

---

# Corrélation entre la répartition de température du substrat de silicium et celle du hublot

*Dans l'état de l'art du chapitre I, on a vu que le hublot chaud est l'une des causes principales de la non-uniformité de température du substrat de silicium lors d'un procédé thermique rapide. Pour mieux comprendre l'effet du **hublot**, la modélisation en deux dimensions va être utilisée.*

*L'objectif de cette étude est de **mettre en évidence la relation entre la répartition de la température du substrat et celle du hublot**. Pour cela, des **simulations** de la modélisation en deux dimensions du système rapide thermique AS-One 150 sont effectuées. Certains paramètres de la modélisation vont être modifiés pour apprécier l'influence du hublot sur la température du substrat et inversement. Différentes situations, difficiles à envisager dans la réalité, sont envisagées. Les calculs sont tous réalisés en **régime permanent** pour les mêmes puissances (10 à 30%).*

*Dans un premier temps, la répartition de température du substrat et celle du hublot sont comparées. Puis, l'influence du substrat sur la température du hublot est appréciée. L'inverse est ensuite réalisé. Les **constatations** obtenues seront récapitulées dans la conclusion.*

## VI.1. Observation des profils de température du substrat et du hublot

Les profils de température calculés à la surface du substrat et au niveau du hublot sont comparés pour les puissances considérées. La Figure VI-1 montre l'exemple de 15% de puissance. Des résultats de la même forme sont obtenus pour les autres puissances.

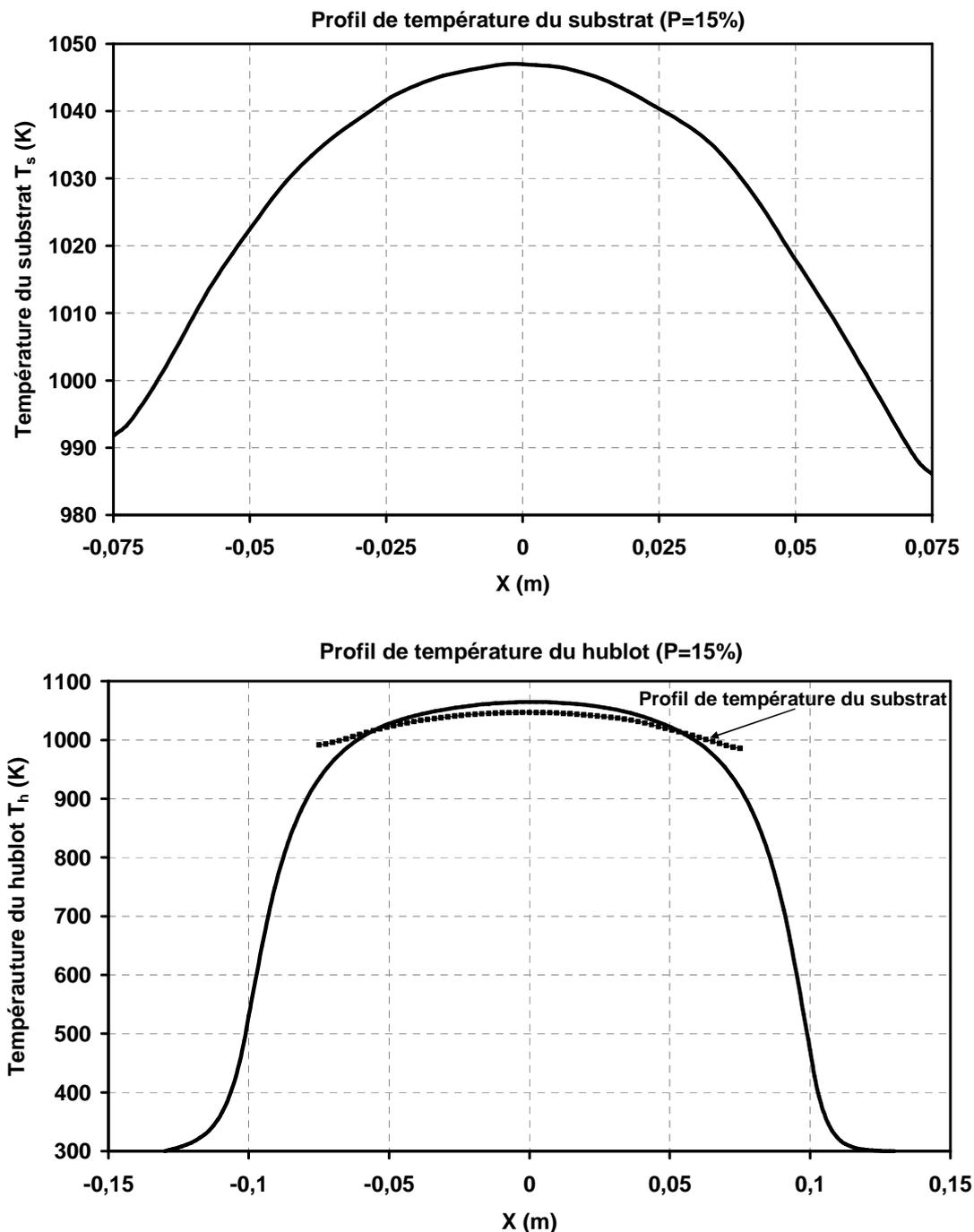


Figure VI-1. Profils de température du substrat (en haut) et du hublot (en bas).

