

Projet de conception d'un puissance mètre

Rapport de projet – version finale

présenté à

Martin Bernier

par

Équipe 3 — Photon **W**atté

matricule	nom
[REDACTED]	[REDACTED]

Table des matières

1	Introduction	1
2	Description	2
3	Besoins et contraintes	2
4	Synthèse et retour sur le cahier des charges et sur l'échéancier	3
5	Synthèse des travaux de conception et de modélisation	8
6	Appareil de mesure	16
7	Confirmation du modèle thermique	17
8	Caractérisation des performances de l'appareil de mesure	18
9	Limitations et améliorations possibles de l'appareil de mesure	22
10	Conclusion	24
	Bibliographie	25
	Annexes	25
	Annexe A Design mécanique	26
	Annexe B Modélisation thermique	29
	Annexe C Conception électronique	37
	Annexe D Caractéristiques des composantes optiques	38
	Annexe E Solution logicielle	44
	Annexe F Algorithme de triangulation	45
	Annexe G Diagramme de Gantt	47

Chapitre 1: Introduction

Sur le marché, on trouve présentement plusieurs sortes de puissance-mètres laser dont ceux à haute précision de l'entreprise *Gentec Inc.*. Cette entreprise offre une gamme d'instruments de mesure de puissance laser. On retrouve dans leurs catalogues des détecteurs thermiques, pyroélectriques, à sphère d'intégration et calorimètres à eau permettant d'avoir une plage de mesure de puissance allant de 0,3 nW à 100 000 W.[1]

Le Centre d'optique, photonique et laser est à la recherche depuis quelques années du meilleur puissance-mètre adapté à leurs besoins, plus spécifiquement à leurs nombreux types de lasers. Ayant obtenu le contrat pour développer un puissance-mètre laser, l'entreprise *Concept GPH inc.* décide de donner son projet à l'équipe R&D Photon Watté. L'équipe de R&D a pour but de démontrer la faisabilité d'un puissance-mètre et de définir ses performances et ses limitations dans l'optique d'une future mise en marché à l'échelle mondiale et de faire face à la concurrence.

Le prototype étant complété, ce rapport rappelle d'abord les besoins et contraintes du produit. Une synthèse des critères et des spécifications de l'appareil s'ensuit. On parle par après des points principaux de la conception et des problèmes rencontrés. Ensuite, l'appareil de mesure dans son ensemble est présenté. Le modèle thermique est comparé aux résultats réels de l'instrument de mesure. Les spécifications du puissance-mètre sont ensuite expliquées plus en détails et quelques résultats de mesure sont présentés. La section finale comprend les limitations du prototype et comment il serait possible de l'améliorer.

Chapitre 2: Description

Le client a soumis un contrat à l'équipe R&D Photon Watté. Le contrat décrit le projet *Développement d'un puissance-mètre laser*. À terme, le client vise à développer un produit pour la mise en marché à grande échelle.

Ce projet implique de développer un puissance-mètre laser utilisant le principe de l'absorption volumique. Celui-ci doit répondre à toutes les demandes du client en termes de performances et de limitations. Les performances de l'appareil de mesure ont été optimisées avec l'aide de la cellule de détection réalisée par notre équipe. De plus, celui-ci devra avoir une précision optimale à la longueur d'onde de (790 ± 10) nm. Le puissance-mètre laser a dû démontrer son efficacité lors des tests en laboratoire et comprendre une interface logicielle intuitive qui a été validée expérimentalement. L'ensemble du design devait être esthétique, tout en répondant aux critères de robustesse. Le développement de l'interface logicielle devait être réalisé avec LabVIEWTM dans l'objectif d'une utilisation robuste de l'appareil de mesure avec un ordinateur d'acquisition. Pour l'utilisateur, l'interface devait afficher la puissance laser instantanée et la position du faisceau sur la cellule. Celle-ci devait être conviviale et posséder un niveau d'esthétisme suffisant pour être présentable.

Chapitre 3: Besoins et contraintes

3.1 Besoins

Selon les demandes du client et la documentation fournie par l'entreprise concernant les spécifications du système et du design, la liste suivante présente les besoins établis au début du projet [2] :

1. Afficher en temps réel la puissance moyenne d'un laser continu sur la plage de mesure 0-10 W, avec une erreur inférieure à 5 % de la puissance maximale.
2. Afficher la position du faisceau laser sur une cellule de détection ayant au moins 20 mm de diamètre, avec une erreur inférieure à 10 % du diamètre.
3. Maintenir un temps de réponse inférieur à 5 s sur toute la plage de mesure.
4. Enregistrer la puissance instantanée du laser et la position du faisceau sur la cellule de détection, sur une durée minimale de 10 minutes avec une fréquence d'échantillonnage d'au moins 1 Hz.
5. Permettre une correction logicielle de la calibration spectrale sur la plage 500 à 2500 nm.
6. Comprendre une interface LabVIEWTM intuitive esthétique pour une utilisation robuste de l'appareil de mesure via un ordinateur d'acquisition.
7. Posséder un module d'interrogation électronique robuste ayant un niveau d'esthétisme suffisant pour être présentable à un client.
8. Posséder une précision optimale à une longueur d'onde de (790 ± 10) nm

9. Respecter le budget de 250 \$.
10. Être livré avant le 21 avril.

Chapitre 4: Synthèse et retour sur le cahier des charges et sur l'échéancier

4.1 Synthèse et retour sur le cahier des charges

Tableau 4.1 – Retour sur le cahier des charges

Critères à évaluer	Conditions à respecter	Critère respecté	Note
Performance			47/50
Puissance moyenne d'un laser continu	0 à 10 W	Oui	9/9
Temps de réponse	Inférieure à 5 secondes	Oui	8/9
Précision sur la puissance	Inférieure à 5% de la puissance maximum	Oui	6/6
Précision sur la position	Inférieure à 10% du diamètre d'entrée	Oui	6/6
Diamètre d'entrée	Supérieur ou égale à 20 mm	Oui	5/5
Plage de longueur d'onde	500 à 2500 nm	Oui	3/5
Fréquence d'échantillonnage	Supérieur à 1 Hz	Oui	5/5
Durée de l'enregistrement	Supérieur à 10 minutes	Oui	5/5
Robustesse			24/25
Robustesse de l'appareil	Solide et fiable	Oui	10/10
Calibration logicielle	Mise à zéro et ajustement spectral	Oui	5/5
Interface logicielle robuste	Faire face aux clics aléatoires	Oui	5/5
Gestion des erreurs	Génère et affiche les codes d'erreur	Oui	4/5
Esthétisme et convivialité			15/15
Module d'interrogation électronique	Fils bien disposés	Oui	5/5
Logiciel LabVIEW™	Interface intuitive et bien organisée	Oui	5/5
Design de l'appareil	Simple, convivial et propre	Oui	5/5
Coût			9/10
Budget	Inférieur ou égal à 250 \$	Oui	9/10
Échéancier	Avant le 21 avril		0
Total			95/100

4.2 Performance

Puissance moyenne d'un laser continu : Le critère est atteint, puisque la puissance maximale mesurée en laboratoire est de 14,9 W, ce qui dépasse largement la puissance de 10,0 W requise par le client. Cette puissance a été appliquée pendant environ 60 secondes sans endommager l'appareil, ce qui démontre que l'appareil peut supporter cette puissance.

Temps de réponse : En puissance, lorsque le faisceau laser est centré, le temps de réponse mesuré est d'environ 4,2 secondes. En position, le temps de réponse mesuré est d'environ 6,0 s secondes. Ce temps de réponse a été mesuré en plaçant le laser à une distance de 3,54 mm du centre avant d'allumer le laser. Cela permet d'avoir le laser décentré lorsque le laser est allumé évitant ainsi le temps de déplacement du faisceau avec la vis micrométrique. À la base, le critère est sur le temps de réponse en puissance, ce qui est atteint. En revanche, un point est retranché puisque le temps de réponse en position dépasse légèrement le 5,0 s.

Précision sur la puissance : La précision sur la puissance est mesurée en régime permanent sur un test d'échelons

successifs. Deux critères sur la précision sont évaluées : l'exactitude et la dispersion de la mesure en puissance. L'exactitude est évaluée à 50 mW et la dispersion est évaluée à 40 mW. La précision surpassé donc largement le critère de 500 mW.

Précision de la position : La précision sur la position est aussi évaluée sur l'exactitude et la dispersion de la mesure en position. Celles-ci sont de 0,2mm et de 0,1mm respectivement. Le critère de 2 mm est donc facilement respecté.

Diamètre d'entrée Le critère est atteint, puisque le diamètre d'entrée de la cellule est de 20 mm.

Plage de longueur d'onde : Le critère est atteint, puisque le puissance-mètre possède une correction spectrale allant de 500 à 2500 nm. Cependant, comme l'appareil a seulement été testé à 790 nm et qu'il absorbe beaucoup moins de puissance aux longueurs d'onde plus élevées, il n'est pas possible de savoir si le puissance-mètre fonctionnerait de façon optimale à ces longueurs d'onde.

Fréquence d'échantillonnage : Le critère est atteint, puisqu'il est possible d'échantillonner la puissance et la position à des fréquences allant de 1 Hz jusqu'à 10 Hz¹.

Durée de l'enregistrement : Le critère est atteint, puisqu'il est possible d'enregistrer le signal pendant plus de 10 minutes.

4.3 Robustesse

Robustesse de l'appareil : Le critère est atteint, puisque le puissance-mètre résiste aux perturbations environnementales (il est possible de mettre sa main sur le puits de chaleur sans trop affecter les mesures) et il résiste bien aux chocs (le puissance-mètre est tombé sur la table optique sans briser). Aussi, le boîtier d'électronique résiste bien aux chocs.

Calibration logicielle : Ce critère est atteint, car il est possible de changer la longueur d'onde du laser dans les paramètres de la simulation, même pendant l'acquisition. Aussi, comme les températures sont référencées au puits de chaleur, la mise à zéro se fait automatiquement. Il a donc été jugé superflu d'ajouter une mise à zéro manuelle à l'interface.

Interface logicielle robuste : L'interface survit sans peine à la tempête du clic. Seuls les boutons Arrêter et Paramètres sont activés lors de l'acquisition. Les seuls paramètres modifiables pendant l'acquisition sont la longueur d'onde et l'échelle du graphique de puissance, qui se mettent à jour automatiquement sans erreur. De plus, la face avant se verrouille lorsqu'une commande est traitée ou qu'une fenêtre est ouverte.

Gestion des erreurs : Les erreurs relatives au fonctionnement normal du logiciel ont été traitées en amont. Les paramètres sont tous contraints dans une plage testée pour ne pas générer d'erreurs (par exemple : la fréquence d'échantillonnage maximale permise est de 1300 Hz, la capacité du DAQ étant 10 kHz répartis sur 6 entrées). L'acquisition est annulée et un message s'affiche si le DAQ est introuvable, si les entrées sont invalides ou en nombre insuffisant, ou encore si les tensions sont anormalement faibles. Si un code d'erreur survient néanmoins, par exemple provenant du DAQ, l'acquisition est arrêtée et une fenêtre d'erreur générée par LabVIEW s'ouvre. Les données sont toutefois enregistrées, les boucles se ferment normalement et le DAQ est réinitialisé pour reprendre l'acquisition, donc la gestion est considérée robuste. Un point est retiré parce que les messages d'erreur générés par Labview sont en anglais, et souvent peu conviviaux.

4.4 Esthétisme et convivialité

Module d'interrogation électronique : Le niveau d'esthétisme et de convivialité a été atteint, le module d'interrogation électrique est très propre et son apparence est soignée et robuste. Les fils électriques sont bien dissimulés.

Logiciel LabVIEWTM : L'interface du logiciel est simple et intuitive à utiliser. La position et la puissance s'affichent numériquement et graphiquement pour une lecture simple et agréable. Les paramètres s'ouvrent dans une fenêtre à part pour ne pas encombrer l'interface. Les paramètres avancés sont aussi séparés pour ne pas confondre un utilisateur débutant.

1. La tension est échantillonnée à 1300 Hz, mais les signaux sont moyennés afin de réduire le bruit, ce qui réduit la fréquence d'échantillonnage de la puissance et de la position

Des paramètres par défaut sont fournis pour une aisance d'utilisation maximale. Le critère d'esthétisme et de convivialité est pleinement atteint.

Design de l'appareil : En évaluant l'aspect du design de l'appareil, on constate un souci de l'esthétisme très satisfaisant. L'esthétisme du système est présentable au client en vue d'une mise en marché mondial.

4.5 Coût

Budget : Le coût total du projet est de 246.76\$. Ce montant est inférieur au budget maximal alloué ainsi le critère est respecté.

4.5.1 Synthèse et retour sur l'échéancier

La mise à jour de l'échéancier du projet a été réalisée de façon continue afin d'assurer un suivi de projet hebdomadaire. Une attention particulière a été apportée aux contraintes superflues ainsi qu'aux contraintes manquantes. Pour ce faire, une réorganisation des tâches a été faite afin que la suite des tâches mène vers la fin du projet. Les changements principaux apportés ont été de relier les différents aspects du projet tels que l'optique photonique à la conception mécanique, la conception mécanique à la modélisation thermique, la modélisation thermique à la conception logicielle ainsi que l'aspect de la conception électrique. À la suite de cette réorganisation, un nouveau chemin critique a été identifié, celui-ci a été mis en rouge afin que les ressources accordent une attention particulière à l'avancement de ces tâches.

Lors de la première planification du diagramme de Gantt, un pourcentage d'attribution des ressources avait été retenu en cas de modifications futures pour ne pas surcharger l'utilisation des ressources requises pour compléter le projet. Ainsi, l'ajout et la réorganisation des tâches n'ont pas ajouté une surcharge aux ressources.

La durée de certaines tâches a été modifiée, car il s'est avéré que celles-ci prenaient plus de temps. Par exemple, la tâche concernant les tests finaux était planifiée pour seulement une journée avec un délai aussi court, cela ne permet pas d'avoir le temps de déboguer notre prototype s'il ne fonctionne pas bien. De plus, le délai d'usinage et certains délais de livraison tels que le délai de livraison d'un des absorbants qui n'est pas comptabilisé dans le budget (puisque celui-ci est gratuit) ont été modifiés afin d'être plus réalistes.

De manière à améliorer l'aspect esthétique du diagramme, la position des tâches a été déplacée pour améliorer la clarté. Dans le but d'alléger son aspect visuel, on affiche seulement les initiales des personnes-ressources dans le diagramme de Gantt.

En général, les modifications apportées ont été bénéfiques pour l'échéancier : celles-ci ont bonifié le diagramme de Gantt. Suite à ces modifications, le suivi de l'échéancier a permis d'atteindre la finalité du projet.

4.6 Principaux problèmes rencontrés et solutions apportées

4.6.1 Optique-photonique

Un des problèmes rencontrés dans la partie optique-photonique est le diamètre du filtre absorbant. Au départ, le filtre choisi avait un diamètre de 25 mm. Cependant, le diamètre d'entrée de 20 mm et le diffuseur font que le faisceau peut dépasser les extrémités du filtre. La solution à ce problème était de changer la commande Thorlabs pour prendre un filtre ayant un diamètre de 50 mm afin de s'assurer que toute la puissance optique est absorbée par le filtre, peu importe la position du faisceau.

Un autre problème rencontré a été le diffuseur. Initialement, le diffuseur choisi était le DGUV10-600 de Thorlabs fait en verre de silice fondu [3]. Il avait été choisi, puisque la courbe de la transmission en fonction de l'angle fournie par Thorlabs (figure D.8) semblait indiquer que la divergence allait être suffisante pour élargir le faisceau au diamètre voulu (environ

12 mm). Cependant, en mesurant le diamètre du faisceau après le diffuseur pour plusieurs distances, celui-ci n'augmentait pas aussi rapidement que prévu. Pour avoir le diamètre voulu, il aurait fallu mettre le filtre à une distance d'environ 80 mm du diffuseur. La première solution considérée était d'acheter un autre diffuseur ayant une diffusion plus grande (le DGUV10-120 ou le DGUV10-220). Cependant, Martin a proposé d'utiliser un diffuseur fait au COPL pour une équipe en 2019 [4]. Ce diffuseur a été choisi pour deux raisons. Premièrement, il possédait une diffusion beaucoup plus grande que l'autre diffuseur. En effet, à une distance diffuseur-filtre de 27 mm, le diamètre du faisceau mesurée est d'environ 13 mm. Deuxièmement, Martin a proposé de fournir le diffuseur gratuitement en échange du diffuseur de Thorlabs. Cela a permis de sauver environ 50\$ sur le budget. En choisissant ce diffuseur, un autre problème est apparu : la transmittance en fonction de la longueur d'onde du diffuseur est inconnue. La première solution considérée était de mesurer la transmittance à l'aide du spectrophotomètre Cary 5000 d'Agilent. Le problème est que la transmittance mesurée ne représente pas la vraie transmittance, car la diffusion causait des pertes supplémentaires dans l'appareil. La deuxième solution était de trouver un modèle physique simple permettant de relier la longueur d'onde et la transmittance. Le problème est que, comme les imperfections à la surface du diffuseur sont de l'ordre de $80 \mu\text{m}$ - $130 \mu\text{m}$ ², le régime de diffusion a considéré est celui de Mie [5]. Les solutions obtenues dans ce régime sont beaucoup trop complexes pour les besoins de ce projet. La troisième et dernière solution était de mesurer la taille des imperfections à l'aide d'un microscope pour obtenir leur taille approximative. Ensuite, à l'aide de deux mesures de transmittance obtenues expérimentalement ($T_d = 80,57\%$ à 787 nm et $T_d = 90,6\%$ à 1976 nm), les données ont été ajustées à l'aide des données fournies par Thorlabs pour le diffuseur DGUV10-120. Ce diffuseur a été choisi, car la taille des imperfections de ce diffuseur est similaire à celle mesurée avec le microscope. Les résultats sont présentés plus en détails dans la section 5.1.

4.6.2 Conception mécanique

Lors de la modélisation de la cellule, le nombre et les dimensions exactes des capteurs étaient encore inconnus. L'emplacement approximatif des capteurs était connu, mais rien de plus. Cela c'est avéré être un problème majeur. Les rainures dans le filtre avaient déjà été modélisées et c'était prévu qu'elles soient assez grandes pour y faire passer les fils des capteurs. En fin de compte, les fils étaient trop gros. D'autres rainures ont dû être coupées dans la cellule en plus de celles dans le filtre. Celles dans la cellule sont surdimensionnées afin de s'assurer qu'elles concordent avec celles dans le filtre même si elles pouvaient être hors spécifications ou mal positionnées.

4.6.3 Modélisation thermique

Au début du projet, l'outil de simulation numérique *Thermal Simulation* de *SolidWorks* avait été sollicité afin de faire la modélisation thermique de la cellule. Toutefois, les résultats de simulation étaient lents et laborieux à obtenir et les fichiers contenant ces résultats étaient volumineux. En outre, afin de simuler l'absorption volumique dans le filtre et le profil non uniforme du faisceau incident sur celui-ci, il était nécessaire de fractionner le filtre et d'implanter de la génération de chaleur surfacique sur l'ensemble des surfaces. Cette manière de procéder était peu efficace puisqu'elle alourdissait le fichier et augmentait le risque d'erreurs en raison de la nécessité d'implanter un relativement grand nombre d'équations. Elle limitait aussi l'efficacité du maillage étant donné qu'en fractionnant la géométrie, le nombre d'interfaces où les mailles doivent communiquer augmente significativement et augmente par le fait même les risques que le maillage échoue. Il a donc été décidé de passer à l'outil de simulation numérique *Flow Simulation* du même logiciel. Non seulement les résultats de simulation étaient plus rapides à obtenir et plus légers, mais le logiciel offrait également la possibilité d'implanter de la génération de chaleur volumique et surfacique dans le filtre à l'aide d'équations. En plus de simplifier la géométrie et restreindre le risque d'erreur, cette approche permet de paramétriser facilement la simulation et de faire varier en fonction du temps la puissance incidente sur le filtre, la position et la largeur du faisceau, la longueur d'onde du laser et le coefficient d'absorption du filtre.

4.6.4 Électronique

La méthode pour étalonner les capteurs posait quelques problèmes. D'abord, puisque le faisceau est agrandi par le diffuseur, à faible puissance, la température aux capteurs n'est pas très élevée par rapport à la référence. Il devient donc

2. Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un microscope utilisé pour le cours Travaux pratiques en biophotonique (PHY-7093)

important de bien caractériser les capteurs aux alentours de 20°C. La méthode consiste à faire chauffer de l'eau avec une plaque chauffante et de mesurer la résistance à plusieurs températures. Puisque la plaque chauffante ne peut pas chauffer en dessous de 50°C, il fallait prendre des mesures en régime transitoire. Bien que le thermomètre soit précis, son temps de réponse est beaucoup plus faible que celui du capteur et on n'associait pas la résistance à la température réelle, mais celle mesurée par le thermomètre. On a donc essayé de caractériser avec un thermocouple qui a un temps de réponse très rapide, mais qui est beaucoup moins précis. Une solution est d'assumer que le thermocouple est seulement mal calibré d'un décalage constant (*offset*). Ainsi, la forme de la courbe devrait être la bonne et il est possible de décaler la courbe d'un facteur α comme le montre l'équation (5.2). Ce décalage a été mesuré au thermomètre, qui est précis, lorsque les thermistances ont été fixées dans la cellule.

Un autre problème rencontré est la petite taille des thermistances et les manipuler. En étalonnant le premier capteur, on a mis le mélangeur pour bien homogénéiser la température de l'eau. Le capteur s'est emporté autour du brasseur et un des deux fils a cassé à la base de la thermistance. Ce capteur n'était donc plus utilisable. Heureusement, un capteur était prévu en surplus, mais il a fallu manipuler les thermistances délicatement par la suite.

