

Détermination des paramètres thermiques des cristaux laser

La thermographie, possible avec une caméra thermique IR, offre la possibilité non seulement de mesurer la conductivité thermique mais aussi de quantifier toutes les sources de chaleur, en mettant une valeur sur chaque rendement thermique défini précédemment. Par contre, la mesure de la puissance dioptrique donne une information directe sur la nature même de la lentille thermique, à savoir si elle est divergente ou convergente. Elle permet également de confirmer l'expression trouvée pour la focale de la lentille thermique. Ensuite, l'association des cartographies thermiques et des mesures de la puissance dioptrique permet une estimation du coefficient thermo-optique des cristaux laser étudiés. Il s'agit, à ma connaissance, de la première démonstration de mesure *in situ* du coefficient thermo-optique pour des cristaux laser dopés ytterbium. Dans un premier temps, nous présenterons les résultats obtenus pour les cristaux Yb:CALGO, Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂ ayant tous une épaisseur de 4 mm pour les mesures de la lentille thermique. Ensuite, nous présenterons le calcul des différents rendements thermiques et la vérification des valeurs de conductivité thermique estimées précédemment dans le chapitre 1 grâce aux thermographies pour les cristaux de fluorures. L'association avec la mesure de la lentille thermique nous permettra de calculer les coefficients thermo-optiques pour les fluorures et les comparer avec la littérature. Finalement, une étude des gradients thermiques avec et sans effet laser pour le cristal laser Yb:CALGO nous permettra de faire une comparaison de propriétés thermiques entre les trois cristaux laser.

Encadré 2.7 : Quelques remarques au sujet des fluorures

Les fluorures CaF₂, SrF₂ ainsi que le BaF₂ sont connus pour leur large transmission qui va de l'UV jusqu'à des longueurs d'onde de 11 μm . Cette transparence entre 8-11 μm remet en doute la validité des hypothèses énoncées sur la cartographie thermique de la face d'entrée. Cependant, les cristaux laser étudiés thermiquement sont fortement dopés avec des dopages proches de 3 % en ions ytterbium. Ce fort dopage rend les fluorures fortement absorbants dans la bande de fonctionnement de la caméra thermique IR choisie. En effet, expérimentalement, nous avons mesuré une transmission résiduelle de 5 % pour un cristal Yb:CaF₂ dopé à 2,6 % en ions ytterbium d'épaisseur de 0,5 mm avec une source de chaleur d'environ 200° C. Nous pouvons alors considérer que les cartographies thermiques représentent la face pompée du cristal laser.

2.5.1- Les aberrations thermiques

Pour mesurer les aberrations thermiques, il faut faire une décomposition sur les polynômes de Zernike. Sur la *Figure 2.24*, sont représentées la focale et les aberrations de la lentille thermique mesurées avec effet laser pour les cristaux Yb:SrF₂, Yb:CaF₂ et Yb:CALGO pour une puissance incidente de 47, 83 et 86 W respectivement. Les aberrations pertinentes de la lentille thermique sont les astigmatismes à 0 et 45° et l'aberration sphérique du 3^{ème} ordre.

L'absence d'aberration sphérique du 3^{ème} ordre pour les fluorures signifie que les faisceaux de pompe et de sonde ont la même taille sur le cristal et que le profil de la pompe est « top-hat » (partie 2.4.3.2).

Pour le cristal Yb:SrF₂, les aberrations de la lentille thermique sont négligeables par rapport à la focale de la lentille thermique. La lentille thermique n'est donc pas aberrante et il sera

possible de compenser parfaitement et facilement en jouant sur les distances de la cavité laser.

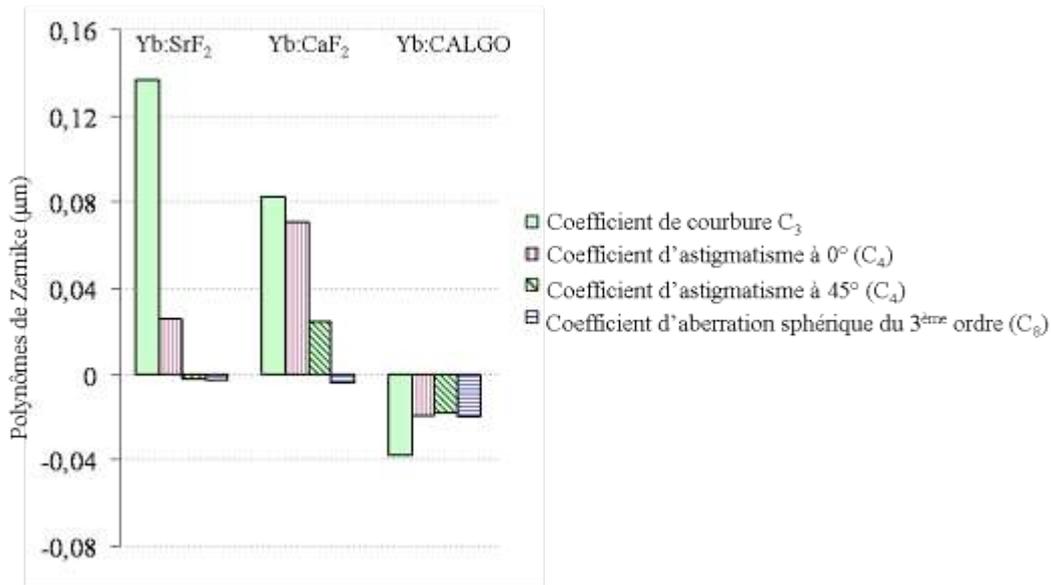


Figure 2.24 : Coefficient de courbure, d'astigmatisme à 0 et 45 ° et d'aberration sphérique mesurés avec effet laser pour les cristaux Yb:SrF₂, Yb:CaF₂ et Yb:CALGO à leur puissance de pompe maximale à savoir 47 W, 83 W et 86 W respectivement

Pour le cristal Yb:CaF₂, contrairement à l'astigmatisme à 45°, l'astigmatisme à 0° est non négligeable. Cet astigmatisme est peut être dû à un refroidissement inhomogène suivant les deux axes ou à l'apparition d'une anisotropie entre les propriétés thermomécaniques et thermo-optiques suivant ces deux axes.

Pour le cristal Yb:CALGO, il est naturel de voir des coefficients d'astigmatisme à 0 et 45° étant donné qu'il s'agit d'un cristal uniaxe et que la sonde n'était pas polarisée.

2.5.2- Détermination de la lentille thermique des cristaux dopés ytterbium

2.5.2.1- Signe des puissances dioptriques mesurées

Les puissances dioptriques en fonction de la puissance incidente sont représentées *Figure 2.25* pour les trois cristaux laser dopés ytterbium choisis. La première différence notable est la mesure de puissances dioptriques positives pour le cristal laser Yb:CALGO et négatives pour les cristaux laser Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂. Cette constatation prouve que la lentille thermique du cristal Yb:CALGO est une lentille convergente et que les cristaux de fluorures se comportent comme des lentilles divergentes lors de forts pompages.

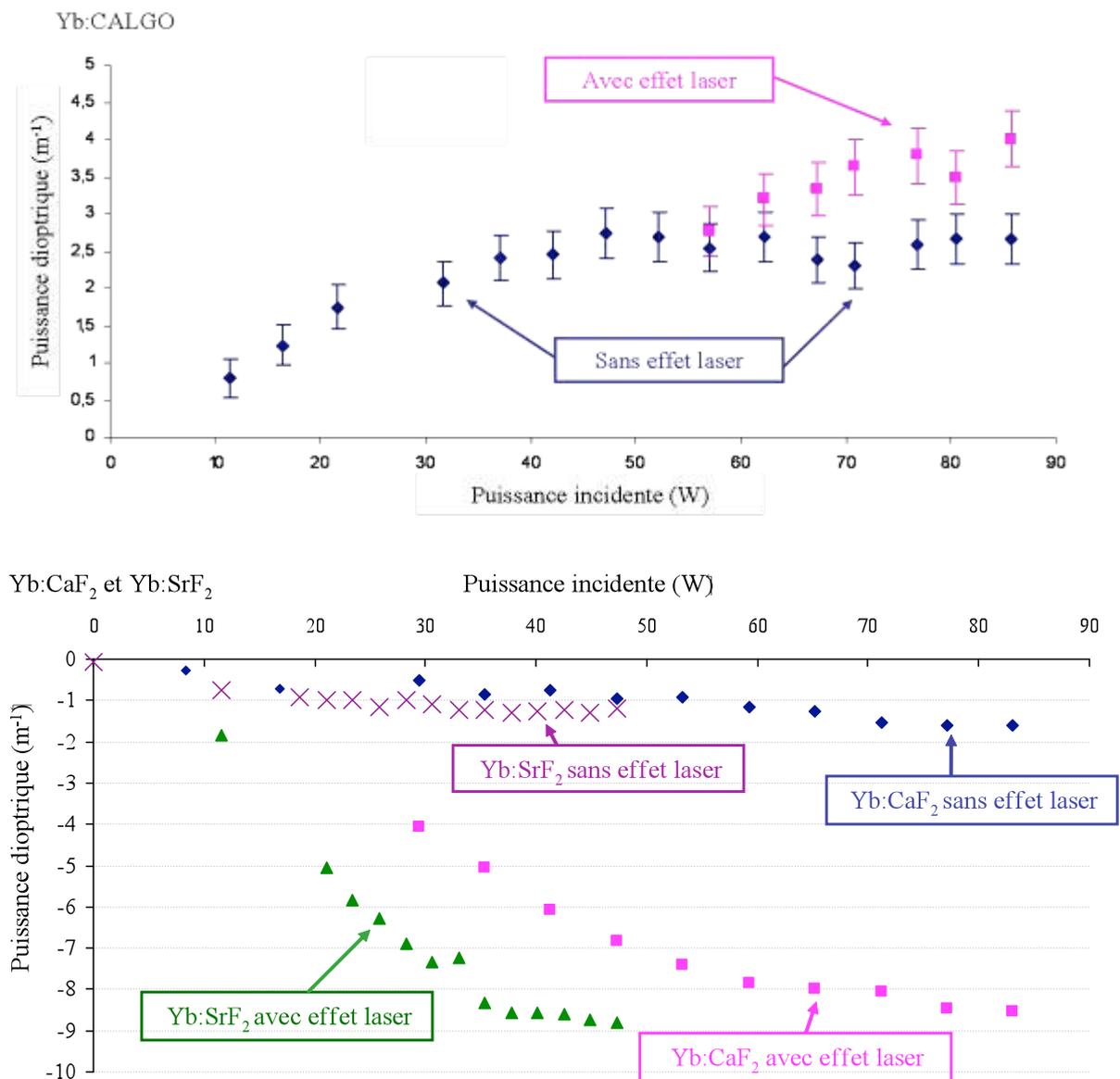


Figure 2.25: Puissances dioptriques en fonction de la puissance incidente pour les cristaux laser Yb:CALGO, Yb:SrF₂ et Yb:CaF₂

1) Analyse des courbes pour les fluorures :

En ce qui concerne les cristaux de fluorures, les effets thermo-optiques semblent négligeables en l'absence d'effet laser due à la saturation d'absorption. Par contre, elles ne le sont plus en présence d'effet laser puisque les puissances dioptriques atteignent des valeurs proches de 10 m^{-1} . Les lentilles thermiques ainsi générées par l'échauffement laser auront pour conséquence de déstabiliser la cavité laser. La prise en compte de la lentille thermique est fondamentale pour une optimisation de la cavité laser pour les cristaux Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂. Une remarque importante est la différence de puissance dioptrique pour une même puissance de pompe incidente suivant la présence ou non de l'effet laser. Cette différence appuie l'importance de la saturation d'absorption dans nos mesures et donc de la différence entre les puissances absorbées avec ou sans effet laser comme le montre la *Figure 2.26*.

