

BUT Informatique
Fabien ORTEGA

Rapport de stage

Réalisation d'un plugin de calibration des caméras
infrarouges du Tokamak WEST de Cadarache

Organisme d'accueil :
CEA

Maître de stage :
Leo DUBUS

Département Informatique
Site d'Arles
Tuteur :
Eric REMY

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce stage.

En premier lieu, je remercie chaleureusement Monsieur Léo DUBUS mon tuteur de stage au sein du CEA, pour son encadrement, sa disponibilité, ses précieux conseils ainsi que ses explications un domaine de travail complexe tout au long de cette expérience. Son expertise et ses encouragements ont été d'un grand soutien pour moi.

Je souhaite également remercier Monsieur Victor MONCADA, créateur du logiciel ThermaVIP. Son dévouement et son savoir-faire ont grandement facilité mon apprentissage et la réalisation de ma mission.

Un grand merci à l'équipe du GP3 de l'IRFM qui m'a entouré et soutenu tout au long de mon stage. Leur accueil chaleureux, leur coopération et leur esprit d'équipe ont rendu cette expérience extrêmement enrichissante et agréable. Leur aide précieuse et leur camaraderie ont facilité mon intégration et à ma réussite.

Je souhaite remercier l'IUT d'Aix-Marseille pour la qualité de son enseignement et le soutien apporté tout au long de mon parcours. L'encadrement pédagogique, les ressources mises à disposition et l'accompagnement des étudiants ont joué un rôle crucial dans la préparation et la réussite de ce stage.

Enfin, je souhaite également à exprimer ma reconnaissance à Monsieur Eric REMY, mon tuteur académique à l'IUT d'Aix-Marseille, pour son suivi, ses conseils et son soutien.

Table des figures

Figure 1 - Cartes des centres	7
Figure 2 - Organisation de l'IRFM.....	10
Figure 3 - Processus de détermination de la température	13
Figure 4 - Caméra infrarouge sur le banc de calibration.....	14
Figure 5 - Anciennes courbes de calibrations	15
Figure 6 - Architecture de ThermaVIP	20
Figure 7 - Courbe de calibration brute	23
Figure 8 - Courbe de calibration linéarisée	24
Figure 9 - Courbe linéarisée en utilisant un point	25
Figure 10 - Courbe linéarisée en retirant un point	25
Figure 11 - Fenêtre de configuration d'une calibration	26
Figure 12 - Courbes de Calibration et Entrées d'Acquisitions.....	27
Figure 13 - Rétroplanning.....	40

Table des tableaux

Tableau 1 - Tableau d'optimisations	29
-------------------------------------------	----

Table des matières

Remerciements	2
Table des figures	3
Table des tableaux	3
Introduction.....	6
1. Présentation de l'entreprise.....	7
1.1. Le CEA.....	7
1.2. Site de Cadarache.....	8
1.3. L'Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique (IRFM) ..	9
1.3.1. Missions et Objectifs de l'IRFM.....	9
1.3.2. Organisation de l'IRFM	10
1.3.3. Pôles d'activités du Groupe de Protection de la Première Paroi (GP3)	11
1.3.4. Installations et Équipements	11
2. Contexte de la mission	12
2.1. Principe d'une calibration	13
2.2. Processus de création d'une calibration	14
3. Développement d'un Outil de Calibration pour le Tokamak WEST	16
3.1. Analyse des Besoins	16
3.1.1. Besoins Fonctionnels.....	16
3.1.2. Besoins Non Fonctionnels	17
3.2. Organisation du Projet.....	17
3.2.1. Méthode Agile.....	18
3.2.2. Gestion du Code avec Git.....	18
3.3. Analyse de l'architecture existante	19
3.3.1. Architecture de la Base de Données.....	19
3.3.2. Architecture de ThermaVIP	20

3.4. Développement du projet	22
3.5. Résultats obtenus.....	23
3.6. Tests de performances	28
3.7. Documentation	30
3.8. Utilisation et Retours d'expériences	31
4. Insertion dans le milieu professionnel.....	32
4.1. Intégration et Adaptation	32
4.2. Développement de compétences techniques	32
4.3. Compétences en Communication et Collaboration.....	33
Conclusion.....	34
Glossaire	35
Lexique	36
Bibliographie.....	37
Résumé	38
Mots clés	39
Feuille de Temps	40

Introduction

Du 2 avril 2024 au 21 juin 2024, j'ai effectué un stage au sein du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA). Au cours de ce stage au Groupe de Protection de la Première Paroi (GP3) de l'Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique (IRFM), j'ai pu m'intéresser aux problématiques physiques et technologiques de la fusion par confinement magnétique et plus précisément les méthodes qui permettent de mesurer les températures de surface dans le Tokamak via la thermographie infrarouge (IR).

J'ai été accompagné par Monsieur Léo DUBUS, ingénieur en instrumentation infrarouge, qui m'a formé dans d'excellentes conditions et m'a guidé tout au long de ma mission. Son expertise et son encadrement ont été déterminants pour la réalisation de mes tâches.

Les missions du GP3 sont la Protection de la machine ainsi que l'étude de l'interaction plasma-paroi. En effet, les importants flux de chaleur survenant pendant les expériences nécessitent un suivi en temps réel de la température de surface des composants face au plasma. Les 12 visées IR permettent ainsi la surveillance de la paroi interne du tokamak. Elles participent également à la production de données pour la recherche.

Mon stage a consisté à développer un plugin facilitant la calibration des caméras IR du Tokamak WEST (WEST pour « W Environment in Steady-state Tokamak ») de Cadarache. En effet, chacune des visées IR nécessite une calibration spécifique qui est réalisée en laboratoire. Il y a un grand nombre de configuration et de données à gérer pour assurer la calibration de cet ensemble de caméras.

Problématique : Comment gérer efficacement toutes les données de calibration des caméras infrarouge du Tokamak WEST ?

Dans ce rapport, je vais présenter rapidement le CEA ensuite expliquer la mission qui m'a été confiée puis analyser les méthodes de travail et les résultats obtenus pour finir avec une conclusion.

1. Présentation de l'entreprise

1.1. Le CEA

À la fin de la Seconde Guerre Mondiale, le général de Gaulle est persuadé qu'il faut créer un organisme national consacré à l'énergie nucléaire au vu de la population mondiale qui ne cesse constamment d'augmenter. Afin de faire face au mieux à ses enjeux, le chef du gouvernement signe l'ordonnance du 18 octobre 1945 qui marque la création du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA, 2023).

Le CEA s'est engagé dans la recherche fondamentale d'excellence afin d'apporter des solutions concrètes sur quatre domaines bien précis :

- Les énergies bas carbone dites nucléaires et renouvelables
- La recherche fondamentale et technologique
- La défense et la sécurité
- La santé et les technologies pour la santé

Aujourd'hui, le CEA comptabilise neuf centres (voir Figure 1) répartis sur le territoire Français avec près de 20 000 collaborateurs dont 16 000 CDI, c'est aussi le 1^{er} organisme public en Europe et le 2^{ème} au monde.

