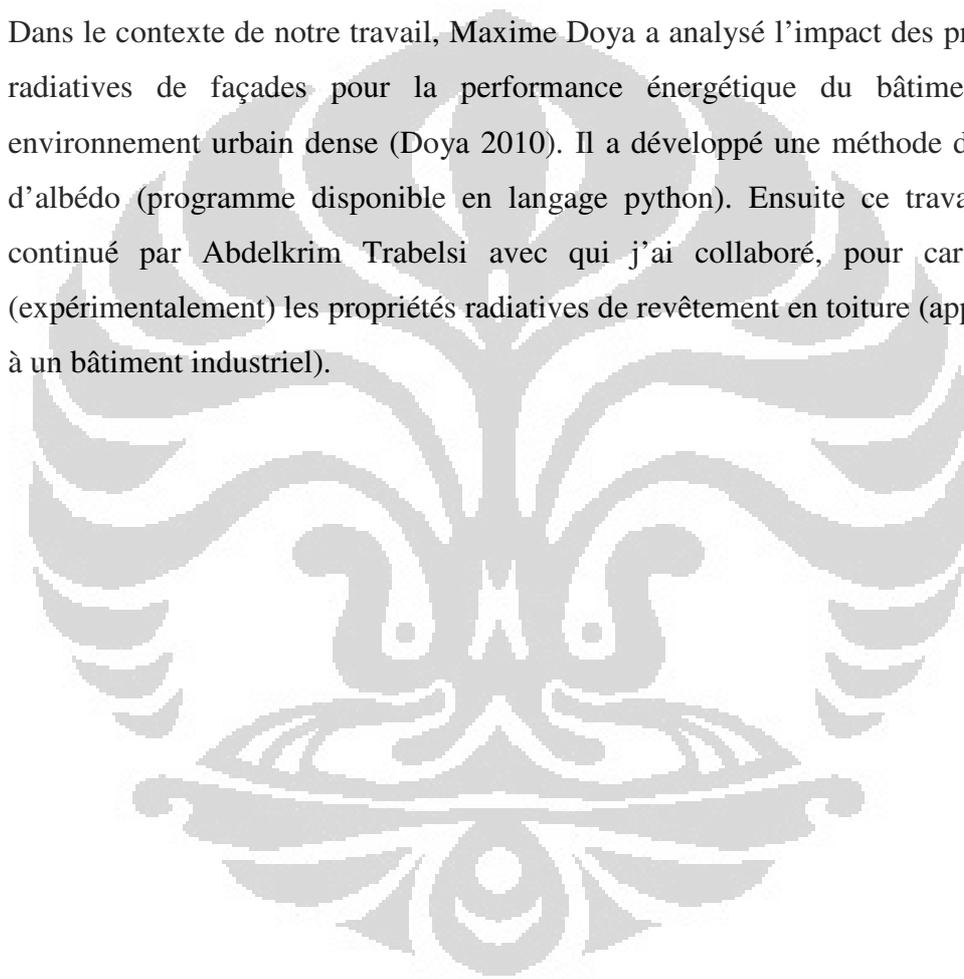
Notre rapport de provisoire contient la méthode pour déterminer coefficient d'échange par convection  $h_c$ , l'absorptivité et la réflectivité solaire dans deux manières. Le premier est on détermine  $h_c$  en connaissance le bilan thermique sur la surface d'échantillon (Soprastar). Ensuite, on va utiliser les variables A et B qui est existe dans l'équation du flux convection pour trouver la valeur de l'absorptivité solaire ( $\alpha$ ) et la réflectivité solaire ( $\rho$ ). Au contraire, à la deuxième méthode, on fixé d'abord l'albédo en utilisant la valeur standard qui vient du fabricant, et par la suite, cette valeur être employée pour déterminer le coefficient de convection.

Nous réalisons que notre travail n'est pas maximale à cause du temps de stage n'est pas suffit pour finir ce projet. Néanmoins, nous voudrons continuer notre travail pour évaluer l'impact du vieillissement du matériel, la nébulosité, l'humidité relative et l'angle d'incidence solaire.

## 2. Contexte

Les études sur les propriétés thermo-optiques (la réflectivité solaire appelée aussi albédo et l'absorptivité solaire) et leurs impacts sont des thèmes actuels de recherche. En effet, c'est très important pour diminuer les besoins d'énergie, notamment pendant l'été et baisser la production de CO<sub>2</sub> liée à cette consommation, en particulier la climatisation. De plus, cela influe sur le réchauffement climatique.

Dans le contexte de notre travail, Maxime Doya a analysé l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique du bâtiment d'un environnement urbain dense (Doya 2010). Il a développé une méthode de calcul d'albédo (programme disponible en langage python). Ensuite ce travail a été continué par Abdelkrim Trabelsi avec qui j'ai collaboré, pour caractériser (expérimentalement) les propriétés radiatives de revêtement en toiture (application à un bâtiment industriel).



### **3. État de l'art sur les techniques de mesure des propriétés radiatives des surfaces de toitures terrasses**

Ce chapitre présente les plusieurs méthodes pour déterminer l'albédo et l'absorptivité solaire, et puis, on continue avec la mesure de l'émissivité de matériel, en fin on le termine avec l'étude de l'incertitude des propriétés radiatives mesurées.

#### **3.1. Méthodes de détermination l'albédo et de l'absorptivité solaire**

Le flux solaire terrestre incident réel n'est pas aussi régulier qu'une courbe de Wienn, des absorptions sélectives par les espèces moléculaires présentes dans l'atmosphère interviennent dans des bandes de longueurs d'onde précises, par conséquent il est nécessaire d'évaluer une réflectivité totale pondéré par le flux solaire réel incident en fonction de sa distribution spectrale. Cette mesure de la réflectivité se fait généralement sous différentes sources artificielles et naturelles, avec des distributions spectrales variées. Dans des secteurs tels que l'industrie des cellules photovoltaïques, où l'efficacité des modules dépend fortement de la fréquence du rayonnement incident, la répartition spectrale de l'éclairement solaire incident a dû être normalisée. Pour les modules destinés aux applications terrestres, l'ASTM (American Society for Testing and Materials) avec des partenaires industriels et des laboratoires de recherche ont défini 2 spectres solaires normalisés, que l'on retrouve dans la norme ASTM G173-03 et internationalement connue sous le nom spectre 1.5 AM, qui correspond au spectre de la lumière solaire après qu'elle ait traversé une épaisseur d'air pur correspondant à 1.5 fois l'épaisseur de l'atmosphère, pour un ensemble de conditions atmosphérique très spécifique (Doya 2010).

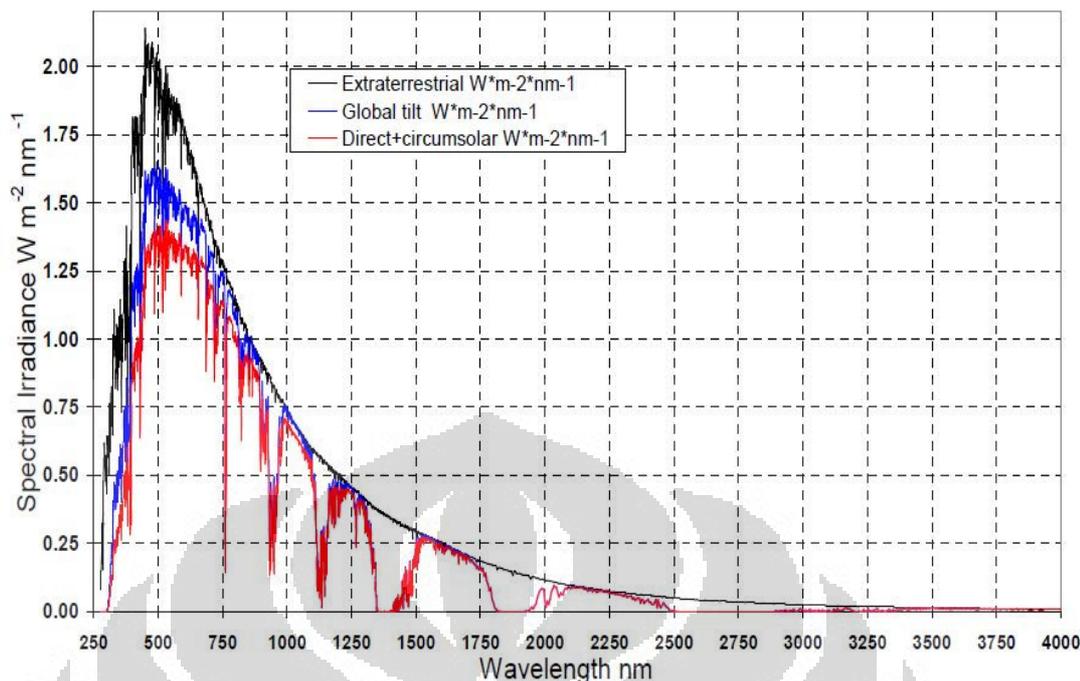


Figure 1. Spectres solaires de référence appartenant à la norme ASTM-173-03

Le document utilisé (<http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>) rassemble dans une même feuille Excel, la norme de l'éclairement solaire spectral normal direct, le spectre extraterrestre AM0 avant les multiples absorptions moléculaires réalisées dans l'atmosphère développé par Gueymard (2006) et le spectre qui nous intéresse particulièrement, celui du rayonnement global total sous AM 1,5 (rayonnement hémisphérique dans un champ de  $2\pi$  Stéradians d'une surface inclinée). La situation définie se présente en pratique lorsque le ciel est très clair et que le soleil se trouve à une hauteur de  $41.8^\circ$  au-dessus de l'horizon.

Les méthodes couramment utilisées pour mesurer la réflectivité solaire des matériaux de couverture comprennent les normes ASTM E903 (spectromètre), C1549 (réflectomètre) et E1918 (pyranomètre). Norme E903 utilise un spectromètre à une sphère intégrante pour mesurer la réflectivité spectral solaire d'une superficie d'environ  $0,1 cm^2$ . La réflectivité solaire spectrale est ensuite pondérées avec une irradiante solaire spectrale pour calculer la réflectivité solaire. Norme C1549 utilise un réflectomètre pour mesurer la réflectivité solaire d'une surface d'environ  $5 cm^2$ . Les deux E903 et C1549 sont les mieux adaptés à la mesure de la réflectivité solaire des surfaces planes et homogènes. Norme E1918 utilise un pyranomètre pour mesurer la réflectivité solaire d'une surface d'environ

10 m<sup>2</sup>, et est mieux appliqué aux grandes surfaces qui peuvent aussi être rugueux et / ou non uniforme.