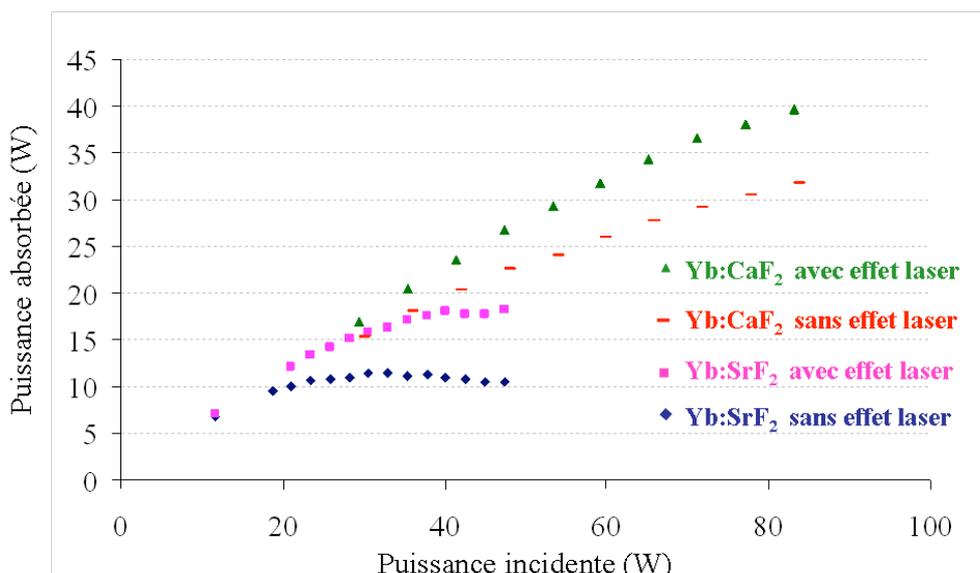


Figure 2.26: Puissances absorbées avec et sans effet laser pour les deux fluorures dopés ytterbium en fonction de la puissance incidente

De plus, un regard rapide sur l'expression de la puissance dioptrique, c'est à dire $D_{th} = (\eta_h \cdot P_{abs} \cdot \chi) / (2 \cdot \pi \cdot w_p^2 \cdot \kappa_c)$, nous permet de constater que le signe de D_{th} dépend du signe du coefficient thermo-optique χ puisque tous les autres coefficients ont obligatoirement des valeurs positives. Or d'après toujours la même équation, nous remarquons que χ est la somme de trois termes : $\chi_{dn/dT}$, $\chi_{contraintes}$ et $\chi_{dilatation}$, termes détaillés tableau 2.1 [Weber 03]. Les valeurs dans ce tableau sont issues de la littérature.

Cristal	Yb:CaF ₂	Yb:SrF ₂
dn/dT (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	-10,6	-12,0
expansion thermique α_T (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	18,9	18,4
le coefficient de Poisson ν	0,28	0,25
C_r	-0,098	-0,125
C_θ	-0,1025	-0,131
χ (dn/dT)	-10,6 10 ⁻⁶ K ⁻¹	-12,0 10 ⁻⁶ K ⁻¹
χ (stress) = $2 \cdot n^3 \cdot \alpha_T \cdot C_{r,\theta}$	-11,1 10 ⁻⁶ K ⁻¹	-14 10 ⁻⁶ K ⁻¹
χ (dilatation) = $(n-1)(1+\nu) \alpha_T$	10,4 10 ⁻⁶ K ⁻¹	10,1 10 ⁻⁶ K ⁻¹
$\chi = \chi$ (dn/dT) + χ (stress) + χ (dilatation)	-11,3 10 ⁻⁶ K ^{-1*}	-15,9 10 ⁻⁶ K ^{-1*}

tableau 2.1: Calcul des différentes composantes pour le coefficient thermo-optique pour les fluorures

2) Analyse des courbes pour le CALGO

Tout d'abord, on remarque que les puissances dioptriques, inférieures à 4.5 m⁻¹ pour le cristal laser Yb:CALGO sont très faibles en présence ou non de l'oscillation laser. On peut en conclure que l'apparition de la lentille thermique n'aura donc quasiment pas d'influence sur la stabilité de la cavité laser.

Ensuite, à cause de trop d'inconnues sur le cristal de CALGO, nous sommes dans l'incapacité de calculer la valeur du coefficient thermo-optique. Cependant, grâce au raisonnement précédent, nous pouvons affirmer que le CALGO a un coefficient thermo-optique positif.

De manière analogue aux fluorures, la différence de puissance dioptrique en l'absence ou non d'effet laser pour une même puissance incidente est due à la présence d'une saturation d'absorption comme le prouve la *Figure 2.27*.

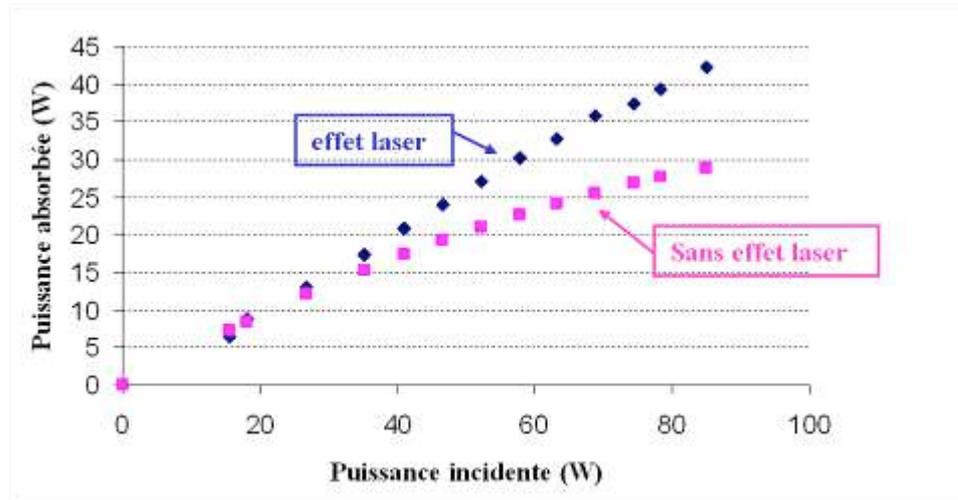


Figure 2.27: Puissance absorbée en fonction de la puissance incidente pour le cristal Yb:CALGO

3) Résumé des résultats expérimentaux

Le tableau 2.2 résume les différentes focales obtenues pour les différents cristaux laser étudiés à puissance incidente maximale en présence de l'effet laser. Les puissances absorbées sont également rappelées dans ce tableau.

Cristal	Yb:CaF ₂	Yb:SrF ₂	Yb:CALGO
$P_{\text{incidente}}$	83 W	47 W	86 W
$P_{\text{absorbée}}$	40 W	18 W	42 W
w_p	220 μm	220 μm	220 μm
f_{th}	-119 mm	-113 mm	+250 mm

tableau 2.2: Les différentes focales obtenues pour les cristaux de Yb:CaF₂, Yb:SrF₂ et Yb:CALGO à puissance maximale de pompe

2.5.2.2- Cavités laser de fortes puissances

L'apparition d'une lentille thermique dans la cavité laser peut la déstabiliser et/ou changer le mode du faisceau laser. Il apparaît évident maintenant que la prise en compte de la focale de la lentille thermique permet une optimisation de l'architecture de la cavité laser et de s'assurer un faisceau monomode en sortie de l'oscillateur laser. Grâce à ces mesures de focales, nous avons pu dans des conditions similaires, à savoir puissances absorbées et intracavités, optimiser les cavités laser en régime continu pour les trois cristaux dopés ytterbium étudiés. Intéressons-nous à ces différentes cavités laser et aux performances obtenues.

1) cavité laser optimisée de forte puissance pour le Yb:SrF₂ et Yb:CaF₂

Les cristaux laser dopés ytterbium Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂, non traités antireflet, sont pompés avec le même banc de pompe que celui utilisé pour les expériences du banc thermique. Le faisceau de pompe est imagé sur la face entrée du cristal laser grâce à un système de doublets d'une focale de 60 mm chacun. Le montage expérimental est représenté *Figure 2.28 (a)*.

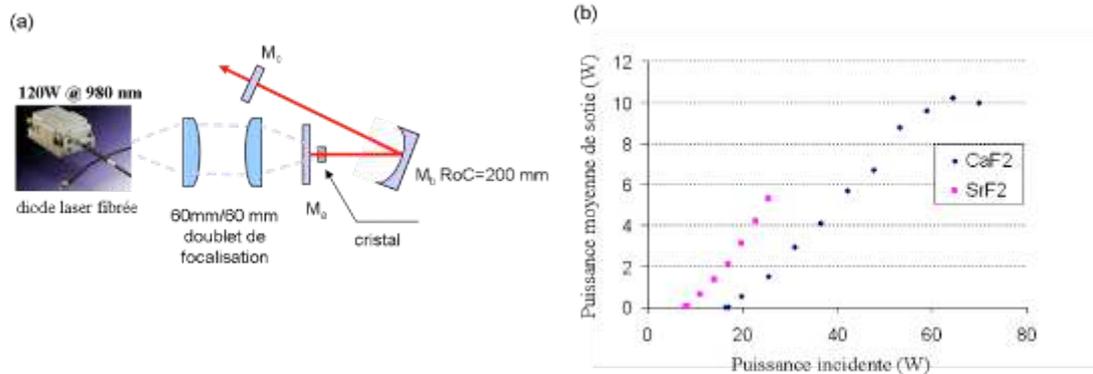


Figure 2.28: Cavité laser (a) et puissance moyenne de sortie en fonction de la puissance incidente pour les cristaux de fluorures (b)

L'oscillateur laser est composé de trois miroirs. Le premier miroir est un miroir dichroïque, réfléchissant à la longueur d'onde laser et transparent à la longueur d'onde de pompe (M_a). Ensuite, le miroir qui vient focaliser le faisceau laser dans le cristal est un miroir concave avec un rayon de courbure de 200 mm (M_b). Finalement, le miroir de fond de cavité (M_c) est un miroir plan avec une transmission de 10 % pour le cristal Yb:SrF₂ et 15 % pour le cristal Yb:CaF₂. Les cristaux laser sont considérés comme des lentilles divergentes ayant une focale de -113 mm pour le cristal Yb:SrF₂ et de -119 mm pour le cristal Yb:CaF₂ pour les puissances de pompe maximales. Les distances optimales entre les différents éléments optiques ont été estimées par un logiciel basé sur la loi des matrices ABCD. Les puissances de sortie en fonction de la puissance incidente sont tracées sur la *Figure 2.28 (b)*.