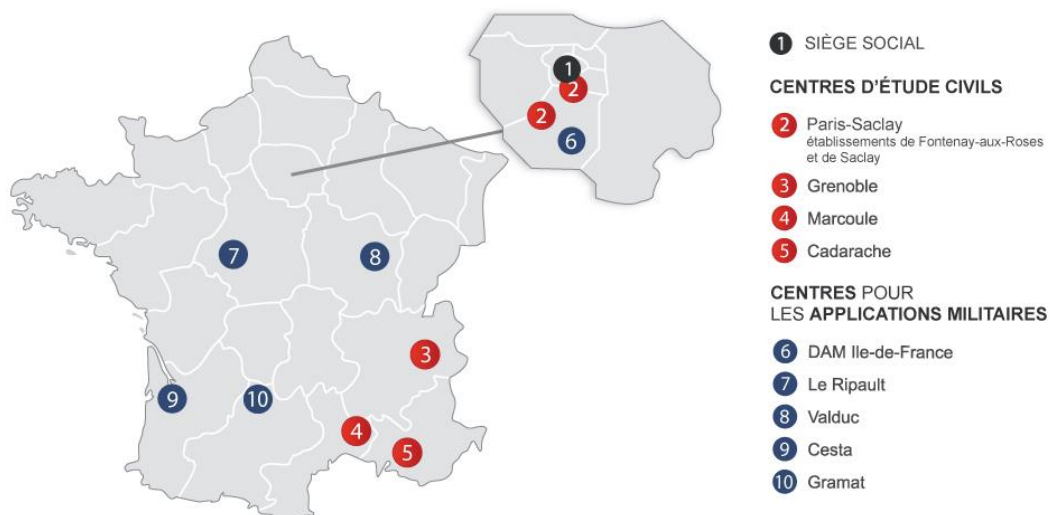


Figure 1 - Cartes des centres

1.2. Site de Cadarache

Le site de Cadarache, situé dans la commune de Saint-Paul-lez-Durance dans le sud de la France, est l'un des principaux centres de recherches du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives. Fondé en 1959, il est aujourd'hui reconnu comme l'un des plus grands centres de recherche et développement en Europe dans le domaine de l'énergie nucléaire et des énergies alternatives.

Initialement conçu pour la recherche sur l'énergie nucléaire, Cadarache a évolué pour inclure un grand nombre de recherches dans les domaines de la fission nucléaire, de la fusion, et des énergies renouvelables. La mission du site est de contribuer à la transition énergétique en développant des technologies avancées qui répondent aux défis énergétiques et environnementaux mondiaux.

Cadarache s'étend sur environ 1 600 hectares et abrite plus de 20 installations nucléaires, dont plusieurs réacteurs de recherche. Parmi les infrastructures notables, on trouve le Tokamak WEST de l'IRFM (Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique), une machine dédiée à l'étude de la fusion nucléaire. WEST est une plateforme essentielle pour la préparation du projet International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) car elle permet de tester et de développer des composants critiques dans des conditions de fusion réelles et prolongées.

1.3. L'Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique (IRFM)

Parmi les nombreuses installations présentes sur le site de Cadarache, l'Institut de Recherche sur la Fusion par Confinement Magnétique (IRFM) occupe une place de choix. Cet institut est dédié à la recherche et au développement de technologies permettant de maîtriser la fusion nucléaire, un processus prometteur pour la production d'énergie propre et quasi-illimitée.

1.3.1. Missions et Objectifs de l'IRFM

L'IRFM a pour mission de contribuer à la compréhension et à la maîtrise de la fusion par confinement magnétique, une technologie clé pour l'avenir énergétique mondial. Son objectif principal est d'effectuer des recherches sur la fusion par confinement magnétique, principalement via 3 axes :

- La contribution au projet ITER
- La préparation des opérations scientifique d'ITER à travers des activités d'expérimentation ainsi que de théorie et de modélisation
- D'établir les bases du futur réacteur de fusion.

Ces 3 axes de recherche et développement sont réalisable grâce à :

- **La recherche fondamentale** : Étudier les plasmas, ces états de la matière où les ions et les électrons se déplacent librement, pour mieux comprendre leur comportement dans des conditions de fusion.
- **Le développement technologique** : Créer et perfectionner des équipements et des technologies capables de soutenir des réactions de fusion contrôlées.

1.3.2. Organisation de l'IRFM

L'IRFM est structuré en plusieurs services de recherche spécialisés (voir Figure 2). Le SPPF (Service de Physique des plasmas de Fusion) se concentre sur l'étude approfondie des propriétés physiques des plasmas de fusion, essentielle pour optimiser les conditions de confinement et de performance des réacteurs à fusion. Le STEP (Service Tokamak Exploitation & Pilotage) est responsable de l'exploitation et de la gestion du Tokamak, en s'assurant que les dispositifs fonctionnent de manière optimale et en coordonnant les opérations expérimentales pour avancer dans la recherche sur la fusion. Enfin, le SI2P (Service d'Ingénierie, des Internes et des Projets) est responsable du développement, de l'exploitation et de la protection des composants internes, ainsi que des systèmes de chauffage du plasma. Il assure également le support en gestion de projet et la coordination des grands projets, tout en servant d'interface avec ITER.

Chaque service est ensuite structuré en groupe. J'ai fait mon stage dans le groupe GP3 (Groupe de Protection de la Première Paroi) qui est un des groupes du SI2P.



Figure 2 - Organisation de l'IRFM

1.3.3. Pôles d'activités du Groupe de Protection de la Première Paroi (GP3)

Le GP3 fait partie du SI2P de l'IRFM. Au sein du GP3 il y a 4 pôles d'activités différents qui travaillent pour répondre au besoin de la protection de la machine ainsi que la recherche physique concernant l'interface plasma-paroi :

- Instrumentation IR : Production de données de thermographie, c'est dans ce cadre que se situe mon stage
- Protection temps réel par l'imagerie : Réalisé en grande partie avec de l'Intelligence Artificielle (IA)
- Modélisation des scènes thermiques
- Expérimentations pour le bilan de puissance reçues par les composants

1.3.4. Installations et Équipements

L'IRFM dispose d'infrastructures avancées et de laboratoires de pointe pour mener à bien ses recherches. Parmi ces installations se trouvent :

- **Tokamak WEST** : Cet équipement est une plateforme de recherche cruciale pour le développement de la fusion nucléaire. Il permet de tester des composants critiques, comme les plaques de tungstène, dans des conditions de fusion prolongées. WEST joue un rôle clé dans la préparation du projet ITER.
- **Laboratoires de diagnostic et de mesure** : Ces laboratoires sont équipés de technologies avancées pour analyser les plasmas et les matériaux soumis à des conditions extrêmes.
- **Ateliers de développement technologique** : Ici, les ingénieurs et les scientifiques conçoivent et testent de nouveaux dispositifs et composants pour les réacteurs à fusion.

