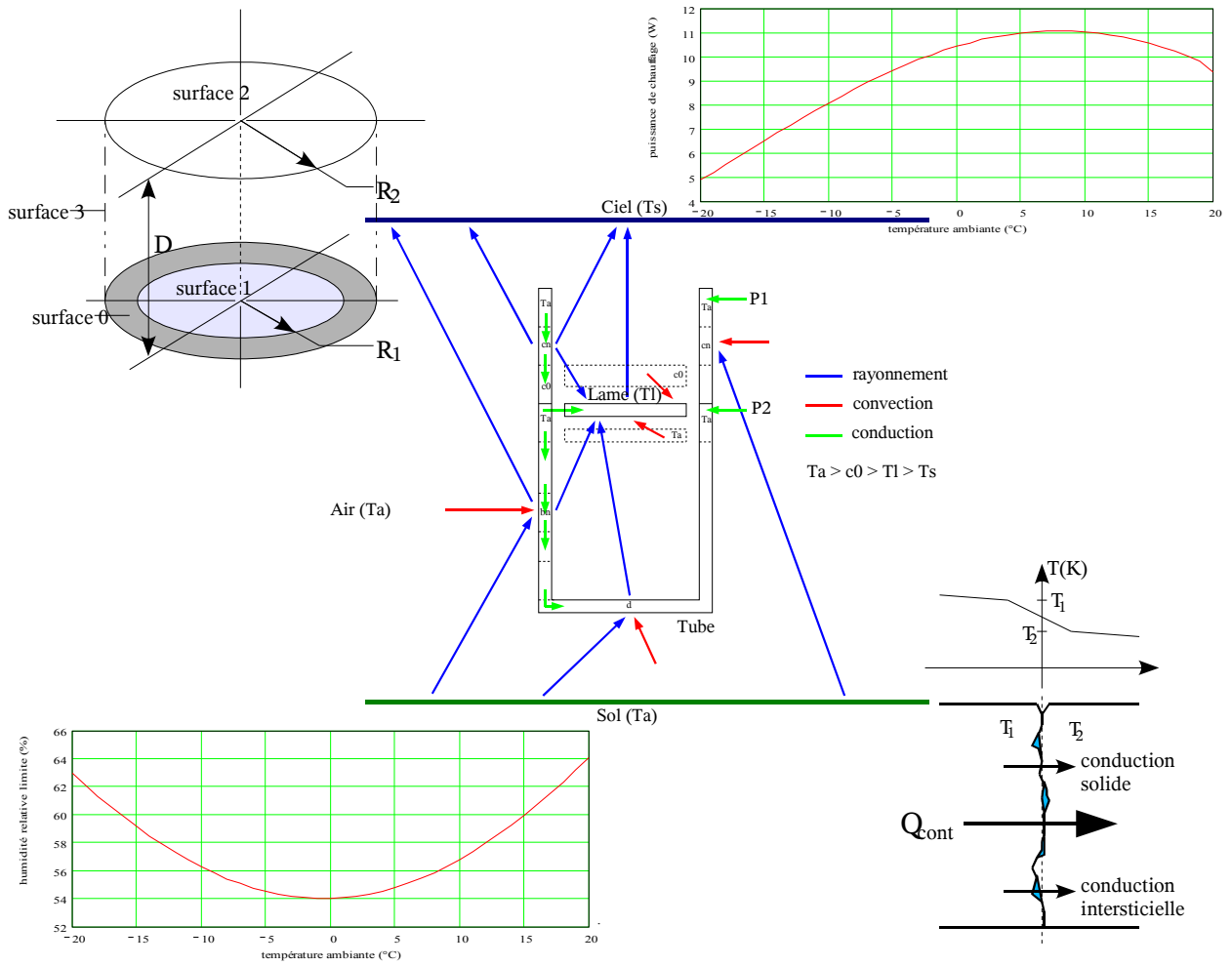


Buée et lame de fermeture : une histoire de transfert thermique



Didier Levavasseur
le 28 décembre 2004

Buée et lame de fermeture : une histoire de transfert thermique

Introduction

Chaque astronome amateur a inmanquablement subi une nuit ou l'autre un fâcheux dépôt d'humidité mettant prématurément fin à une séance d'observation prometteuse. Tout à chacun a pu également constater que les instruments à tube fermé sont très sensibles à l'humidité : un dépôt de buée ou de givre se forme très facilement sur la lentille frontale des lunettes, sur les lames de fermeture des Schmidt-Cassegrain ou les ménisques des Maksutov. Les tubes ouverts y sont nettement moins sensibles mais ne sont pas à l'abri pour autant : j'ai le vague souvenir que le miroir secondaire est en général affecté le premier mais il m'est également arrivé de voir le primaire d'un Newton se couvrir de buée. Ces dépôts d'humidité apparaissent d'ailleurs aussi bien en été qu'en hiver sous forme de buée ou de givre lorsque la température ambiante est inférieure ou proche de 0° C. Les tubes sont également affectés et peuvent se transformer paraît-il dans certaines situations désespérées en quelque chose qui ressemble à une gouttière.

La solution habituelle pour lutter contre ce phénomène est l'utilisation conjointe d'un pare-buée et d'une résistance chauffante (je sais par expérience que l'utilisation d'un pare-buée seul ne suffit pas, et à l'évidence une résistance chauffante seule ne suffit pas non plus comme un témoignage récent me l'a confirmé). Ces mesures ont essentiellement un caractère préventif, les seules actions curatives vraiment efficaces étant le sèche-cheveux ou le retour à la maison. Il est communément admis que la longueur optimale du pare-buée doit être approximativement le diamètre du tube optique : ceci paraît être effectivement un bon compromis entre l'efficacité du bafflage radiatif et l'encombrement sans pour autant créer de vignelage.

Ce document présente les travaux de simulations menés avec un modèle propriétaire simplifié. Les paragraphes suivants constituent une synthèse des résultats obtenus que chacun pourra confronter avec son expérience. Les résultats détaillés sont donnés dans les annexes A à H pour des tubes fermés de 8, 10, 12 et 14 pouces de diamètre, tandis que l'annexe I consiste en une présentation des modèles utilisés précédée de quelques rappels théoriques sur le transfert de chaleur.

Conditions de formation de la buée

La buée se forme sur une surface lorsque sa température est inférieure ou égale au point de rosée auquel cas la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant se condense. Lorsque la température de la surface est inférieure à 0°C, il y a formation de givre par sublimation inverse.

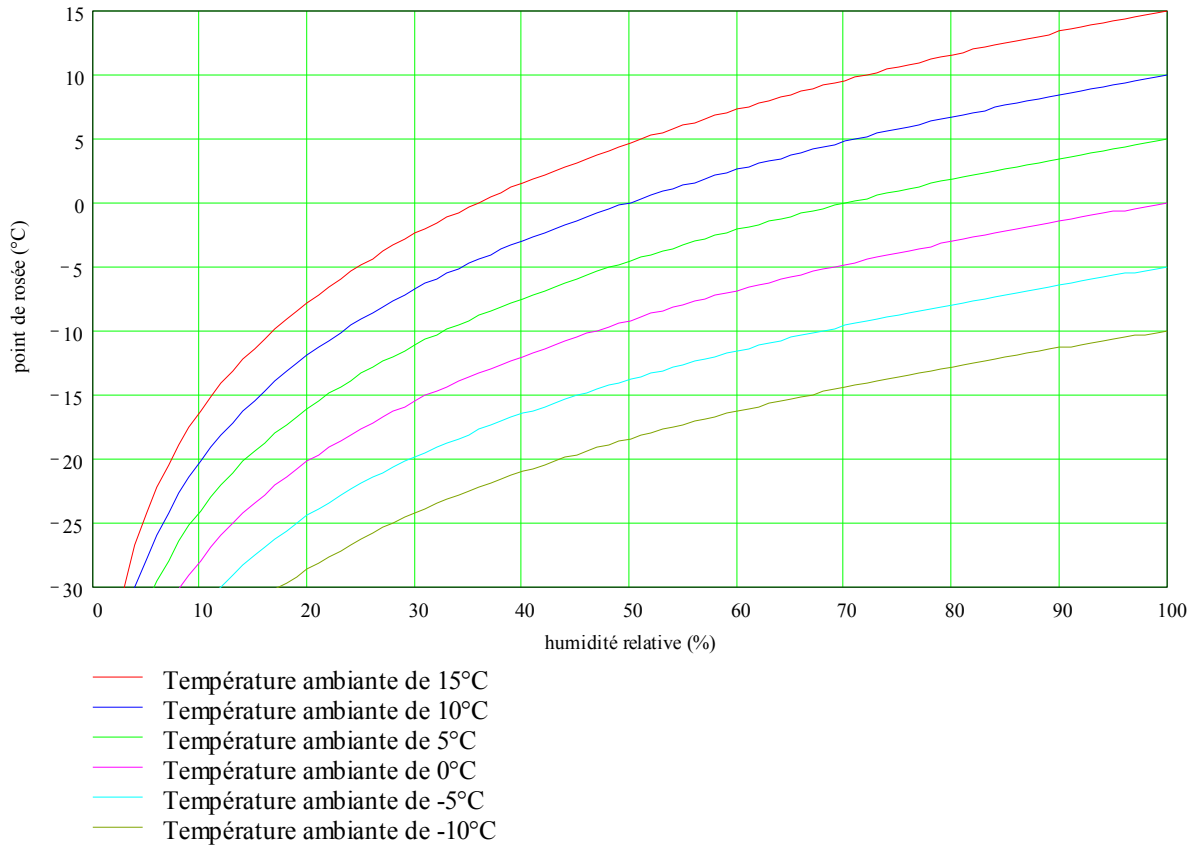
J'ai utilisé la formule suivante [R3] qui donne le point de rosée T_R en fonction de la température ambiante T_A et de l'humidité relative HR avec une approximation meilleure que le degré :

$$T_R(HR, T_A) = 237,3 \cdot \frac{-7,5 \cdot \frac{T_A}{237,3 + T_A} - \log(HR) + 2}{0,66077 + 7,5 \cdot \frac{T_A}{237,3 + T_A} + \log(HR) - 2 - 8,16077} \quad [1]$$

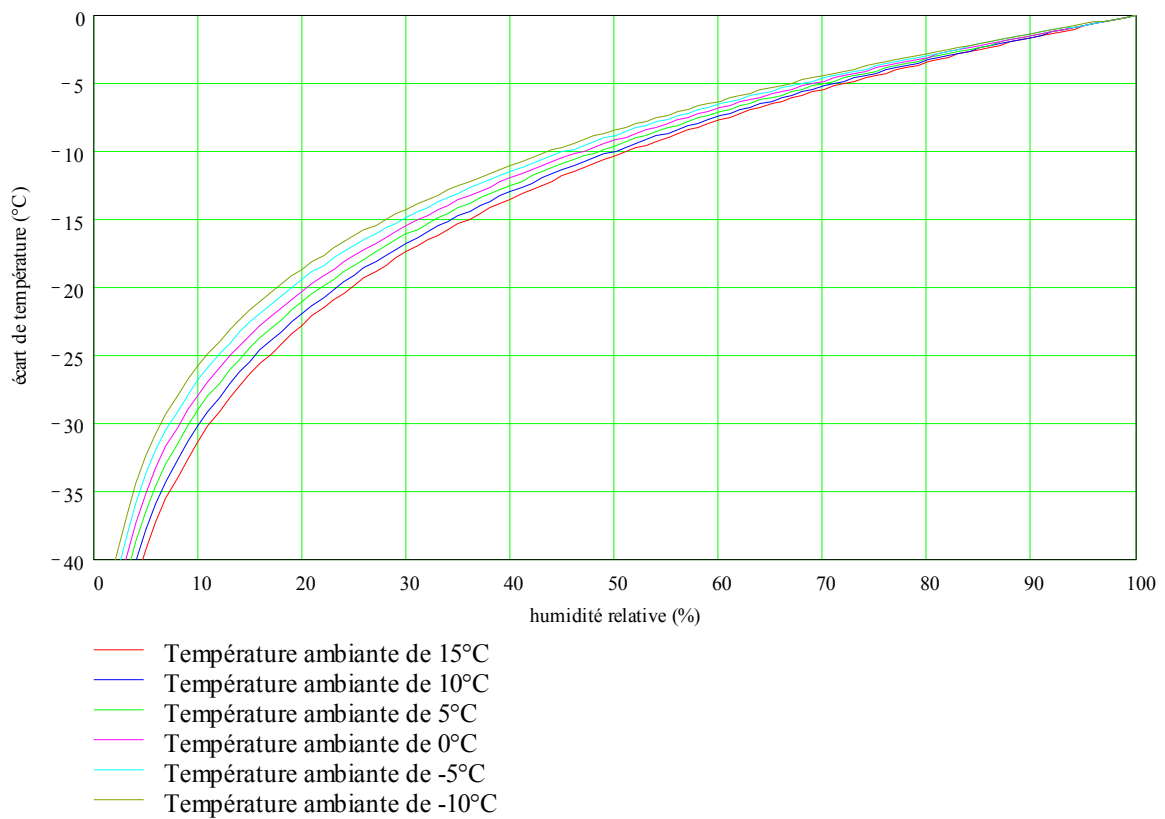
où :

- T_R et T_A sont exprimés en °C
- HR est exprimé en %

On peut alors tracer la valeur du point de rosée en fonction de l'humidité relative et plus intéressant encore l'écart de température entre le point de rosée et la température ambiante.



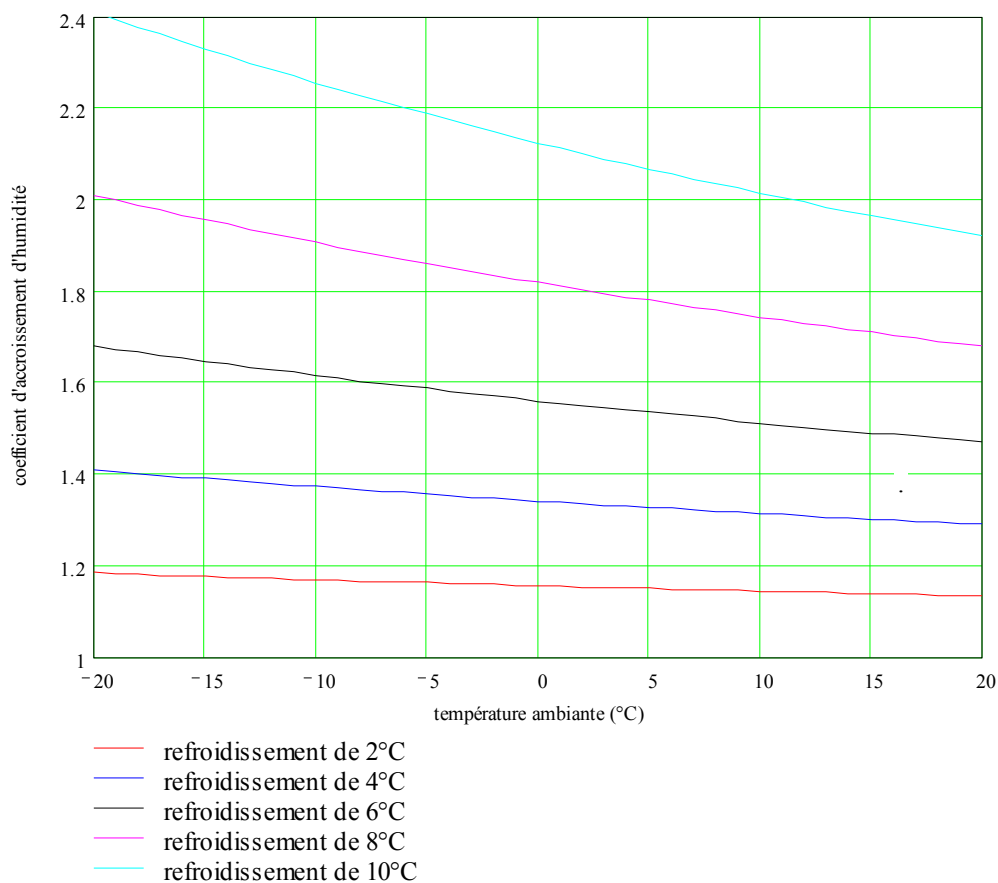
Point de rosée en fonction de l'humidité relative



Différence entre le point de rosée et la température ambiante en fonction de l'humidité relative

Ceci amène quelques commentaires :

- le point de rosée est toujours inférieur ou égal à la température ambiante
- l'écart entre le point de rosée et la température ambiante décroît avec l'augmentation de l'humidité relative
- lorsque l'humidité relative est de 100%, le point de rosée est égal à la température ambiante et il y a présence de brouillard
- lorsqu'il y a baisse de la température ambiante à densité volumique de vapeur d'eau constante, il y a augmentation de l'humidité relative [R5]. Lorsque la nuit est claire, l'humidité relative est presque toujours plus élevée en seconde partie de nuit, le refroidissement du sol par rayonnement provoquant par convection le refroidissement de l'air. Ce phénomène connu sous le terme d'inversion de température est d'ailleurs un des mécanismes d'apparition du brouillard, et l'examen de la courbe suivante tendrait à faire penser qu'un taux d'humidité de 85% au début d'une nuit claire va systématiquement donner du brouillard au matin. Il apparaît que la baisse de température par rayonnement au cours de la nuit [R6] peut atteindre la dizaine de degrés.



Accroissement du taux d'humidité relative avec la diminution de température

Comment éviter la formation de buée : approche qualitative

Pour éviter la formation de la buée, il suffit de maintenir l'ensemble des pièces optiques à une température supérieure au point de rosée. Il ne serait pas inintéressant non plus de maintenir l'ensemble du tube à une température supérieure au point de rosée pour éviter toute condensation favorable à l'oxydation des métaux ou à l'altération des matériaux synthétiques.

La température d'un corps s'établit en dressant le bilan des flux de chaleur échangés entre le corps et son environnement. Le corps se stabilise à la température pour laquelle le flux entrant est égal au flux sortant en tenant compte de l'absorption ou de la création interne de chaleur. Les 3 modes d'échange de chaleur sont :

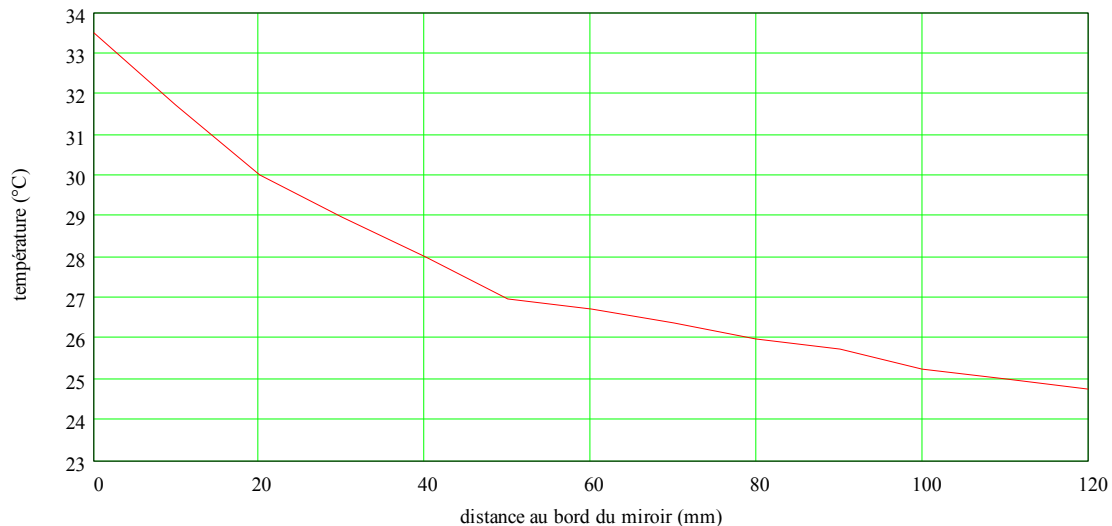
- la conduction qui définit un échange par contact entre 2 solides
- la convection qui définit un échange par contact entre un solide et un fluide
- le rayonnement thermique qui définit un échange à distance par radiation électromagnétique

En premier lieu, il conviendrait de maintenir l'ensemble de l'instrument (pare-buée inclus) à une température aussi proche que possible de la température ambiante mais toujours inférieure, afin de minimiser la turbulence locale due à la convection générée par le tube bien que la température d'un tube laissé à un refroidissement naturel ne s'écarte pas de la température ambiante de façon me semble-t-il à générer une turbulence locale gênante. Cette configuration présente en outre l'avantage de permettre de minimiser l'échange de flux de chaleur entre le télescope et l'atmosphère dont l'évaluation précise est difficile. De plus c'est bien la situation vers laquelle nous allons essayer de converger lorsque l'humidité relative est élevée, cas le plus propice à l'apparition de la buée. Négliger le transfert de chaleur par convection reviendrait en outre à fournir dans tous les cas où la température du télescope reste inférieure à la température ambiante un majorant de la puissance de chauffage à appliquer puisque le transfert de chaleur s'effectue alors de l'atmosphère vers l'instrument. Quoiqu'il en soit, le coefficient surfacique de convection \bar{h} reste pour notre problème de convection naturelle en régime laminaire bien inférieur à $10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Donc si on se place dans l'hypothèse d'un instrument en quasi-équilibre thermique avec l'atmosphère le seul mode d'échange de chaleur significatif entre l'instrument et son environnement reste le rayonnement thermique.

Le premier moyen que nous avons à notre disposition pour lutter contre les dépôts d'humidité est le pare-buée dont le rôle n'est pas d'absorber l'humidité de l'air mais d'augmenter le flux de chaleur radiatif reçu par la lame de fermeture ou la lentille frontale. La fonction d'un pare-buée est en fait de diminuer l'angle solide sous lequel est vu le ciel qui est toujours plus froid d'une vingtaine de degrés que l'air ambiant [R7], sachant que le pare-buée se stabilise naturellement à une température moyenne estimée inférieure de cinq degrés environ à la température ambiante, soit à une température bien supérieure à celle du ciel. L'idéal serait de chauffer légèrement le pare-buée mais dans ce cas il doit nécessairement être bon conducteur de la chaleur. D'une manière générale il est toujours favorable pour l'équilibre thermique de recourir à des matériaux bons conducteurs de la chaleur car l'utilisation de matériaux isolants est susceptible de créer des courants thermiques.

Le deuxième moyen dont nous disposons pour lutter contre les dépôts d'humidité est la résistance chauffante dont la fonction ne doit pas être le chauffage de la lame de fermeture car le verre est un mauvais conducteur thermique. Injecter 10 ou 20 W dans une lame de fermeture engendre un gradient de température dont les effets ne sont certainement pas sans conséquences : le relevé de la température à la surface d'un disque de verre de 250 mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur dans lequel 10 W (aux pertes de couplage près) sont injectés par la circonférence est présenté ci-dessous. Les résultats de cette expérience réalisée avec les moyens du bord sont essentiellement significatifs par l'ordre de grandeur du gradient de température qu'ils mettent en évidence : un écart de 8°C environ a été relevé entre le centre et le bord du disque. L'intérêt d'une résistance chauffante est donc de permettre d'améliorer le bilan des échanges radiatifs entre la lame de fermeture et la structure de l'instrument ce qui suppose que le tube comme le pare-buée sont construits dans un matériau dont la conductivité thermique est élevée : inutile donc de s'évertuer à chauffer un pare-buée en plastique ou un tube en fibre de verre (pour la fibre de carbone il me semble que cela dépend de la composition). Cela laisse penser aussi qu'une résistance chauffante n'a certainement réellement d'intérêt qu'associée à un pare-buée.



Gradient de température dans un disque de verre de 250 mm de diamètre soumis à un chauffage périphérique de 10 W à une température ambiante de 23°C

Comment éviter la formation de buée : approche quantitative

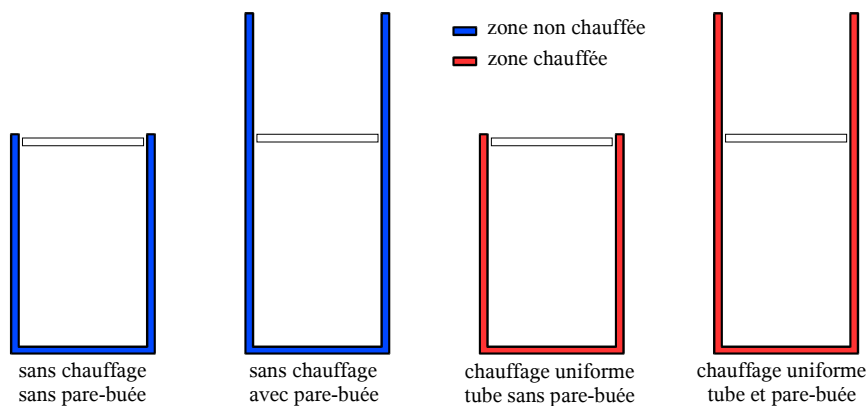
Tout ce qui a été dit précédemment reste assez vague puisque nous n'y avons associé aucun ordre de grandeur. Pour donner des ordres de grandeur, longueur du pare-buée et puissance de chauffage nécessaires à la prévention de la buée en fonction de la température ambiante et de l'humidité relative, il est nécessaire d'établir un modèle.

La construction du modèle repose sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices en partie issues de l'approche qualitative :

- l'instrument est à l'équilibre thermique, les températures sont stationnaires. Dans ce cas les flux convectifs internes sont faibles mais pas nuls puisque toutes les pièces du télescope ne sont pas stabilisées à la même température. Négliger ces flux convectifs internes définit un pire cas.
- l'intérieur et l'extérieur du tube comme du pare-buée sont peints avec une peinture mate d'émissivité 0,9 (émissivité standard d'une peinture mate noire ou blanche)
- la présence du miroir primaire n'est pas prise en compte (température identique aux autres éléments à l'équilibre thermique, réflectivité thermique proche de 1 à comparer à l'émissivité de 0,9 d'une peinture mate)
- l'instrument est supposé pointer vers le zénith faisant apparaître une symétrie de révolution salvatrice (hypothèse réaliste et de plus pessimiste)
- l'émissivité de la lame de fermeture est égale à 0,9 (verre standard)
- la longueur du pare-buée est égale à deux fois et demi le rayon du tube, sauf indication contraire
- le tube et le pare-buée sont thermiquement totalement couplés et construits tous les deux dans un matériau parfaitement conducteur de la chaleur
- le couplage de la résistance chauffante avec la structure est supposé parfait

Les deux derniers points ne sont pas réalistes mais permettent de supposer que la température du tube et du pare-buée est uniforme et donnent la valeur maximale de l'humidité relative que l'on peut combattre avec un pare-buée et une résistance chauffante, en maintenant la totalité de la structure à la température ambiante. Ceci pourrait être approché avec une structure chauffante (résistance intégrée au tube et au pare-buée) et thermiquement conductrice permettant un chauffage uniforme, qu'aucun constructeur ne propose bien évidemment. C'est aussi la configuration qui donne la puissance de chauffage maximale applicable tout en maintenant toute partie de la structure à une température inférieure ou égale à la température ambiante.

L'analyse sans résistance ni pare-buée nous donne la valeur de l'humidité relative à partir de laquelle il convient de prendre des mesures.



Configurations de base

L'étude des 4 configurations de base ainsi définies a été conduite pour des tubes Schmidt-Cassegrain de 8, 10, 12 et 14 pouces à la fois sans et avec inversion de température, à considérer respectivement en début et en fin de nuit, en supposant que le sol est à la température ambiante :

- Schmidt-Cassegrain 8 pouces sans inversion de température (Annexe A)
- Schmidt-Cassegrain 8 pouces avec inversion de température (Annexe B)
- Schmidt-Cassegrain 10 pouces sans inversion de température (Annexe C)
- Schmidt-Cassegrain 10 pouces avec inversion de température (Annexe D)
- Schmidt-Cassegrain 12 pouces sans inversion de température (Annexe E)
- Schmidt-Cassegrain 12 pouces avec inversion de température (Annexe F)
- Schmidt-Cassegrain 14 pouces sans inversion de température (Annexe G)
- Schmidt-Cassegrain 14 pouces avec inversion de température (Annexe H)

Dans tous les cas l'épaisseur de la lame de Schmidt est de 5 mm (ce paramètre n'a que peu d'influence). La géométrie des tubes (hors pare-buée) est la suivante :

- Schmidt-Cassegrain 8 pouces : diamètre 25 cm et longueur 43 cm
- Schmidt-Cassegrain 10 pouces : diamètre 30 cm et longueur 54 cm
- Schmidt-Cassegrain 12 pouces : diamètre 35 cm et longueur 65 cm
- Schmidt-Cassegrain 14 pouces : diamètre 40 cm et longueur 76 cm

Les tableaux suivants résument les ordres de grandeur déterminés pour les 4 configurations précédentes. Les instruments sont plus sensibles à la buée lorsque la température ambiante est proche de 0°C ce qui n'est pas étonnant puisque c'est vers 0°C que l'écart entre la température effective du ciel et la température ambiante est le plus important. Le bilan thermique étant essentiellement lié au facteur de forme de la structure, les humidités relatives maximales supportables selon que le tube est chauffant ou non-chauffant muni ou non d'un pare-buée ne dépendent presque pas du diamètre du tube considéré. La puissance de chauffage nécessaire pour maintenir la structure à la température ambiante dépend bien évidemment de sa surface et est maximale aux environs de 10°C puisque c'est à cette température que le bilan de flux radiatif avec le ciel est le plus défavorable. A noter que dans tous les cas, la lame de fermeture est bien évidemment la pièce la plus froide du télescope, ce qui maintient une inversion de température dans le pare-buée.

configuration de la structure	humidité relative supportable sans inversion de température	humidité relative supportable avec inversion de température
tube non-chauffant sans pare-buée	# 54%	# 60%
tube non-chauffant avec pare-buée	# 61%	# 67%
tube chauffant sans pare-buée	# 71%	# 75%
tube chauffant avec pare-buée	# 95%	# 96%

Ordre de grandeur de l'humidité relative supportable par un SC 8 pouces à une température ambiante de 0°C pour les 4 configurations de base

configuration de la structure	humidité relative supportable sans inversion de température	humidité relative supportable avec inversion de température
tube non-chauffant sans pare-buée	# 52%	# 59%
tube non-chauffant avec pare-buée	# 61%	# 66%
tube chauffant sans pare-buée	# 68%	# 73%
tube chauffant avec pare-buée	# 94%	# 95%

Ordre de grandeur de l'humidité relative supportable par un SC 10 pouces à une température ambiante de 0°C pour les 4 configurations de base

configuration de la structure	humidité relative supportable sans inversion de température	humidité relative supportable avec inversion de température
tube non-chauffant sans pare-buée	# 51%	# 58%
tube non-chauffant avec pare-buée	# 60%	# 66%
tube chauffant sans pare-buée	# 66%	# 72%
tube chauffant avec pare-buée	# 94%	# 95%

Ordre de grandeur de l'humidité relative supportable par un SC 12 pouces à une température ambiante de 0°C pour les 4 configurations de base

configuration de la structure	humidité relative supportable sans inversion de température	humidité relative supportable avec inversion de température
tube non-chauffant sans pare-buée	# 50%	# 57%
tube non-chauffant avec pare-buée	# 60%	# 66%
tube chauffant sans pare-buée	# 65%	# 70%
tube chauffant avec pare-buée	# 94%	# 95%

Ordre de grandeur de l'humidité relative supportable par un SC 14 pouces à une température ambiante de 0°C pour les 4 configurations de base

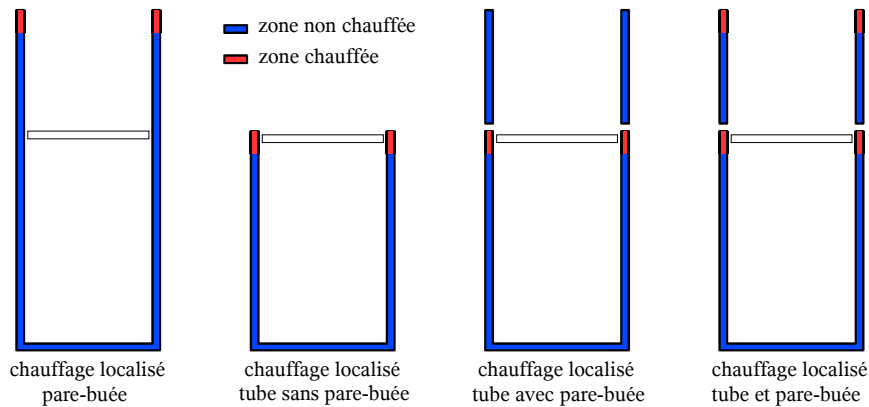
configuration	SC 8 pouces	SC 10 pouces	SC 12 pouces	SC 14 pouces
sans pare-buée sans inversion	# 15 W	# 23 W	# 32 W	# 43 W
avec pare-buée sans inversion	# 28 W	# 42 W	# 58 W	# 76 W
sans pare-buée avec inversion	# 13 W	# 19 W	# 27 W	# 36 W
avec pare-buée avec inversion	# 24 W	# 35 W	# 48 W	# 63 W

Puissance de chauffage pour maintenir la structure à la température atmosphérique avec chauffage uniforme de la structure pour une température ambiante de 10°C

Aucun instrument du commerce ne présente malheureusement de tube et de pare-buée avec un chauffage intégré. Il faut toujours ajouter un élément chauffant externe sous forme d'un ruban chauffant à installer sur la circonférence du tube, ce qui en général est fait au niveau de la lame de fermeture. Le tube n'étant pas thermiquement parfaitement conducteur, ce chauffage local provoque un gradient de température décroissant à partir de la résistance.