Avec le cristal Yb:SrF₂, une puissance moyenne de 5,8 W a été obtenue pour une puissance incidente de pompe de 26 W, correspondant à une puissance absorbée de 20 W (*Figure 2.28 (b)*). La puissance de sortie en fonction de la puissance de la diode laser²² (ou « slope efficiency » en anglais) est de 22,7 %. L'efficacité optique-optique²³ (ou « optical-optical efficiency » en anglais) est de 22,3 %. La puissance incidente de pompe a été volontairement limitée à 26 W pour éviter la fracture du cristal due à une température trop élevée (voir partie suivante).

Avec le cristal Yb:CaF₂, une puissance moyenne de sortie de 10,2 W a été obtenue pour 64 W de puissance de pompe incidente correspondant à une puissance absorbée de 39 W et une puissance intracavité d'environ 68 W. La puissance moyenne en fonction de la puissance émise par la diode laser est de 21,6 % et l'efficacité optique-optique est de 16 %. La chute de la puissance incidente pour de fortes puissances de pompe est due au fait que nous sommes proches de la fracture du cristal laser. Le faisceau laser a été caractérisé en sortie de l'oscillateur. Les facteurs M² sont approximativement égaux à 1,16 et 1,20 suivant les axes *x* et *y* respectivement, donc proches de la limite de diffraction (*Figure 2.29*) pour une puissance incidente de 64 W. Le faisceau laser est quasiment en limite de diffraction car seule la lentille thermique a été compensée grâce à la géométrie de la cavité laser et pas les autres aberrations. D'autres optiques doivent être introduites pour compenser ces aberrations mais introduisant davantage de pertes dans la cavité laser. A notre connaissance, c'est la plus forte puissance

²² Il s'agit tout simple de la pente *c* de la courbe $P_{laser} = c \cdot P_{incident} + d = f(P_{incident})$

²³ Il s'agit du rapport $(P_{laser}) / (P_{incident})$

moyenne de sortie jamais obtenue avec une cavité laser à base de cristaux Yb:CaF₂ pompés par diode laser en régime continu.

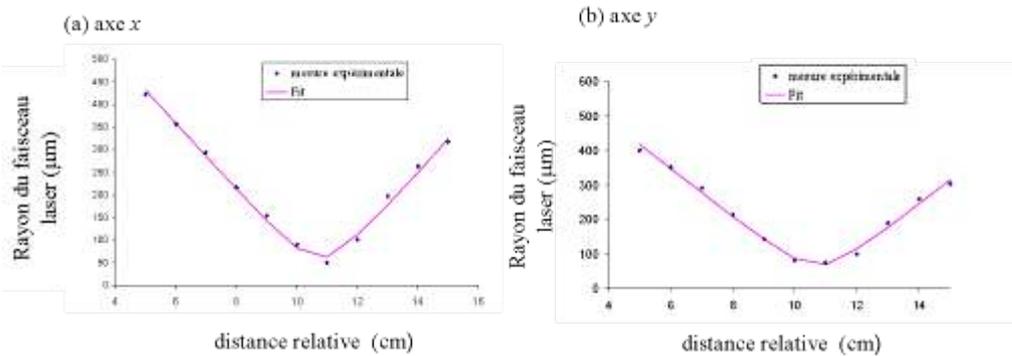


Figure 2.29: Mesures des facteurs M^2 suivant les axes x (a) et y (b) pour le cristal Yb:CaF₂ à une puissance incidente de 64 W

Si les lentilles thermiques n'avaient pas été prises en compte dans l'architecture des cavités laser, les deux cavités auraient produits des faisceaux multimodes (simulations faites sous le logiciel LASCAD où nous avons la possibilité de calculer les rayons du faisceau laser sur chaque optique de la cavité laser ainsi créée par les lois des matrices ABCD). Les rayons de pompe et du faisceau laser ne sont pas similaires et ne permettent pas alors d'obtenir un laser monomode.

De manière générale, nous remarquons que la prise en compte des focales de lentille thermique nous permet d'améliorer les performances en régime continu pour les cristaux de fluorures. Ceci permet de corroborer nos résultats et nous confortent dans nos mesures de lentille thermique.

2) cavité laser optimisée de forte puissance pour le Yb:CALGO

Contrairement aux cristaux de fluorures, l'apparition de la lentille thermique n'a pas beaucoup d'influence sur la stabilité de la cavité laser de part sa faible convergence. La cavité laser et le banc de pompe de la cavité laser à base d'un cristal Yb:CALGO sont exactement les mêmes que ceux développés pour les cristaux de fluorures mais avec un coupleur de sortie ayant une transmission de 5 %. Cependant, une différence notable est à souligner. Le cristal Yb:CALGO a un traitement antireflet sur ses faces, évitant ainsi l'introduction supplémentaire de pertes dans la cavité laser.

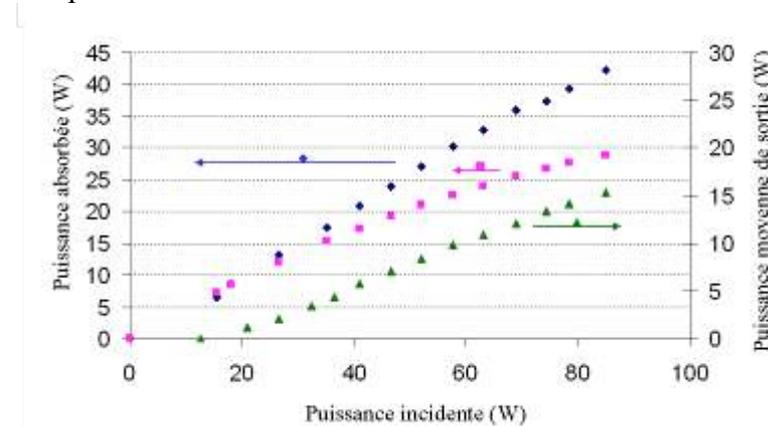


Figure 2.30 : Mesures des puissances absorbées avec (losanges) et sans (carré) effet laser et de la puissance moyenne de sortie (triangles) en fonction de la puissance incidente

Une puissance de sortie de 15,3 W (*Figure 2.30* formes triangulaires) a été obtenue pour une puissance incidente de 92 W, correspondant à une puissance absorbée de 42 W (*Figure 2.30* formes losanges). La puissance moyenne en fonction de la puissance de la diode laser est de 22,9 % et l'efficacité optique-optique est de 17 %. C'est également la plus forte puissance moyenne jamais obtenue pour un cristal Yb:CALGO en régime continu.

Le faisceau laser a également été caractérisé en sortie du résonateur. Les facteurs M^2 ont été mesurés égaux à 1,29 et 1,14 suivant les axes x et y respectivement (*Figure 2.31*).

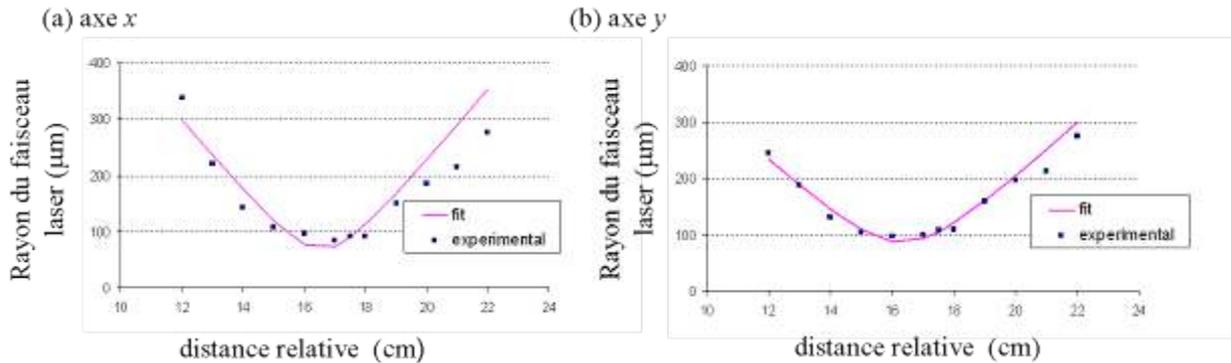


Figure 2.31: Mesures des facteurs M^2 suivant les axes x et y respectivement pour le cristal de Yb:CALGO

2.5.3- Etude thermique des fluorures

Le but de cette partie sera, dans un premier temps, de déterminer tous les rendements thermiques définis précédemment : $\eta_{h_sanslaser}$, η_{h_laser} , η_r et η_l . Nous allons au départ utiliser l'équation (1.2) de la conductivité thermique pour montrer que le rendement quantique de fluorescence est proche de l'unité pour les deux fluorures. Ensuite nous utiliserons ces résultats pour en déduire des valeurs expérimentales de la conductivité thermique et des coefficients thermo-optiques, en vérifiant en parallèle la validité de l'expression analytique pour la lentille thermique.

L'objectif de cette étude thermique est de mesurer les conductivités thermiques et les coefficients thermo-optiques des cristaux fluorures pour les comparer entre eux mais également comparer ces valeurs aux valeurs données dans la littérature, pour des cristaux non dopés. De plus ces mesures permettront d'écrire une expression générale de la focale de la lentille thermique grâce seulement à des données expérimentales pour ces deux cristaux.

2.5.3.1- Le calcul de la fraction thermique avec et sans effet laser

Tout d'abord, une méthode de calcul du rendement quantique de fluorescence à partir de la cartographie thermique sans effet laser sera proposée. Ensuite, le rendement d'extraction laser sera estimé. Finalement, en ayant toutes les données, nous pouvons calculer la fraction thermique avec effet laser, résultat confirmé par la cartographie thermique en présence d'effet laser. On considèrera un rendement quantique d'absorption égal à l'unité, hypothèse qui sera validée par la suite.