2. Contexte de la mission

La mission principale de mon stage au sein de l'IRFM du CEA Cadarache consistait à développer un plugin de calibration pour les caméras IR du Tokamak WEST. Ce plugin sera intégré au logiciel ThermaVIP, un outil utilisé pour l'analyse des données thermographiques.

Afin de réaliser au mieux la surveillance des températures du Tokamak WEST, 12 visées IR avec plusieurs calibrations par caméra et plusieurs centaines de films par calibration sont disponibles, ce qui représente une grande quantité de données à gérer.

La calibration des caméras IR est essentielle pour garantir des mesures précises des températures à l'intérieur du Tokamak. Les températures élevées atteintes lors des expériences de fusion nucléaire nécessitent une surveillance rigoureuse pour assurer le bon fonctionnement des équipements, la sécurité des opérations et l'étude des interactions plasma-paroi pour les physiciens.

Avant mon arrivée, toutes les calibrations étaient effectuées manuellement par une personne qui a développé des scripts python pour gérer le parc d'instrumentation IR. De fait, toutes les étapes d'analyse décrites dans la partie 2.2 n'étaient pas automatisées ni facilement réalisables par différentes personnes. Mon outil permet donc d'automatiser l'ensemble du processus de calibration, le rendant plus fiable et plus rapide.

Le plugin de calibration vise à faciliter la manipulation des données métrologiques pour les techniciens du GP3 et aider à l'amélioration de la précision des mesures thermographiques en assurant que les caméras IR fournissent des données fiables et cohérentes.

2.1. Principe d'une calibration

Les calibrations sont réalisées dans le but de les appliquer sur une caméra IR pour la surveillance du Tokamak WEST durant les expériences. Ces calibrations sont réalisées en laboratoire et elles consistent à faire correspondre une intensité lumineuse (enregistrée par la caméra en Digital Level, DL) avec une température connue (donnée par un corps noir) (voir Figure 3).

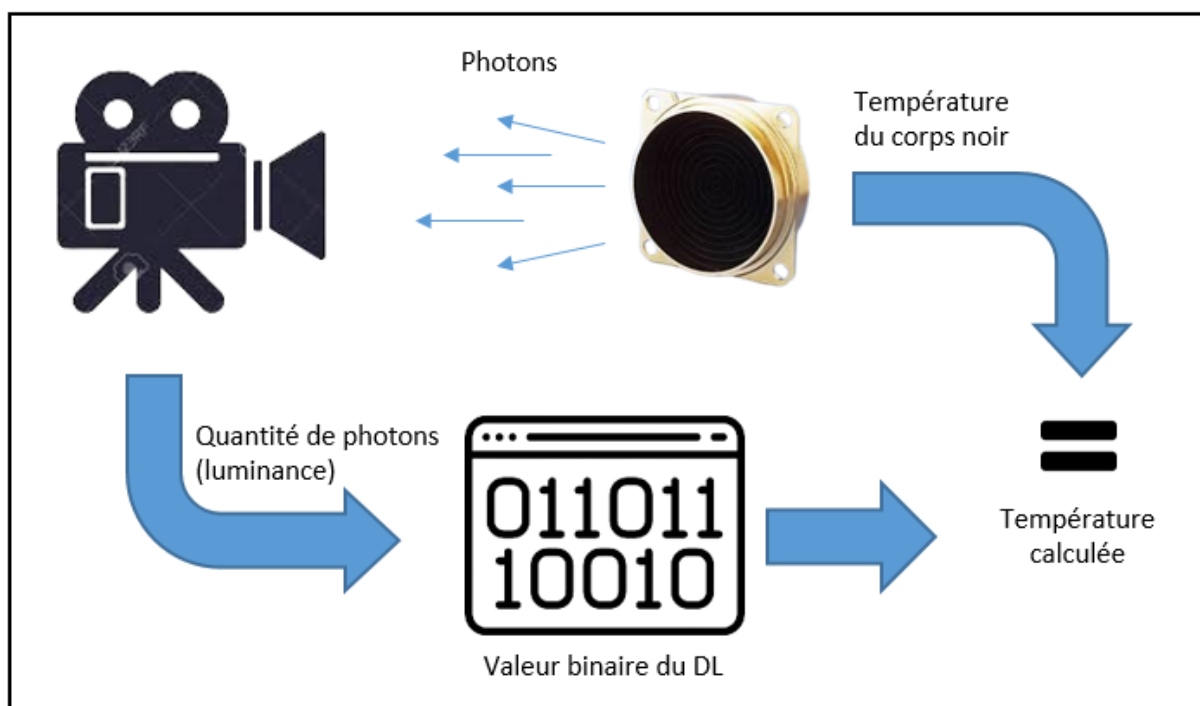


Figure 3 - Processus de détermination de la température

2.2. Processus de création d'une calibration

Plusieurs étapes sont nécessaires à la création d'une calibration pour les caméras IR du Tokamak WEST.

Tout d'abord, il faut placer une caméra IR devant un corps noir (voir Figure 4) qui est une source de température contrôlée. Dans le laboratoire où les calibrations sont réalisées, deux types de corps noirs sont présents, le corps noir ponctuel qui va servir à créer les différents films de calibrations et le corps noir étendu qui va permettre de créer les films de Non Uniformity Correction (NUC). Ces films de NUC permettent d'homogénéiser la réponse de chaque pixel du détecteur, assurant ainsi une mesure de température équivalente dans toute l'image. Ensuite, on vient enregistrer différents films avec différentes températures de corps noir et différents Temps d'Intégration (TI). Les films enregistrés sont ensuite analysés pour obtenir un point de mesure.



Figure 4 - Caméra infrarouge sur le banc de calibration

Chacun des fichiers sont analysés de la manière suivante :

- Récupération de la température du corps noir et du temps d'intégration dans le nom du fichier.
- Détection du signal corps noir dans le film pour obtenir un cercle.

- Calcul de la moyenne des pixels à l'intérieur du cercle obtenu (cette moyenne va correspondre au DL moyen).
- Analyse du fichier de configuration associé aux films de calibration pour récupérer les paramètres de caméra utilisés lors de l'enregistrement du film.
- Correspondance du DL / températures pour le TI en fonction des paramètres de caméra.

Une fois les fichiers analysés, on peut finalement créer des courbes de calibration (voir Figure 5), avec chacun des points du graphique qui provient d'un film de calibration différent. L'ordonnée représente le DL moyen enregistré par la caméra placée devant le corps noir, l'abscisse les différentes températures de corps noir mesurées et enfin, chaque courbe de couleur représente un temps d'intégration différent de la caméra.

