
Compréhension de la forme du profil de température du substrat de silicium

*L'objectif de ce chapitre est d'expliquer la forme du **profil de la température du substrat**. Pour y parvenir, il faut interpréter les constations obtenues dans le chapitre VI précédent. Cette interprétation s'appuie sur **les propriétés radiatives** du substrat et du hublot, ainsi que sur celles des autres surfaces du système de chauffage rapide étudié.*

*La démarche est donc la suivante : les propriétés radiatives des surfaces du système sont d'abord décrites. Dans une seconde partie, **les quatre constations** du chapitre VI vont être **interprétées**. Enfin, **une explication de la forme du profil de température** est proposée.*

VII.1. Propriétés radiatives des surfaces du système thermique rapide

L'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et le coefficient de transmission des différentes surfaces du système thermique rapide sont ici présentées. Leurs valeurs sont déterminées à partir des indices optiques complexes comme expliqué au chapitre III.4. Les indices optiques complexes proviennent de l'ouvrage *Handbook of Optical Constants of Solids* (Palik 1998).

L'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et le coefficient de transmission ont été déterminées pour des longueurs d'ondes allant de **0,5 à 100 μm** . Quand la courbe est coupée (par exemple à 20 μm), cela signifie que les valeurs des coefficients n'évoluent pas ou très peu. Il faut aussi garder en tête que **l'émissivité est égale à l'absorptivité** d'après la loi de Kirchhoff (relations III-26 et III-27).

Les spectres sont présentés dans le cas d'un rayonnement arrivant en incidence normale. Pour les rayons en incidence oblique, les valeurs restent dans le même ordre de grandeur.

VII.1.1. Le tungstène des filaments des lampes infrarouges

L'émissivité et la réflectivité du tungstène des filaments des lampes sont données par la Figure VII-1. Leurs valeurs varient très peu dans le domaine de température utilisé qui va de 1500 à 2300 K. Les lampes infrarouges, en raison des propriétés du quartz, émettent **un rayonnement infrarouge centré aux alentours de 1 μm de longueur d'onde**.

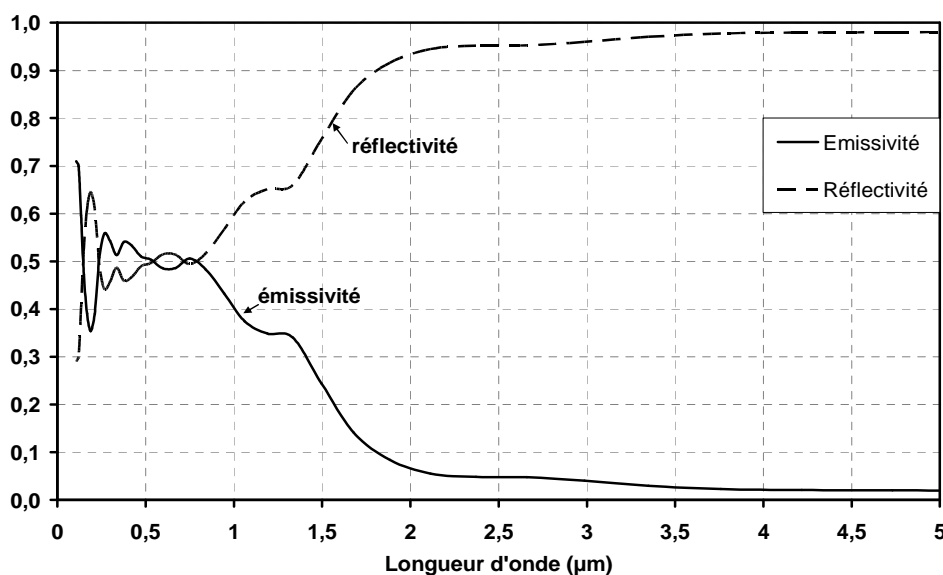


Figure VII-1. Émissivité et réflectivité du tungstène des filaments des lampes (Palik 1998).

VII.1.2. Le substrat de silicium

L'émissivité du substrat de silicium suivant sa température est donnée par la Figure VII-2. Les températures du substrat que l'on considère sont au-dessus de 800 K. Pour ce domaine de température, **l'émissivité du substrat de silicium est de l'ordre 0,7** dans tout le domaine infrarouge. **L'absorptivité est donc de l'ordre de 0,7** dans tout le domaine infrarouge.

La réflectivité et le coefficient de transmission sont indiqués sur la Figure VII-3 pour une température du substrat de silicium de 1000 K. Leurs valeurs ne varient quasiment pas au-dessus de 800 K. La **réflectivité est de l'ordre de 0,3**. Le coefficient de transmission est très faible.

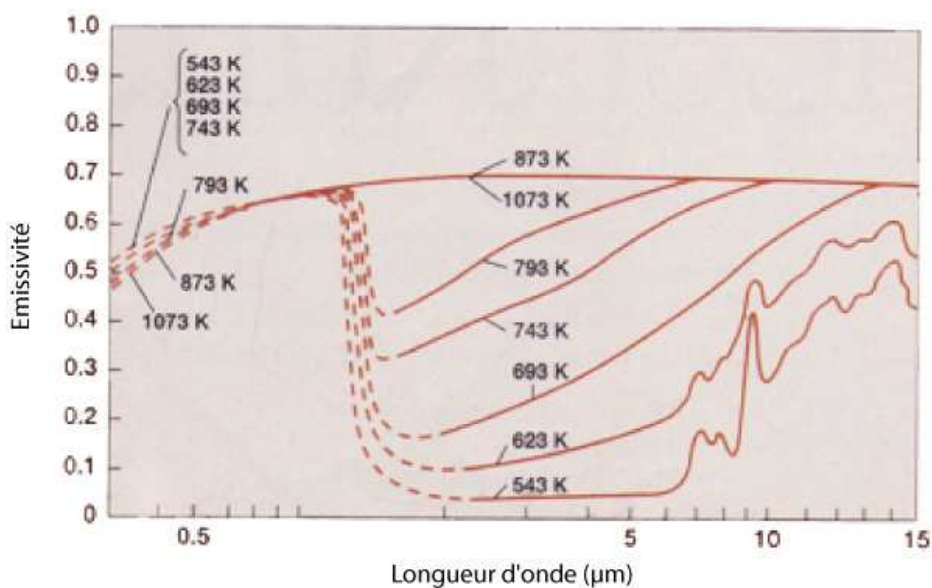


Figure VII-2. Émissivité spectrale du substrat en silicium (Sato 1967).