1) Le calcul des coefficients d'absorption non saturée

Les coefficients d'absorption non saturée ont une grande importance dans nos calculs de $dP(z)/dz$ (voir annexe B) pour estimer certains rendements thermiques par la suite. Le montage expérimental pour les déterminer est décrit *Figure 2.32*.

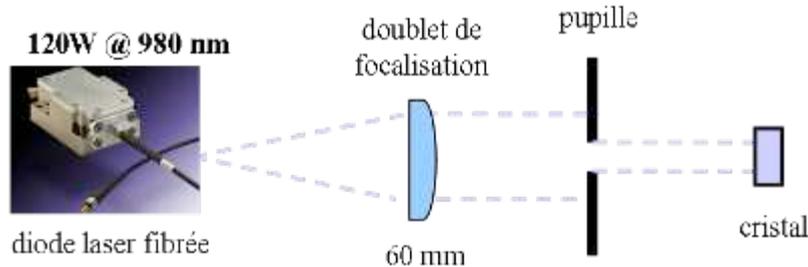


Figure 2.32: Montage expérimental du calcul du coefficient d'absorption non saturée

Un diaphragme est placé dans le faisceau de pompe collimaté pour réduire de manière significative la puissance de pompe. De cette manière, aucune saturation de l'absorption n'est observée dans le cristal car le diamètre du faisceau est de quelques millimètres et la puissance maximale est de quelques milliwatts. Les mesures de α_{NS} sont de $340 \pm 8,5$ et $420 \pm 10,5 \text{ m}^{-1}$ pour les cristaux laser de Yb:CaF₂ et de Yb:SrF₂ respectivement.

2) Calcul de la fraction thermique sans effet laser

En présentant le principe de la thermographie, nous avons montré que la distribution de chaleur inhomogène pouvait s'exprimer en $\Delta T = (\eta_h \cdot (dP(z)/dz)) / (4 \cdot \pi \cdot \kappa_c) \cdot f(r, z)$ où la différence de température $\Delta T = T(r = 0, z) - T(r, z)$ est reliée à une fonction géométrique $f(r, z)$. Pour rappel, le $dP(z)/dz$ correspond au $dP(z)/dz$ en $z = 0$ puisque la cartographie thermique a été mesurée sur la face d'entrée du cristal. Connaissant les valeurs de la conductivité thermique κ_c , le rayon du faisceau de pompe w_p , il est alors possible grâce au profil horizontal théorique de la distribution de chaleur d'estimer la valeur de la fraction thermique sans effet laser $\eta_{h, \text{sans laser}}$. Dans le chapitre 1, les valeurs de la conductivité thermique ont été estimées à 6 et 3,3 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour les cristaux Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂ respectivement [Gaumé 03] (voir encadré 2.8). Les profils expérimentaux (points bleus) et les courbes théoriques en ajustant la valeur de $\eta_{h, \text{sans laser}}$ (ligne rouge) sont représentés sur la *Figure 2.33* pour les deux fluorures.

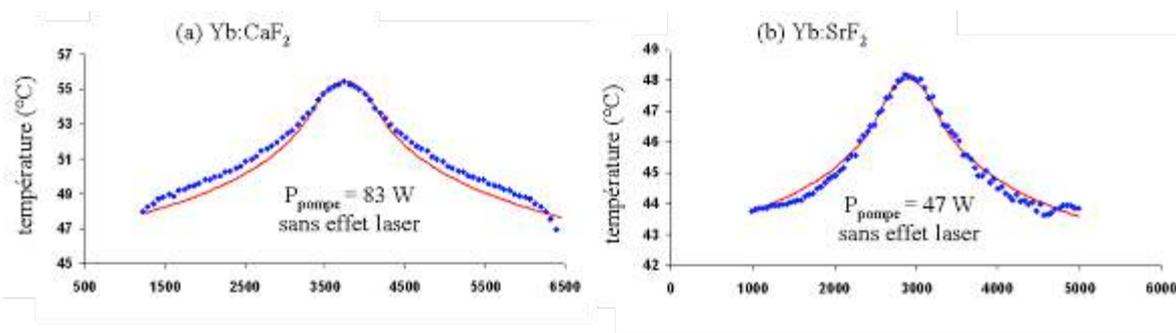


Figure 2.33: Profils de température expérimentaux et théoriques pour (a) le cristal Yb:CaF₂, (b) le cristal Yb:SrF₂

Encadré 2.8 : L'estimation de la conductivité thermique dans les courbes théoriques

Bien que les valeurs de κ_c ne soient qu'estimées d'après le modèle de R. Gaumé [Gaumé 03], il existe une petite marge d'ajustement autour de ces valeurs comme le montre la *Figure 2.34*. La validité des courbes d'approximation des profils expérimentaux de la distribution de chaleur est valide dans cette marge d'ajustement. D'ailleurs, ces valeurs seront validées à posteriori.

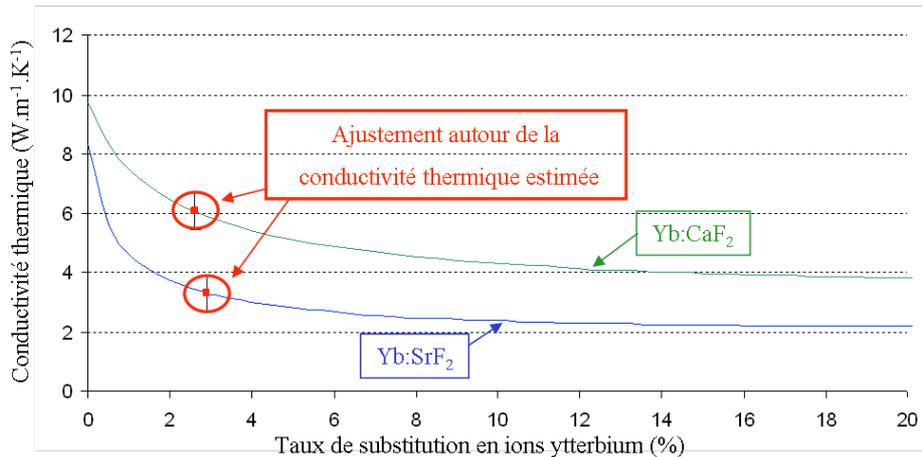


Figure 2.34 : Ajustement autour de κ_c pour les fluorures

Les résultats et le calcul de $dP(z)/dz$ sont résumés dans le tableau 2.3. Cette quantification permet d'affirmer que 3,5 % et 1,4 % de la puissance absorbée est transformée en chaleur pour les cristaux laser Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂ respectivement.

Cristal	Yb:CaF₂	Yb:SrF₂
$P_{incidente}$	83 W	47 W
$P_{absorbée}$	32 W	10 W
$dP(z)/dz (W.m^{-1})$	3669	3110
ΔT	13 °C	6°C
κ_c	6 $W.m^{-1}.K^{-1}$	3,3 $W.m^{-1}.K^{-1}$
w_p	220 μm	220 μm
$\eta_{h_sanslaser}$	0,035	0,014

tableau 2.3 : Caractéristiques et calculs obtenus pour la fraction thermique en l'absence d'effet laser pour les deux cristaux étudiés

La différence entre les deux valeurs de la fraction thermique sans effet laser est due naturellement à la différence de la longueur d'onde de fluorescence moyenne entre les deux cristaux. Il est donc normal d'obtenir une plus faible valeur pour Yb:SrF₂ étant donné que sa longueur d'onde de fluorescence moyenne est de 989 nm comparée au 1008 nm pour Yb:CaF₂.

3) Calcul du rendement quantique de fluorescence

La fraction thermique sans effet laser est reliée directement au rendement quantique de fluorescence par l'équation (2.6). Les longueurs de fluorescence étant de 1008 nm pour le cristal Yb:CaF₂ et de 989 nm pour le cristal Yb:SrF₂, les rendements quantiques de

fluorescence valent respectivement 0,993 et 0,995. Un rendement quantique de fluorescence proche de l'unité permet d'affirmer que la cristallogénèse des fluorures étudiés est parfaitement maîtrisée. Ceci revient à dire que les cristaux sont de très bonne qualité et présentent en conséquence très peu d'impuretés et/ou de lacunes et/ou de dislocations. On valide alors que le rendement quantique d'absorption est lui aussi proche de l'unité.

Les rendements quantiques de fluorescence de ces cristaux sont proches de l'unité, ce qui constitue une information très intéressante. En effet, ces valeurs proches de 1 signifient que l'immense majorité des ions excités contribueront à l'émission spontanée. Les ions excités dissiperont alors une grande quantité de leur énergie sous forme radiative. Donc en l'absence d'effet laser, la source de chaleur est proche du défaut quantique de fluorescence, défini équation (2.4). Cette source de chaleur sera la plus forte quantité de chaleur qui peut se produire dans un cristal laser pompé en l'absence d'effet laser. Ces résultats sont corroborés par les faibles puissances dioptriques obtenues sans effet laser.

4) Calcul du rendement d'extraction laser

On reprend l'équation (2.11)²⁴ où P_{int} correspond à la puissance intracavité, égale à 57 et 60 W pour le cristal Yb:CaF₂ et le cristal Yb:SrF₂ respectivement. Les puissances intracavités ont été calculées pour les cavités laser obtenues à des puissances incidentes de pompe de 83 W et 47W pour les cristaux Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂ respectivement [Boudeile 08].