Un changement fait par rapport au design électronique initial est la valeur de R_A , R_B , R_C et R_S . Initialement, en voyant l'équation 5.6, on voit qu'augmenter R_A et R_C augmente le signal. Pour que le puits de courant fonctionne, il fallait aussi que R_S soit grand, ce qui diminue le courant et l'erreur causée par l'effet Joule. Cependant, il fallait aussi un gain plus élevé, d'environ 12. Pour que les ampli-op soient dans leur région linéaire, il faut une différence de potentiel de 0.6V. Avec le gain, ça représente 7.2V. La plage effective était donc de 7.2 à 10V, ce qui limitait grandement la résolution. Les valeurs de R_A , R_B , R_C et R_S ont été baissées, ce qui augmente le courant, la sortie du pont de Wheatstone, mais aussi l'erreur thermique. Le gain est maintenant de 3.73 et la plage effective est de 2.25 à 10V, ce qui a grandement amélioré la résolution.

En regardant les courbes d'étalonnage des capteurs, on voit que la pente de la résistance en fonction de la température n'est pas constante. En effet, le capteur est beaucoup plus sensible proche de la température pièce et perd de la sensibilité aux hautes températures, donc aux hautes puissances. Puisque le bruit électronique reste constant, le rapport signal à bruit diminue. La mesure à haute puissance est donc plus bruitée. D'un autre côté, la perte de sensibilité à haute température aide à ne pas saturer et de pouvoir mesurer une puissance maximale plus élevée.

4.6.5 Développement logiciel

Un des principaux problèmes rencontrés dans l'analyse numérique des signaux par le logiciel concerne l'algorithme de triangulation. La solution proposée initialement utilisait la forme presque gaussienne du profil de température obtenu dans la simulation thermique, afin de lier par des équations simples la température des capteurs à la température maximale et la position du faisceau (voir l'annexe F). Malheureusement, l'ajout de rainures a brisé la symétrie radiale du filtre et donc du profil de température. On a rapidement remarqué que l'erreur sur la température maximale et sur la position devenait importante en supposant un profil indépendant de la position. Comme il était difficile de résoudre analytiquement le système des équations de température pour un profil autre qu'une gaussienne de largeur constante, la première partie de la solution a été d'implanter un VI de résolution d'équations non-linéaires. Celui-ci nous a permis d'utiliser une nouvelle approximation du profil, toujours gaussienne, mais cette fois-ci de largeur variable selon la position du centre. Ceci rajoutait un 4e paramètre variable aux équations (avec les coordonnées du centre et la température maximale), ce que permettent nos 5 thermistances. Si cette solution a certaines limites, développées à la section 9.5, elle a permis néanmoins de réduire les erreurs en position et en puissance. La simplicité du VI de résolution laisse aussi place à une amélioration future des équations utilisées.

Un autre problème important était lié à la caractérisation des thermistances. Même après l'ajustement du paramètre α , puisque leurs paramètres n'étaient pas connus avec précision, les valeurs de températures calculées ne l'étaient pas non plus, affectant du même coup les positions et les puissances mesurées. Ce problème s'est avéré évident avec les premiers résultats de tests, montrant que, pour une position constante, les températures évaluées n'augmentaient pas selon la puissance incidente avec un même gain pour toutes les thermistances, ce qui ne concordait pas avec nos simulations. Aussi, le retour à zéro était problématique, puisque les températures divergeaient progressivement en s'éloignant de la température de la pièce. Pour minimiser le problème, les paramètres de l'équation de Steinhart Hart pour chaque capteur ont été légèrement modifiés par des simulations successives de manière à ce que leurs gains de puissance à température soient aussi uniformes entre eux que possible. On voit bien à la figure B.10 que ces ajustements ont éliminé la légère pente

des échelons due principalement à la caractérisation erronée de la thermistance de référence.

Chapitre 5: Synthèse des travaux de conception et de modélisation

5.1 Optique-photonique

5.1.1 Modélisation du parcours optique

Le parcours optique est simple : le faisceau laser traverse un diffuseur pour ensuite être absorbé par un filtre. Dans cette sous-section, chaque composant optique est présenté, puis l'équation permettant de modéliser l'absorption de la puissance est présentée.

5.1.1.1 Filtre absorbant

L'objectif principal du système optique était d'absorber le faisceau de façon volumique dans un matériau fortement absorbant sur la plage de longueur d'onde désirée ([500, 2500] nm). Cela produit un échauffement du matériau pouvant être mesuré par les thermistances. Le changement de température mesuré peut ensuite être converti en puissance lorsque le puissance-mètre a été caractérisé correctement. Le matériau choisi pour remplir cette fonction est un filtre à densité neutre (NE2R30B [6]) fait de verre Schott NG9. Sa réflectance et sa transmittance sont présentées aux figures D.4 et D.5 respectivement. Il est possible d'observer qu'il possède une forte absorption à la longueur d'onde de design (790 nm), ce qui permet d'avoir un comportement optimal, puisque la sensibilité en K/W sera plus élevée donnant ainsi un meilleur signal à bruits. Cependant, aux longueurs d'onde plus élevées, il transmet beaucoup de puissance, ce qui diminue les performances du puissance-mètre à ces longueurs d'onde. Afin de compenser pour ces différences d'absorption, une correction spectrale est appliquée à la puissance mesurée (voir [sous-section 5.1.3](#)).

5.1.1.2 Diffuseur

Bien que le filtre absorbant possède une température de transition vitreuse élevée (470°C [7]), les simulations ont permis de déterminer qu'il serait préférable d'élargir le faisceau afin que la densité de puissance à la surface du filtre ne soit pas trop élevée. Il est également préférable d'élargir le faisceau, car cela permet de déterminer plus facilement la position du faisceau, puisque les thermistances plus éloignées seront toujours en mesure de mesurer un changement de température. La composante choisie pour atteindre ce but est un diffuseur fait au COPL pour une ancienne équipe [4]. Il est avantageux d'utiliser un diffuseur plutôt qu'une lentille, puisque celui-ci est insensible au désalignement du faisceau (son fonctionnement est le même sur toute la surface d'entrée du puissance-mètre) et il permet d'obtenir un faisceau à peu près gaussien peu importe l'allure du faisceau d'entrée (voir [figure D.1](#)). Ce comportement du diffuseur est important, puisque l'algorithme de triangulation permettant de positionner le faisceau pourra être grandement simplifié en assumant que la distribution de température est toujours gaussienne (voir [section 5.5](#)). L'angle de divergence du diffuseur déterminée en échantillonnant spatialement le faisceau avant et après le diffuseur est d'environ $7,31^{\circ}$.

5.1.2 Absorption de la puissance

L'absorptance totale du filtre est donnée par l'équation

$$A(\lambda) = \frac{P_{abs}(\lambda)}{P_0} = T_d(\lambda) \cdot (1 - R_f(\lambda) - T_f(\lambda)),$$

où A est l'absorptance, P_{abs} est la puissance absorbée, P_0 est la puissance incidente, T_d est la transmittance du diffuseur dépoli, R est la réflectance filtre et T_f est la transmittance du filtre.

Afin de trouver l'absorbée dans le filtre, il faut tout d'abord trouver la puissance transmise par le diffuseur en fonction de la longueur d'onde. Tel que mentionné dans la [sous-section 4.6.1](#), la transmittance du diffuseur a été déterminée en ajustant des données expérimentales aux courbes de transmittance fournie par Thorlabs pour le diffuseur DGUV10-120. Les résultats de cet ajustement sont présentés à la [figure D.5](#). Pour les longueurs d'onde supérieures à 2000 nm, la transmittance est considérée comme étant constante, car les données de Thorlabs étaient à peu près constantes pour les longueurs d'onde allant de 1975 nm à 2000 nm¹. Ensuite, il faut déterminer la puissance restant qui sera absorbée par le filtre en déterminant la réflectance et la transmittance du filtre. La réflectance est déterminée à l'aide des équations de Fresnel et la transmittance a été mesurée en laboratoire à l'aide du spectrophotomètre Cary 5000 d'Agilent. Les démonstrations et les résultats sont présentés à l'annexe [D.1](#). La [figure D.6](#) présente l'absorptance totale du système en fonction de la longueur d'onde.

5.1.3 Correction spectrale

Afin de considérer la dépendance en longueur d'onde du système optique, une correction spectrale sur la puissance doit être effectuée. En effet, l'absorptance de la puissance totale dans le filtre est fortement dépendant de la longueur d'onde telle que présenté dans la [figure D.6](#). La correction spectrale consiste à multiplier la puissance trouvée par la l'algorithme par un facteur. Le facteur possède la forme suivante :

$$C(\lambda) = \frac{A_{790nm}}{A(\lambda)},$$

où $C(\lambda)$ est le facteur de correction à la longueur d'onde désirée, A_{790nm} est l'absorptance du système à la longueur d'onde de design et $A(\lambda)$ est l'absorptance du système à la longueur d'onde désirée.

Le facteur de correction est normalisé par rapport à la longueur d'onde de design, puisque toutes les fonctions de transfert et l'algorithme de prédition de la puissance sont optimisés à cette longueur d'onde. La [figure D.9](#) présente le facteur de correction résultant de cette équation.

5.1.4 Caractérisation du faisceau laser et sécurité laser

La caractérisation du laser et la sécurité laser ont été présentées dans le rapport précédent, elles seront donc présentées brièvement. Pour caractériser la distribution spatiale du faisceau, celui-ci a été échantillonné spatialement en bougeant un sténopé le long d'un axe. Afin de déterminer le spectre à différentes puissances, un analyseur de spectre a été utilisé afin de mesurer la puissance à chaque longueur d'onde. Les résultats obtenus avant et après le diffuseur sont présentés aux figures [D.1](#) et [D.2](#). Pour la sécurité laser, les lunettes LG9 de Thorlabs [8] sont recommandées, puisqu'elles ont un OD de 7 à 790 nm, la longueur d'onde du laser. Ces lunettes permettent donc de diminuer la puissance incidente d'un facteur de 10 000 000, ce qui diminue les risques de blessures importants aux yeux si le faisceau est dévié ou s'il est dirigé directement dans les yeux de la personne.

5.2 Conception mécanique

La fonction principale de la cellule est de tenir le train optique. C'est pourquoi elle a été conçue en tenant compte des principes de base de l'optomécanique[9]. Premièrement, la position des pièces de l'assemblage est maintenue par leur géométrie ce qui fait qu'on n'est pas à la merci de la rigidité des fixations et que l'assemblage est incroyablement facile à effectuer tout en gardant un alignement conforme. De plus, deux vis servent à appliquer une précharge aux pièces ce qui donne une raideur très élevée à l'assemblage, et donc au train optique. Deuxièmement, les deux composantes optiques

1. Ce résultat n'est pas vraiment justifiable physiquement. Les appareils permettant de refaire ces mesures avec le vrai diffuseur n'étaient pas disponibles. Les améliorations possibles de cette approche seront discutées à la [section 9.1](#)



(a) CAD



(b) Réalisé

Figure 5.1 – Comparaison entre le modèle CAD et l'appareil réalisé

(c.-à-d. le diffuseur et le filtre) sont maintenues en place avec des joints toriques préchargés ce qui donne une raideur très élevée sur leur position et leur parallélisme. Avec ces joints, on a aussi une forme de protection des pièces optique, car si une grande force est appliquée, par exemple si on échappe la cellule, les joints restent flexibles et les pièces ne devraient pas casser.

Le filtre est monté sur un socle sur la face avant du dissipateur de chaleur. Cela rend le centrage du filtre à la main très facile lors de l'assemblage. Dans ce socle, deux rainures alignées avec celles dans le filtre sont coupées. Ces rainures servent d'endroit pour placer les capteurs et par où passer leurs fils. Cette particularité du design permet une flexibilité dans le nombre et le placement des capteurs. Cela a permis de mettre un capteur centré derrière le filtre qui s'avère être un énorme avantage, car on trouve expérimentalement que les mesures de puissance et de position sont plus exactes si le laser pointe directement vers un capteur. Certaines caractéristiques de l'assemblage du filtre ont dû déroger du design prévu. Pour plus de détails, voir la [section 9.2](#).

La face avant du capteur a un fini *sandblast* et est peinturée noir pour des raisons de sécurité optique. On estime qu'on n'a pas besoin d'une géométrie exotique de gestion de laser désaligné sur cette face, car elle serait difficile à fabriquer, son efficacité dépendrait de la nature du désalignement ce qui pourrait rendre l'appareil plus dangereux dans certains cas et que de rendre la trajectoire des réflexions facilement prédictible par l'utilisateur demeure une bonne solution.

Le boîtier placé dans l'assemblage sert à protéger les fils des capteurs et de les cacher de façon plus esthétique. Il sert aussi d'encrage pour le connecteur *D-Sub*. On a conçu un boîtier pour protéger la cellule pendant le transport et l'entreposage à long terme.



(a) CAD



(b) Réalisé

Figure 5.2 – Comparaison entre le modèle CAD et l'appareil réalisé

On a conçu un boîtier pour contenir le circuit électronique. Ce boîtier est connecté aux capteurs par un câble D-Sub. On utilise un interrupteur pour contrôler l'alimentation du circuit et une DEL pour indiquer son état.



(a) CAD



(b) Réalisé

Figure 5.3 – Comparaison entre le modèle CAD et l'appareil réalisé

5.3 Modélisation thermique

5.3.1 Modélisation thermique analytique

Une première modélisation de la cellule a été réalisée en régime permanent au début du projet. Ce modèle suggérait entre autres qu'en raison du faible temps caractéristique de diffusion de la chaleur dans le verre, il était nécessaire de considérer le développement d'un algorithme de prédiction de la puissance. Il avait également suggéré la possibilité de positionner les capteurs de température à l'intérieur de rainures creusées dans le filtre afin d'augmenter le gradient de température dans le plan des capteurs et afin d'avoir un temps de réponse sur la mesure de puissance plus faible suite à un changement de puissance incidente.

5.3.2 Modélisation thermique numérique

Afin de représenter adéquatement l'absorption volumique de la puissance dans le filtre, celle-ci a été modélisée à partir d'une source de génération de chaleur volumique. L'équation prend en compte le profil du faisceau à la sortie du diffuseur qui a été modélisé comme une somme de fonction gaussienne à partir des données empiriques obtenues en laboratoire. L'équation prend également en compte l'absorptance totale du système optique complet, la puissance initiale du laser, le diamètre du faisceau incident sur le filtre ainsi que le coefficient d'absorption du filtre. La fraction de puissance incidente atteignant la pâte thermique, elle, est modélisée par une source de génération de chaleur surfacique. En outre, étant donné que la température à la surface du filtre varie significativement et de manière localisée en régime transitoire, la température moyenne à la surface du filtre où le faisceau est incident est enregistrée lors d'une première itération. La surface est un cercle de diamètre équivalent à celui du faisceau. Par la suite, un coefficient de convection naturel est calculé à partir du profil de température obtenu. Le graphique B.2 montre les coefficients de convection appliqués en fonction du temps pour différentes puissances du laser. Finalement, le coefficient de convection dépendant du temps est injecté dans la simulation sur la surface en question. Pour les autres surfaces, étant donné que leur température moyenne est relativement constante, un coefficient de température constant est appliqué.

La simulation thermique a également permis de déterminer qu'il était avantageux de creuser des rainures dans le filtre et l'aluminium afin d'avoir un gradient de température plus élevé dans le plan des capteurs et un temps de réponse plus rapide sur l'estimation de la puissance. Les rainures dans le filtre ont une profondeur de 1 mm et une largeur de 1,6 mm alors que ceux dans l'aluminium ont une profondeur et une largeur de 1,98 mm. Un époxy thermique a été utilisé pour combler les rainures une fois les thermistances positionnées. L'époxy a une conductivité thermique de $1,2 \frac{W}{mK}$. Toutefois afin de déterminer quelle pâte thermique il était préférable d'utiliser dans les rainures de l'aluminium, des simulations ont été effectuées avec des pâtes thermiques de différentes conductivités thermiques. Le graphique B.1 montre l'effet qu'a la conductivité thermique de la pâte dans les rainures de l'aluminium sur la température maximale dans le plan des capteurs lorsque le faisceau est centré et que la puissance est de 10 W. Le gradient de température augmente significativement lorsque la conductivité diminue, mais la constante de temps de la fonction de transfert augmente elle aussi. Il a finalement été décidé de privilégier un grand gradient de température au détriment d'un temps de réponse un peu plus élevé. Les

propriétés thermiques des matériaux utilisés dans les simulations thermiques sont détaillées dans le [tableau B.1](#). Une résistance de contact entre le filtre et l'aluminium a également été modélisée à partir des propriétés thermiques de la pâte. L'épaisseur de la résistance de contact était de 0,45 mm.

5.3.3 Lien entre la température de la cellule de détection et la puissance laser injectée

Afin de faire le lien entre la température de la cellule de détection et la puissance laser injectée, il a été décidé de prendre la température relative des capteurs par rapport à la température du système d'ailettes. Lorsque la cellule est exposée au laser sur une période de temps relativement grande, le système d'ailettes peut chauffer significativement. Lorsque la puissance est coupée, la température des capteurs met beaucoup moins de temps à rejoindre celle du système d'ailettes que la cellule met de temps à rejoindre la température du milieu ambiant. Cette méthode permet donc une remise à zéro rapide de la puissance mesurée lorsque la puissance incidente est coupée subitement. La [figure B.4](#) montre l'importance de prendre la température du système d'ailettes comme température de référence. La [figure B.5](#) montre la puissance estimée à l'aide de l'algorithme prédictif et à partir de la température relative du capteur central par rapport au système d'ailettes.

Bien qu'il ait été possible d'approximer le profil du faisceau à la sortie du filtre comme étant une somme de plusieurs fonctions gaussiennes, ce profil n'est plus valide dans le plan des capteurs étant donnée la présence des rainures. Le passage de l'absorption volumique à l'absorption surfacique et le changement de la conductibilité thermique à l'interface entre le filtre et la pâte thermique dans une géométrie 3D relativement complexe rendent le profil de température dans le plan des capteurs dépendant de la position du faisceau par rapport au centre du filtre. Les rainures permettent certes d'augmenter le gradient de température dans le plan des capteurs en fonction de la puissance et de diminuer le temps de réponse du système, mais ils compliquent l'estimation de la puissance ainsi que l'estimation de la position du faisceau. La fonction de transfert entre la température où le faisceau est incident dans le plan des capteurs et la puissance du laser peut être approximée par une fonction de transfert de premier ordre, c'est-à-dire par l'équation [5.1](#).

$$H(s) = \frac{G}{1 + \tau s} \quad (5.1)$$

L'équation dépend à la fois de la puissance du laser et de la position du faisceau par rapport au centre du filtre. Le graphique [B.6](#) montre que le gain de la constante de temps varie relativement peu et de manière linéaire en fonction de la puissance. Le facteur qui influence le plus les paramètres de la fonction de transfert est la position. Les graphiques [B.7](#) et [B.8](#) montrent que le gain et la constante de temps décroissent de manière exponentielle lorsque le faisceau s'éloigne du centre du filtre. Toutefois, la dynamique de la décroissance dépend de la position du faisceau par rapport aux rainures. Les simulations n'ont pas permis d'établir une relation précise entre la température maximale dans le plan des capteurs et la puissance incidente. Pour parvenir à une relation, il a été nécessaire d'effectuer des courbes d'ajustement sur des données expérimentales lorsque la puissance incidente était connue.

5.3.4 Effet de la longueur d'onde

Bien qu'il n'ait pas été possible, d'utiliser des lasers à différentes longueurs d'onde pour les tests expérimentaux, les équations de génération de chaleur volumique et surfacique peuvent prendre en compte la longueur d'onde du faisceau par l'intermédiaire de l'absorptance et du coefficient d'absorption. Le graphique [B.12](#) montre la température relative du capteur central par rapport à la température de référence en fonction du temps pour différentes longueurs d'onde. Le faisceau est centré et la puissance incidente est de 10 W. Toutefois, ce graphique n'est valide que lorsque le diamètre du faisceau incident sur le filtre est de 13,38 mm. Ce diamètre a été déterminé expérimentalement. Il s'agit du diamètre mesuré à la sortie du diffuseur. Il ne peut être différent puisque le diamètre du faisceau à la sortie du diffuseur dépend de la longueur d'onde et que dans les simulations c'est cette valeur qui a été implantée dans les fonctions de génération de chaleur.

5.4 Électronique

5.4.1 Capteur

Le capteur choisi est le B57540G1103F005 de EPCOS - TDK Electronics. C'est une thermistance de $10\text{k}\Omega$ à 25°C avec une *B-value* de 3612K . Elle a été choisie pour sa petite taille et son temps de réponse rapide de moins de 1s . Elle a un diamètre de $(0,8 \pm 0,1)\text{ mm}$ et une hauteur de $(1,4 \pm 0,4)\text{ mm}$ ce qui va faciliter son insertion dans le filtre absorbant et permettre de mesurer la température de façon plus localisée. De plus, elle a une température maximale élevée de 200°C et une tolérance de 1% . Son prix est de $6,25\$$, ce qui est plus élevé que la moyenne, mais ses caractéristiques font en sorte que c'était le capteur le mieux adapté à nos besoins. Sa constante de dissipation thermique est de $0,4\text{ mW}/^\circ\text{C}$ [10].

Sa courbe d'étalonnage est présentée en annexes à la figure C.2 à l'aide du modèle de Steinhart-Hart :

$$\frac{1}{T - \alpha} = A + B \ln R + C(\ln R)^3. \quad (5.2)$$

A , B et C sont des paramètres obtenus expérimentalement qui donnent la forme de la courbe et α est le décalage expliqué à la sous-section 4.6.4. Tous les capteurs ont été étalonnés individuellement puisque la résistance en fonction de température est différente de ce qui est spécifié par le fabricant.