Les 4 configurations de chauffage localisé étudiées sont pour un tube et un pare-buée en aluminium de 3 mm d'épaisseur :

- résistance chauffante placée en haut du pare-buée, avec couplage thermique parfait entre le pare-buée et le tube supposés donc constituer une pièce unique
- résistance chauffante placée en haut du tube juste sous la lame de fermeture sans pare-buée
- résistance chauffante placée en haut du tube juste sous la lame de fermeture plus pare-buée, avec isolation thermique parfaite entre le pare-buée et le tube
- résistance chauffante placée en haut du tube juste sous la lame de fermeture ainsi qu'en haut du pare-buée, avec isolation thermique parfaite entre le pare-buée et le tube



Configurations pratiques de chauffage

Si ces 4 configurations préservent la stabilité des couches d'air à l'intérieur du tube optique, seules les 2 premières la conservent naturellement à l'extérieur du tube sur le trajet optique, à condition d'adapter la puissance de chauffage afin de maintenir la température du tube et du pare-buée inférieure à la température ambiante, la partie du tube ou du pare-buée sous la résistance étant naturellement le point le plus chaud. La troisième configuration ne conserve pas la stabilité des couches d'air à l'intérieur du pare-buée car celui-ci est à une température inférieure de quelques degrés à la lame de fermeture : l'inversion de température n'est donc plus maintenue à l'intérieur du pare-buée. La dernière configuration ne conserve la stabilité des couches d'air à l'intérieur du pare-buée que si la résistance thermique de ce dernier est suffisamment faible pour que sa partie basse reste à une température supérieure à celle de la lame, et notamment que s'il présente une épaisseur supérieure ou égale à 3 mm lorsqu'il est construit en aluminium.

Le modèle étant dans ces 4 cas bien plus fastidieux à établir que précédemment, les travaux n'ont été conduits que pour un tube [Schmidt-Cassegrain 8 pouces sans inversion \(Annexe A\)](#) et [avec inversion de la température atmosphérique \(Annexe B\)](#) dans le cas d'un ruban chauffant de 2 centimètres de large. Le modèle intègre deux hypothèses supplémentaires destinées à simplifier son écriture :

- le couplage de la résistance chauffante avec la structure est supposé parfait ce qui implique de l'appliquer sur le tube avec une pression assez forte, au moyen d'un ruban élastique par exemple, et d'isoler sa face extérieure, idéalement à l'aide d'une feuille de polystyrène expansé.
- un pare-buée en aluminium donc relativement bon conducteur de la chaleur, permet dans le cas du chauffage du tube avec un pare-buée thermiquement découplé, de supposer la température du pare-buée homogène. Si le pare-buée était en plastique ou dans tout autre matériau isolant, cette hypothèse devrait être reconsidérée et définirait une configuration moins favorable.

configuration de chauffage localisé	humidité relative supportable sans inversion de température	humidité relative supportable avec inversion de température
au niveau du pare-buée	# 74%	# 78%
au niveau de la lame sans pare-buée	# 69%	# 73%
au niveau de la lame avec pare-buée	# 80%	# 83%
au niveau de la lame et du pare-buée	# 87%	# 89%

Humidité relative pour un SC 8 pouces dans une configuration de chauffage localisé gardant la structure sous la température atmosphérique à une température ambiante de 0°C

configuration de chauffage localisé	puissance de chauffage sans inversion de température	puissance de chauffage avec inversion de température
au niveau du pare-buée	# 13 W	# 11 W
au niveau de la lame sans pare-buée	# 9,5 W	# 8 W
au niveau de la lame avec pare-buée	# 9 W	# 7,5 W
au niveau de la lame et du pare-buée	# 20 W	# 17 W

Puissance de chauffage pour un SC 8 pouces dans une configuration de chauffage localisé gardant la structure sous la température atmosphérique à une température ambiante de 10°C

Bien évidemment dans le cas d'un chauffage localisé, l'humidité relative supportable est inférieure à ce que l'on peut espérer de mieux avec un chauffage uniforme. Toutefois, en plus du fait que c'est la seule accessible à l'amateur, cette configuration est intéressante si l'on tient compte de son rendement énergétique :

- un chauffage localisé du pare-buée donne les mêmes résultats qu'un chauffage uniforme du tube sans pare-buée pour une puissance consommée inférieure de 15%
- un chauffage localisé du tube avec un pare-buée non chauffé donne des résultats certes inférieurs à un chauffage uniforme du tube et du pare-buée, mais pour une puissance consommée 3 fois plus faible, et des résultats bien meilleurs qu'un chauffage uniforme du tube sans pare-buée pour une puissance consommée inférieure de 40%. A noter que c'est le seul cas où le pare-buée se retrouve à une température inférieure à la lame et qu'il convient donc de placer sur sa face intérieure une feuille de papier buvard afin d'éviter des coulures sur la lame de fermeture et de poursuivre tranquillement les observations qui sinon resteraient possibles.
- un chauffage localisé du tube et du pare-buée donne des résultats presque aussi bons qu'un chauffage uniforme du tube et du pare-buée pour une puissance consommée inférieure de 30%.

Si l'on veut avec un chauffage localisé combattre des taux d'humidité plus élevés, il faut chauffer localement le tube ou le pare-buée à une température supérieure à la température ambiante et donc renoncer dans tous les cas à maintenir la stabilité de l'air sur le chemin optique. Ce calcul a été réalisé à 0°C, en l'absence d'inversion de température atmosphérique, pour les 3 premières configurations de chauffage localisé décrites précédemment toujours dans le cas d'un Schmidt-Cassegrain de 8 pouces. Quelques Watts supplémentaires suffisent pour augmenter l'humidité relative supportable de façon significative au prix d'une augmentation de quelques degrés de la température du tube ou du pare-buée.

puissance de chauffage	humidité relative supportable sans inversion de température	écart max de température du pare-buée avec l'ambiante
14 W	# 76%	0,7°C
16 W	# 78%	1,9°C
18 W	# 81%	3,1°C

Chauffage du pare-buée au-dessus de la température atmosphérique pour un SC 8 pouces à une température ambiante de 0°C

puissance de chauffage	humidité relative supportable sans inversion de température	écart max de température du tube avec l'ambiante
10 W	# 71%	0,25°C
12 W	# 75%	1,5°C
14 W	# 80%	2,8°C

Chauffage du tube sans pare-buée au-dessus de la température atmosphérique pour un SC 8 pouces à une température ambiante de 0°C

puissance de chauffage	humidité relative supportable sans inversion de température	écart max de température du tube avec l'ambiante
10 W	# 84%	0,5°C
12 W	# 89%	1,8°C
14 W	# 95%	3,1°C

Chauffage du tube avec pare-buée au-dessus de la température atmosphérique pour un SC 8 pouces à une température ambiante de 0°C

Je n'ai pas de certitudes concernant les conséquences significatives ou non de cette élévation de température du tube ou du pare-buée sur la qualité des images. Tout ce que je peux dire c'est que :

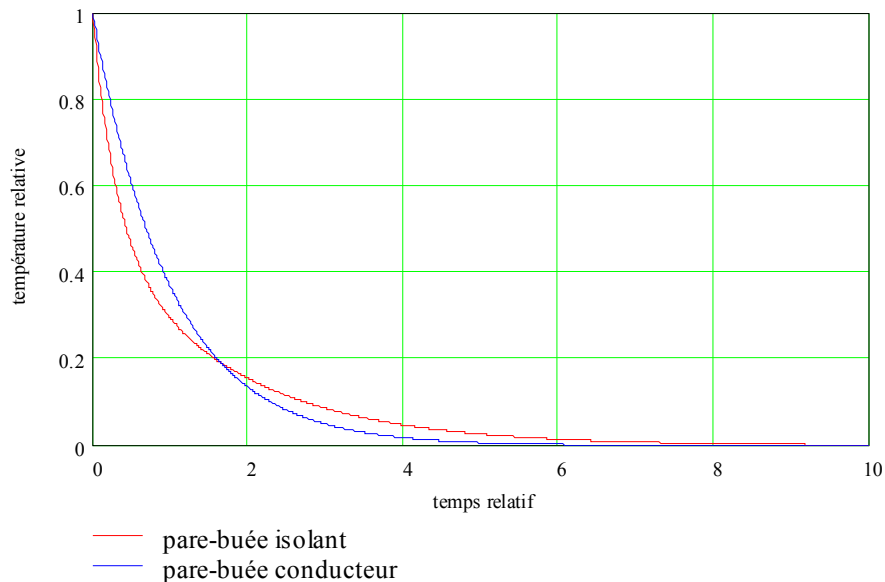
- la présence d'un observateur autour du tube est une source thermique qui dépasse largement les quelques Watts supplémentaires en question, sauf qu'un observateur ne se tient jamais sous l'ouverture d'un télescope
- dans une certaine mesure, le pare-buée va faire écran vis à vis des courants convectifs extérieurs
- la hausse de température de la lame va augmenter les mouvements convectifs internes au pare-buée dont la température reste quasiment inchangée lorsqu'il n'est pas lui-même chauffé, l'écart de température entre la lame et le pare-buée étant à l'origine déjà supérieur à 3 degrés
- le fond d'un tube non chauffé est naturellement plus élevé de quelques dixièmes de degré que sa partie supérieure sans pour autant générer de mouvements convectifs significatifs
- sur un instrument fermé comme mon Maksutov, les effets des mouvements convectifs internes sont encore perceptibles à un niveau important bien après le début de la mise en température. L'amplitude de la langue thermique visible sur la tâche de diffraction en plage intra ou extra focale ne décroît qu'à la fin du processus quand l'équilibrage est quasiment réalisé et la décroissance des effets optiques n'est donc manifestement pas linéaire.

En conséquence de quoi je préconiserais une certaine prudence en limitant la puissance de chauffage de façon à ce que la structure ne dépasse jamais la température ambiante, vu que le gain ne devient réellement intéressant que pour une augmentation de température de 2 ou 3 degrés.

Pour finir, un dimensionnement rapide du pare-buée conduit aux résultats suivants :

- selon les configurations, le gain sur l'humidité relative est de un ou deux points lorsque la longueur du pare-buée passe de deux fois à deux fois et demie le rayon du tube ; il est de seulement un ou deux points supplémentaires lorsque que cette longueur passe de deux fois et demie à quatre fois le rayon du tube
- un bon compromis entre efficacité du bafflage radiatif et masse du pare-buée donne une longueur de pare-buée égale à deux fois et demie le rayon du tube conduisant déjà à un pare-buée en aluminium de 3 mm d'une masse de 2 kg pour un tube de 8 pouces
- l'utilisation d'un matériau isolant (plastique ou mousse) pour le pare-buée n'est pas avantageuse

du point de vue de l'humidité relative puisque l'utilisation d'une matière isolante, outre le fait qu'elle interdit l'emploi d'une résistance chauffante, accroît le déséquilibre de température après stabilisation entre l'extérieur (plus chaud) et l'intérieur (plus froid) du pare-buée. Lors de la phase transitoire les choses sont différentes, la température de surface d'un pare-buée isolant va décroître d'abord plus rapidement que son équivalent conducteur, la tendance s'inversant dans un deuxième temps en faveur du pare-buée isolant comme le montre la figure suivante.



Comparaison des températures de surface en régime transitoire entre un pare-buée isolant et un pare-buée conducteur

Les conclusions auxquelles cette étude a conduit sont pour résumer :

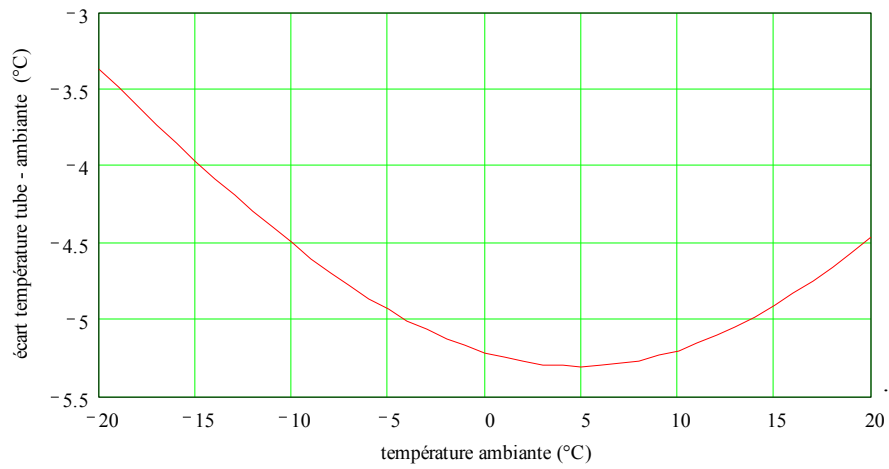
- la meilleure configuration (hors chauffage uniforme et traitement basse émissivité) pour lutter contre la buée tout en minimisant la création de mouvements convectifs est un pare-buée et un tube conducteurs, réciproquement isolés et munis chacun d'une résistance chauffante.
- la puissance de chauffage effective cumulée pour un tube de 8 pouces est de 20 W et permet les observations jusqu'à des taux d'humidité relative de 90% environ. L'extérieur des résistances doit être isolé par une feuille de polystyrène expansé d'au moins 3 mm d'épaisseur et l'ensemble doit être plaqué fermement afin de maintenir leur température de surface sous la température ambiante et d'obtenir un rendement correct, estimé dans ce cas supérieur à 90% et conduisant à une puissance électrique nécessaire de 22 W.
- l'utilisation d'un matériau comme la fibre de verre est à proscrire.
- l'aluminium est parmi les métaux le candidat offrant le meilleur compromis entre densité et conductivité thermique mais conduit à une masse élevée (respectivement 2 kg et 3 kg pour le pare-buée et le tube d'un instrument de 8 pouces avec les hypothèses du modèle).
- l'utilisation du carbone semble la solution la mieux adaptée et conduirait à des tubes et des pare-buée beaucoup plus légers grâce à une conductivité thermique double de celle de l'aluminium et une densité de 30% inférieure, soit 700 g et 1 kg respectivement pour le pare-buée et le tube.
- aucun instrument amateur du commerce n'est vraisemblablement conçu spécifiquement pour la prévention des dépôts de buée, un axe supplémentaire d'optimisation est le dépôt d'une couche basse émissivité sur la face extérieure de la lame.

Bibliographie :

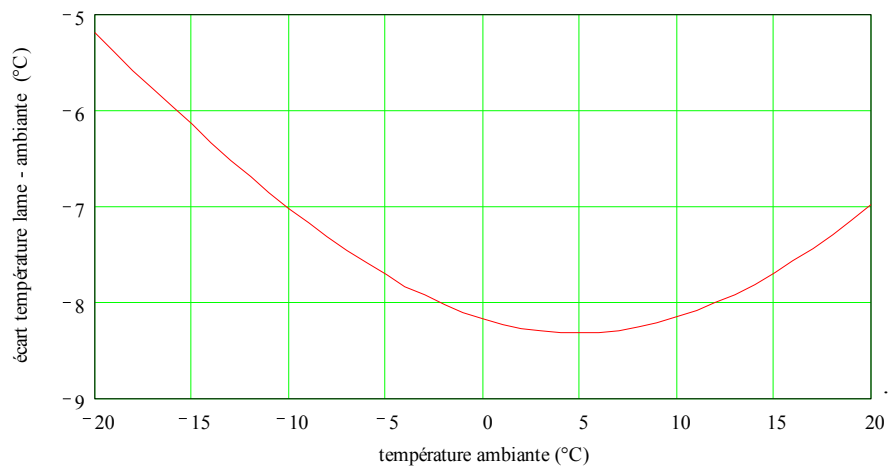
- [R1] John H. Lienhard IV and V, A Heat Transfer Textbook, Phlogiston Press
- [R2] Adrian Bejan et al., Heat Transfer Handbook, John Wiley
- [R3] Matthias Bopp, Determining whether dew may form on telescope optics during an observing session
- [R4] Yves Jannot, Thermique Solaire
- [R5] Diffusion Des Savoirs, Chimie et Atmosphère
- [R6] Michael Pidwirny, Dayly and Annual Cycles of Temperature
- [R7] R. H. B. Exell, Atmospheric Radiation

Annexe A – Bilan sans inversion pour un Schmidt-Cassegrain de 8 pouces

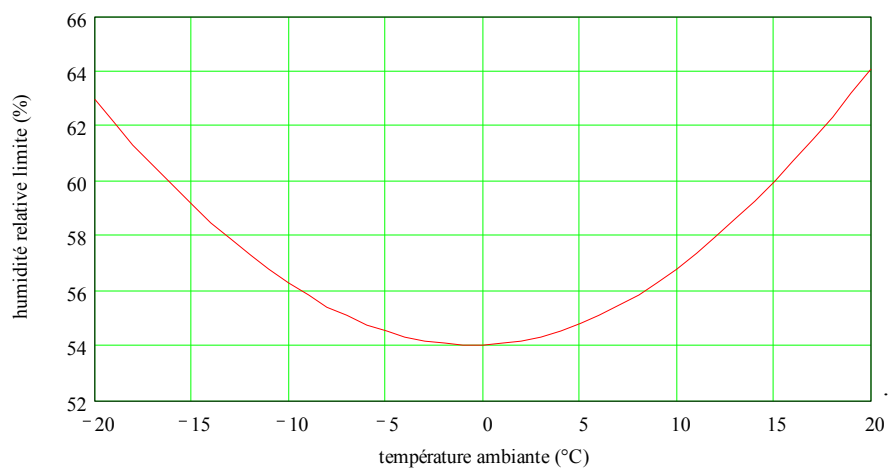
Tube optique sans chauffage et sans pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

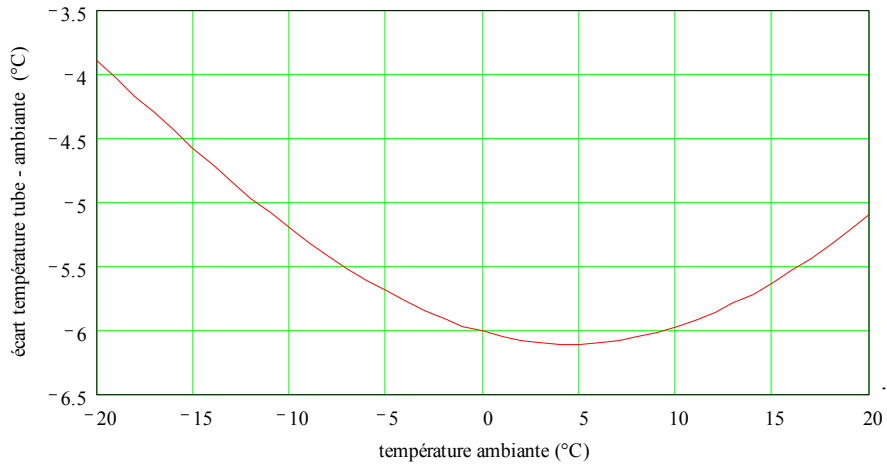


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

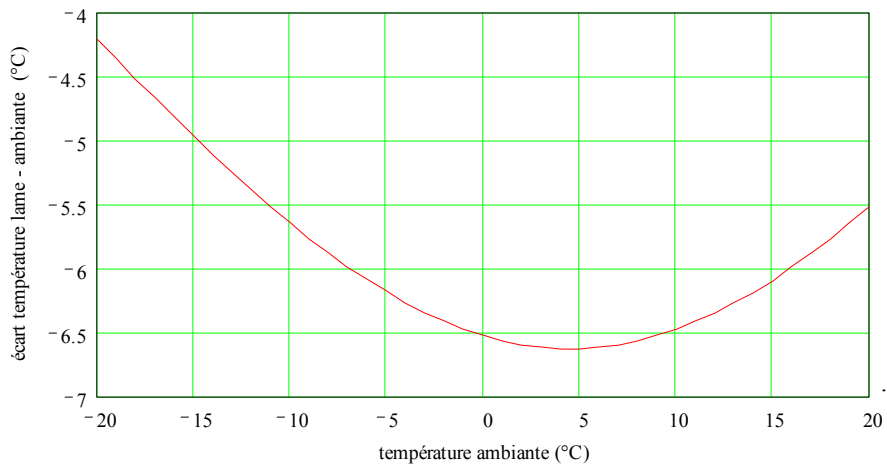


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

Tube optique sans chauffage et avec pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

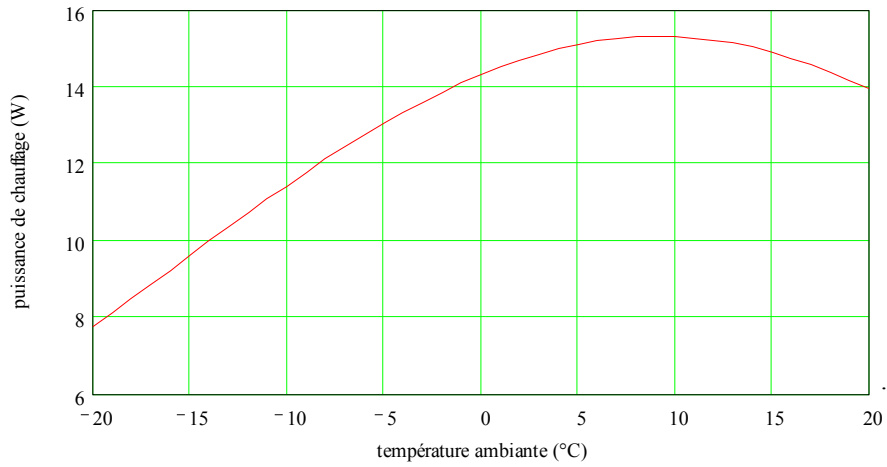


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

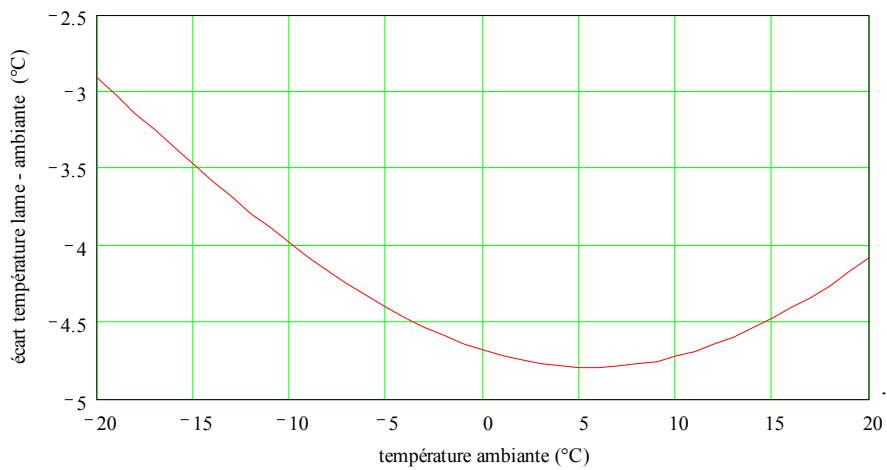


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

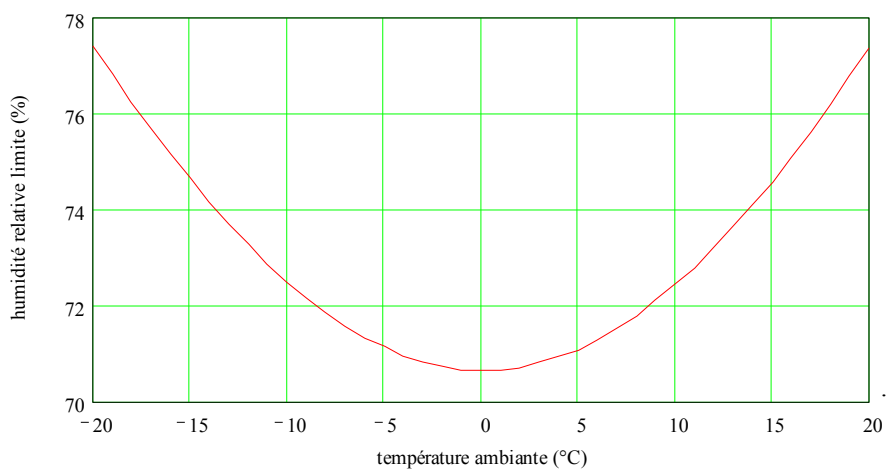
Chauffage uniforme du tube optique sans pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante

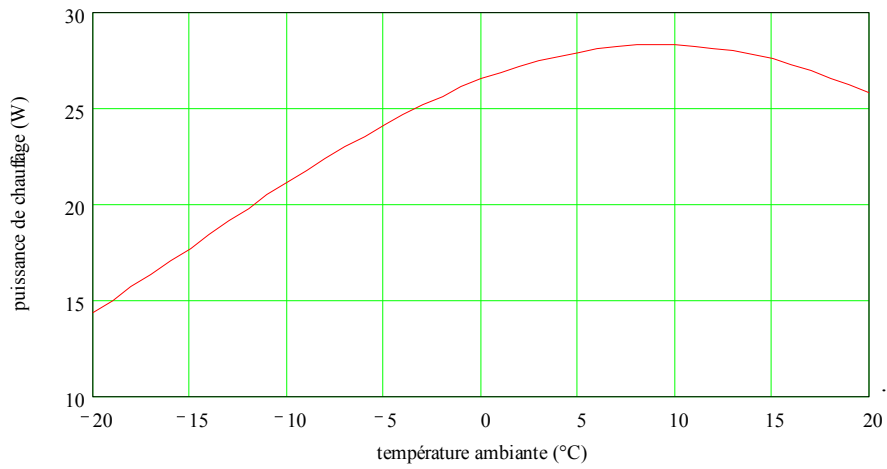


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

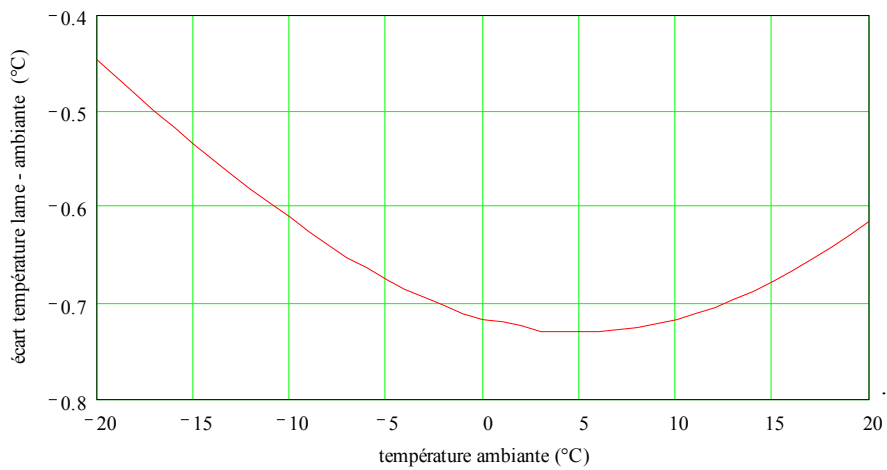


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

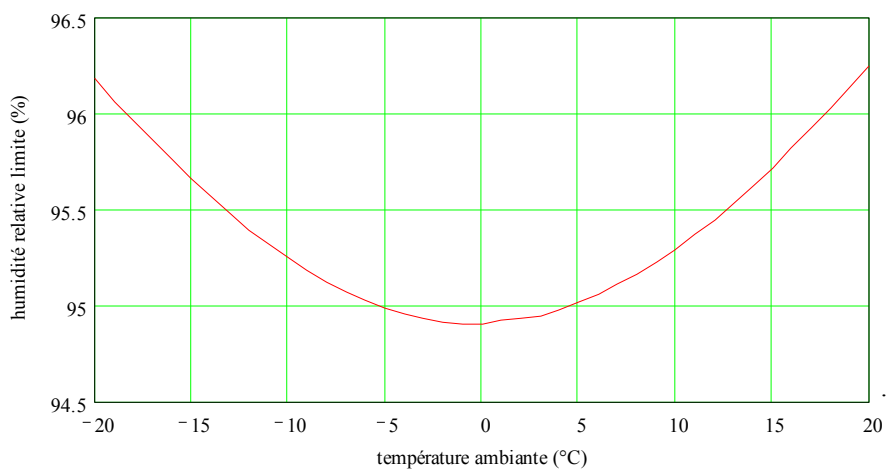
Chauffage uniforme du tube optique et du pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante

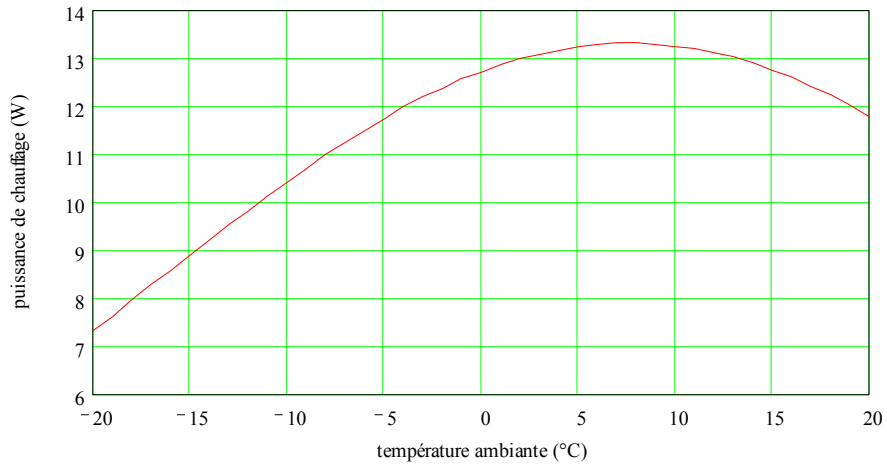


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

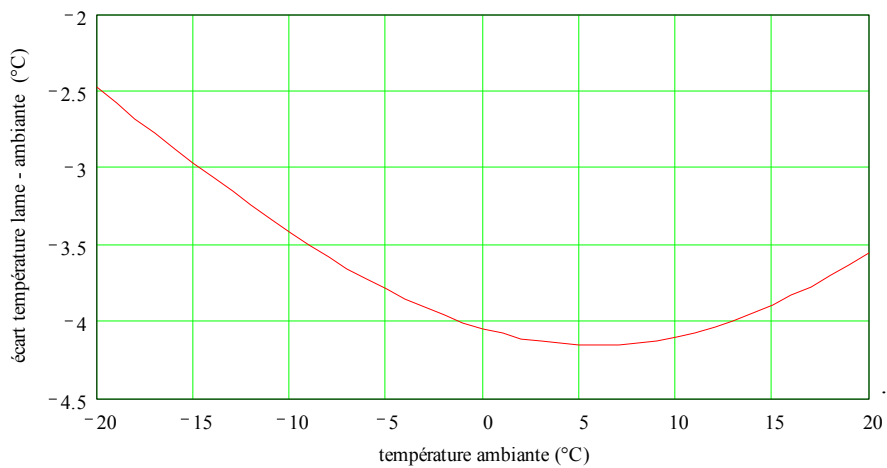


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

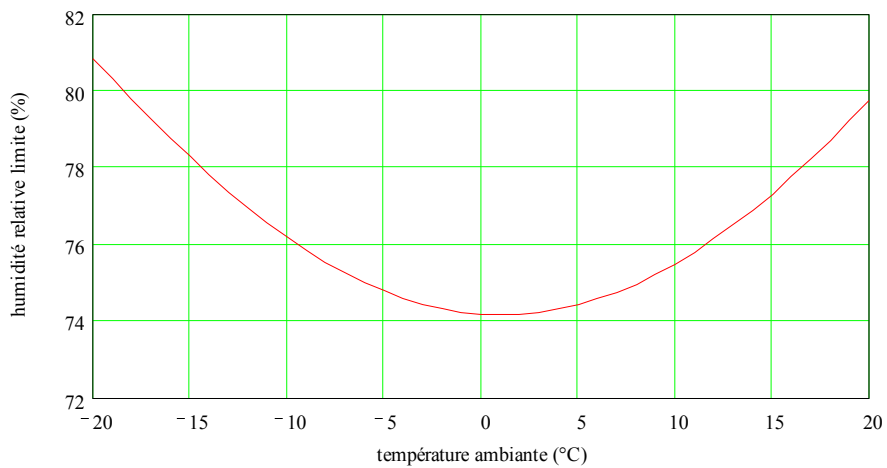
Chauffage localisé du pare-buée



Puissance de chauffage en fonction de la température ambiante

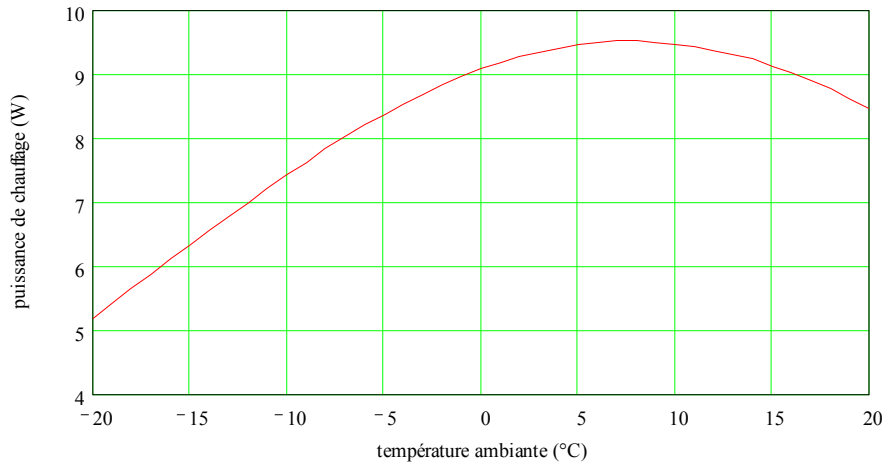


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

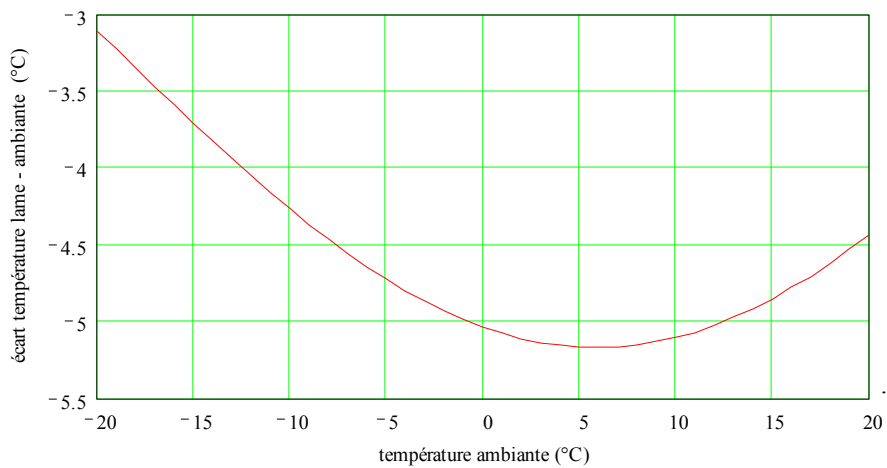


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

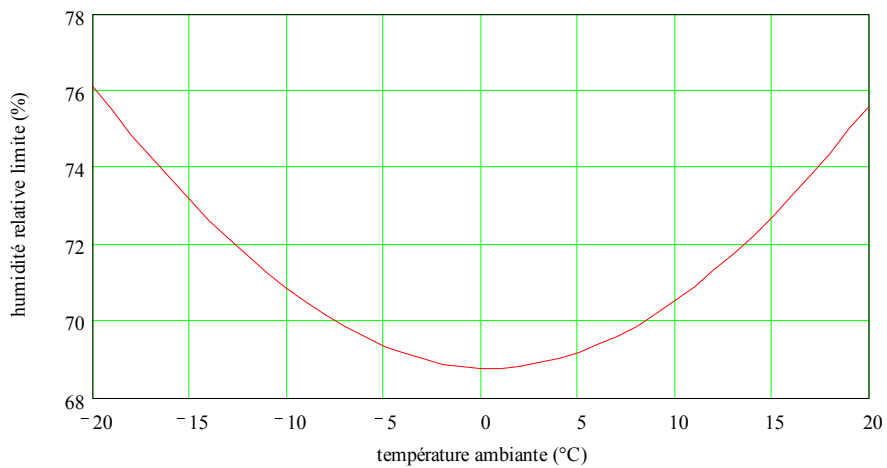
Chauffage localisé du tube optique sans pare-buée