Akbari a décrit une technique qui utilise un pyranomètre pour mesurer la réflectivité solaire d'un échantillon uniforme ou panaché de surface de réflexion diffuse d'une superficie d'environ 1 m<sup>2</sup>, et d'utiliser cette technique (appelée E1918A) pour mesurer la réflectivité solaire de faible et assemblages de carreaux de grande envergure. Pour 10 grands ensembles de tuiles (10 m<sup>2</sup>) dont les réflectivités E1918 solaires s'échelonne de 0,10 à 0,50, l'ampleur de la différence entre le E1918 et E1918A mesures ne dépasse pas 0,02 pour les assemblages unicolore, et n'a pas dépassé 0,03 pour les assemblées multicolores (Akbari 2008). Afin de déterminer la réflectivité solaire sur le spectre 280-2500nm, Doya a utilisé le spectre solaire standard (normes ASTM) en guise de fonction de pondération.

$$RS_{totale} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\lambda,i} E_s^{\lambda,i} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_s^{\lambda,i} d\lambda} \quad \text{Équation 1}$$

Dans cette formule,  $\rho$  est la réflectivité spectrale pour une longueur d'onde  $\lambda$ , et  $E_s$ , l'éclairement spectral. La forme du spectre dans le domaine des visibles (0,38 à 0,76  $\mu\text{m}$ ) contient des informations pour comparer la concomitance des couleurs entre les différents échantillons. Les mesures effectuées sur le spectrophotomètre se situent entre 200 et 2500 nm alors que la bande spectrale solaire fournie par la norme standard est située entre 280 et 4000 nm. Néanmoins les mesures en dessous de 300nm sur le spectrophotomètre ne sont pas toujours très fiables, le bruit y est important. Et si une densité de flux solaire au niveau extraterrestre existe dans le domaine des UV (100 – 400 nm), la densité de flux reçue au niveau de la surface terrestre est souvent négligeable jusqu'à 300 nm. Par conséquent nous avons réduit notre spectre de travail pour déterminer la réflectivité solaire de nos échantillons à 280 -2500nm, spectre qui après intégration du flux global reçu sur les longueurs d'onde, s'avère être de 992,6 W/m<sup>2</sup>, soit 99,2% du rayonnement incident total incident contenu sur 280 - 4000 nm (1000,4 W/m<sup>2</sup>)(Doya 2010).

### 3.2. La mesure de l'émissivité grande longueur d'onde

L'émissivité de nos échantillons a été déterminée avec un émissiomètre de modèle AE<sup>1</sup> (Figure 2). Cet émissiomètre est un instrument comparatif qui demande une pré-calibration avec 2 matériaux de référence dont l'émissivité est connue et fournie. Les standards de référence sont un disque d'aluminium d'émissivité 0,06 et un disque recouvert de peinture noire mate d'émissivité 0,88. Le détecteur est pourvu d'une résistance de chauffage qui lui permet d'atteindre une température de 82°C. Il est placé en contact avec la face supérieure des disques de référence ou de l'échantillon à mesurer, eux même disposé sur un dissipateur à ailettes, afin de maintenir une température d'équilibre du système et évitant ainsi d'avoir à chauffer l'échantillon test. Le capteur/détecteur est en fait une thermopile différentielle composée de surfaces mixtes présentant des hautes et basses émissivités. La différence de température est de 0°C si l'échantillon testé est tout à fait réfléchissant (basse émissivité) et elle est plus élevée pour les échantillons d'aspect plus mat. La tension récupérée en sortie sur le voltmètre est linéaire avec l'émissivité avec une précision de  $\pm 0,01$  sur cette émissivité.



Figure 2. Émissiomètre Modèle AE avec son voltmètre digital

De part les précédentes caractéristiques de l'appareillage, on peut réaliser les mesures dans une pièce à température ambiante. Après l'étape de calibration, la mesure s'effectue en plaçant l'échantillon test et l'échantillon de référence à haute émissivité sur le dissipateur. Le dissipateur maintient une température constante,

<sup>1</sup> Fabriqué par Devices & Services Co (D&S)

on peut alors mesurer la tension pour les 2 échantillons. Le détecteur doit être laissé en contact sur chaque plaque entre 60 et 90 secondes afin que la lecture se stabilise. L'émissivité de l'échantillon test peut alors être calculée à partir des tensions mesurées:

$$\mathcal{E}_{\text{échantillon}} = \frac{V_{\text{échantillon}}}{V_{\text{alu}}} \cdot \mathcal{E}_{\text{alu}} \quad \text{Équation 2}$$

$\mathcal{E}_{\text{alu}}$  est l'émissivité du matériel de référence à haute émissivité (0,88),  $V_{\text{échantillon}}$  et  $V_{\text{alu}}$  étant les 2 tensions mesurées lorsque le détecteur est disposé sur chaque échantillon (carrés de 8 cm de côté).

### 3.3. Incertitudes sur les propriétés radiatives mesurées

L'incertitude de la plupart des mesures dépend de plusieurs facteurs, dont certains sont bien définis et évalués alors que d'autres sont fondés sur divers degrés de connaissance et d'expérience. Quelle que soit l'évaluation de ces facteurs, on peut les classer dans deux catégories, selon la méthode utilisée pour déterminer leurs valeurs numériques : facteurs évalués à l'aide de méthodes statistiques (type A) et facteurs évalués autrement (type B), dans les deux cas exprimés sous forme d'écart types et définis comme incertitudes types.

L'évaluation de type A de l'incertitude type s'appuie sur une méthode statistique valide de traitement des données. La détermination de l'écart type de la moyenne d'une série d'observations indépendantes en est un exemple. L'évaluation de type B de l'incertitude type s'appuie d'habitude sur un jugement scientifique fondé sur l'information pertinente disponible : les mesures précédentes, l'expérience ou la connaissance générale du comportement et de la propriété du matériel pertinent, les spécifications des fabricants du matériel, les données d'étalonnage et d'autres certificats et l'incertitude des données de référence des manuels. Il faut donc consulter les documents appropriés pour déterminer, par exemple, l'écart type et, partant, l'incertitude type dans chaque cas. Voir la liste des documents de référence.

L'incertitude type totale d'une mesure s'appelle incertitude type combinée ( $\mu c$ ). Il s'agit d'une incertitude type approximative égale à la racine carrée positive de la

variance totale obtenue en faisant la somme des variances (et des covariances s'il y a lieu) fournies par les incertitudes types individuelles ( $\mu_i$ ), peu importe la méthode d'évaluation (type A ou B). Lorsque certaines incertitudes sont corrélées, on doit tenir compte de la corrélation dans les évaluations expérimentales ou dans les calculs effectués selon les techniques adéquates. Pour plus de précision et des exemples de combinaison d'incertitudes types, voir le GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) de l'ISO ou les documents de référence (Exigences du CLAS 2003).

Kollie et al. (1990) rapportent une reproduction des mesures avec l'émissiomètre D&S de  $\pm 0,008$  pour une incertitude de  $\pm 0,014$ . Ils ont aussi montré que l'instrument mesurait essentiellement l'émissivité hémisphérique totale et non l'émissivité normale. L'élévation en température de l'échantillon à caractériser lors de son contact avec le détecteur est liée à sa conductivité thermique et à son épaisseur. Si la surface à caractériser et celle de référence ne sont pas à la même température lorsque la lecture faite par le détecteur atteint une valeur fixe, on introduit une erreur dans la mesure. En supposant que le régime permanent est atteint, l'erreur peut être estimée. Le détecteur est une thermopile différentielle qui par sa configuration ne peut réagir qu'aux échanges de chaleur radiatifs entre la surface de l'échantillon et la surface de la thermopile face à face. La grandeur de sortie du détecteur peut être exprimée par :

$$D = K \cdot \varepsilon (T_d^4 - T_s^4) \quad \text{Équation 3}$$

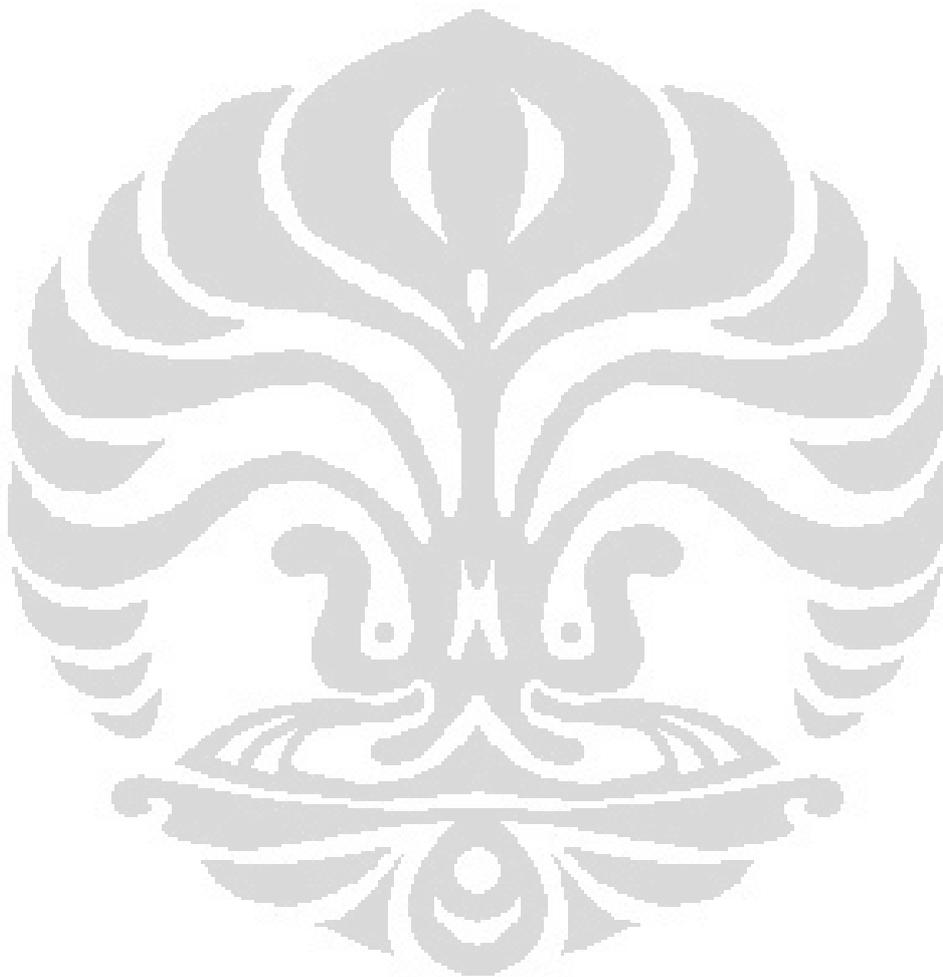
$$\Delta \varepsilon \cong \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot T_a^3}{(T_d^4 - T_a^4)} \cdot \frac{x}{k} \cdot (150\varepsilon + 120) \quad \text{Équation 4}$$

$$\Delta \varepsilon \cong 0.856 \frac{x \cdot \varepsilon}{\lambda} \cdot (1,25\varepsilon + 1)$$

Avec  $x$ , l'épaisseur du substrat et  $k$ , la conductivité thermique du substrat.

L'incertitude de la mesure des propriétés du matériel que nous recevons de les limites des instruments de mesure, erreurs humaines, les conditions matérielles, en particulier de surface et des conditions climatiques au cours du processus de mesure était en cours. Quant à la détermination de la valeur moyenne de

l'absorptivité et la réflectivité du soleil nous nous référons au type total ou combinée.



## 4. Protocoles de mesures d'échantillons de revêtements de toiture

Dans ce projet nous employons le banc expérimental qu'il s'appelle XP1. Il est destiné à la caractérisation de la surface de l'élément paroi hors du système bâtiment. Il nous permet de caractériser les échanges thermique à l'interface surface/environnement extérieur (utilisables pour un code numérique) et à constater les performances réelles de produits « cools » et d'estimer la dégradation des propriétés radiatives au cours du temps.