5.4.2 Circuit

Le circuit d'interrogation est présenté à la figure C.1 en annexe. La source principale d'alimentation vient d'un transformateur 15V DC . Un régulateur de tension 12V LM7418 et un condensateur en parallèle permettent de redistribuer $(11.95 \pm 0.01)\text{V}$ stable à tous les circuits. La première partie du circuit est un puits de courant. Celle-ci sert à garder un courant constant au pont de Wheatstone. Une explication quantitative est fournie en annexes.

Le courant est déterminé par la résistance R_S et le voltage V_{in} à l'entrée de l'ampli-op AOP1. Avec le diviseur de tension, le courant est de $100\ \mu\text{A}$.

$$I_s = \frac{V_{\text{in}}}{R_S} = \frac{V_{\text{CC}}}{R_S} \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = 390\ \mu\text{A} \quad (5.3)$$

Le puits de courant fait en sorte que le courant reste constant peu importe la charge du pont de Wheatstone. Ainsi, le courant total passant dans le pont est toujours de $390\ \mu\text{A}$. La deuxième partie du circuit est le pont de Wheatstone. Celui-ci permet de mesurer produire une tension entre les deux branches. En fixant un courant constant I_S , l'équation de la différence de potentiel est :

$$V_a - V_b = \frac{I_S(R_A + R_T)}{(R_A + R_B + R_C + R_T)} \left(R_B - \frac{R_A(R_B + R_C)}{(R_A + R_T)} \right) \quad (5.4)$$

Le pont est équilibré lorsque la résistance du capteur est de $R_{T_{\text{max}}}$, qui est définie comme suit :

$$R_{T_{\text{max}}} = \frac{R_A R_C}{R_B}. \quad (5.5)$$

Ainsi, l'équation qui donne le voltage au pont de Wheatstone devient :

$$V_a - V_b = \frac{I_S R_A R_C (R_T - R_{T_{\text{max}}})}{R_A R_{T_{\text{max}}} + R_T R_{T_{\text{max}}} + R_A R_C + R_C R_{T_{\text{max}}}}. \quad (5.6)$$

On voit donc qu'on a intérêt à choisir des valeurs de R_A et R_C élevées pour maximiser le signal. Par contre, le puit de courant marche dans la limite où R_S est dans les mêmes ordres de grandeur que les résistances du pont de Wheatstone. En choisissant des valeurs de $23.6\text{k}\Omega$, $33.1\text{k}\Omega$ et $23.6\text{k}\Omega$, pour R_A , R_B et R_C respectivement, on respecte cette condition et le $R_{T_{\max}}$ est de $16.82\text{k}\Omega$, ce qui équivaut à $13,0^\circ\text{C}$.

La dernière partie du circuit est le conditionnement du signal avec un amplificateur de mesure (*Instrumentation amplifier*, IN-AMP). Le IN-AMP permet d'amplifier une différence de potentiel avec une grande impédance d'entrée. Celui-ci peut être décortiqué en deux étages : un étage de tampon (*buffer*) et un étage d'amplification. L'étage de tampon est tout simplement un AOP en configuration de suiveur de tension pour isoler chacune des branches. Puisque l'AOP a une très faible impédance de sortie, cela permet d'utiliser un amplificateur différentiel, qui ne fonctionne que lorsque les résistances de rétroaction (*feedback*) sont beaucoup plus grandes que l'impédance d'entrée. Lorsque $R_{GA_1} = R_{GA_2}$ et $R_{GB_1} = R_{GB_2}$, le gain de l'amplificateur différentiel devient :

$$G = \frac{R_{GB_1}}{R_{GA_1}} = 3.73. \quad (5.7)$$

Le gain est ajusté pour que la différence de potentiel maximale au pont de Wheatstone soit de 10V pour profiter de la plage complète du DAQ. Le circuit a été soudé sur un *protoboard* pour assurer un bon contact et une certaine robustesse. Chacune des thermistances sur la cellule sont reliées au circuit par deux fils. La connexion est faite par un câble *D-Sub 15 PIN*. Des ports VGA ont été installés sur la cellule et le boîtier électronique. Le transformateur DC permet d'alimenter tout le circuit à partir d'une prise murale, ce qui est pratique. Le circuit est placé dans le boîtier électronique avec le DAQ.

5.5 Développement logiciel

Le logiciel a été développé sous la forme d'un instrument virtuel LabviewTM. Il est donc composé d'une face avant, qui sert d'interface utilisateur (IU), ainsi que du diagramme, qui traite les commandes, analyse les données et assure le bon fonctionnement de l'instrument. L'interface utilisateur est présentée aux figures E.1 et E.2.

5.5.1 Structure générale du diagramme

Le projet est basé sur un modèle de gestionnaire de messages dans une file d'attente avec DAQmx. Une boucle d'événements traite les commandes de l'utilisateur et envoie un message à la boucle de l'IU. Celle-ci gère l'activation des boutons, l'affichage des messages et la mise à jour des paramètres. Elle transmet aussi les messages et les paramètres aux autres boucles. La boucle d'acquisition, quant à elle, configure le DAQ, acquiert les données en continu et transmet périodiquement un *buffer* de données à la boucle d'analyse. La fréquence d'échantillonnage et la taille du *buffer* déterminent la fréquence d'analyse et d'enregistrement. La boucle d'analyse traite les données acquises par le DAQ. Elle envoie un ensemble de valeurs finales à la boucle d'enregistrement et à celle d'affichage. La boucle d'enregistrement configure le fichier de sauvegarde en format CSV, y ajoute directement les données après chaque itération de l'analyse, ou les assemble dans un tableau en attente de la commande *Enregistrer*. La boucle d'affichage est la plus simple, elle reçoit les valeurs sous forme de notification et met à jour le graphique de puissance, le schéma de position et les indicateurs numériques, tous visibles dans la face avant. Le fonctionnement du VI est illustré à l'annexe E.

5.5.2 Boucle d'analyse

La boucle d'analyse combine plusieurs fonctions. Elle doit ultimement produire des valeurs de position du faisceau et de puissance incidente aussi exactes et précises que possible. Les premières fonctions sont donc la triangulation du centre du faisceau et la conversion des tensions en puissance. La lenteur de la réponse dynamique du filtre demande une analyse prédictive pour retrouver la puissance avec un temps de réponse minimal. Comme l'analyse prédictive amplifie le bruit présent dans les mesures de tension, un filtre est aussi nécessaire pour maintenir une bonne précision. Un VI distinct, contenant uniquement la boucle d'analyse et un code pour lire les données en tension et simuler leur acquisition, a été développé pour optimiser les paramètres d'analyse malgré les données de test limitées.

5.5.3 Triangulation

La triangulation utilise la dépendance entre la température maximale dans le plan des capteurs, la distance du centre du faisceau et la température d'un capteur. On a donc une équation en température pour chaque capteur. Résoudre le système d'équations de température en connaissant les températures aux capteurs permet de retrouver la température maximale et les coordonnées du centre du faisceau dans le plan. Le profil de température est approximé par une gaussienne. La résolution du système est approfondie à l'annexe F. Les limites de l'algorithme de triangulation sont discutées à la section 9.5. La triangulation est désactivée lorsque la différence de température entre les capteurs est de l'ordre de grandeur du bruit, car les valeurs n'ont alors aucun sens physique.

5.5.4 Conversion

Comme la triangulation permet de passer de la température des capteurs au maximum de température, il nous reste à passer des tensions aux températures et de la température maximale à la puissance. La section 5.4 présente les équations utilisées pour passer des tensions aux températures, faisant intervenir les paramètres caractéristiques des thermistances et de leurs circuits. Puisque le capteur en entier accumule de la chaleur lorsqu'il absorbe la puissance du laser, on soustrait une température de référence mesurée sur le puits de chaleur et on obtient une température relative à convertir en température relative maximale. Finalement, en supposant un profil de température indépendant de la position, la température maximale dépend uniquement de la puissance. Comme prédict par la simulation, la relation entre les deux est presque linéaire. Le gain a été optimisé à partir des tests d'échelons de puissance au centre. La dépendance en position du gain réel rend donc ces valeurs moins optimales pour toute autre position du faisceau.

$$P = \frac{T_{\max}}{0.00339T_{\max} + 6.365} \quad (5.8)$$

5.5.5 Analyse prédictive

Idéalement, l'analyse prédictive consiste en la multiplication d'un signal par la fonction de transfert inverse du système. Pour une fonction de transfert de premier ordre avec gain unitaire, on additionne simplement au signal sa première dérivée multipliée par une constante (on utilise ici la dérivée discrète). Bien que la réponse dynamique de notre système ne soit pas parfaitement de premier ordre, cette approximation suffit à réduire considérablement le temps de réponse, et les dérivées d'ordres supérieurs sont trop sensibles au bruit. La constante de temps de réponse a été optimisée à 5.8, valeur qui permet un faible temps de réponse, mais crée de légers dépassements dans certains cas loin du centre.

5.5.6 Filtres, moyennage et contrôle de la variation

La fonction de filtrage sert à limiter le bruit présent dans les données présentées. Le bruit en tension est faible, de l'ordre de 10 mV d'amplitude. La conversion en température et l'analyse prédictive amplifient ce bruit. De plus, la triangulation génère des pics lorsque la puissance ou la position varie brusquement. Un filtre triangulaire sur une largeur d'environ 2.5s est utilisé pour lisser le bruit sur les tensions à l'entrée. Ce filtre affecte peu le temps de réponse et ne diminue pas la taille du *buffer*. Après l'analyse prédictive, les températures sont moyennées en une valeur unique par *buffer*. Ceci lisse également le bruit, mais sa raison d'être première est que la résolution du système d'équation ne peut être exécutée à haute fréquence, parce qu'elle peut prendre jusqu'à 50 ms. À cause de ce moyennage, on a intérêt à maximiser la fréquence d'échantillonnage pour diminuer le bruit. Une limite est fixée sur la variation des valeurs à la sortie de la triangulation. Cette limite est de 16 K/s en température et 1 mm/s. Elle peut donc limiter le temps de réponse pour un échelon de 15W ou plus, ou pour un changement important de position, mais élimine en contrepartie les divergences de la triangulation.

Un deuxième filtre triangulaire a été ajouté à la sortie de l'analyse, pour lisser ses effets non linéaires et minimiser le bruit.

Chapitre 6: Appareil de mesure



Figure 6.1 – Puissance-mètre développé par Photon Watté

Le puissance-mètre développé par Photon Watté est présenté à la figure 6.1. La cellule a été conçue afin que chaque pièce s'assemble et se positionne entre elles précisément seulement avec leur géométrie, pour assurer un meilleur alignement et parallélisme entre les composantes optiques. Le puissance-mètre repose sur l'absorption volumique dans un filtre pour mesurer la puissance d'un laser. Un diffuseur optique est placé avant le filtre pour augmenter le diamètre du faisceau laser. Le but étant de diminuer la densité de puissance pouvant faire fondre le filtre et de permettre une mesure de la position sur toute la surface. Le filtre (le NE2R30B de Thorlabs) absorbe la quasi-totalité de la lumière à une longueur d'onde de 790 nm, ce qui permet d'obtenir une bonne sensibilité. Lorsque le système optique est utilisé à haute puissance, le filtre n'est pas endommagé, puisqu'il possède une température de transition vitreuse élevée (470 degrés Celsius).

Dans le but de prédire une valeur de puissance et de position, la température est mesurée à cinq endroits derrière le filtre absorbant. Le capteur choisi est le B57540G1103F005 de EPCOS - TDK Electronics. C'est une thermistance qui a été sélectionnée pour sa petite taille, son temps de réponse rapide de moins de 1 seconde et sa température maximale élevée de 200 degrés Celsius. Les capteurs sont placés dans des rainures à l'arrière du filtre. Cela permet d'augmenter le temps de réponse et la sensibilité du puissance-mètre. Des rainures sont également présentes dans l'aluminium afin de faire sortir les fils des thermistances. Les thermistances sont reliés au circuit d'interrogation à l'aide d'un câble VGA 15 PIN. Ce circuit permet de relier l'ensemble des connexions au module d'acquisition (DAQ). La source d'alimentation principale provient d'un transformateur 15 V DC. Un condensateur est mis aux bornes de la source pour limiter les variations. La première partie du circuit est un puits de courant pour garder un courant constant au pont de Wheatstone. La deuxième partie du circuit est le pont de Wheatstone. Celui-ci permet de mesurer la résistance de la thermistance à partir de la différence de potentiel entre le centre des deux branches. La dernière partie du circuit est le conditionnement du signal avec un amplificateur de mesure (Instrumentation amplifier, IN-AMP). Le circuit est soudé sur un protoboard pour assurer un bon contact et une robustesse. Tout le circuit est fixé dans un boîtier de plastique afin qu'il soit protégé de l'environnement (voir figure 6.1).

La structure générale de l'outil logiciel est basée sur le modèle Mesure continue et enregistrement dans un fichier journal (NI-DAQmx) de Labview. Le logiciel LabVIEW Puissance-mètre Photon Watté permet d'obtenir la position en coordonnées cartésiennes du centre du faisceau à l'aide d'un algorithme de triangulation. La puissance est également obtenu en estimant la température maximale au centre du faisceau. Un algorithme de prédiction permet également d'estimer la température des capteurs en régime permanent, ce qui permet d'augmenter le temps de réponse à un échelon de position ou de puissance. Les données de puissances et de positions sont enregistrées dans un fichier csv si l'utilisateur désire

examiner les données mesurées.

En plus de la cellule, un boîtier de plastique a été fabriqué pour protéger la cellule lors du transport et de l'entreposage.

Chapitre 7: Confirmation du modèle thermique

Afin de confirmer le modèle thermique, le test de puissance en escalier a été effectué en laboratoire avec le prototype. La puissance en fonction du temps est montrée sur le graphique B.5. Les figures B.4 et B.9 montrent les résultats obtenus expérimentalement et les simulations correspondant aux mêmes tests. Pour le capteur du bas, la simulation est très fidèle aux résultats expérimentaux. Par contre, le capteur central et le capteur du haut sont moins représentatifs de la réalité. Le capteur du haut sous-estime la température réelle et le capteur central la surestime. Les capteurs de droite et gauche sont affectés par le même problème. Ce résultat suggère que la simulation est très sensible au positionnement des capteurs. Les distances des capteurs par rapport au centre ont été mesurées expérimentalement, mais l'incertitude de la mesure est élevée en raison de la difficulté de bien effectuer la mesure. Les simulations ont montré qu'il était possible de corriger la différence de température en déplaçant quelque peu les capteurs. La figure B.10 montre le profil de température du capteur du haut une fois sa position dans la simulation corrigée. La correction est de l'ordre du dixième de millimètre ce qui rentre dans l'incertitude de la prise de mesure. Le tableau 7.1 montre la distance mesurée entre les capteurs et le centre de filtre et la distance corrigée dans la simulation. Toutefois, il est important de retenir que les capteurs de la simulation sont des points singuliers et qu'ils n'ont pas de volume alors que les véritables capteurs ont un volume fini.

Tableau 7.1 – Distance entre les capteurs et le centre du filtre dans le plan des capteurs

Capteurs	Distances mesurées expérimentalement [mm]	Distances corrigées dans la simulation [mm]
± 0.3		
Haut	4.0	3.8
Droite	4.2	3.9
Gauche	3.5	3.3
Bas	3.5	3.5

Le graphique B.4 confirme également qu'il est avantageux d'utiliser la température du système d'ailettes comme température de référence telle que les simulations le suggéraient. Le graphique B.5 montre la puissance estimée à partir de la température relative des capteurs par rapport à la température de référence. La puissance estimée retourne bien à zéro lorsque la puissance incidente est nulle.

Des échelons de position effectués à puissance constante ont également été effectués sur le prototype puis ces mêmes tests ont été reproduits dans la simulation. La figure B.11 montre le profil de température relatif des capteurs du haut et du bas comme pour le test de l'escalier. Les simulations ont également été effectuées avec les positions corrigées des capteurs. Initialement, la position du faisceau est de $x = -1,83$ mm et $y = 1,83$ mm (voir le système de coordonnées de la figure B.14). À cette position, la simulation est bien moins représentative des données expérimentales. Les constantes de temps et les gains des fonctions de transfert simulés et réels sont significativement différents. Par contre, lorsque la position du faisceau est modifiée afin de revenir à zéro, les courbes de température relatives des simulations épousent relativement bien celle des données expérimentales. Il y a évidemment un décalage entre les données simulées et les données expérimentales, mais ce décalage est causé par le fait que la simulation n'est pas représentative de la réalité lorsque le faisceau est centré. La simulation n'est cependant pas nécessairement la source d'erreur. Des problèmes ont été rencontrés avec la caractérisation des thermistances. Afin de minimiser l'erreur de la caractérisation, les paramètres des thermistances implantés dans l'algorithme de *LabVIEW* ont été optimisés afin d'être le plus fidèles possible lorsque le faisceau est centré. Cette optimisation rend cependant l'algorithme de conversion de la tension en température moins

précise lorsque le faisceau n'est pas centré.

Chapitre 8: Caractérisation des performances de l'appareil de mesure

Afin de caractériser les performances du puissance-mètre, plusieurs tests ont été effectués en laboratoire. Les premiers tests ont permis d'ajuster les fonctions de transfert et l'algorithme prédictif. Ces tests ont également permis de réaliser que la caractérisation des thermistances n'était pas vraiment adéquate. Il a donc fallu ajuster leurs paramètres afin d'obtenir des performances adéquates. Aussi, le bruit était assez important avec l'algorithme initial, il a donc fallu ajouter un filtrage après l'algorithme de triangulation pour diminuer ce bruit. La figure 8.1 permet de visualiser la différence entre les deux algorithmes pour les mêmes données de tension échantillonées lors de la démonstration. Les autres données de performance ont été acquises à l'aide de tests d'échelon de position et de puissance.

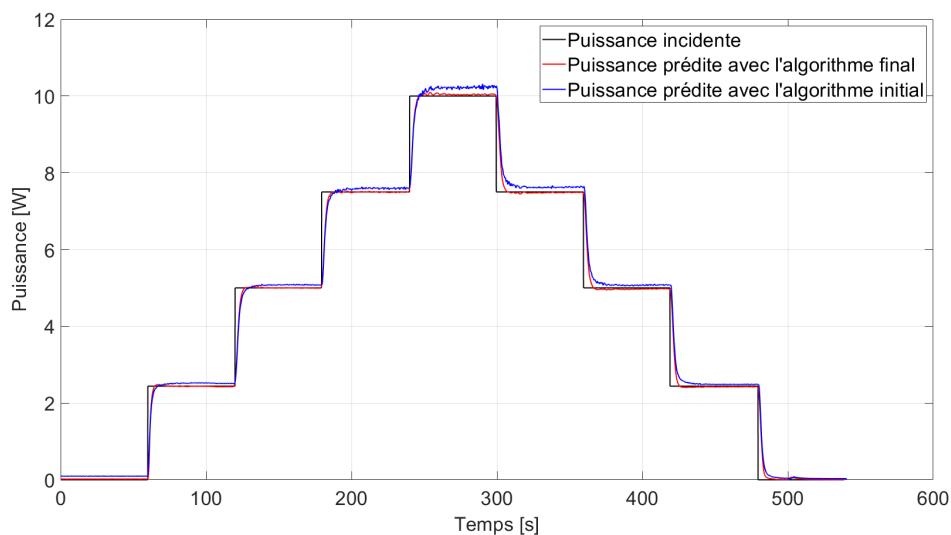
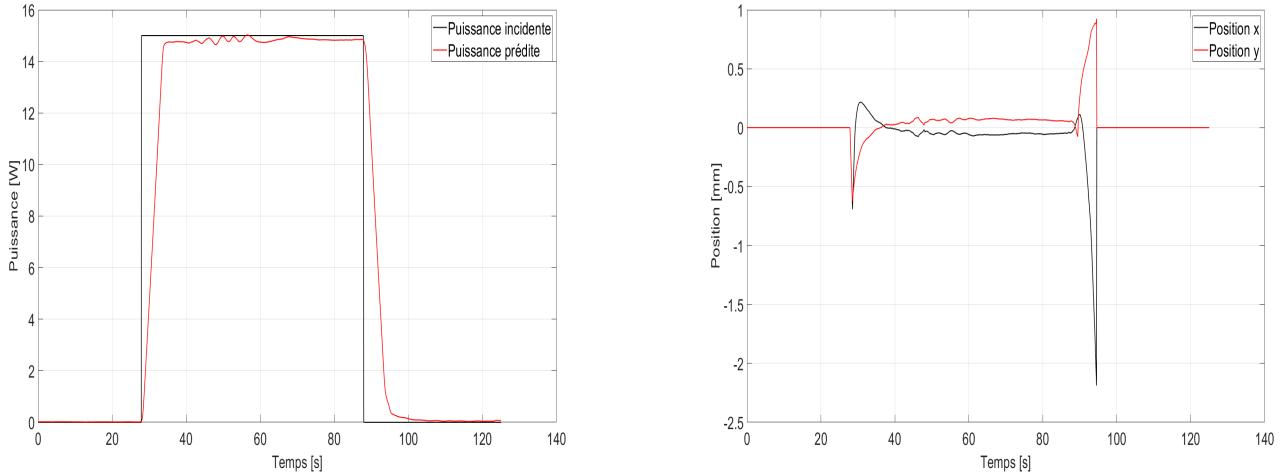


Figure 8.1 – Comparaison des puissances prédites par l'ancien et le nouvel algorithme pour les mesures prises lors du test de l'escalier de la démonstration

8.1 Puissance maximale mesurée

La puissance maximale mesurée par le laser en laboratoire était de 14,9 W (voir figure 8.2). Théoriquement le laser pourrait mesurer une puissance plus élevée avant que le circuit électronique sature. Par contre, selon les simulations, à 15 W, la température maximale du filtre est d'environ 480 °C (voir figure B.13). Comme il ne faut pas dépasser 500 °C lorsque le laser fonctionne en continu, cela représente la puissance maximale qu'il est possible de mesurer sans risque d'endommager le filtre.