On remarque que les profils de température du substrat et du hublot ont tous deux une **forme en cloche**. Il y a une **forte décroissance de la température vers le bord**.

Comparons les différences entre les températures au centre et au bord du substrat et du hublot. On choisit pour cela de **relever les températures en quatre points** :

- au centre du substrat  $T_s(x=0)$  ;
- à 5 mm de son bord  $T_s(x=-0,070m)$  ;
- au centre du hublot  $T_h(x=0)$  ;
- et à une position proche de son bord intérieur  $T_h(x=-0,0875m)$ .

Ces points sont indiqués sur le schéma de la Figure VI-2. Les **écarts de température entre le centre et le bord** pour le substrat noté  $E_{cbs}$  et pour le hublot  $E_{cbh}$  ont alors pour expressions :

$$E_{cbs} = T_s(x=0) - T_s(x=-0,070m) \quad (\text{VI-1})$$

$$E_{cbh} = T_h(x=0) - T_h(x=-0,0875m) \quad (\text{VI-2})$$

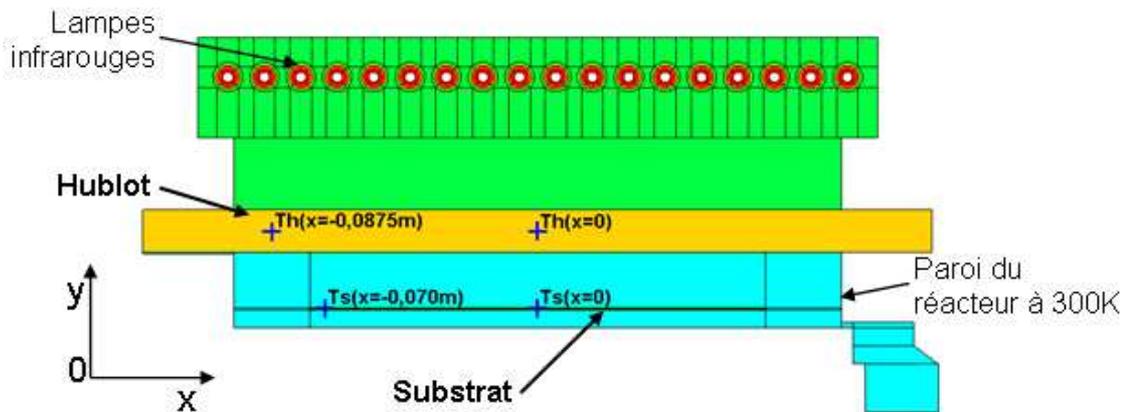


Figure VI-2. Les quatre points de relevé de la température.

La Figure VI-3 donne les écarts de la température entre le centre et le bord du substrat et du hublot suivant la puissance de chauffage. **Ces écarts augmentent tous les deux de manière linéaire suivant la puissance.**

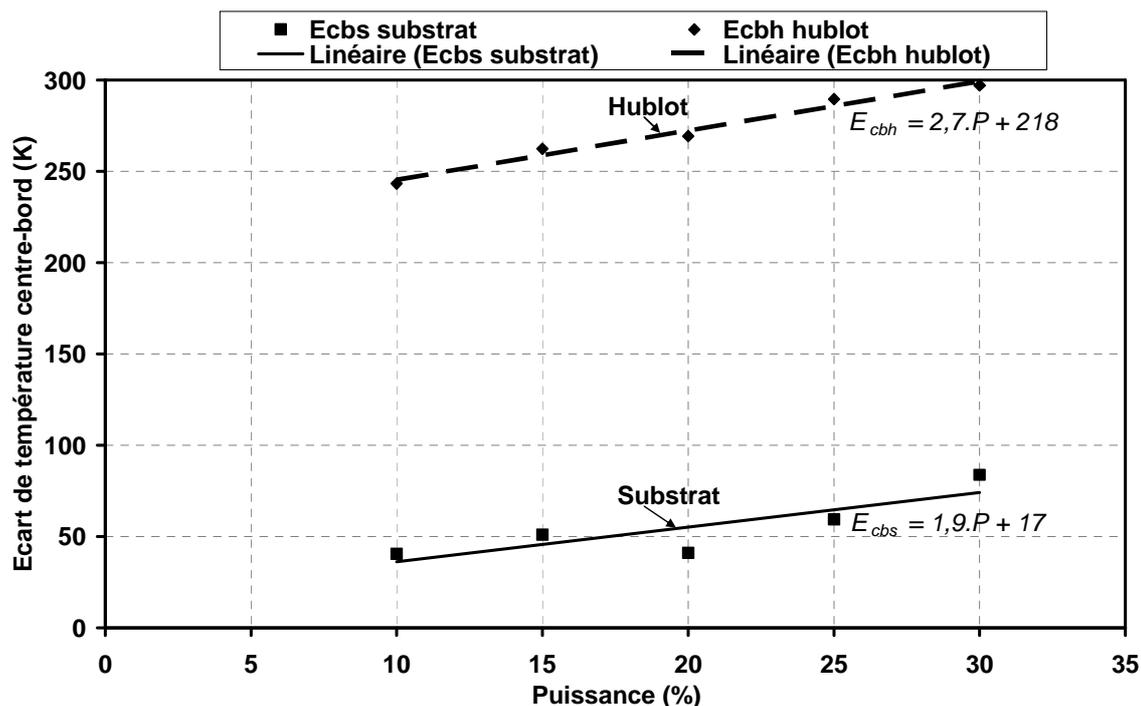


Figure VI-3. Écarts de température centre-bord suivant la puissance.