### 4.1. Présentation du banc de mesure en toiture

Le banc XP1 est composé de différents appareils de mesures météorologiques et thermiques reliés à une station de mesures<sup>2</sup> qui rendent possible la mesure des différentes composantes du bilan énergétique à la surface de 5 types de revêtements d'étanchéité fabriqués par l'entreprise SOPREMA (voir *Figure 3*): une membrane synthétique, et des membranes bitumineuses recouvertes de différents composants (aluminium gaufré : Sopralast Alu ; concassés d'ardoise : Sopralene flam ; polymères gaufrés différemment : Soprasolin star et Soprastar). Ces deux derniers ont été spécialement traités afin d'avoir des réflectivités solaires élevées (matériaux dits « cool ») (Trabelsi 2010).

La réflectivité solaire (albédo) est mesurée à l'aide s'une méthode développée au laboratoire (Doya 2010). Cette dernière permet non seulement de remonter à l'albédo mais aussi au coefficient d'échange thermique par convection. Le principe consiste à identifier ces paramètres par méthode inverse à partir du bilan thermique surfacique (*Figure 3*). L'expression du coefficient d'échange thermique par convection en fonction de la vitesse du vent est déterminée sur la période nocturne. Par la suite, l'albédo est déterminé sur la période diurne.

Les autres composants du bilan thermique sont, quant à elles, mesurées directement à partir d'un banc expérimentale spécialement développé à cet effet : les rayonnements solaires CLO et GLO sont mesurés à l'aide d'un pyranomètre-pyrgéomètre ; la température de surface et le flux conduit à travers la surface sont mesurés respectivement à l'aide de thermocouples et de capteurs de flux sur des échantillons carrés de 25 cm de côté ; la température extérieur et la vitesse du vent sont mesurés à l'aide d'un sonde de température et d'un anémomètre.

---

<sup>2</sup>CR1000 de Campbell Scientific®



Figure 3. Photographies du montage réalisé en toiture de l'Université de La Rochelle

À gauche : Les échantillons (sopralene flame (gris), sopralast alu-soprarstar-soprasolinstar (blanc), membrane synthétique (bleu)

À droite : Le radiomètre, l'anémomètre-girouette et la sonde humidité température de l'air

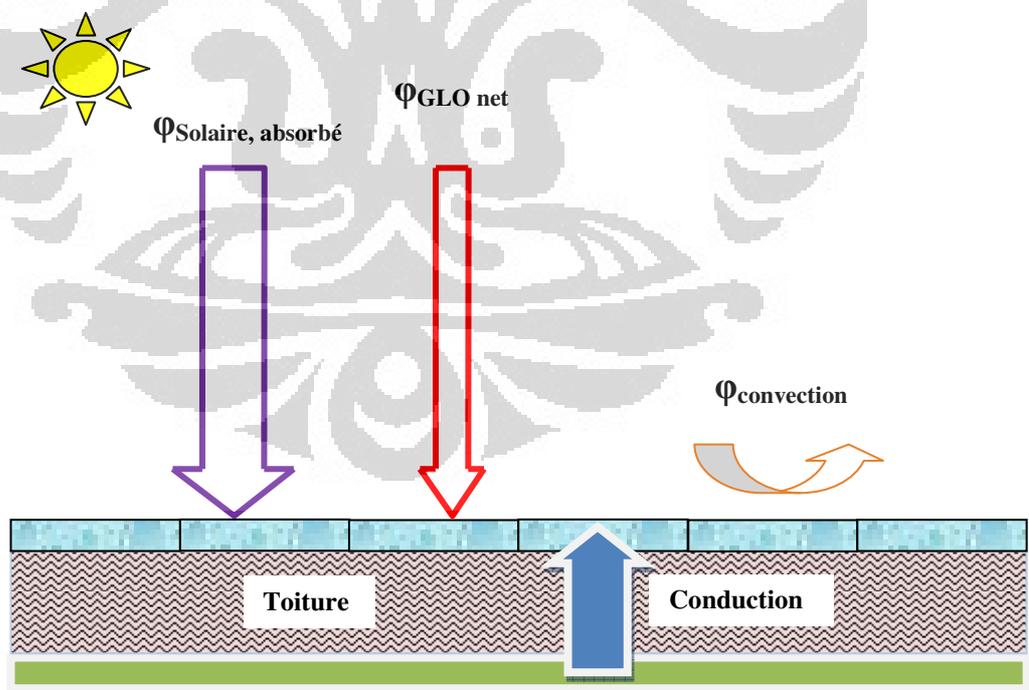


Figure 4. Schéma de bilan thermique sur la surface du matériel d'essai

Le banc et les matériaux sont exposés aux fluctuations météorologiques sur la toiture terrasse d'un bâtiment de l'université de La Rochelle (h=14m), les

bâtiments alentours de hauteur équivalente n'obstruent pas le champ de vision des échantillons et des appareils mesurant les flux radiatifs incidents, on peut ainsi considérer que le rayonnement de grandes longueurs d'onde incident est uniquement dû à l'atmosphère. La figure ci-dessous présente la disposition de notre matériel expérimental nécessaire à la mesure de notre bilan thermique.

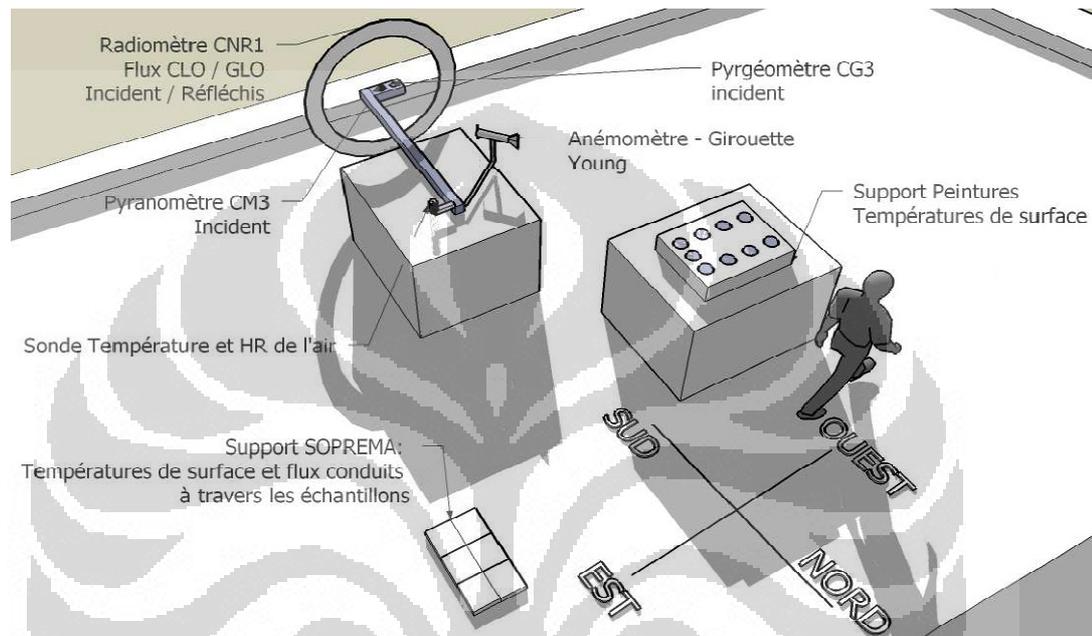


Figure 5. Disposition du matériel expérimental du banc XP1

Les grandeurs radiatives incidentes de grandes et courtes longueurs d'ondes sont mesurées avec un radiomètre<sup>3</sup> regroupant un pyranomètre CM3 et un pyrgéomètre CG3. Les propriétés de l'air ambiant circulant au dessus des surfaces exposées nécessaires à calculer les échanges convectifs sont mesurées par un anémomètre-girouette et une sonde température/humidité relative. Le bilan de surface s'écrit alors de la manière suivante :

$$\varphi_{sol,absorbé} + \varphi_{GLOnet} + \varphi_{cond} = \varphi_{conv} \quad \text{Équation 5}$$

Où

$$\begin{aligned} \varphi_{sol\ absorbé} &= \alpha \cdot E_{sol} \\ \varphi_{GLOnet} &= \varepsilon \cdot (E_{atm} - \sigma \cdot T_s^4) \\ \varphi_{conv} &= h_c \cdot (T_s - T_{air}) \end{aligned}$$

<sup>3</sup> CNR1 de Kipp & Zonen ©

L'émissivité GLO,  $\varepsilon$  est connue (mesure présentée précédemment), de plus des mesures effectuées suite à l'exposition des disques à l'extérieur n'ont pas révélé de modification. L'éclairement solaire, le rayonnement atmosphérique, la température de surface et la température de l'air sont mesurés. L'absorptivité CLO de la surface,  $\alpha$ , et le coefficient de convection  $hc$  restent à déterminer, ce dernier pourrait se calculer grâce aux équations semi empiriques utilisées pour les plaques planes. L'ensemble des données physiques mesurées pour les différentes composantes du bilan thermique doivent nous permettre de constater les performances réelles de chaque échantillon sous le climat Rochelais et nous permettre d'ajuster précisément le bilan radiatif et convectif de surface au fil du temps. Les précisions sur les mesures effectuées, décrites ci-dessus, sont résumées dans le tableau 1.

Notre centrale de mesure fonctionne en 8 entrées différentielles (DF), auxquelles se rajoutent deux multiplexeurs comportant chacun 16 voies de mesures différentielles pour augmenter le nombre de voies. La résolution des mesures pour la gamme de tension mesurée par nos capteurs est de  $0,333\mu\text{V}$  en mode unipolaire pour une plage de mesures s'étendant entre  $\pm 2,5\text{mV}$  soit  $333\mu\text{V}$  pour  $\pm 2500\text{mV}$ . Ces caractéristiques appliquées à notre dispositif permettent une résolution de  $3,3 \text{ W/m}^2$  pour les mesures de flux radiatifs et de  $0,01^\circ\text{C}$  pour les températures.

Tableau 1 . Précision des mesures

Variable	Type de capteur	Précision de la mesure
Température de surface échantillons de cuivre, $T_{sc}$ (°C)	Mesurex type K	$\pm 0.3^\circ\text{C}$ calibré
Température de surface échantillons SOPREMA, $T_{sr}$ (°C)	Mesurex type K	$\pm 0.3^\circ\text{C}$ calibré
Température de l'air extérieur, $T_a$ (°C)	Vaisala HMP50C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
Humidité relative de l'air, $HR$ (%)	Vaisala HMP50C	
	Précision entre 0 – 90%	$\pm 3\%$
Vitesse du vent, $\omega$ (m/s)	Précision entre 90 – 98%	$\pm 5\%$
	Anémomètre YOUNG 05103 Seuil de démarrage : 1.0 m/s	$\pm 0.3$ m/s
Direction du vent, $\gamma$ (°)	Girouette YOUNG 05103, Seuil de démarrage pour $10^\circ$ de déplacement : 1.1 m/s	$\pm 3^\circ$
Flux solaire radiatif, $E_{sol}$ (W/m <sup>2</sup> )	CNR1 KIPP & ZONEN, pyranomètre CM3	$\pm 3\%$
Flux GLO radiatif atmosphérique, $\phi_{ciel}$ (W/m <sup>2</sup> )	CNR1 KIPP & ZONEN, pyrgéomètre CG3	$\pm 3\%$

#### 4.2. Traitement des données par bilan thermique de surface

Huit échantillons ont été testés en continu sur le banc du 24 novembre 2010 au 8 avril 2011, mais à cause de la limitation de la date, nous traitons seulement un matériel Soprastar. Les 2 capteurs CG3 du radiomètre CNR1 90 (pyrgéomètre) effectuent la mesure du rayonnement grande longueur d'onde (GLO) émis par la voûte céleste et l'environnement compris entre des longueurs d'onde de 4,5 à 42  $\mu\text{m}$ . Dans un premier temps, comme notre équation de bilan énergétique de surface (Équation 5) ne prend pas en compte les termes d'évaporation ou de condensation, il est nécessaire d'éliminer l'ensemble des données où de tels épisodes sont susceptibles d'intervenir (Doya 2010). Toutes les trois de traitement des données ci-dessous sont créées par Doya et être utilisées pour diminuer l'incertitude de la mesure. Pour en instant, on n'applique pas encore dans notre travail. On va les employer pour le travail d'avenir (calcul de la valeur de réflectivité solaire sous python).

