
Amélioration de l'uniformité de la température du substrat de silicium

*Pour améliorer l'uniformité de la température du substrat, **deux idées** ont été proposées au chapitre VII. Les rayonnements émis et réfléchis par le substrat au-delà de $2,6 \mu\text{m}$ doivent être réfléchis au niveau de la face inférieure du hublot. Cette réflexion peut être envisagée sur toute la surface ou uniquement sur le bord du hublot. Dans le même temps, le rayonnement émis par les lampes doit être transmis. La réflexion uniquement sur le bord du hublot permettrait un meilleur équilibre des flux arrivant sur le substrat. Cette dernière idée serait donc plus efficace.*

*L'objectif de ce chapitre est de **vérifier l'efficacité et la faisabilité de ces idées.***

*Dans un premier temps, **la propriété radiative souhaitée** au niveau de la face inférieure du hublot est posée. Les **deux configurations** envisagées sont précisées.*

*Puis, le modèle en deux dimensions de l'AS-One 150 est modifié. Les **calculs** sont effectués en régime permanent pour les mêmes puissances de lampes (10 à 30%). Les résultats obtenus et la mise en œuvre expérimentale de ces idées sont alors **discutés.***

VIII.1. Propriété radiative souhaitée

La propriété radiative voulue pour la surface inférieure du hublot est donnée par la Figure VIII-1. La réflectivité et le coefficient de transmission y sont représentés suivant la longueur d'onde.

Les rayonnements émis et réfléchis par le substrat au-delà de 2,6 μm sont réfléchis. Ceux émis par les lampes, centrés aux alentours de 1 μm , sont transmis.

Le changement de propriété radiative est appelé « **filtre** ».

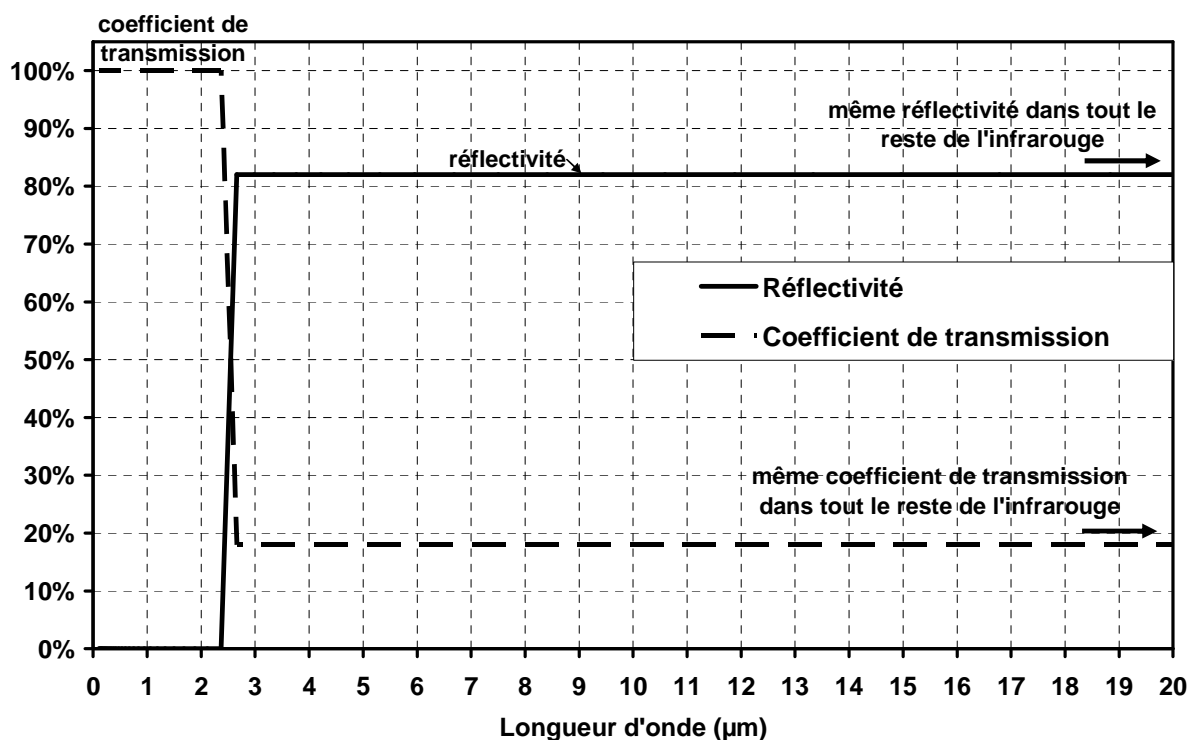


Figure VIII-1. Propriété radiative souhaitée au niveau de la face inférieure du hublot.

Deux configurations ont été proposées pour appliquer la propriété (le filtre) :

- sur toute la face inférieure du hublot (Figure VIII-2.a)
- sur le bord du hublot. Cette configuration correspond à une couronne sur la face inférieure du hublot (Figure VIII-2.b).