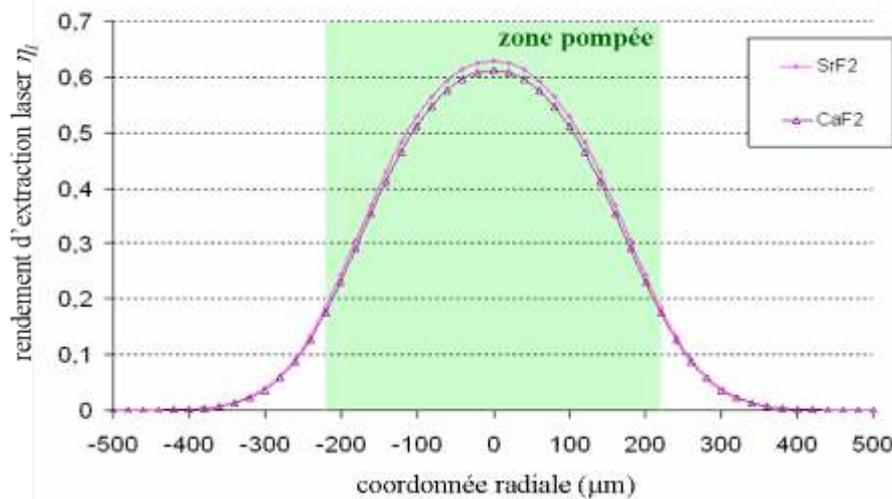


Figure 2.35: Evolution du rendement d'extraction laser en fonction de la coordonnée radiale pour les cristaux de Yb:CaF₂ et de Yb:SrF₂

Le profil radial de l'extraction laser a été tracé sur la *Figure 2.35* pour la puissance intracavité maximale mesurée pour chaque cristal de fluorure. On constate de suite que les rendements d'extraction laser ont des valeurs nettement inférieures à 1. Les faibles puissances intracavité, inférieures à la centaine de W pour les deux cristaux de fluorures, sont responsables de ces faibles valeurs de η_l . Ces « faibles » puissances intracavité sont provoquées par des pertes intracavité trop importantes. Ces pertes sont dues à la présence de la lame de ZnSe dans la

²⁴ Pour rappel, l'expression du rendement d'extraction laser vaut
$$\eta_l(r) = \frac{\sigma_{em}(\lambda_l)I(r)}{\sigma_{em}(\lambda_l)I(r) + \frac{1}{\eta_r \cdot \tau}}$$

cavité laser, et à l'absence de traitement antireflet sur les cristaux de fluorures. Pour calculer η_l , on prend alors la valeur moyenne pondérée par le profil de l'intensité de pompe (qui est dans notre configuration « top-hat » à cause de la fibre multimode de la diode laser) du rendement de l'extraction laser sur la zone pompée, c'est-à-dire la valeur moyenne de η_l entre $r = -w_p$ et $r = w_p$. Les valeurs de η_l valent 0,45 et 0,46 pour les cristaux Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂ respectivement.

5) *Calcul de la fraction thermique en présence d'effet laser η_{h_laser} :*

Etant donné que précédemment nous avons calculé les rendements quantique de fluorescence et d'extraction laser et en connaissant les longueurs d'onde de pompe, laser et de fluorescence moyenne, nous pouvons aisément grâce à l'équation (2.7)²⁵ calculer les valeurs de la fraction thermique η_{h_laser} . Les résultats sont regroupés dans le tableau 2.4.

Une fraction thermique en présence d'effet laser de 0,05 pour le cristal Yb:CaF₂ indique que 5 % de la puissance absorbée est transformée en chaleur, et donc 3,9 % de la puissance absorbée pour le cristal Yb:SrF₂.

Cristal	Yb:CaF ₂	Yb:SrF ₂
η_p	1	1
η_r	0,993	0,995
η_l	0,45	0,46
λ_p	980 nm	980 nm
λ_l	1053 nm	1051 nm
λ_f	1008 nm	989 nm
η_{h_laser}	0,050	0,039

tableau 2.4: Résultats obtenus pour la fraction thermique en présence d'effet laser

On remarque que la fraction thermique passe de 3,5 % (tableau 2.3) en l'absence d'effet laser à 5 % (tableau 2.4) en présence d'effet laser pour le cristal Yb:CaF₂ pour une différence de 10 W de puissance absorbée entre les deux régimes et de 1,4 % (tableau 2.3) à 3,9 % (tableau 2.4) pour une différence de 8 W pour le cristal Yb:SrF₂.

6) *Autre méthode pour le calcul de la fraction thermique avec effet laser*

Pour corroborer nos résultats, il est également possible de calculer la valeur de la fraction thermique en présence d'effet laser en utilisant la même technique que celle choisie pour mesurer la fraction thermique sans effet laser²⁶. Les fractions thermiques en présence de l'effet laser valent 0,055 et 0,042 pour Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂ respectivement (tableau 2.5). Ces résultats sont en bon accord avec les résultats trouvés précédemment (tableau 2.4). Les profils de la température pour les deux cristaux de fluorures (points bleus) et les courbes théoriques (lignes rouges) en présence d'effet laser sont représentés pour les cristaux Yb:CAF₂ et Yb:SrF₂ sur la Figure 2.36.

²⁵ L'équation (2.7) relie η_{h_laser} avec $\eta_{h_sanslaser}$ de la manière suivante : $\eta_{h_laser} = \eta_{h_sanslaser} + \eta_p \cdot \eta_l \cdot \left[\eta_r \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_f} - \frac{\lambda_p}{\lambda_l} \right]$

²⁶ Pour rappel, l'ajustement des courbes théoriques de la distribution de chaleur sur les courbes expérimentales issues de la cartographie sans effet laser a permis de trouver la valeur de la fraction thermique sans effet laser, tous les autres paramètres étant déterminés.

Cristal	Yb:CaF ₂	Yb:SrF ₂
$P_{incidente}$	83 W	47 W
$P_{absorbée}$	40 W	18 W
$dP(z)/dz$	8131	5194
ΔT	34 °C	26 °C
κ_c	6 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	3,3 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
w_p	220 μm	220 μm
η_{h_laser}	0,055	0,042

tableau 2.5: Résultats obtenus pour la fraction thermique en présence d'effet laser grâce à la thermographie

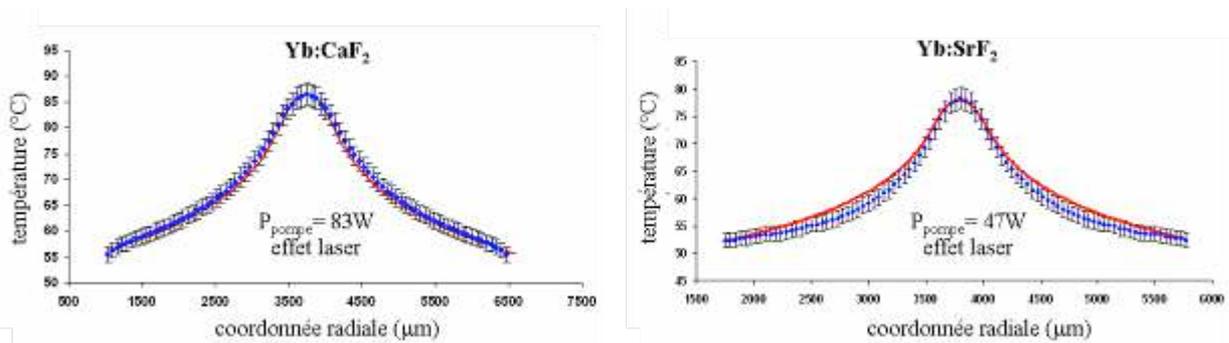


Figure 2.36: les profils de température (points bleus) et leurs courbes théoriques (lignes rouges) pour les cristaux (a) Yb:CaF₂ et (b) Yb:SrF₂

6) Conclusions

En conclusion, en l'absence d'effet laser, l'apparition de la chaleur dans le cristal laser est très faible parce que la chaleur provient du défaut quantique de fluorescence (entre les longueurs d'onde de fluorescence moyenne et de pompe). En présence d'effet laser, on remarque que les fractions thermiques augmentent de près de 2 % et 3 % pour les cristaux Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂ respectivement. Les fractions thermiques sont plus élevées en présence qu'en l'absence d'effet laser. En effet, une moitié des photons participent à l'émission d'un photon laser et l'autre moitié à l'émission d'un photon de fluorescence. Dans cette configuration, l'émission laser induit plus de chaleur que l'émission spontanée car les longueurs d'onde laser sont supérieures aux longueurs d'onde de fluorescence. Il est donc normal de trouver des valeurs de fraction thermique avec effet laser supérieures à celles sans effet laser. Toutes ces raisons, mais surtout en rajoutant la saturation d'absorption de la pompe en l'absence d'effet laser, peuvent expliquer les différences de résultats obtenus pour la puissance dioptrique des lentilles thermiques avec et sans effet laser. En effet, pour une puissance incidente de 83 W et 47 W pour les cristaux Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂, une différence de 8 W entre les puissances absorbées avec et sans effet laser a été mesurée pour les deux fluorures.

2.5.3.2- Détermination expérimentale de la conductivité thermique

Durant sa thèse, Julien Didierjean a développé une nouvelle méthode de mesure de la conductivité thermique via les cartographies thermiques en présence d'effet laser [Didierjean 07]. Cette technique sera utilisée pour conforter les valeurs de conductivités thermiques admises (et utilisées précédemment) pour les cristaux de fluorures.

Nous remarquons rapidement que, grâce à l'équation (2.27), nous pouvons exprimer facilement la conductivité thermique en fonction de $f(r,z)$

$$\kappa_c = -\frac{1}{T(r,z) - T(r_0,z)} \cdot \frac{\eta_h}{4\pi} \cdot \frac{dP(z)}{dz} \cdot f(r,z) \quad (2.35)$$

où pour rappel $f(r,z)$ est la fonction géométrique décrivant le modèle théorique de la distribution de chaleur dans le cristal, détaillé partie 2.4.1.4.

En ayant toutes les données nécessaires, il est possible de déterminer la valeur de la conductivité thermique en ajustant les profils expérimentaux de la distribution de la chaleur aux courbes théoriques (Figure 2.37). Les paramètres et les valeurs des conductivités thermiques utilisés pour les ajustements sont réunis dans le tableau 2.6.

Cristal	Yb:CaF ₂	Yb:SrF ₂
λ_p	980 nm	980 nm
λ_t	1053 nm	1051 nm
λ_f	1008 nm	989 nm
$\eta_{h, laser}$	0,050	0,039
$dP(z)/dz$	8131	5194
κ_c	5,4 ± 1 W.m⁻¹.K⁻¹	3,1 ± 0,6 W.m⁻¹.K⁻¹

tableau 2.6: Tableau résumant les résultats obtenus pour les calculs de conductivités thermiques

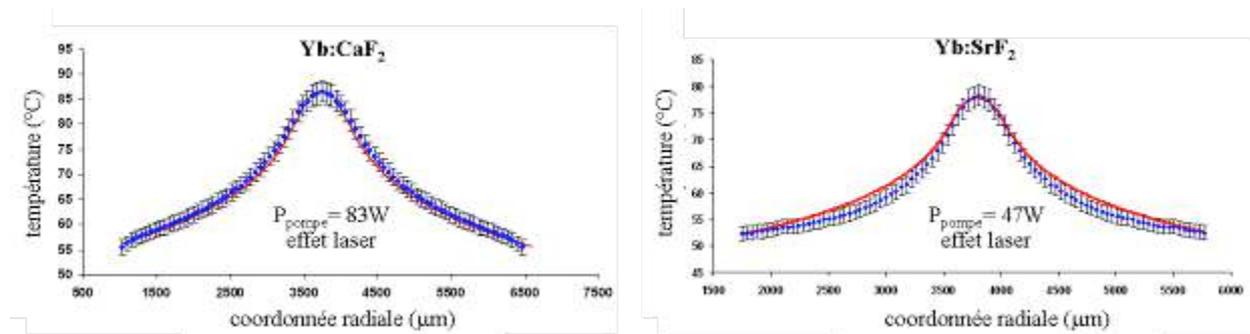


Figure 2.37: Profils thermiques expérimentaux (points bleus) et théoriques (courbe rouge) pour les cristaux Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂

Les incertitudes indiquées pour les conductivités thermiques sont de l'ordre de 15 %. Malgré une valeur inférieure pour le cristal Yb:CaF₂, nos résultats, plutôt en bon accord avec les valeurs de conductivité thermique issues du modèle théorique de R. Gaumé [Gaumé 03], nous confortent dans notre choix des valeurs de 6 et 3,3 W.m⁻¹.K⁻¹ des conductivités thermiques pour Yb:CaF₂ et Yb:SrF₂ respectivement dans nos mesures (Figure 2.38).