L'observation de la ressemblance ici constatée conduit à **plusieurs interrogations** :

- Y-a-t-il une **relation** entre la répartition de la température du substrat et celle du hublot ?
- Si oui, dans **quel sens** est-elle ? Le hublot chauffe-t-il le substrat ? Ou à l'inverse, le substrat chauffe-t-il le hublot ?
- Quelles sont alors **les conséquences sur l'uniformité de la température du substrat** ?

## VI.2. Influence du substrat sur la température du hublot

### VI.2.1. Température du hublot sans substrat

Le système AS-One 150 est simulé **sans la présence du substrat**. Dans le modèle, le substrat est remplacé par de l'azote à la pression de 300 Pa comme dans le reste du réacteur.

Les températures obtenues au centre du hublot avec et sans la présence du substrat sont confrontées sur la Figure VI-4.

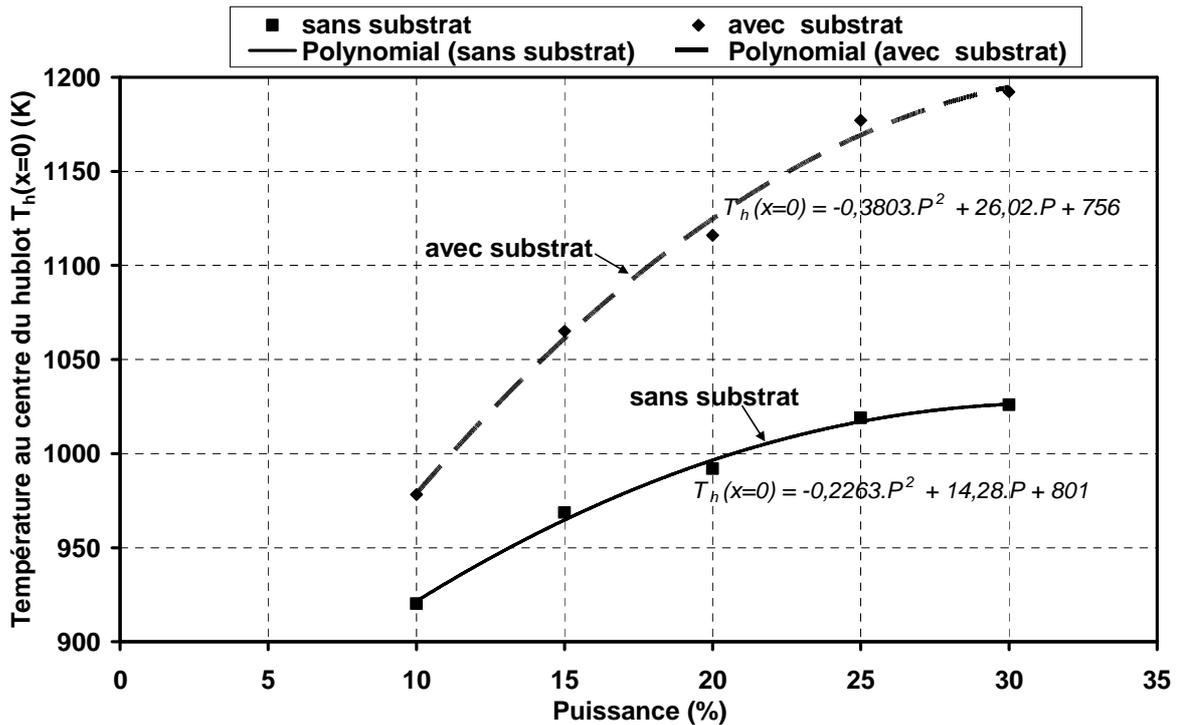


Figure VI-4. Température au centre du hublot avec et sans substrat.

La présence du substrat a pour effet d'augmenter la température au centre du hublot. L'augmentation est d'environ 125°C soit environ 10% de la température du hublot en l'absence de substrat.

Cette augmentation est relativement faible pour deux raisons. Les parois du réacteur sont très réfléchissantes. De plus, les simulations sont effectuées en régime permanent, c'est-à-dire pour une durée de chauffage infinie. Le hublot a suffisamment de temps pour accumuler une partie importante des rayonnements présents dans le système.

## VI.2.2. Modification des propriétés radiatives du substrat

Pour compléter ce résultat, les simulations du système thermique rapide sont réalisées en modifiant les propriétés radiatives du substrat. Autrement dit, les propriétés en volume sont conservées mais les propriétés radiatives en surface sont modifiées. L'objectif est de savoir si les propriétés radiatives du substrat contribuent à l'élévation de la température du hublot.

**Quatre cas** sont considérés pour les propriétés radiatives du substrat :

- sans substrat, résultat obtenu précédemment
- propriétés radiatives du silicium
- celles d'un réflecteur parfait
- celles d'un corps noir qui absorbe parfaitement et émet dans tout le domaine infrarouge

Les ordres de grandeur de l'émissivité, de l'absorptivité et de la réflectivité sont indiqués dans le Tableau VI-1. On rappelle que l'émissivité est égale à l'absorptivité par la loi de Kirchhoff (relations III-26 et III-27).