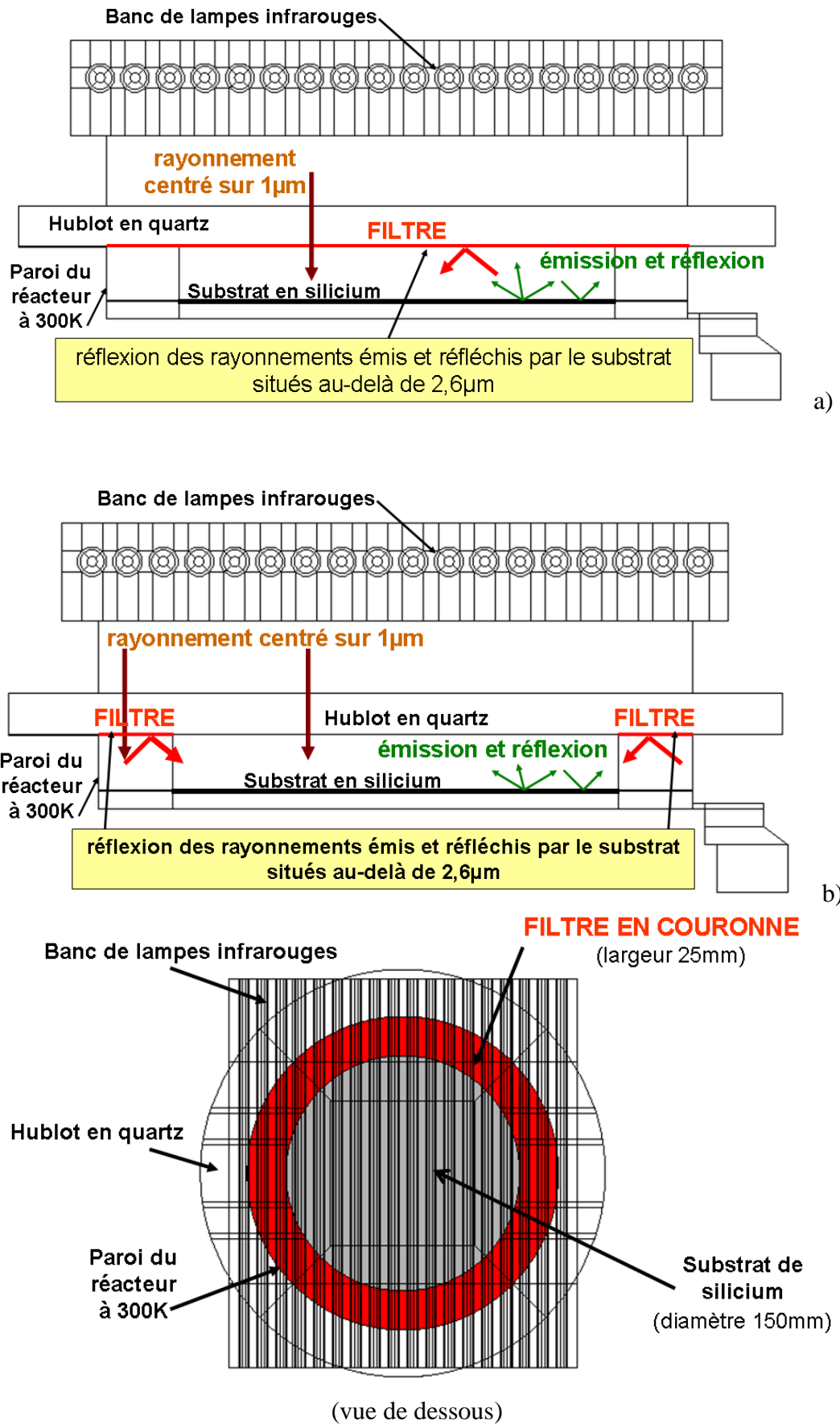


Figure VIII-2. Les deux configurations pour la propriété radiative souhaitée.

VIII.2. Calculs avec le filtre sur toute la face inférieure du hublot

La propriété radiative souhaitée (le **filtre**) est appliquée sur la surface inférieure du hublot dans le modèle en **deux dimensions** de l'AS-One 150. Les calculs sont réalisés en **régime permanent**.

Les températures obtenues au centre du hublot et du substrat pour les différentes puissances considérées sont comparées avec et sans le filtre (Figure VIII-4).

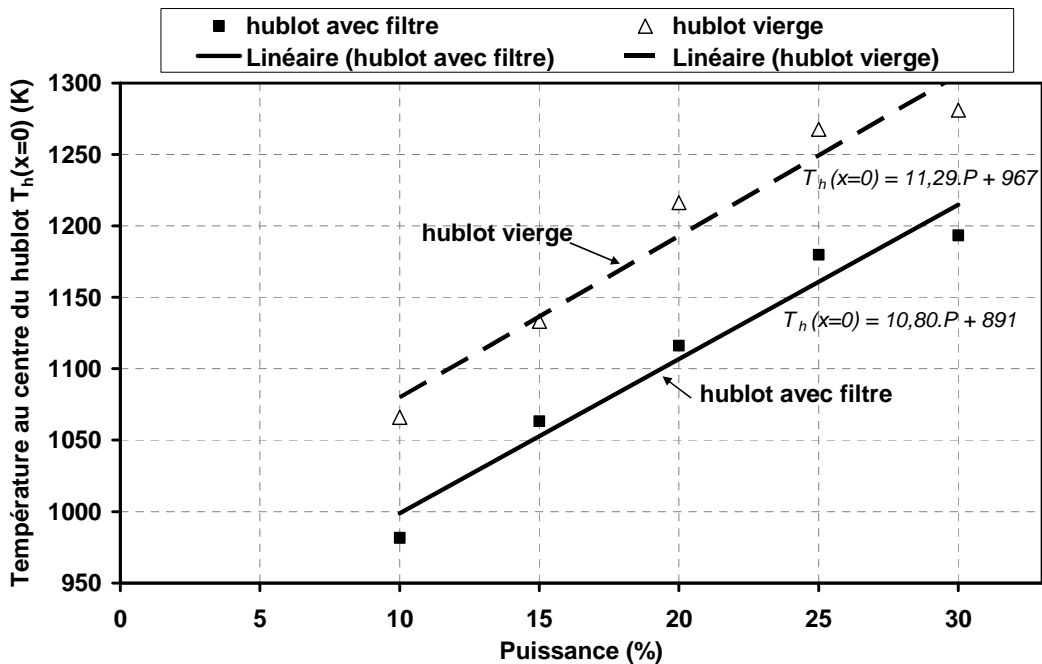


Figure VIII-3. Température au centre du hublot avec et sans le filtre sur toute la surface.