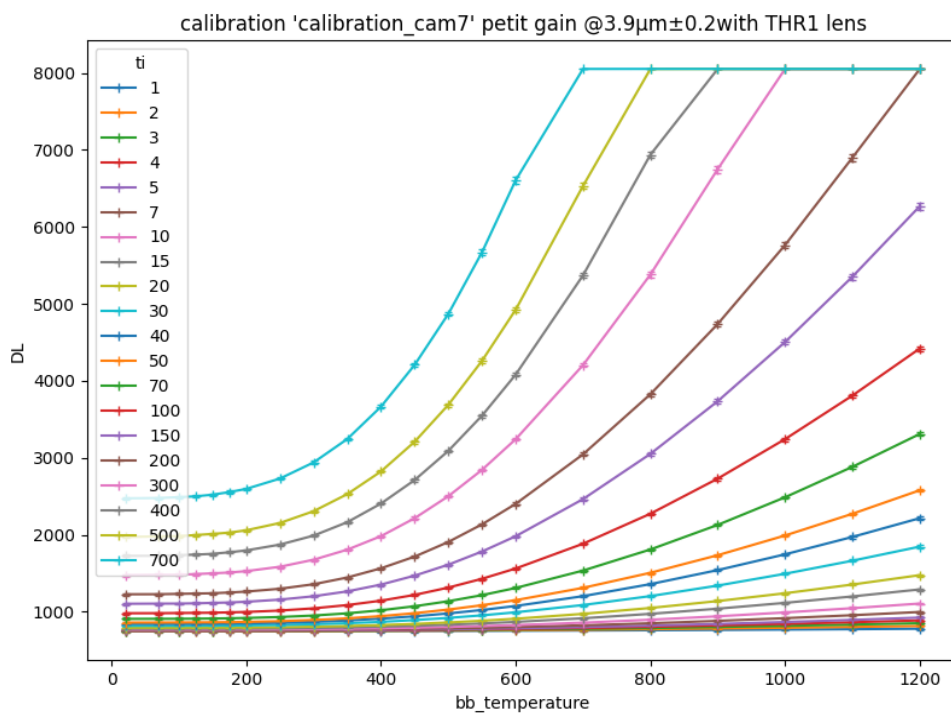


Figure 5 - Anciennes courbes de calibrations

Ensuite, afin de savoir si chacune des entrées d'acquisition sont correctes pour la sauvegarde en base de données, on linéarise les courbes à l'aide de la formule de Planck, procédé nécessaire à la création des fichiers de calibration finaux. Enfin, chaque point et chaque film sont ensuite enregistrés dans une base de données pour archivage et consultation.

3. Développement d'un Outil de Calibration pour le Tokamak WEST

3.1. Analyse des Besoins

L'analyse des besoins constitue la première étape essentielle du projet. Cette phase m'a permis de définir précisément les exigences et les fonctionnalités attendues du plugin, en tenant compte des besoins des utilisateurs finaux.

3.1.1. Besoins Fonctionnels

- **Visualisation des calibrations brutes** : Affichage de courbes de calibration permettant une vue d'ensemble sur l'état actuel d'une calibration disponible dans la base de données.
- **Visualisation des calibrations linéarisées** : Affichage des courbes de calibration linéarisées par la formule du corps noir de Planck avec les points utilisables précédemment choisis.
- **Mise à disposition d'informations**: Pour chaque point d'une courbe, il sera possible d'obtenir des informations comme l'affichage d'un film ou bien la modification d'informations comme savoir si un point de la courbe brute est utilisable sur la courbe de calibration linéarisée.
- **Création de nouvelles calibrations** : A l'aide des fichiers réalisés en laboratoire, les ingénieurs en charge pourront créer de manière automatisée des nouvelles calibrations. Ce qui n'était pas possible avant car seulement quelques personnes qualifiées pouvaient utiliser cette base de données.

3.1.2. Besoins Non Fonctionnels

- **Performance** : Le plugin doit être performant et réactif c'est-à-dire que le temps que met l'outil à s'exécuter pour chacune des fonctionnalités doit être le plus rapide possible, même lors de la manipulation de grandes quantités de données (films). Des temps de réponse rapides sont essentiels pour assurer une expérience utilisateur fluide et un gain de temps conséquent.
- **Compatibilité avec ThermaVIP** : Le plugin doit être entièrement compatible avec le logiciel de visualisation des données IR : ThermaVIP (voir section 3.3.2 pour une description détaillée).
- **Intuitivité de l'interface utilisateur** : L'interface utilisateur du plugin doit être intuitive, permettant aux utilisateurs de naviguer facilement à travers les différentes fonctionnalités et d'effectuer des tâches associées avec une calibration sans nécessiter d'une formation approfondie.

Ces besoins ont été identifiés en collaboration avec les utilisateurs qui seront les plus susceptibles d'utiliser l'outil, l'équipe diagnostic IR du GP3, tout cela afin de garantir que l'outil réponde pleinement aux exigences opérationnelles et fonctionnelles.

3.2. Organisation du Projet

Afin de réaliser un développement structuré, j'ai adopté une approche Agile afin de favoriser la flexibilité et la réactivité aux changements tout au long du projet. Bien que j'ai été seul à développer ce projet, l'utilisation des principes Agile m'a permis de gérer efficacement les tâches et les priorités. De plus cela m'a permis de conserver un historique des tâches réalisées.

3.2.1. Méthode Agile

J'ai opté pour une approche Agile. Cette approche est caractérisée par des cycles de développement itératifs et incrémentaux. Les principes Agile m'ont permis d'avoir une adaptation continue aux besoins changeants du projet. Les « users stories » ont été utilisées pour représenter les exigences fonctionnelles du projet et ont été formalisées sous forme d'issues sur GitLab, offrant ainsi une vue claire et organisée des tâches à accomplir. Chaque « user story » décrit une fonctionnalité spécifique ou une amélioration nécessaire, ce qui m'a aidé à rester concentré et à prioriser les tâches de manière efficace.

3.2.2. Gestion du Code avec Git

Le développement a été effectué en utilisant Git, un système de contrôle de version distribué, avec une approche de développement en branches. C'est-à-dire que chaque fonctionnalité ou amélioration (user story) a été développée dans une branche dédiée, permettant un travail isolé des différentes fonctionnalités sans perturber le code principal. Une fois qu'une fonctionnalité a été complétée et testée avec succès, elle a été fusionnée dans la branche principale du projet, assurant ainsi l'intégration continue du code.

Cette organisation du projet a grandement facilité la gestion des différentes étapes du développement, tout en assurant la stabilité et la qualité du code produit. L'utilisation de Git a permis un suivi précis des changements apportés au code, garantissant ainsi la traçabilité et la réversibilité des modifications.