<b>Coefficient</b>	<b>Parois du réacteur réfléchissante*</b>	<b>Silicium</b>	<b>Réflecteur parfait</b>	<b>Corps noir</b>
<b>Émissivité = absorptivité</b>	0,25	0,7	0	1
<b>Réflectivité</b>	0,75	0,3	1	0

Tableau VI-1. *Propriétés radiatives de surface entrées pour le substrat.*

\*sans substrat

Les températures au centre du hublot et du substrat ont été relevées suivant la puissance de chauffage (Figure VI-5 et Figure VI-6).

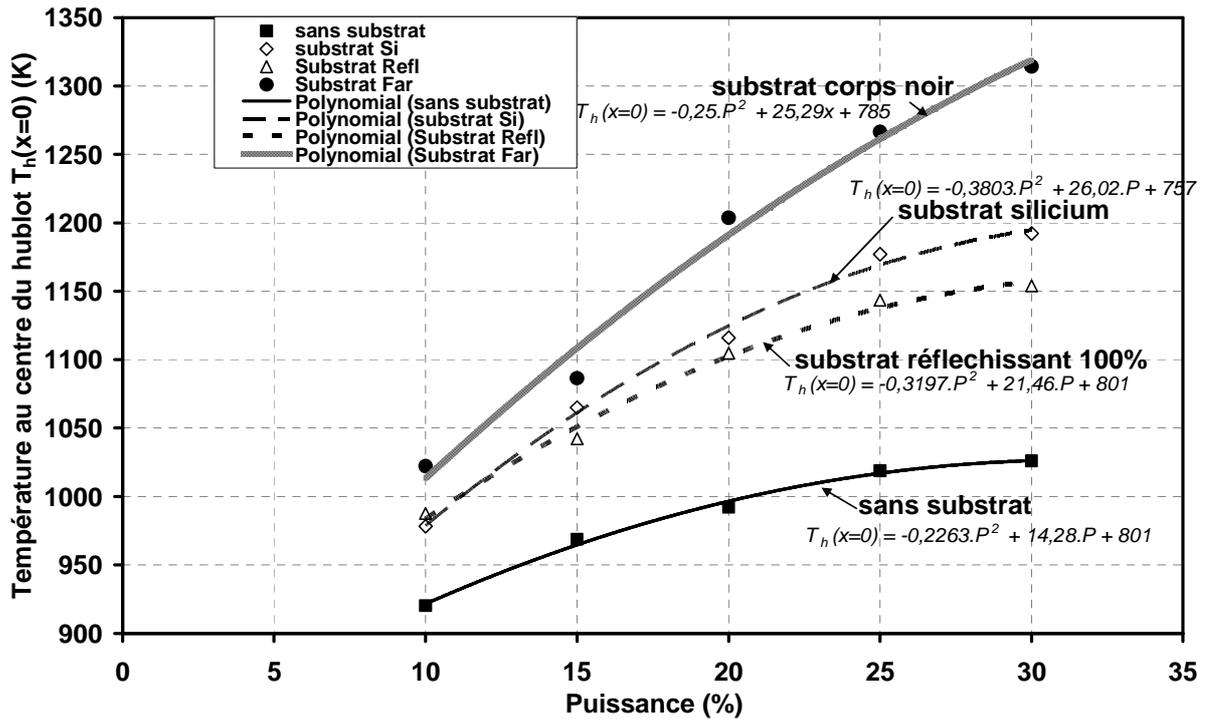


Figure VI-5. Températures au centre du hublot suivant la puissance pour différentes propriétés radiatives du substrat.