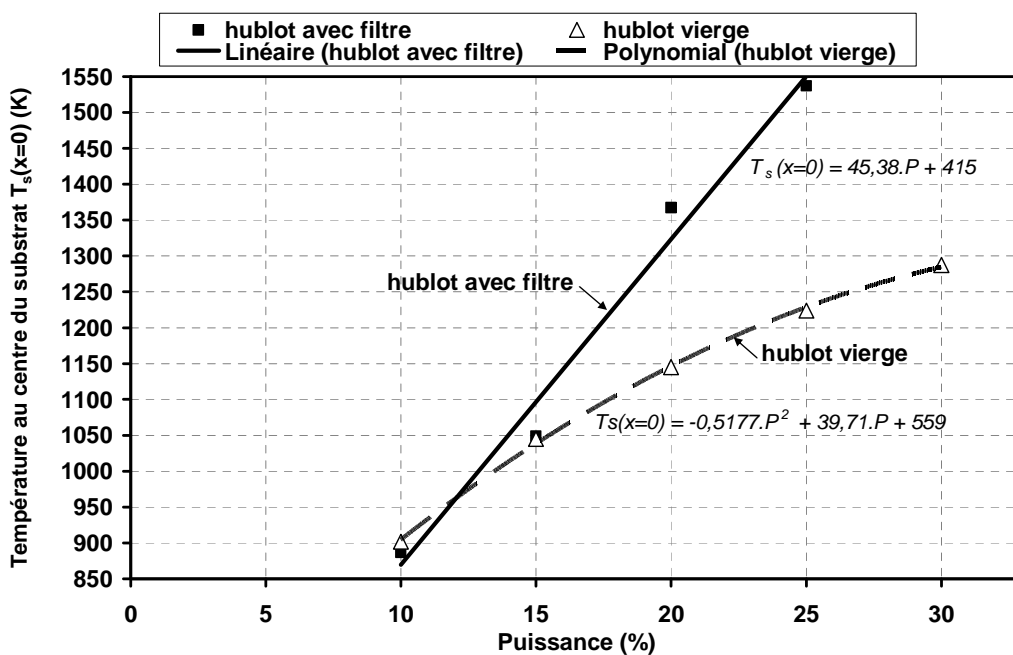


Figure VIII-4. Température au centre du substrat avec et sans le filtre sur toute la surface.

La température du hublot est diminuée en présence du filtre. Cependant, la différence est de l'ordre de 10%. Cette faible différence est due au fait que le hublot en quartz n'est pas totalement transparent au rayonnement des lampes sur sa face supérieure (95% de transmission pour un rayonnement centré aux alentours de 1 μm). Comme les calculs sont en régime permanent, donc pour un temps infini, le hublot a eu suffisamment de temps pour accumuler la chaleur.

Le filtre a pour effet d'**augmenter la température du substrat**. En même temps, il diminue la température du hublot.

L'augmentation de la température du substrat est très notable pour les puissances au-dessus de 15% car le nombre de rayons réfléchis et émis par le substrat est plus important.

En outre, la correspondance puissance-température du substrat obtenue avec un hublot vierge (Figure V-11 du chapitre V.3.2) est modifiée.

Puisque la correspondance puissance-température est modifiée, il est plus intéressant de représenter l'écart de température entre le centre et le bord du substrat suivant la température au centre du substrat (Figure VIII-5).