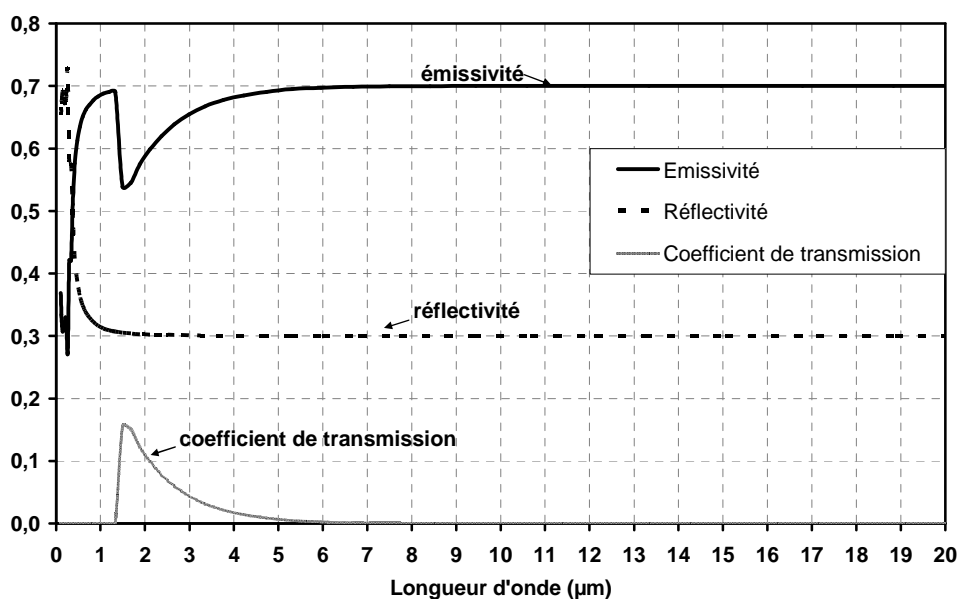


Figure VII-3. Émissivité, réflectivité et coefficient de transmission du substrat de silicium à 1000 K (Palik 1998).

VII.1.3. Le hublot en quartz

L'émissivité, la réflectivité et le coefficient de transmission du hublot en quartz sont données par la Figure VII-4. Leurs valeurs sont indépendantes de la température. L'ampoule en quartz des lampes a les mêmes propriétés.

Le hublot transmet le rayonnement infrarouge émis par le tungstène des filaments des lampes dans une fenêtre allant de 0,2 à 2,6 μm . Le coefficient de transmission est très élevé dans cette fenêtre, de l'ordre de 0,95.

Le hublot a une absorptivité très importante au-dessus de 2,6 μm . En moyenne, elle est de l'ordre de 0,8. Comme l'absorptivité est égale à l'émissivité, le hublot émet de manière importante au-delà de 2,6 μm .

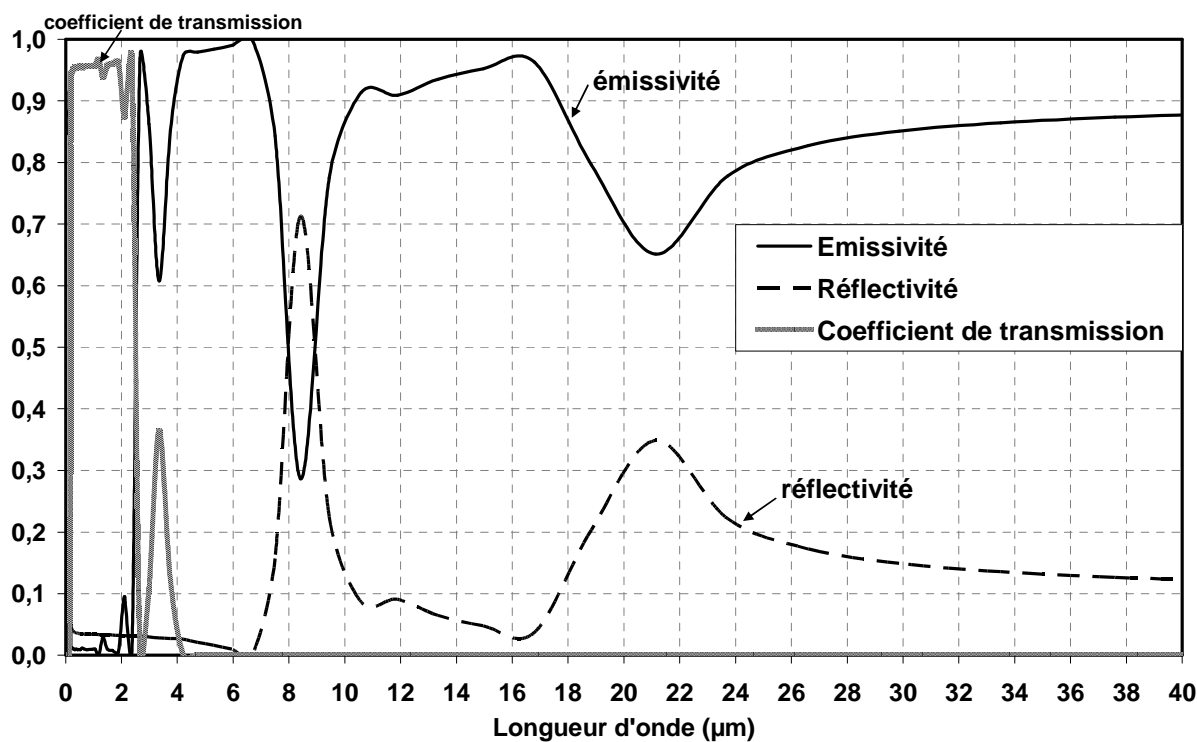


Figure VII-4. Émissivité, réflectivité et coefficient de transmission du hublot en quartz (Palik 1998).