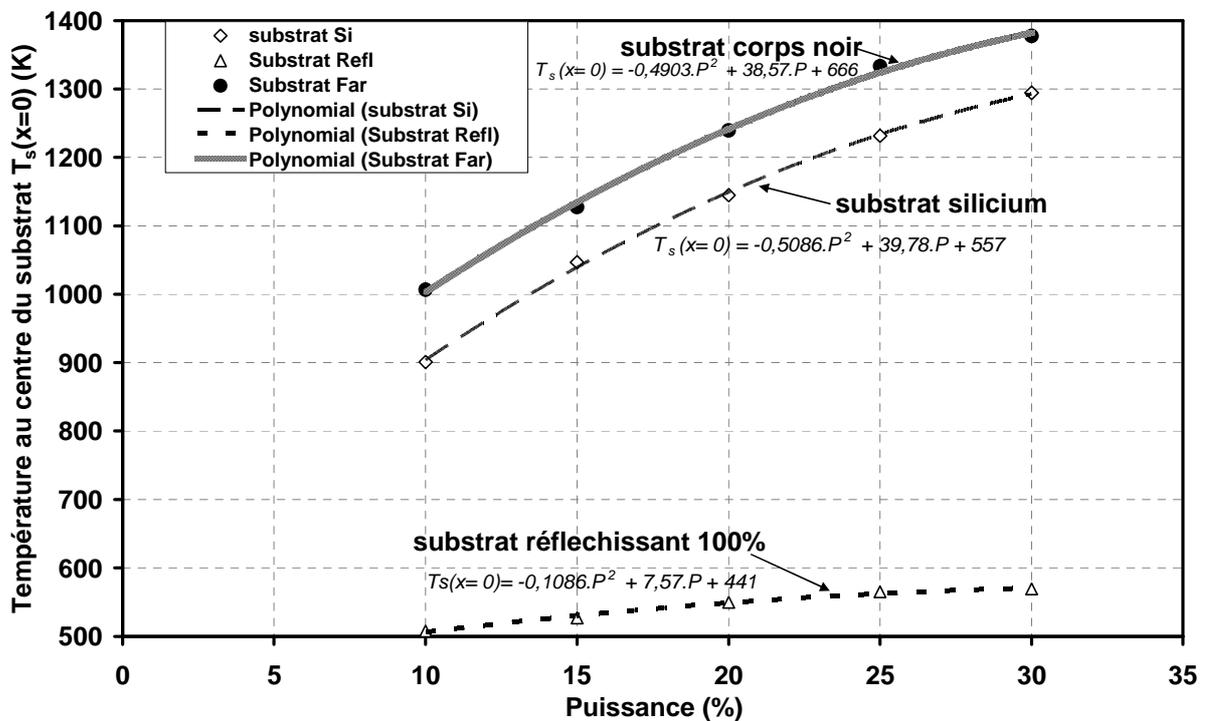


Figure VI-6. Températures au centre du substrat suivant la puissance pour différentes propriétés radiatives du substrat.

Le substrat et le hublot sont les plus chauds dans le cas où le substrat a la propriété d'un corps noir. **Les températures du substrat et du hublot suivent donc les propriétés d'absorption et d'émission du substrat.** Plus elles ont des coefficients élevés, plus les températures seront grandes. Le hublot est donc chauffé par le rayonnement émis par le substrat.

Lorsque le substrat a la propriété d'un réflecteur parfait, sa température est d'environ 520 K. Comme le substrat réfléchit dans tout le domaine spectral, on s'attendait à obtenir une température proche de 300 K. Le substrat est chauffé par convection car il y a de l'azote chaud dans le réacteur. La température du hublot est plus élevée que dans le cas où il n'y a pas de substrat car la réflectivité est plus importante. **La réflectivité du substrat a une influence sur la température du hublot : plus elle est importante et plus la température du hublot sera élevée.**

La réflectivité des parois peut aussi contribuer à élever la température du hublot.

➤ **Constatation n°1 : L'émissivité et la réflectivité du substrat, voire celle des parois du réacteur ont un effet sur la température du hublot.**

## **VI.3. Influence du hublot sur la température du substrat**

### **VI.3.1. Température du substrat sans hublot**

On se place dans le cas contraire au précédent. Le système est simulé **sans la présence du hublot** afin d'apprécier son influence sur la température du substrat (*Logerais et al. 2006*).

Le hublot a été remplacé par un volume contenant de l'azote dans le modèle en deux dimensions. Le réacteur est mis en commun avec le four. L'intérieur du système contient de l'azote à la pression de 300 Pa. Cette configuration n'est pas applicable en réalité car le hublot assure l'étanchéité du réacteur.

Les profils de température du substrat calculés sont comparés avec et sans la présence du hublot. La Figure VI-7 indique la température au centre du substrat pour les différentes puissances. L'écart de température entre le centre et le bord est montré sur la Figure VI-8.