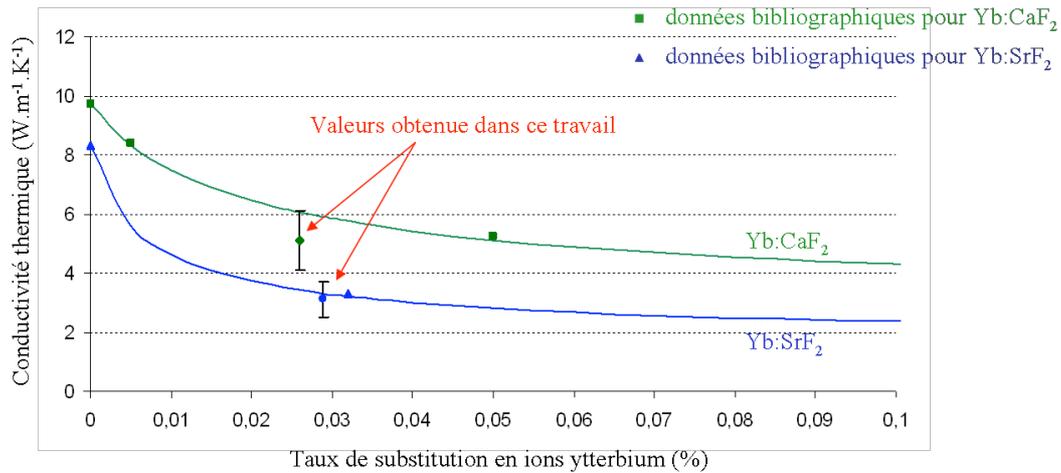


Figure 2.38: Comparaison des mesures de conductivités thermiques avec la littérature [Mogilevskii 76] [Siebold 07], le modèle théorique de R.. Gaumé en fonction la variation du taux de substitution avec l'ion ytterbium [Gaumé 03]

2.5.3.3- Calcul du coefficient thermo-optique pour les cristaux de fluorures

Grâce aux mesures des puissances dioptriques et la détermination de la fraction thermique précédemment, il devient possible d'approximer les courbes expérimentales en utilisant la formule (2.12). Le seul paramètre d'ajustement est alors le coefficient thermo-optique. On trouve alors que χ vaut $-17,8 \cdot 10^{-6} \pm 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour Yb:CaF₂ et $-20,5 \cdot 10^{-6} \pm 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour Yb:SrF₂.

Les points expérimentaux (points bleus) de la puissance dioptrique sont représentés sur la Figure 2.39 avec les courbes théoriques (courbes roses), définies équation (2.16) avec la valeur ajustée pour le coefficient thermo-optique pour chaque cristal laser.

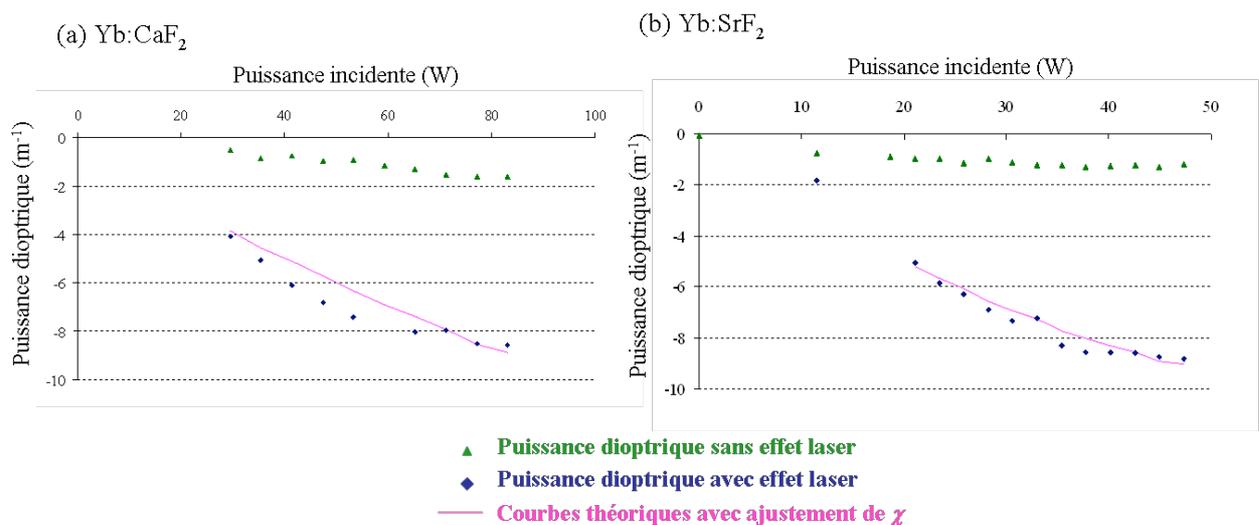


Figure 2.39: Courbes expérimentales des puissances dioptriques (losanges bleus) et courbes théorique (courbes roses) avec effet laser pour (a) Yb:CaF₂ et (b) Yb:SrF₂

Les incertitudes sont calculées grâce à la dérivée logarithmique de la formule (2.16) :

$$\frac{d\chi}{\chi} = \sqrt{\left(\frac{dD_{th}}{D_{th}}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{dw_p}{w_p}\right)^2 + \left(\frac{d\kappa_c}{\kappa_c}\right)^2 + \left(\frac{dP_{abs}}{P_{abs}}\right)^2} \approx 0,10 \quad (2.36)$$

Les calculs du coefficient thermo-optiques ainsi que les valeurs des focales de la lentille thermique mesurées et théoriques sont résumés dans le tableau 2.6.

On peut remarquer, grâce au tableau 2.7, une importante différence entre notre évaluation du coefficient thermo-optique et le coefficient généralement admis dans la littérature pour des cristaux laser non dopés [Weber 03]. Deux raisons pourraient expliquer cette différence notoire :

- 1) Le coefficient thermo-optique varie avec la concentration du dopant comme c'est le cas pour la conductivité thermique.
- 2) Le coefficient thermo-optique donné dans la littérature est déduit de mesures obtenues quand le cristal est à l'équilibre thermodynamique et à contrainte constante. Or dans nos expériences, les coefficients thermo-optiques sont mesurés quand le cristal est pompé et donc soumis à une distribution inhomogène de la chaleur, c'est-à-dire loin de l'équilibre thermodynamique et en subissant donc des contraintes.

Cristal	Yb:CaF ₂	Yb:SrF ₂
<i>χ expérimental K⁻¹ (cristaux dopés)</i>	-17,8 ± 1,5 10⁻⁶	-20,5 ± 1,8 10⁻⁶
<i>χ théorique K⁻¹ par l'équation (2.16)</i>	-11,3 10⁻⁶	-15,9 10⁻⁶
<i>f_{th} théorique mm (conductivité thermique non dopé)</i>	-302 *	-364 **
<i>f_{th} théorique mm (conductivité thermique dopé)</i>	-188 *	-158 **
<i>f_{th} expérimentale mm (conductivité thermique dopé)</i>	-119	-113

* $\eta_p = \eta_r = 1$; $\eta_{h_laser} = 0,045$; $\eta_l = 0,45$; $\chi = -11,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

** $\eta_p = \eta_r = 1$; $\eta_{h_laser} = 0,037$; $\eta_l = 0,46$; $\chi = -15,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

tableau 2.7: Comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs théoriques pour le coefficient thermo-optique et les focales des lentilles thermiques associées

Pour conclure, dans le domaine des cristaux laser dopés ytterbium, l'utilisation des valeurs tabulées du coefficient thermo-optique conduit à des sous-estimations de l'effet de la lentille thermique. Dans notre cas, il y a quasiment un rapport 1/3 sur la sous-estimation des puissances dioptriques : la différence est de 37 % pour Yb:CaF₂ et de 38 % pour Yb:SrF₂. Les valeurs mesurées obtenues dans ce travail nous ont permis d'optimiser au mieux nos cavités laser et générer de fortes puissances en régime continu pour un faisceau laser monomode. Les performances pour les trois cristaux laser ont été détaillées dans la partie 2.5.1.2. Nous remarquons naturellement que la prise en compte des valeurs publiées dans la littérature ne

permettait en aucun cas l'optimisation de l'architecture de la cavité laser pour de fortes puissances moyennes [Boudeile 08].

2.5.4- Mesure du gradient thermique du cristal Yb:CALGO

Pour rappel, les valeurs de la conductivité thermique pour le cristal Yb(2%):CALGO ont été mesurées à 6,9 et 6,3 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ selon les axes a et c respectivement [Petit 05]. Les images issues de la thermographie et les profils de la distribution de température correspondants sont représentés sur la *Figure 2.43* Pour une puissance incidente de 86 W, les gradients de température, à savoir la différence de température entre la température maximale et les bords du cristal, valent 15 °C en l'absence d'effet laser (*Figure 2.40 (a)*) et 21 °C en présence de l'effet laser (*Figure 2.40 (b)*), correspondant respectivement à une puissance absorbée de 29 W et 42 W.