VII.1.4. Les parois du système

L'émissivité et la réflectivité des parois du réacteur et du four sont montrées sur la Figure VII-5. **Les parois ont une réflectivité importante, de 0,75. L'émissivité et l'absorptivité sont de 0,25.** Ces coefficients sont indépendants de la température.

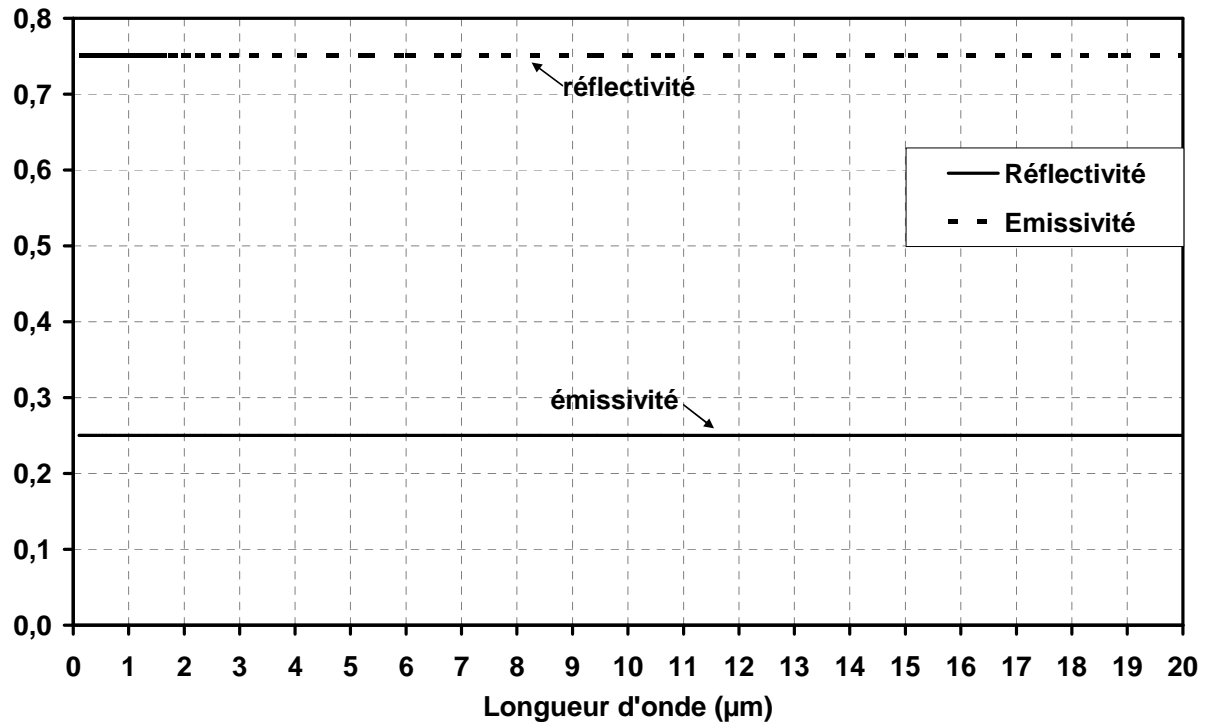


Figure VII-5. Réflectivité et absorptivité des parois du réacteur et du four (Palik 1998).

VII.2. Discussion des constatations à l'aide des propriétés radiatives

À l'aide des propriétés radiatives des surfaces présentées, les constatations du chapitre VI peuvent être interprétées une par une.

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

Le cas où le substrat a les propriétés radiatives du corps noir et celui où il a celles du silicium sont d'abord confrontés. Le cas sans substrat est ensuite confronté à celui où le substrat est parfaitement réfléchissant.

➤ **Comparaison du cas où le substrat a les propriétés radiatives du corps noir à celui où il a celles du silicium**

Lorsque le substrat a la propriété d'un corps noir, il absorbe tout le rayonnement émis par les lampes qu'il reçoit. C'est pour cela qu'il est plus chaud que dans le cas du silicium où l'absorptivité est de 0,7.

Une fois le rayonnement absorbé, le substrat chaud émet dans tout le domaine spectral. L'émissivité du corps noir est supérieure à celle du silicium, 1 contre 0,7 dans tout le domaine infrarouge. Or, le hublot absorbe fortement au-delà de 2,6 μm . Le hublot est donc chauffé par le rayonnement émis par le substrat au-delà de 2,6 μm .

La température du hublot est donc plus élevée dans le cas du corps noir du fait de son émissivité plus importante. En définitif, **la température du hublot suit l'émissivité du substrat.**

➤ **Comparaison du cas sans substrat à celui où le substrat est parfaitement réfléchissant**

Le hublot absorbe avec un faible pourcentage, environ 5%, le rayonnement centré aux alentours de 1 μm émis par les lampes. Il peut absorber dans cette même proportion le rayonnement réfléchi par les parois du réacteur. Comme les calculs ont été réalisés en régime permanent, donc pour un temps supposé infini, le hublot a donc eu le temps d'absorber assez de rayonnement pour atteindre une température élevée.

La température du hublot est plus élevée quand le substrat est parfaitement réfléchissant. Celui-ci **renvoie plus de rayonnement** que dans le cas où il n'y a pas de substrat. Les parois du réacteur ont une réflectivité moins importante (0,75). Les parois absorbent le reste du rayonnement (0,25). Mais une fois absorbé, le rayonnement émis par les parois est faible car leur température est faible (300 K).