## Élimination des jours de pluie

La mesure de pluviométrie présentant de nombreuses erreurs, nous avons classé en journées de pluie potentielle, l'ensemble des jours où l'ensoleillement incident mesuré et inférieurs à 80% de l'ensoleillement modélisé par un modèle de ciel clair. L'évaluation de la clarté du ciel se fait grâce à un modèle simplifié de l'ensoleillement global reçu en un site pour une latitude, une longitude et une épaisseur atmosphérique données. Pour la détermination des ciels clairs, les valeurs des mesures expérimentales supérieures aux valeurs calculées sont remises (fort rayonnement diffus) à la valeur calculée, de cette manière la somme des pics d'éclairement dus au rayonnement solaire diffus ne reflète pas un excès de clarté du ciel.

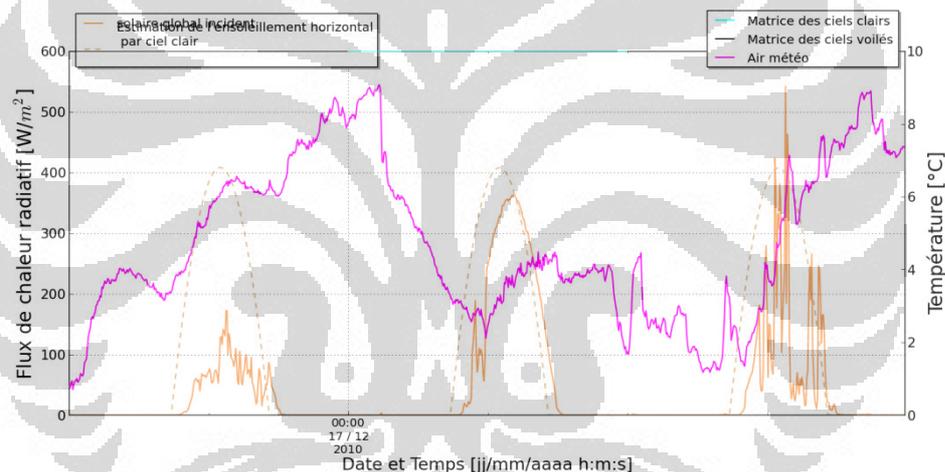


Figure 6. Reconnaissance des ciels clairs par ratio de l'éclairement solaire mesuré sur l'éclairement solaire calculé

On observe entre l'éclairement solaire mesuré et l'éclairement solaire calculé :

- des atténuations fortes parfois,
- des dépassements des valeurs maximum anormales

Cela peut être dû à la présence de nuage et à la présence de réflexions diffuses mais aussi aux périodes « lever et coucher du soleil » sensibles à l'imprécision du calcul et du matériel de mesure.

## Élimination des cas de condensation

Pour les mêmes raisons, nous avons éliminé les mesures où un risque de condensation est calculé. En supposant que de tels épisodes interviennent lorsque la température des disques,  $T_s$ , devient inférieure à la température de rosée de l'air calculée,  $T_{dp}$  ambient. Nous avons ensuite fait l'hypothèse que le volume de condensat au cours du temps était proportionnel à  $T_s - T_{dp}$ .

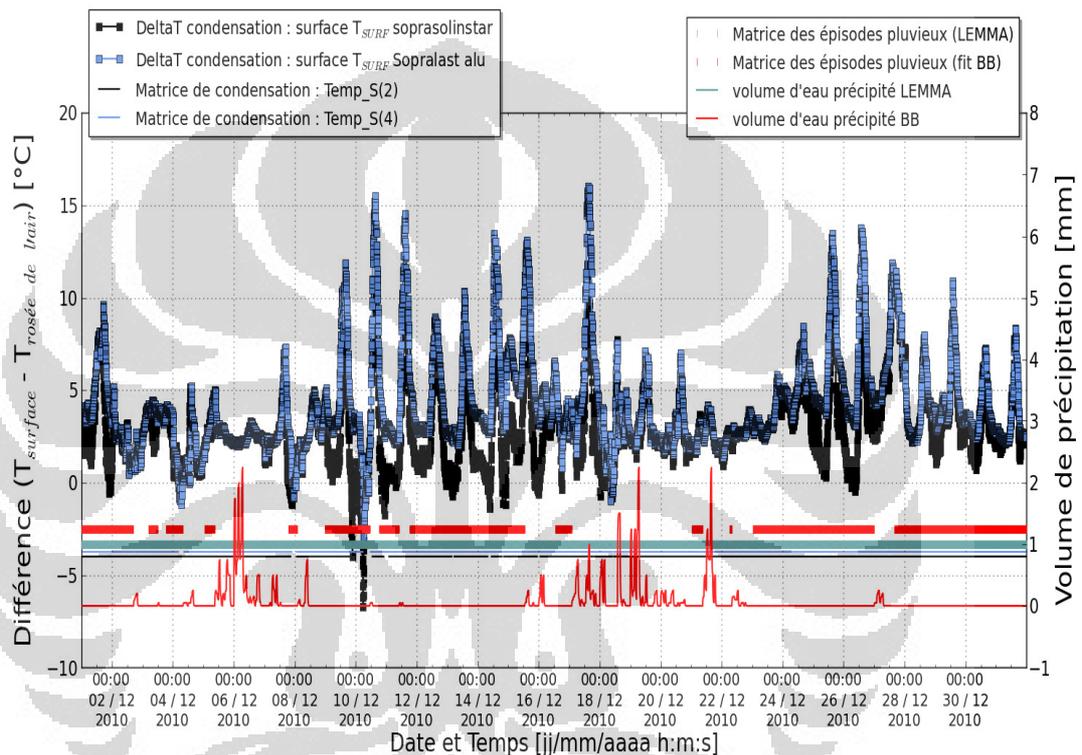


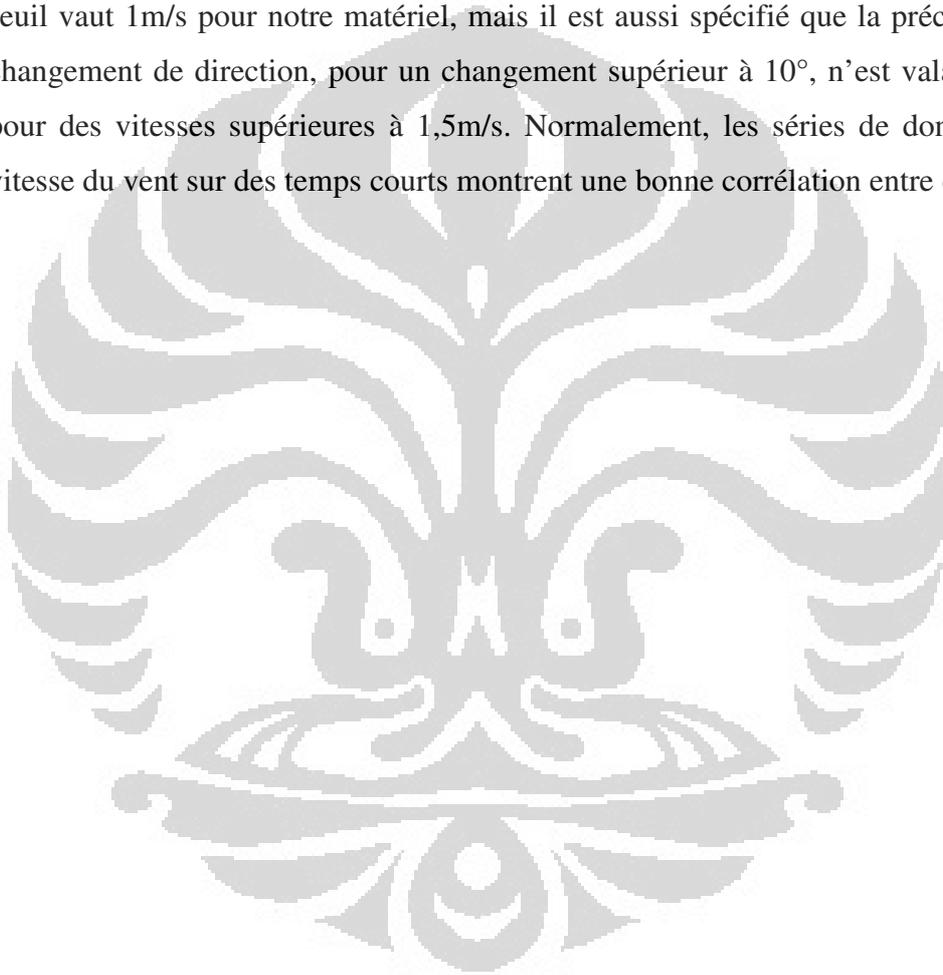
Figure 7. Épisode de condensation

L'algorithme pour éliminer cette condition (Clar et.al) :

- tant qu'il n'y a pas de risque de condensation, on fixe la valeur d'un potentiel de condensat,  $S_0$  à 0
- pour un pas de temps  $i$  où la différence de température évaluée  $T_s - T_{dp} < 0$ , on estime le condensat  $S_i = S_{i-1} + f(T_s - T_{dp})$
- on exclue des points de mesures l'ensemble des valeurs de  $S$  inférieur à 0.

### **Élimination des vitesses de vents anormales**

Notre anémomètre girouette présente les inconvénients classiques du système potentiométrique. Dans le cas d'absence de vent la girouette est immobile, mais dans une position quelconque, et le système d'acquisition identifiera cette direction comme une direction de vent. Et on ne peut discriminer parfaitement ce cas en utilisant l'information vitesse du vent, car l'anémomètre présente un seuil en dessous duquel il ne mesure plus correctement non plus la vitesse du vent. Ce seuil vaut 1m/s pour notre matériel, mais il est aussi spécifié que la précision du changement de direction, pour un changement supérieur à 10°, n'est valable que pour des vitesses supérieures à 1,5m/s. Normalement, les séries de données de vitesse du vent sur des temps courts montrent une bonne corrélation entre elles.