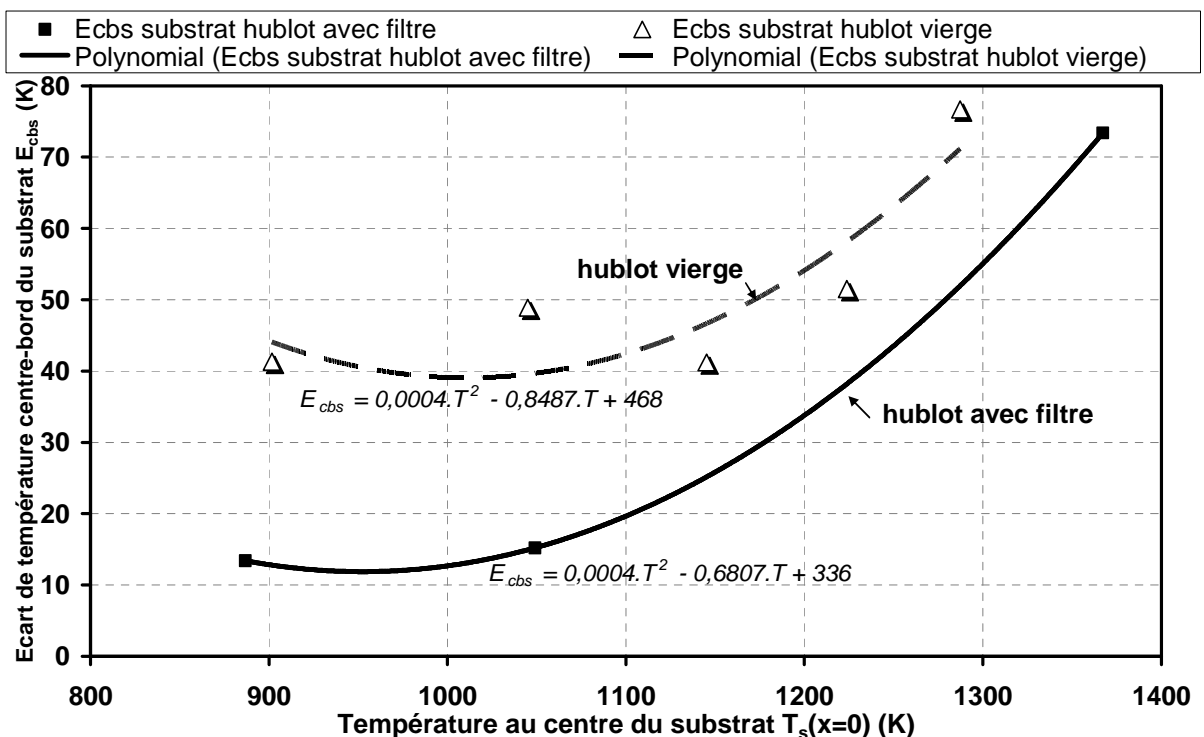


Figure VIII-5. Écart de température centre-bord du substrat suivant sa température au centre avec et sans le filtre sur toute la surface.

L'écart de température entre le centre et le bord du substrat est diminué d'environ de 30 K pour une température en-dessous de 1000 K et de 20 K pour une température au-dessus. Il y a bien **une réduction de l'écart de température entre le centre et le bord du substrat**. L'effet du filtre est donc **vérifié**.

VIII.3. Calculs avec le filtre disposé suivant une couronne sur la face inférieure du hublot

La propriété radiative souhaitée (le filtre) est à présent appliquée dans le modèle en **deux dimensions** de l'AS-One 150 selon la deuxième configuration, celle d'une **couronne** au bord de la partie inférieure du hublot. Le reste de la surface inférieure du hublot a les propriétés radiatives du quartz.

La température au centre du hublot est proche de celle obtenue avec un hublot vierge. Mais ce qui nous intéresse particulièrement est la température à la surface du substrat.

Les profils de température calculés pour un hublot avec et sans le filtre en couronne sont confrontés sur la Figure VIII-6 pour trois puissances de chauffage : une faible (10%), une moyenne (20%) et une forte (30%).

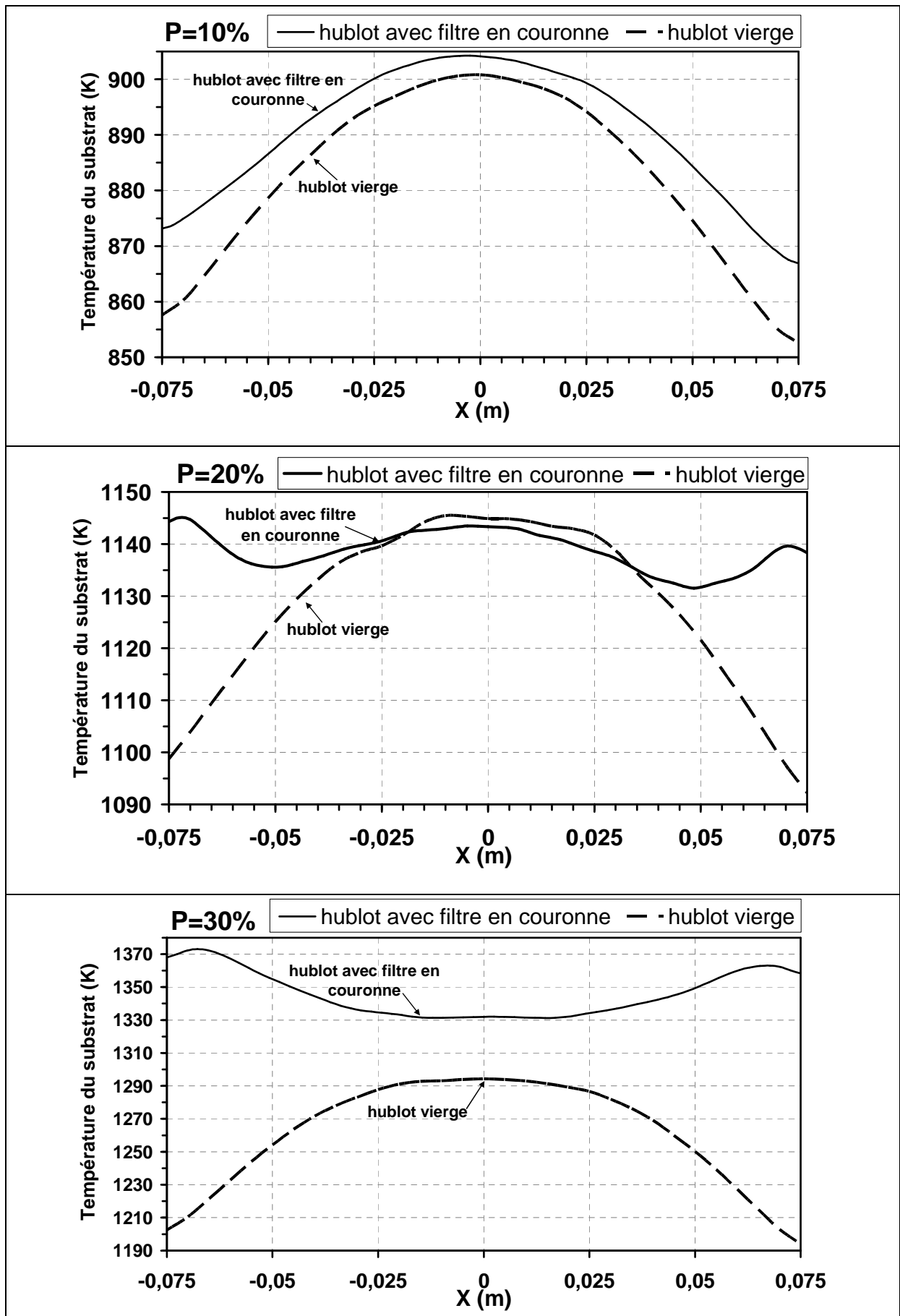


Figure VIII-6. Comparaison des profils de température avec et sans le filtre en couronne.