3.3. Analyse de l'architecture existante

L'analyse de l'architecture existante a été une étape indispensable pour comprendre le contexte technique dans lequel le plugin de calibration devait être développé et intégré. Cette analyse a porté principalement sur deux aspects clés : la base de données (BDD) existante et l'architecture du logiciel ThermaVIP.

3.3.1. Architecture de la Base de Données

La BDD joue un rôle indispensable dans la conservation des données thermographiques et des calibrations. L'analyse de cette architecture a permis d'identifier les structures de données existantes, les schémas de table ainsi que les relations entre elles.

La BDD infrarouge du Tokamak WEST est complexe et contient de nombreuses tables couvrant divers aspects. Pour le développement du plugin de calibration, seules certaines tables spécifiques sont nécessaires, notamment celles permettant de définir les informations d'une entrée d'acquisition, de stocker les données relatives aux enregistrements vidéo et de gérer les paramètres de calibration. D'autres tables fournissent des détails sur les composants optiques et les capteurs associés aux caméras utilisés.

L'utilisation de ces tables spécifiques m'a permis de concentrer le développement sur les données nécessaires, simplifiant ainsi le processus tout en garantissant la performance et la réactivité du plugin.

Des mécanismes de validation ont été mis en place dans le plugin de calibration pour garantir l'intégrité et la cohérence des données.

Cette analyse approfondie de la BDD a été essentielle pour poser une base solide sur laquelle développer le plugin en assurant qu'il soit robuste, fiable et performant. En comprenant les structures de données existantes et en les utilisant de manière optimale, le développement du plugin a pu avancer de manière structurée et efficiente.

3.3.2. Architecture de ThermaVIP

ThermaVIP est un logiciel open source développé en interne qui est réalisé en C++. Il est utilisé pour l'analyse des données thermographiques et des signaux temporels. Il est aussi utilisé par d'autres machines de fusion comme W7-X qui est un Stellarator allemand et le Tokamak EAST qui est chinois.

L'intégration du plugin de calibration dans cet environnement complexe a nécessité une compréhension plus approfondie de son architecture (CEA, 2024).

ThermaVIP fournit un kit de développement (SDK) constitué de plusieurs modules et composants (voir Figure 6), chacun étant responsable d'une partie bien spécifique du processus d'analyse des données thermographiques. Les modules utilisés pour le développement du plugin, sont :

- **Annotation** : Module responsable de la manipulation initiale des données brutes, incluant le filtrage et le nettoyage des données.
- **Gui** : Module permettant de gérer la gestion de l'affichage
- **Plotting** : Module permettant de générer différents graphiques
- **Logging** : Module permettant de réaliser la gestion d'erreurs

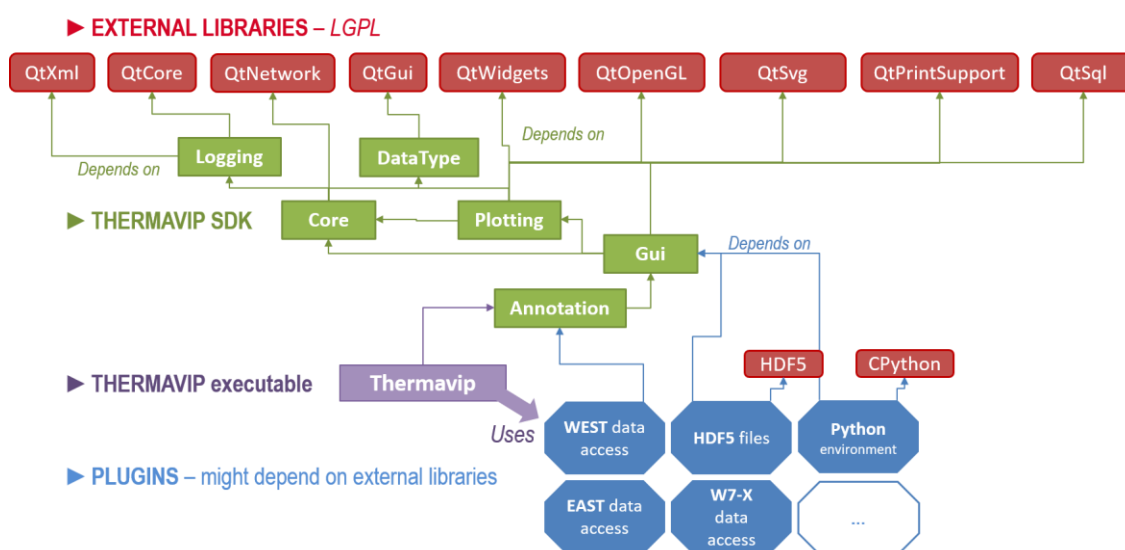


Figure 6 - Architecture de ThermaVIP

La BDD et ThermaVIP vont me fournir tous les éléments nécessaires au développement du plugin de calibration. Cette analyse a permis d'identifier les bonnes pratiques d'utilisation des différents modules de ThermaVIP, les points d'intégration clés, d'assurer la compatibilité avec les structures de données existantes et de garantir une performance optimale. Cette compréhension approfondie a été essentielle pour concevoir un plugin efficace et fiable, répondant aux besoins spécifiques du GP3.

3.4. Développement du projet

Le développement du plugin de calibration pour les caméras IR du Tokamak WEST s'est déroulé en plusieurs étapes, tout en suivant les principes fondamentaux des méthodes agiles. Cette approche m'a permis d'assurer une évolution itérative et incrémentale du projet.

La première étape du développement a consisté à planifier le projet et à définir les « users stories ». Chaque « user story » représentait une fonctionnalité ou un besoin bien spécifique en fonction du point de vue de l'utilisateur. Ces « users stories » ont ensuite été transformées en issues sur GitLab ce qui m'a permis d'avoir un suivi et de structurer l'avancement du projet.

Par la suite, j'ai commencé à répondre aux besoins cités par les « users stories » qui ont été écrites. Les premières étaient principalement liées à l'architecture de base du logiciel, par exemple reproduire l'architecture de la base de données sous la forme de classes C++.

Ensuite, j'ai créé de multiples méthodes permettant de récupérer toute la hiérarchie de la base de données. Ces données sont formalisées avec la structure dont le plugin aura besoin par la suite.

Après avoir récupéré les informations contenues dans la base de données, j'ai développé la première fonctionnalité : afficher les courbes de calibrations brutes à l'aide de la structure créée précédemment. Cette première fonctionnalité m'a permis de trouver des erreurs de structure. Ces erreurs de structure ont été corrigées pour l'implémentation des fonctionnalités suivantes. J'ai ensuite développé de manière itérative les différentes fonctionnalités décrites par les « users stories » tout en appliquant les méthodes agiles.