## 5. Détermination par la mesure de la réflectivité et de l'absorptivité solaire

Les coefficients de convection surfacique sont identiques pour l'ensemble du support et des échantillons. Avec la valeur des émissivités GLO étant connue, tout d'abord nous allons déterminer la valeur des variables A, B, exp. et hnat. Ensuite, nous employons ces valeurs pour calculer les valeurs d'albédo en considérant l'impact de vieillissement du matériel, la nébulosité, l'humidité relative et l'angle d'incidence solaire.

### 5.1. Présentation du programme de traitement des mesures

Nous présentons l'organigramme des étapes de détermination les valeurs du coefficient  $h_c$ , l'absorptivité solaire et l'albédo en utilisant deux méthodes, méthode 1 et 2 (figure 8 et 9). A partir d'équation 5, nous écrivons l'équation du coefficient d'échange par convection,  $h_c$  qui est reliée avec les variables A et B.

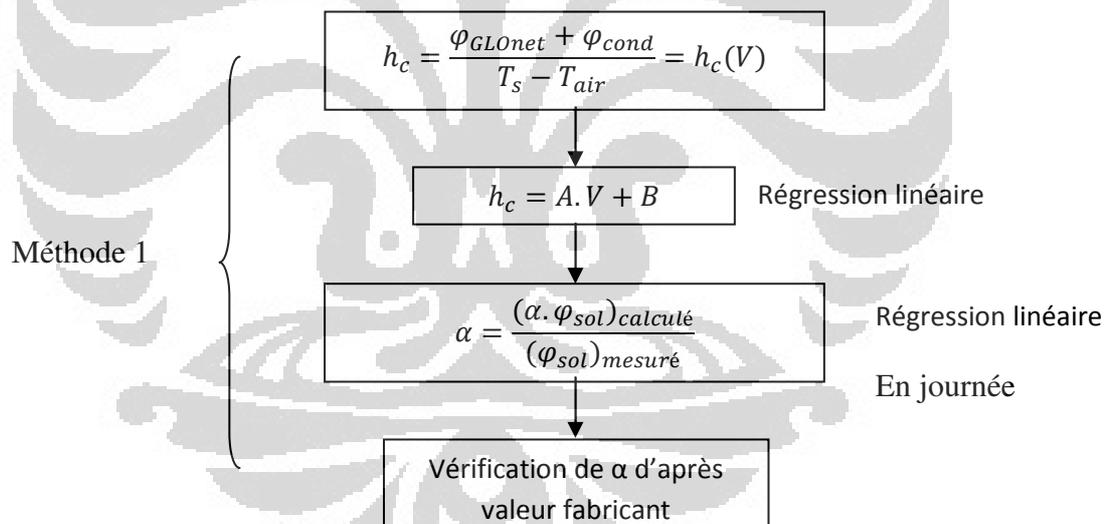


Figure 8. Les étapes de détermination des valeurs de  $\alpha$

Dans ce cas, nous travaillons en période nocturne pour simplifier le problème et aussi en connaissant que à ce moment la, la vitesse du vent n'est pas très élevée. Par conséquence, pendant la nuit, le flux solaire incidence égale à zéro. La valeur  $\alpha$  peut être déterminée par la comparaison entre  $(\alpha \cdot \varphi_{sol} \text{ absorbé})$  qui vient du calcul de bilan thermique et  $\varphi_{sol}$  qui est trouvé par la mesure.

On a besoin d'ajustement pour vérifier le bilan thermique sur la surface de matériel. Pour cette objective, on modifie l'équation 5 en fonction du temps.

$$f(t) = \varphi_{conv} - \varphi_{sol\ absorbé} - \varphi_{GLOnet} - \varphi_{cond} \quad \text{Équation 6}$$

Si on obtient  $f(t)$  égale à zéro tous les temps, c'est-à-dire que les valeurs qui sont existe dans cette équation sont bonne.

Nous employons la méthode 2 pour comparer le résultat de la méthode précédente.

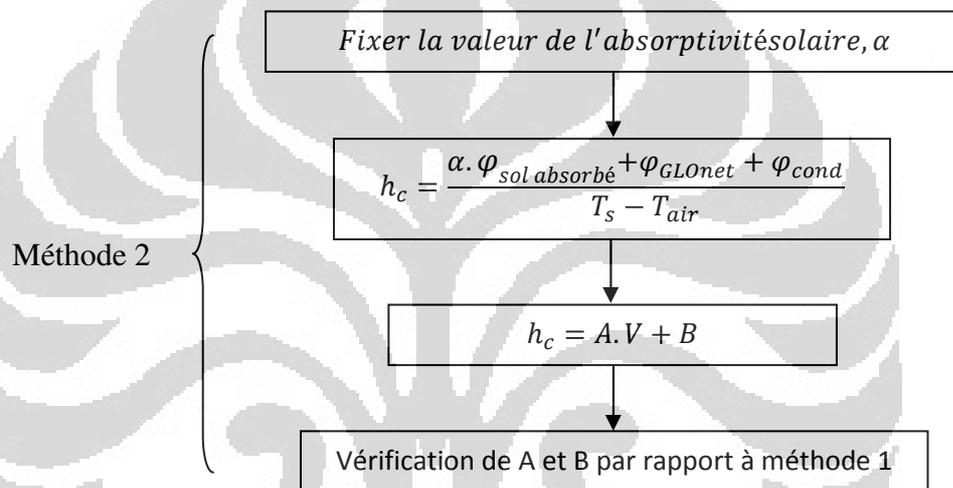


Figure 9. La méthode 2

Nous allons comparer le résultat qui est obtenu par les deux méthodes, et s'ils sont bons, alors nous pourrons continuer le travail de calcul de l'albédo en considérant l'effet de vieillissement du matériel, la nébulosité, l'humidité relative et l'angle d'incidence solaire.

## 5.2. Résultats et analyse

A partir d'équation précédente (équation 5) pour trouver les valeurs de l'absorptivité solaire ( $\alpha$ ), nous allons calculer les valeurs de l'albédo d'après la formule suivante :

$$\rho = 1 - \alpha \quad \text{Équation 7}$$

### Méthode 1

Dans cette méthode nous traçons les valeurs du coefficient  $h_c$  qui vient du calcul et la vitesse du vent qui est obtenu de la mesure.

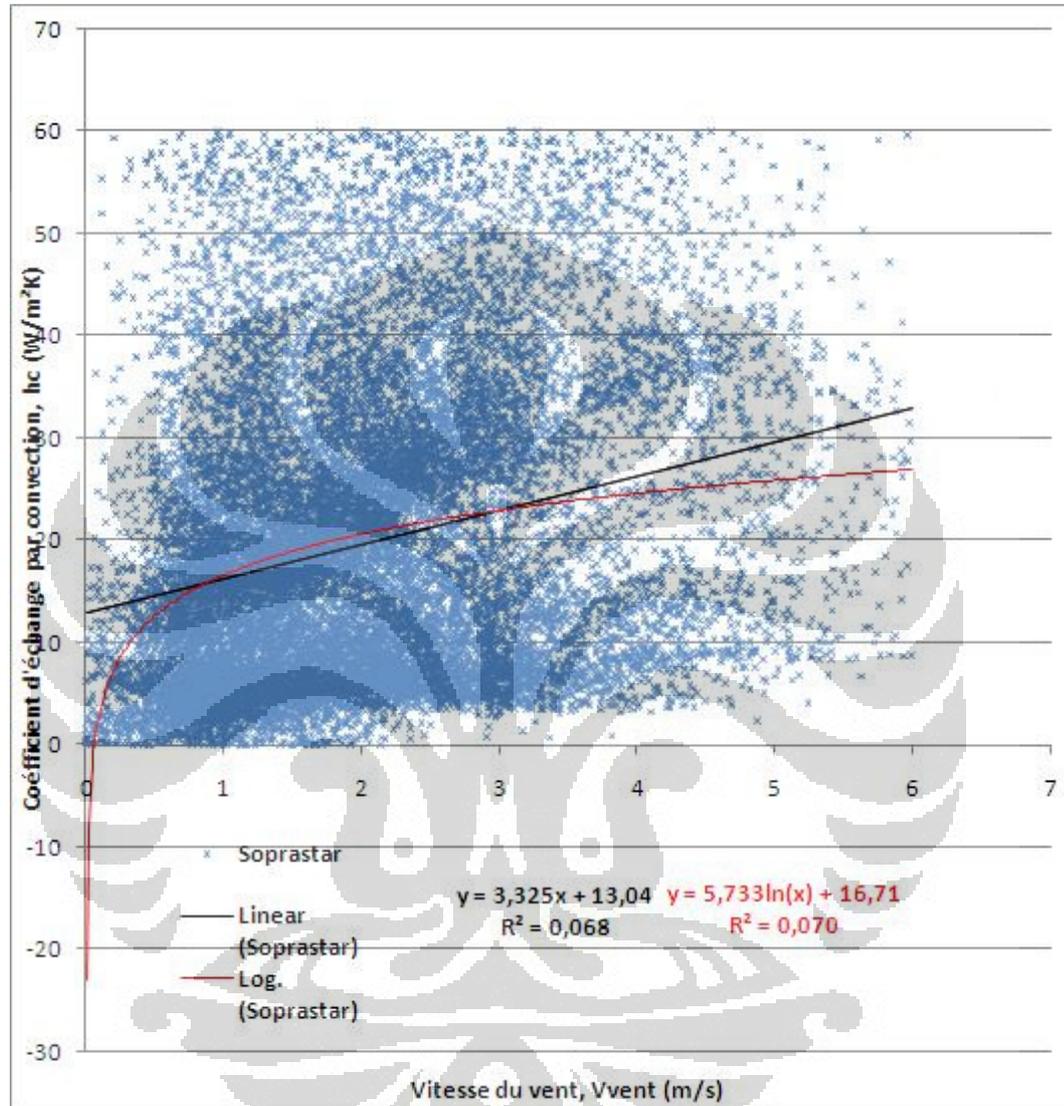


Figure10. Évolution de la vitesse du vent sur le coefficient d'échange par convection

De la figure 10 :

- il y a 2 tendances du nuage de point
- on approche la figure 1 avec la régression, linéaire et le logarithmique.
- on veut analyser les zones qui sont situées au sous (zone 1) et au dessous (zone 2)

## Zone 1

### Détermination hc, A et B (nocturne)

Les conditions limitées :

- $E_{sol} \leq 0$
- $T_{ciel} < -1$
- Filtre de condensation
- $T_s - T_a \geq 1$