Puissance de chauffage en fonction de la température ambiante

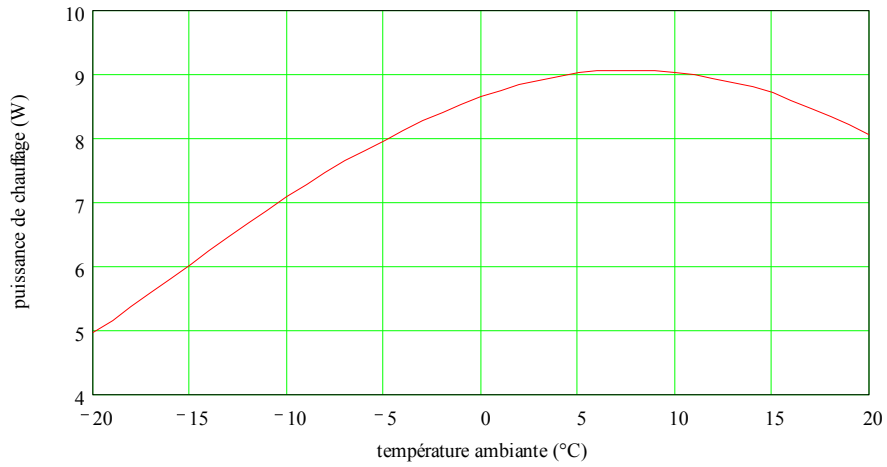


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

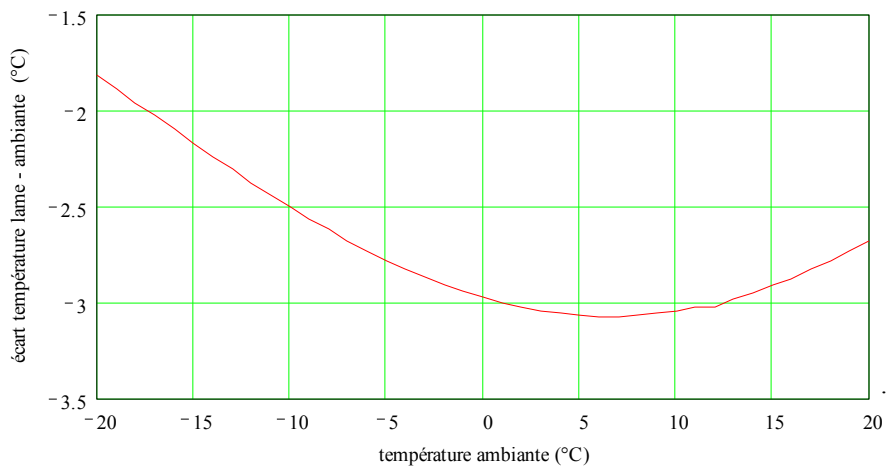


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

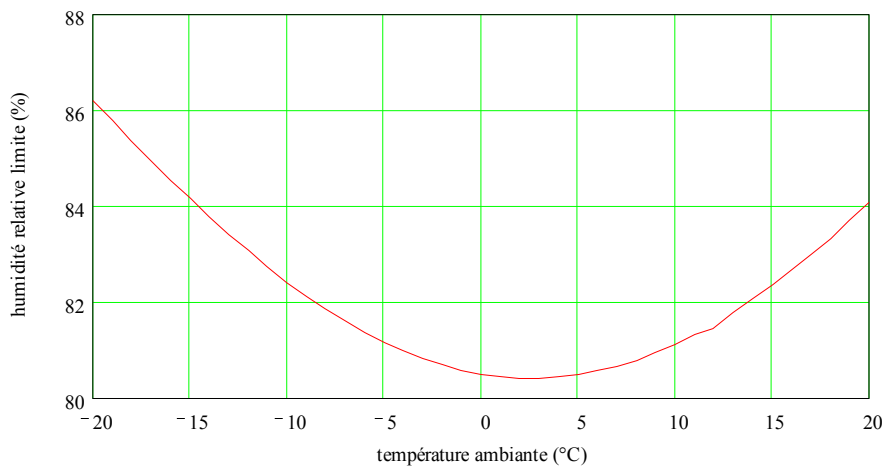
Chauffage localisé du tube optique avec pare-buée



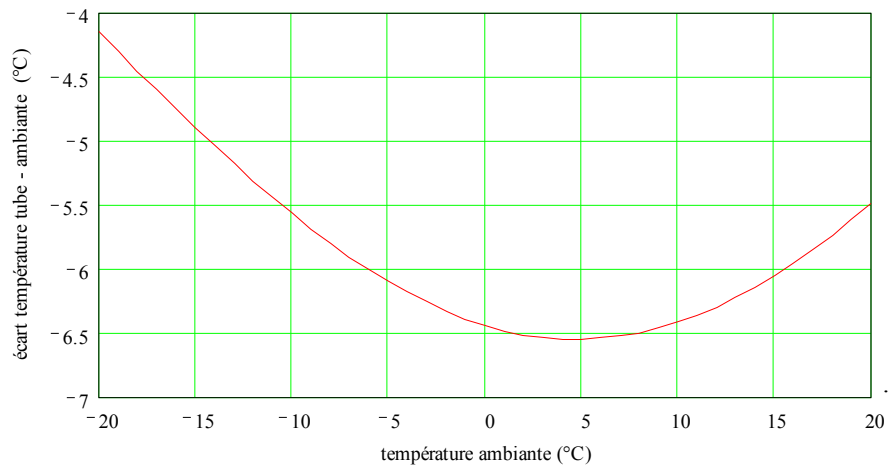
Puissance de chauffage en fonction de la température ambiante



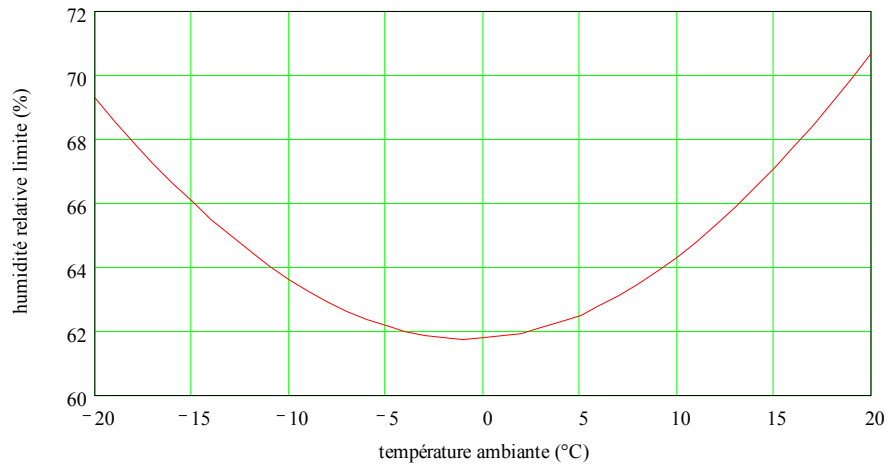
Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante



Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

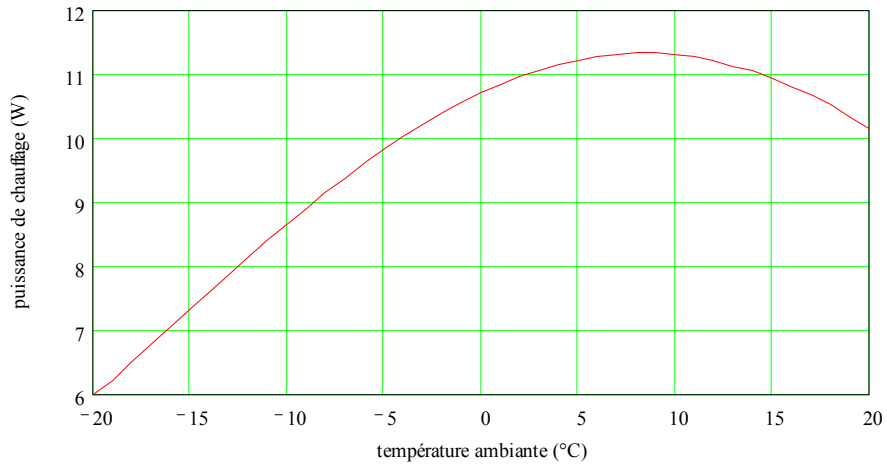


Écart moyen de température entre le pare-buée et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

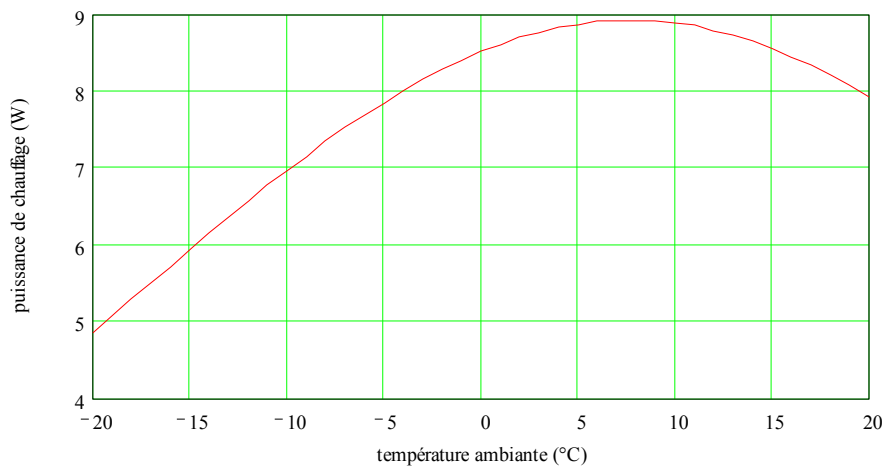


Condition de formation de la buée sur le pare-buée en fonction de la température ambiante

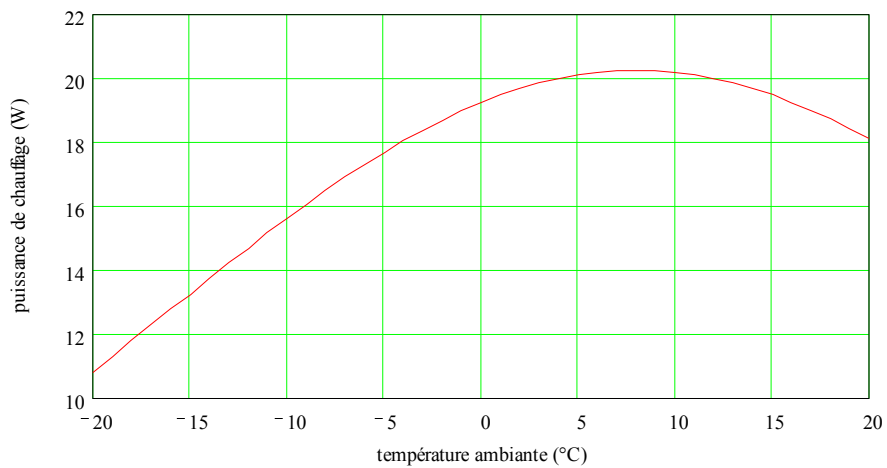
Chauffage localisé du tube optique et du pare-buée



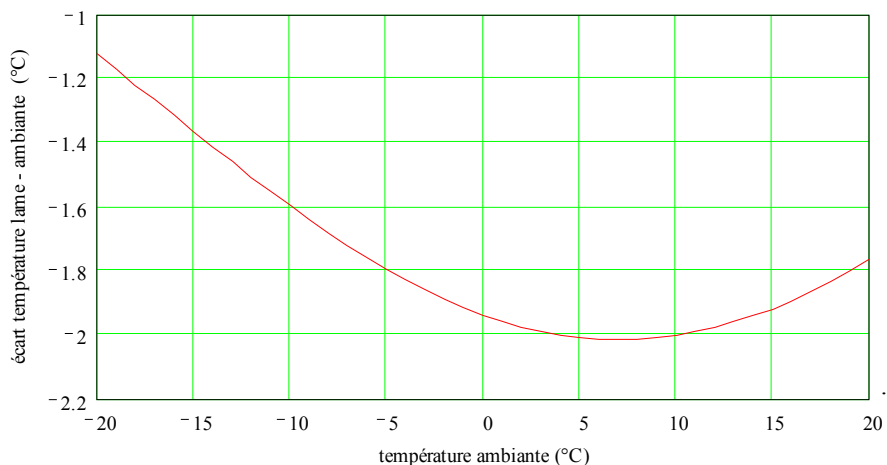
Puissance de chauffage du pare-buée en fonction de la température ambiante



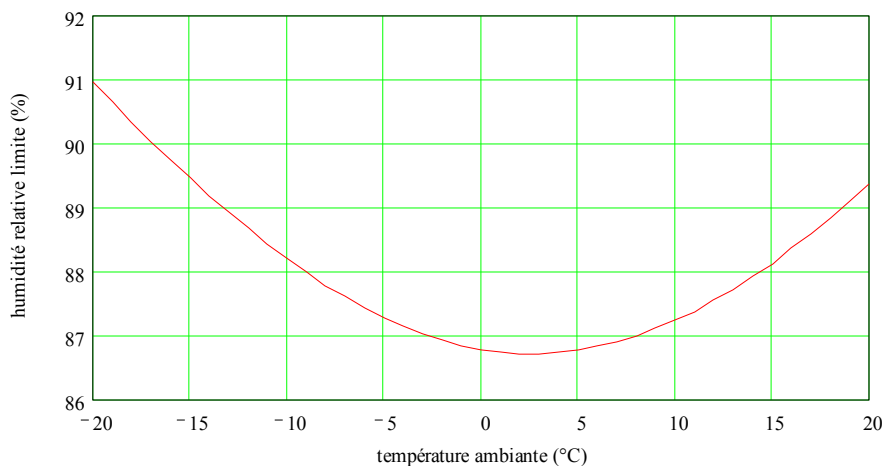
Puissance de chauffage du tube en fonction de la température ambiante



Puissance de chauffage totale en fonction de la température ambiante



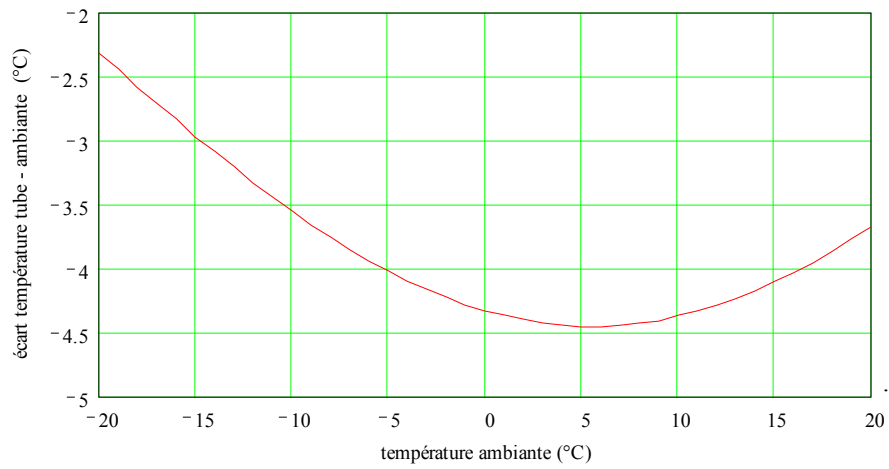
Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante



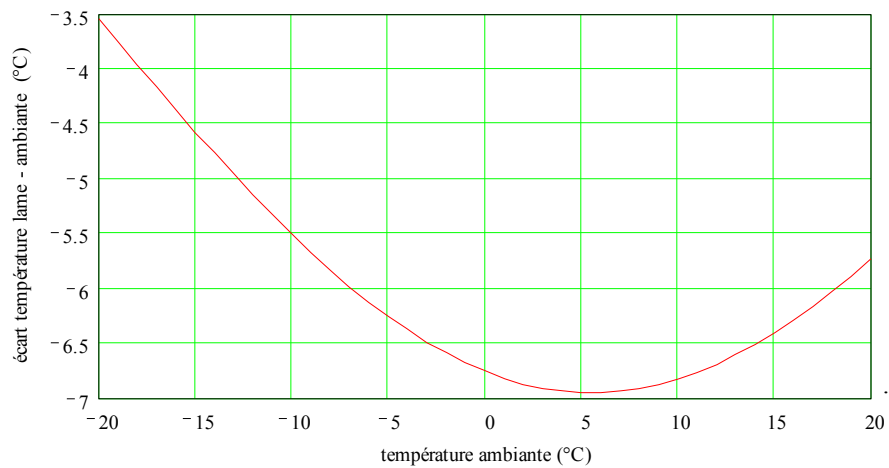
Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

Annexe B – Bilan avec inversion pour un Schmidt-Cassegrain de 8 pouces

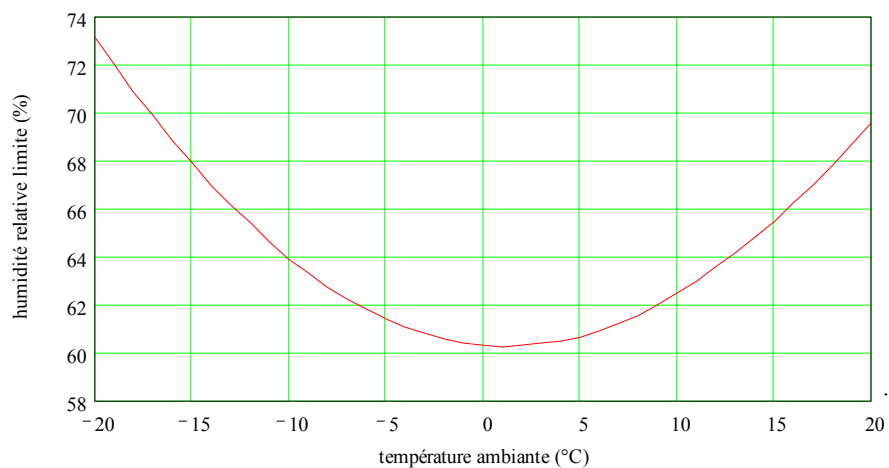
Tube optique sans chauffage et sans pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

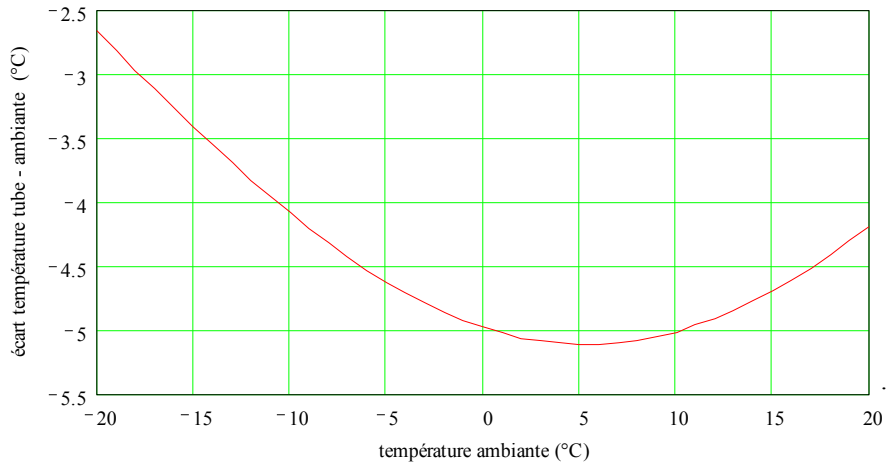


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

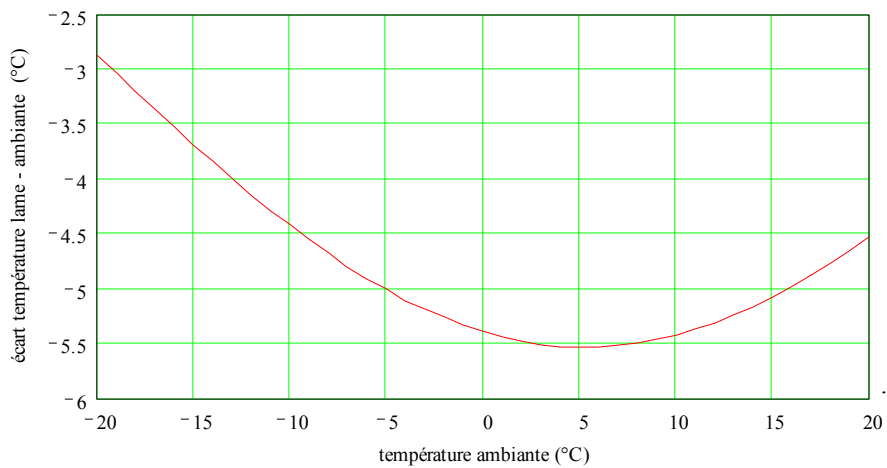


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

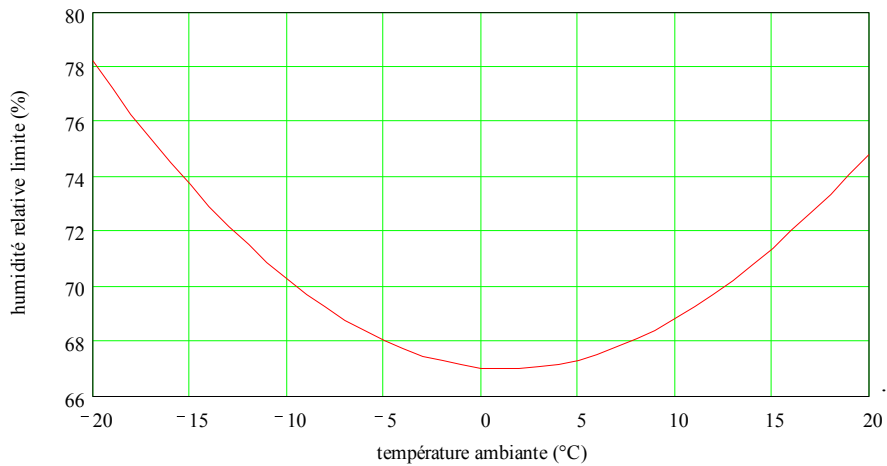
Tube optique sans chauffage et avec pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

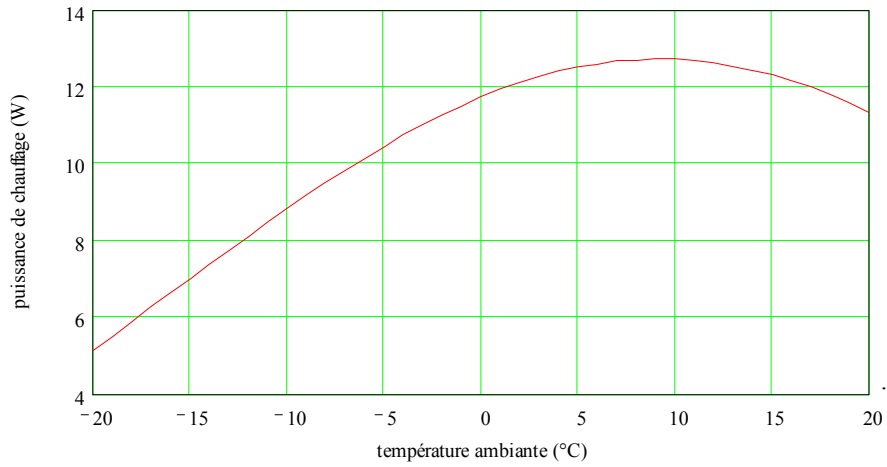


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

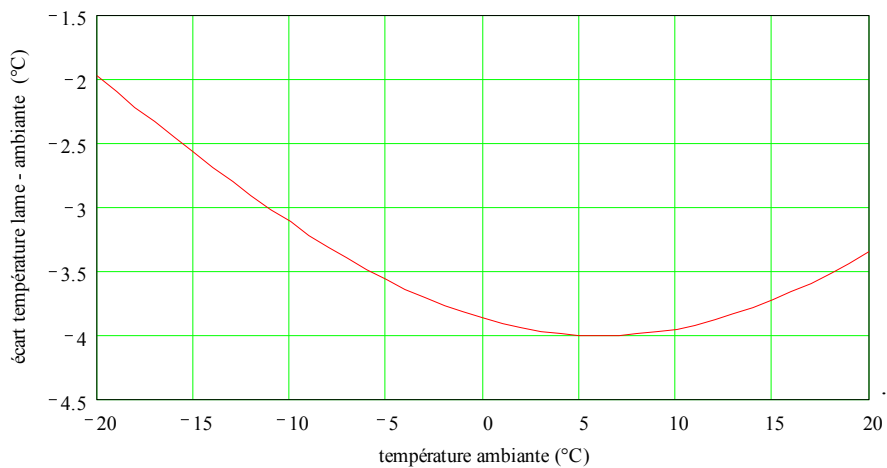


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

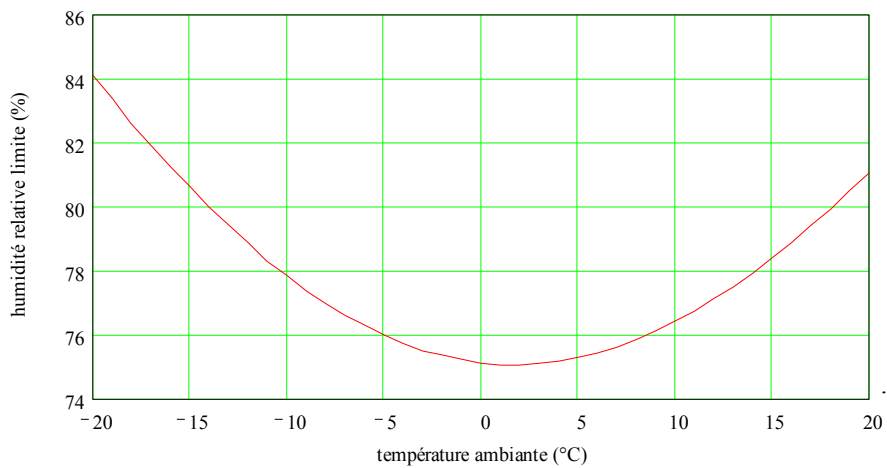
Chauffage uniforme du tube optique sans pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante

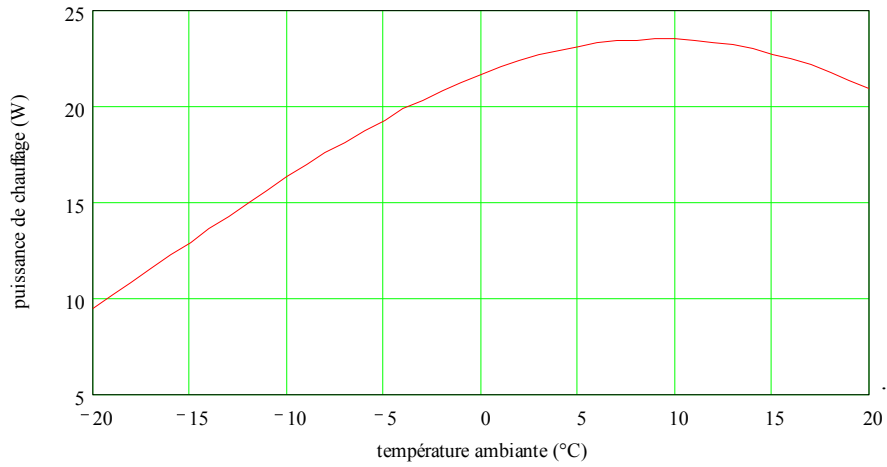


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

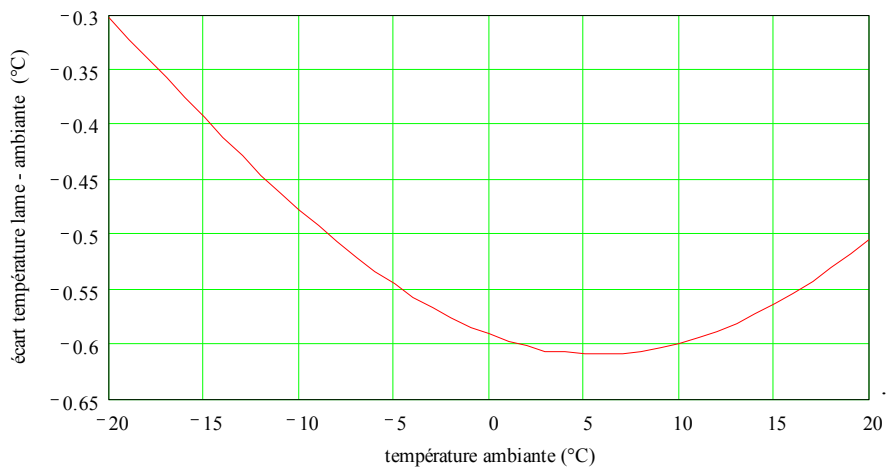


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

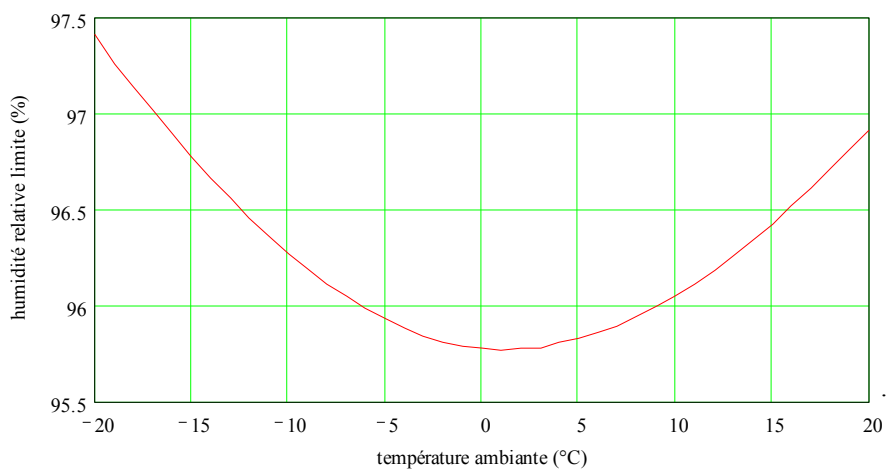
Chauffage uniforme du tube optique et du pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante

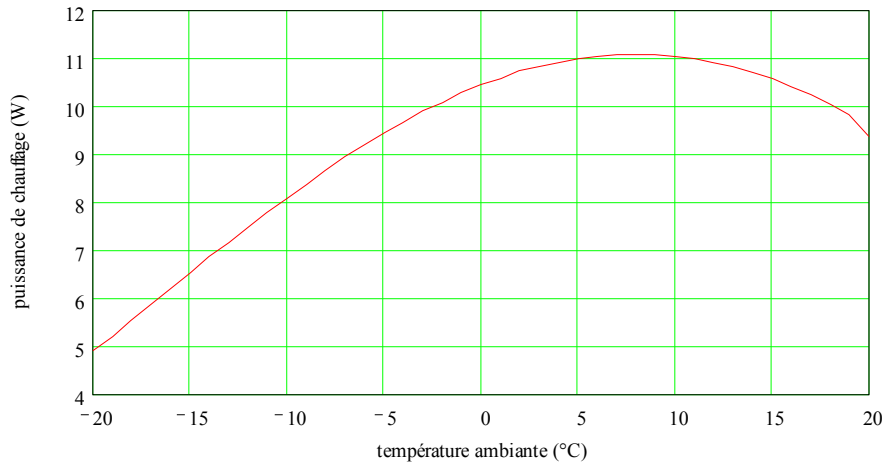


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

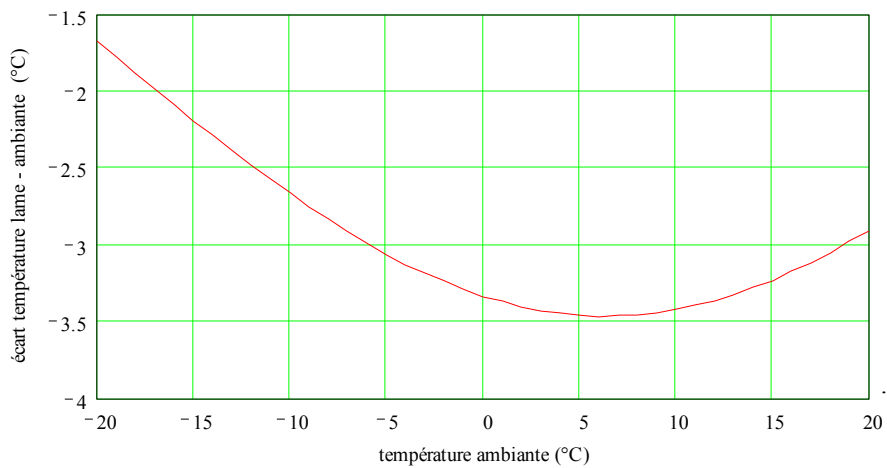


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

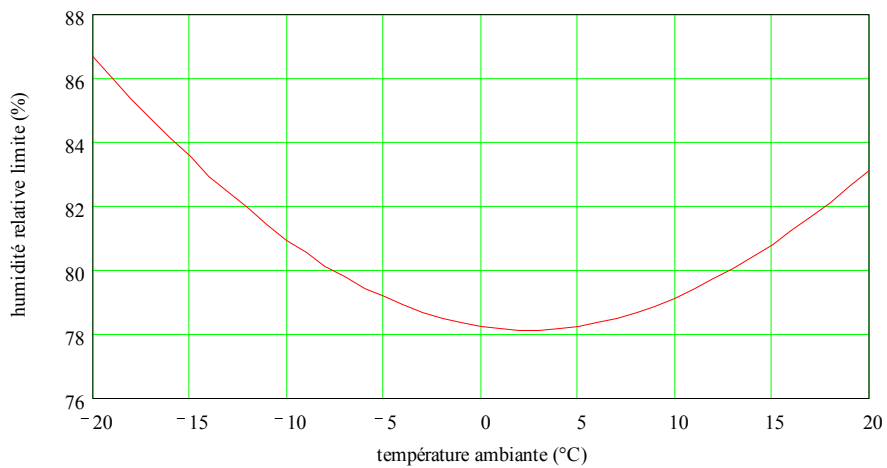
Chauffage localisé du pare-buée



Puissance de chauffage en fonction de la température ambiante

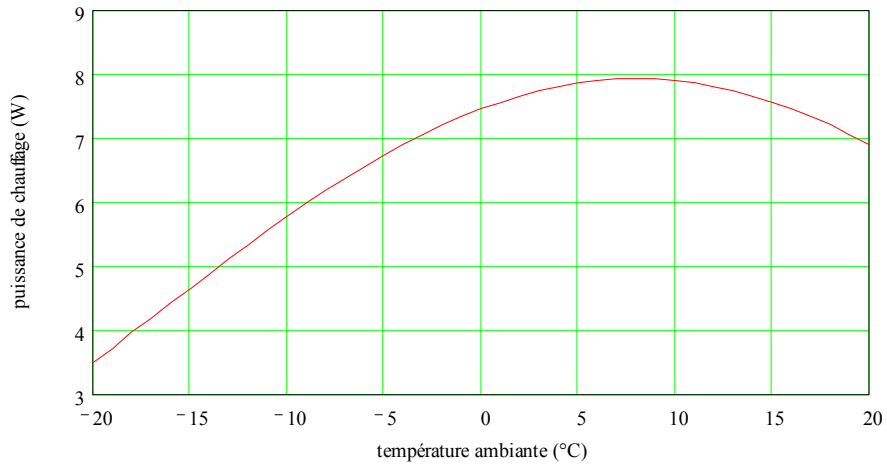


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

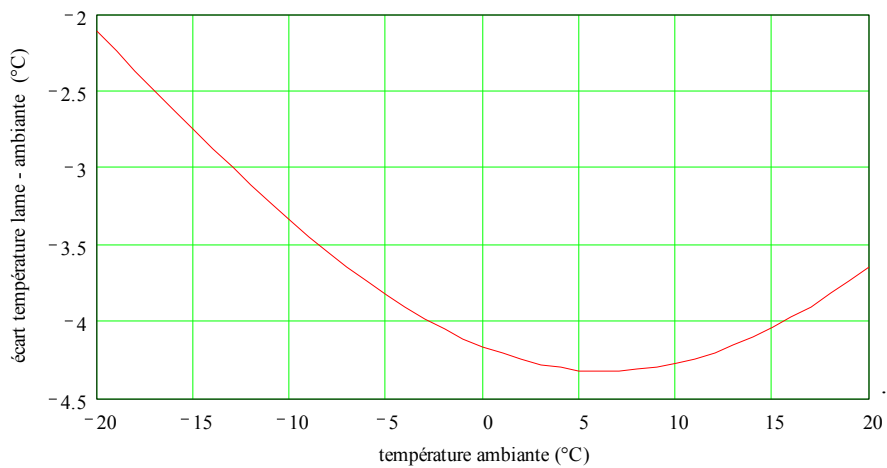


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

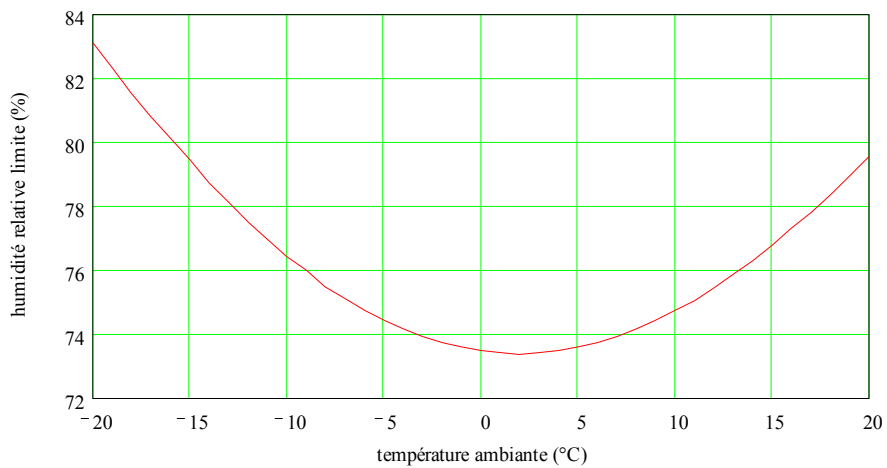
Chauffage localisé du tube optique sans pare-buée



Puissance de chauffage en fonction de la température ambiante

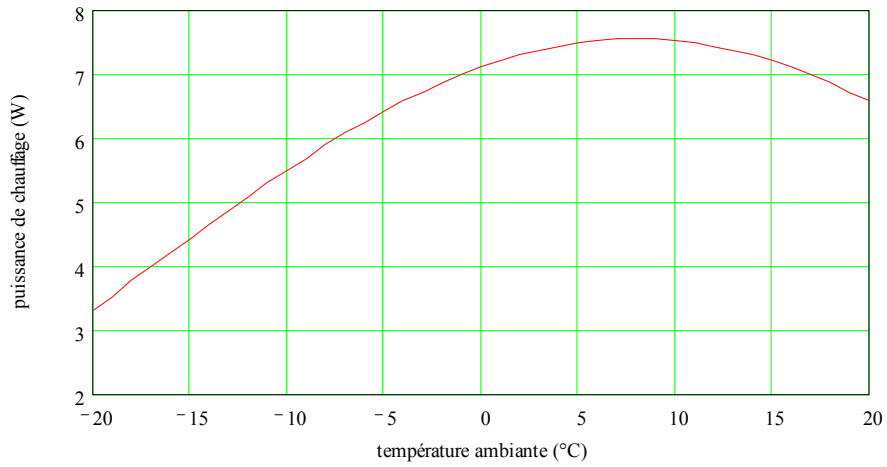


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

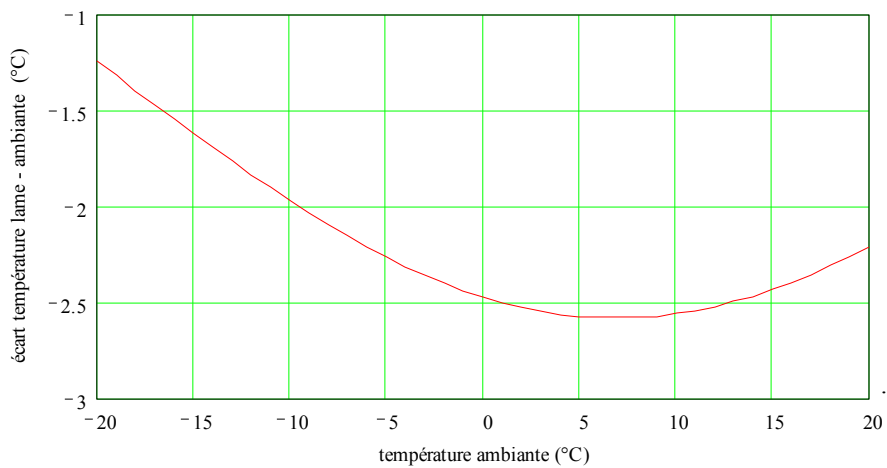


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

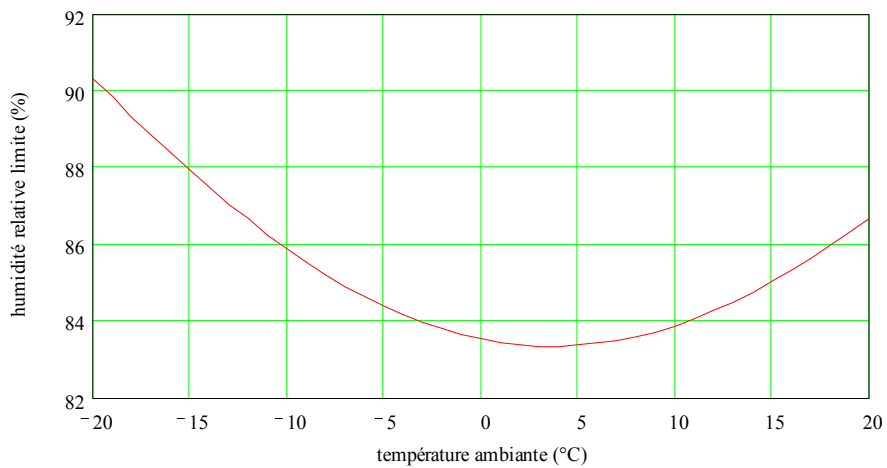
Chauffage localisé du tube optique avec pare-buée



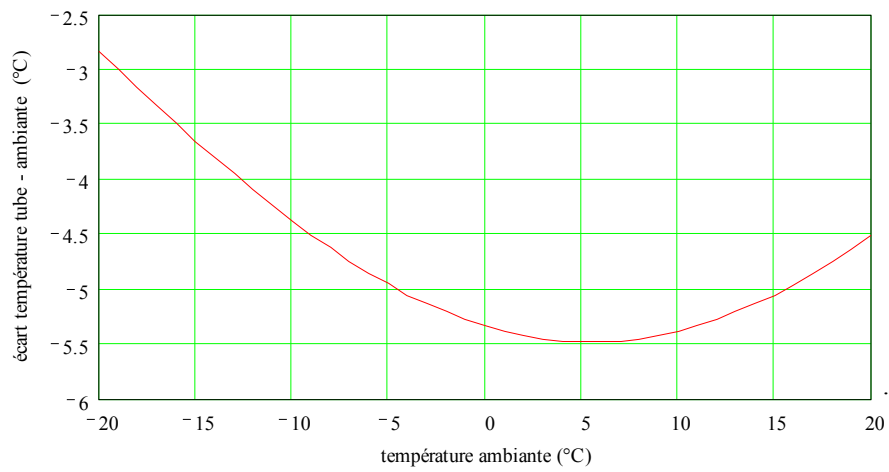
Puissance de chauffage en fonction de la température ambiante



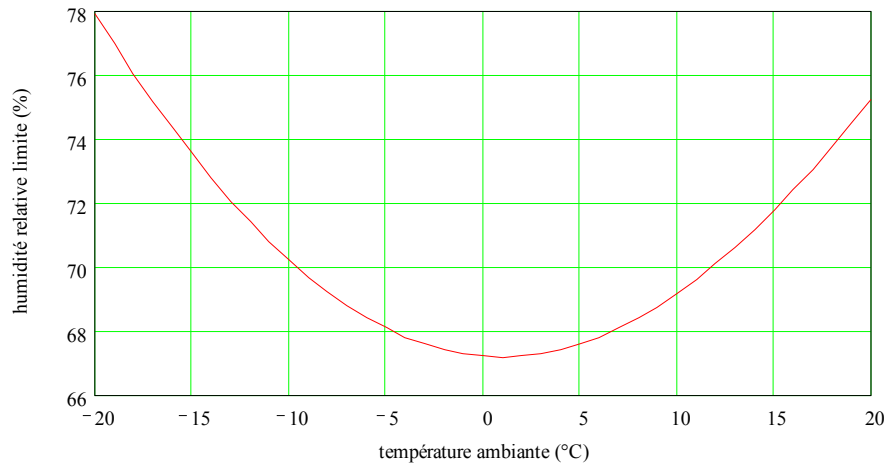
Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante



Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

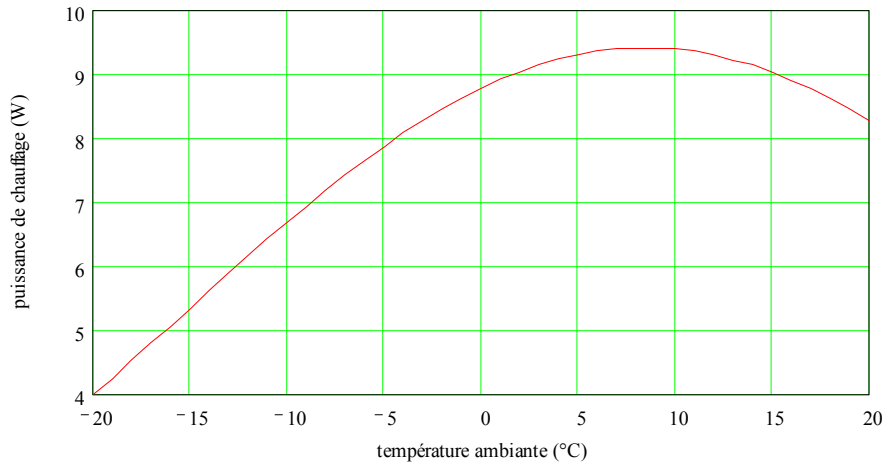


Écart moyen de température entre le pare-buée et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

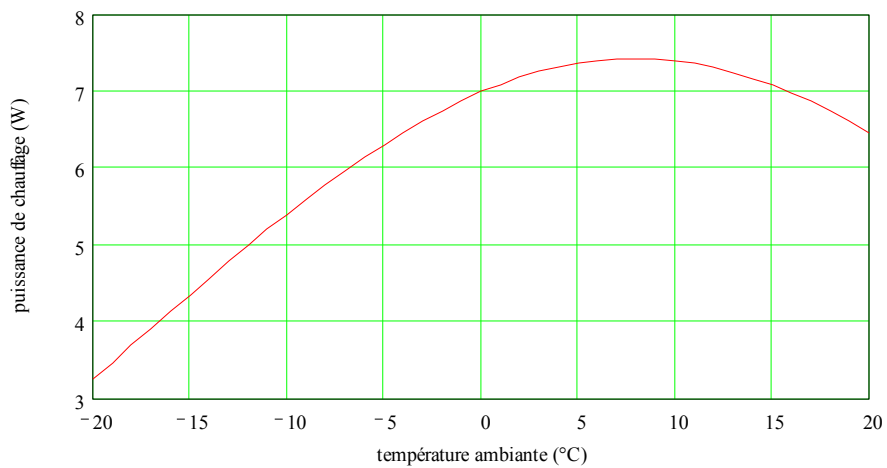


Condition de formation de la buée sur le pare-buée en fonction de la température ambiante

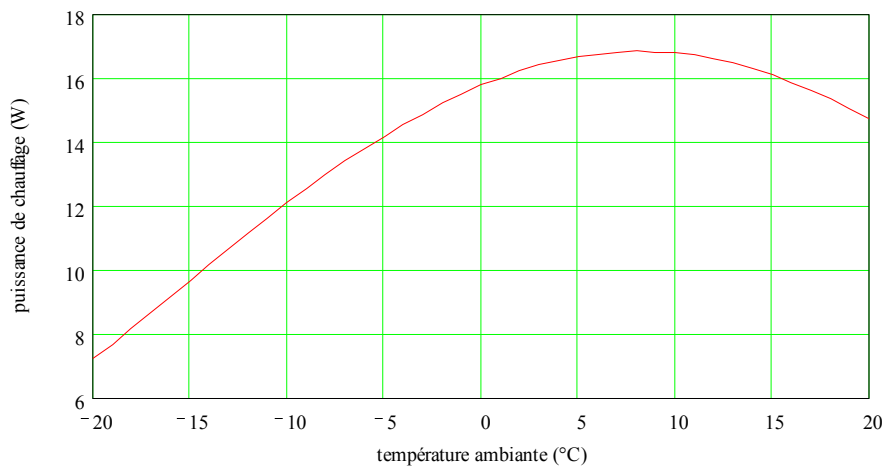
Chauffage localisé du tube optique et du pare-buée



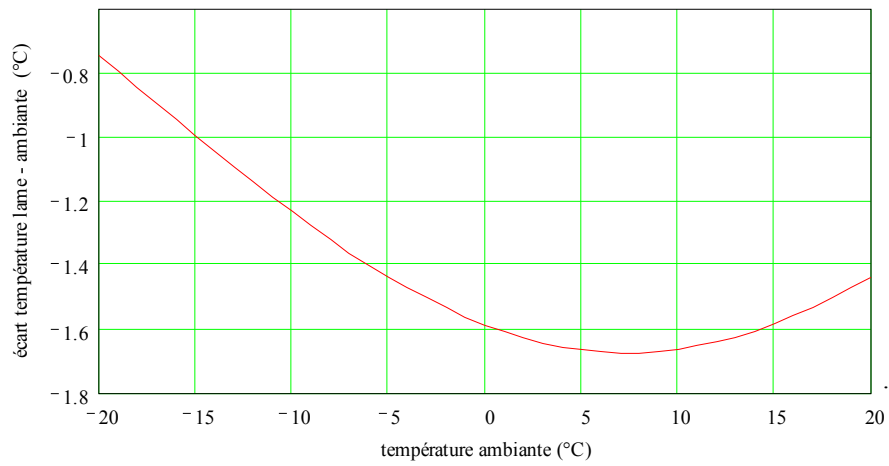
Puissance de chauffage du pare-buée en fonction de la température ambiante



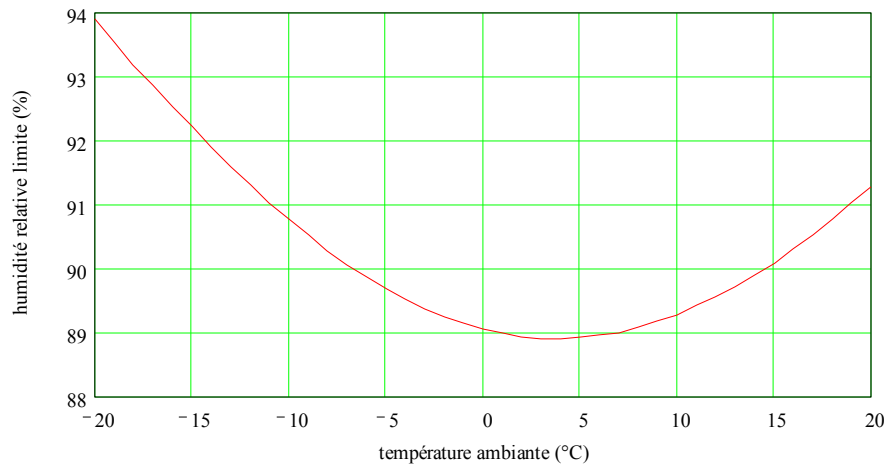
Puissance de chauffage du tube en fonction de la température ambiante



Puissance de chauffage totale en fonction de la température ambiante



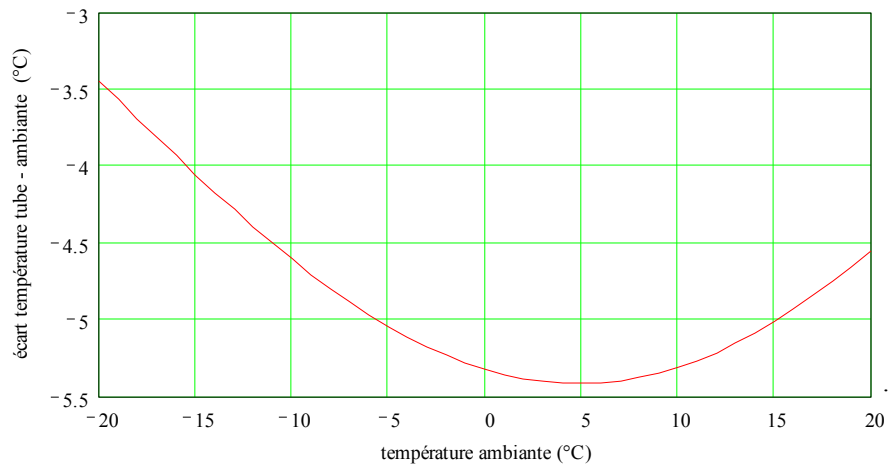
Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante



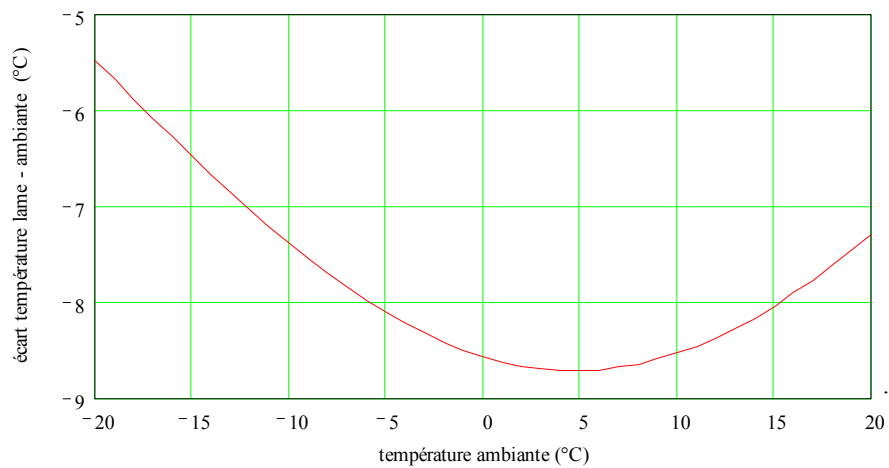
Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

Annexe C – Bilan sans inversion pour un Schmidt-Cassegrain de 10 pouces

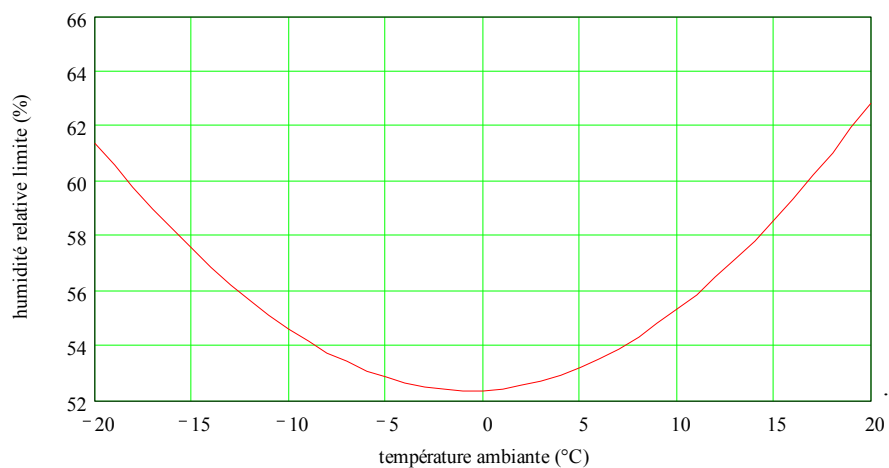
Tube optique sans chauffage et sans pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

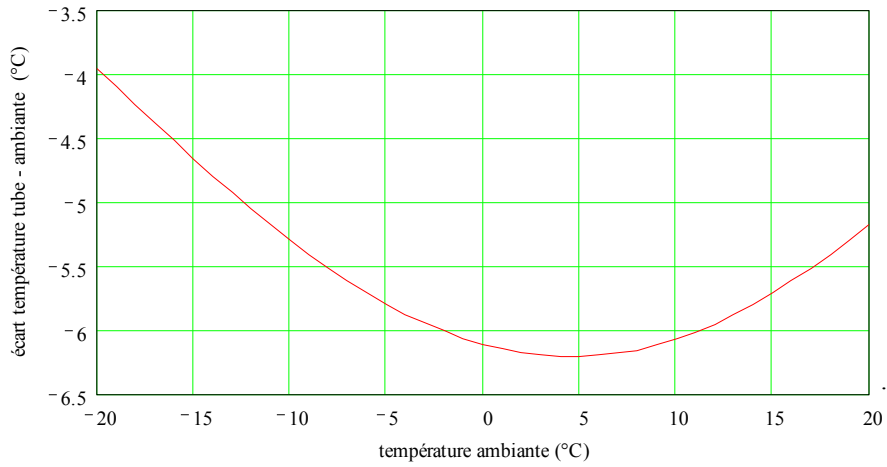


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

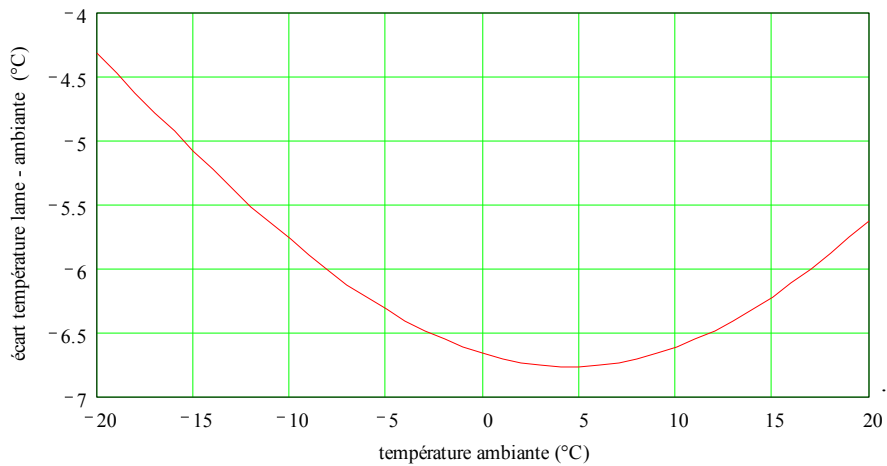


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

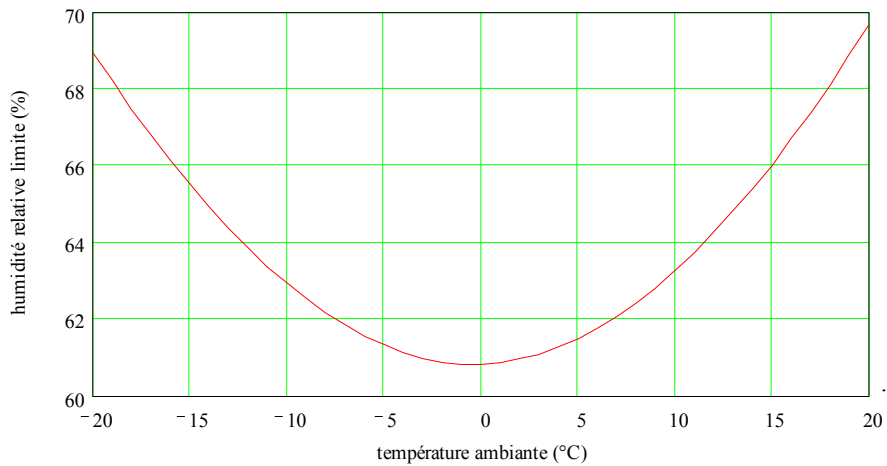
Tube optique sans chauffage et avec pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

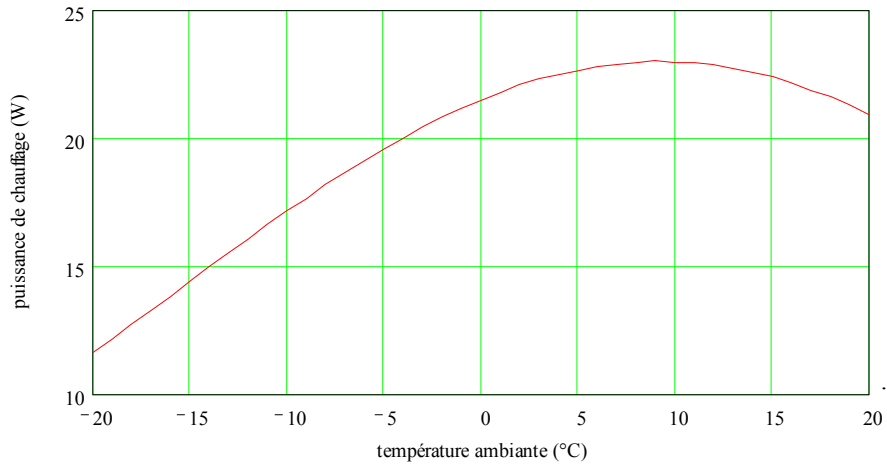


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

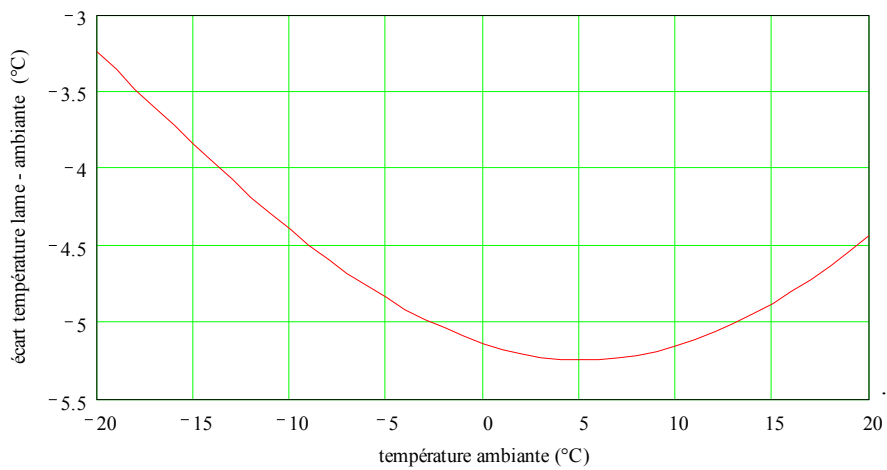


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

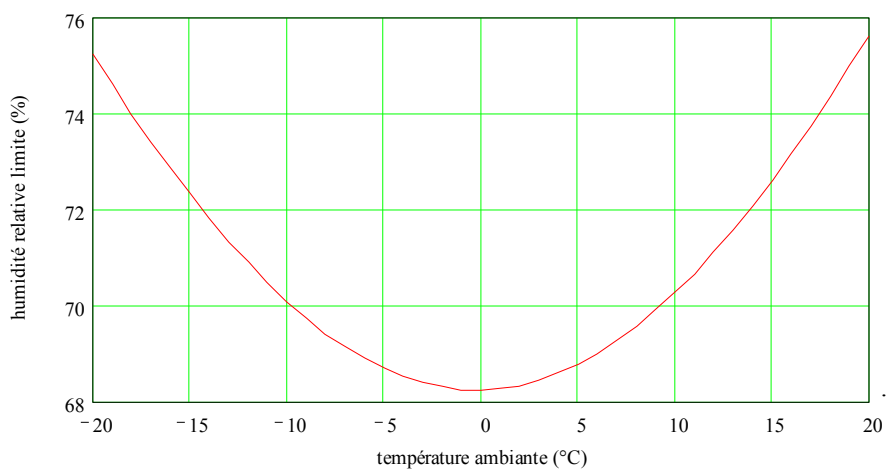
Chauffage uniforme du tube optique sans pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante

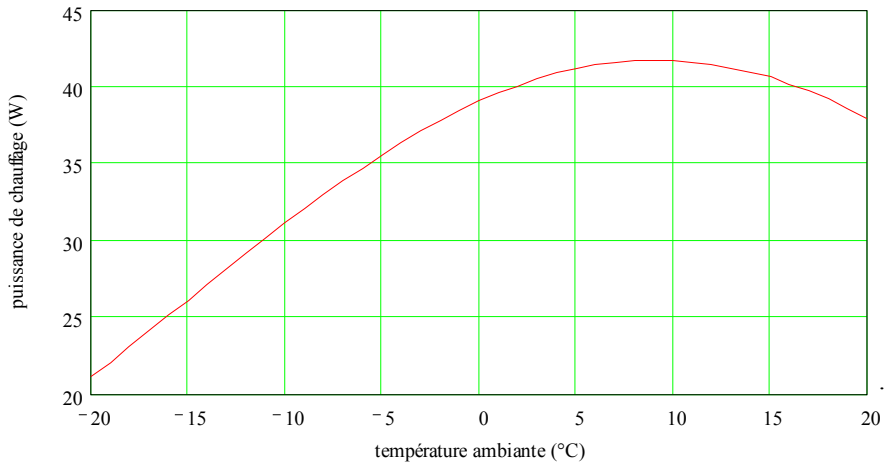


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

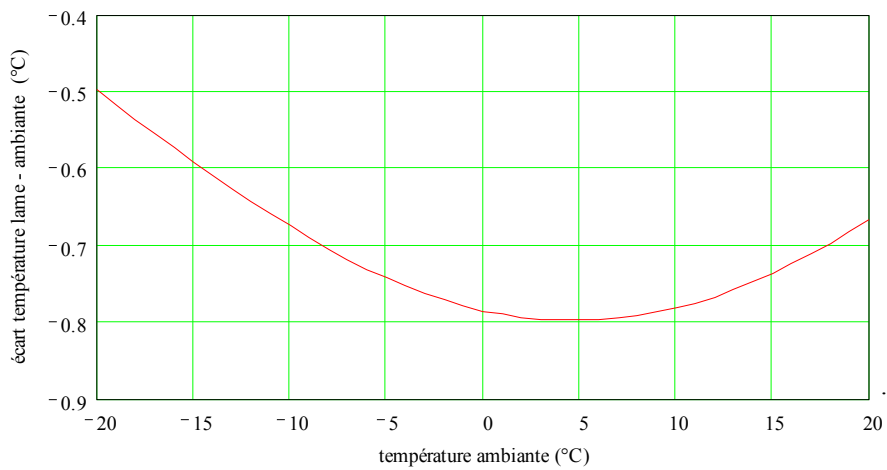


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

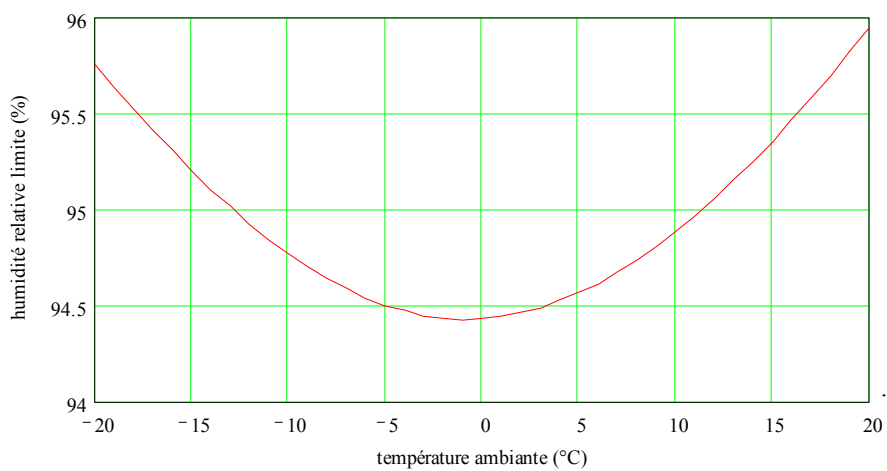
Chauffage uniforme du tube optique et du pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante



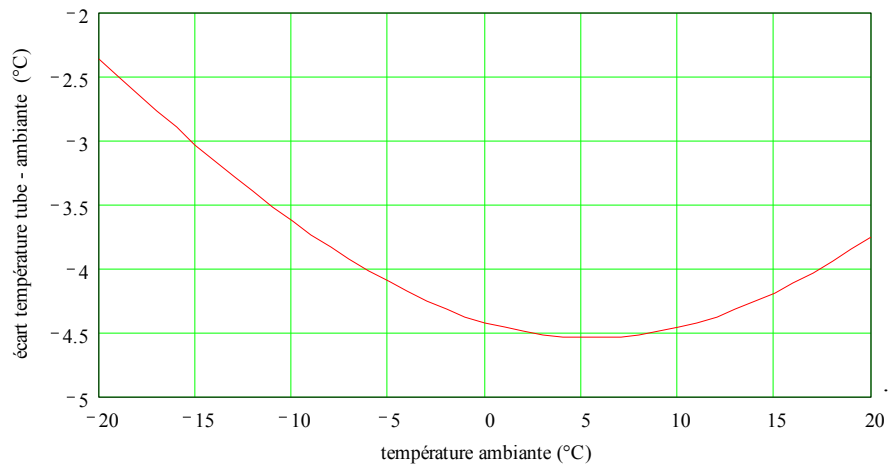
Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante



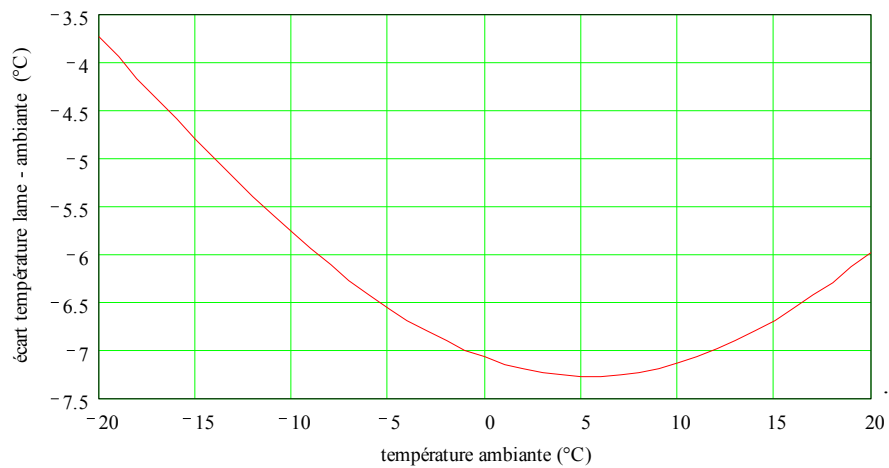
Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

Annexe D – Bilan avec inversion pour un Schmidt-Cassegrain de 10 pouces

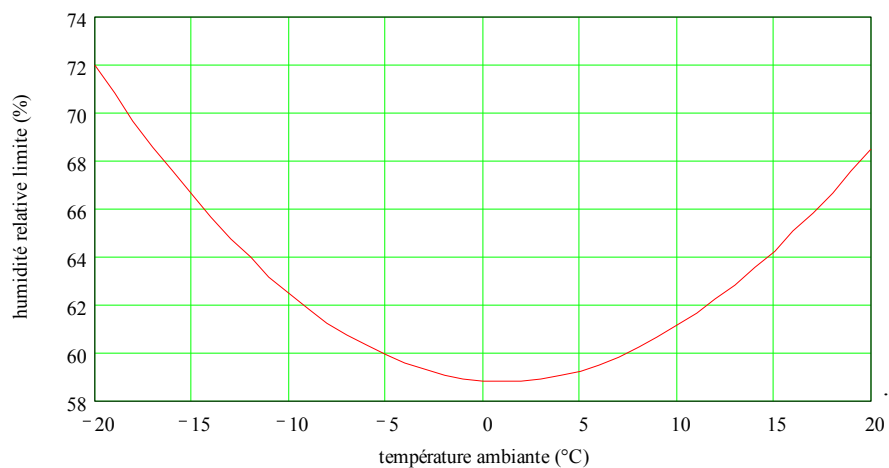
Tube optique sans chauffage et sans pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

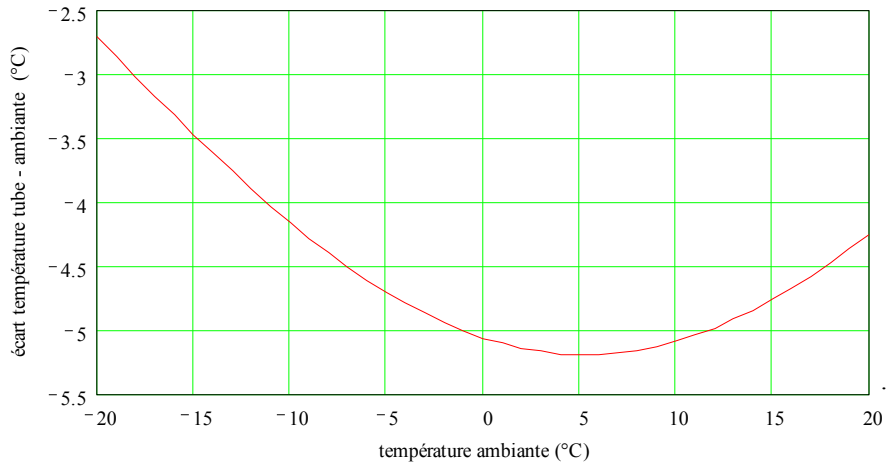


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

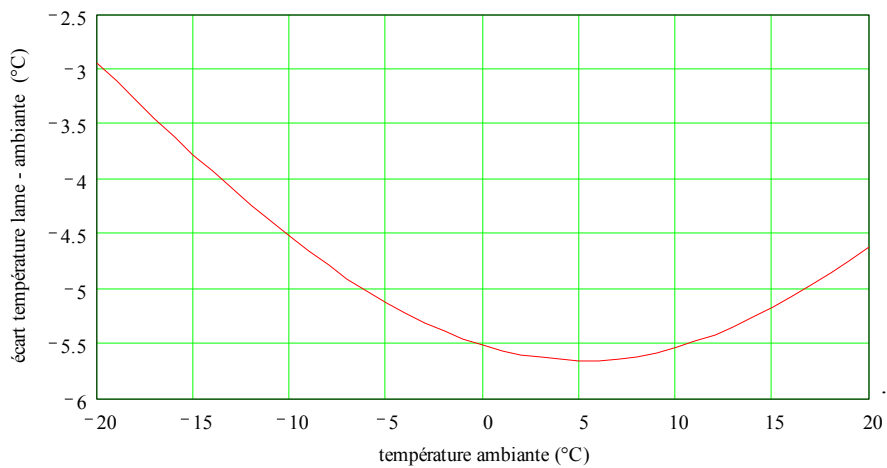


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

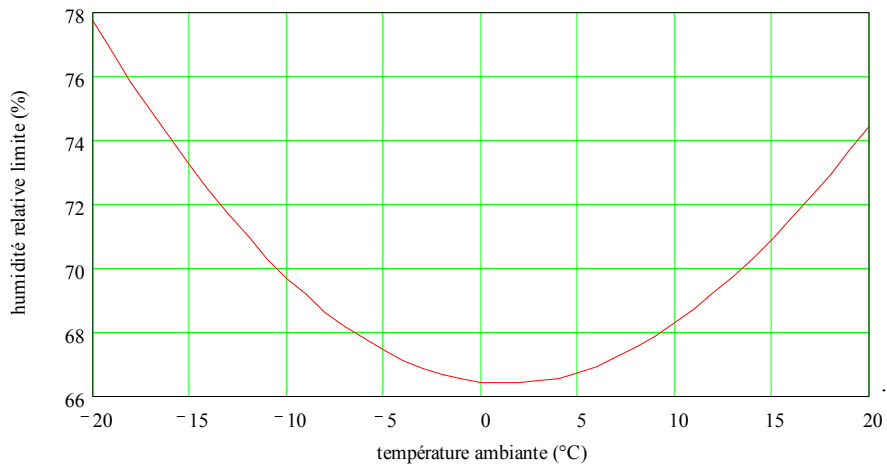
Tube optique sans chauffage et avec pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

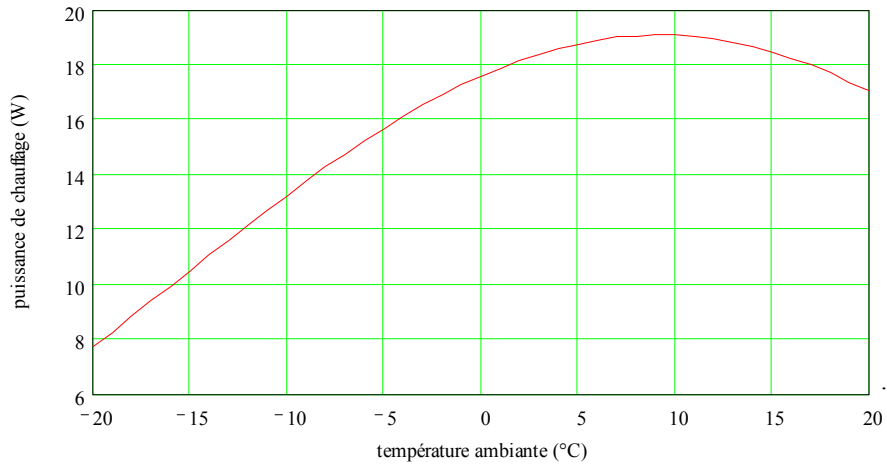


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

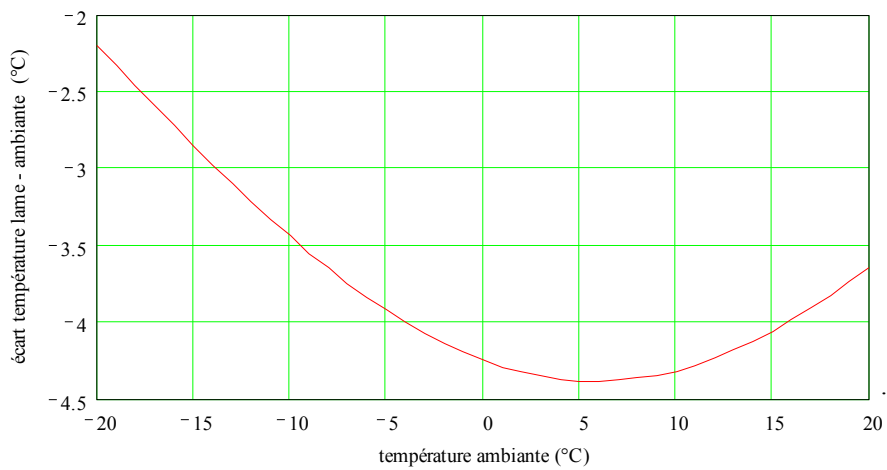


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

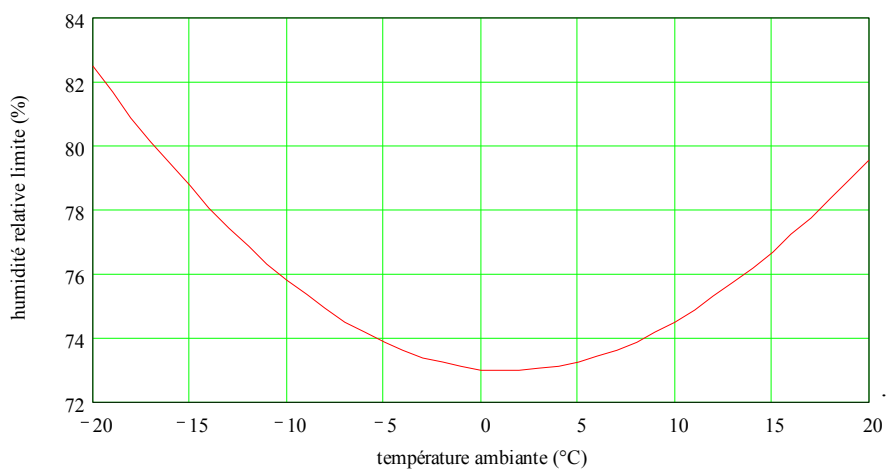
Chauffage uniforme du tube optique sans pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante

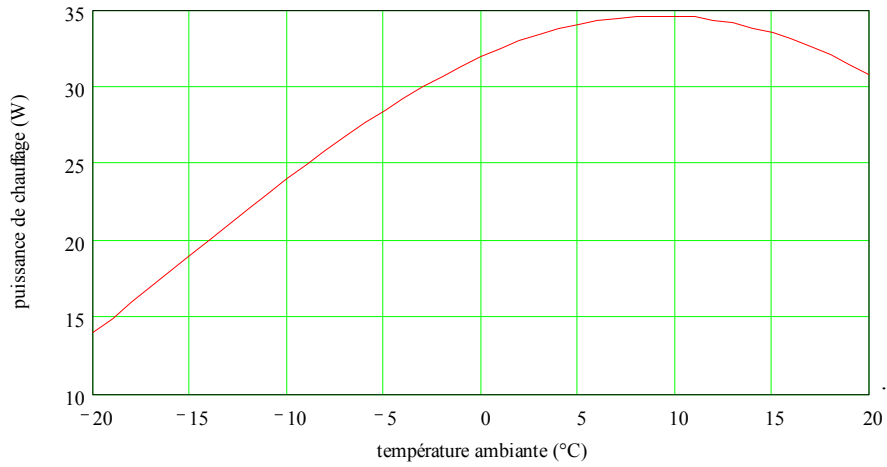


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

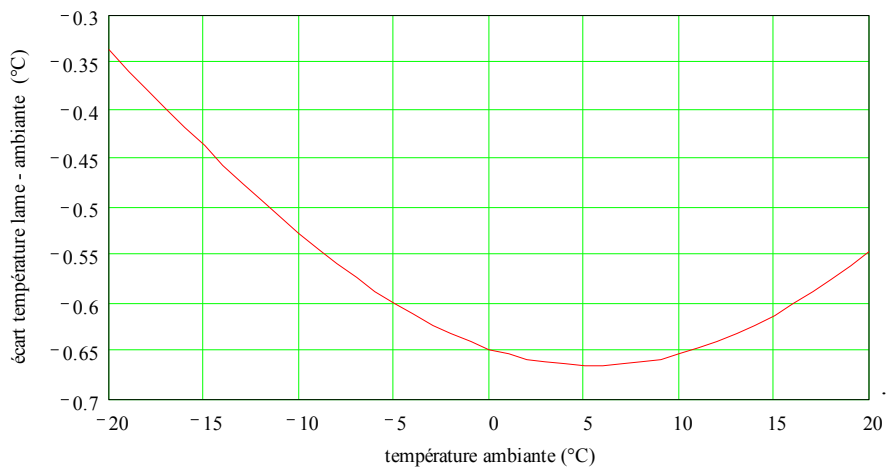


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

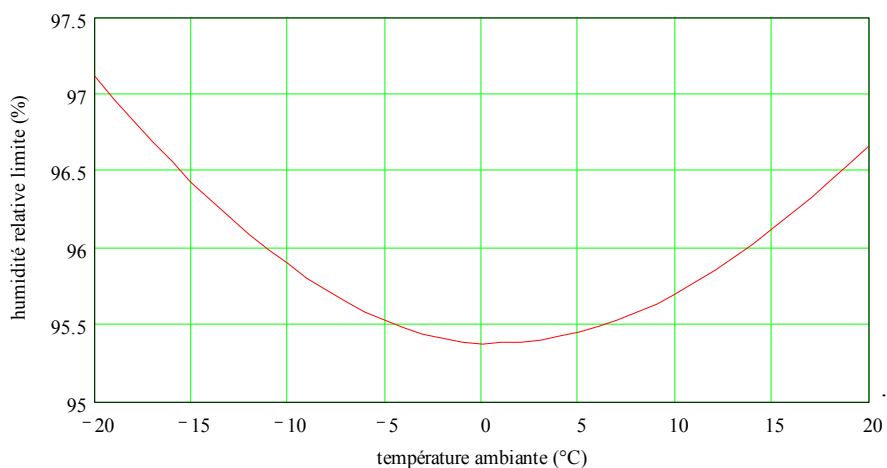
Chauffage uniforme du tube optique et du pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante



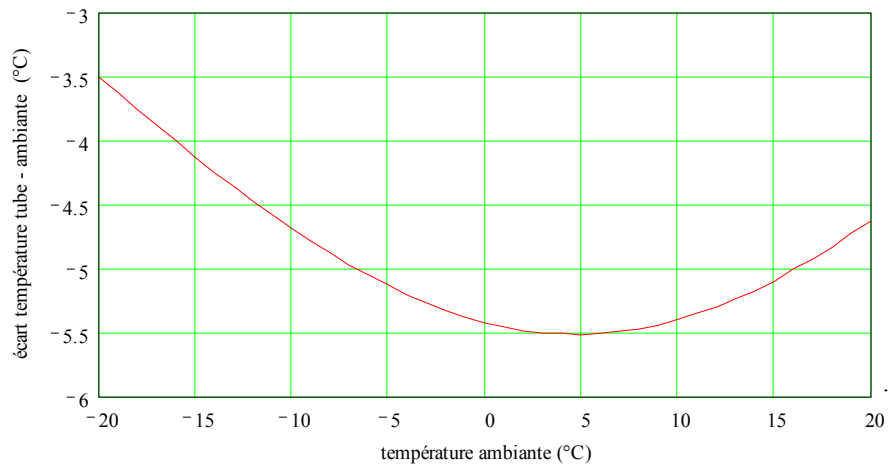
Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante



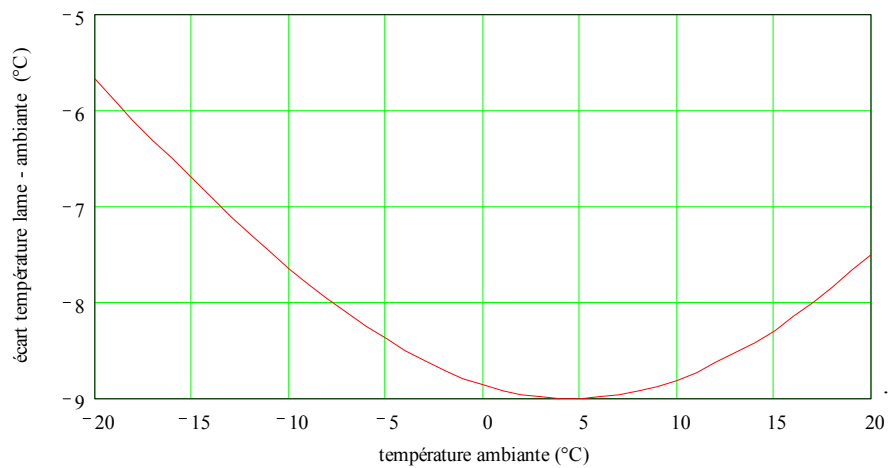
Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

Annexe E – Bilan sans inversion pour un Schmidt-Cassegrain de 12 pouces

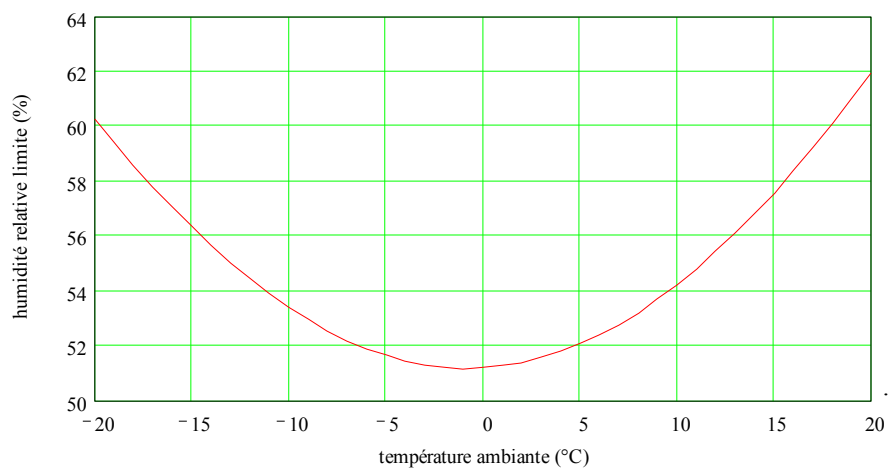
Tube optique sans chauffage et sans pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

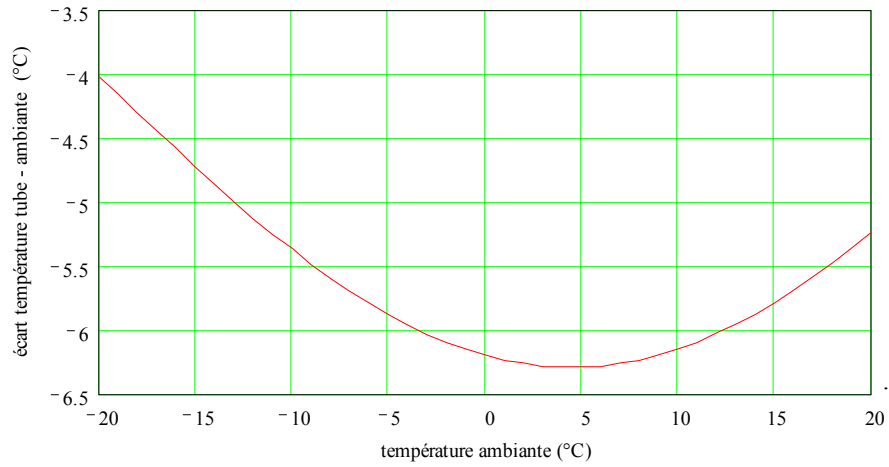


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

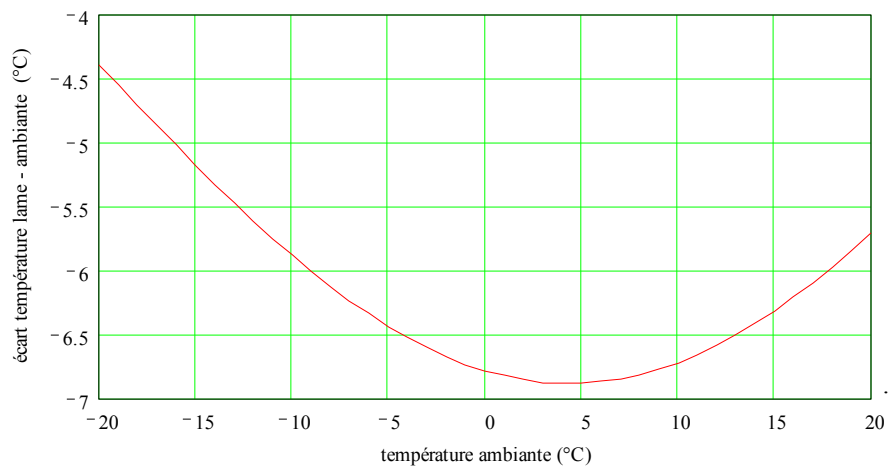


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

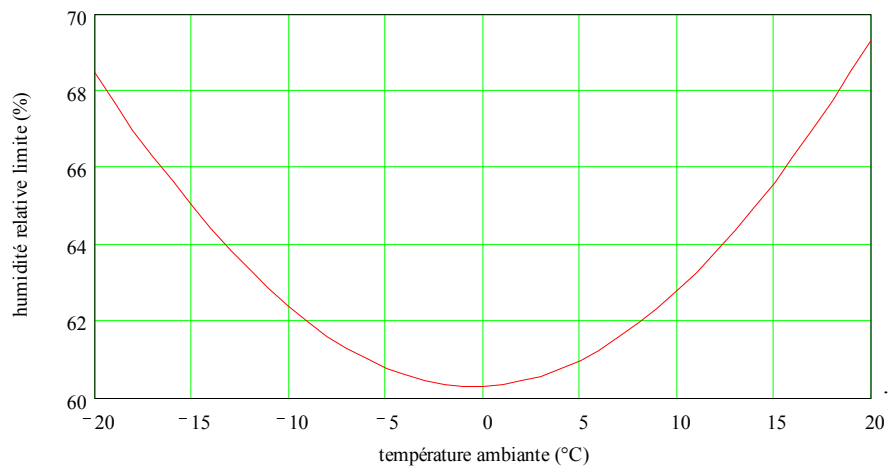
Tube optique sans chauffage et avec pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

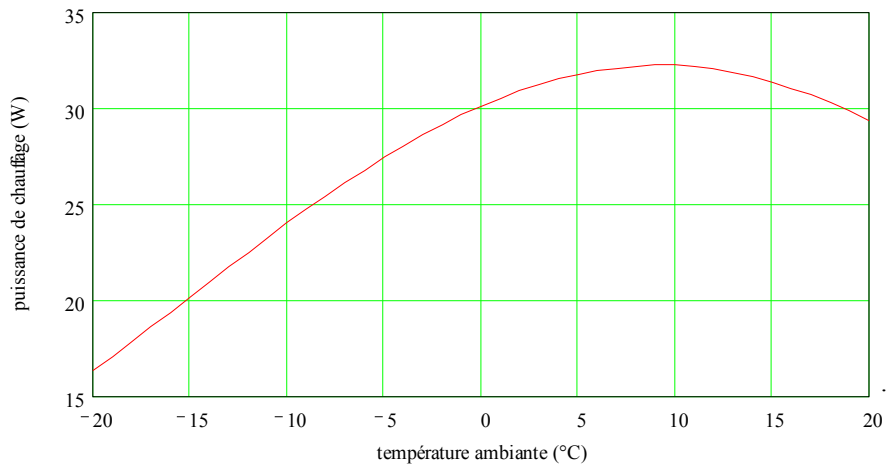


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

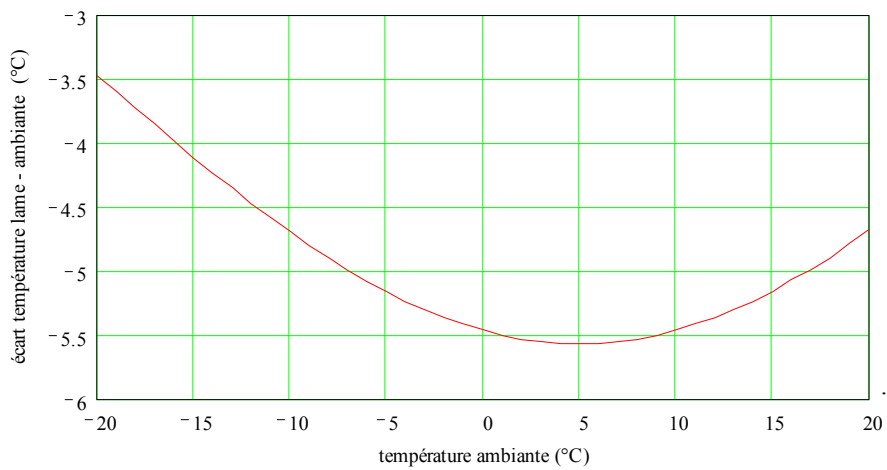


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

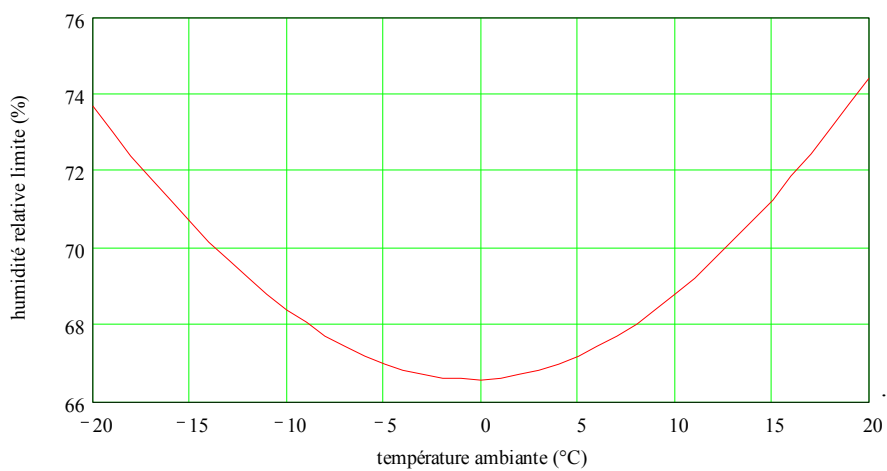
Chauffage uniforme du tube optique sans pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante

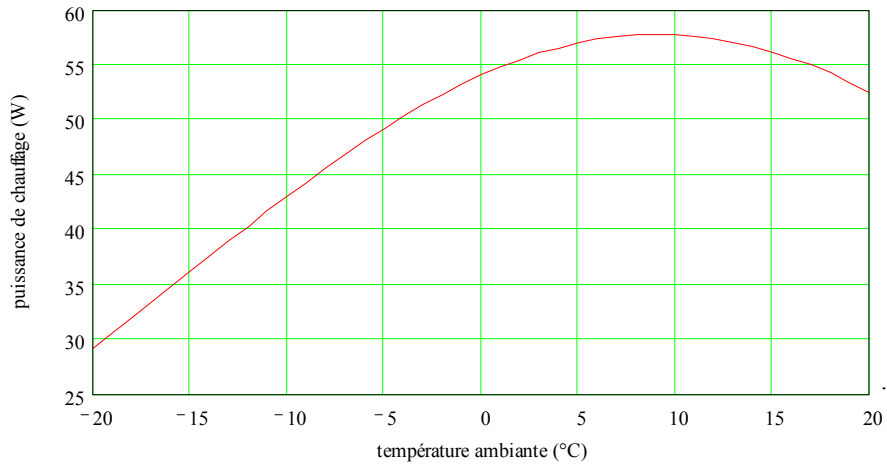


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

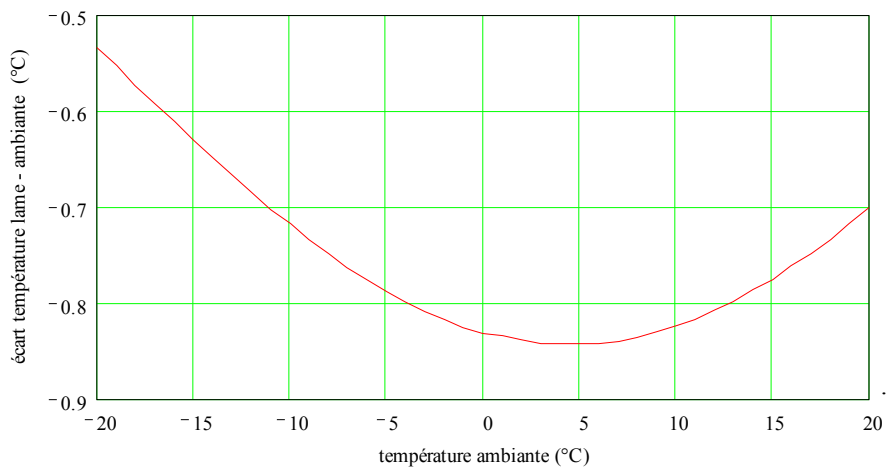


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

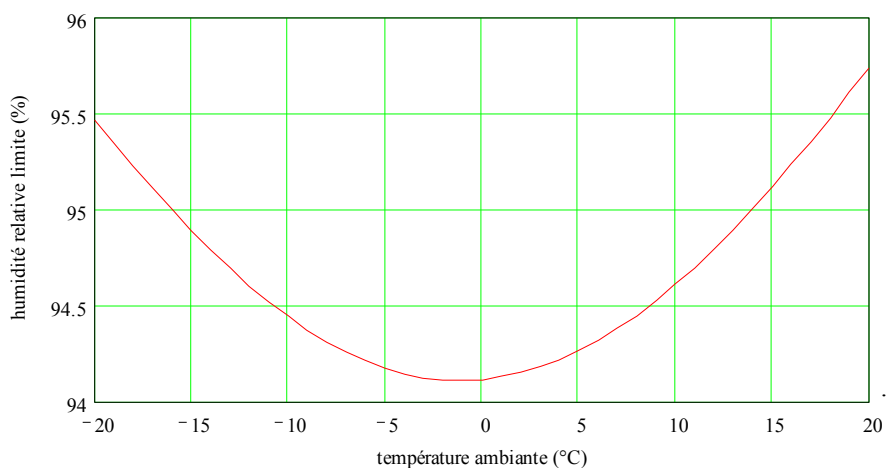
Chauffage uniforme du tube optique et du pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante



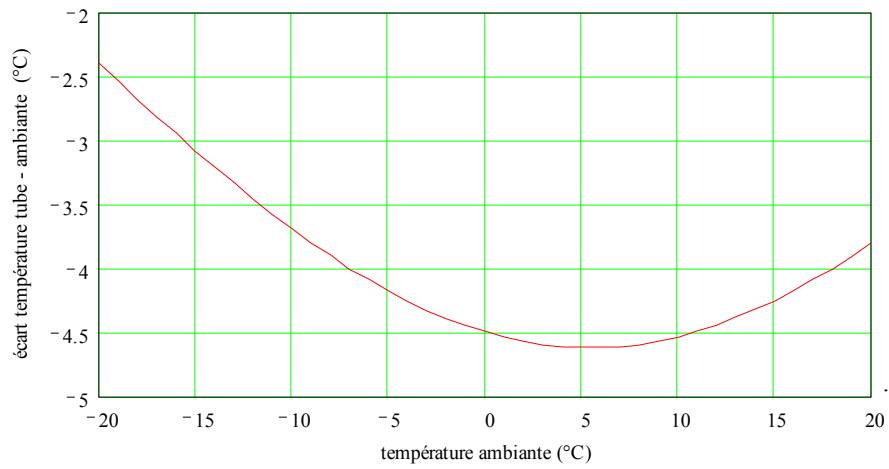
Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante



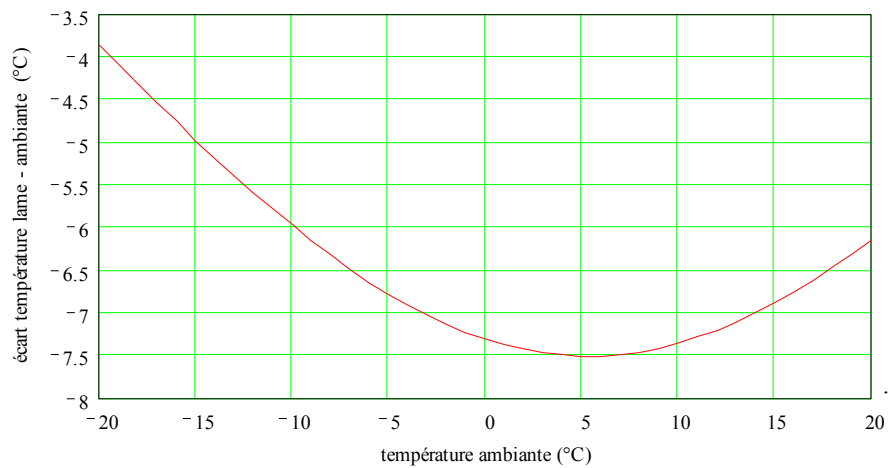
Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

Annexe F – Bilan avec inversion pour un Schmidt-Cassegrain de 12 pouces

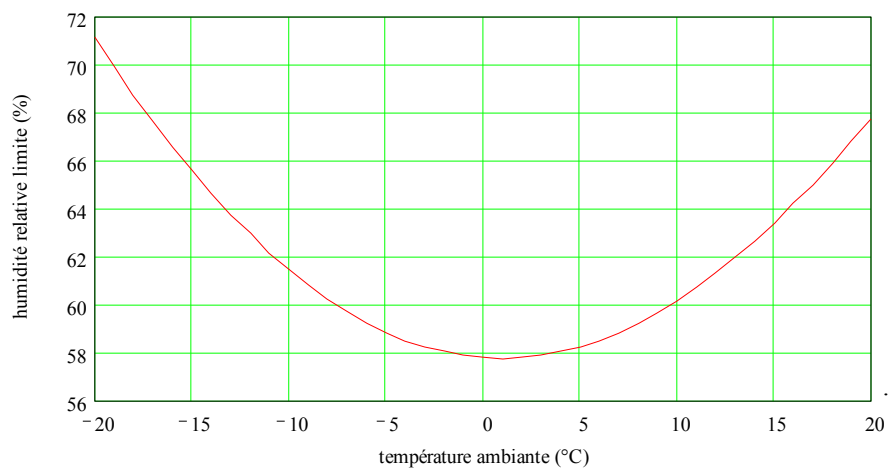
Tube optique sans chauffage et sans pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

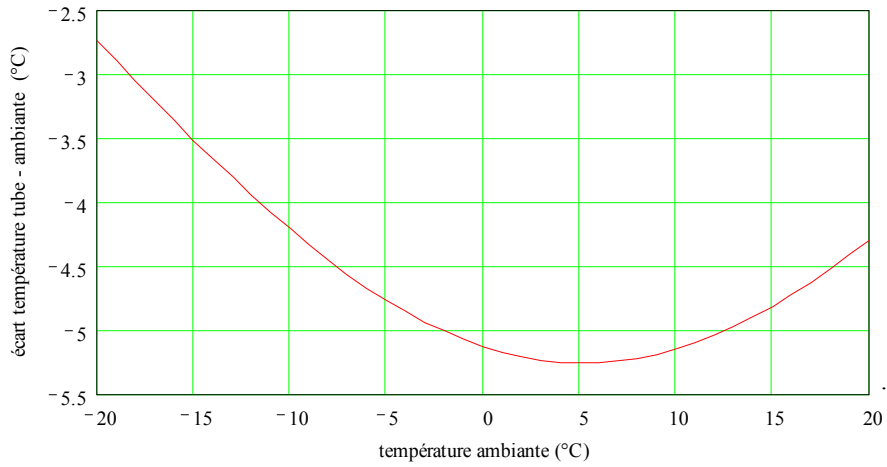


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

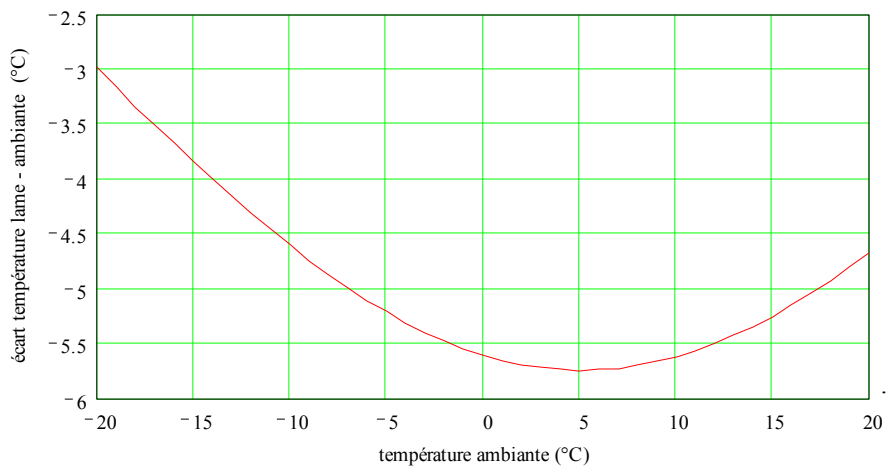


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

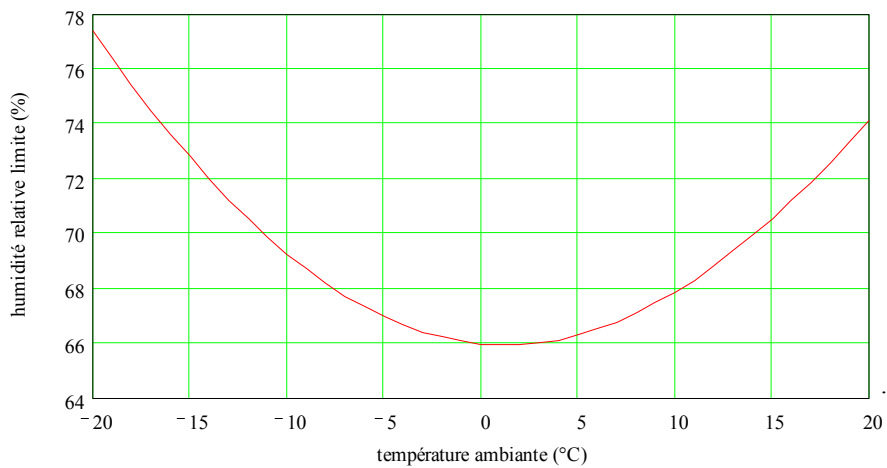
Tube optique sans chauffage et avec pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

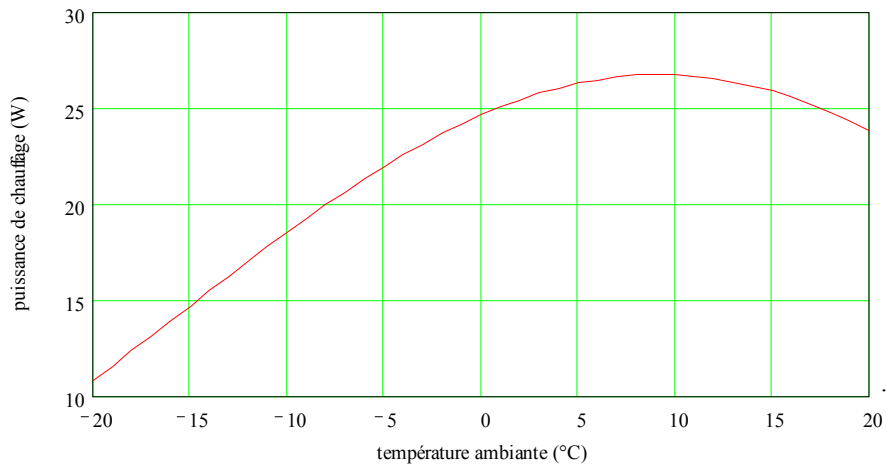


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

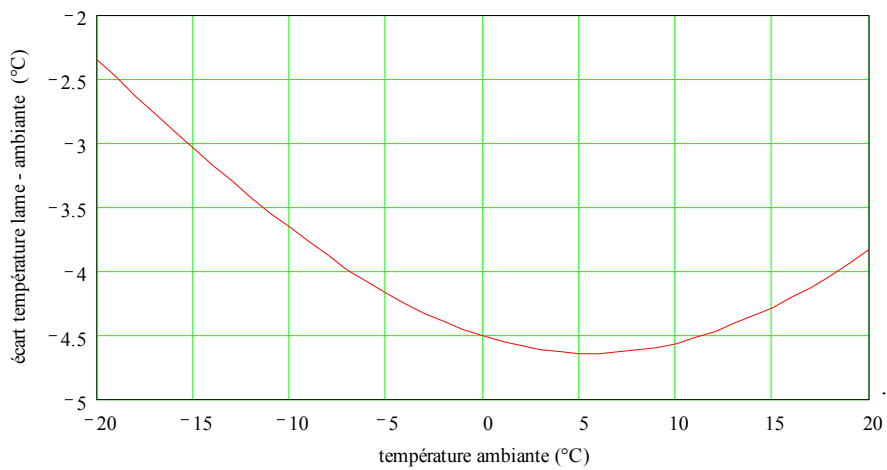


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

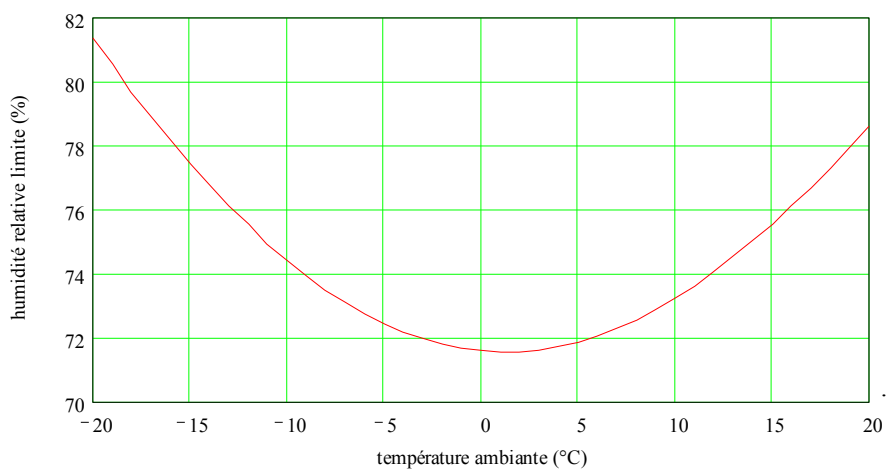
Chauffage uniforme du tube optique sans pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante

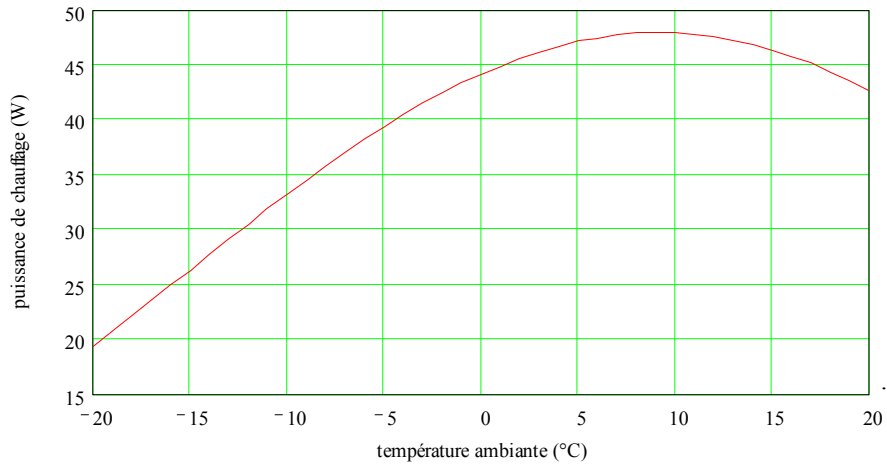


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

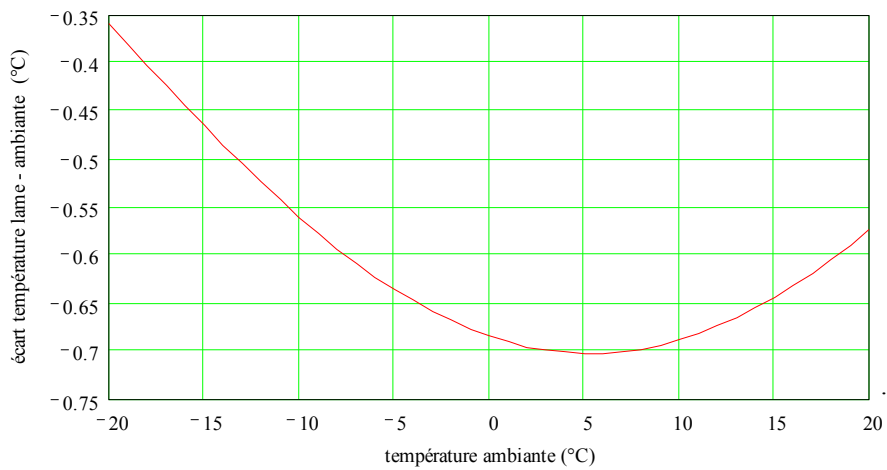


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

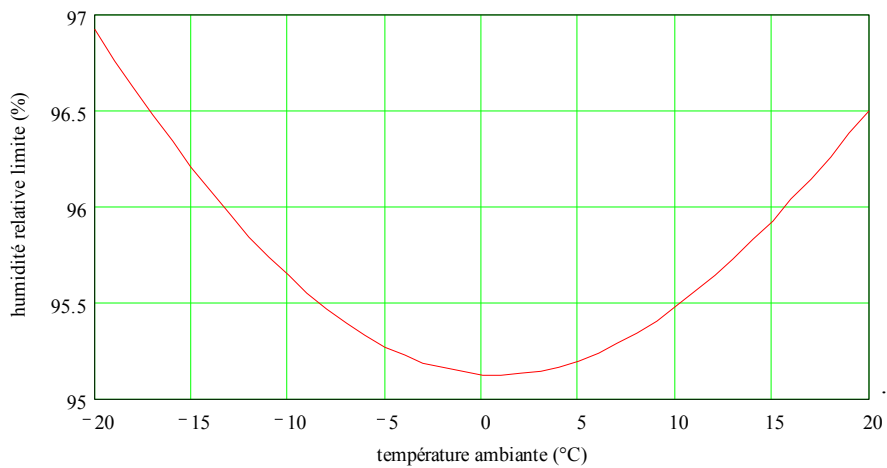
Chauffage uniforme du tube optique et du pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante



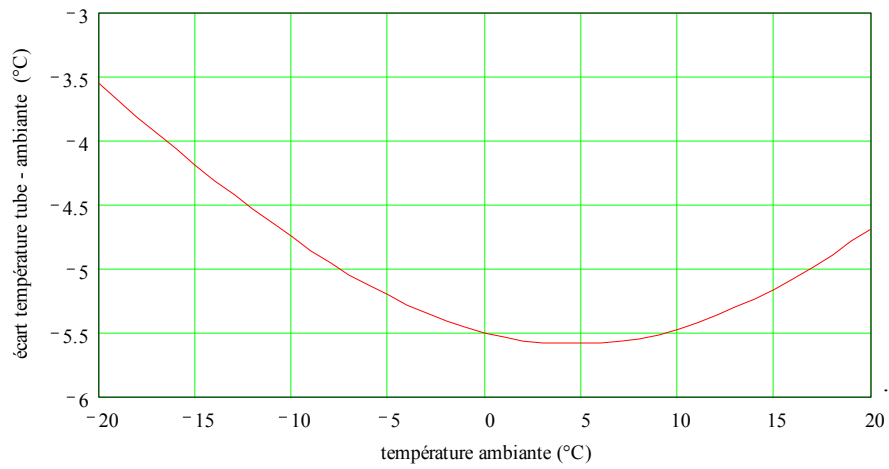
Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante



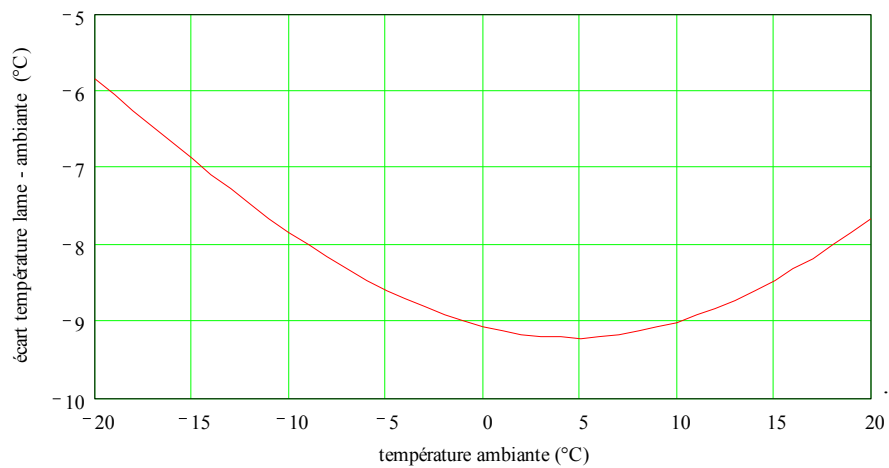
Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

Annexe F – Bilan sans inversion pour un Schmidt-Cassegrain de 14 pouces

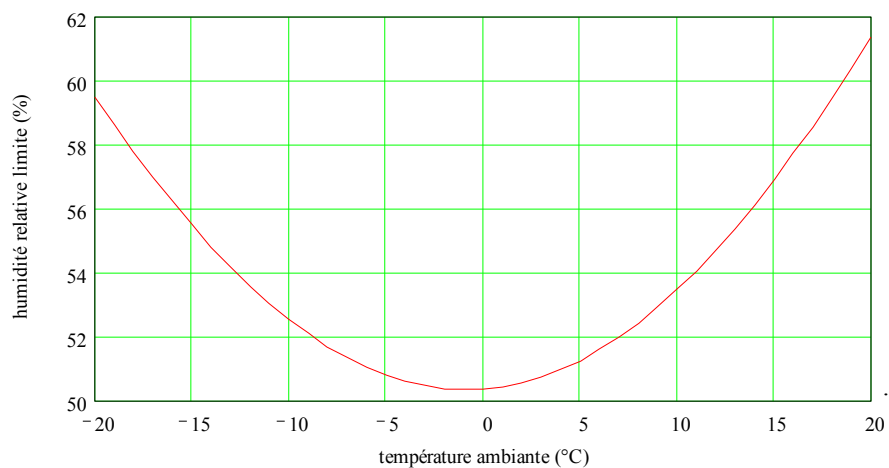
Tube optique sans chauffage et sans pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

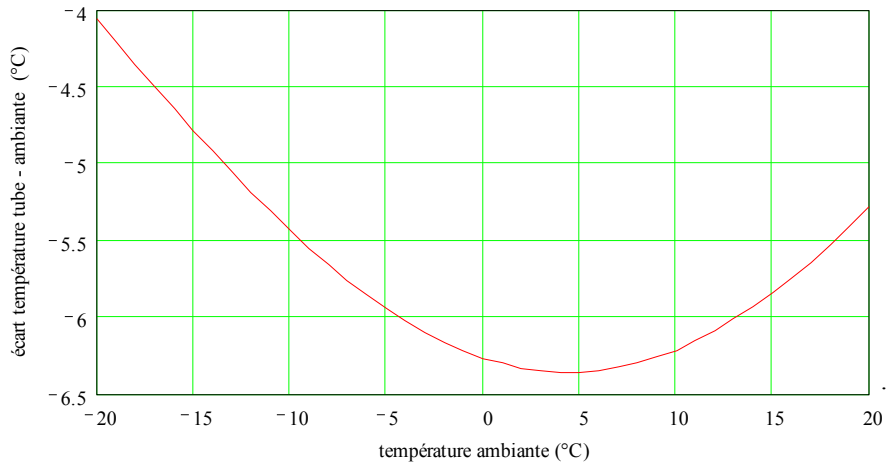


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

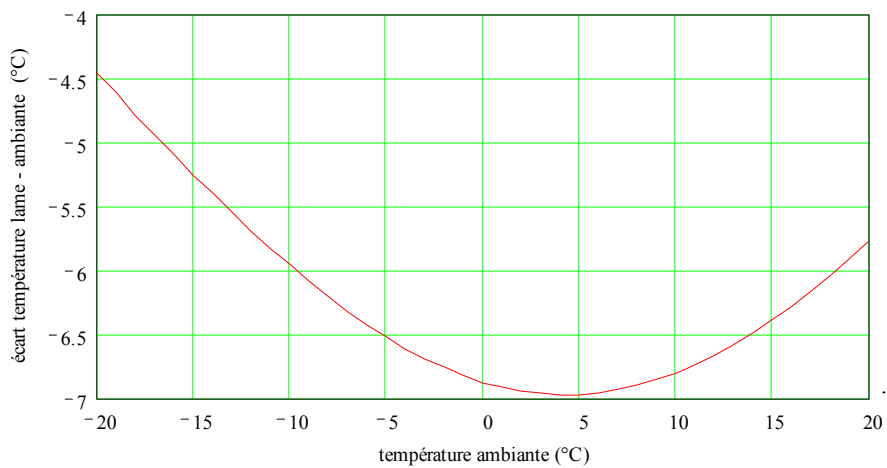


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

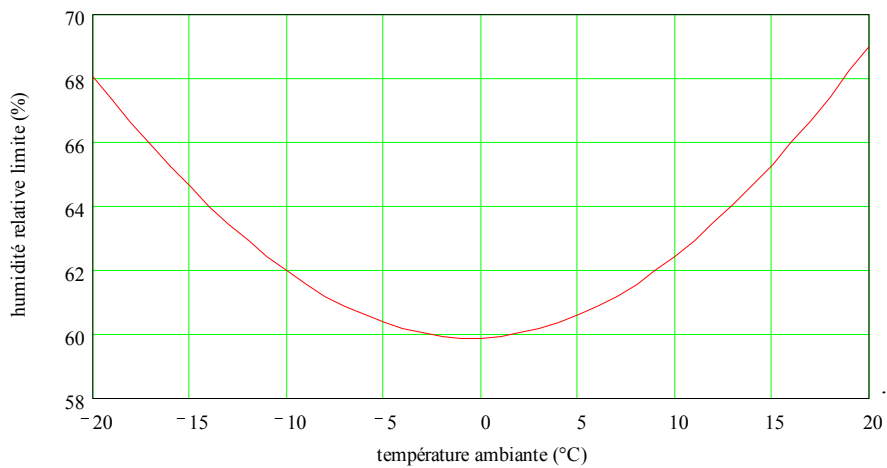
Tube optique sans chauffage et avec pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

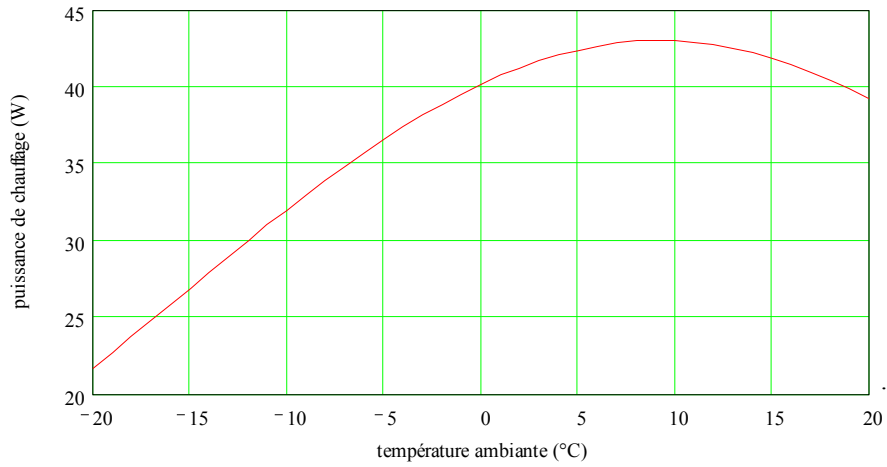


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

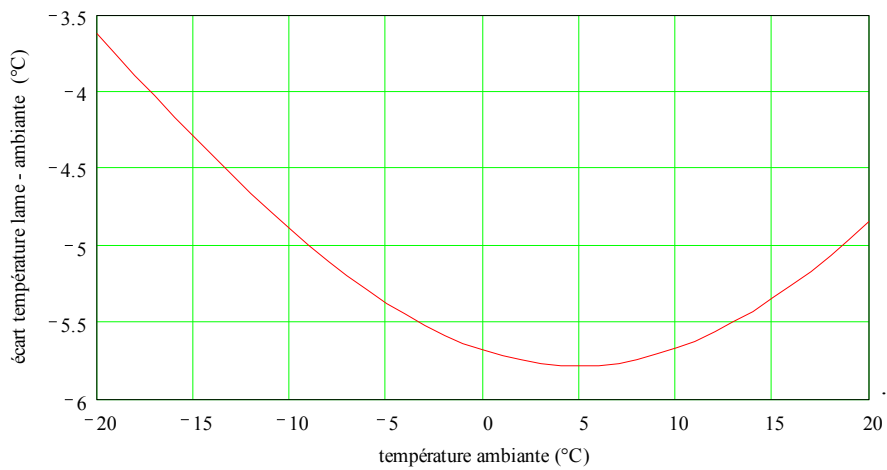


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

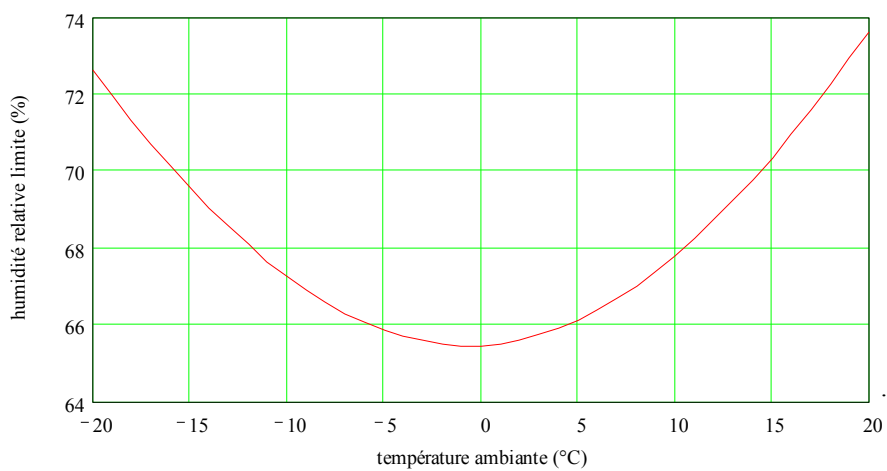
Chauffage uniforme du tube optique sans pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante

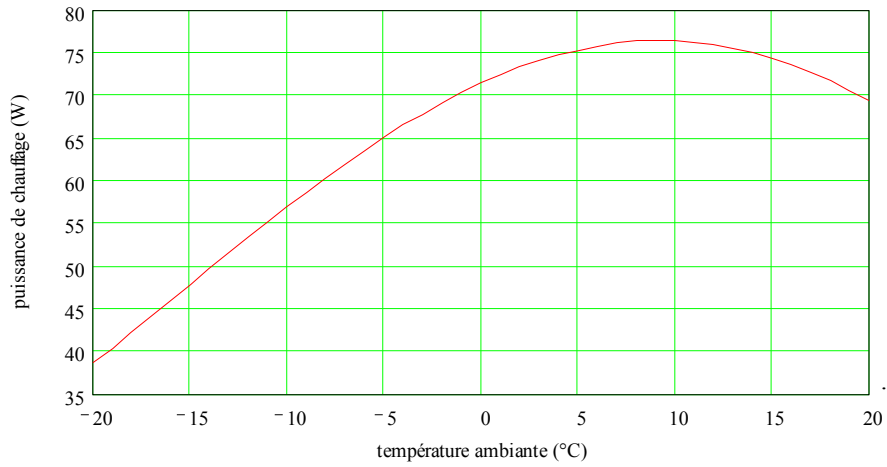


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

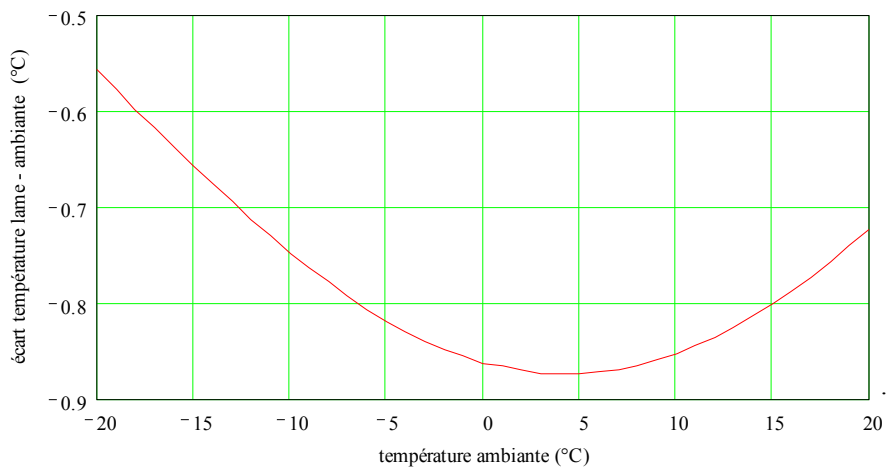


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

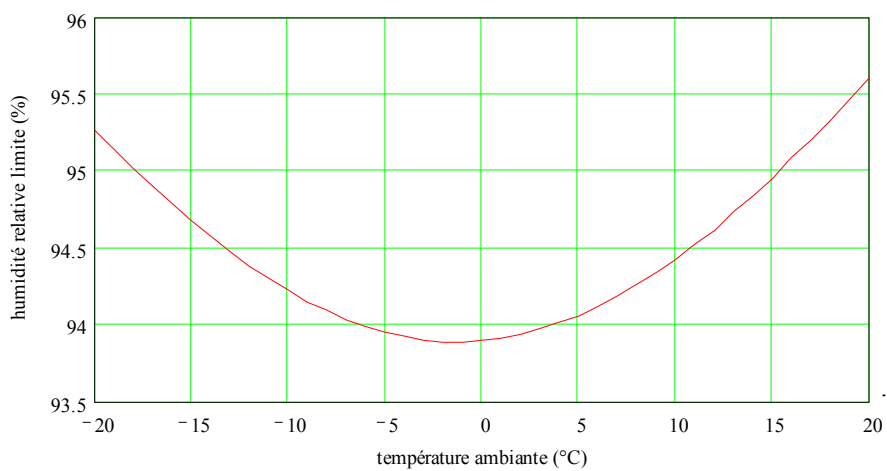
Chauffage uniforme du tube optique et du pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante



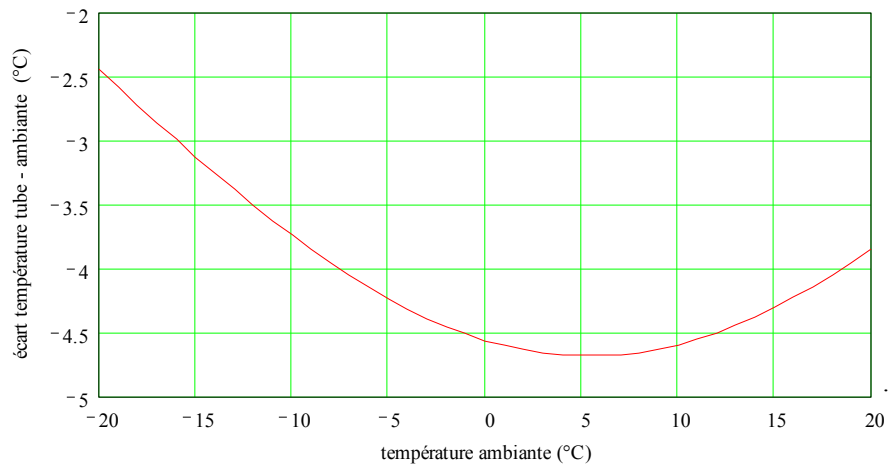
Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante



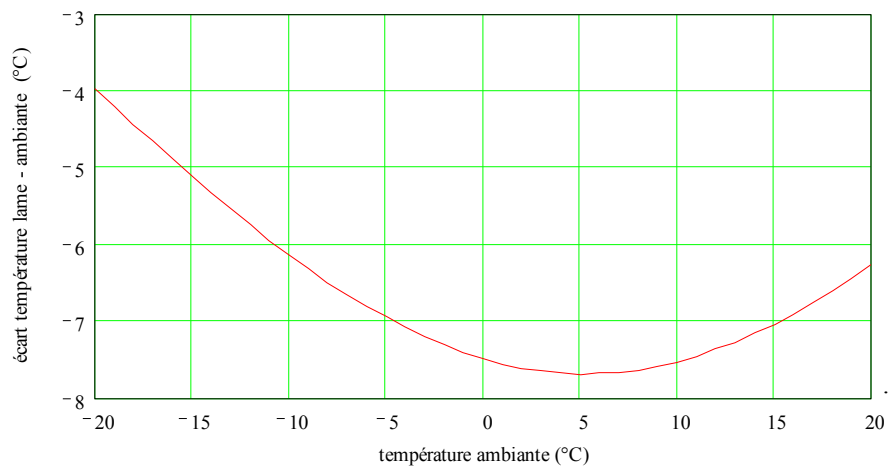
Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

Annexe H – Bilan avec inversion pour un Schmidt-Cassegrain de 14 pouces

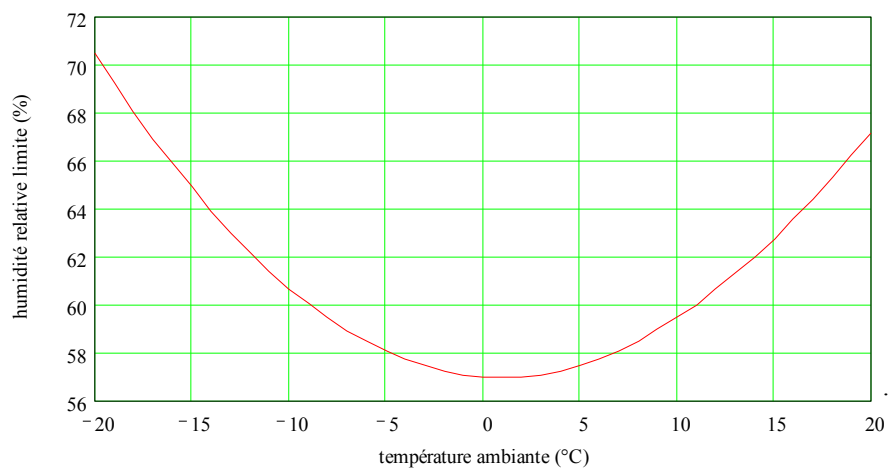
Tube optique sans chauffage et sans pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

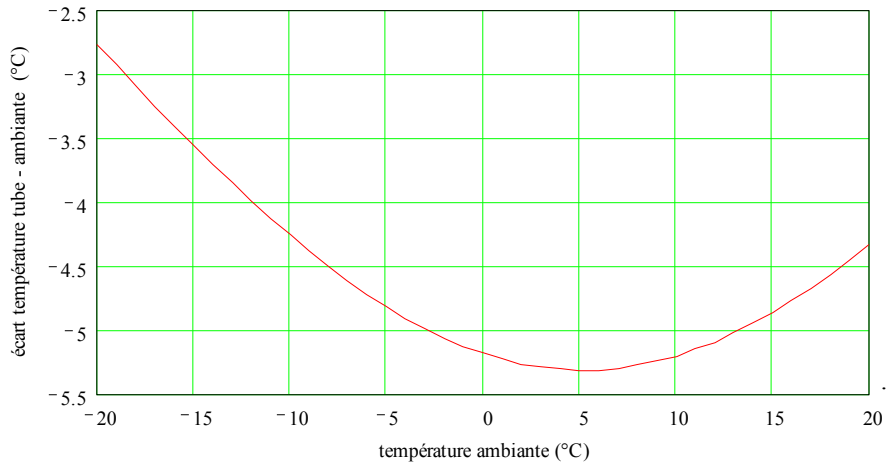


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

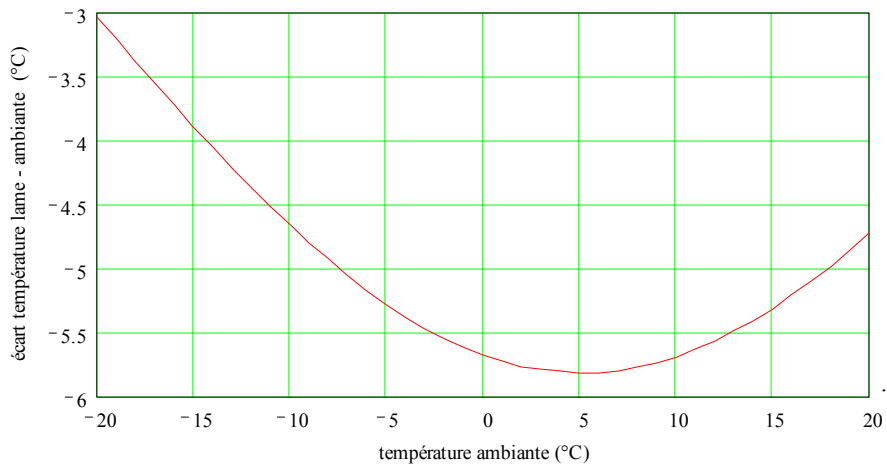


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

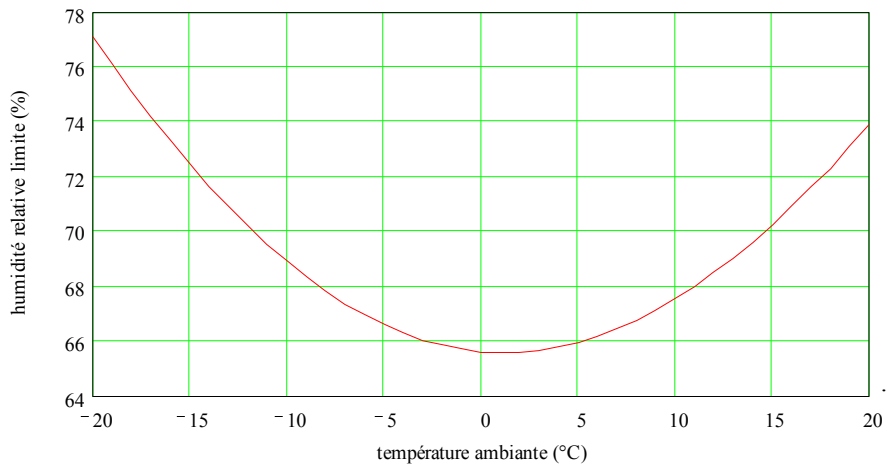
Tube optique sans chauffage et avec pare-buée



Écart de température entre le tube et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

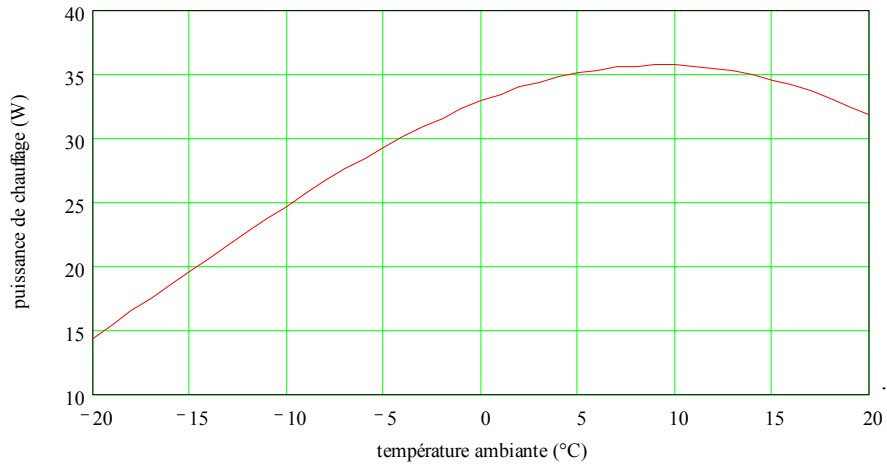


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

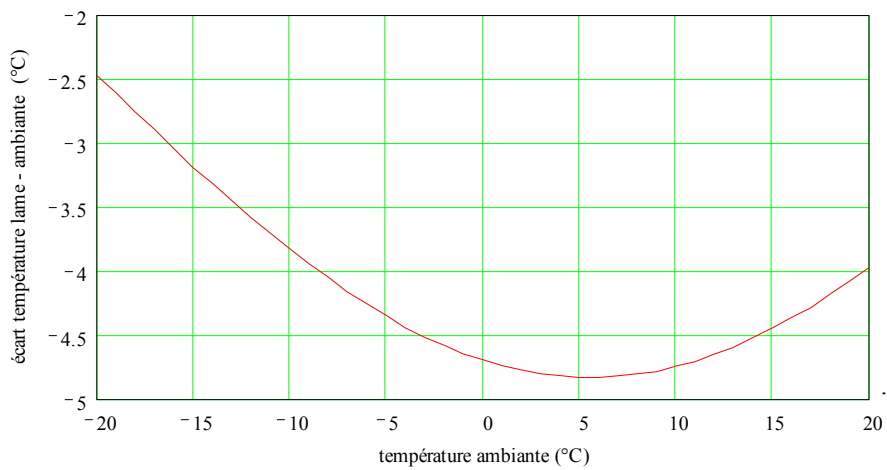


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

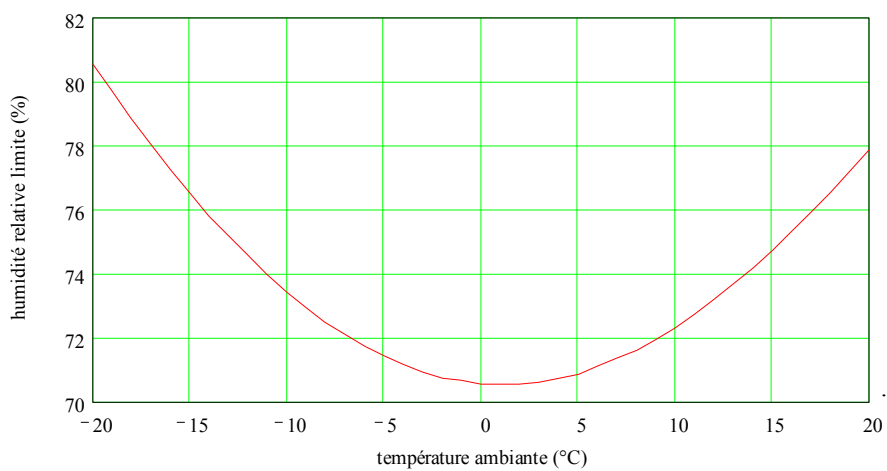
Chauffage uniforme du tube optique sans pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante

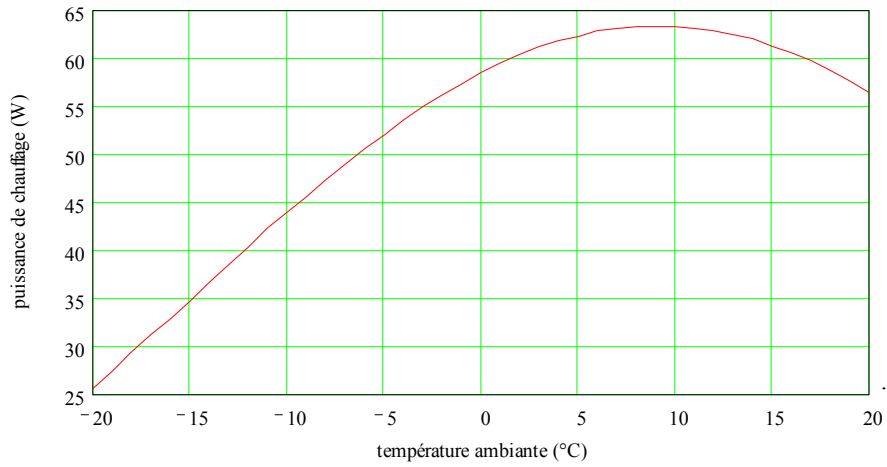


Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante

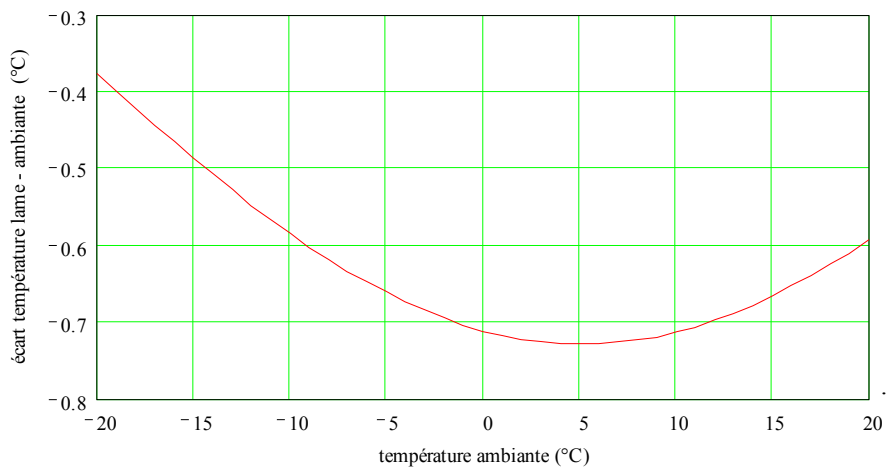


Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

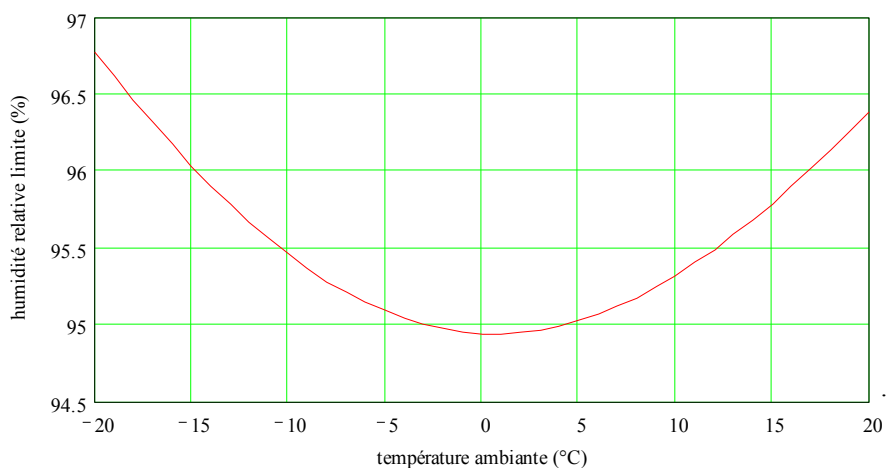
Chauffage uniforme du tube optique et du pare-buée



Puissance de chauffage nécessaire pour maintenir le tube à la température de l'atmosphère en fonction de la température ambiante



Écart de température entre la lame et l'atmosphère en fonction de la température ambiante



Condition de formation de la buée sur la lame de fermeture en fonction de la température ambiante

Annexe I – Éléments théoriques

Généralités

La thermodynamique a pour objet l'étude des relations entre les phénomènes thermiques et les phénomènes mécaniques.

La théorie du transfert de chaleur ou Thermocinétique a pour objet l'étude de l'évolution du champ de température d'un système entre un état d'équilibre initial et un état d'équilibre final. L'évolution dans le temps et l'espace de la température $T(x,y,z,t)$ est déterminée par les échanges de chaleur à l'intérieur du système et avec l'environnement du système. La valeur instantanée de la température en tout point du système définit un scalaire appelé champ de température : lorsque le champ de température est indépendant du temps le régime est dit permanent ou stationnaire ; lorsque le champ de température est variable dans le temps le régime est dit transitoire ou non stationnaire.

Les états d'équilibre d'un système sont déterminés en construisant le bilan des flux de chaleur échangés en régime permanent en accord avec la 1^{ère} loi de la Thermodynamique :

$$Q = W + \frac{dU}{dt} \quad [1]$$

où :

- Q est le bilan des flux de chaleur échangés (positif vers le système) exprimé en Watts
- W est le travail fourni par le système (positif vers l'environnement) exprimé en Watts
- U est l'énergie thermique interne exprimée en Joules

Pour les processus à volume et pression constante qui nous intéressent la 1^{ère} loi de la Thermodynamique s'écrit sous la forme :

$$Q = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad [2]$$

où :

- m est la masse du système (supposée constante) exprimée en kg
- c est la chaleur spécifique ou capacité calorifique exprimée en J/kg·K
- T est la température du système exprimée en K

La température d'un corps s'établit en dressant le bilan des flux de chaleur échangés entre le corps et son environnement. Le corps se stabilise à la température pour laquelle le flux entrant est égal au flux sortant se traduisant par l'équation suivante :

$$Q = 0 \quad [3]$$

La Thermocinétique introduit les lois de transports de la chaleur :

- loi de Fourier pour les échanges par conduction qui caractérise un échange par contact entre 2 solides
- loi de Newton pour les échanges par convection qui caractérise un échange par contact entre un solide et un fluide
- loi de Stefan-Boltzmann pour les échanges par rayonnement qui caractérise un échange à distance par radiation électromagnétique

Échange par conduction

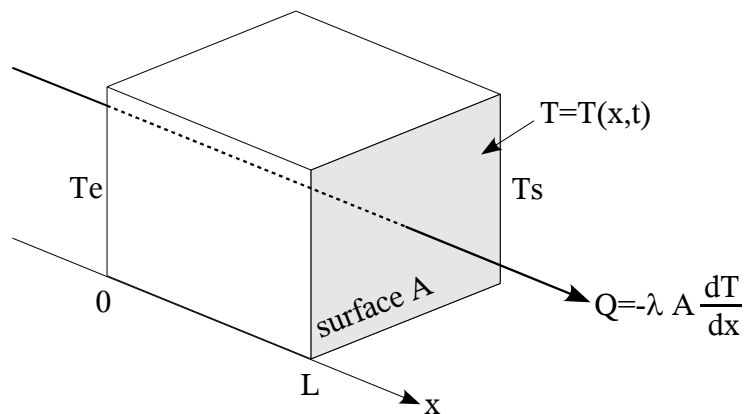
La conduction est le mode de transfert de chaleur dans un milieu opaque sans déplacement de matière sous l'influence d'une différence de température. Le mécanisme de transport de la chaleur dans un solide non conducteur est exclusivement lié à la transmission des vibrations atomiques. Dans un solide conducteur, ce mécanisme est aussi associé à la transmission d'électrons libres.

Le modèle est décrit par la loi de Fourier, soit dans sa forme réduite à une dimension :

$$Q_{cond} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad [4]$$

où :

- λ est la conductivité thermique du milieu exprimée en W/m·K
- A est la surface de la section de passage du flux de chaleur exprimée en m²
- dT est la variation de température exprimée en K sur la distance dx exprimée en m. Le rapport $\frac{dT}{dx}$ est le gradient de température dans la direction x .



Gradient de température dans un solide

Dans le cas de la figure précédente la relation [4] peut s'écrire sous la forme :

$$Q_{cond} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{T_s - T_e}{L} \quad [5]$$

Faisant apparaître une analogie avec la loi d'Ohm connue en électricité dans laquelle le flux de chaleur Q tiendrait le rôle du courant et la température T celui de la tension, le terme $\frac{L}{\lambda \cdot A}$ représentant la résistance thermique du solide de section constante A , de longueur L et de conductivité thermique λ :

$$R_{cond} = \frac{L}{\lambda \cdot A} \quad [6]$$

Le tableau suivant donne les propriétés thermiques de quelques corps et alliages courants.

Matériau	Densité ρ (kg/m ³)	Capacité calorifique c (J/kg·K)	Conductivité thermique λ (W/m·K)
Acier 1010	7 830	434	64
Aluminium pur	2 707	905	237
Aluminium 6061	2 700	896	167
Aluminium 7075	2 800	841	130
Bronze (Sn 25%)	8 666	343	26
Cuivre pur	8 954	384	398
Cuivre DSC15715	8 900	384	365
Inox 410	7 700	460	25
Caoutchouc synthétique	1 150	1 970	0,23
Epoxy FR4	1 800	1 600	0,29
Fibre de verre	220	-	0,04
Polystyrène expansé	30	-	0,04
PVC	1 380	960	0,15
Pyrex	2 210	753	1,3

Propriétés thermiques de quelques matériaux courants

Échange par convection

La convection est le mode de transfert de chaleur entre un solide et un fluide. En convection naturelle, le mouvement du fluide est produit par des différences de densité résultant de gradients de température dans le fluide qui est réchauffé ou refroidit par conduction au contact du solide. En convection forcée, le mouvement du fluide est produit par un dispositif extérieur comme un ventilateur ou par le mouvement propre du solide au sein du fluide. Seule la convection naturelle est considérée pour la résolution de notre problème.

Le modèle est décrit par la loi de Newton, soit pour le flux de chaleur diffusé par convection par un solide à la température T :

$$Q_{conv} = \bar{h} \cdot A \cdot (T - T_A) \quad [7]$$

où :

- \bar{h} est le coefficient moyen de transfert de chaleur sur la surface solide considérée exprimé en W/m²·K
- A est la surface de contact entre le solide et le fluide exprimée en m²
- T_A est la température du milieu fluide ambiant

Le coefficient \bar{h} est déterminé par calcul ou le plus souvent à l'aide de corrélations empiriques qui ont été établies aussi bien en régime laminaire qu'en régime turbulent. L'instrument étant supposé à l'équilibre thermique, seul le régime laminaire à pression atmosphérique pour lequel les principales corrélations sont rappelées ci-dessous a été pris en considération.

configuration	\bar{h}	longueur caractéristique L_c
cylindre vertical de hauteur H	$1,42 \cdot \left \frac{T - T_A}{L_c} \right ^{1/4}$	H
dessus d'un disque chaud ou dessous d'un disque froid de rayon R	$1,32 \cdot \left \frac{T - T_A}{L_c} \right ^{1/4}$	2·R
dessous d'un disque chaud ou dessus d'un disque froid de rayon R	$0,59 \cdot \left \frac{T - T_A}{L_c} \right ^{1/4}$	2·R

Principales corrélations pour le coefficient de convection

La notion de résistance thermique n'apparaît plus de façon aussi claire que précédemment où elle n'était finalement que l'expression des propriétés thermiques des matériaux. Dans le cas de la convection naturelle, elle ne peut être mise en évidence que par linéarisation autour d'un point de fonctionnement.

Échange par rayonnement

Le rayonnement est le mode d'échange de chaleur aussi bien entre solides qu'entre fluides à travers un milieu transparent. Tout corps émet des radiations électromagnétiques dont l'intensité dépend de la température et de la nature de sa surface. La plus grande partie de l'énergie émise par un feu de cheminée l'est d'ailleurs sous forme de rayonnement électromagnétique. Dans la suite, les solides sont considérés suivant les cas comme des surfaces « noires » (émissivité égale à l'unité, indépendante de la longueur d'onde et de la direction) ou des surfaces « grises » diffuses (émissivité inférieure à l'unité, indépendante de la longueur d'onde et de la direction). Aucun matériau ne se comporte rigoureusement comme un corps gris, mais beaucoup présentent un comportement quasiment gris et l'approximation est en pratique très souvent justifiée.

Le modèle est décrit par la loi de Stefan-Boltzmann, soit pour le transfert de chaleur par rayonnement d'un corps M_1 vers un corps M_2 :

$$Q_{1-2} = A_1 \cdot Ft_{1-2} \cdot \sigma \cdot T_1^4 \quad [8]$$

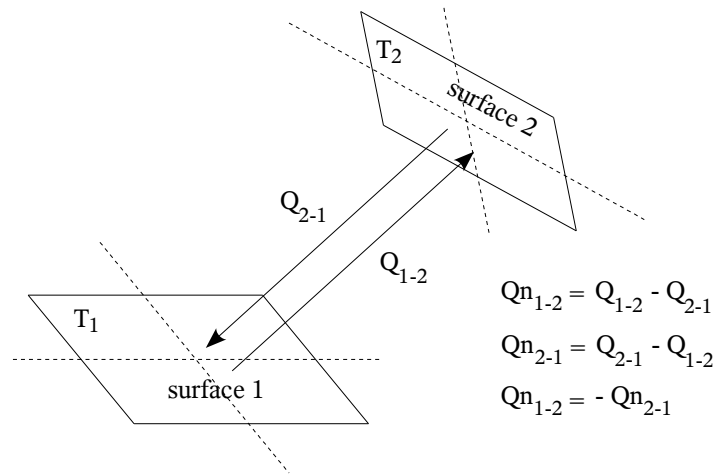
où :

- σ est la constante de Stefan de valeur $5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
- A_1 est la surface du corps M_1 exprimée en m^2
- T_1 est la température du corps M_1 exprimées en K
- Ft_{1-2} est le coefficient de transfert par radiation, soit la fraction de flux radiatif quittant M_1 absorbée par M_2

La valeur du coefficient Ft_{1-2} dépend des propriétés radiatives des surfaces des corps M_1 et M_2 ainsi que de la géométrie du problème.

Par symétrie, le transfert de chaleur par rayonnement du corps M_1 vers le corps M_2 s'écrit :

$$Q_{2-1} = A_2 \cdot Ft_{2-1} \cdot \sigma \cdot T_2^4 \quad [9]$$



Échanges radiatifs entre 2 surfaces

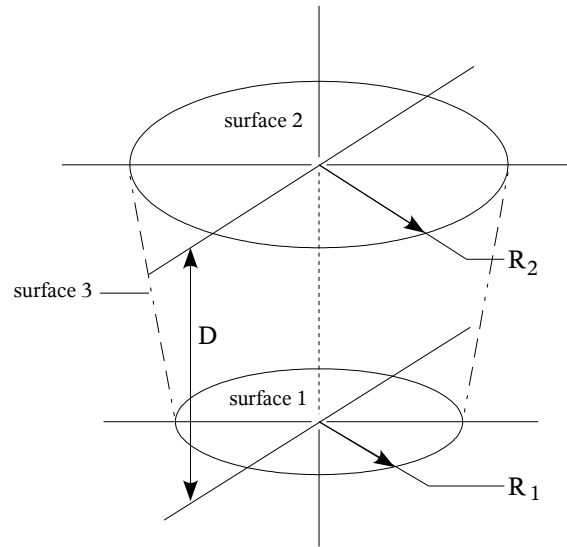
Le bilan des échanges radiatifs se traduit respectivement pour les surfaces grises 1 et 2 par :

$$Qn_{1-2} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{1-2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 \cdot A_2}} \quad [10']$$

$$Qn_{2-1} = \frac{\sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 \cdot A_2} + \frac{1}{A_2 \cdot F_{2-1}} + \frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 \cdot A_1}} \quad [10'']$$

où :

- σ est la constante de Stefan de valeur $5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
- A_1 et A_2 sont les aires respectives des surfaces 1 et 2 exprimées en m^2
- T_1 et T_2 sont les températures respectives des surfaces 1 et 2 exprimées en K
- ϵ_1 et ϵ_2 sont les émissivités respectives des surfaces 1 et 2
- F_{1-2} et F_{2-1} sont les facteurs de vue respectivement de la surface 2 vue depuis la surface 1 et de la surface 1 vue depuis la surface 2. Ce sont des termes purement géométriques qui correspondent à la fraction du champ qu'occupe une surface vue depuis l'autre. Pour des surfaces diffuses et isothermes, ces termes représentent la fraction d'énergie quittant la première surface pour atteindre la seconde.
- $A_1 \cdot F_{1-2} = A_2 \cdot F_{2-1}$ traduisant bien l'égalité $Qn_{1-2} = -Qn_{2-1}$



Facteur de forme pour une géométrie cylindrique

Les facteurs de vue correspondants à la géométrie cylindrique décrite par la figure ci-dessus et définissant les surfaces 1, 2 et 3 sont :

$$F_{1-2} = \frac{1}{2} \cdot \left[X_{1-2} - \sqrt{X_{1-2}^2 - 4 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right] \quad \text{avec} \quad X_{1-2} = 1 + \frac{D^2 + R_2^2}{R_1^2} \quad [11]$$

$$F_{2-1} = \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot F_{1-2} \quad [12]$$

$$F_{1-3} = 1 - F_{1-2} \quad [13]$$

$$F_{2-3} = 1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot F_{1-2} \quad [14]$$

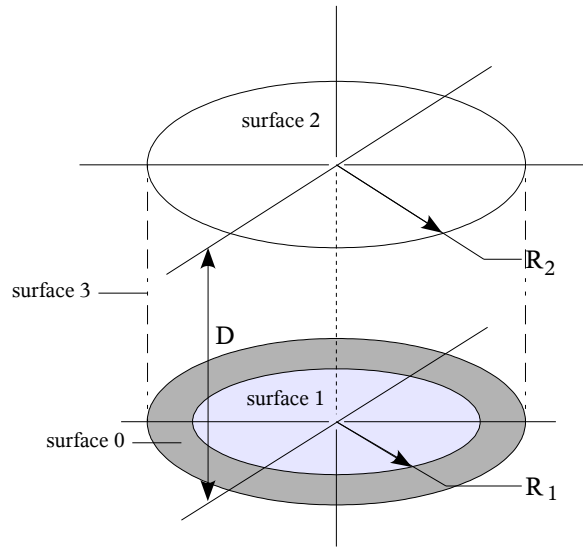
$$F_{3-1} = \frac{R_1^2}{(R_1 + R_2) \cdot D} \cdot (1 - F_{1-2}) \quad [15]$$

$$F_{3-2} = \frac{R_2^2}{(R_1 + R_2) \cdot D} \cdot \left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot F_{1-2} \right) \quad [16]$$

$$F_{3-3} = 1 - \frac{R_1^2 + R_2^2}{(R_1 + R_2) \cdot D} + \frac{2 \cdot R_1^2}{(R_1 + R_2) \cdot D} \cdot F_{1-2} \quad [17]$$

$$F_{1-1} = 0 \quad [18]$$

$$F_{2-2} = 0 \quad [19]$$



**Facteur de forme pour l'ouverture d'un télescope
surface 1 définissant la lame de fermeture**

Les facteurs de vue correspondants à la géométrie cylindrique décrite par la figure ci-dessus et définissant les surfaces 0, 1, 2 et 3 sont :

$$F_{1-2} = \frac{1}{2} \cdot \left[X_{1-2} - \sqrt{X_{1-2}^2 - 4 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right] \quad \text{avec} \quad X_{1-2} = 1 + \frac{D^2 + R_2^2}{R_1^2} \quad [20]$$

$$F_{(0+1)-2} = \frac{1}{2} \cdot \left[X_{(0+1)-2} - \sqrt{X_{(0+1)-2}^2 - 4} \right] \quad \text{avec} \quad X_{(0+1)-2} = 2 + \frac{D^2}{R_2^2} \quad [21]$$

$$F_{1-3} = 1 - F_{1-2} \quad [22]$$

$$F_{2-3} = 1 - F_{(0+1)-2} \quad [23]$$

$$F_{2-1} = \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot F_{1-2} \quad [24]$$

$$F_{2-0} = F_{(0+1)-2} - \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot F_{1-2} \quad [25]$$

$$F_{3-2} = \frac{R_2}{2 \cdot D} \cdot (1 - F_{(0+1)-2}) \quad [26]$$

$$F_{3-3} = 1 - \frac{R_2}{D} \cdot (1 - F_{(0+1)-2}) \quad [27]$$

$$F_{3-1} = \frac{R_1^2}{2 \cdot R_2 \cdot D} \cdot (1 - F_{1-2}) \quad [28]$$

$$F_{3-0} = \frac{R_2}{2 \cdot D} \cdot (1 - F_{(0+1)-2}) - \frac{R_1^2}{2 \cdot R_2 \cdot D} \cdot (1 - F_{1-2}) \quad [29]$$

$$F_{0-2} = \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \left(F_{(0+1)-2} - \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot F_{1-2} \right) \quad [30]$$

$$F_{0-3} = \frac{2 \cdot R_2 \cdot D}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \left(\frac{R_2}{2 \cdot D} \cdot (1 - F_{(0+1)-2}) - \frac{R_1^2}{2 \cdot R_2 \cdot D} \cdot (1 - F_{1-2}) \right) \quad [31]$$

$$F_{1-0} = 0 \quad [32]$$

$$F_{1-1} = 0 \quad [33]$$

$$F_{2-2} = 0 \quad [34]$$

$$F_{0-0} = 0 \quad [35]$$

$$F_{0-1} = 0 \quad [36]$$

L'équation [8'] peut être linéarisée sous la forme :

$$Qn_{1-2} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot (T_1 \cdot T_2)^{3/2} \cdot (T_1 - T_2)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{1-2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 \cdot A_2}} \quad [37]$$

faisant apparaître la notion de résistance thermique dont la valeur définie autour du point de fonctionnement défini par T_1 et T_2 est :

$$R_{th} = \frac{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{1-2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 \cdot A_2}}{4 \cdot \sigma \cdot (T_1 \cdot T_2)^{3/2}} \quad [38]$$

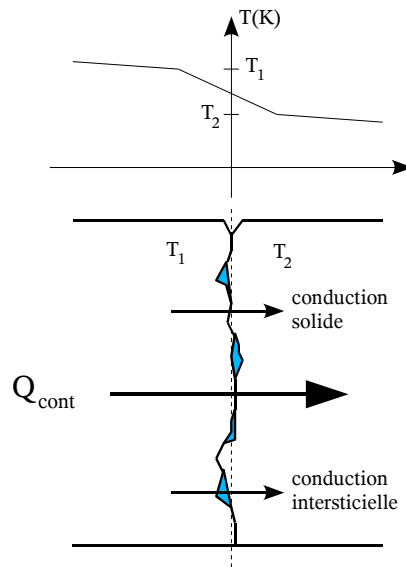
Pour finir, le tableau suivant donne les propriétés radiatives de quelques matériaux courants.