En parallèle des tests techniques, une validation continue a été effectuée avec les utilisateurs finaux. Des démonstrations régulières ont été organisées pour présenter l'avancement du développement et recueillir des retours. Ces démonstrations m'ont permis d'identifier rapidement les ajustements nécessaires et de les intégrer dans les cycles de développement à venir.

3.5. Résultats obtenus

La réalisation du plugin de calibration a abouti à plusieurs résultats significatifs. Les fonctionnalités initialement prévues ont été implémentées :

- **Visualisation des courbes de calibration brutes:** Affichage des courbes de calibration brute (voir Figure 7) existantes, disponibles en sélectionnant un identifiant présent dans la base de données ou bien en sélectionnant une caméra puis une calibration parmi la liste des calibrations disponibles avec cette caméra, offrant une vue d'ensemble claire et détaillée.

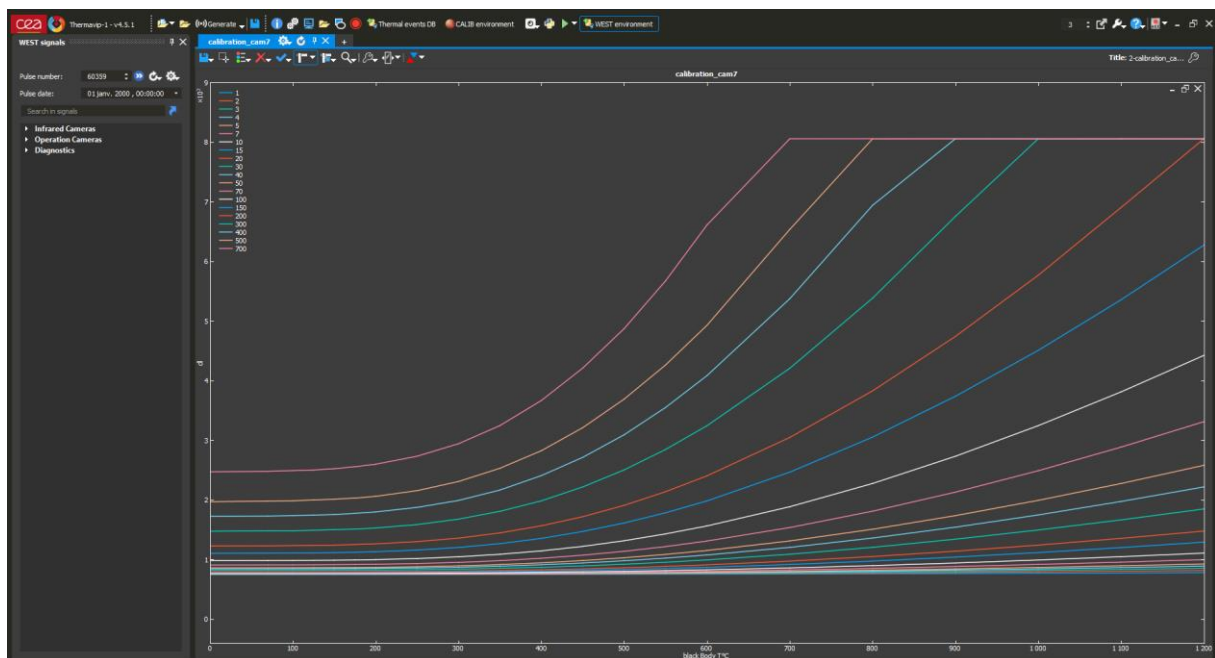


Figure 7 - Courbe de calibration brute

Ce résultat a été rendu possible grâce à une série de requête à la base de données permettant la récupération de toutes les données d'une calibration. Ensuite, une fois que toutes ces données ont été récupérées et organisées, il faut créer le graphique associé à l'aide des fonctionnalités disponible via ThermaVIP.

- **Visualisation des courbes de calibration linéarisées:** L'affichage des courbes de calibration linéarisées (voir Figure 8). Cette courbe va s'afficher à côté de la courbe de calibration.

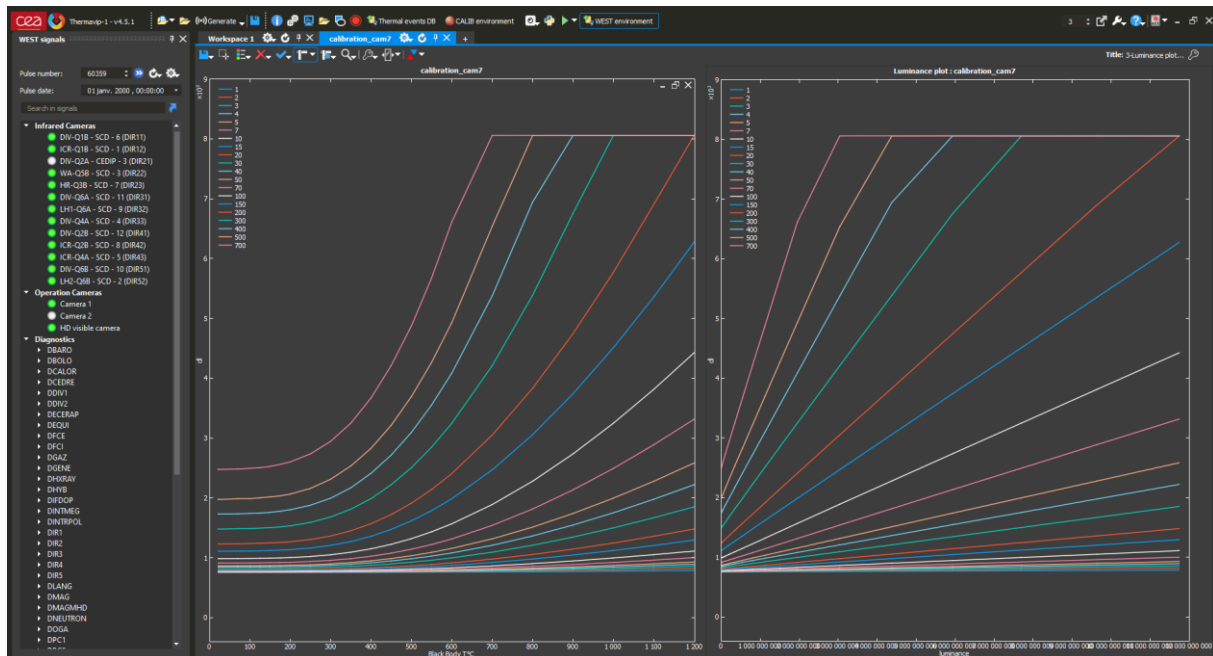


Figure 8 - Courbe de calibration linéarisée

Les données étant déjà organisées grâce à la récupération des données, il ne reste plus qu'à réaliser tous les calculs nécessaires à l'aide de la formule de Planck pour obtenir les points de la courbe linéarisée. Cette courbe montre les Digital Level (DL) en fonction de la Luminance. Elle permet de savoir si un point de la courbe est utilisable, si un point de la courbe n'est pas correctement linéaire cela veut dire qu'il ne sera pas utilisable pour la calibration.