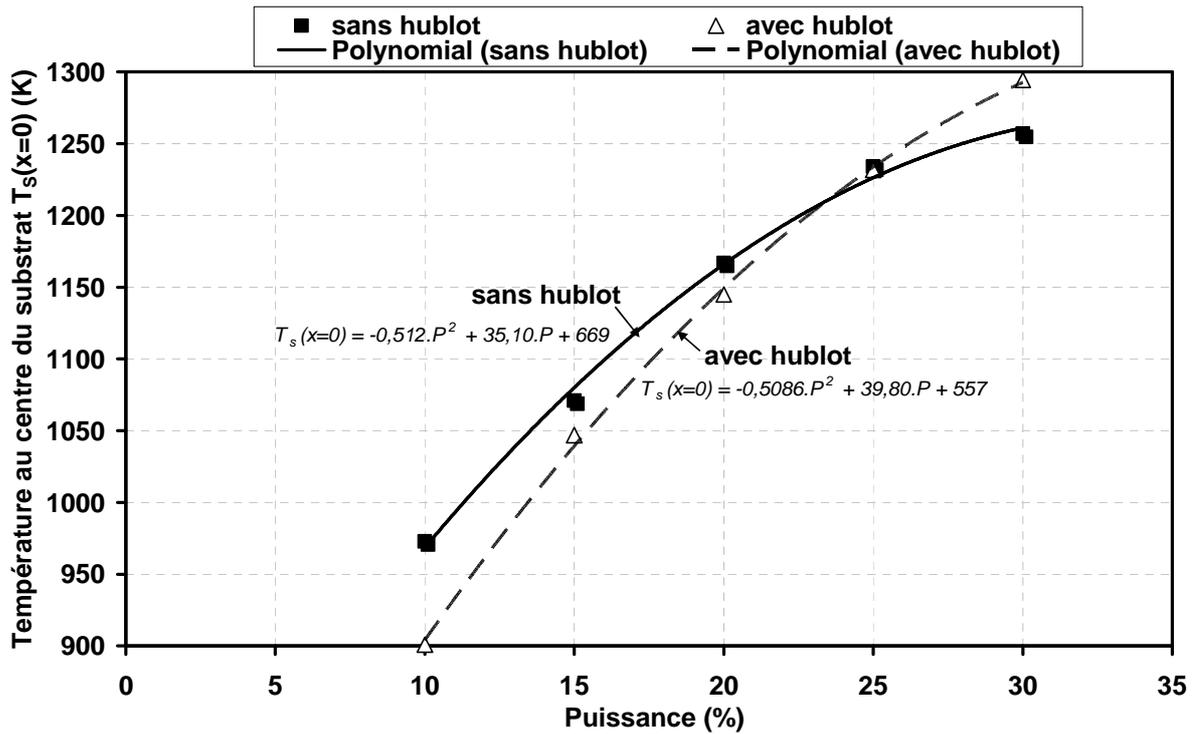


Figure VI-7. Comparaison entre la température au centre du substrat avec et sans hublot.

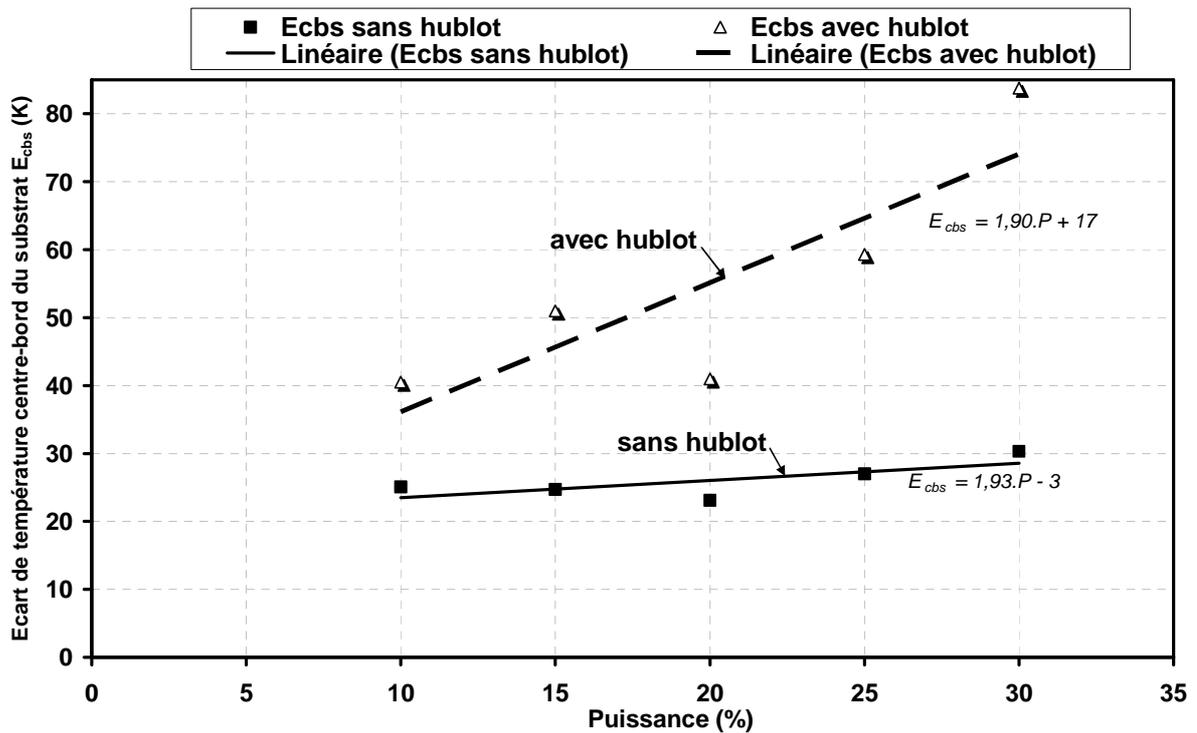


Figure VI-8. Écart de température centre-bord du substrat avec et sans hublot.

La température au centre du substrat est dans l'ensemble légèrement plus élevée sans hublot car le hublot absorbe un peu le rayonnement des lampes infrarouges et évacue un peu de chaleur vers la paroi froide en acier.

**L'écart de la température entre le centre et le bord du substrat est diminué sans hublot.** Cette diminution est de l'ordre de 20 K. En pourcentage, elle peut être estimée à 40%. Cependant, l'écart de température entre le centre et le bord n'est pas nul.

➤ **Constatation n°2 : l'absence de hublot permet de réduire l'écart de température entre le centre et le bord du substrat de l'ordre de 40%.**

### **VI.3.2. Calcul de la température du substrat avec un hublot de diffusivité thermique élevée**

Il a été observé dans la partie VI.1 portant sur la comparaison des profils thermiques qu'il y a un fort gradient de température entre le centre et le bord du hublot. Il en va de même pour le substrat. Le but recherché ici est de **réduire ce gradient** pour apprécier son influence sur la répartition de la température du substrat.

Les propriétés du quartz sont indiquées dans le Tableau VI-2. Des ordres de grandeurs sont donnés car ses propriétés varient suivant sa température (chapitre III-3.3.2). On constate que le hublot a une conductivité thermique faible et une capacité calorifique élevée. Sa diffusivité thermique est donc élevée : le hublot peut stocker facilement de la chaleur.

