

Caractérisation thermique des cellules photovoltaïques multi-jonction par la méthode 3ω

Emmanuel GIUDICELLI¹, Nadia MARTAJ^{1,2}, Rachid BENNACER³, Y. CUMINAL¹,
et Philippe COMBETTE¹

¹ IES, UMR5214, Université Montpellier II, Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier, France;

² EPF-Ecole d'Ingénieurs, 21 boulevard Berthelot, 34000 Montpellier;

³ LMT CNRS UMR 8535, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Cachan, France

Résumé – Cette étude consiste à calculer la conductivité thermique des cellules photovoltaïques multi-jonctions à couche mince par la méthode 3ω . Cette méthode consiste à envoyer un signal électrique sinusoïdal qui va générer une perturbation thermique dans l'élément. Le système sera décrit par un modèle électrique et un modèle thermique. Le modèle électrique permet de connaître la puissance électrique propagée dans l'échantillon par effet joule. Le modèle décrit le transfert thermique dans l'échantillon qui permet de remonter à la conductivité thermique de la cellule composée du substrat et de la couche mince.

Afin de compléter la démarche expérimentale et quantifier la pertinence du dispositif expérimental et les déviations possibles dues aux imperfections des conditions expérimentales, une simulation numérique CHT (computational heat transfer) 3D a été réalisée.

Nomenclature

P	puissance électrique, [W]
e	épaisseur de la couche mince, [m]
T	température, [K]
t	temps, [s]
l	longueur de l'élément chauffant, [m]
V	tension électrique, [V]
R	résistance, [Ω]
cp	chaleur spécifique à $p=cte$, [J/kg K]
b	rayon de l'élément chauffant, [m]
ω	fréquence angulaire, [$rad.s^{-1}$]
D	diffusivité thermique, [$m^2.s^{-1}$]
I	courant, [A]

Indices

rms	valeur efficace
th	thermique
ac	alternatif
dc	continu
s	substrat
cm	couche mince

Notations

Al	Aluminium
Ga	Galium
Sb	Antimoine
In	Indium

Symboles grecs

α	coefficient de température en résistance (CTR), [K^{-1}]
φ	déphasage, [$^\circ$]
λ	conductivité thermique, [W/m.K]
δ	longueur de pénétration thermique, [m]
η	nombre d'onde, [m^{-1}]

1. Introduction

Les cellules multijonctions sont composées de différents matériaux déposés en couches minces qui permettent une utilisation optimisée du spectre solaire. Ainsi chaque jonction travaille avec son rendement optimum absorbant la plage spectrale qui lui est propre.

Dans une cellule mono jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (notée E_g en eV) sont absorbés et capables de créer des paires électron-trou. Les photons ayant une longueur d'onde inférieure à celle de la bande interdite sont « perdus ». Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans création de paires électrons trous. De plus, lorsque l'énergie apportée par un photon est supérieure à la bande interdite, l'excès d'énergie est dissipé sous forme de chaleur par thermalisation. Une solution, pour limiter les pertes, consiste à utiliser des cellules multi-jonctions comportant plusieurs jonctions réalisées avec des matériaux possédant des gaps décroissants. Ainsi il est possible de mieux exploiter le spectre solaire avec des rendements de conversion plus importants.

Lancées par la crise pétrolière de 1973, les technologies de conversion photovoltaïque sous concentration ont fait l'objet de nombreuses recherches depuis 1975 [1]. Le record du monde est actuellement détenu par la société américaine Solar Junction avec un rendement de 44% mesuré sur une cellule triple jonctions en GaInP/GaAs/GaInNAs de $0,3 \text{ cm}^2$ pour un taux de concentration de 942 X (irradiance directe de 942 kW/m^2).

Le développement des cellules à haut rendement a été notamment motivé par les applications spatiales qui ont besoin d'autonomie énergétique et ne sont pas sensibles aux coûts des modules PV pour des satellites valant plusieurs milliards.

Du fait de leur coût de fabrication encore trop élevé, le PV de 3^{ème} génération est peu utilisé et représente moins de 0.1 % des technologies photovoltaïques commerciaux dans le monde.