La température globale du substrat avec le filtre en couronne est légèrement rehaussée avec le filtre en couronne. Celui-ci renvoie une partie du rayonnement émis et réfléchi par le bord du substrat vers le centre du substrat.

L'écart de température entre le centre et le bord du substrat est modifié. Comme prévu, **la température au niveau du bord du hublot est rehaussée**. L'idée est **vérifiée**.

Pour mieux s'en rendre compte, les écarts de température obtenus suivant la puissance de chauffage sont reportés Figure VIII-7.

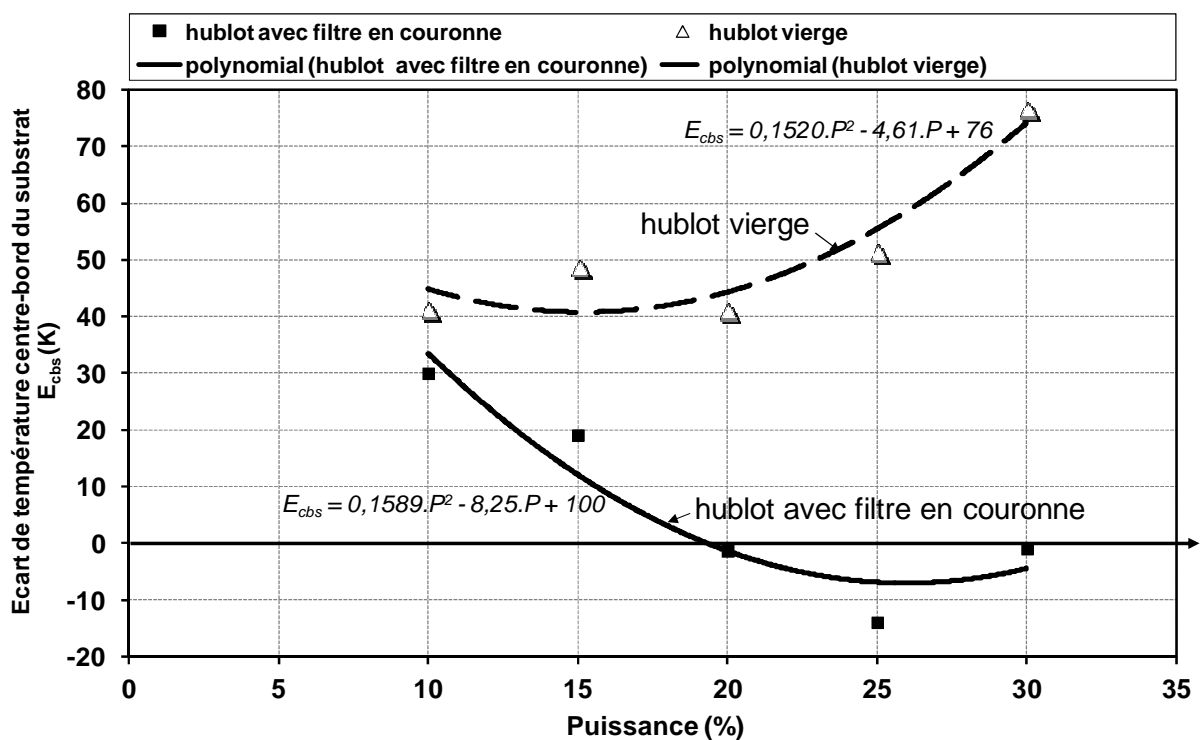


Figure VIII-7. Écart de température centre-bord du substrat avec et sans le filtre en couronne.

L'écart de température entre le centre et le bord du substrat est diminué. **La température est plus uniforme**.

L'effet du filtre est **optimal pour les puissances moyennes**, comme 20%.

Pour les faibles puissances (par exemple 10% et 15%), l'amélioration n'est pas aussi bonne. Cela est dû au nombre de rayons réfléchis par le filtre qui est moins important pour rehausser la température au bord du substrat.

À l'inverse, pour les fortes puissances (par exemple 30%), la température au bord du substrat est trop élevée car le nombre de rayons réfléchis est trop important.

VIII.4. Discussion

Pour vérifier si le filtre en couronne est plus **efficace** que le filtre sur toute la surface, l'écart de température entre le centre et le bord du substrat suivant la température au centre du substrat est comparé Figure VIII-8.