Le substrat de silicium réfléchit à 30% le rayonnement qu'il reçoit des lampes. Le hublot absorbe avec un faible taux (5%) dans ce domaine. Par conséquent, le rayonnement des lampes centré aux alentours de 1 μm qui est réfléchi par le substrat chauffe le hublot mais de manière beaucoup moins importante que le rayonnement émis par le substrat.

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

Cela signifie que la présence du hublot n'est pas la seule cause de l'écart de température entre le centre et le bord du substrat. En l'absence de hublot, le substrat est placé dans un réacteur aux parois froides (300 K). **L'influence des parois relativement froides du réacteur est donc une cause plus importante de non-uniformité pour la température du substrat.** Par conséquent, une action au niveau du hublot aurait un résultat limité sur l'uniformité de la température du substrat.

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

On considère les longueurs d'onde au-delà de 2,6 μm .

Le hublot absorbe à 80% le rayonnement émis par le substrat chaud. Le hublot une fois chaud va émettre de manière importante vers le substrat. Or, le substrat absorbe à son tour à 70% le rayonnement reçu du hublot. Puis il va émettre de nouveau vers le hublot. De plus, le substrat réfléchit à 30% le rayonnement émis par le hublot. Il y a donc un **chauffage mutuel par émission, absorption, et réflexion entre le hublot et le substrat** (Logerais et al. 2007).

Si la température du hublot est de l'ordre de 300 K, le flux de chaleur émis par le hublot vers le substrat, qui dépend de la température, est fortement réduit. La température du substrat est alors diminuée.

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

On considère toujours les longueurs d'onde au-delà de 2,6 μm .

Pour interpréter cette constatation, il faut dans un premier temps expliquer pourquoi il y a un écart de température entre le centre et le bord du hublot. Pour y parvenir, utilisons les **dénominations** indiquées dans le schéma de la Figure VII-6 pour les différentes parties du hublot et du substrat.

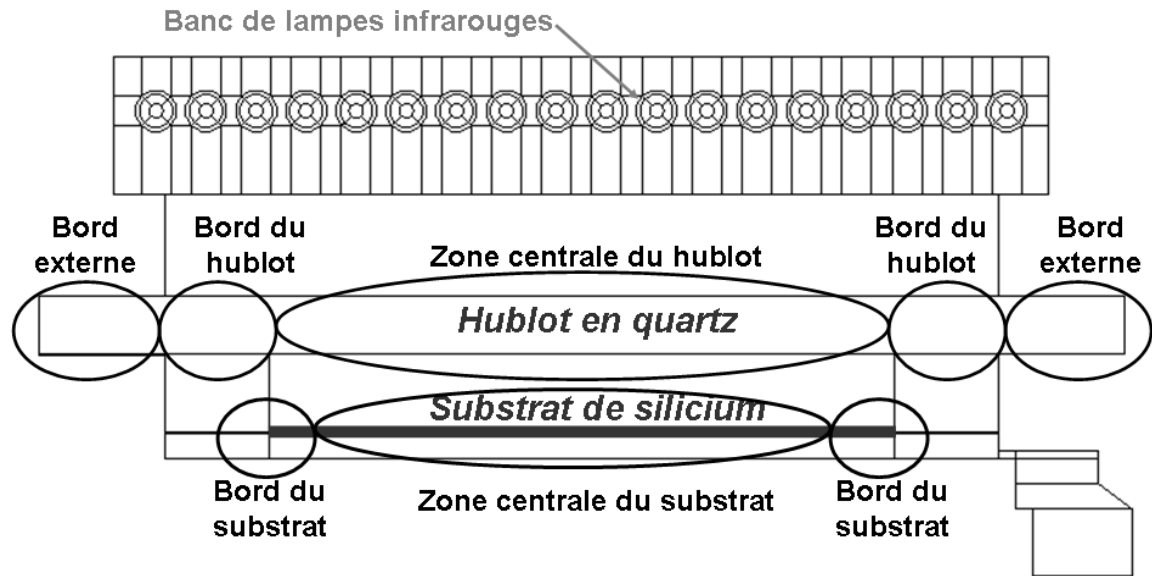


Figure VII-6. Dénomination utilisée.

➤ **Écart de température entre le centre et le bord du hublot**

Quatre raisons peuvent être évoquées pour expliquer la décroissance de la température du centre du hublot vers son bord.

- Comme le substrat et le hublot sont **en regard**, le hublot va recevoir de manière plus importante le rayonnement émis par le substrat dans sa zone centrale. Par conséquent, le bord du hublot va absorber moins de rayonnement.
- De plus, la température au bord du substrat est inférieure à celle en son centre à cause de **l'influence des parois froides**. Le substrat émet donc moins de rayonnement en son bord.
- Il y a aussi un **flux conductif** qui va de la zone centrale du hublot vers son bord externe. En effet, la température est élevée au centre du hublot et le bord externe est à la température de 300 K. Néanmoins, ce flux conductif est faible car le hublot est un mauvais conducteur de chaleur.
- Enfin, la raison majeure est **l'influence de la paroi du réacteur**. Plaçons-nous au niveau du bord du hublot. Dans cette zone, le bord du hublot est très proche de la paroi du réacteur à la température de 300 K. Il y a donc une **perte importante de chaleur du hublot chaud vers la paroi du réacteur à 300 K**. Cette perte se fait par **émission et par conduction**.

➤ **Influence sur l'écart de température entre le centre et le bord du substrat**

Comme la température au bord du hublot est diminuée, l'émission est moins importante au bord. Donc, le rayonnement qui est reçu au bord du substrat est plus faible qu'au centre. **La température du substrat est donc réduite au bord.** Cet effet s'ajoute à celui des parois froides du réacteur.