(a) Puissance en fonction du temps mesurée pour un échelon de 15 W

(b) Position x et y en fonction du temps mesurée pour un échelon de 15 W

Figure 8.2 – Tests de la puissance maximale avec le nouvel algorithme

8.2 Temps de réponse

Pour mesurer le temps de réponse sur la puissance, on utilise le test de l'échelon. Il consiste à envoyer des échelons de puissances successifs de 2,44W, 5,0W, 7,5W, 10,0W, 7,5W, 5,0W, 2,44W et de revenir à 0. Le temps de réponse en puissance est le temps qu'il prend pour partir de 10% jusqu'à 90% de la variation du signal en régime permanent comme c'est illustré à la figure 8.3. Pour chaque échelon, les temps de réponse sont respectivement de 2,30s, 3,71s, 3,50s, 4,07s,

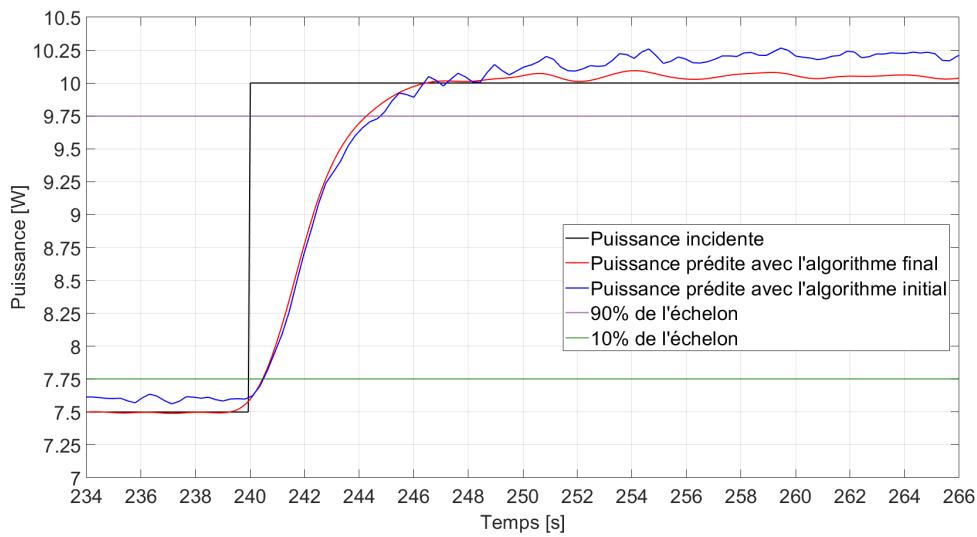


Figure 8.3 – Temps de réponse à l'échelon de 7,5W à 10W.

3,94s, 3,78s, 3,48s et 3,11s. Le temps de réponse en puissance serait de 4,2s en conditions normales d'utilisation, c'est-à-dire lorsque le faisceau est centré.

Pour le temps de réponse sur la position, le test consiste à allumer le laser lorsqu'il est déjà décentré sur le capteur. Puisqu'il y a un *overshoot* sur la position, il faut changer un peu la définition du temps de réponse. Elle serait plutôt définie comme le temps entre 10% de la variation et le moment où le signal est entièrement contenu dans $\pm 10\%$ du régime

permanent. Autrement dit, le temps de réponse est mesuré entre 10% et 110% de la valeur obtenue en régime permanent. Ainsi, en x le temps de réponse est de 5,98s et en y il est de 5,08s.

8.3 Précision sur la puissance

Pour mesurer la précision de l'appareil, on se basera sur l'exactitude et la dispersion de la mesure en régime permanent. L'exactitude de l'appareil est mesurée comme l'erreur RMS et la dispersion serait 3 fois l'écart-type du signal en régime permanent. En considérant que le bruit a une distribution gaussienne, on serait confiant à 99,7% que la dispersion réelle soit inférieure à 3σ . Les formules de l'erreur RMS et de l'écart-type sont données par

$$\varepsilon_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - P_{\text{Ref}})^2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \mu)^2}.$$

Ces caractéristiques sont mesurées sur le test de l'échelon et les valeurs de références sont de 2,44W, 5,0W, 7,5W et 10,0W tel que montré à la figure 8.1. L'erreur RMS et l'écart-type sont calculés pour chaque palier et on garde seulement le pire des cas. On aurait donc que l'exactitude est de 50 mW et que la dispersion de la mesure est de 40 mW.

Le cas le plus bruité correspond à la puissance de 10,0W. On peut voir la montée de 7,5W à 10,0W à la figure 8.3. On pourrait l'expliquer par la diminution de la sensibilité des capteurs à haute température. Le rapport signal à bruit serait donc plus faible tel qu'expliqué à la section 4.6.4.

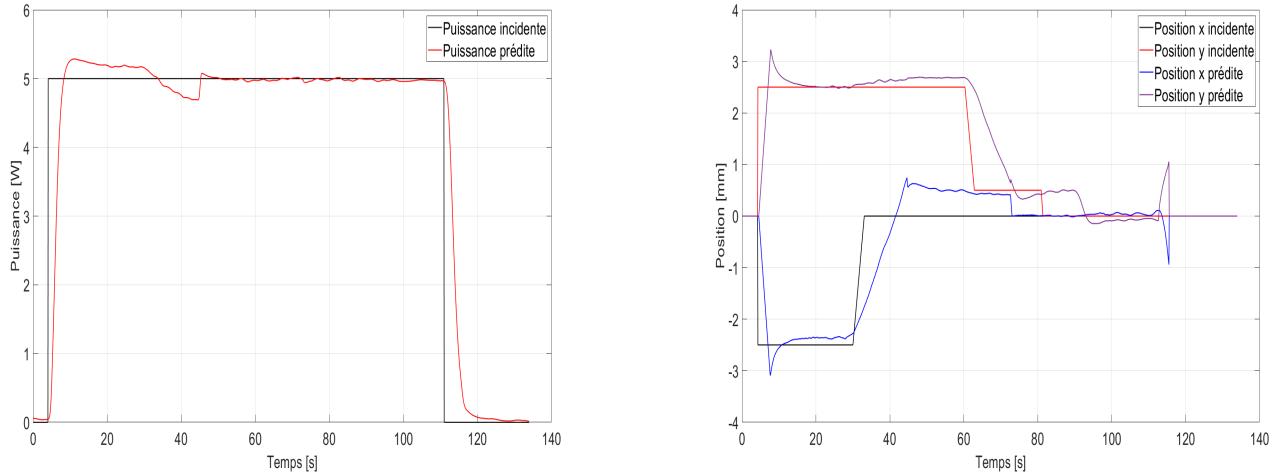
8.4 Précision sur la position

La précision sur la position est calculée de la même manière que la puissance. En régime permanent, on mesure l'erreur RMS ε_{RMS} par rapport à la valeur de référence et l'écart-type de la mesure σ . L'exactitude est évaluée comme l'erreur RMS et la dispersion de la mesure est de 3σ . À la figure 8.4, la plage de régime permanent utilisée pour l'écart-type est de 13,46 à 28,46s. Pour mesurer l'erreur RMS en x cette même plage est utilisée, mais en y la plage est plus grande et celle utilisée est de 13,46 à 59,61s. Les caractéristiques sont donc déterminées sur les données de la figure 8.4b.

En x , l'erreur RMS mesurée est de 0,13 mm et l'écart-type mesuré est de 0,04 mm. En y , l'erreur RMS mesurée est de 0,12 mm et l'écart-type mesuré est de 0,08 mm. Ainsi, en conditions normales, la position est exacte de 0,2mm et la dispersion de la mesure est de 0,1mm.

8.5 Retour à zéro

Grâce au capteur de référence positionné sur le puits de chaleur, le retour à zéro se fait automatiquement sans avoir de mise à zéro dans le logiciel. En effet, tous les calculs dans l'algorithme sont faits à l'aide des températures relatives au capteur de référence, tel que présenté à la figure B.9. En regardant les figures 8.1 et 8.2a, il est possible de voir que la puissance revient bel et bien à 0 lorsque la consigne est nulle.



(a) Puissance en fonction du temps mesurée pour des échelons de position

(b) Position x et y en fonction du temps mesurée pour des échelons de position

Figure 8.4 – Tests de l'algorithme de position

8.6 Puissance seuil mesurée

Lors des tests en laboratoire, la puissance minimale mesurée est de 200 mW lorsque le faisceau est centré (voir figure 8.5). Cette puissance a été choisie, puisque le bruit était autour de 80 mW avec l'algorithme utilisée initialement. Avec le nouvel algorithme, le bruit se situe autour de 10-15 mW. Il serait donc possible de mesurer une puissance encore plus petite (possiblement 40-50 mW). Cette mesure de puissance seuil est seulement valable lorsque le faisceau est centré.

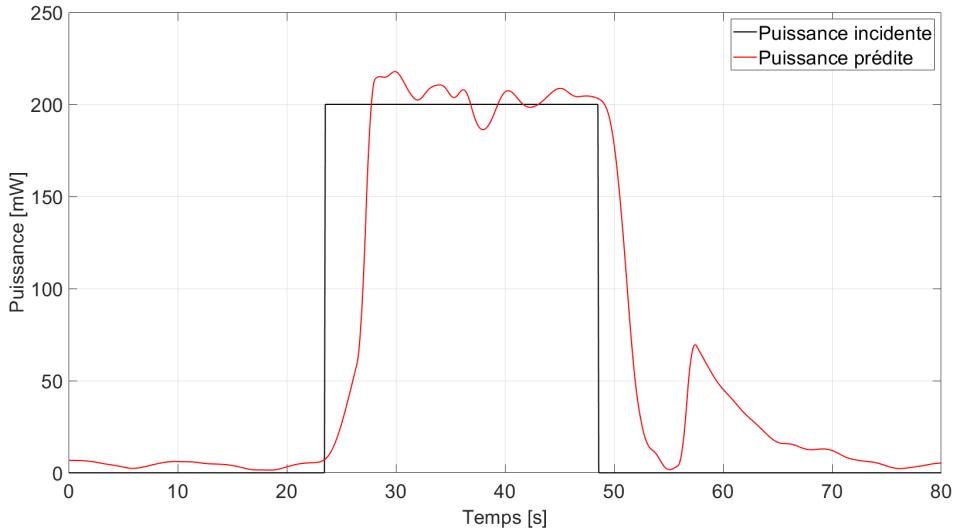


Figure 8.5 – Puissance minimale mesurée en laboratoire avec le nouvel algorithme

8.7 Algorithme de prédiction

L'algorithme de prédiction permet d'obtenir un temps de réponse sous le seuil du 5 secondes pour la puissance (voir section 8.2). En se référant à la figure B.5, sans l'algorithme de prédiction, le temps de réponse est d'environ 14 secondes,

ce qui ne répond pas aux attentes du client. L'algorithme prédictif est donc essentiel pour diminuer le temps de réponse, car le système ne répond pas assez rapidement aux échelons de puissance. De plus, comme la prédiction est faite sur la température qui est calculée avant l'algorithme de triangulation, cela permet d'améliorer le temps de réponse sur la position et sur la puissance en même temps au lieu d'avoir seulement un meilleur temps de réponse en puissance. C'est d'ailleurs ce qui permet d'avoir un temps de réponse autour de 6 secondes en position. Ce faible temps de réponse permet de suivre la position du laser en temps réel et de le centrer plus facilement.

Chapitre 9: Limitations et améliorations possibles de l'appareil de mesure

9.1 Conception optique-photonique

La principale limitation du système optique est le manque de données concernant le diffuseur utilisé. En effet, la transmittance a été déterminée à l'aide des données fournies par Thorlabs en ajustant avec des mesures expérimentales. Le problème avec cette méthode est que le diffuseur de Thorlabs n'est pas le même que celui fabriqué par le COPL, ils ont donc nécessairement des comportements différents. Idéalement, il aurait fallu avoir un système de sphères intégrantes avec un laser accordable afin de mesurer la vraie transmittance du diffuseur en fonction de la longueur d'onde. Cela n'aurait pas affecté les résultats obtenus, car la correction spectrale n'a pas été vérifiée à d'autres longueurs d'onde. Par contre, cela aiderait certainement à avoir une correction spectrale plus réaliste. Aussi, comme la distribution spatiale du laser a été mesurée à seulement deux distances et à une seule longueur d'onde, la vraie divergence du diffuseur est toujours inconnue. Il aurait fallu mesurer la distribution du faisceau à plusieurs distances et à une autre longueur d'onde pour que celle-ci soit bien caractérisée. Cela aurait permis de faire un choix distance-filtre plus judicieux au lieu de choisir une distance plutôt arbitraire.

Une autre limitation est la dépendance en longueur d'onde de la divergence du diffuseur. En effet, pour un diamètre d'entrée donnée, plus la longueur d'onde est grande, moins le faisceau laser sera large lorsqu'il atteindra le filtre. Cela signifie que même si deux faisceaux laser ont la même puissance et le même diamètre d'entrée, la température maximale au centre du faisceau sera différente. Cela pose problème pour la fonction de transfert qui est caractérisée pour les températures maximales du laser utilisé dans les tests. Pour résoudre ce problème, il serait nécessaire de trouver une correction de la fonction de transfert en puissance qui dépend de la largeur du faisceau incident sur le filtre. Cela peut potentiellement être fait en utilisant le paramètre a de l'équation (F.3) calculé par l'algorithme de triangulation lorsque le faisceau est centré.

9.2 Conception mécanique

La manière avec laquelle le filtre est fixé sur le dissipateur de chaleur est loin d'être optimale. La face du dissipateur de chaleur en contact avec le filtre aurait dû être aplatie comme prévu dans le design. En pratique, un époxy thermique a été utilisé pour coller les capteurs au filtre et le filtre au dissipateur. À cause de cela, une surface du filtre est rigidement fixée inutilement et cela pourrait casser le filtre si les contraintes thermiques sont trop grandes, car le filtre et l'aluminium n'ont pas la même dilatation thermique. Secondairement, cela enlève aussi l'accès aux capteurs. Si on avait eu accès à un marbre (*Surface plate*), on aurait pu aplatiser la surface et utiliser un autre matériel pour lier le filtre au dissipateur de chaleur. Par contre, les effets de cette amélioration ne sont pas tous connus et son efficacité reste à déterminer.

La méthode des rainures pour positionner les capteurs et leurs fils devrait être améliorée. En pratique, cette méthode nous oblige à fixer les capteurs avec de l'époxy thermique et de remplir les rainures aussi avec de l'époxy thermique. Bien qu'on utilise un outil pour positionner les capteurs (voir figure A.2), il est quand même difficile de les placer correctement. Ce problème est expliqué en détail à la section 9.3.

Les pièces en aluminium sont trop grosses. Cela ne nuit pas aux performances de l'appareil, mais elles ont beaucoup

plus de matière que nécessaire. Aussi, certaines pièces pourraient être combinées ensemble. En général, plus de métal pourrait être enlevé sur la plupart des pièces et le dissipateur de chaleur pourrait être fait à partir d'ailettes extrudées ce qui permettrait de faire un appareil plus compact.

Les boîtiers de transport et électronique ont été conçus pour l'impression 3D, mais ne requièrent que peu de modifications pour être propice à des procédés de fabrication industriels comme le moulage par injection. Il suffirait d'enlever certaines caractéristiques moins pertinentes et d'ajouter un angle de dépouille.

9.3 Aspect thermique

La présence des rainures dans le filtre et dans l'aluminium permet d'améliorer le gradient de température dans le plan des capteurs et de réduire le temps de réponse de la puissance estimée. Toutefois, les rainures empêchent le profil de température dans le plan des capteurs de rester presque gaussien indépendamment de la position du faisceau. Elles contribuent donc à complexifier l'algorithme de triangulation et l'algorithme de prédiction de la puissance. Afin de simplifier la géométrie dans le plan des capteurs tout en gardant un bon gradient de température et un temps de réponse relativement faible pour l'estimation de la puissance, il serait pertinent de diminuer l'épaisseur du filtre et faire passer les capteurs par l'arrière du système d'ailettes. Aucun trou ne serait percé dans le filtre. Les capteurs seraient simplement placés à l'interface entre le filtre et l'aluminium et une couche de pâte thermique serait appliquée à l'arrière du filtre. L'utilisation d'une pâte thermique à faible conductibilité thermique permettrait aussi de favoriser un gradient de température élevée au détriment d'un temps de réponse un peu plus grand pour l'estimation de la puissance.

9.4 Conception électronique

Un aspect limitant de la conception est la conception électronique est la plage dynamique. Le circuit est optimisé pour utiliser la plage 0-10V du DAQ. Même en changeant l'échelle, puisque les ampli-op sont alimentés avec 11.95V, on sortirait de leur plage linéaire peu après 10V. Ainsi, avec un gain de 3.73, le voltage maximal qu'on peut générer au pont de Wheatstone sans saturer serait de 2.68V. Sur le circuit le plus limitant, ça équivaut à une température de 154.3°C. Si le faisceau est centré sur le capteur correspondant, en utilisant la relation (5.8), ça équivaut à une puissance maximale de 22.8W. Ce serait donc la puissance maximale que le système pourrait supporter sans saturer. Les capteurs peuvent supporter une température maximale de 250°C alors l'élément limitant est vraiment la saturation du DAQ.

Le circuit limite aussi la température minimale de l'environnement dans lequel est le capteur. En effet, le $R_{T_{\max}}$, est la résistance à laquelle le pont est équilibré et il ne génère pas de tension. Par contre, il faut considérer que pour que les ampli-op soient dans leur plage linéaire, il faut au minimum une tension de 0.6V. Sur le circuit 4, le plus limitant, ça équivaut à une température de 19.5°C. Ainsi, le bon fonctionnement de l'appareil est seulement assuré lorsqu'il est dans un environnement au-dessus de 19.5°C.

Un autre aspect limitant de la conception est l'étalonnage des capteurs. La courbe obtenue semble beaucoup varier en fonction de la méthode utilisée et les paramètres ont une influence directe sur la mesure de température qui est reliée à la puissance. Idéalement, si le puissance-mètre était vendu à plusieurs exemplaires, il faudrait un montage avec un environnement plus contrôlé. Idéalement, les thermistances seraient caractérisées aussi lorsqu'elles sont fixées sur le filtre absorbant pour mieux refléter le comportement réel de l'appareil. Il pourrait être intéressant de faire le lien directement entre voltage et température. On caractériserait l'ensemble capteur-circuit et on n'aurait pas besoin de mesurer toutes les résistances une par une. Un exemple de montage pourrait être un four avec une température contrôlable à 0.2°C près. On mettrait l'appareil dans le four à une température donnée et on attendrait un certain temps pour s'assurer que toutes les composantes sont bien à la température du four. On pourrait automatiser le processus durant lequel on enregistre la tension alors que le four change sa température entre 15 et 120°C. De cette manière, on aurait une caractérisation plus précise et plus représentative du système. Il serait même possible de caractériser plusieurs puissance-mètre en même temps.

9.5 Logiciel

L'algorithme de triangulation utilisé, malgré ses avantages, a aussi plusieurs limites. Puisque l'approximation gaussienne du profil de température est imprécise en tenant compte des asymétries radiales de la cellule, l'évaluation de la position et de la température maximale est nécessairement faussée. Bien que rendre le terme de largeur du profil a variable permette de diminuer cette erreur, celle-ci demeure importante pour de grandes positions. Surtout, l'erreur est difficile à corriger parce qu'elle varie fortement sur la surface du capteur, de sorte que la puissance peut être sous-estimée à un endroit et surestimée au point correspondant dans un autre quadrant. Cette variation est due à la combinaison de l'asymétrie causée par les rainures, de l'incertitude sur leur géométrie et sur la position des thermistances, ainsi que de la caractérisation imprécise de ces dernières. Si ces imperfections étaient réduites, l'algorithme produirait sans doute des résultats plus précis. Sinon, plusieurs corrections dans le logiciel restent possibles. Par exemple, le facteur a pourrait être exprimé en fonction de la position du faisceau pour tenir compte de l'asymétrie du profil de température. Puisqu'une corrélation existe entre l'erreur en puissance et le terme a calculé, car la température maximale est moindre si le profil est plus large, une correction pourrait être appliquée en fonction de ce terme. Comme cette valeur varie fortement, cette correction représente surtout un défi de traitement numérique. Mieux encore, avec une série de tests rigoureux et poussés, il serait possible d'extrapoler les erreurs en puissance et en position pour toute position mesurée du faisceau, et donc d'établir des tables ou des fonctions analytiques de correction.

Le filtrage, le moyennage, le *slew rate* et l'analyse prédictive pourraient être optimisés davantage afin d'avoir à la fois un temps de réponse minimal, peu de dépassement et une sensibilité au bruit minimale. Comme le temps de réponse d'un capteur varie selon la distance du faisceau et d'autres paramètres, notre algorithme de prédiction constant produit toujours des temps de réponse trop lents dans certains cas et des dépassements dans d'autres. L'analyse prédictive pourrait être complexifiée pour tenir compte de la position, et ultimement même distinguer la réponse à des variations de position ou de puissance.

Finalement, l'utilisation de la barre d'état et des boîtes de dialogue utilisateur pourrait être étendue pour afficher davantage d'information, notamment dans la gestion des erreurs. Idéalement, un maximum des cas d'erreurs qui ne peuvent être prévenus devraient être expliqués à l'utilisateur sans dépendre des boîtes d'erreur peu conviviales de Labview. Un historique des messages pourrait aussi être implémenté pour que l'utilisateur accède rétroactivement aux messages importants.

Chapitre 10: Conclusion

Dans ce rapport final d'avancement du projet du développement d'un puissance mètre lasser, on a présenté un retour sur le cahier des charges qui a permis d'évaluer notre prototype avec un pointage de 95/100. La synthèse des travaux de conception et de modélisation a été abordée ainsi que la présentation et le fonctionnement de l'appareil de mesure. Suite aux tests en laboratoire, on a été en mesure de caractériser les performances et de déterminer les limitations du prototype.