Soulignons que grâce à l'expérience ISFOC (Instituto de Sistemas Fotovoltaicas de Concentration) initiée par l'Espagne au cours de laquelle plusieurs champs de systèmes CPV commerciaux (3 MW de systèmes fonctionnant à 500 soleils ou un peu moins) ont été testés en fonctionnement réel pendant plus d'un an, la fiabilité des technologies CPV sous forte concentration du flux solaire commence à être démontrée ce qui facilite le développement de nouveaux projets industriels.

A l'exception des cellules solaires, qui restent des composants technologiquement pointus et chers, les autres composants des dispositifs photovoltaïques sous concentration sont, en principe, relativement peu coûteux en plus d'être facilement disponibles. Ainsi, si on compare le meilleur rendement sans concentrateur d'une triple jonctions GaInP/GaAs/Ge atteignant les 32%, cette même cellule dépasse les 40 % sous concentrateur [7]. Les cellules PV multijonctions à concentration actuelles utilisent comme substrat des semi-conducteurs de Ge ou de GaAs.

Dans notre étude, nous nous intéressons aux cellules à triples jonctions sur substrat de GaSb dont on cherche à mesurer la conductivité thermique.

4 échantillons ont été étudiés en utilisant la méthode 3ω pour réaliser la caractérisation thermique des couches minces epitaxiées.

Parmi les différentes méthodes 3ω employées pour les couches minces, celle que nous utilisons, dite différentielle, consiste à caractériser le substrat seul puis l'ensemble « Substrat + Couches minces ».

Les variations de température sont tracées en fonction de la fréquence du courant injecté dans la cellule. L'approche différentielle consiste à comparer les courbes expérimentales des échantillons comprenant les couches minces à celle obtenue avec le substrat seul de manière à estimer la résistance thermique introduite par les couches minces.

La figure 1 montre le schéma de la structure qui a été utilisée pour la réalisation des échantillons pour la méthode 3ω . Les détails de la composition de la structure sont donnés dans le Tableau 1.

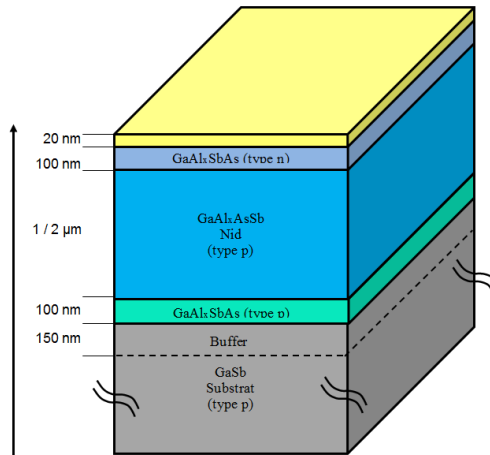


Figure 1 : Schéma de la cellule

Les cellules étudiées sont à 2 épaisseurs différentes, 1 μm et 2 μm . Leurs caractéristiques sont les suivantes :

Structure	Composition x	Composition y	Epaisseur couche d'absorption	Contrainte	Epaisseur couche contact (InAs)
	-	-	μm	ppm	nm
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	0.8	0.068	1	< 100	21
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	0.8	0.068	2	< 80	20
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	0.2	0.018	1	720	19
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	0.2	0.018	2	560	23

Tableau 1 : Compositions des couches minces étudiées en accord de maille sur GaSb

2. Description de la méthode

On injecte dans l'échantillon (Fig.2) un courant sinusoïdal de pulsation ω à travers un fil chauffant de platine (Pt), de longueur 5 mm et largeur 20 μm . La résistance R de ce fil de coefficient de température α est donnée par l'équation 1.

$$R = R_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (1)$$

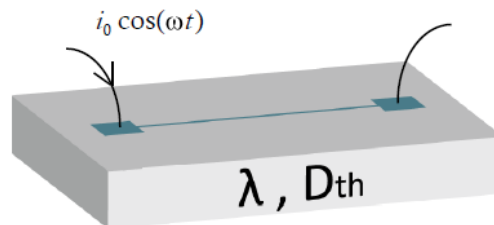


Figure 2 : Schéma de la cellule

Par effet Joule, la puissance dissipée dans cette résistance aura une fréquence deux fois plus élevée que le courant injecté et se composera d'une partie constante (notée dc) ainsi que d'une partie alternative (notée ac) :

$$Q = R * I^2 = \frac{R * I^2}{2} (1 + \cos(2\omega t)) = Q_{dc} + Q_{ac} \quad (2)$$