Quand on réduit l'écart de température centre-bord du hublot avec un hublot de diffusivité élevée, l'émission du hublot vers le substrat devient uniforme. Par conséquent, la température du substrat obtenue est plus uniforme. Cependant, on retrouve des résultats du même ordre de grandeur que dans le cas où on enlève le hublot. Cela confirme que les parois jouent un rôle non négligeable dans la différence de température centre-bord du substrat. Limiter au maximum les gradients de température du hublot ne conduira donc pas à une uniformité maximale de la température du substrat.

VII.3. Phénomènes intervenant dans la forme du profil de température du substrat et du hublot

En **réorganisant** les explications effectuées dans le chapitre VII.2 précédent, les phénomènes majeurs intervenant dans la forme des profils de température du substrat et du hublot en régime permanent peuvent être posés. D'autres commentaires sur l'effet des parois réfléchissantes du réacteur sont apportés.

L'explication de la forme des profils de température du substrat et du hublot peut être divisée **en quatre phases**. Les **phénomènes** se produisant dans ces phases sont représentés sur le **schéma** la Figure VII-7.

- **Phase 1** : Les lampes émettent un flux radiatif centré aux alentours de $1 \mu\text{m}$ qui passe à 95% à travers le hublot.

- **Phase 2** : Ce flux est absorbé à 70% par le substrat de silicium et est réfléchi à 30% par celui-ci. Le substrat chaud émet alors un rayonnement dans tout le domaine infrarouge. Son émissivité est de 70%. Le flux émis prend la direction du hublot et celle de la paroi du réacteur à 300 K :
 - Le flux net échangé entre le bord du substrat chaud et la paroi à 300 K est important car la différence de température est très élevée. Par conséquent, la température du substrat devient moins élevée en son bord qu'en son centre.
 - Il y a un flux émis par le substrat vers le hublot. Comme la température du substrat est moins élevée en son bord, le flux émis par le substrat est plus important en son centre.
 - Il faut ajouter qu'une partie du rayonnement émis par le bord du substrat est réfléchi par la paroi du réacteur. Une grande partie de ce flux réfléchi arrive sur le bord du hublot.

- **Phase 3** : Le hublot absorbe à 80% les rayonnements émis par le substrat au-delà de $2,6 \mu\text{m}$. Il réfléchit le reste. Puisque le flux reçu au centre du hublot est plus important qu'en son bord, la température du hublot est alors plus élevée en son centre. Cet écart est accru par la perte importante de chaleur par émission vers la paroi froide du réacteur et par conduction, en faible partie, vers le bord externe du hublot.

- **Phase 4** : Le rayonnement absorbé par le hublot est aussi réémis en direction du substrat et de la paroi du réacteur. L'émissivité est de 80%.

Comme la température du hublot est plus élevée en son centre, le flux émis par le hublot au centre du substrat est plus important qu'au bord du substrat. L'écart de température entre le centre et le bord du substrat est donc augmenté.

Il faut signaler que l'émission vers la paroi du réacteur à 300 K est très forte au bord du hublot. Cependant, une grande partie de ces rayons sont réfléchis et retombent sur le bord du substrat. Mais cela n'est pas suffisant pour rééquilibrer la température du substrat.