- **Validation d'un point de mesure dans la linéarisation de la calibration :**
Lorsqu'on ctrl + click sur un point de la courbe de calibration non-linéarisée, le graphique comportant cette linéarisation sera alors actualisé afin d'utiliser ou non le point sélectionné.

Voici un exemple de ce qu'il se produit une fois qu'un point a été sélectionné afin d'actualiser la courbe linéarisée (voir Figure 9, 10)

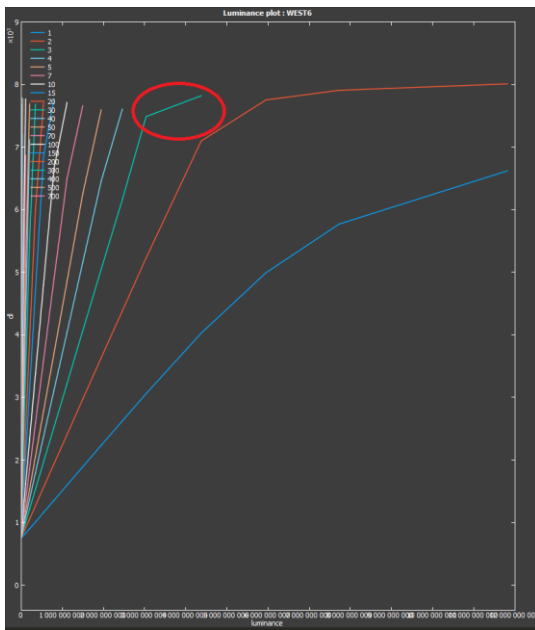


Figure 9 - Courbe linéarisée en utilisant un point

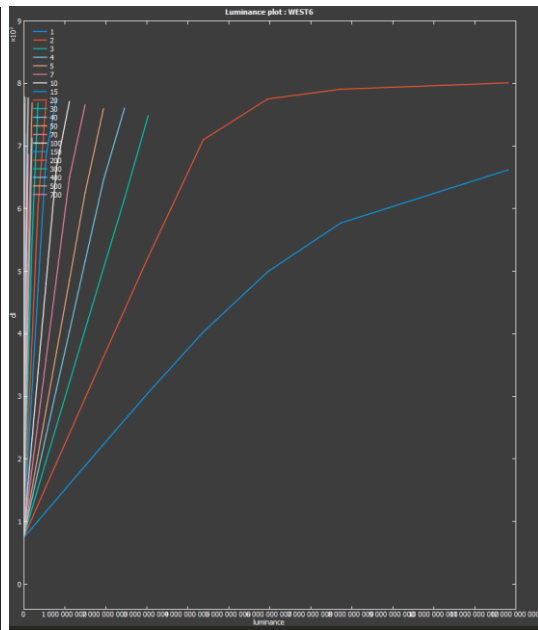


Figure 10 - Courbe linéarisée en retirant un point

Afin de pouvoir actualiser le graphique j'ai dû comprendre le mécanisme permettant de conserver des données dans un graphique. Ensuite, pour que la nouvelle courbe linéarisée soit juste, j'ai recalculé tous les points d'une courbe puis afficher le résultat.

- **Importation d'une nouvelle calibration** : Fonctionnalité permettant de créer des calibrations à partir de fichiers réalisés en laboratoire (films ou textes). Avec une interface de configuration simplifiée (voir Figure 11) pour l'importation et le traitement des données.

The image shows a software window titled "Calibration configuration" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). The window is divided into several sections, each with a title and a group of configuration fields:

- Sensor**:
 - Serial sensor: 5 (spin box)
 - Type: SCD (dropdown menu)
 - Gain: petit (dropdown menu)
- Ir Filter**:
 - Serial filter: MWIR (text field)
 - Lambda: 3,90 (spin box)
 - Bandwidth: 0,70 (spin box)
 - Setpoint: 16,00 (spin box)
- Lens**:
 - Serial lens: 6 (spin box)
 - Name: TS (text field)
- Auto-detect post-processing circle**:
 - X: 306 (spin box)
 - Y: 246 (spin box)
 - Radius: 26 (spin box)
 - Name: (empty text field)
- Other**:
 - Calibration name: (empty text field)
 - Emissivity: 1,00 (spin box)
 - Date: 27/05/2024 10:50:57 (spin box)

At the bottom of the window, there are two buttons: "OK" and "Cancel Calibration".

Figure 11 - Fenêtre de configuration d'une calibration

L'importation d'une nouvelle calibration nécessite la récupération d'informations supplémentaires dans un fichier de configuration. Ainsi, j'ai interprété le fichier de configuration afin que toutes les données présentes soient utilisées. Grâce à ce fichier de configuration, j'ai pu retrouver les paramètres de configuration de la caméra utilisée au moment de la capture du film. Ensuite, j'ai recherché le disque de signal du corps noir dans l'image à l'aide d'OpenCV, une librairie qui permet de faire de la recherche de cercle à l'aide de la technique d'extraction « Hough Circle Transform ». De fait, j'ai extrait le DL moyen à l'intérieur du cercle. Finalement, avec toutes les informations regroupées, j'ai, pour chacun des fichiers, le type de celui-ci (calibration entry, offset entry, nuc entry), ce qui permet de reconstruire une calibration complète afin que le reste de mon outil puisse lui aussi effectuer des opérations sur la calibration qui vient d'être importé.

- **Affichage des films des Entrées d'Acquisition :** Le plugin peut afficher les films correspondants à chaque point (voir Figure 12), s'il existe, des courbes de calibration via un shift-click.