La puissance va osciller 2 fois plus rapidement. La puissance à 2ω va créer des températures qui varient à la même fréquence mais pas la même phase. Il y aura donc un déphasage lié à la conduction thermique dans le substrat.

$$T(t) = \Delta T_{dc} + \Delta T_{ac} \cos(2\omega t + \varphi) \quad (3)$$

Cette même résistance, dépendant de cette température sinusoïdale, s'écrit :

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T_{dc}) + R_0(\alpha T_{ac} \cos(2\omega t + \varphi)) \quad (4)$$

La tension à ses bornes est donnée par la loi d'Ohm.

$$V = R * I = [R_{dc} + R_{ac} \cos(2\omega t + \varphi)] * I_0 \cos(\omega t) \quad (5)$$

Cette tension possède 3 composantes, respectivement aux pulsations ω , 2ω et 3ω .

$$V = V_{1\omega} \cos(\omega t) + V'_{1\omega} \cos(2\omega t + \varphi) + V_{3\omega} \cos(3\omega t + \varphi) \quad (6)$$

Avec :

$$V_{1\omega} = I_0 R_0(1 + \alpha \Delta T_{dc}) \quad (7)$$

$$V'_{1\omega} = I_0 R_0\left(\frac{1}{2}\alpha \Delta T_{ac}\right) \quad (8)$$

$$V_{3\omega} = I_0 R_0\left(\frac{1}{2}\alpha \Delta T_{ac}\right) \quad (9)$$

Si on explicite $V_{3\omega}$, α fait le lien entre la résistance et la température. Donc 3ω nous donne accès à ΔT_{ac} .

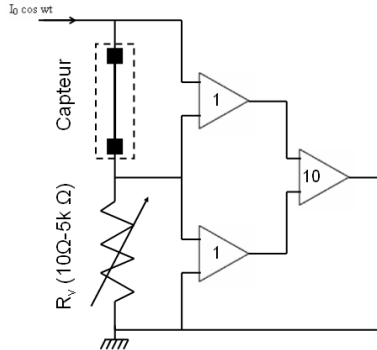


Figure 3 : Conditionnement du signal

Le montage électrique, de la figure 3, utilisé pour la suppression du mode commun dit « différentiel » permet de supprimer la composante fondamentale par ajustement d'une résistance variable, R_v . Par un filtrage, on s'intéresse uniquement à la fréquence 3ω .

Cahill a développé [8] des expressions de ΔT et ϕ en fonction de la conductivité thermique.

Il suppose que la conductivité du fil est infinie, i.e. que la température est la même dans le fil supposé infiniment long.

La variation de la température [8] s'écrit :

$$\Delta T_{ac}(\omega) = \frac{P_{rms}}{\pi \lambda l} \int_0^{+\infty} \frac{\sin^2(\eta b)}{(\eta b)^2 \sqrt{q^2(\omega) + \eta^2}} d\eta \quad (10)$$

avec $q = \sqrt{\frac{2i\omega}{D}}$ et $\eta = \frac{1}{\lambda}$.

Des solutions approchées peuvent être obtenues à partir de cette équation sous certaines conditions. La notion de longueur de pénétration thermique, notée δ , est introduite dans ces solutions car elle joue un rôle prépondérant pour distinguer les différents régimes thermiques intervenant selon la fréquence de l'excitation thermique.

Lorsqu'on envoie un courant sinusoïdal dans l'élément chauffant, la température à sa surface est aussi sinusoïdale déphasée de ϕ . La notation complexe de celle-ci est composée de 2 termes, un terme en phase et l'autre en quadrature.

Dans [2], on trace les parties linéaires des composantes en phase de l'onde thermique dans le substrat avec et sans couche mince dans la figure 4. Par l'approche différentielle, la courbe de l'écart correspond à la résistance thermique de la couche mince représentée dans la figure 5.