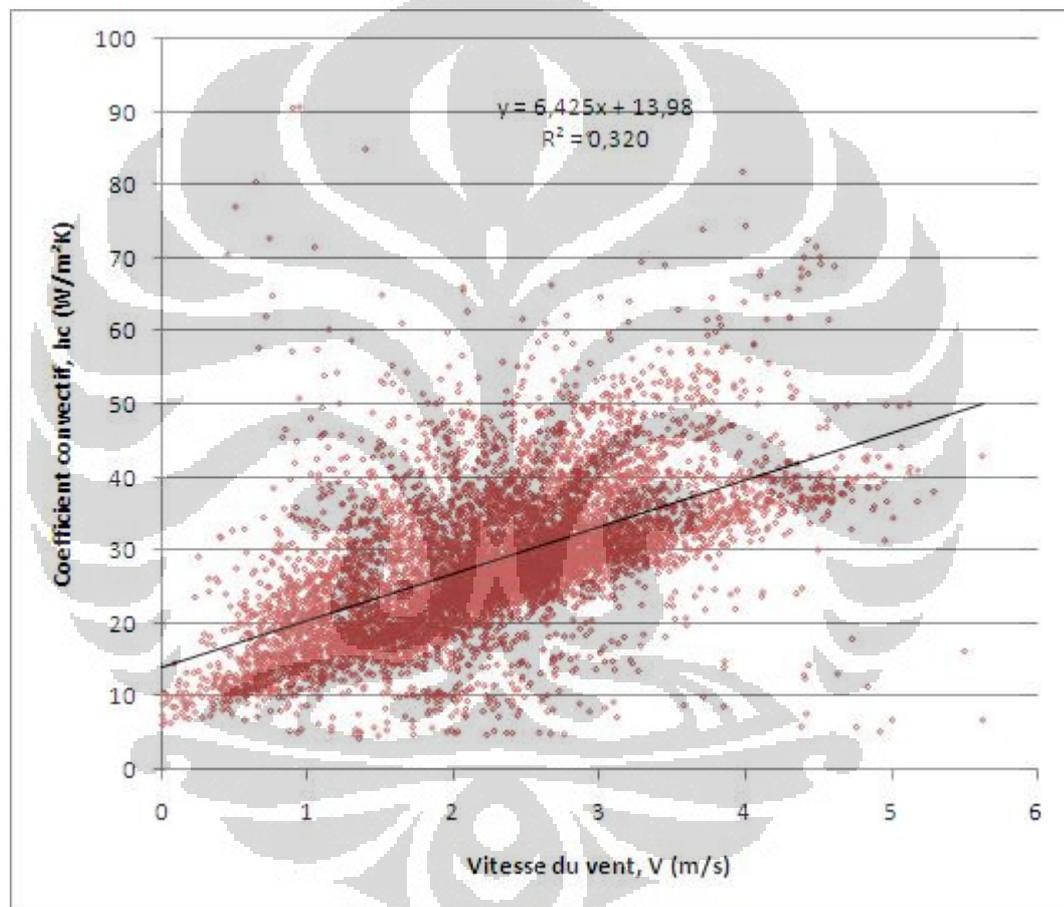


Figure 11. Évolution de la vitesse du vent sur le coefficient convectif

On a :

- $A = 6,425$
- $B = 13,98$

### Calcul $\alpha$ et $\rho$ (diurne)

Les conditions limitées :

- $E_{sol} > 0$
- $T_{ciel} < -1$
- Filtre de condensation
- $T_s - T_{s'} \geq 1$

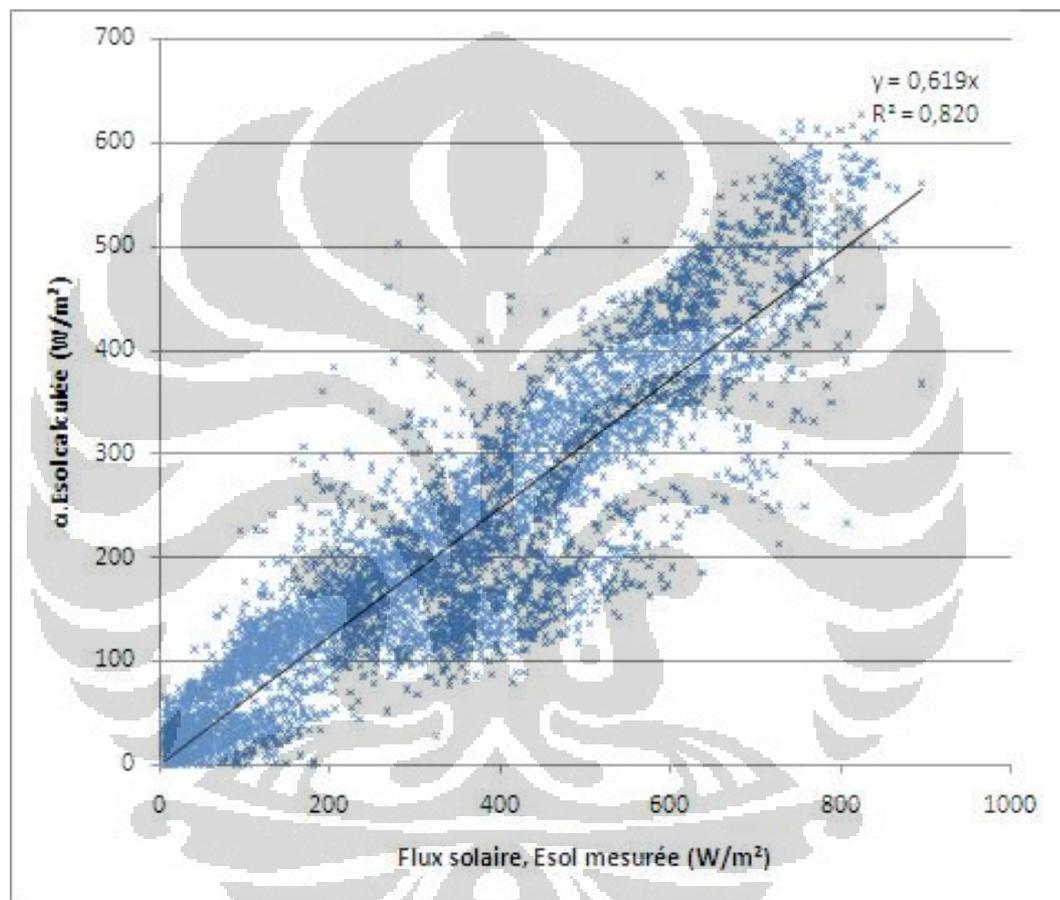


Figure 12. Détermination l'absorptivité solaire

On a :

-  $\alpha = 0,619$

-  $\rho = 0,381$

### Évaluation le bilan thermique (nocturne et diurne)

- $E_{sol} \geq 0$

- $T_{\text{ciel}} < -1$
- Filtre de condensation
- $T_s - T_{\text{s}} \geq 1$
- $\alpha \cdot E_{\text{sol}} \geq 0$

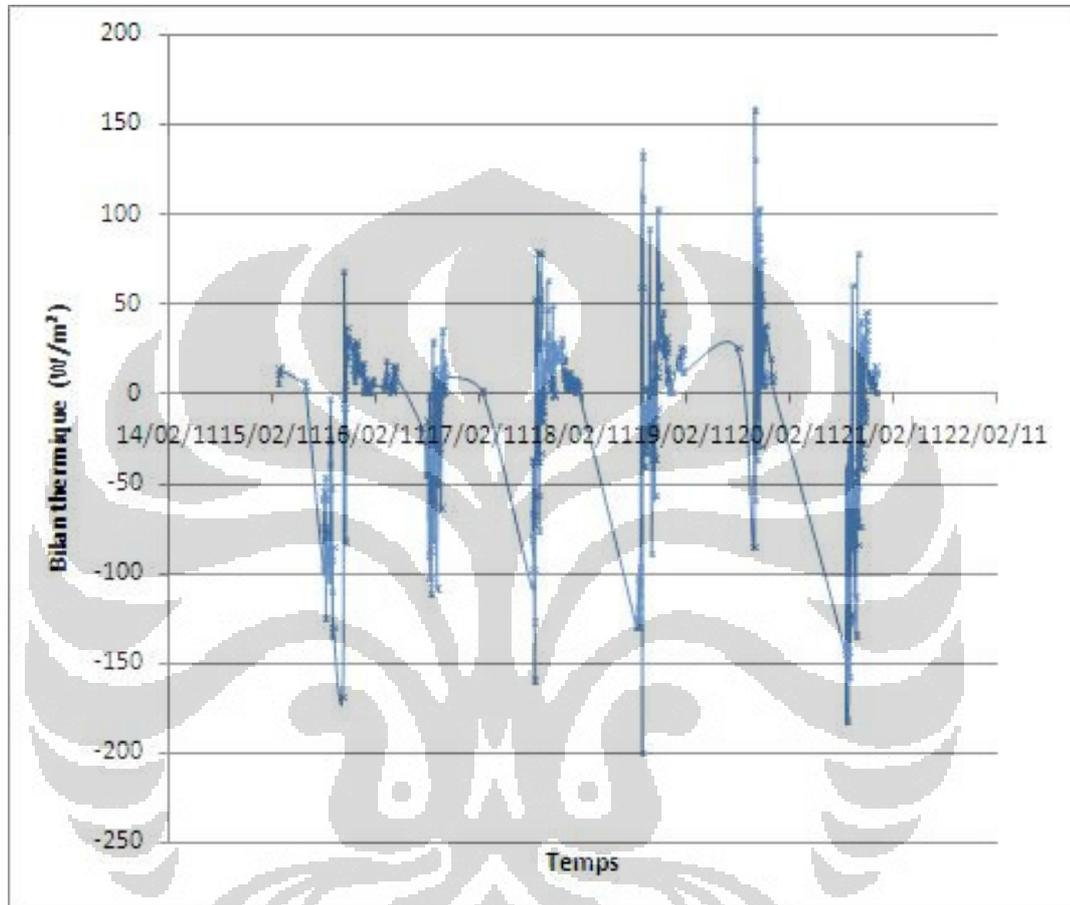


Figure 13. Évolution du bilan thermique en fonction du temps

Commentaire :

- le bilan thermique n'est pas bon
- la réflectivité solaire est très petite ( $\rho = 0,381$ ) comparé avec la valeur de fabricant (0,78)
- dans ce cas, la température ciel joue en rôle

## Zone 2

### Détermination $h_c$ , A et B (nocturne)

Les conditions limitées :

- $E_{sol} \leq 0$
- $T_{ciel} > -1$
- Filtre de condensation
- $T_s - T_a \geq 1$