Métaux	Émissivité ϵ	Non métaux	Émissivité ϵ
Aluminium oxydé	0,2	Carbone	0,95
Aluminium poli	0,04	Peinture blanche mate	0,93
Aluminure sous vide	0,03	Peinture noire epoxy	0,89
Argent poli	0,02	Peinture noire optique	0,95
Cuivre poli	0,03	Pyrex	0,94
Or poli	0,02	Quartz	0,96

Émissivité de quelques surfaces courantes

Échange par contact

La notion de résistance thermique est particulièrement utile pour modéliser le comportement thermique d'une interface entre 2 solides. A cause de leur rugosité, le contact thermique entre 2 surfaces solides ne peut être parfait : des zones de conduction solide alternent avec des zones de conduction interstitielle.



Transfert de chaleur entre 2 surfaces solides en contact

Le modèle fait intervenir une conductance de contact h_c exprimée en $W/m^2 \cdot K$ similaire au coefficient de transfert par convection \bar{h} et la résistance thermique de contact s'écrit alors :

$$R_{cont} = \frac{1}{h_c \cdot A_c} \quad [39]$$

où A_c est la surface de contact exprimée en m^2 .

La relation liant flux de chaleur et gradient de température s'écrit alors :

$$Q_{cont} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cont}} \quad [40]$$

Dans notre modèle thermique de télescope, cette résistance de contact n'intervient qu'entre le tube et la lame de fermeture. Par défaut, la valeur de h_c a été choisie égale à $500 W/m^2 \cdot K$ en accord avec les valeurs typiques données dans la littérature pour des interfaces métal-céramique à pression modérée. La valeur de la conductance de contact tube-lame a peu d'influence sur les résultats compte tenu de la mauvaise conductivité thermique du verre.

Rayonnement thermique du ciel nocturne

Le ciel nocturne est la source d'un rayonnement infrarouge principalement dû à la vapeur d'eau et au dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère. La quasi totalité de ce rayonnement provient des couches basses de l'atmosphère qui sont les plus humides. Aux latitudes tropicales, l'irradiance atmosphérique typique est de l'ordre de $400 W/m^2$.

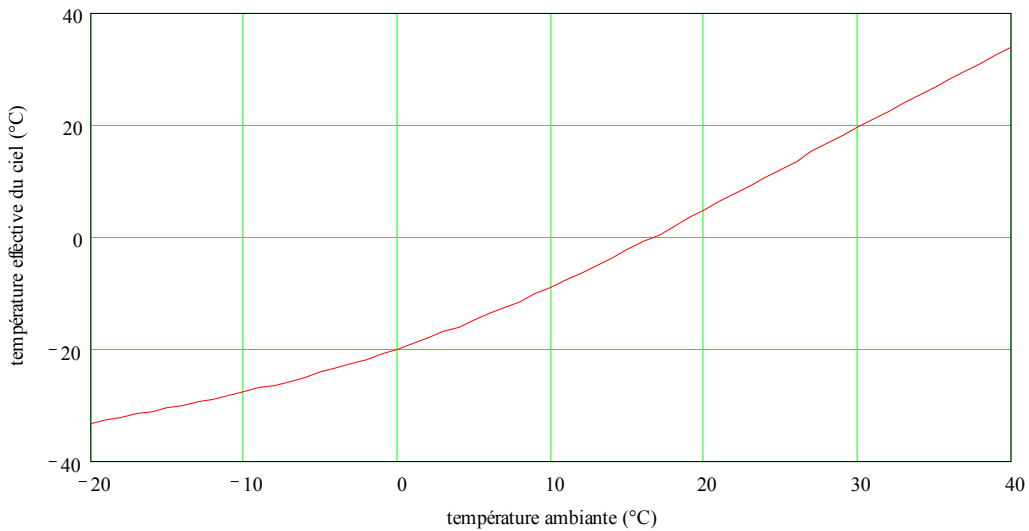
L'irradiance atmosphérique pour une surface horizontale sous un ciel clair est donnée par la relation empirique suivante déterminée par Idso et Jackson en 1969 :

$$J_0 = \sigma \cdot T_A^4 \cdot \left[1 - 0,261 \cdot e^{-0,000777 \cdot (273 - T_A)^2} \right] \quad [41]$$

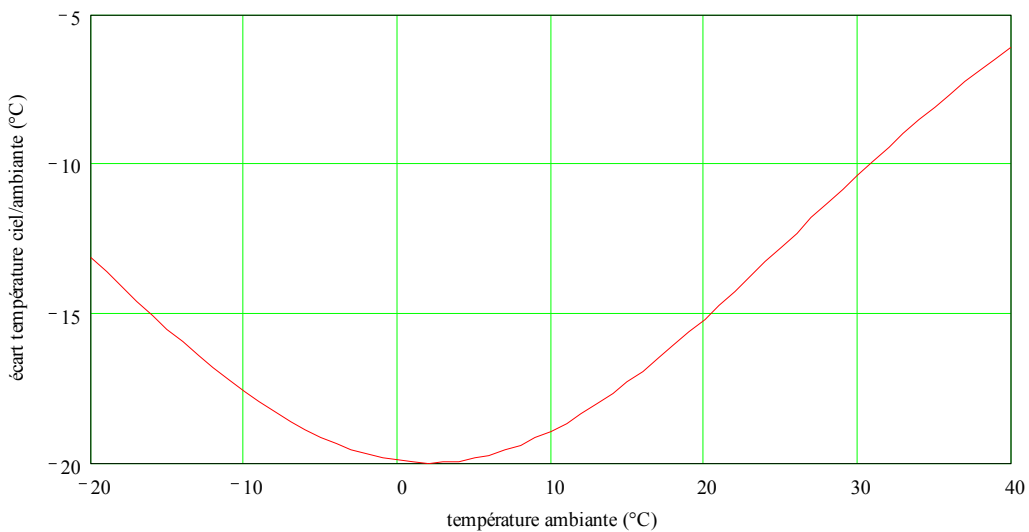
où T_A est la température de surface en Kelvins.

La formule [41] permet de calculer la température effective du ciel qui est la température du corps noir qui donnerait la même irradiance atmosphérique :

$$T_E = \left[\frac{J_0}{\sigma} \right]^{1/4} \quad [42]$$



Température effective du ciel en fonction de la température atmosphérique ambiante

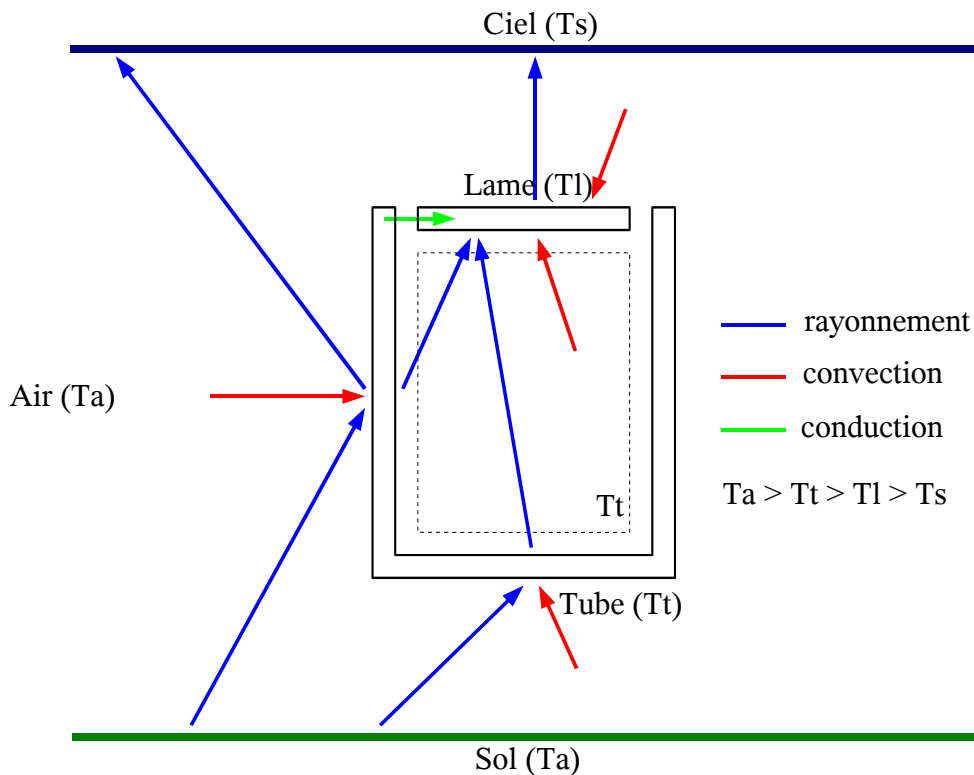


Écart entre la température du ciel et la température atmosphérique ambiante

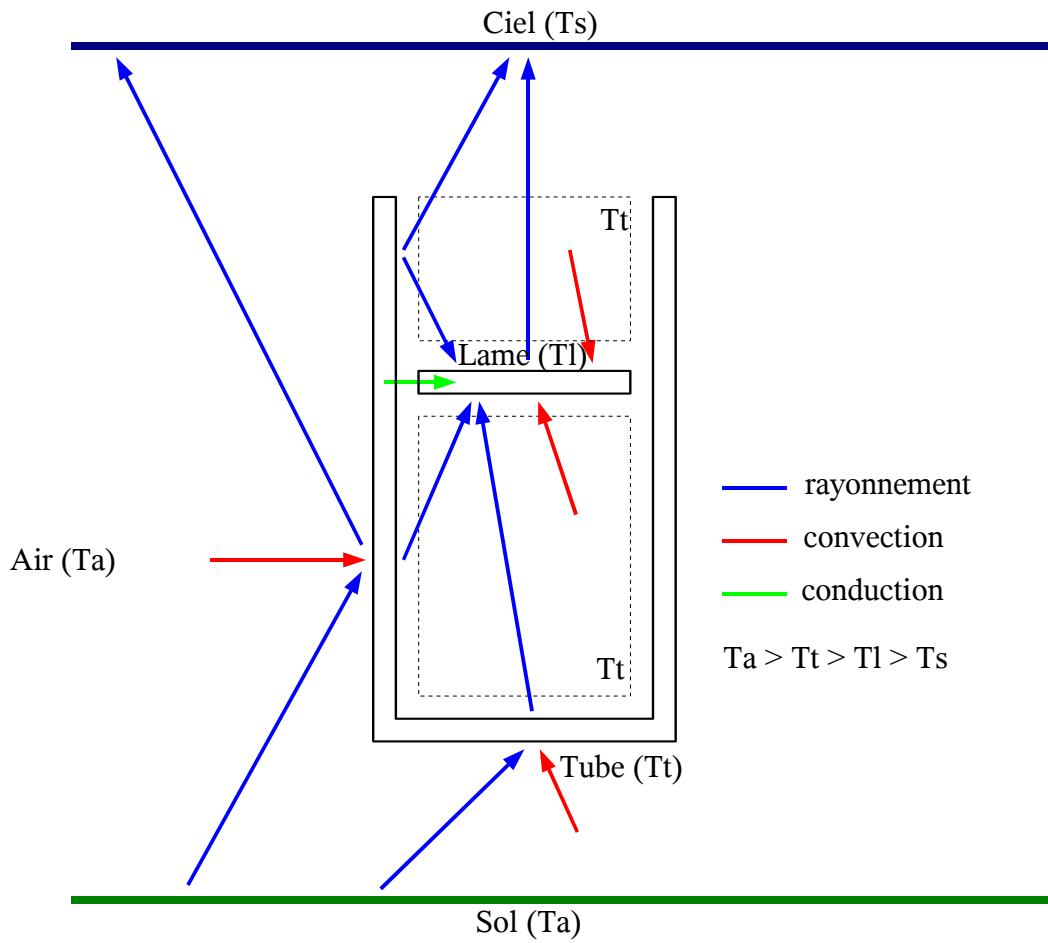
Comme le montrent les figures précédentes la température effective du ciel clair nocturne est approximativement inférieure de 20 degrés à la température de surface. La température effective du ciel n'a rien à voir avec la température du fond cosmologique à 3 K : le rayonnement thermique du ciel provient en effet en grande partie de la réflexion du rayonnement thermique du sol par l'atmosphère (effet de serre). En présence de nuages, la température du ciel devient plus élevée et peut dans des conditions de couverture nuageuse particulièrement dense être inférieure à la température de surface de quelques degrés seulement.

La relation [41] doit être corrigée par un terme additionnel d'une valeur de 15 W lorsque l'atmosphère est dans une configuration d'inversion de température. Elle constitue certainement un minorant pour les surfaces verticales.

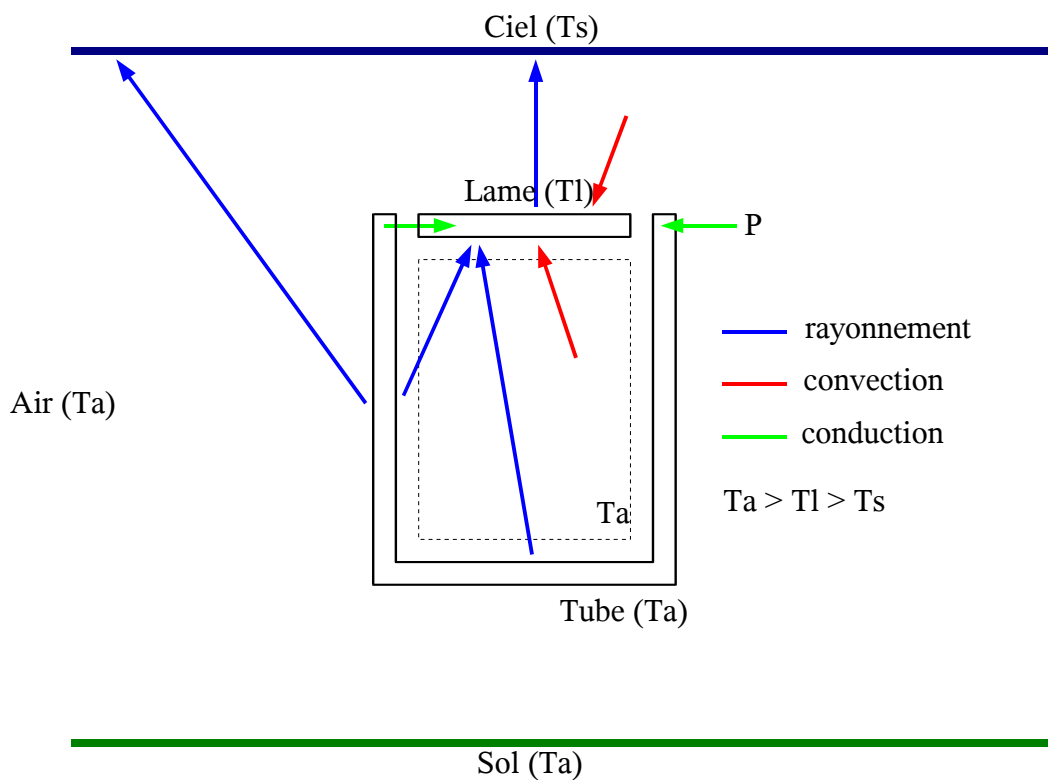
Présentation des modèles



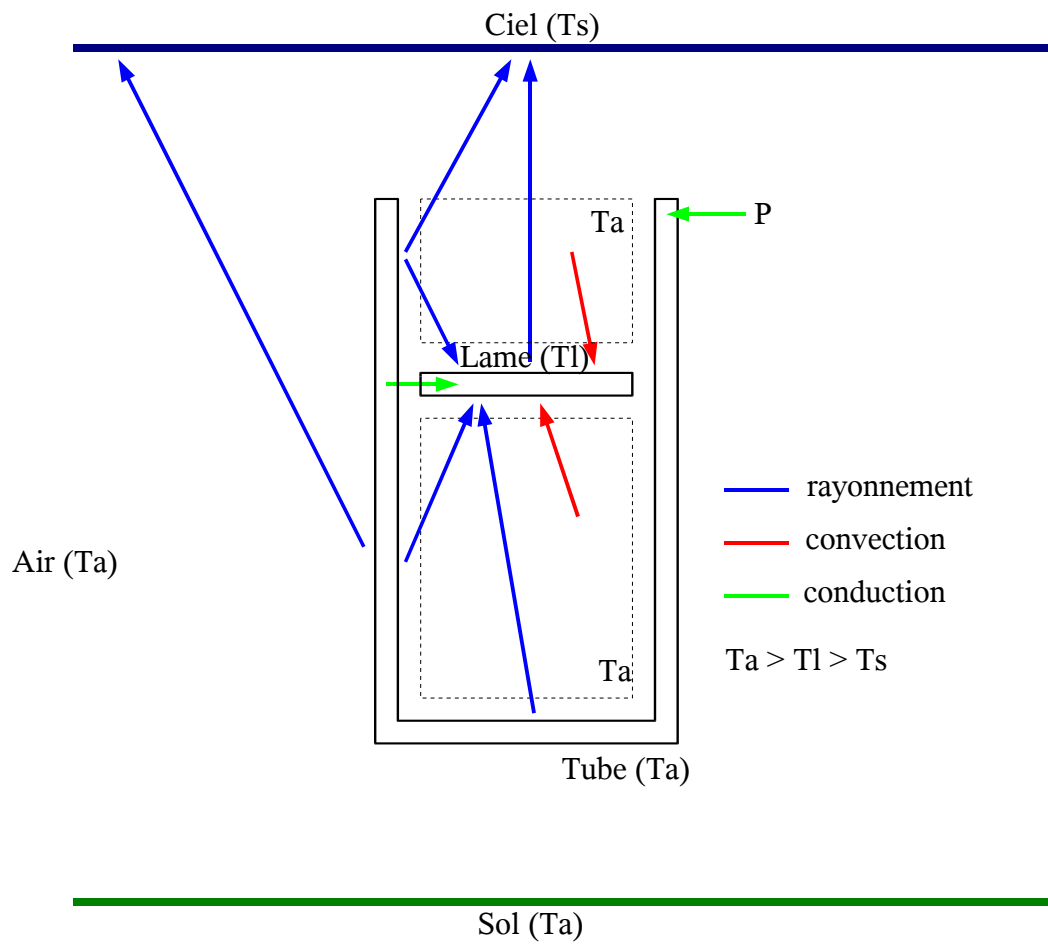
Tube optique sans chauffage et sans pare-buée



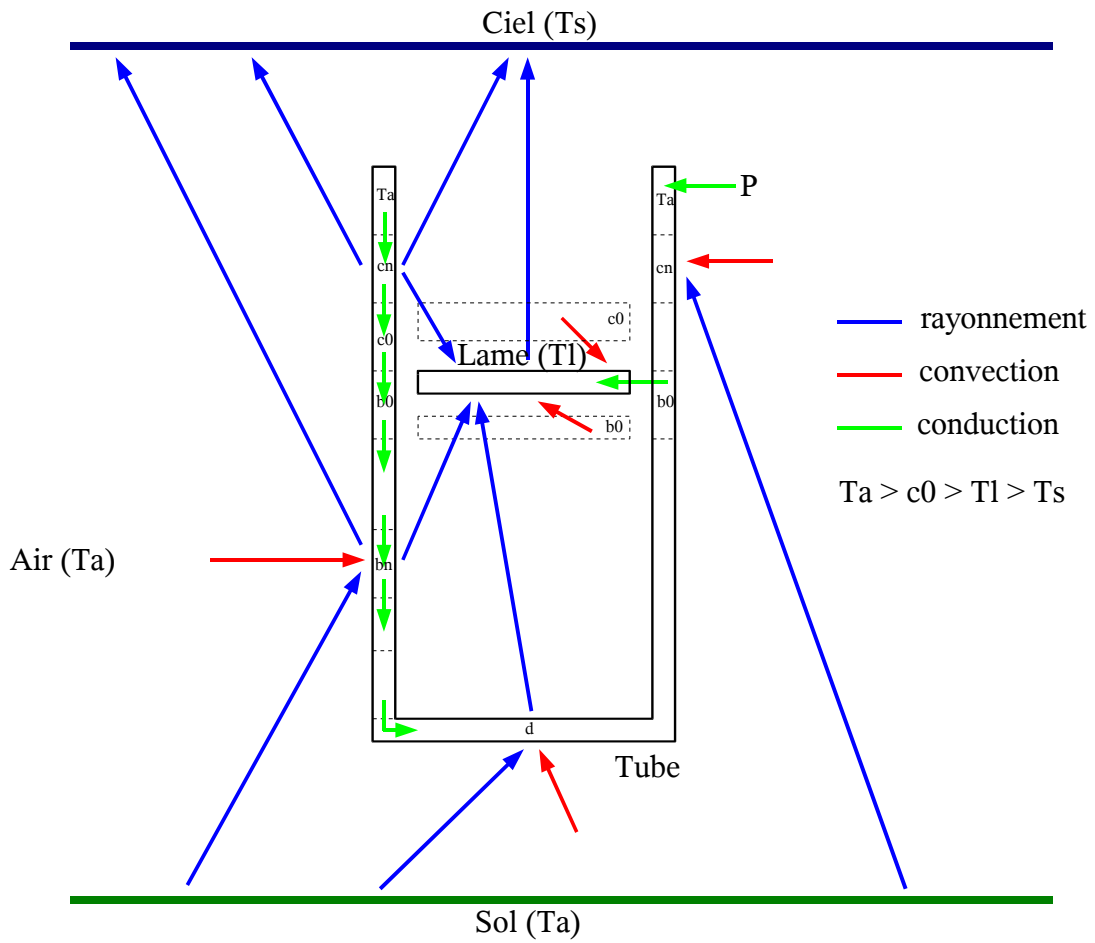
Tube optique sans chauffage et avec pare-buée



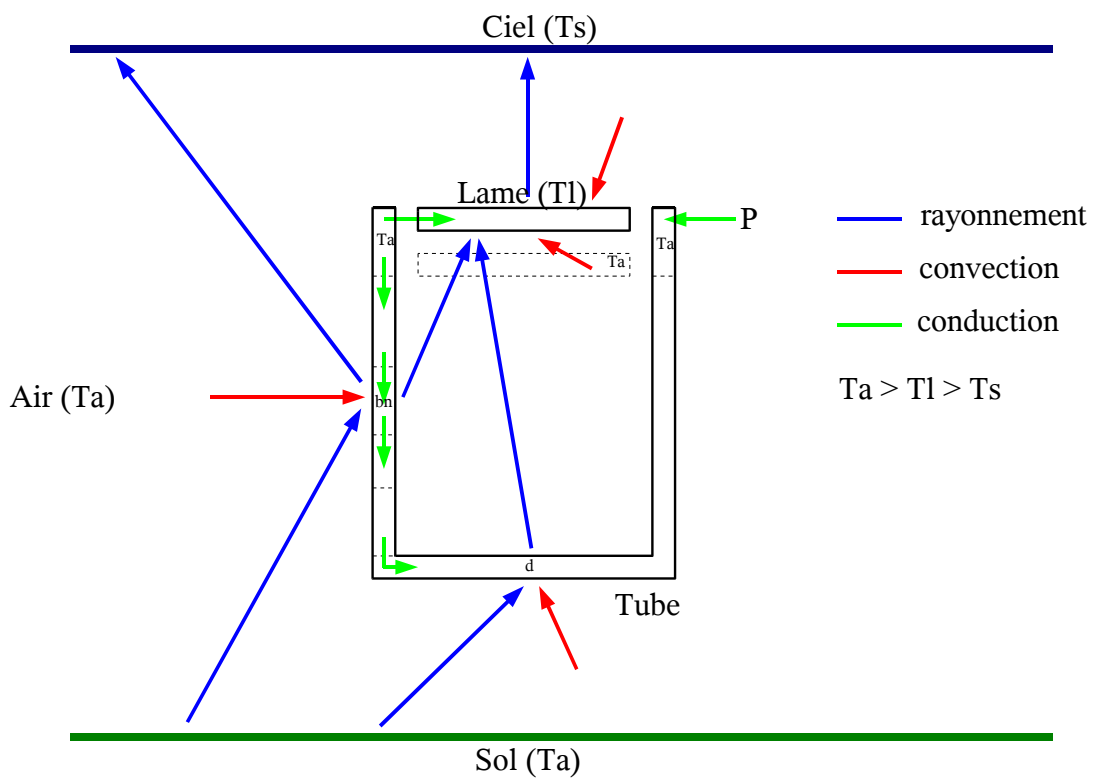
Chauffage uniforme du tube optique sans pare-buée



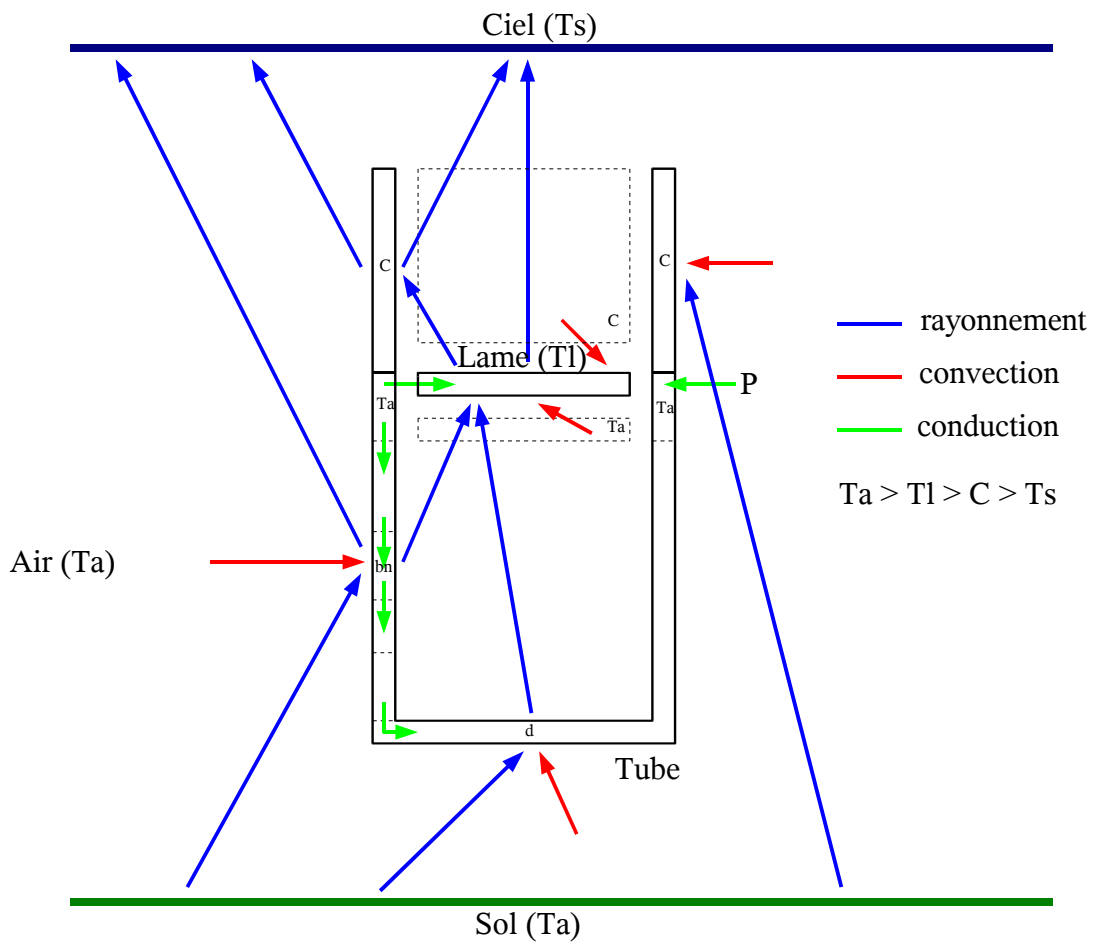
Chauffage uniforme du tube optique et du pare-buée



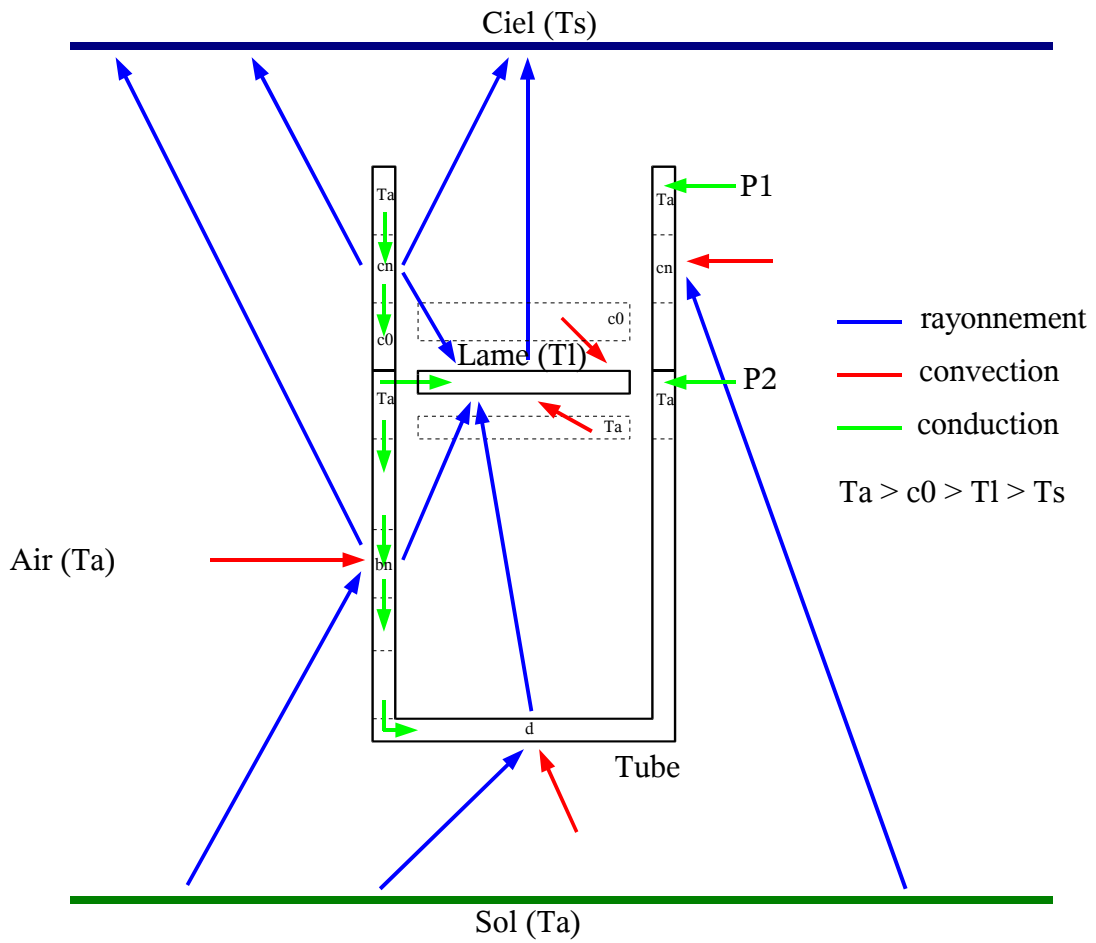
Chauffage localisé du pare-buée



Chauffage localisé du tube optique sans pare-buée



Chauffage localisé du tube optique avec pare-buée



chauffage localisé du tube optique et du pare-buée