L'appareil de mesure répond aux besoins du client ainsi qu'aux critères du cahier des charges. En effet, il satisfait les exigences de performance. Par exemple, il permet de mesurer une puissance moyenne d'un laser continu de 0 à 10 W. En tout temps, le temps de réponse est inférieur à 5 secondes. Les conditions de précision sur la puissance (inférieur à 5% de la puissance maximum) et la position (inférieur à 10% du diamètre d'entrée) sont respectées. En fait, l'exactitude sur la mesure en puissance et en position sont de 50 mW et de 0,2 mm respectivement. Dans le cas de l'aspect robustesse, le prototype respecte les conditions autant au niveau physique, électronique et logiciel. Concernant le volet esthétisme et convivialité, les conditions du module d'interrogation électronique, le logiciel labVIEW et le design de l'appareil sont entièrement satisfaits. Des modifications supplémentaires permettraient de bonifier le prototype afin qu'il obtienne le pointage de 100/100.

Bibliographie

- [1] GENTEC. *Mesure de puissance laser*. <https://www.gentec-eo.com/fr/puissance-metre-laser>. Date de consultation : 2021-02-04.
- [2] M BERNIER. « GPH-3110 Projet de conception en génie physique ». In : (jan. 2021), p. 2.
- [3] THORLABS. *DGUV10-600 - Ø1" UV Fused Silica Ground Glass Diffuser, 600 Grit*. https://www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=6337&pn=DGUV10-600. [En ligne ; accédé le 30 janvier 2021].
- [4] Équipe 4 — POWERUP. *Conception d'un puissance-mètre*. https://sitescours.monportail.ulaval.ca/contenu/sitescours/036/03613/202101/site125245/modules844749/module1071703/page2899738/bloccontenu280992%C3%89quipe4_1976nm_2019.pdf. [En ligne ; accédé le 20 mars 2021].
- [5] HYPERPHYSICS. *Mie Scattering*. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>. [En ligne ; accédé le 20 avril 2021].
- [6] THORLABS. *NE2R30B - Unmounted Ø2" Absorptive ND Filter, Optical Density : 3.0*. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=NE2R30B>. [En ligne ; accédé le 30 janvier 2021].
- [7] SCHOTT. *NG9 glass datasheet*. https://www.us.schott.com/d/advanced_optics/297bc6b7-4f93-4df7-8348-2fe1e0f810b8/1.11/schott-neutral-density-ng9-en.pdf. [En ligne ; accédé le 30 janvier 2021].
- [8] THORLABS. *LG9 - Laser Safety Glasses*. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=LG9>. [En ligne ; accédé le 12 mars 2021].
- [9] Katie SCHWERTZ et James H. BURGE. *Field Guide to Optomechanical Design and Analysis*. Avr. 2021. ISBN : 9780819491619.
- [10] EPCOS. *NTC thermistors for temperature measurement - B57540G Series*. [En ligne ; accédé le 9 février 2021]. 2009. URL : <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/328033/EPCOS/B57540G.html>.
- [11] MGCHEMICALS. *8329TFS - Thermal Adhesive. Long Working Time, Flowable*. [En ligne ; accédé le 22 avril 2021]. URL : <https://www.mgchemicals.com/products/adhesives/thermally-conductive-adhesives/thermally-conductive-adhesive/>.
- [12] Refractive INDEX. *Optical constants of BK7*. [En ligne ; accédé le 9 février 2021]. URL : <https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=BK7&page=SCHOTT>.

Annexe A: Design mécanique

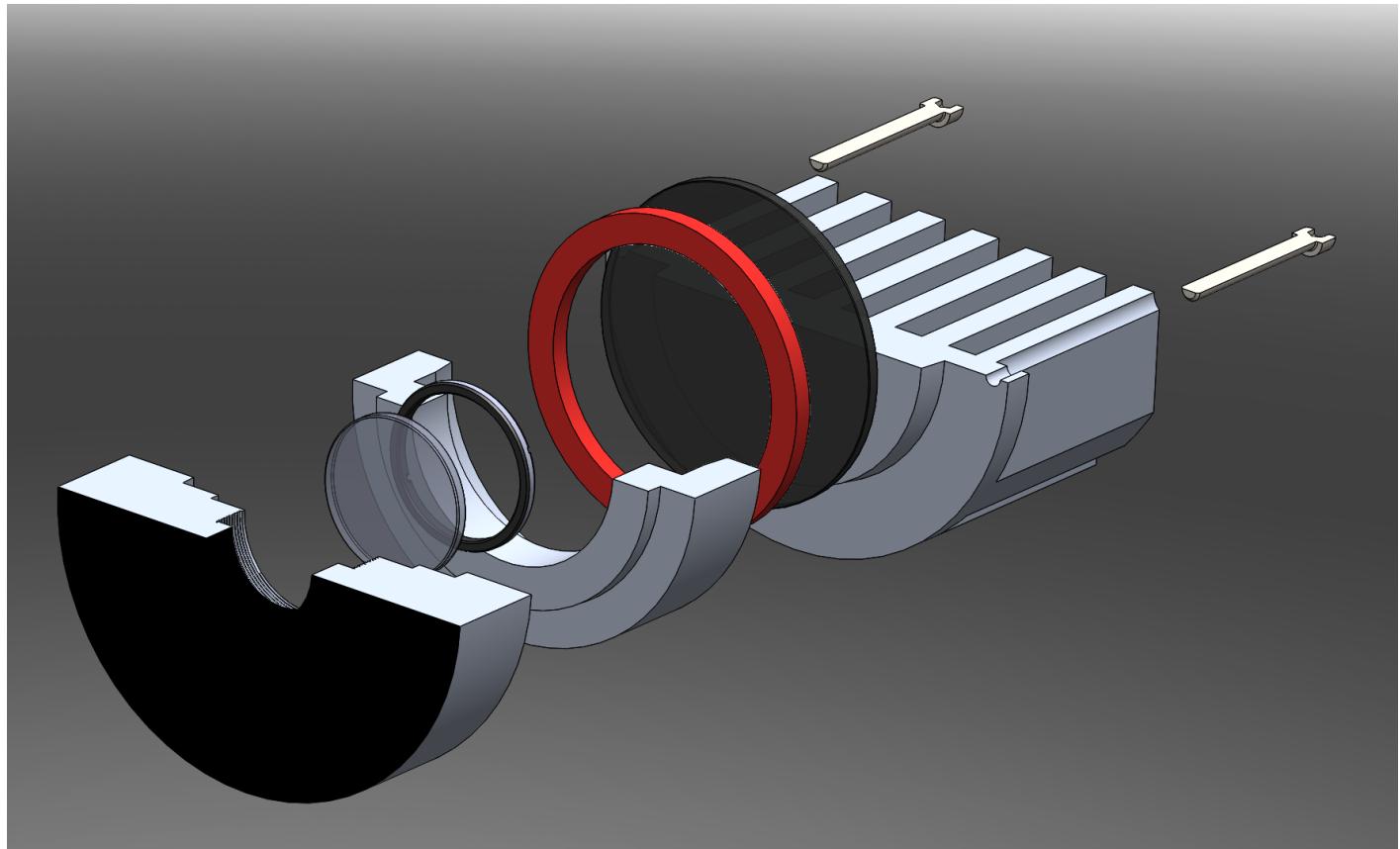
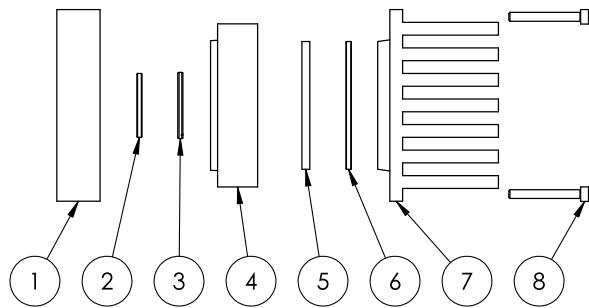


Figure A.1 – Vue auxiliaire en coupe du design mécanique

2

1

B



A



SCALE 1 : 5

SPONSORED BY



THORLABS

ITEM NO.	PART NAME
1	Aperture
2	Diffuser - 1"
3	Lock Ring
4	Housing
5	O-Ring
6	Filtre - 2"
7	Core
8	HX-SHCS 0.138-32x1.125x1.125-N

Photon Watté
Power Meter

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL	TITLE:	PRT. NO. 0		SIZE A	REV. 7
	SCALE: 1:2	SHEET 1 OF 8			

2

1



Figure A.2 – Outil servant à l’alignement des capteurs

Annexe B: Modélisation thermique

Le [tableau B.1](#) montre les propriétés thermiques des matériaux de la cellule de détection. Dans le cas du filtre, les propriétés ont été estimées à l'aide de filtres absorbants similaires puisque les propriétés du filtre NG9 ne sont pas données par le fabricant. La pâte thermique utilisé sur le prototype est la pâte thermique 8329TFS [11].

Tableau B.1 – Propriétés du filtre, de l'aluminium et de la pâte thermique utilisés dans la simulation

	Aluminium	Filtre NG9	Pâte thermique
Conductivité thermique [W/m · K]	237	1,13	1,2
Coefficient d'émissivité	0,07	0,96	-
Chaleur spécifique [J/kg · K]	902	765,2	-

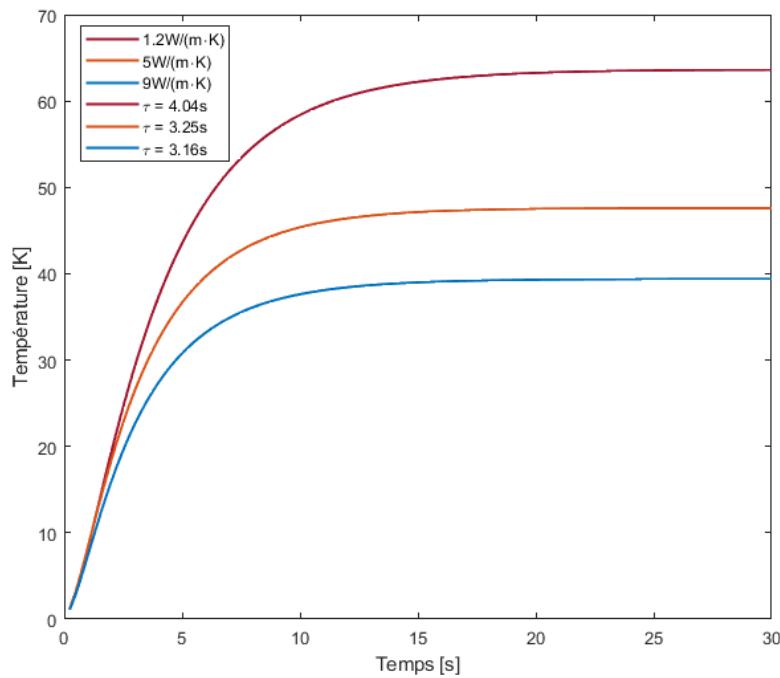


Figure B.1 – Température relative du capteur central par rapport au capteur de référence pour une puissance incidente de 10 W à 787 nm lorsque le faisceau est centré sur filtre en fonction du temps pour différente conductivité thermique de la pâte thermique dans l'aluminium

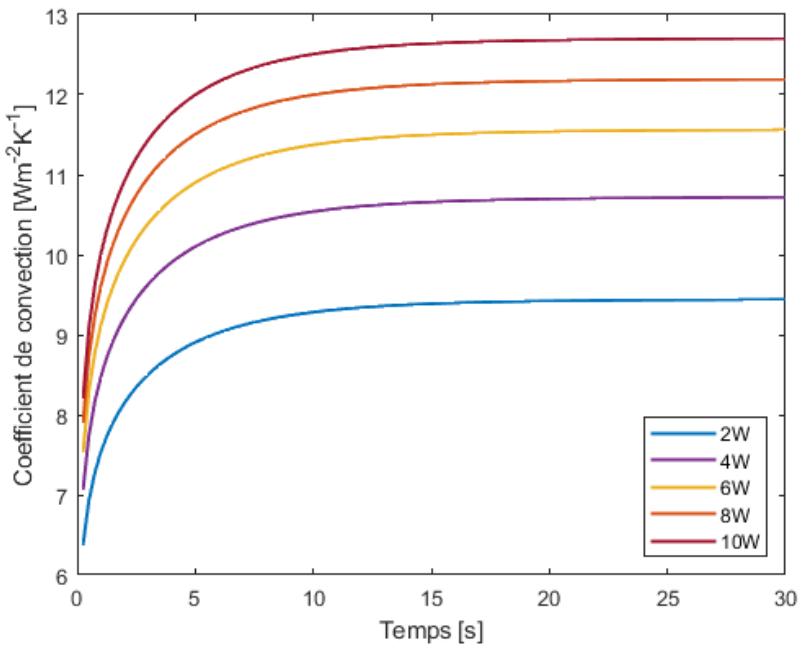


Figure B.2 – Coefficient de convection appliqué sur la région du filtre où le faisceau est incident en fonction du temps pour diff rantes puissances incidente

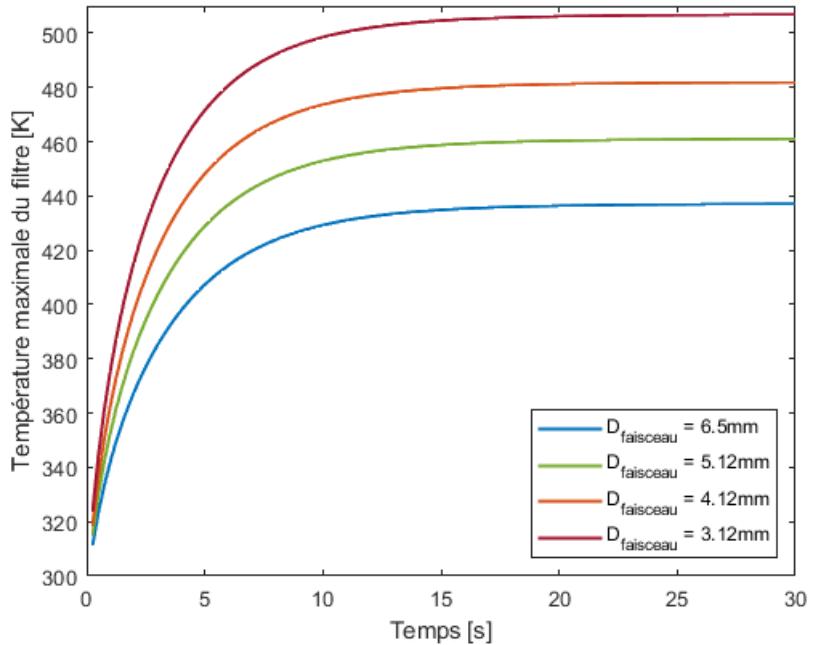


Figure B.3 – Température maximale du filtre en fonction du temps pour diff rantes diamètres du faisceau lorsque la longueur d'onde est de 787 nm, que la puissance est de 10 W et que le faisceau est centré

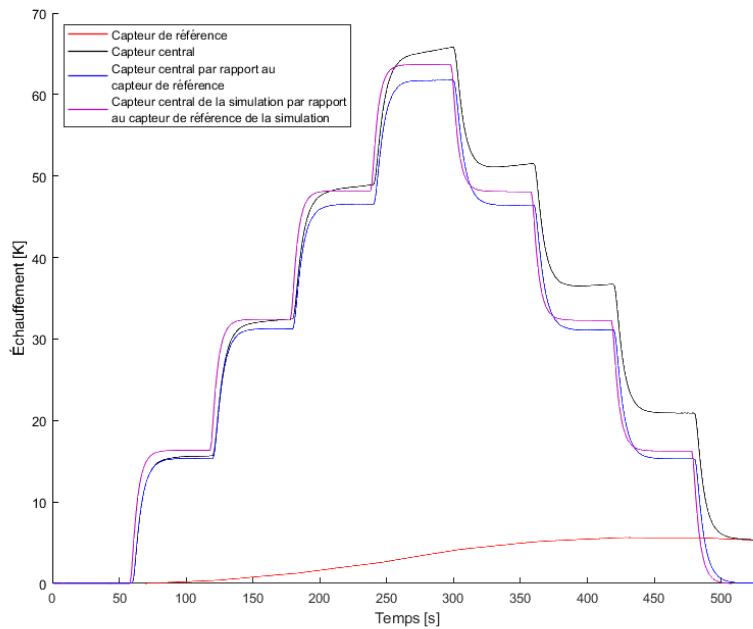


Figure B.4 – Échauffements du capteur central et du capteur de référence en fonction du temps et échauffement relatif du capteur central par rapport au capteur de référence en fonction du temps pour différentes puissances incidentes (0W, 2.5W, 5W, 7.5W, 10W, 7.5W, 5W, 2.5W, 0W)

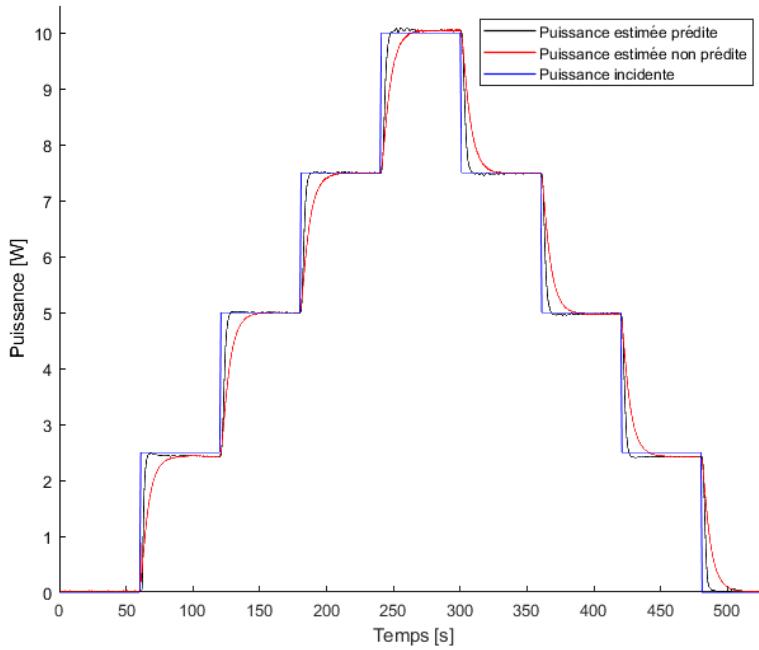


Figure B.5 – Puissances estimées prédict et non prédict en fonction du temps pour différentes puissances incidentes

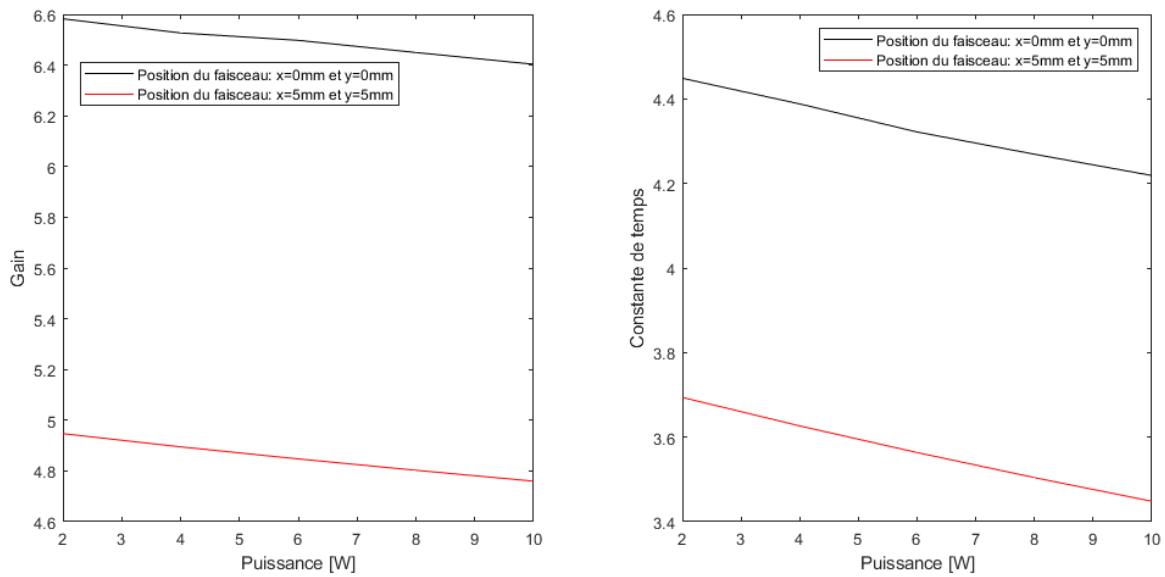


Figure B.6 – Gain et constante de temps de la fonction de transfert entre la puissance incidente et la température maximale dans le plans des capteurs en fonction de la puissance incidente pour différentes positions du faisceau incident