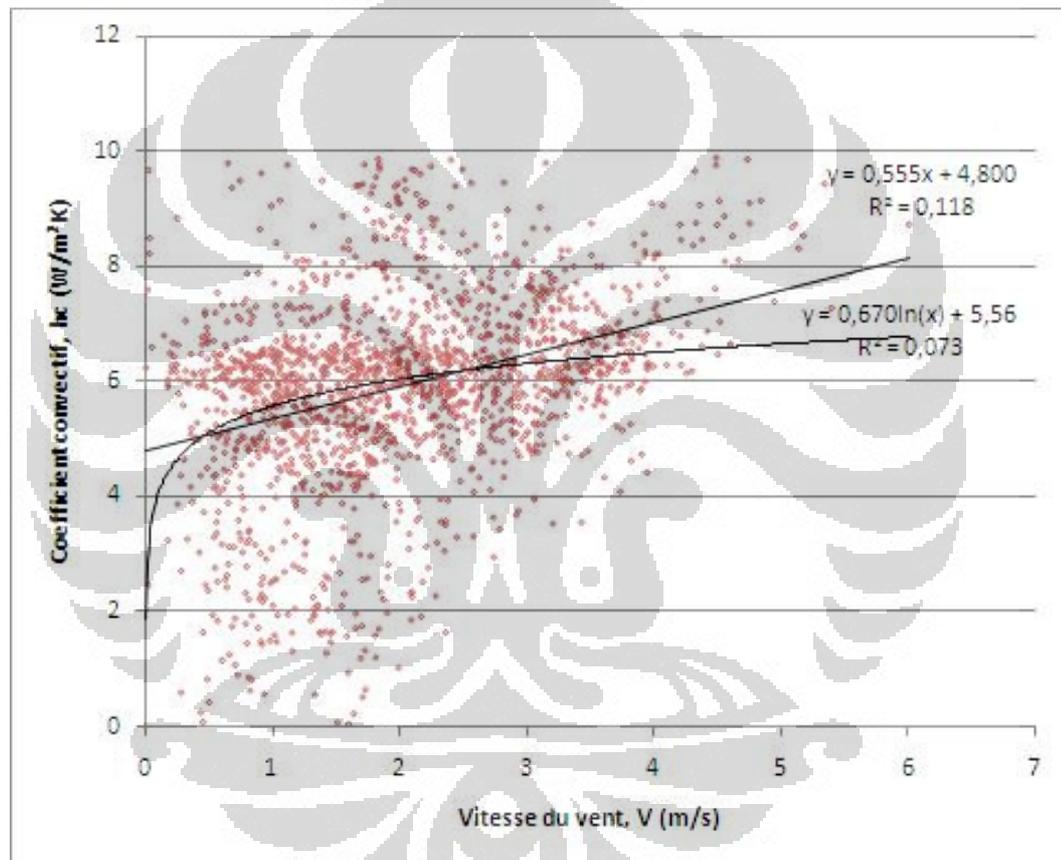


Figure 14. Évolution de la vitesse du vent sur le coefficient convectif

De la figure 4, il y a 2 régressions. On a choisi  $y = 0,555x + 4,8$  parce que il a la  $R^2$  plus élevée. Donc :

- $A = 0,555$
- $B = 4,8$

### Calcul $\alpha$ et $\rho$ (diurne)

Les conditions limitées :

- $E_{sol} > 0$
- $T_{ciel} > -1$
- Filtre de condensation
- $T_s - T_a \geq 1$

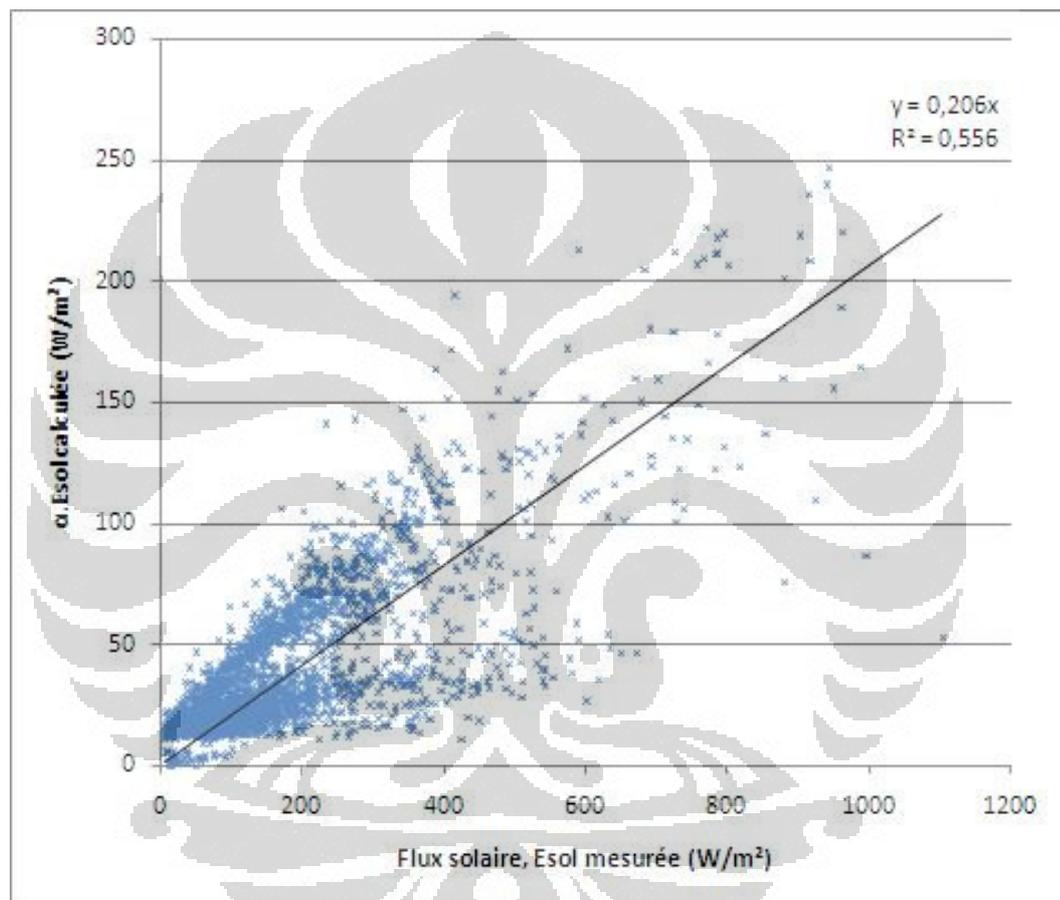


Figure 15. Détermination l'absorptivité solaire

On a :

- $\alpha = 0,206$
- $\rho = 0,794$

### Évaluation le bilan thermique (nocturne et diurne)

- $E_{sol} \geq 0$

- $T_{\text{ciel}} > -1$
- Filtre de condensation
- $T_s - T_a \geq 1$
- $\alpha \cdot E_{\text{sol}} \geq 0$

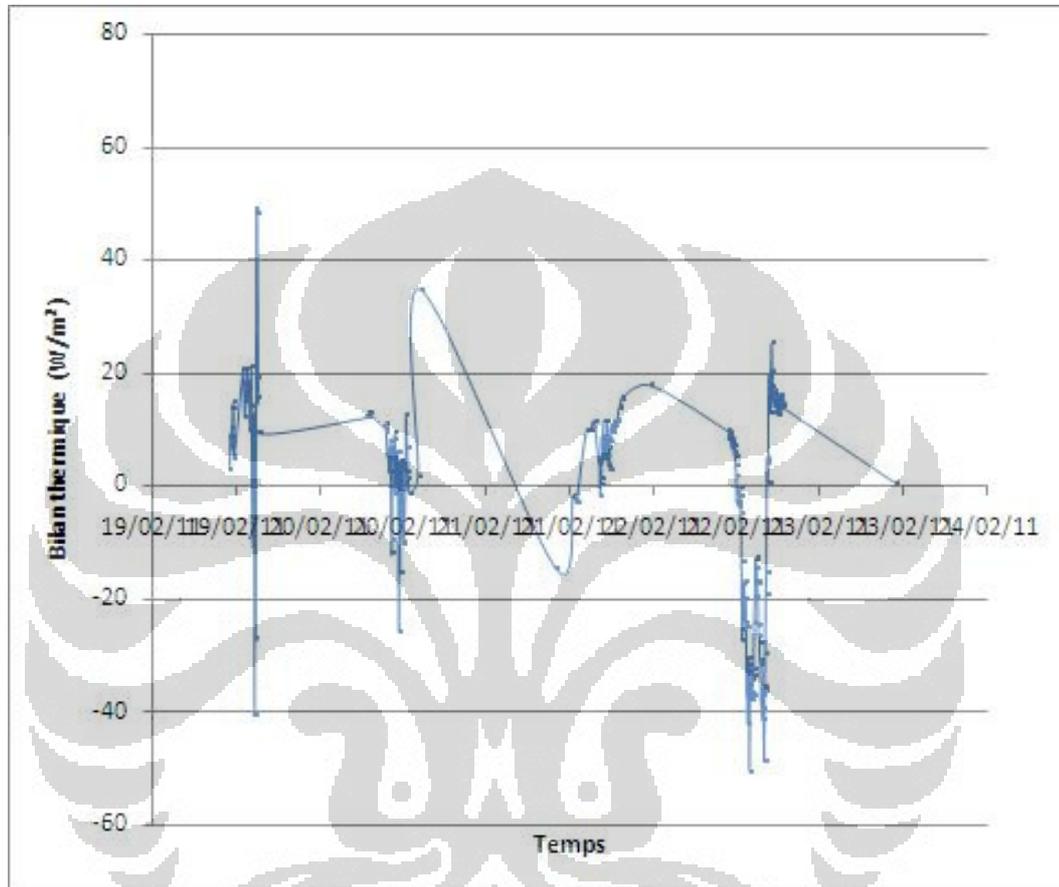


Figure 16. Bilan thermique en fonction du temps

Commentaire :

- le bilan thermique montre une fluctuation irrégulière de temps en temps qui correspond avec la condition micro climat autour du banc expérimental
- la réflectivité solaire est mieux ( $\rho = 0,794$ ) que la valeur de fabricant (0,78)
- dans ce cas, la température ciel joue en rôle
- La résultat du calcul d'albédo et bilan thermique pour la zone 2 est meilleure que la zone 1. Donc, on va étudier la variation des paramètres dans cette zone.

Pour les conditions :

- filtre condensation
- $-7 < T_{ciel} < 20$
- $T_s - T_a \geq 1$

On a obtenu :

- ✓  $A = 0,359$  et  $B = 5,564$
- ✓  $\alpha = 0,218$  et  $\rho = 0,782$
- ✓ Le bilan thermique est meilleur

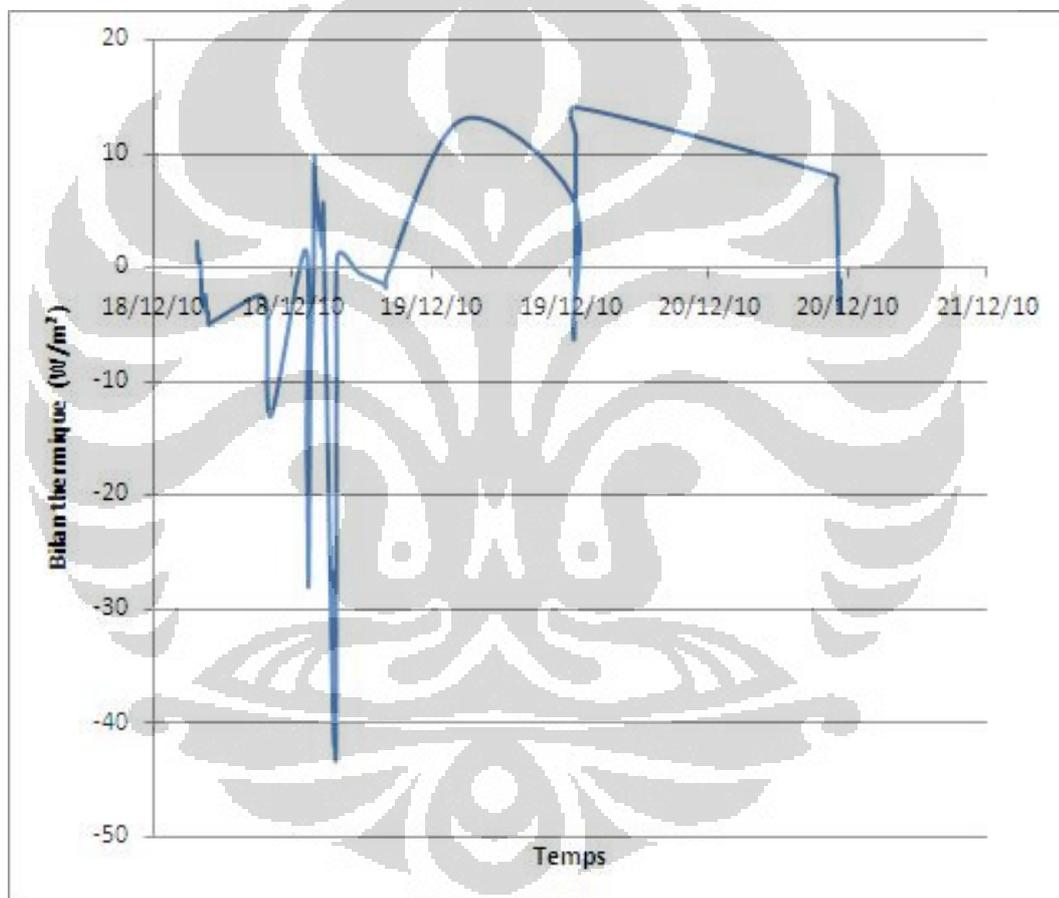


Figure 17. Bilan thermique en fonction du temps

De la figure 17, nous savons que :

- le bilan thermique quelque fois sont négatif ou positif
- de 18 à 20 décembre 2010, la valeur maximum de bilan thermique est  $14 \text{ W/m}^2$ , tandis que la sa valeur minimum est  $-43 \text{ W/m}^2$ .