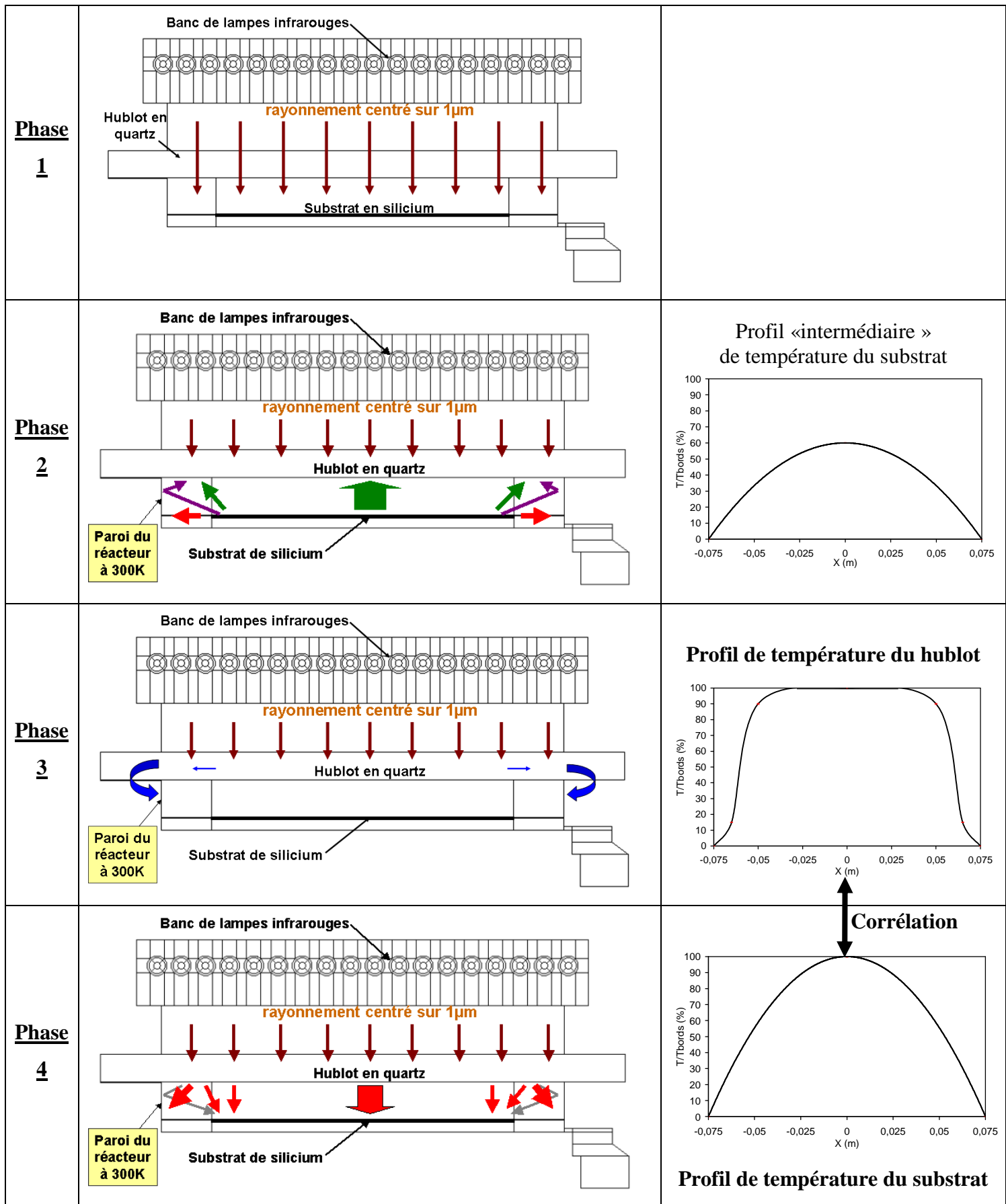


Figure VII-7. Explication de la forme des profils de température du substrat et du hublot en régime permanent.

VII.4. Idées pour uniformiser la température du substrat

Les différents phénomènes qui interviennent dans la forme du profil de température du substrat viennent d'être posés. Cependant, le défi est d'obtenir **une température uniforme** à la surface du substrat. Dans le schéma explicatif de la Figure VII-7, il faut déterminer les phénomènes sur lesquels on peut agir pour améliorer l'uniformité de la température du substrat. **Deux idées** sont ici proposées.

VII.4.1. Réflexion sur la surface inférieure du hublot des rayonnements émis et réfléchis par le substrat

On a vu que le flux émis par le hublot en son centre est plus important qu'en son bord (phase 4). L'écart de température entre le centre et le bord du substrat est alors augmenté.

Il serait donc intéressant de bloquer l'absorption du hublot au-delà de $2,6\ \mu\text{m}$. Pour cela, il faut trouver le moyen de **réfléchir les rayonnements émis par le substrat au-delà de $2,6\ \mu\text{m}$ au niveau de la surface inférieure du hublot** (Figure VII-8). **Le rayonnement centré aux alentours de $1\ \mu\text{m}$ émis par les lampes doit en même temps passer.**

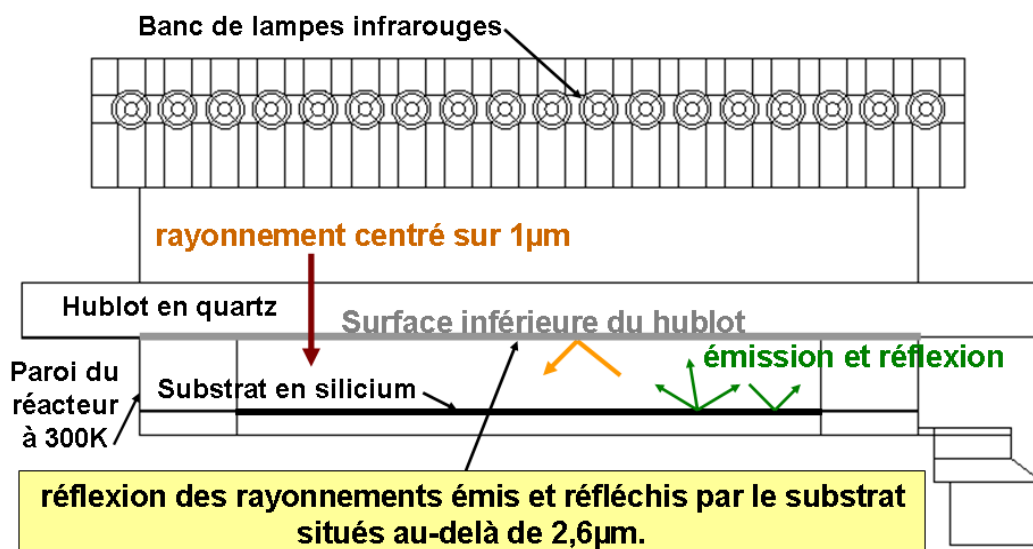


Figure VII-8. Première idée pour améliorer l'uniformité de la température du substrat.

Cette idée permettrait d'éliminer les gradients de température au niveau du hublot. La température du substrat va être plus uniforme. Cependant, cette amélioration serait partielle car l'effet de la paroi froide du réacteur est toujours présent. Il faut trouver une autre idée où l'effet de la paroi serait contrecarré.

VII.4.2. Réflexion au niveau du bord du hublot des rayonnements émis et réfléchis par le bord du substrat

Plaçons-nous dans la région au bord du substrat et du hublot.

Il a été montré dans la phase 2 que le flux reçu par le bord du hublot provient selon les **deux chemins** suivants :

- directement du bord du substrat
- une partie du rayonnement émis par le substrat est réfléchi par la paroi du réacteur et tombe sur le bord du hublot.

Le rayonnement une fois reçu par le bord du hublot est absorbé. Le flux qui est émis au bord du hublot est en conséquence inférieur au flux reçu. De plus, il y a des **pertes importantes** par émission vers la paroi froide du réacteur et par conduction, en faible partie, vers le bord externe du hublot.

Pour éviter ces pertes, l'idée serait de bloquer l'absorption au-delà de $2,6 \mu\text{m}$ **non plus sur toute la surface inférieure du hublot mais seulement au bord du hublot**. Comme précédemment, il faut trouver le moyen de réfléchir les rayonnements émis par le substrat au-delà de $2,6 \mu\text{m}$ mais seulement dans cette zone (Figure VII-8).