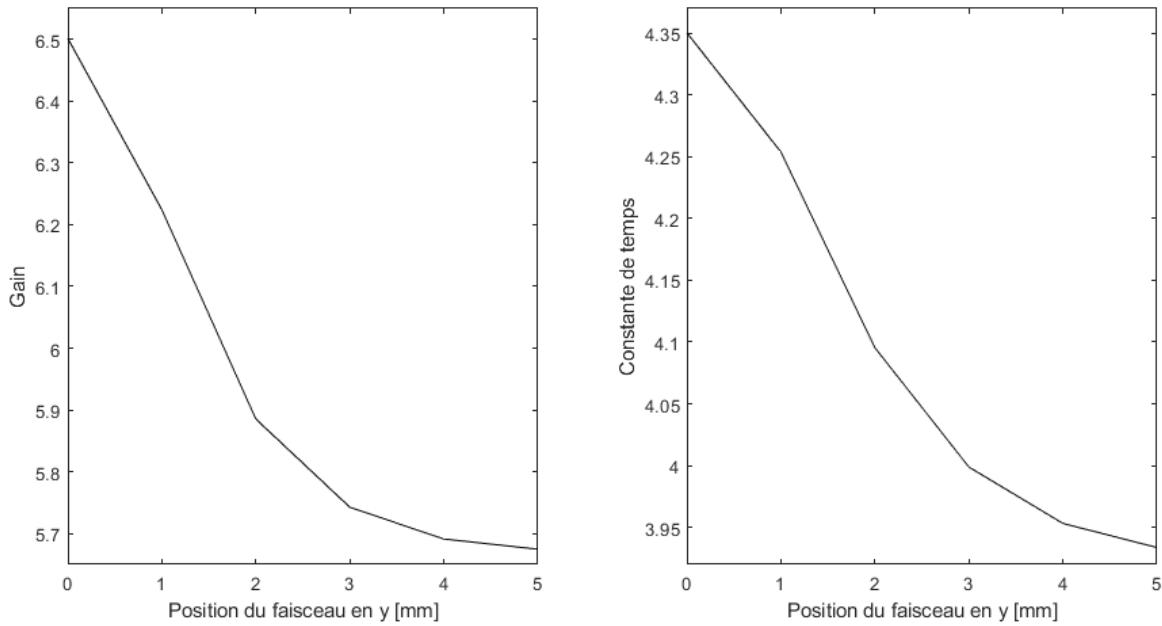


Figure B.7 – Gain et constante de temps de la fonction de transfert entre la puissance incidente et la température maximale dans le plan des capteurs en fonction de la position du faisceau lorsque celui-ci se déplace dans les rainures ($x = 0\text{mm}$) pour une puissance de 8W

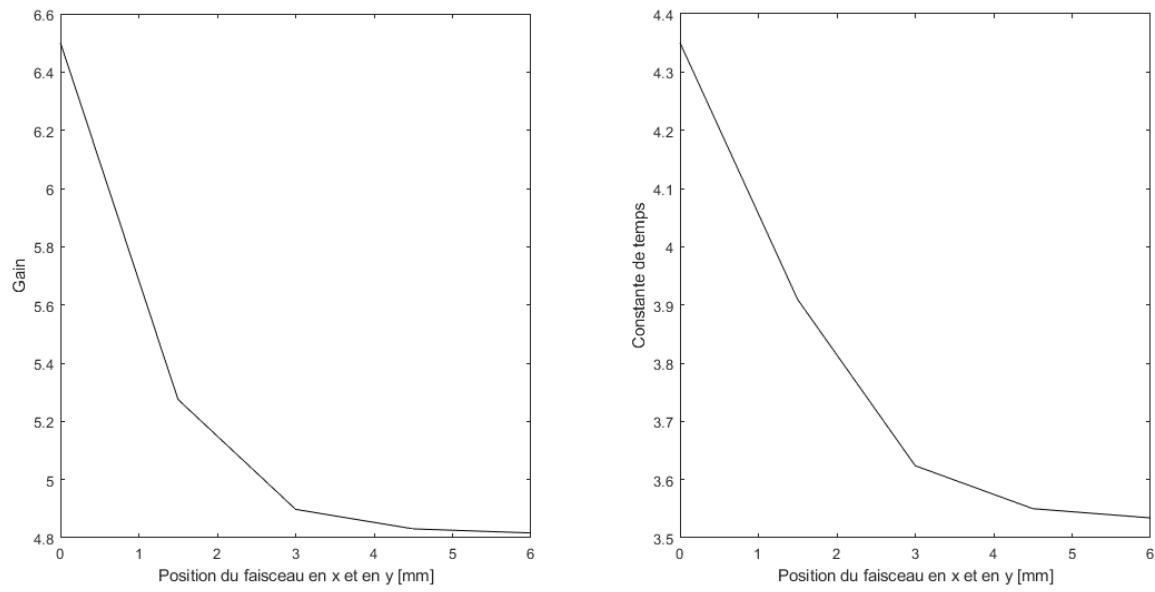


Figure B.8 – Gain et constante de temps de la fonction de transfert entre la puissance incidente et la température maximale dans le plan des capteurs en fonction de la position du faisceau lorsque celui-ci se déplace entre les rainures pour une puissance de 8W

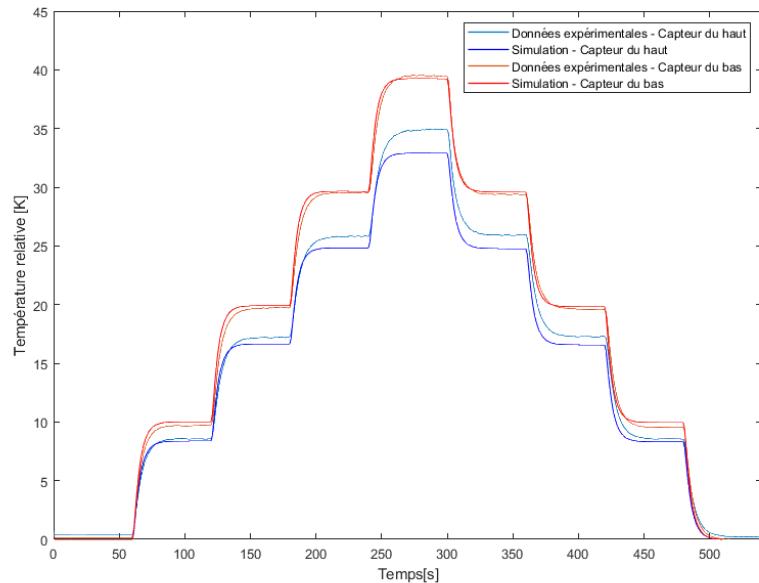


Figure B.9 – Température relative des capteurs par rapport à la température de référence pour la simulation et les données expérimentales lorsque le faisceau est centré

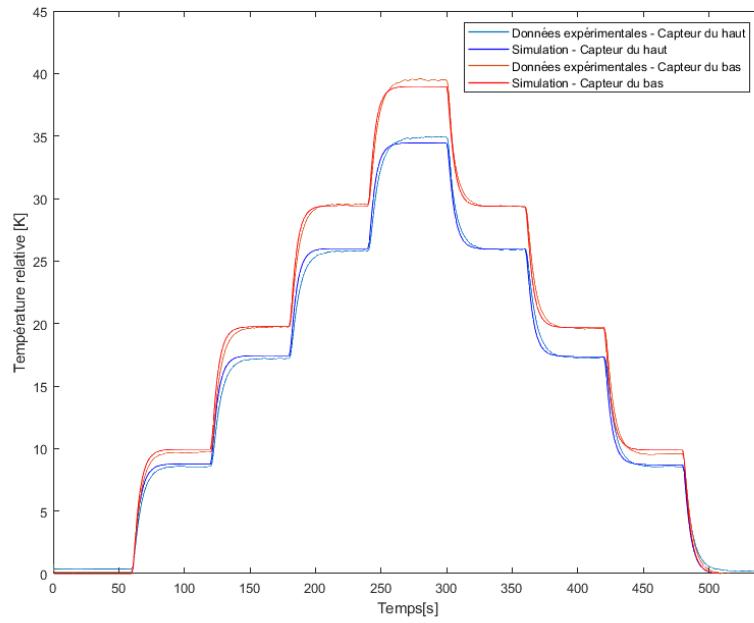


Figure B.10 – Température relative des capteurs par rapport à la température de référence pour la simulation et les données expérimentales en fonction du temps lorsque le faisceau est centré et que la position des capteurs est corrigée

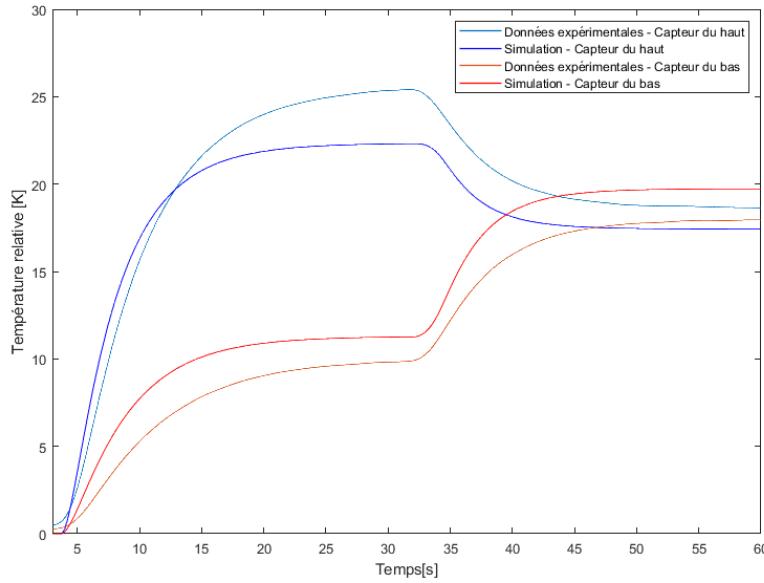


Figure B.11 – Température relative des capteurs par rapport à la température de référence pour la simulation et les données expérimentales en fonction du temps lorsque le faisceau subit un échelon de position et que la puissance est de 5W (La position passe de $x = -1.83\text{mm}$ et $y = 1.83\text{mm}$ à $x = 0\text{mm}$ et $y = 0\text{mm}$)

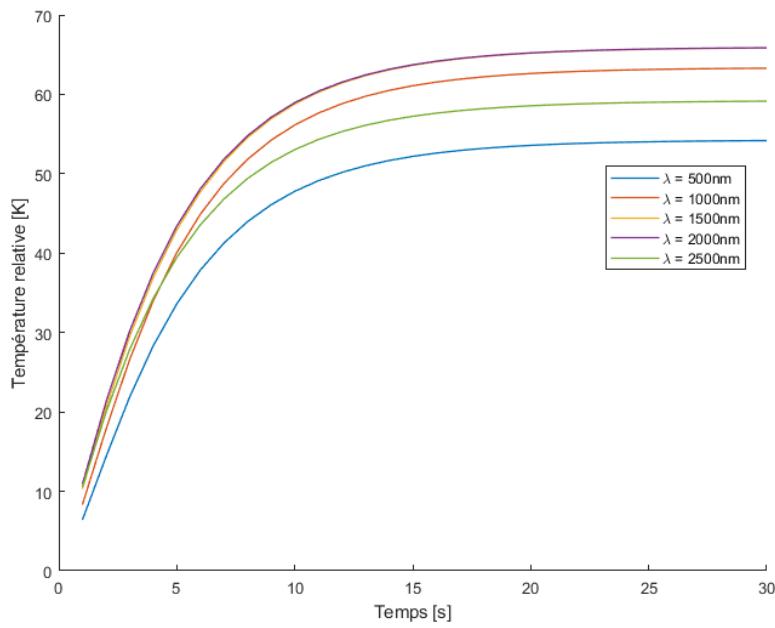


Figure B.12 – Température relative du capteur central par rapport à la température de référence en fonction du temps pour différentes longueurs d'onde lorsque le faisceau est centré et que la puissance est de 10W

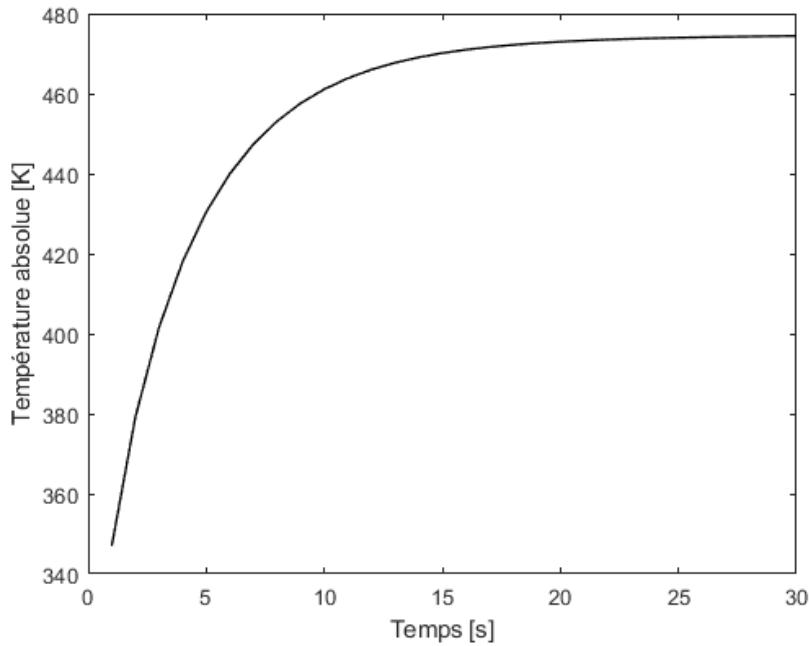


Figure B.13 – Température absolue maximale en fonction du temps pour une puissance de 15W lorsque le faisceau est centré

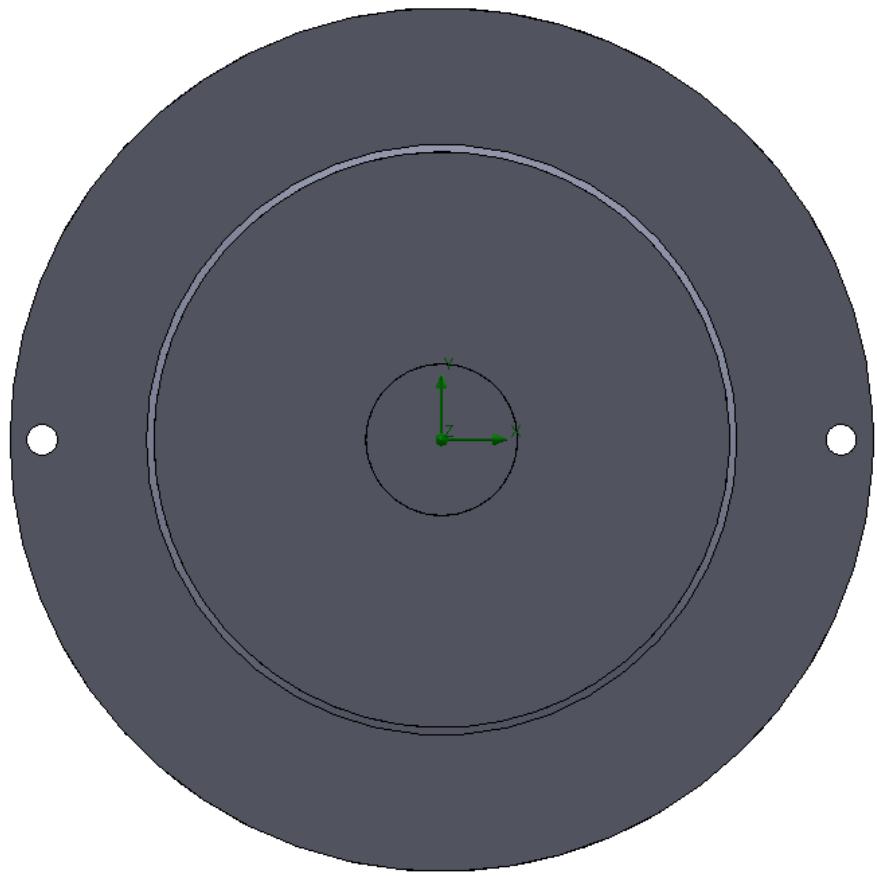


Figure B.14 – Système de coordonnées de la simulation

Annexe C: Conception électronique

Annexe C.1. Circuit

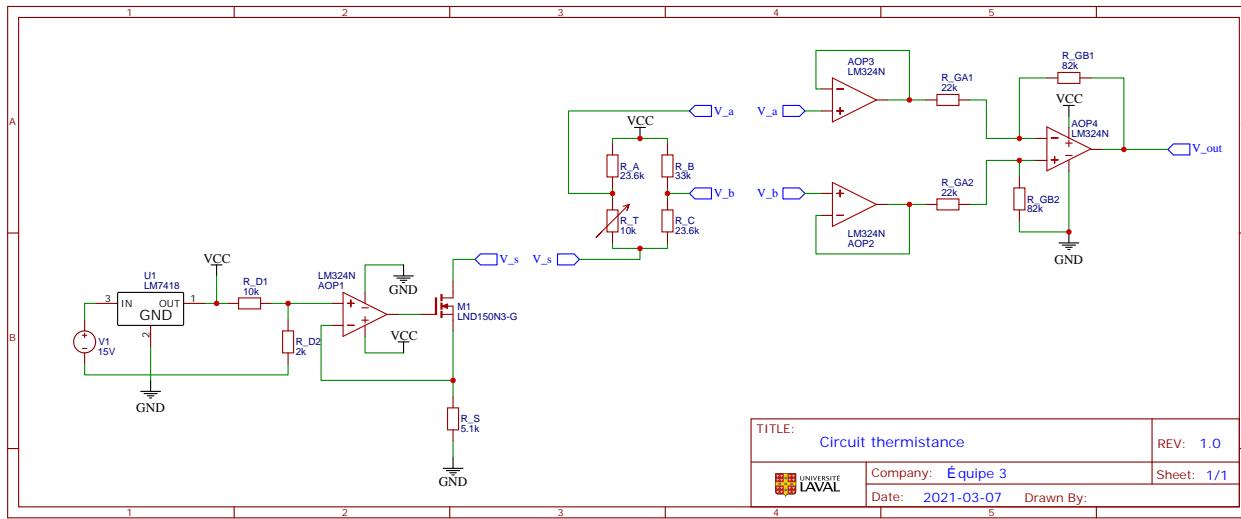


Figure C.1 – Circuit d'interrogation.

Annexe C.2. Courbe d'étalonnage des capteurs

La figure C.2 présente la résistance de la thermistance B57540G1103F005 en fonction de la température selon les données du fabricant.

Tableau C.1 – Paramètres des courbes d'étalonnages des capteurs.

Circuit	1	2	3	4	5	6
R_{D1} [Ω]	9992	9997	9997	9992	9994	9993
R_{D2} [Ω]	2002	1995	1997	1994	2003	2004
R_S [Ω]	5115	5102	51140	5126	5108	5107
R_A [Ω]	23644	23582	23636	23666	23657	23656
R_B [Ω]	33141	33057	33122	33090	33129	33064
R_C [Ω]	23699	23613	23740	23547	23689	23640
G_a [V^{-1}]	-0.002792	-1.056·10 $^{-3}$	-1.006·10 $^{-3}$	1.610·10 $^{-3}$	-1.5878·10 $^{-3}$	-1.748·10 $^{-3}$
G_b [-]	3.746	3.744	3.752	3.712	3.729	3.757
A [K^{-1}]	0.002267	5.175·10 $^{-4}$	7.167·10 $^{-4}$	8.180·10 $^{-4}$	7.765·10 $^{-4}$	9.379·10 $^{-4}$
B [K^{-1}]	0.0000029	3.278·10 $^{-4}$	2.944·10 $^{-4}$	2.745·10 $^{-4}$	2.831·10 $^{-4}$	2.527·10 $^{-4}$
C [K^{-1}]	0.0000001	-2.342·10 $^{-7}$	-1.008·10 $^{-7}$	7.617·10 $^{-9}$	-4.412·10 $^{-8}$	1.149·10 $^{-7}$
α [°C]	0.377	0.234	0.659	0.333	0.789	0.044

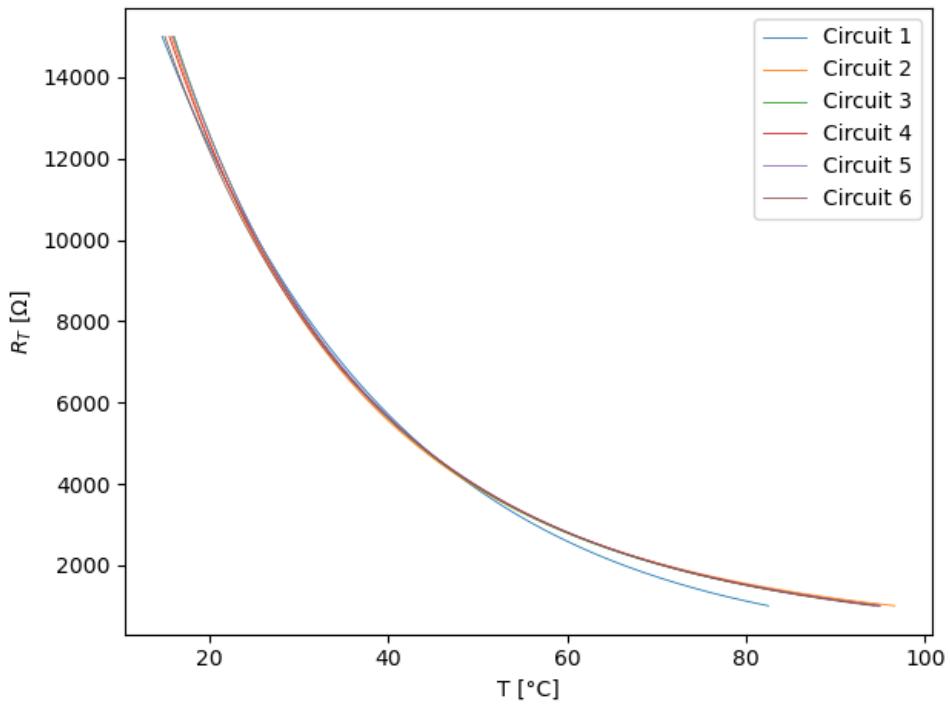
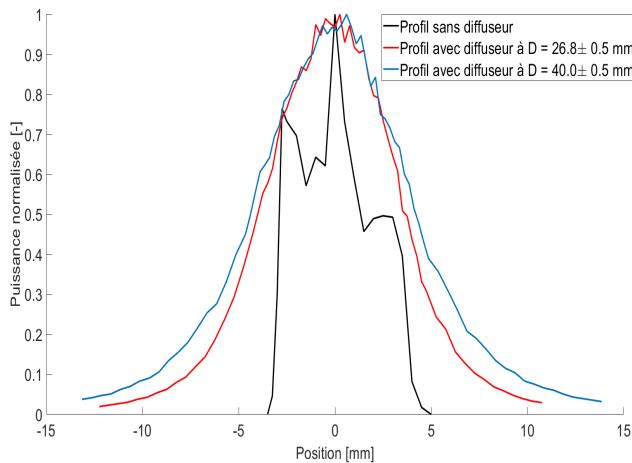
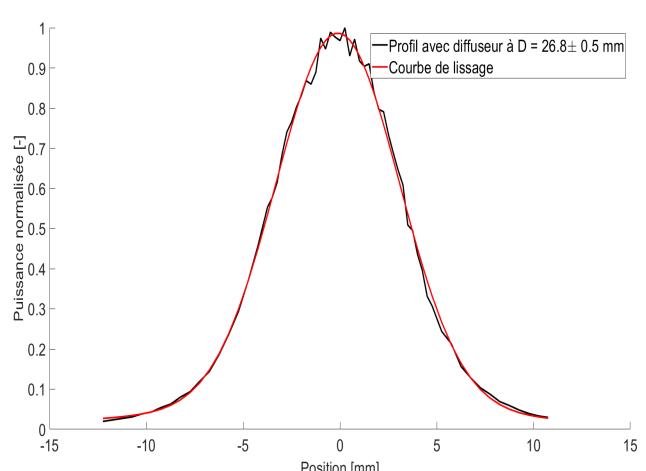


Figure C.2 – Courbe d'étalonnage de la résistance en fonction de la température pour la thermistance B57540G1103F005.