La variation de température dans le substrat avec couche mince s'écrit, [2] :

$$\Delta T_{ac,s+cm}(\omega) = \Delta T_{ac,s}(\omega) + \Delta T_{ac,cm} = \Delta T_{ac,s}(\omega) + P_{rms} \frac{e}{l \times 2b \lambda_{cm,\perp}} \tag{11}$$

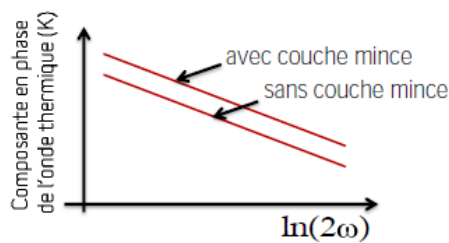


Figure 4 : Composantes en phase de l'onde thermique avec et sans couche mince, [2]

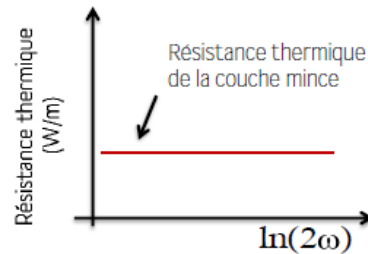


Figure 5 : Résistance thermique de la couche mince [2]

3. Résultats expérimentaux

Des tests ont été réalisés sur le GaSb et GaSb + couche mince (AlGaAsSb avec 20% d'Al).

Les courbes suivantes illustrent :

Fig.6 : les variations de température en phase en fonction de la fréquence pour les deux échantillons.

Fig.7 : La résistance thermique de la couche mince, AlGaAsSb avec 20%.

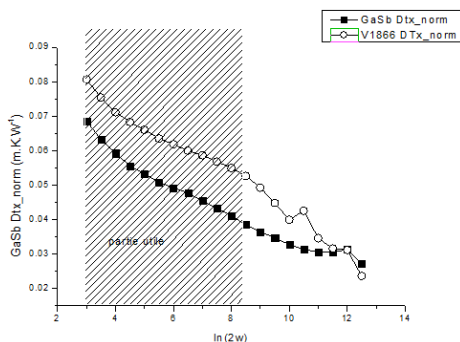


Figure 6 : Variation de la composante en phase de la température du substrat avec et sans AlGaAsSb (20% d'aluminium et une épaisseur de la couche d'absorption de 1μm)

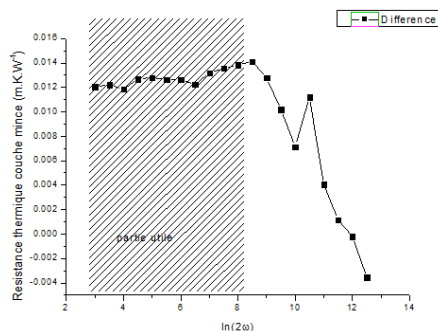


Figure 7 : La résistance thermique de la couche mince AlGaAsSb d'épaisseur 1μm et avec 20% d'aluminium

Les variations de température sont tracées en fonction de la fréquence.

L'approche différentielle consiste à comparer les courbes expérimentales des échantillons comprenant les couches minces à celle obtenue avec le substrat seul de manière à estimer la résistance thermique perpendiculaire introduite par les couches minces [9].

La résistance thermique R_{th} de la couche mince, déterminée expérimentalement, permet d'obtenir la conductivité thermique λ par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{P_{rms} * e}{R_{th} . l . 2 * b} \quad (12)$$

Pour les 4 couches minces étudiées avec substrat, nous obtenons les résultats consignés dans le tableau 2 :

Echantillons	GaSb	n-InAs/ n-GaAl _{0,2} AsSb (1 μ m)	n-InAs/ n-GaAl _{0,2} AsSb (2 μ m)	n-InAs/ n-GaAl _{0,8} AsSb (1 μ m)	n-InAs/ n-GaAl _{0,8} AsSb (2 μ m)
R_0 (Ω)	284,2	265,5	305,9	291,7	310,5
a	$2,1.10^{-3}$	$2,5.10^{-3}$	$2,6.10^{-3}$	$2,0.10^{-3}$	$2,7.10^{-3}$
Résistance thermique couche mince (m.K.W ⁻¹)	$2,78. 10^{-2}$	$1,27.10^{-2}$	$1,60.10^{-2}$	$1,45. 10^{-2}$	$1,68.10^{-2}$
λ (W/m.K)	33	7	11	6.7	10.5