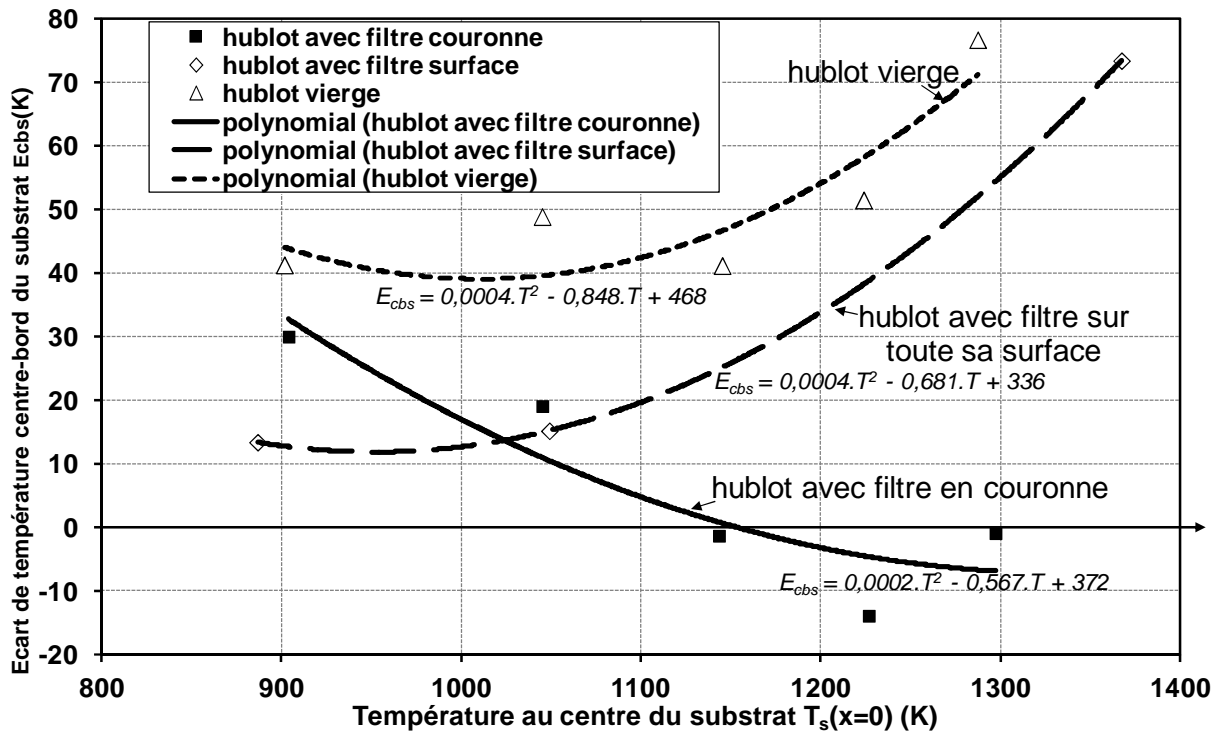


Figure VIII-8. Écart de température centre-bord du substrat suivant sa température au centre avec les deux configurations du filtre et sans celui-ci.

La configuration en **couronne** donne une température plus uniforme pour le substrat avec **les puissances moyennes et fortes**.

Pour les **faibles puissances**, l'amélioration est moins bonne. Par contre, la température est plus uniforme avec **le filtre sur toute la surface**. Il y a un meilleur équilibre des flux arrivant sur le substrat avec le filtre sur toute la surface.

La configuration où le **filtre est appliqué sur toute la surface inférieure du hublot** serait intéressante dans le cas d'un **procédé thermique rapide de dépôt chimique à partir de la phase vapeur (RTCVD)**. La température du hublot est ainsi diminuée. Il y a donc moins de risque d'avoir des dépôts sur la surface inférieure du hublot. Ces dépôts sont susceptibles de provoquer un échauffement dangereux pour le hublot.

Pour les fortes puissances, une surélévation de la température au bord du substrat a été constatée. La **réflectivité du filtre au-delà de 2,6 μm** est trop forte. Il serait intéressant de l'**ajuster** suivant l'écart de température entre le centre et le bord du substrat (Figure VIII-9), et suivant la puissance de chauffage. Une optimisation de l'uniformité de la température du substrat pourrait alors être obtenue.

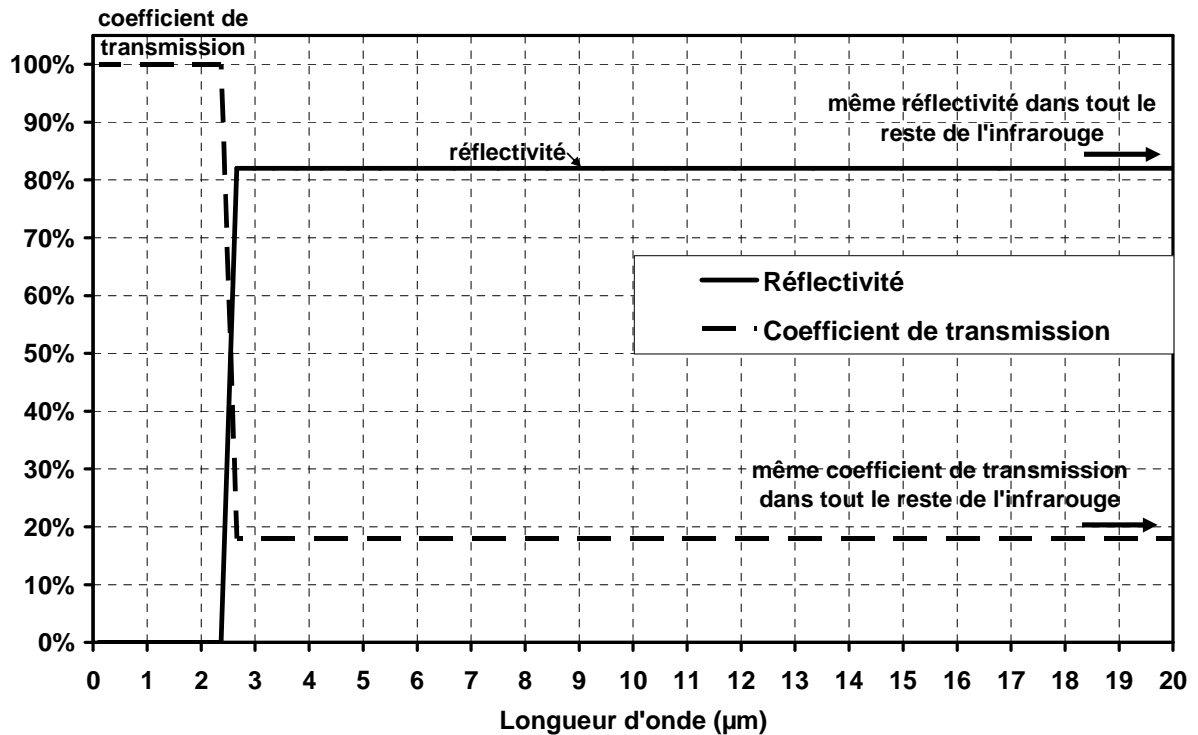


Figure VIII-9. Modification de la réflectivité au-delà de 2,6 μm .