Pour réduire au maximum la température globale du hublot et son fort gradient, il faut **augmenter sa diffusivité thermique**. De cette façon, la chaleur reçue par le hublot sera évacuée rapidement vers la paroi froide.

Pour obtenir cette diminution de diffusivité, la conductivité thermique très importante du cuivre et la capacité calorifique très faible de l'or ont été considérées dans les calculs comme caractéristiques thermiques pour le hublot. Les ordres de grandeur de ces valeurs sont donnés dans le Tableau VI-2. La densité du quartz est gardée. La diffusivité est alors divisée par un facteur 1500.

	<b>Caractéristiques du hublot (quartz)</b>	<b>Caractéristiques remplacées</b>
<b>Densité</b> ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	2649	2649
<b>Capacité calorifique</b> ( $\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	1000	130 (or)
<b>Conductivité thermique</b> ( $\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	2	400 (cuivre)
<b>Diffusivité</b> ( $\text{m.s}^{-2}$ )	$7,6.10^{-7}$	$1,16.10^{-3}$

Tableau VI-2. *Propriétés thermiques du quartz constituant le hublot.  
(ordres de grandeurs tirés de l'ouvrage Heat Transfer (Bejan 1993)).*

La Figure VI-9 donne un exemple de comparaison pour les profils de température du substrat et du hublot pour 20% de puissance. Des résultats **analogues** sont obtenus pour les autres puissances.

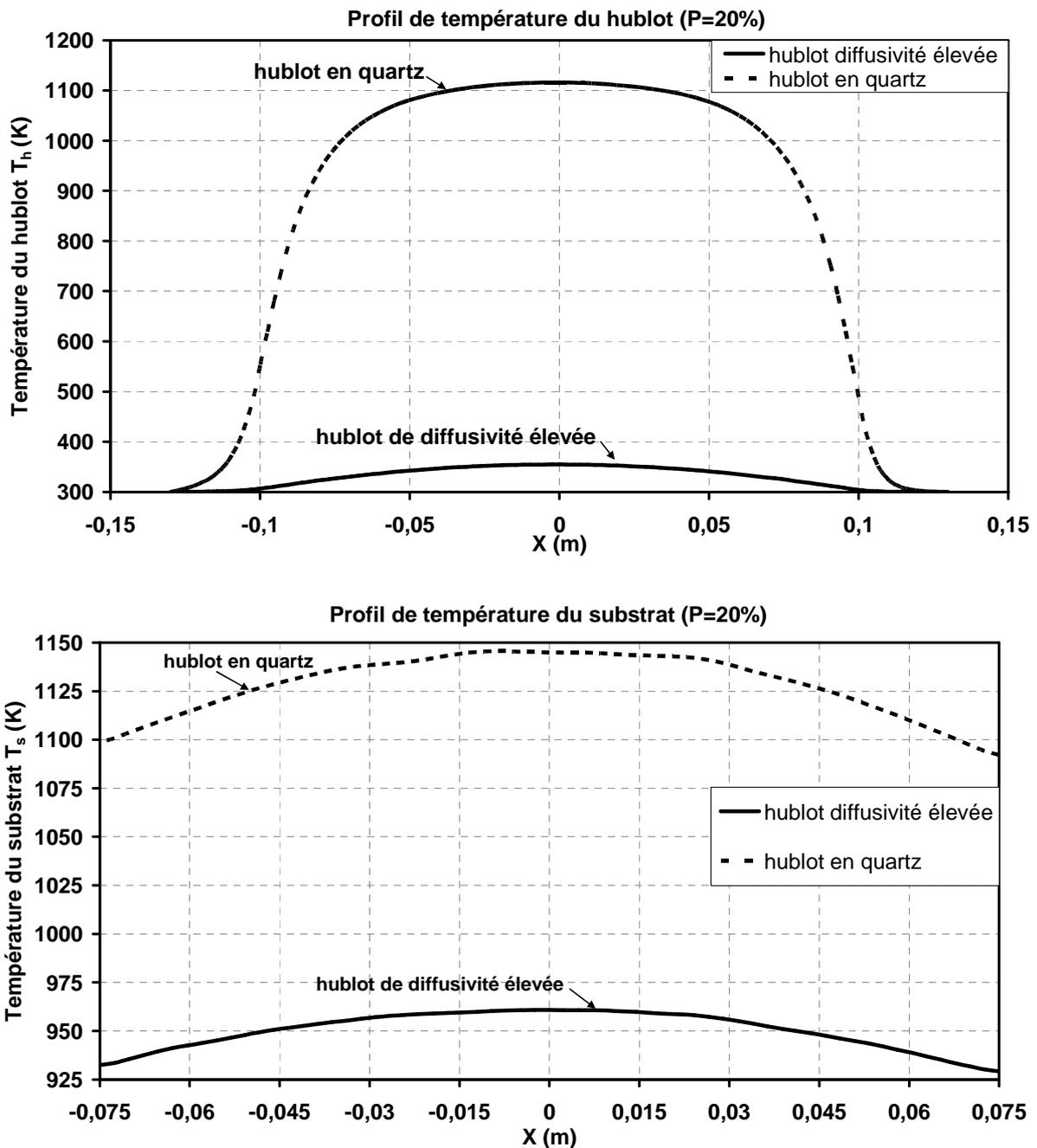


Figure VI-9. Profils de températures du hublot (en haut) et du substrat (en bas) avec une diffusivité thermique élevée (modification) et faible (quartz) pour le hublot.