Tableau 2 : Conductivités thermiques des échantillons étudiées

Dans un alliage quaternaire $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$, [3] a montré que cette conductivité est donnée par l'expression suivante:

$$\lambda(x, y) = \frac{1}{R_{th}(x, y)} = \frac{1}{xyR_{thAC} + x(1-y)R_{thAD} + (1-x)yR_{thBC} + (1-x)(1-y)R_{thBD} + x(1-x)C_{A-B} + y(1-y)C_{C-D}} \quad (13)$$

Matériaux	λ	R_{th}	C_{A-B}
	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	m.K/W	m.K/W
AlAs	91	0,011	$C_{As-Sb} = 0,91$
AlSb	57	0,0175	$C_{Al-Ga} = 0,32$
GaAs	45	0,0222	
GaSb	36	0,0278	

Tableau 3 : Conductivité thermique λ et résistivité thermique R_{th} à température ambiante pour des semi-conducteurs III-V, avec les paramètres de diffusion C_{A-B} utilisés dans le calcul de λ et R_{th} .

Où C_{A-B} est le paramètre de diffusion.

$$C_{A-B} = \left[\frac{\sqrt{2\pi}}{3} \frac{e \bar{h}^4 N_{dl}}{(kT)^{1/2} (m_h)^{5/2} (\Delta U_h)^2} \right]^{-1} \quad (14)$$

Où N_{dl} est la densité des alliages, m_h la masse effective des trous et ΔU_h le potentiel de diffusion de l'alliage.

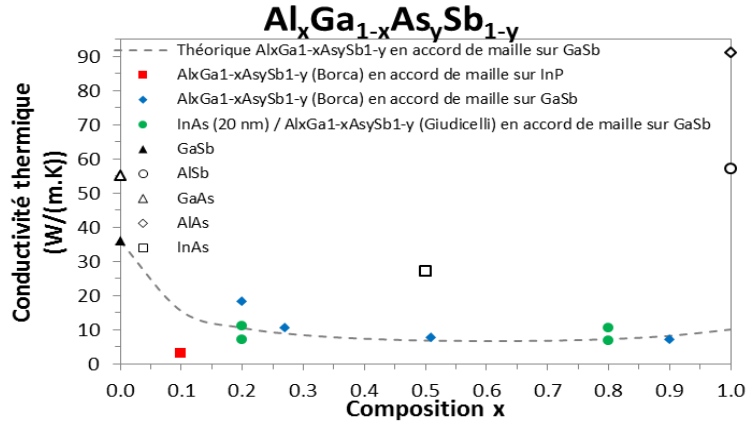


Figure 8 : Mesures expérimentales de conductivités thermiques obtenues sur nos 4 échantillons étudiés et trouvés dans la littérature.

Les valeurs de conductivité obtenues (●), tracées dans la figure 8, sont proches de celles de la littérature pour 20% et 80% d'aluminium pour la cellule $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$.

4. Résultats de simulation

Nous utiliserons la simulation numérique afin de compléter la démarche expérimentale et quantifier la pertinence du dispositif expérimental et les déviations possibles à cause des imperfections des conditions expérimentales.

Le modèle utilisé est classique et se résume en l'équation de conservation d'énergie au niveau des diverses couches de matériaux et du substrat.

$$\rho(M).C_p(M)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda(M,T)\nabla T) \quad (15)$$

Où, $\lambda(M)$ est la conductivité locale au point M. Sur la face supérieure de l'éprouvette parallélépipédique (1x1x2) un flux modulé est imposé à pulsation ω le long d'une ligne médiane de largeur 0,1. La face inférieure est supposée à température constante (dans le cadre de ce travail préliminaire) et les autres faces sont à flux nuls. Il est à signaler que pour des couches minces de 100nm, la linéarisation et l'approximation des phénomènes physiques à l'interface, nous reviendrons sur cette question dans de futurs développements. Le code de calcul utilisé fait appel à la technique des volumes finis avec une stratégie multigrilles (Full). Ce code de type laboratoire a déjà été qualifié dans divers exercices de validation [6]. Un résultat instantané du champ de température est représenté sur la figure 9. Le cas illustré correspond à une couche de conductivité thermique double, intercalé entre les positions 0,3 et 0,5. Cet accroissement en conductivité est illustré clairement par la tendance à homogénéiser la température.