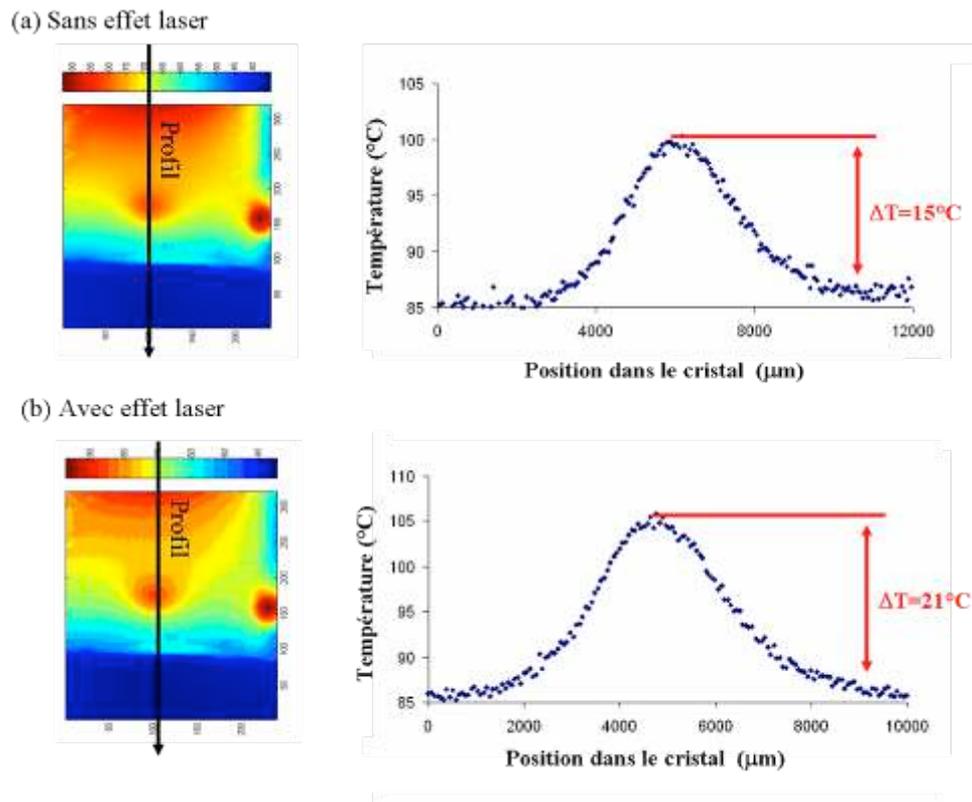


Figure 2.40: Thermographies et profils de température correspondant pour le cristal Yb:CALGO sans (a) et avec (b) effet laser

Deux remarques importantes peuvent être faites. Tout d'abord, quelle que soit la configuration, les gradients de température sont inférieurs à 22 °C. En comparaison, la mesure de gradient de température vaut 36°C en présence d'effet laser pour une puissance absorbée équivalente de l'ordre de 40 W pour le cristal Yb:CaF₂ (tableau 2.5). Le cristal laser Yb:CALGO ne connaît qu'un échauffement de 21°C pour une puissance incidente de pompe de 86 W ! Finalement, nous remarquons de suite que la différence entre les gradients de température avec et sans effet laser est seulement de 5°C. Cette valeur est très faible, comparée au 21°C pour Yb:CaF₂ et 20°C pour Yb:SrF₂ (tableaux 2.3 et 2.5).

Les faibles valeurs de gradient thermique nous confortent dans les excellentes valeurs mesurées de la conductivité thermique du cristal Yb:CALGO [Petit 05].

2.5.5- Comparaisons entre les cristaux choisis

2.5.5.1- Comparaison entre les cristaux de fluorures

Tout d'abord, nos mesures ont montré que le cristal Yb:CaF₂ présente une valeur de conductivité thermique 1,8 fois supérieure à celle du cristal Yb:SrF₂. Ceci confère une meilleure résistance thermique du Yb:CaF₂ comparé au Yb:SrF₂. Expérimentalement, ceci se traduit par une limitation de la puissance de pompe à 47 W à cause des risques trop importants de fracture du cristal Yb:SrF₂. Ensuite, de grandes différences entre les fractions thermiques avec et sans effet laser ont été observées pour les deux cristaux de fluorures. Par exemple, pour le cristal de Yb:CaF₂, la fraction thermique passe d'une valeur de 1,5 % sans effet laser à une valeur de 5 % avec effet laser ; et pour une même puissance incidente de pompe de 83 W la puissance absorbée passe de 32 W sans effet laser à 40 W avec effet laser ! Finalement, les rendements quantiques de fluorescence, ont été calculés : leur valeur est proche de l'unité.

Cette variation de puissance absorbée est d'autant plus dommageable pour les fluorures qu'ils sont très sensibles aux chocs thermiques (encadré 2.9). Ainsi, l'arrêt brutal de l'oscillation laser dans la cavité laser peut provoquer la fracture du cristal.

Encadré 2.9 : Les chocs thermiques et les fractures du cristal

L'élévation inhomogène de la température va créer des contraintes et des tensions au sein du cristal, qui au moindre changement de température peuvent causer la fracture du cristal. On parle alors de choc thermique. On définit alors le « paramètre de choc thermique » R_T , c'est à dire la résistance du matériau à l'amorçage d'une fissure consécutive à un choc thermique de la manière suivante [Gaumé 02]:

$$R_T = \frac{\kappa_c \cdot \sigma_{max} \cdot f(\nu)}{\alpha_T \cdot E} \quad \text{avec} \quad \sigma_{max} = \frac{\alpha_T \cdot E \cdot \eta_h \cdot P_{abs} \cdot \alpha}{4 \pi \cdot \kappa_c} \quad (2.37)$$

où κ_c est la conductivité thermique, σ_{max} la contrainte maximale à laquelle peut résister le cristal définie en Pascal, ν le coefficient de Poisson, α_T la dilatation thermique, E le module de Young, η_h est la fraction thermique, P_{abs} la puissance absorbée et α le coefficient d'absorption du cristal.

Dans le cadre de ces expériences, 3 cristaux Yb:CaF₂ et 2 cristaux Yb:SrF₂ ont été cassés, majoritairement suite à la perte de l'oscillation laser. Seulement, un seul cristal Yb:CALGO fut fracturé durant ces expériences.

En conclusion, pour de fortes puissances, il est préférable d'opter pour le cristal de fluorure de calcium Yb:CaF₂ présentant une meilleure valeur de la conductivité thermique que le cristal de fluorure de strontium Yb:SrF₂. Cependant ces deux fluorures sont extrêmement sensibles aux chocs thermiques et doivent être maniés avec précaution. Par exemple, il est

déconseillé de manipuler les fluorures avec les doigts à cause de la différence entre la température corporelle et celle du fluorure. L'augmentation de la puissance incidente doit être progressive et non brutale pour éviter une trop grande différence de température au sein du cristal.

2.5.5.2- Comparaison entre le CaF₂ et le CALGO

Au final, il nous reste à comparer les cristaux de Yb:CaF₂ et de Yb:CALGO. L'étude thermique nous confirme l'excellente valeur de la conductivité thermique pour le cristal Yb:CALGO, de faibles gradients thermiques inférieurs à 22 °C ont été observés, sans effet laser. De plus, la différence entre les valeurs des gradients de température avec et sans effet laser est faible pour le cristal Yb:CALGO. En effet, seule une différence de 6 °C est mesurée (*Figure 2.39*) comparée au 21 °C pour Yb:CaF₂ (tableaux 2.3 et 2.5). Finalement, le cristal Yb:CALGO a prouvé une forte résistance aux chocs thermiques expérimentalement. Moins de précautions sont nécessaires pour pouvoir manipuler ce cristal.

En conclusion, pour éviter les fractures du cristal laser, il paraît préférable de s'orienter vers le cristal Yb:CALGO. Cependant, le cristal Yb:CaF₂ présente une large bande d'émission plus qu'intéressante pour la génération d'impulsions femtosecondes. De plus, le cristal Yb:CaF₂ a une croissance plus facile et donc il est possible de l'obtenir en plus grande quantité comparé au cristal Yb:CALGO. Il est alors intéressant d'étudier ces deux cristaux en régime femtoseconde.

Une autre remarque doit être signalée : durant ces études thermiques, nous avons constaté que le cristal Yb:CALGO a une faible absorption de seulement 50 % de la puissance de pompe.

2.6- Conclusions du chapitre 2

Le banc de caractérisation thermique complet qui mesure simultanément la lentille thermique et la carte de température par thermographie présente de nombreux intérêts :

-- Il permet à la fois de mesurer les valeurs de la conductivité thermique et du coefficient thermo-optique. Ces deux paramètres nous permettent d'évaluer la focale de la lentille thermique quelle que soit la configuration expérimentale choisie, sans avoir à utiliser les valeurs tabulées dans la littérature, valeurs calculées principalement pour des cristaux laser non dopés.

-- La différence des résultats avec et sans effet laser à cause de la présence de la saturation d'absorption dans les cristaux laser dopés ytterbium, permet de remonter jusqu'aux valeurs du rendement quantique de fluorescence des cristaux laser étudiés.

Les principaux résultats obtenus pour le banc de caractérisation complet sont résumés ci-après :

-- Les valeurs de la conductivité thermique et du coefficient thermo-optiques ont été mesurées pour les cristaux de fluorures :

- 1) Yb:CaF₂ $\kappa_c = 5,4 \pm 1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\chi = -17,8 \pm 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- 2) Yb:CaF₂ $\kappa_c = 3,1 \pm 0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\chi = -20,5 \pm 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Ce sont les premières démonstrations, à ma connaissance, de mesures de la conductivité thermique pour ces fluorures mais également des coefficients thermo-optiques *in situ* (c'est-à-dire pour des cristaux laser dopés et en dehors de l'équilibre thermodynamique et en dehors de contraintes constantes). D'ailleurs, une prise en compte des données bibliographiques nous montre des surestimations de la focale de la lentille thermique par rapport à celles mesurées expérimentalement. Des cavités laser à l'architecture tenant compte de la focale de la lentille thermique mesurée ont été réalisées. Ceci a permis d'obtenir des performances en régime monomode jamais démontrées auparavant pour ces deux cristaux, nous confortant ainsi dans l'utilité des mesures lentilles thermiques. Grâce à cette étude, une comparaison a pu être faite entre les deux cristaux de fluorures et montre une meilleure gestion de la thermique de la part du fluorure de calcium au détriment du fluorure de strontium.

-- L'excellente valeur de la conductivité thermique et le bon comportement thermique du cristal Yb:CALGO ont été mis en évidence par les faibles valeurs de gradient thermique mesurées avec et sans effet laser. Ensuite une différence de seulement 6°C a été constatée entre les gradients thermiques en présence ou non de l'effet laser. De plus, ce cristal laser soumis à fort pompage se comporte comme une lentille convergente. Cependant, cette lentille thermique aura peu d'influence sur la stabilisation de la cavité laser puisque les puissances dioptriques mesurées sont faibles. Une puissance moyenne de 15,3 W a été obtenue pour une puissance incidente de 86W, correspondant à 30 W de puissance absorbée.

Cependant quelques améliorations sont à envisager pour le banc de caractérisation thermique :

-- L'amélioration de la cavité laser par la diminution des pertes introduites par la lame dichroïque de ZnSe dans la cavité laser.

-- L'amélioration peut également se faire d'un point de vue théorique. Nous sommes capables expérimentalement de tenir compte de la biréfringence des cristaux laser étudiés. En effet, il est possible de faire des profils de température suivant les différents axes cristallographiques du cristal laser. Mais nous n'avons pas, à l'heure actuelle, le formalisme suffisant pour traiter complètement ce cas de figure par le calcul comme le montre le traitement incomplet du cristal CALGO dans ces travaux. Il serait alors possible de faire des études très détaillées des cristaux biréfringents.