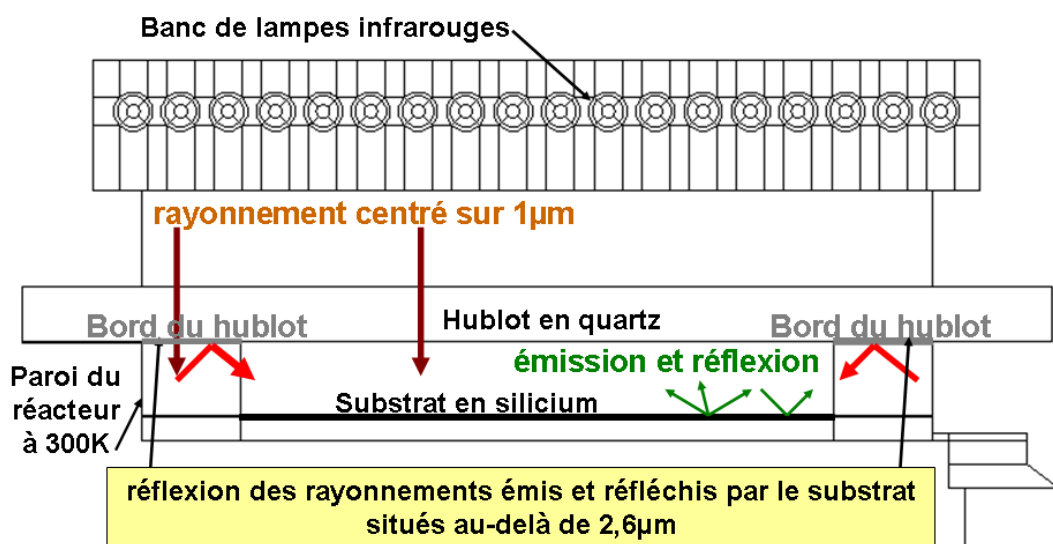


Figure VII-9. Deuxième idée pour améliorer l'uniformité de la température du substrat.

Ainsi, le flux reçu par le bord du hublot est redirigé en grande partie vers le bord du substrat. Deux chemins sont possibles pour les rayons réfléchis par le bord du hublot (Figure VII-10) :

- émission du substrat, réflexion sur le bord du hublot puis réflexion sur la paroi du réacteur et retour sur le bord du substrat (*chemin 1*)
- émission du substrat, réflexion sur la paroi du réacteur puis réflexion sur le bord du hublot et retour sur le bord du substrat (*chemin 2*).

Cependant, à priori, on ne sait pas si ce flux doublement réfléchi arrivant au niveau du bord du substrat sera suffisant pour **compenser** les pertes causées par la paroi du réacteur.

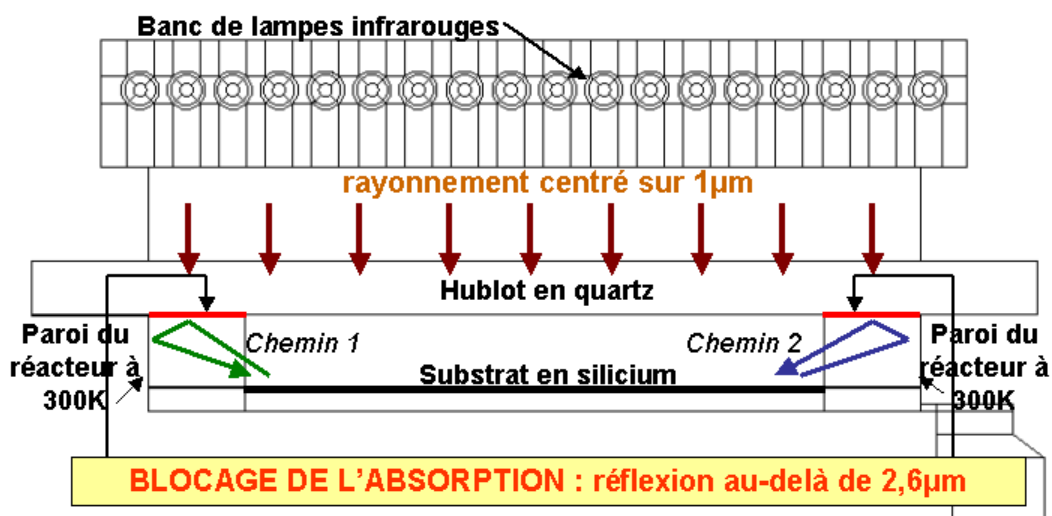


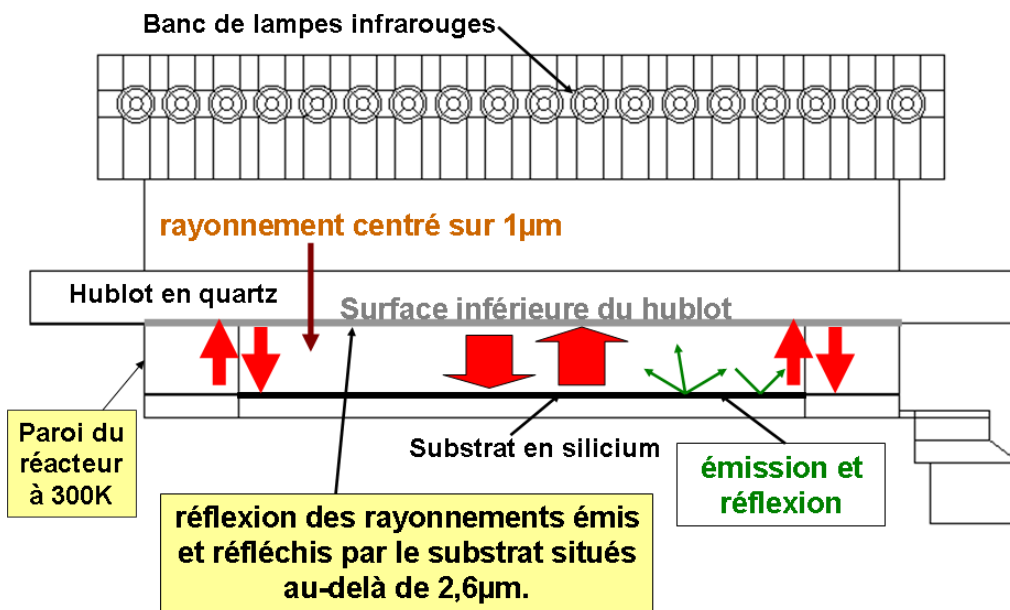
Figure VII-10. Réflexion des rayons émis par le bord du substrat.