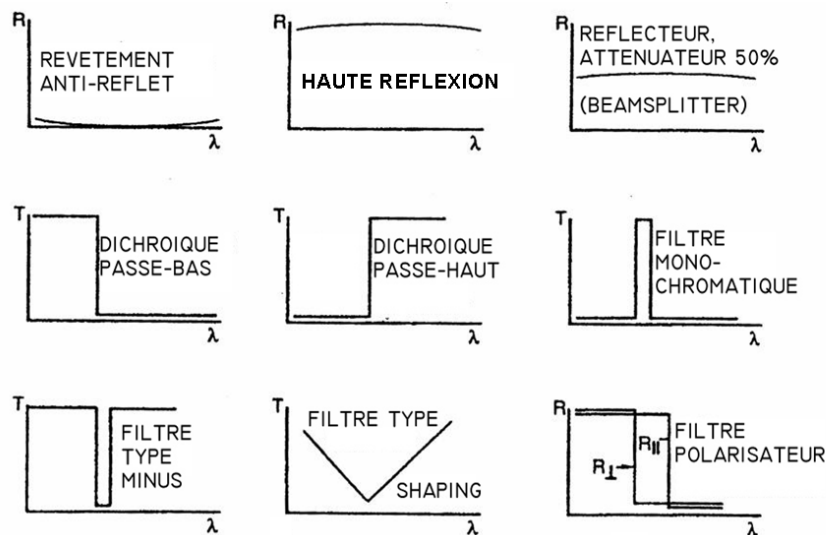
Enfin, comparées aux solutions pour améliorer l'uniformité de la température du substrat au niveau du hublot répertoriées dans l'état de l'art du chapitre I.2, les deux solutions proposées ici sont plus simples à mettre en œuvre. En effet, elles n'impliquent pas d'écoulements à générer au travers d'un double hublot qui absorbe une partie du rayonnement émis par les lampes. Ces solutions ne sont qu'une simple modification de la propriété de surface de la face inférieure du hublot.

VIII.5. Mise en œuvre expérimentale

VIII.5.1. Filtrage avec un empilement de couches minces

Pour mettre en œuvre ces deux idées, il faut trouver un moyen de jouer sur le rayonnement réfléchi et transmis par le hublot. Pour cela, des **empilements de couches minces** peuvent être déposés à la surface du hublot.

En effet, les empilements de couches minces sont généralement déposés sur du verre ou du quartz pour réaliser des fonctions déterminées. La Figure VIII-10 montre des exemples de fonctions suivant la longueur d'onde du rayonnement incident (*MacLeod 2001*). De nombreux exemples d'applications peuvent être trouvés : les traitements antireflets dans les musées (Figure VIII-11), les vitres avec des revêtements athermiques qui laissent passer dans le visible mais pas l'infrarouge (Figure VIII-11) ...



R : Réflectivité ; T : Coefficient de transmission ; λ : longueur d'onde

Figure VIII-10. Applications typiques des empilements de couches minces (*MacLeod 2001*).

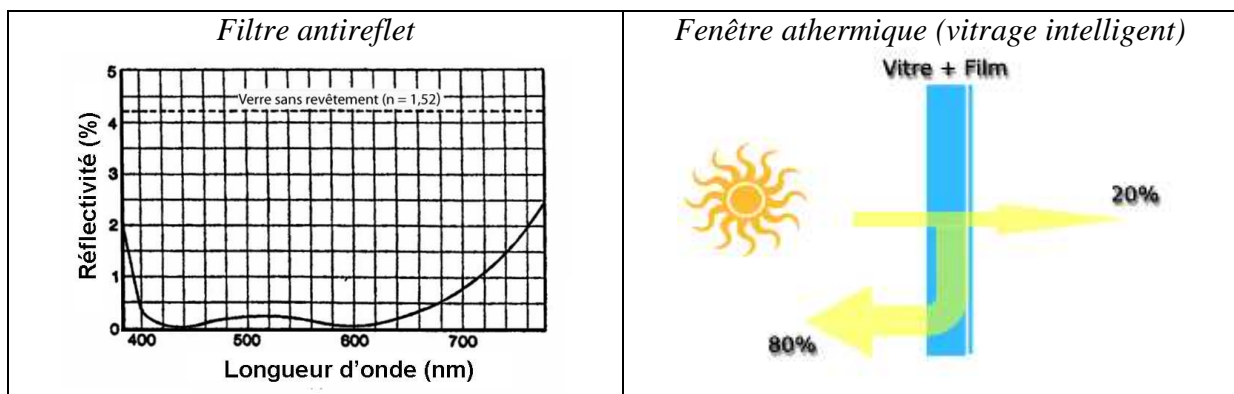


Figure VIII-11. Deux exemples d'applications : traitement antireflet et propriété athermique.

Parmi les fonctions proposées par la Figure VIII-10, celle qu'on souhaite avoir sur la surface inférieure du hublot (Figure VIII-1) est celle d'un **filtre de type dichroïde passe-bas**.