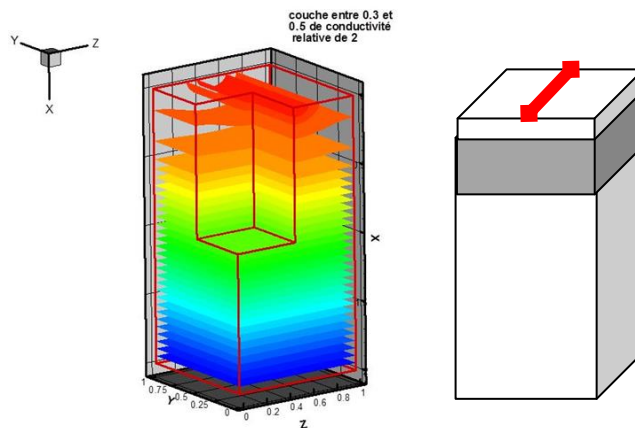


Figure 9 : Champs de température instantanée et domaine considéré

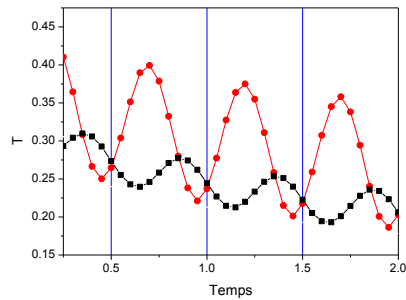


Figure 10 : *Température en deux positions illustrant le déphasage (deux interfaces)*

Des calculs sont en cours afin d'extraire la différence de température en fonction de la pulsation pour les deux cas considérés, sans et avec la couche mince.

5. Conclusion

Dans cette étude, nous avons considéré des cellules à 3 jonctions sur substrat de GaSb dont on cherche à mesurer la conductivité thermique. 4 échantillons ont été étudiés en utilisant la méthode 3ω pour réaliser la caractérisation thermique des couches minces. La méthode utilisée est celle dite différentielle qui consiste à caractériser le substrat seul puis l'ensemble « Substrat + Couches minces ». Les variations de température sont tracées en fonction de la fréquence du courant injecté dans la cellule. Cette approche différentielle consiste à comparer les courbes expérimentales des échantillons comprenant les couches minces à celle obtenue avec le substrat seul de manière à estimer la résistance thermique introduite par les couches minces en vue d'obtenir la conductivité thermique de celles-ci. Une étude numérique a été réalisée afin de valider l'expérimentation. Comme perspectives, des calculs approfondis sont à prévoir afin d'extraire la différence de température en fonction de la fréquence.

Bibliographie

- [1] Swanson R M., « The Promise of Concentrators », in Prog. Photovolt. Res. Appl. 8, 2000.
- [2] Gauthier S., " Caractérisation thermique de la matière par la méthode 3ω ". Thèse, Université Montpellier II, 2012.
- [3] Adach S., "Lattice thermal conductivity of group-IV and III-V semiconductor alloys", J. Appl. Phys. 102, 063502, 2007.
- [4] Gauthier S., Giani A. et Combette P., "Gas thermal conductivity measurement using the three-omega method", Sensors and Actuators A: Physical, Volume 195, Pages 50-55, 2013.
- [5] Both W., Bochkarev A. E., Drakin A. E., and Sverdlov B. N., "Thermal resistivity of quaternary solid solutions InGaAsSb and GaAlAsSb lattice- matched to GaSb", Cryst. Res. Technol. 24, K161, 1989
- [6] Rahli O., Bennacer R., Bouhadek K., Ameziani D.E., "Three-dimensional mixed convection heat and mass transfer in a rectangular duct: Case of longitudinal rolls", Numerical Heat Transfer; Part A, 59, 349-371, 2011
- [7] Petibon S., "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.
- [8] Cahill D., "Thermal conductivity from 30 to 750K: the 3ω method", Rev. Sci. Instrum. 2, pp 802-808, 1990.
- [9] Alvarez-Quintana J., Rodriguez-Viejo J., " Extension of the 3ω method to measure the thermal conductivity of thin films without a reference sample", Sensors and Actuators A 142, pp 232–236, 2008.