Voici dessous le tableau des variations de condition pour obtenir la réflectivité solaire.

Tableau 2. Résultat de calcul

	N°	Esol	Tciel	Ts-Ta	A	B	Période	$\alpha$	$\rho$	Bilan thermique moyenne
Superieur	1	$\leq 0$	$< -1$	$\geq 1$	0,645	13,98	nocturne			2,193
		$> 0$	$< -1$	$\geq 1$			diurne	0,619	0,381	
Inferieur	1	$\leq 0$	$> -1$	$\geq 1$	0,555	4,8	nocturne			26,306
		$> 0$	$> -1$	$\geq 1$			diurne	0,206	0,794	
	2	$\leq 0$	$-.7 < Tc < 20$	$\geq 1$	0,321	5,564	nocturne			24,955
		$> 0$	$-.7 < Tc < 20$	$\geq 1$			diurne	0,218	0,782	

- On remarque le résultat de calcul de l'albédo qui proche de la valeur fabricant avec le couleur rouge

## Méthode 2

A la méthode suivante, nous avons fixé la valeur  $\alpha$  égale à 0,22 (la valeur sandard fabricant). Cette valeur est utilisé pour retrouver le coefficient d'échange par convection et les constante A et B. On peut trouver la valeur de hc en comparaison entre l'ensemble de somme du flux solaire, flux GLO net et flux conduit avec l'écart de la température entre la surface du matériel et l'air.

Nous voulons évaluer les valeurs de constante A et B en période diurne et nocturne comme afficher par la figure 18.

En période nocturne, il n y a pas du rayonnement solaire, donc Esol égale à zéro.

Nous obtenons le résultat comme suivante.

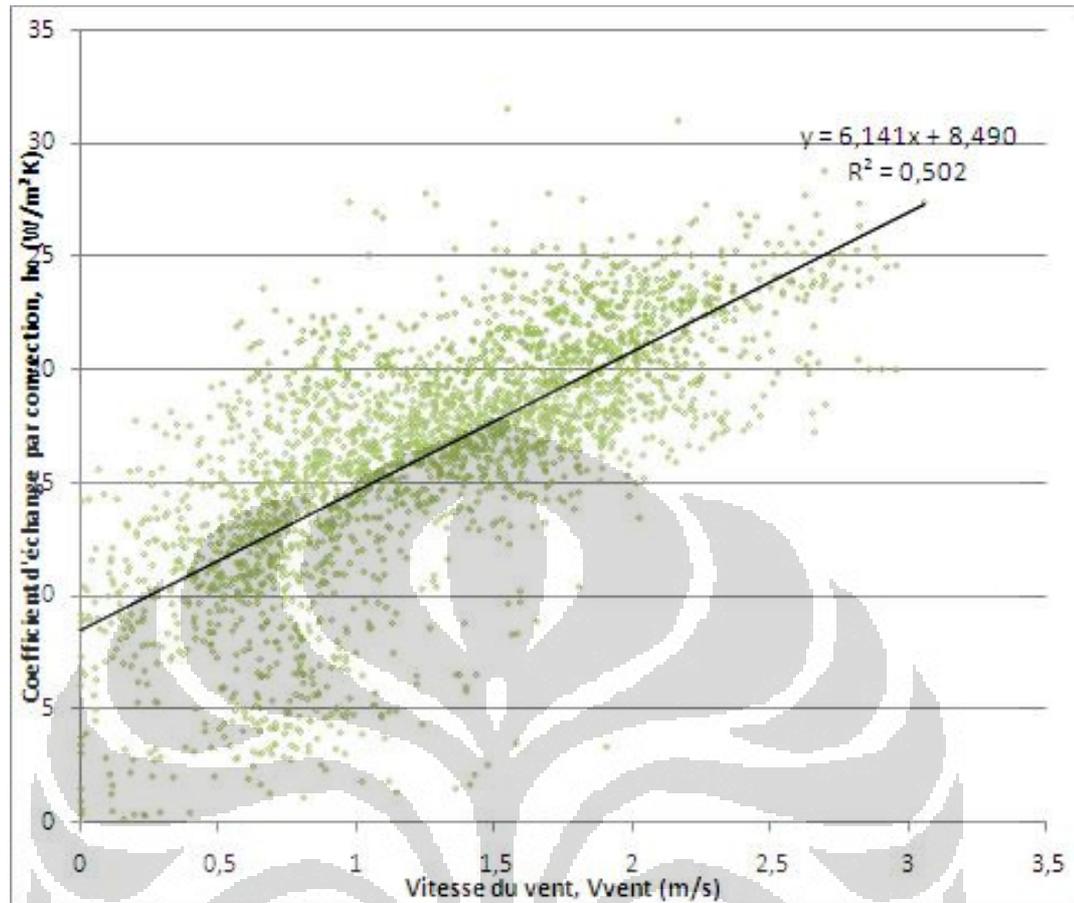


Figure 18. Évolution de la vitesse du vent sur le coefficient d'échange par convection en période nocturne

De la figure 18 nous trouvons que :

- la valeur  $A = 6,141$  et  $B = 8,490$
- ça c'est la dispersion des données pour la température du ciel moins de  $-2^{\circ}\text{C}$  et l'écarte de la température de surface du matériel et l'air supérieur de  $3^{\circ}\text{C}$



## 6. Conclusion et perspectives

Dans ce projet, nous avons étudié deux méthodes pour déterminer les propriétés thermo-optiques de revêtement des toitures terrasses (l'absorptivité et la réflectivité solaire). Pour ce faire, un banc expérimental a été développé spécialement et permet de mesurer en fonction du temps les échanges radiatifs (CLO et GLO), les flux échanges par conduction, la vitesse du vent et les températures de surface et d'air.

Les résultats de calcul montrent que :

- la méthode 1 produit la réflectivité solaire proche de la valeur fabricant pour l'écarte de la température de surface du matériel et l'air supérieur de  $1^{\circ}\text{C}$
- La dispersion de nuage des points de la courbe entre le coefficient convectif et la vitesse du vent est mieux pour la température du ciel moins de  $2^{\circ}\text{C}$  et la delta température entre  $T_s$  et  $T_a$  supérieur de  $3^{\circ}\text{C}$

Par la suite nous proposons d'évaluer l'impact du vieillissement des matériaux, la nébulosité, l'humidité relative et l'angle d'incidence solaire.

## Référence

- Akbari, H., L. S. Rose, and S. Stern. (2008). Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies, *Solar Energi*, 82, 648-655.
- Akbari, H., L. S. Rose, and H. Taha. (2003). Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos, *Landscape and Urban Planning*, 63, 1-14.
- Akbari, H. and L.S. Rose. (2001a). Characterizing the fabric of the urban environment: A case study of metropolitan Chicago, Illinois, *Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL-49275, Berkeley, CA*.
- Akbari, H., and L. S. Rose. (2001b). Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Salt Lake City, Utah, *Lawrence Berkeley National Laboratory Report No. LBNL-47851, Berkeley, CA*.
- Akbari, H., M. Pomerantz and H. Taha. (2001). Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas, *Solar Energy*, 70(3), 295–310.
- A. Synnefa, M. Santamouris, and H. Akbari. (2007). Estimating the effect of using cool coating on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Building*, vol. 39, 1167-1174.
- A. Trabelsi, M. Doya, E. Bozonnet, P. Salagnac, R. Belarbi, R. Perrin. (2010). Caractérisation expérimentale de propriétés radiatives de revêtement en toiture: Application à un bâtiment industriel.
- Clear, R. D., L. Gartland, et al. (2001). An empirical correlation for the outside convective air-film coefficient for horizontal roofs, *Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- Doya, M. (2010). Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense. *Université de La Rochelle*.
- Exigences du CLAS-Document 5. (2003). Exigences générales concernant l'évaluation et l'expression de l'incertitude des résultats de mesure.

- Gueymard, C. A. (2006). Reference solar spectra: Their evolution, standardization issues, and comparison to recent measurements. *Advances in Space Research* **37**(2), 323-340.
- Kollie, T. G., F. J. Weaver, et al. (1990). Evaluation of a commercial, portable, ambient temperature emissiometer. *Review of scientific instruments CODEN RSINAK* **61**(n.5), pp. 1509-1517.
- M.R Yaïche et S.M.A Bekkouche, Conception et Validation d'un Programme Sous Excel pour l'Estimation du Rayonnement Solaire Incident en Algérie. Cas d'un Ciel Totalemment Clair, *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 11, N.3, pp. 423 – 436, 2008.
- Pomerantz, M., H. Akbari, P. Berdahl, S. J. Konopacki and H. Taha. (1999). Reflective surfaces for cooler buildings and cities, *Philosophical Magazine B*, **79**(9), 1457–1476.
- Rosenfeld, A. H., J. J. Romm, H. Akbari, and M. Pomerantz. (1998). Cool Communities: Strategies for Heat Islands Mitigation and Smog Reduction, *Energy and Buildings*, **28**(1) 51–62.
- S. Bretz, H. Akbari, and A. Rosenfeld. (1998). Practical issues for using solar-reflectivity materials to mitigate urban heat island. *Atmospheric Environment*, vol. 32, 95-101
- Taha, H. 2002. Meteorological and Air Quality Impacts of Increased Urban Surface Albedo and Vegetative Cover in the Greater Toronto Area, Canada, *Lawrence Berkeley National Laboratory Report No. LBNL-49210*, Berkeley, CA.
- Taha, H. (2001). Potential Impacts of Climate Change on Tropospheric Ozone in California: A Preliminary Episodic Modeling Assessment of the Los Angeles Basin and the Sacramento Valley. *Lawrence Berkeley National Laboratory Report No. LBNL-46695*, Berkeley, CA.
- Taha, H., S.-C. Chang and H. Akbari. (2000). Meteorological and Air Quality Impacts of Heat Island Mitigation Measures in Three U.S. Cities, *Lawrence Berkeley National Laboratory Report No. LBL-44222*, Berkeley, CA.