Annexe D: Caractéristiques des composantes optiques



(a) Données expérimentales du faisceau mesurées avec la technique du sténopé avec et sans le diffuseur. La distance D représente la distance entre le diffuseur et le détecteur



(b) Courbe de lissage composée de trois gaussiennes pour la distance de $D = 26,8 \pm 0,2$ mm entre le diffuseur et le détecteur

Figure D.1 – Résultats de la mesure du faisceau à l'aide de la technique du sténopé

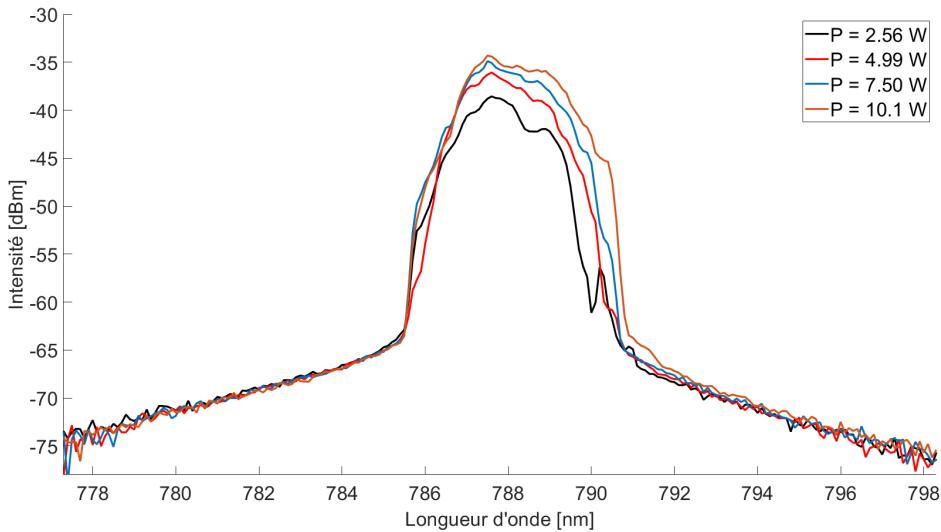


Figure D.2 – Spectre du laser mesuré avec l’analyseur de spectre pour différentes puissances incidentes

Annexe D.1. Caractéristiques des composants optiques

Dans cette section, les équations et les données permettant de trouver l’absorptance totale et le coefficient d’absorption du filtre NE2R30B sont présentés. L’absorptance est donnée par l’équation

$$A(\lambda) = \frac{P_{abs}(\lambda)}{P_0} = T_d(\lambda) \cdot (1 - R_f(\lambda) - T_f(\lambda)),$$

où A est l’absorptance, P_{abs} est la puissance absorbée, P_0 est la puissance incidente, T_d est la transmittance du diffuseur dépoli, R est la réflectance filtre et T_f est la transmittance du filtre.

Pour la réflectance, il faut tout d’abord déterminer l’indice de réfraction des matériaux à l’aide de l’équation de Sellmeier. Pour le filtre, l’équation de Sellmeier du verre NG9 est

$$n_{NG9}(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{0,849885\lambda^2}{\lambda^2 - 0,010965} + \frac{0,393971\lambda^2}{\lambda^2 - 0,009155} + \frac{70,320558\lambda^2}{\lambda^2 - 7863,540}},$$

où λ est la longueur d’onde en μm . Les coefficients ont été fournis par la compagnie Schott. Comme ces coefficients sont valides seulement de $0,5 \mu m$ à $1,5 \mu m$, les coefficients du verre Schott N-BK7 ont été utilisés pour le reste de la plage de longueur d’onde en ajustant la courbe pour la normaliser à celle du NG9 [12]. L’indice de réfraction du filtre est présenté à la figure D.3.

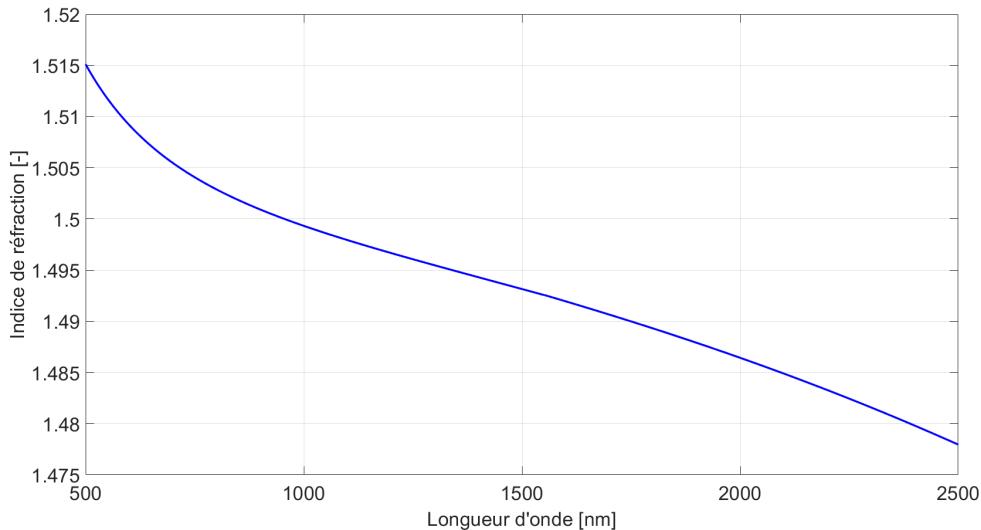


Figure D.3 – Indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde pour le filtre NE2R30B

La réflectance R est ensuite déterminée à l'aide des équations de Fresnel. À incidence normale, la réflectance est donnée par

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2,$$

où $n_1 = 1$ est l'indice de réfraction de l'air et n_2 est l'indice du composant.

Pour la transmittance du filtre et du diffuseur, des données données expérimentales sont utilisées. Les données du filtre ont été obtenues à l'aide d'une mesure fait au spectrophotomètre et les données du diffuseur ont été obtenues en ajustant des mesures fournies par Thorlabs pour un diffuseur similaire. Les figures D.4 et D.5 présentent les données pour la réflectance et la transmittance du filtre. La figure D.6 présente l'absorptance totale du filtre en considérant les pertes dues au diffuseur.

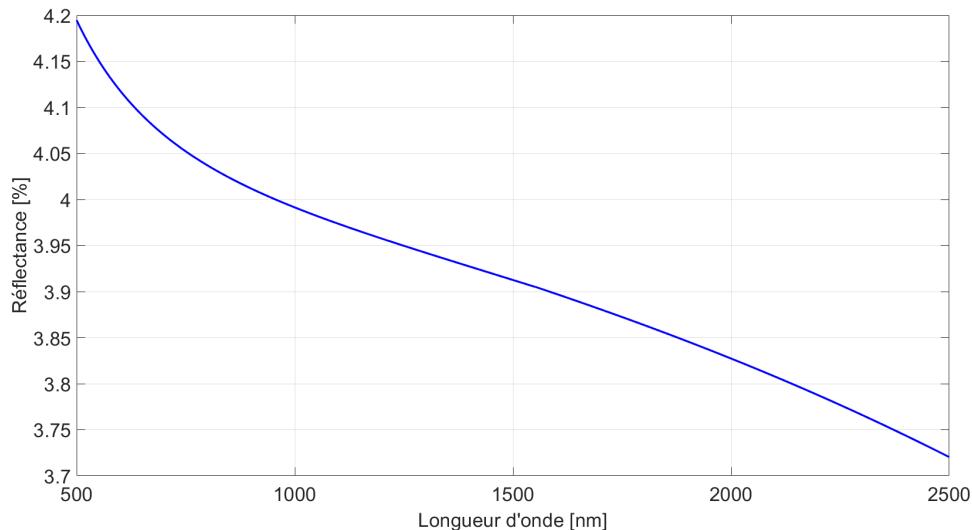


Figure D.4 – Réflectance en fonction de la longueur d'onde pour le filtre NE2R30B

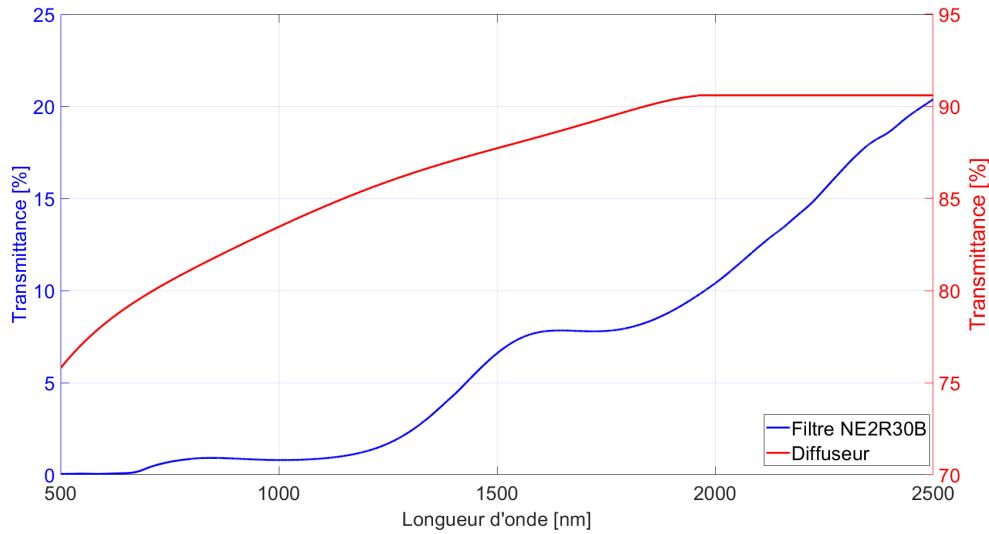


Figure D.5 – Transmittance en fonction de la longueur d'onde pour le filtre NE2R30B et le diffuseur

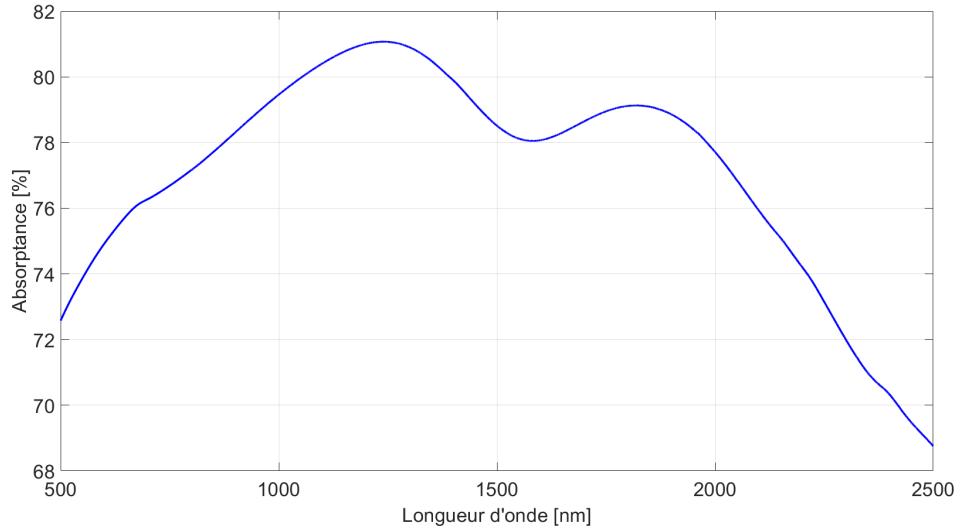


Figure D.6 – Absorptance totale en fonction de la longueur d'onde pour le système optique complet

Il faut également déterminer le coefficient d'absorption en puissance α du filtre pour simuler l'absorption volumique selon la loi de Beer-Lambert dans la simulation thermique. En sachant que la transmission T mesurée expérimentalement du verre NG9 est de 0,8343% à la longueur d'onde du laser (787 nm), il est possible de déterminer la densité optique (OD) à cette longueur d'onde

$$OD = \log_{10} \left(\frac{1}{T} \right) \approx 2,0787$$

En connaissant l'épaisseur $l = 2,1$ mm du filtre NE2R30B, le coefficient d'absorption en puissance du filtre est

$$\alpha = \ln(10) \frac{OD}{l} \approx 2,279 \text{ mm}^{-1}.$$

Le coefficient d'absorption du filtre calculé à l'aide des données expérimentales de la transmittance pour toutes les longueurs d'onde est présenté à la figure D.7

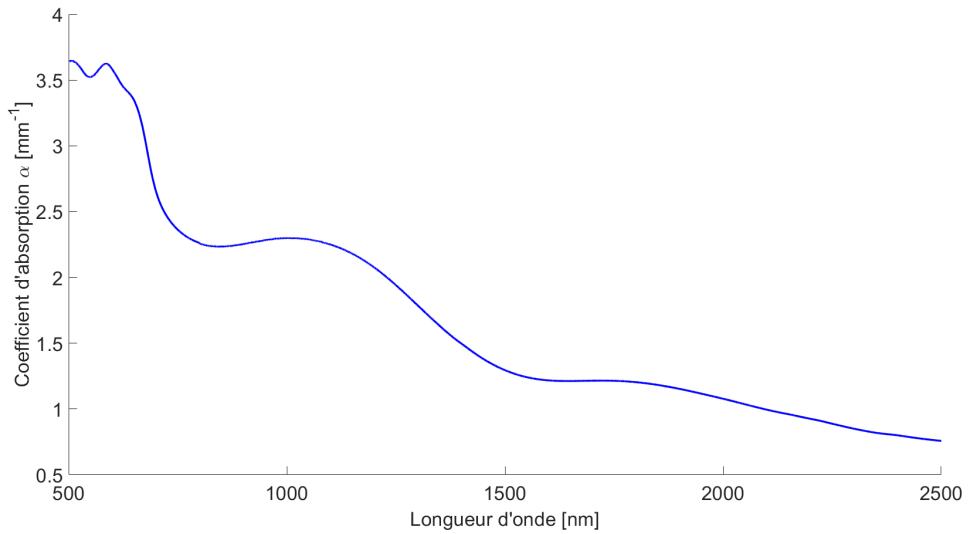


Figure D.7 – Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde pour le filtre NE2R30B

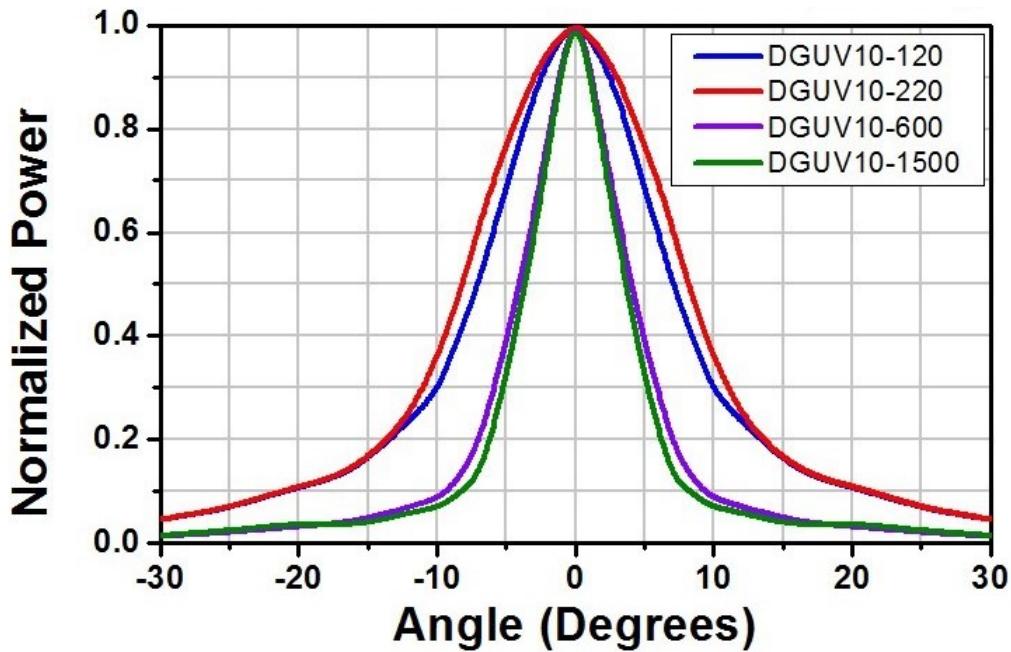


Figure D.8 – Puissance normalisée en fonction de l'angle pour le diffuseur DGUV10-600 [3]

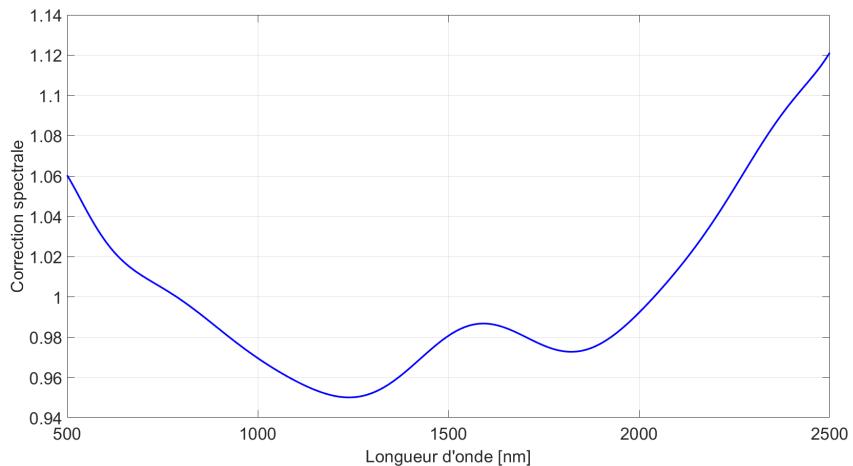


Figure D.9 – Correction spectrale en fonction de la longueur d'onde

Annexe E: Solution logicielle

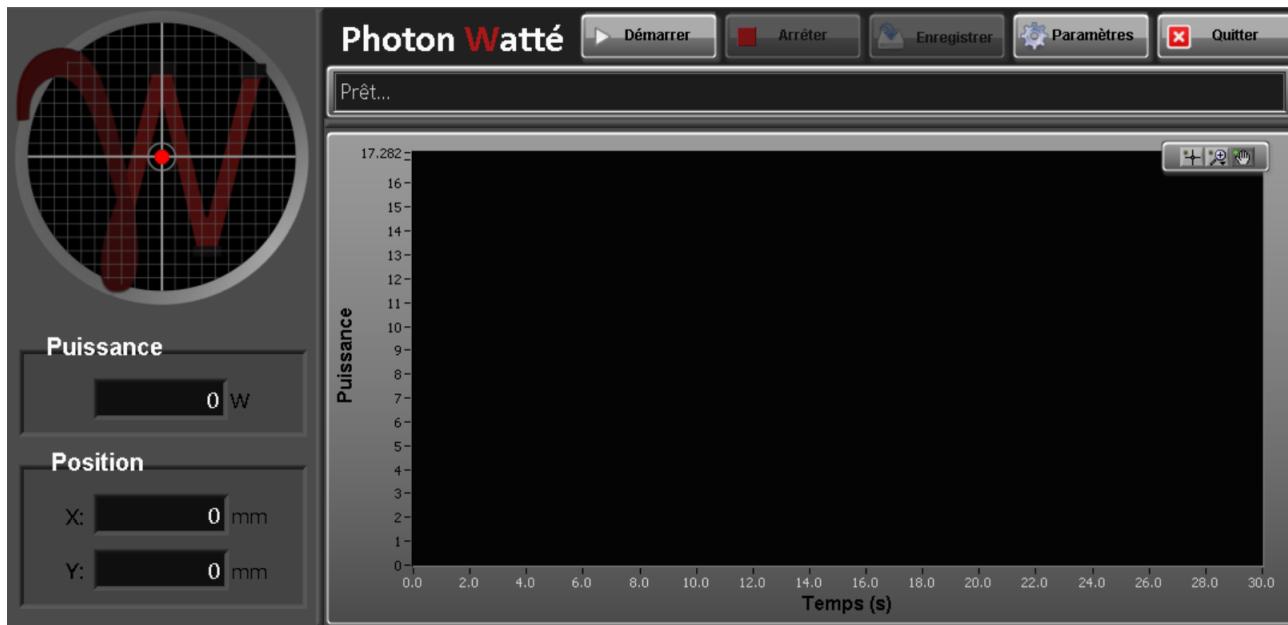


Figure E.1 – Interface utilisateur final (face-avant du VI Labview)



Figure E.2 – Paramètres de l'interface utilisateur

Annexe F: Algorithme de triangulation

Dans le filtre, la différence entre la température absolue d'un capteur n et celle du capteur de référence est T_n . Pour un filtre isotrope, celle-ci est une fonction de la distance radiale r_n entre le capteur et le centre de la distribution, ainsi que de la valeur maximale T_{max} à $r = 0$, toutes inconnues. Si on suppose que le profil est indépendant de T_{max} , on obtient une forme générale :

$$T_n = T_{max}F(r_n)$$

On estime que le profil de température est symétrique radialement et continu, donc que la pente dT/dr est nulle à $r = 0$, et que T s'approcherait asymptotiquement de 0 si r tendait vers l'infini. Il est donc raisonnable d'utiliser un modèle exponentiel de degré b supérieur à 1 pour $F(r)$:

$$T_n = T_{max}e^{-ar_n^{2b}} \quad (\text{F.1})$$

Les constantes a et b peuvent être déterminées expérimentalement ou résolues dans le système d'équations. Le facteur 2 sert à lier les distances r_n aux coordonnées cartésiennes de position du faisceau. Soit le plan sur lequel se trouvent les capteurs à des positions (x_n, y_n) , dont l'origine coïncide avec l'axe central du filtre. Pour un profil centré en (x, y) , on a des distances :

$$r_n^2 = (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 \quad (\text{F.2})$$

Cette expression peut être combinée à l'équation de température, par exemple :

$$r_n^2 = (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 = \left(\frac{\ln(T_{max}) - \ln(T_n)}{a} \right)^{1/b} \quad (\text{F.3})$$

On doit avoir 3 équations au minimum pour résoudre la position (x, y) et T_{max} . Pour résoudre a et b également, on peut utiliser davantage d'équations. Avec 4 capteurs disposés en croix sur les axes x' et y' à même distance approximative d de l'origine et un au centre, on a :

$$r_1^2 = (x' - d)^2 + y'^2 \quad r_2^2 = x'^2 + (y' - d)^2 \quad (\text{F.4})$$

$$r_3^2 = (x' + d)^2 + y'^2 \quad r_4^2 = x'^2 + (y' + d)^2 \quad (\text{F.5})$$

$$r_c^2 = x'^2 + y'^2 \quad (\text{F.6})$$

Si en prime $b = 1$, pour un profil gaussien, les équations de position se simplifient par symétrie et on obtient :

$$x' = \frac{r_c^2 - r_1^2 + d^2}{2d} = \frac{\ln(T_1) - \ln(T_c) + ad^2}{2ad} \quad (\text{F.7})$$

$$y' = \frac{r_c^2 - r_2^2 + d^2}{2d} = \frac{\ln(T_2) - \ln(T_c) + ad^2}{2ad} \quad (\text{F.8})$$

$$(\text{F.9})$$

$$x = \sin 45 y' + \sin 45 x' \quad (\text{F.10})$$

$$y = \sin 45 y' - \sin 45 x' \quad (\text{F.11})$$

De là on peut aussi calculer T_{max} avec les équations de température. Il est préférable d'utiliser les capteurs les plus chauds pour trianguler.