Mais, en raisonnant sur l'ordre de grandeur des flux radiatifs, cette idée devrait être efficace. Pour s'en convaincre, comparons les ordres de grandeurs des flux radiatifs pour les deux idées proposées (schémas de la Figure VII-11).

Pour la première idée, le flux réfléchi par la surface inférieure du hublot vers le centre du substrat va être très important. Le flux réfléchi au bord du hublot vers le bord du substrat va être important. Il y a une différence.

Par contre, la deuxième idée implique un flux réémis par la surface inférieure du hublot vers le centre du substrat. Or, le hublot absorbe une partie du rayonnement qu'il reçoit du substrat. Par conséquent, le flux réémis vers le substrat est moins important que le flux reçu. D'autre part, les rayons émis par le bord du substrat sont renvoyés de manière importante vers le bord du substrat. Le flux arrivant sur le substrat devrait donc être **plus équilibré**. L'écart de température entre le centre et le bord du substrat devrait être réduit notablement.

Première idée



$$\Phi_{\text{émis et réfléchi substrat centre}} = \Phi_{\text{réfléchi hublot centre}}$$

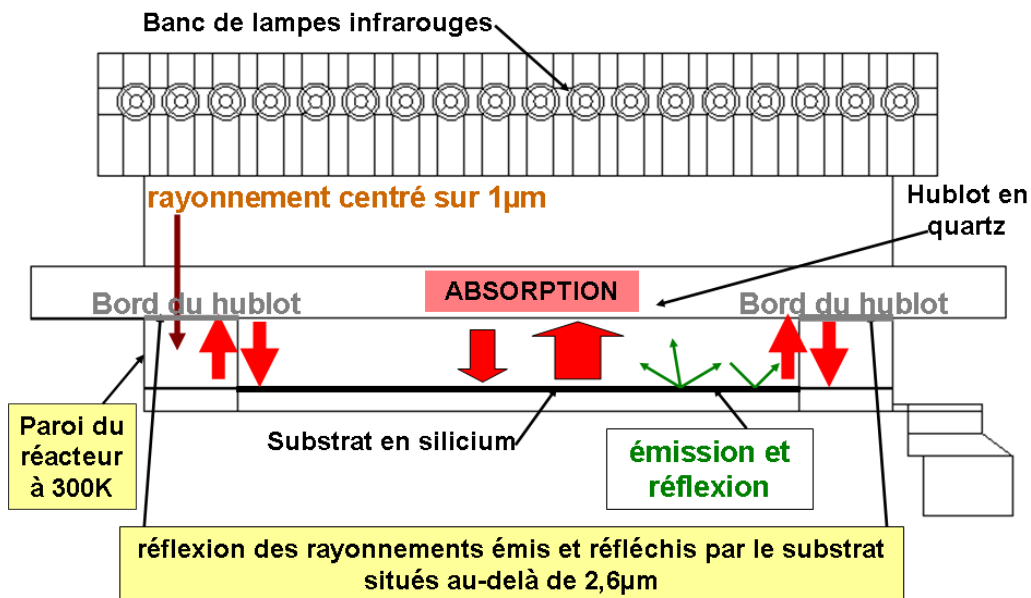
$$\Phi_{\text{émis et réfléchi substrat bord}} = \Phi_{\text{réfléchi hublot bord}}$$

et $\Phi_{\text{émis et réfléchi substrat bord}} < \Phi_{\text{émis et réfléchi substrat centre}}$

et $\Phi_{\text{réfléchi hublot bord}} < \Phi_{\text{réfléchi hublot centre}}$

=> Le flux reçu par le substrat est plus uniforme, mais pas assez.

Deuxième idée



$$\Phi_{\text{émis et réfléchi substrat centre}} = \Phi_{\text{absorbé hublot centre}} + \Phi_{\text{émis hublot centre}}$$

donc $\Phi_{\text{émis hublot centre}} < \Phi_{\text{émis et réfléchi substrat centre}}$

et $\Phi_{\text{émis et réfléchi substrat bord}} = \Phi_{\text{réfléchi hublot bord}}$

on se rapprocherait de $\Phi_{\text{réfléchi hublot bord}} \approx \Phi_{\text{émis hublot centre}}$

=> Le flux reçu par le substrat est plus uniforme.

Figure VII-11. Comparaison entre les ordres de grandeurs des flux.

VII.5. Conclusion

Les constatations effectuées au chapitre VI ont été expliquées une à une à l'aide des **propriétés radiatives des surfaces du système**. Ces explications ont permis de mettre en évidence **les différents phénomènes** qui interviennent dans la forme des profils de la température du substrat et du hublot. **Un schéma en quatre phases** montre ces différents phénomènes. La corrélation de la température du substrat avec celle du hublot est maintenant interprétée.

L'analyse des phénomènes expliquant la forme du profil du substrat a permis de proposer **deux idées** pour avoir **une meilleure uniformité de sa température**. Ces deux idées impliquent de **réfléchir le rayonnement infrarouge au-delà de 2,6 μm sur la surface inférieure du hublot tout en laissant passer le rayonnement émis par les lampes qui est centré aux alentours de 1 μm** .

Ces deux idées doivent maintenant être **vérifiées**. Si tel est le cas, il faut trouver le moyen de les mettre en œuvre expérimentalement.

Références du chapitre VII

Logerais, P.O., D. Chapron, A. Bouteville, (2007), *Transient simulations of a Rapid Thermal Processing apparatus*, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 9 (4), pp. 1082-1086.

Palik, E.D., (1998), *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, New York.

Sato, T., (1967), *Spectral Emissivity of Silicon*, Japanese Journal of Applied Physics, 6 (3), p. 339.