Comme souhaité, la température globale du hublot est de l'ordre de sa température initiale de 300 K. Pour la température du substrat, il y a un décalage des températures vers le bas.

➤ **Constatation n°3** : la diminution de la température globale du hublot entraîne une diminution de celle du substrat.

Comme il y a un décalage, il est intéressant de comparer l'écart de température centre-bord suivant la température au centre du substrat obtenus avec le hublot modifié et celui en quartz. (Figure VI-10).

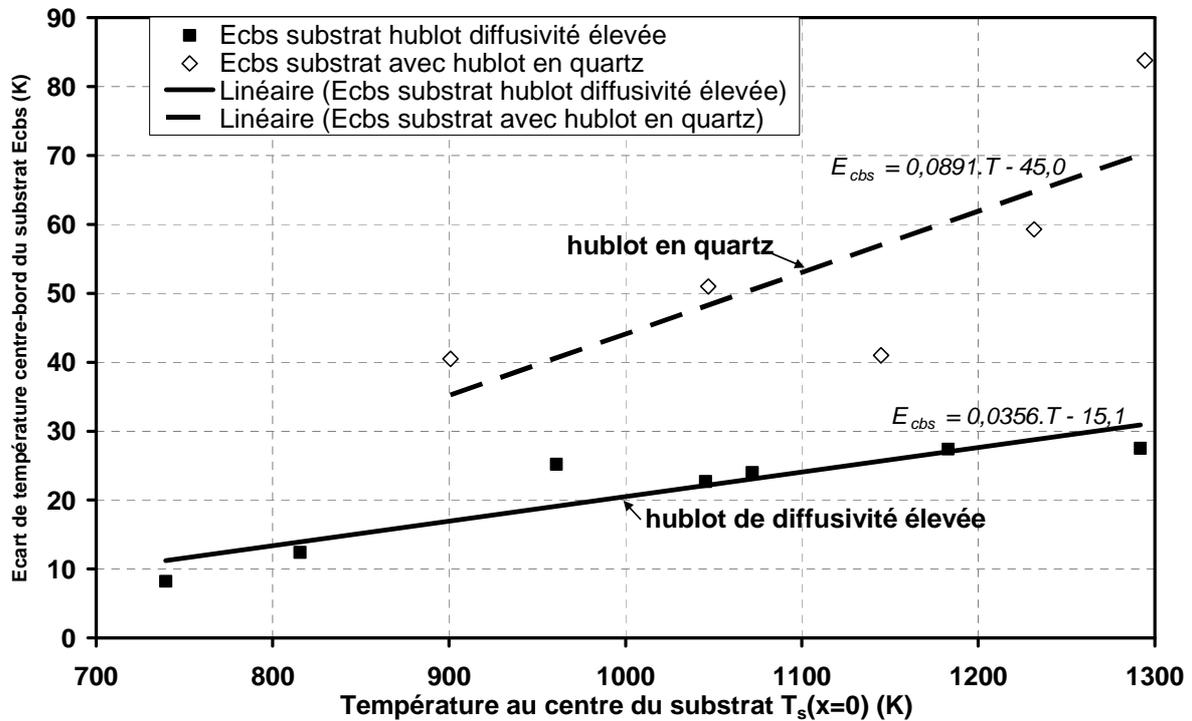


Figure VI-10. Écart de température centre-bord du substrat suivant la température au centre de celui-ci avec une diffusivité thermique élevée (modification) et faible (quartz) pour le hublot.

L'écart de température est réduit de moitié avec le hublot de diffusivité thermique élevée. Comme dans le cas de l'absence de hublot, l'écart de température entre le centre et le bord n'est pas nul.

➤ **Constatation n°4** : l'écart de température entre le centre et le bord du hublot se répercute sur celui du substrat.

## **VI.4. Conclusion**

Les calculs en régime permanent réalisés dans cette étude ont permis de mettre en évidence une **corrélation entre la répartition de la température du substrat et celle du hublot**.

Les constatations effectuées ont révélées que le hublot a une influence sur la température du substrat et inversement. Ces **constations** sont les suivantes :

- Les propriétés d'émission et de réflexion du substrat, ainsi que celles des parois du réacteur ont un effet sur la température du hublot.
- En l'absence de hublot, l'écart de température entre le centre et le bord du substrat est réduit d'environ 40%.
- La diminution de la température du hublot entraîne une diminution de celle du substrat.
- L'écart de température entre le centre et le bord du hublot se répercute sur celui du substrat.

Ces constatations doivent être **expliquées** pour comprendre la corrélation entre les profils de température du substrat et du hublot. **Les phénomènes impliqués** dans ces constatations permettront de comprendre **la forme du profil de température du substrat**.

## Références du chapitre VI

Bejan, A., (1993), *Heat Transfer*, JohnWiley and Sons, Singapour.

Logerais, P.O., M. Girtan, A. Bouteville, (2006), *Influence of the quartz window in a Rapid Thermal Processing apparatus*, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 8 (1), pp. 139-143.