Si ces approximations engendrent trop d'erreurs, les équations peuvent être résolues numériquement. Le temps de résolution, surtout pour 4 paramètres ou plus à résoudre, est un désavantage de cette méthode, mais elle permet d'utiliser des équations plus complexes.

Il est à noter que l'addition de rainures dans le filtre pour insérer les capteurs, puisque le matériau de remplissage a une conductivité différente de celle du filtre, engendre une anisotropie, et donc approximer un profil symétrique radialement et indépendant de la position du faisceau cause des erreurs. Une façon de compenser une partie de ces erreurs est de prendre un a variable, même si la largeur du faisceau est constante à l'entrée du filtre. Les équations à résoudre ont alors la forme :

$$0 = T_{max} e^{-ar_n^2} - T_n \quad (\text{F.12})$$

Avec 4 variables, on doit utiliser les 4 capteurs les plus chauds pour résoudre le système.

Annexe G: Diagramme de Gantt

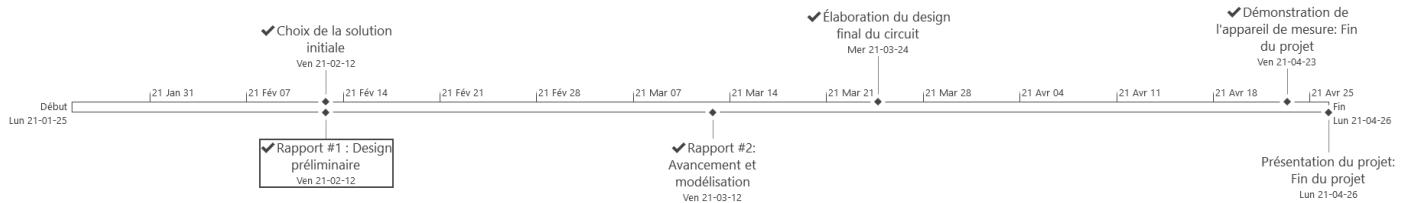


Figure G.1 – Chronologie du projet du développement d'un puissance-mètre

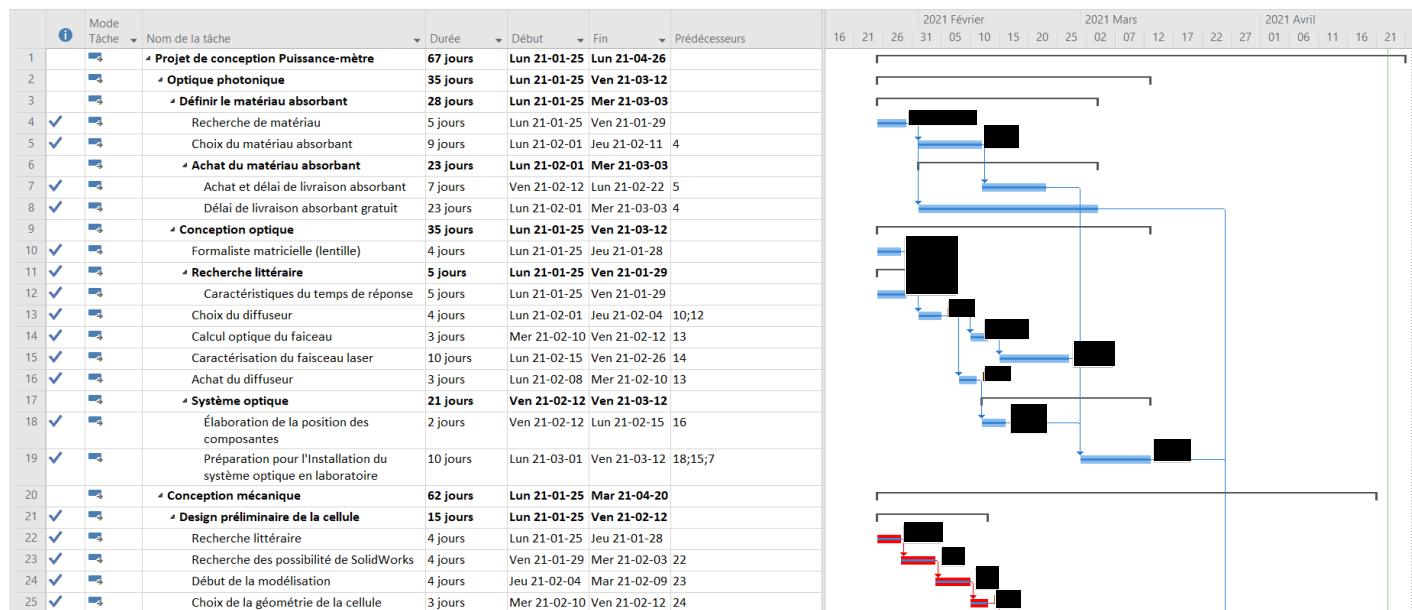


Figure G.2 – Diagramme de Gantt, partie 1/6

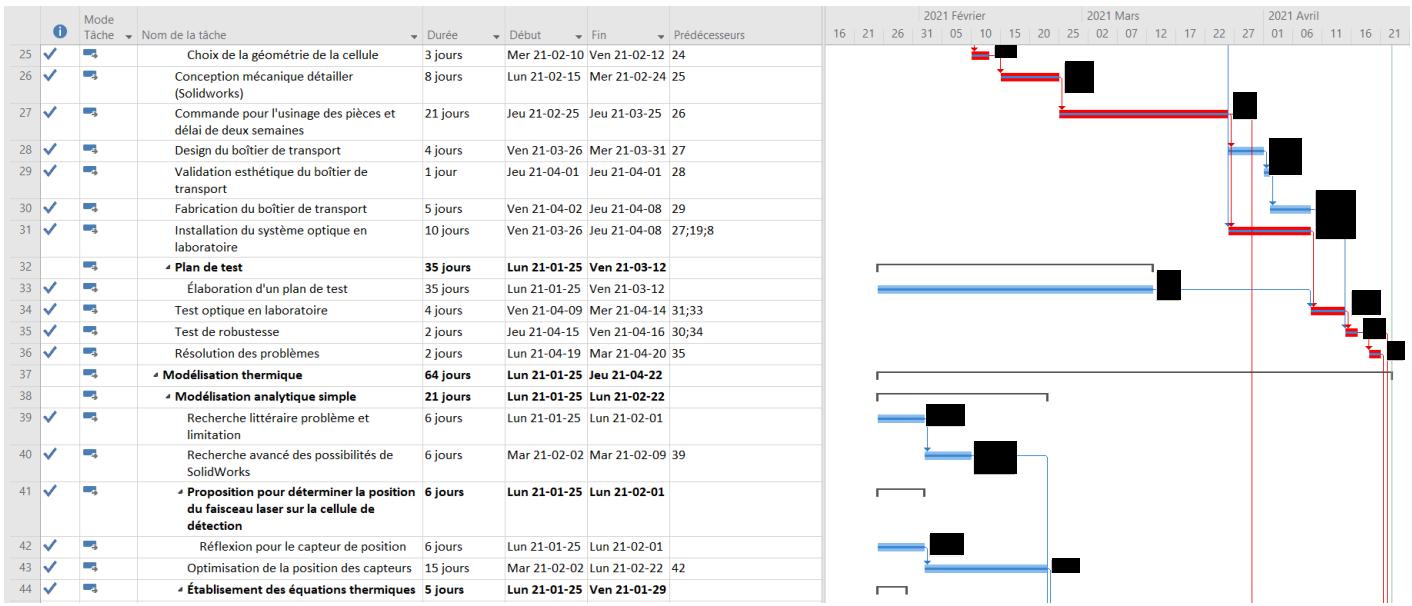


Figure G.3 – Diagramme de Gantt, partie 2/6

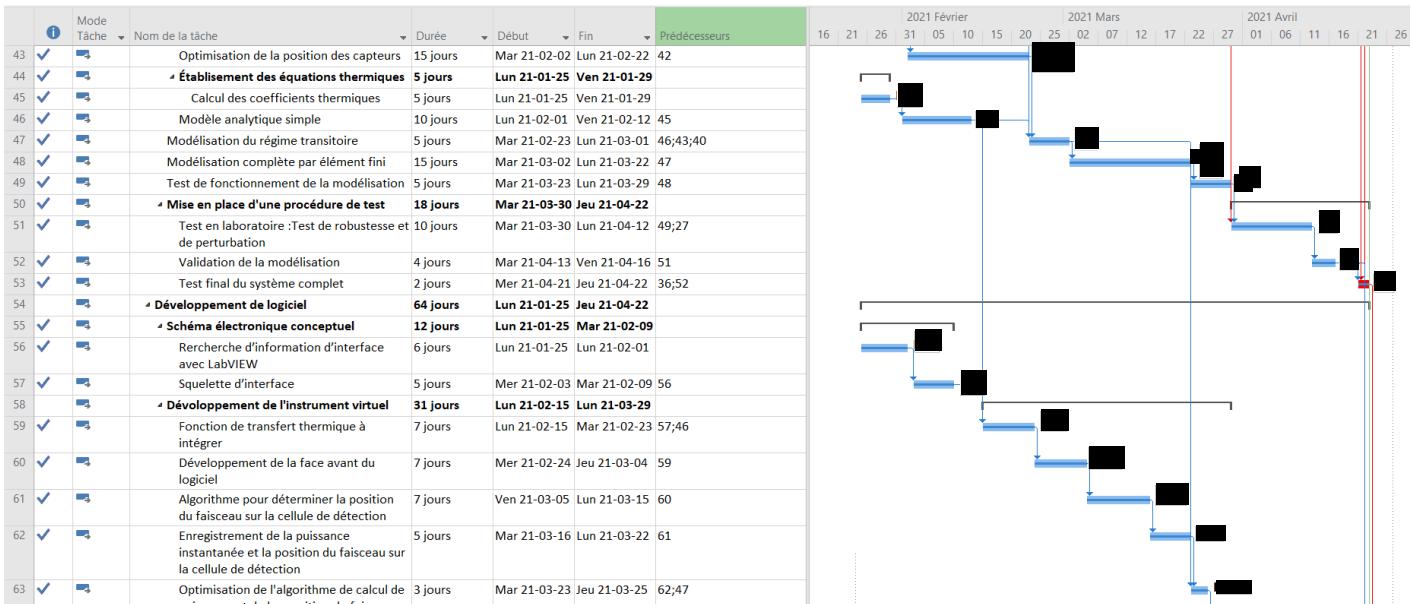


Figure G.4 – Diagramme de Gantt, partie 3/6

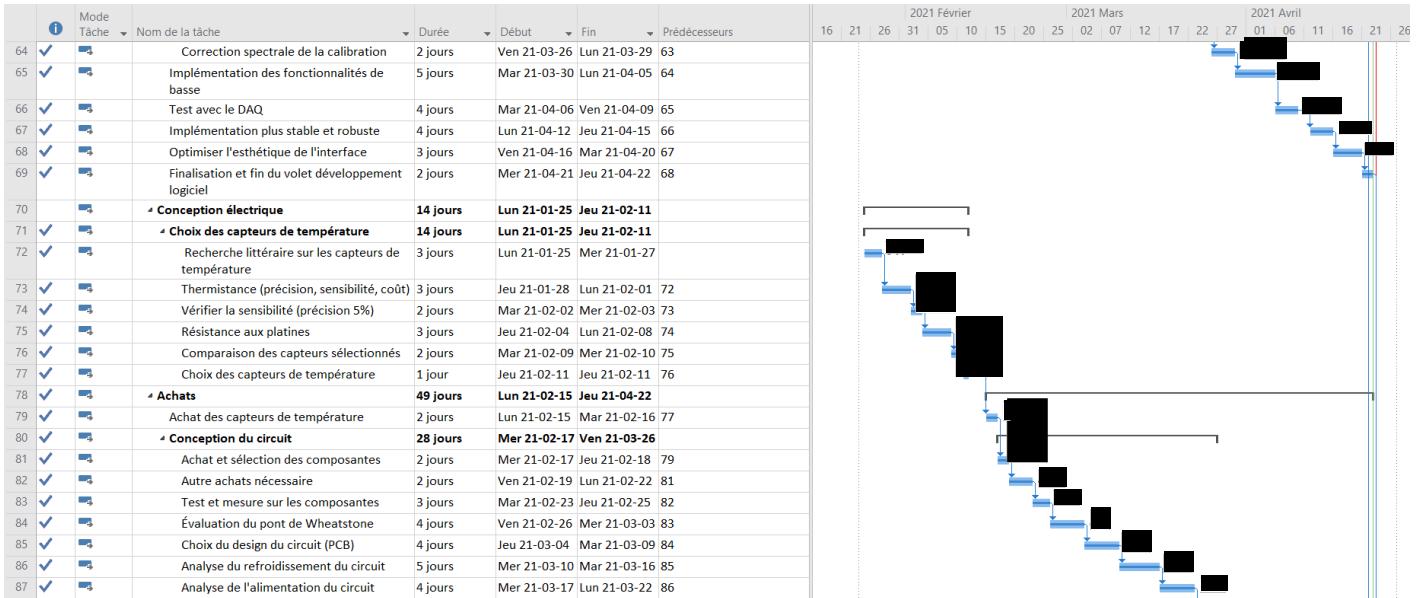


Figure G.5 – Diagramme de Gantt, partie 4/6

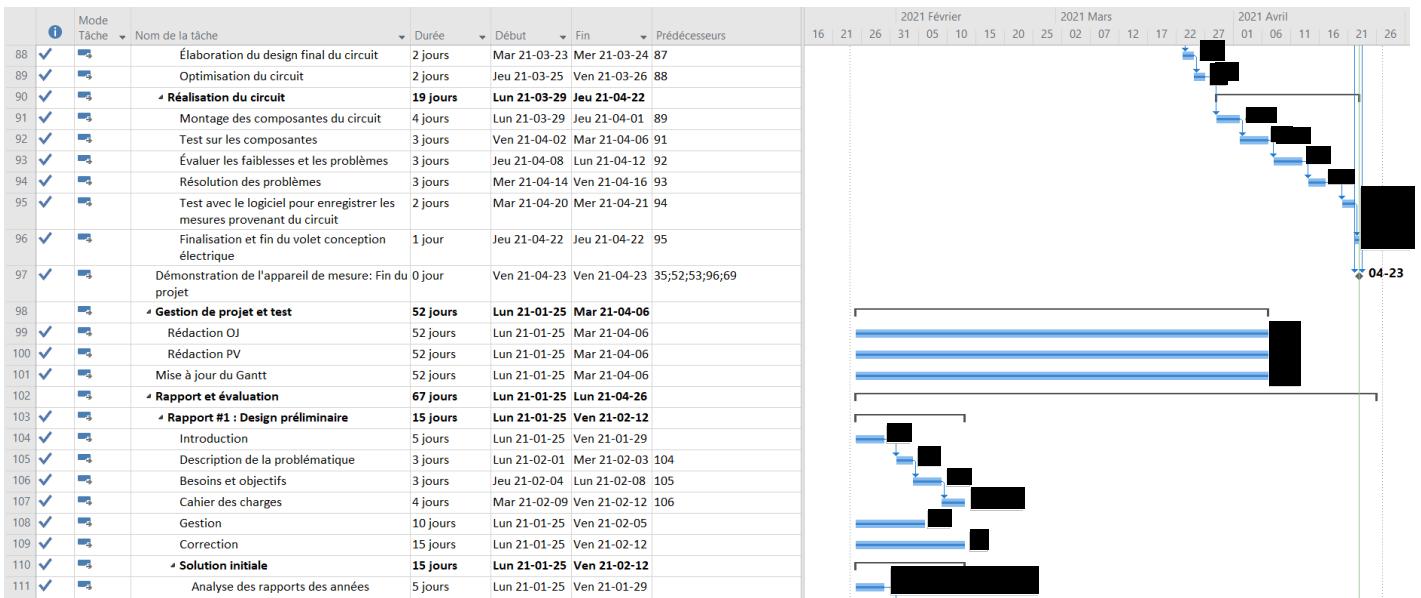


Figure G.6 – Diagramme de Gantt, partie 5/6

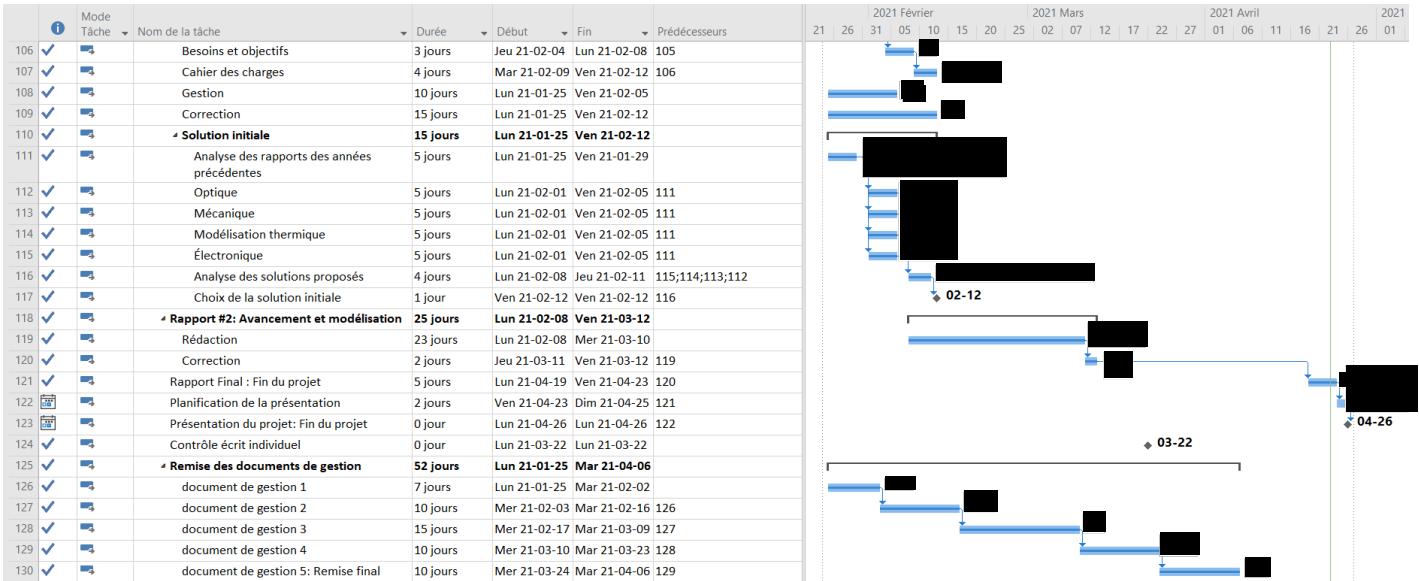


Figure G.7 – Diagramme de Gantt, partie 6/6