En conclusion, ce banc de caractérisation présente l'avantage de permettre d'optimiser les architectures des cavités laser de fortes puissances pour différents cristaux laser et de tester d'autres cristaux laser dopés ytterbium non étudiés thermiquement.

La réalisation de ce banc complet de caractérisation thermique a été possible grâce à la MRCT (Missions Ressources et Compétences Technologiques) du CNRS et à la plateforme PRISME d'Optics Valley financée par le conseil général de l'Essonne.

Bibliographie

A

[Augé 00] F. Augé, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, F. Mougel, G. Aka, and D. Vivien, "Theoretical and Experimental Investigations of a Diode-Pumped Quasi-Three-Level Laser: The Yb³⁺-doped Ca₄GdO(BO₃)₃ (Yb:GdCOB) Laser", *IEEE J. Quantum Electron.* **36**, 598-606 (2000)

B

[Balembois 97] F. Balembois, F. Falcoz, F. Kerboull, F. Druon, P. Georges, A. Brun, "Theoretical and experimental investigations of small-signal gain for a diode-pumped QSwitched Cr:LiSAF Laser", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **33** (2), 269-278 (1997)

[Barnes 02] N. Barnes, B. Walsh, "Quantum efficiency measurements of Nd:YAG, Yb:YAG, and Tm:YAG", *OSA TOPS*, **68**, *Advanced Solid State Lasers*, 284-287 (2002)

[Bisson 00] J.F. Bisson, D. Fournier, M. Poulain, O. Lavigne and R. Mévrel, "Thermal conductivity of Ytria-Zirconia single crystals determined with spatially resolved infrared thermography", *J. Am. Ceram. Soc.*, **83** (8), 1993-1998 (2000)

[Boudeile 08] J. Boudeile, J. Didierjean, P. Camy, J.L. Doualan, A. Benayad, V. Ménard, R. Moncorgé, F. Druon, F. Balembois and P. Georges, "Thermal behaviour of ytterbium-doped fluorite crystals under high power pumping", Accepted in *Optics Express*

[Blows 98] J.L. Blows, T. Omatsu, J. Dawnes, H. Pask, M. Tateda, "Heat generation in Nd:YVO₄ with or without laser action", *IEEE Photonics Technology Letters*, **10** (12), 1727-1729 (1998)

[Brown 97] D.C. Brown, "Ultrahigh-average power diode-pumped Nd:YAG and Yb:YAG lasers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **33** (5), 861-873 (1997)

[Burnham 70] D. Burnham, "Simple measurement of thermal lensing in laser rods", *Applied Optics* **9** (7), 1727-1728 (1970)

C

[Chanteloup 98] J. Chanteloup, F. Druon, M. Nantel, A. Maksimchuk, and G. Mourou, "Single-shot wave-front measurements of high-intensity ultrashort laser pulses with a three-wave interferometer," *Opt. Lett.* **23**, 621-623 (1998)

[Chénais 02] Sébastien Chénais, "De l'ytterbium, de la thermique", thèse de Doctorat de l'Université de Paris-Sud (XI) (2002)

[Chénais 04] S. Chénais, S. Forget, F. Druon, F. Balembois and P. Georges, "Direct and absolute temperature mapping in diode-end pumped Yb:YAG", *Applied Physics B* **79** 221-224 (2004)

[Chénais 06] S. Chénais, F. Balembois, F. Druon, G. Lucas-Leclin and P. Georges, “On thermal effects in solid-state lasers: the case of ytterbium doped-materials” IEEE J. Quantum Electron. **30** (4) 89-153 (2006)

[Clarkson 01] W. A. Clarkson, “Thermal effects and their mitigation in end-pumped solid-state lasers”, J. Phys. D: Appl. Phys. **34**, 2381-2395 (2001)

[Cousins 92] A. K. Cousins, “Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods”, IEEE J. Quantum Electron. **28** (4), 1057-1069 (1992)

D

[Didierjean 07] J. Didierjean, E. Herault, F. Balembois, P. Georges “Thermal conductivity measurements of laser crystals by infrared thermography. Application to Nd:doped crystals” accepted for publication in Optics Express

[Didierjean 07bis] Julien Didierjean, “Etude thermique des cristaux laser, Réalisation de lasers à fibres monocristalline”, thèse de Doctorat de l'Université Paris Sud XI (2006)

F

[Fan 93] T.Y. Fan, “Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG”, IEEE J. Quantum Electron. **29** (6), 1457-1459 (1993)

[Farruck 88] U.O Farruckh, A. M. Buoncrisiani, C.E. Byvik, “An analysis of the temperature distribution in finite solid-state laser rods”, IEEE J. Quantum Electron. **24** (11), 2253-2257 (1988)

[Fluck 00] R. Fluck, M. Hermann, L. Hackel, “Energic and thermal performance of high-gain diode-side pumped Nd:YAG rods”, Appl. Phys. B **70**, 491-498 (2000)

[Frauchiger 92] J. Frauchiger, P. Albers, H.P. Weber, “Modeling of thermal lensing and higher-order ring mode oscillation in end-pumped CW Nd:YAG lasers”, IEEE J. of Quantum Electron. **28** (4), 1046-1056 (1992)

G

[Gaumé 02] Romain Gaumé, “Relations structure-propriétés dans les lasers solides de puissance à l'ytterbium. Elaboration et caractérisation de nouveaux matériaux et de cristaux composites soudés par diffusion”, thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie Paris VI (2002)

[Guy 98] S. Guy, C.L. Bonner, D.P. Shepherd, D.C. Hanna, A.C. Tropper, B. Ferrand, “High-Inversion Densities in Nd:YAG: Upconversion and Bleaching”, IEEE Journal of Quantum Electronics, **34** (5), 900-909 (1998).

H

[Hue 73] C. Hue and J. R. Whinnery, “New thermo-optical measurement method and a comparison with others methods”, Applied Optics **12** (1), 72-79 (1973)

I

[Ito 02] S.Ito, H. Nagaoka, T.Miura, K. Kobayashi, A. Endo, K. Torizuka, “Measurements of thermal lensing in a power amplifier of a terawatt Ti:sapphire laser”, *Applied Physics B* **74**, 343-347 (2002)

J

[Jeong 07] T. M. Jeong, D. -K. Ko, and J. Lee, “Method of reconstructing wavefront aberrations by use of Zernike polynomials in radial shearing interferometers”, *Opt. Lett.* **32**, 232-234 (2007)

K

[Keyes 64] R. J. Keyes, T. M. Quist, “Injection luminescent pumping of $\text{CaF}_2:\text{U}^{3+}$ with GaAs diode laser”, *Applied Physics Letters*, **4** (3), 51-52 (1964)

[Koechner 70] W. Koechner, “Absorbed pump power, thermal profile and stresses in a CW pumped Nd:YAG crystal”, *Applied Optics* **9** (6), 1429-1434 (1970)

[Koechner 99] W. Koechner, “Solid State Laser Engineering, 5th version, Springer, 1999

[Kracht 64] D. Kracht, D. freibourg, R. Wilhelm, M. Frede and C. Fallnich, “Core-doped Ceramic Nd:YAG Laser”, *Optics Express* **14** (7), 2690-264 (1964)

L

[Le Boiteux 60] Henri Le Boiteux, *Mécanique Physique Volume 1: la mécanique des solides reels*, Béranger, 1960

M

[Mangin 93] J. Mangin, P. Strimer, L. Lahlou-Kassi, “An interferometric dilatometer for the determination of thermo-optic coefficients”, *Measurement Science Technology*, **4**, 826-834 (1993)

N

[Neuenschwander 95] B. Neuenschwander, R. Weber, H. Weber, “Determination of the thermal lens in solid-state lasers with stable cavities”, *IEEE J. Quantum Electron.* **31** (6), 1082-1087 (1995)

P

[Pavel 06] N. Pavel, V. Lupei, J. Saikawa, T. Taira, H. Kan, “Neodymium concentration dependence of 0.94-, 1.06- and 1.64 μm laser emission and heating effects under 809- and 885- nm diode laser pumping of Nd:YAG”, *Applied Physics B* **82**, 599-605 (2006)

[Parker 61] W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Butler, G.L. Abbot, “Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity”, *Journal of Applied Physics*, **32** (9), 1679-1684 (1961)

[Primot 93] J. Primot, “three-wave shearing interferometer”, *Appl. Opt.*, **32** (31), 6242-6249 (1993)

[Petit 05] J. Petit, P. Goldner, and B. Viana, "Laser emission with low quantum defect in Yb:CaGdAlO₄," Opt. Lett. 30, 1345-1347 (2005)

[Petit 06] Vincent Petit, "Etude des matériaux dopés Yb³⁺ pour une émission laser large bande autour de 1 µm", thèse de Doctorat de l'Université de Caen/Basse-Normandie (2006)

[Pfitsner 94] C. Pfitsner, R. Weber, H. Weber, S. Merazzi, R. Grube, "Thermal beam distortion in end-pumped Nd:YAG, Nd:GSGG, and Nd:YLF rods", IEEE J. Quantum Electron. 30 (7), 1605-1615 (1994)

[Pittman 02] M. Pittman, S. Ferré, J.P. Rousseau, L. Notebaert, J.P Chambaret, G. Chériaux, "Design and characterization of a near-diffraction-limited femtosecond 100-TW 10Hz high-intensity laser system", Applied Physics B 74, 529-535 (2002)

[Pottier 94] L. Pottier, "Micrometer scale visualization of thermal waves by photoreflectance Microscopy", Applied Physics Letters, 64 (13), 1618-1619 (1994)

S

[Salazar 91] A. Salazar, A. Stinchez-Lavega, and J. Fernandez, "Thermal diffusivity measurements in solids by the "mirage" technique : Experimental results", Journal of Applied Physics, 69 (3), 1216-1223 (1991)

[Site Flir System inc.] <http://www.flir.com/>

[Site LASCAD] <http://www.las-cad.com/>

[Site Phasics] <http://www.phasics.fr/fr/index.php>

[Svelto 89] O. Svelto, Principi dei laser, traducteur David C. Hanna, 3rd edition, Plenum Press, 1989

W

[Weber 03], Marvin J. Weber, "Handbook of Optical Materials", CRC Press, Edition 2003

Y

[Yang 02] P. Yang, P. Deng, Z. Yin, "Concentration quenching in Yb:YAG", Journal of Luminescence, 97, 51-54 (2002)

[Yin 98] H. B. Yin, P. Z. Deng, F. X. Gan, "Defects in YAG:Yb crystals", Journal of Applied Physics, 83 (7), 3825-3828 (1998)