VIII.5.2. Proposition d'un empilement de couches minces

De manière pratique, le filtre correspondrait à un empilement de couches minces. Il faut trouver un empilement ayant les propriétés radiatives adaptées. En plus, il faut que cet empilement soit le plus **stable** possible **thermiquement et chimiquement** pour éviter la contamination des dépôts sur le substrat de silicium dans le cas d'un procédé RTCVD.

Les **oxydes transparents conducteurs (TCO : Transparent Conducting Oxide)** déposés sur du verre ou du quartz ont des propriétés très proches de celles du filtre que l'on souhaite. Ils sont également très stables thermiquement et chimiquement. De plus, ils peuvent être déposés sur des surfaces importantes (*Lu et al. 2007*) (*Lin et al. 2004*). Ils conviennent donc particulièrement bien. La Figure VIII-12 montre l'exemple des propriétés optiques de films d'oxyde dopés avec du fluor et de l'étain qui ont été déposés sur du quartz (*Shanti et al. 1999*) (*Ngaffo et al. 2005*).

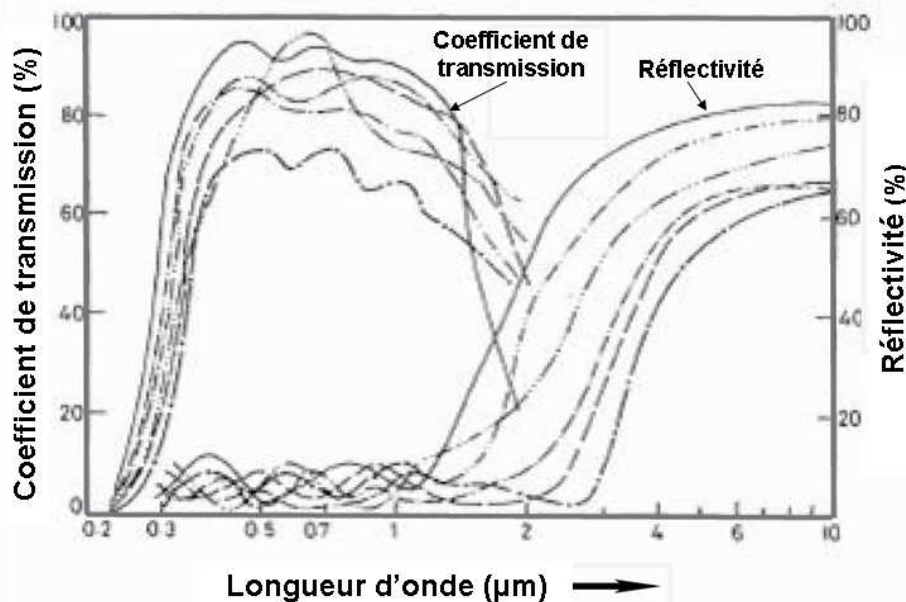


Figure VIII-12. Exemple de propriétés optiques d'une couche mince d'oxyde transparent conducteur.

VIII.6. Conclusion

Dans ce chapitre, l’idée d’un filtre sur la surface inférieure du hublot pour améliorer l’uniformité de la température du substrat a été **vérifiée**.

Deux configurations pour ce filtre ont été considérées dans les calculs : une où il est disposé sur toute la surface inférieure du hublot, l’autre selon une couronne proche de la paroi du réacteur. Conformément au chapitre VII.3, les différentes simulations réalisées ont montré que les dispositions permettent une **amélioration de l’uniformité de la température du substrat**. **Le filtre en couronne est plus efficace pour les puissances moyennes et fortes. Le filtre disposé sur toute la face l’est pour les faibles puissances.**

La configuration où le filtre est appliqué sur toute la surface inférieure est intéressante dans le cas d’une **application RTCVD (Rapid Thermal Chemical Vapour Deposition)**. Cette configuration limite davantage l’échauffement du hublot.

Pour la mise en œuvre expérimentale, le filtre serait un empilement de couches minces. Il serait de type dichroïde passe-bas. Un **revêtement d’oxyde transparent conducteur (TCO : Transparent Conducting Oxide)** serait très adapté.

Grâce aux simulations et à l’analyse des propriétés radiatives des surfaces, l’objectif de cette thèse d’améliorer l’uniformité de la température du substrat a été atteint. Par la suite, il faudra procéder à **la fabrication d’un hublot avec le filtre** et à **des essais expérimentaux** pour confirmer les résultats obtenus.

Références du chapitre VIII

- Lin, H., T. Jin, A. Dmytruk, M. Saito, T. Yazawa, (2004), *Preparation of a porous ITO electrode*, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 164 (1-3), pp. 173-177.
- Lu, J.G., T. Kawaharamura, H. Nishinaka, Y. Kamada, T. Ohshima, S. Fujita, (2007), *ZnO-based thin films synthesized by atmospheric pressure mist chemical vapor deposition*, Journal of Crystal Growth, 299 (1), pp. 1-10.
- Macleod, H.A., (2001), *Thin-Films Optical Filters*, Institute of Physics Publishing, Bristol et Philadelphie.
- Shanthi, S., C. Subramanian, P. Ramasamy, (1999), *Investigations on the optical properties of undoped, fluorine doped and antimony doped tin oxide films*, Crystal Research and Technology, 34 (8), pp. 1037-1046.
- Ngaffo, F.F., A.P. Caricato, A. Fazzi, M. Fernandez, S. Lattante, M., Martino, F., Romano, (2005), *Deposition of ITO films on SiO₂ substrates*, Applied Surface Science, 248 (1-4), pp. 428-432.