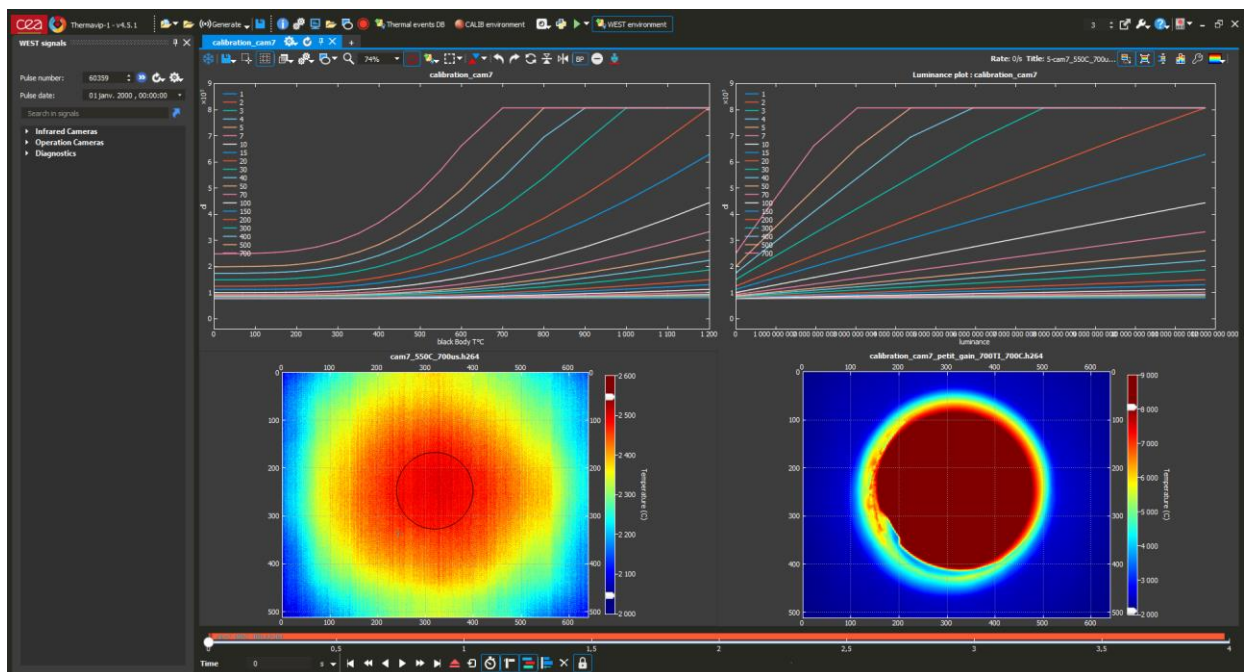


Figure 12 - Courbes de Calibration et Entrées d'Acquisitions

3.6. Tests de performances

La réalisation des tests de performances est une étape importante dans un développement. Ils ont permis de s'assurer que le plugin répond correctement aux exigences et fournissent une expérience utilisateur agréable.

Les tests de performances ont été réalisés en utilisant un ensemble de scénarios tirés de données réelles provenant d'une copie de la base de données déjà existante ainsi que de multiple fichiers eux aussi provenant de données réelles, afin que les conditions des tests soient au plus proche de la réalité. Chaque scénario a été exécuté avant et après les optimisations apportées au plugin dans les mêmes conditions. Voici les trois grandes optimisations apportées :

- **Importation d'une calibration** : L'importation d'une calibration est la fonctionnalité essentielle dans ce plugin, c'est donc pour cela que j'ai dû chercher une méthode afin de réduire considérablement le temps d'exécution qui était d'environ 190 secondes au début de la phase d'optimisation. Afin de trouver un moyen efficace pour réduire le temps d'exécution, j'ai tout d'abord effectué une analyse des algorithmes réalisés mais après avoir effectué quelques corrections, le temps d'exécution était toujours aussi long. Je me suis donc penché sur une méthode plus complexe qui est le multitasking. Le multitasking permet de réaliser plusieurs tâches en parallèle, c'est-à-dire que dans le cas de l'importation d'une calibration, plusieurs fichiers peuvent désormais être analysés en simultané. Grâce à cette correction, le temps d'importation d'une calibration dans le logiciel atteint 9 secondes en moyenne (voir Tableau 1) avec environ 150 millisecondes par fichier pour une calibration d'environ 250 films, ce qui ne gêne pas l'expérience utilisateur au vu de la quantité de fichiers à analyser.
- **L'importation de fichiers de Non Uniformity Correction (NUC)**: Comme l'importation d'une calibration, celle de l'importation de fichiers de NUC est essentielle afin de corriger les pixels défectueux présents sur un film de calibration. Mais lors des essais, le temps d'exécution par fichier était d'environ 35 secondes. J'ai donc ici aussi mis en place le multitasking afin de réduire

considérablement le temps d'exécution de celui-ci pour atteindre 2 secondes environ par fichier (voir Tableau 1).

- **L'actualisation d'une courbe de calibration** : L'actualisation d'une courbe de calibration linéarisée se produit lorsque l'on choisit d'utiliser ou non un point d'une courbe de calibration brute. A chaque fois que cette action est déclenchée, un ensemble de calcul est réalisé afin d'afficher la courbe de calibration linéarisée. Le temps d'exécution moyen pour afficher cette courbe après une actualisation est d'environ 7 secondes. Mais au fur et à mesure des tests réalisés, je me suis rendu compte que l'actualisation prenait de plus en plus de temps. Après de nombreuses recherches dans mon code aucune solution n'a été trouvée. Je me suis donc intéressé plus en profondeur au code de ThermaVIP afin de voir si une erreur était présente. Après de nombreuses recherches, un oubli de libération de mémoire a été trouvé dans le code source de ThermaVIP. Après cette correction, l'actualisation moyenne est passé à 5 secondes (voir Tableau 1) quel que soit le nombre de fois que l'on actualise. Retrouver ce problème dans le code source de ThermaVIP m'a permis de déboguer et de contribuer à un projet open source qui est ThermaVIP.

En plus de toutes ces optimisations, tous ces tests ont été réalisés sur des fichiers stockés en local afin de réduire les échanges réseaux.

Ces améliorations ont non seulement permis de rendre le plugin plus rapide et plus réactif, mais elles ont également facilité l'expérience utilisateur en permettant aux ingénieurs et chercheurs de travailler de manière plus efficace.

	Avant Optimisation	Après Optimisation
Importation d'une calibration	190 secondes	9 secondes
Importation de fichier de NUC	73 secondes	5 secondes
Actualisation d'une courbe de calibration	7 secondes	5 secondes

Tableau 1 - Tableau d'optimisations

3.7. Documentation

J'ai été amené à créer de la documentation du code associé au plugin pour plusieurs raisons fondamentales.

- **Faciliter la maintenance future** : Lorsqu'un projet est en cours d'évolution, il est fréquent que des modifications et des améliorations soient nécessaires. Une documentation claire et détaillée va permettre à n'importe quel développeur y compris moi-même, de comprendre rapidement le fonctionnement du code existant et d'identifier les endroits où des changements qui peuvent être apportés sans introduire de bugs par la suite.
- **Préserver les connaissances** : La documentation de code permet de préserver les connaissances acquises durant le développement, ce qui est important pour la continuité du projet.
- **Faciliter la réutilisation du code** : Dans de nombreux cas, certaines parties du code peuvent être réutilisées dans d'autres projets. Cette documentation de code rend la réutilisation plus facile. Cela augmente l'efficacité en réduisant le besoin de réécrire des fonctionnalités déjà existantes.

La documentation de code que j'ai réalisée a permis de répondre à ces différents besoins. En investissant du temps dans cette documentation, j'ai contribué à créer un environnement de développement plus structuré, durable et qui assure le transfert de connaissances.

3.8. Utilisation et Retours d'expériences

Les retours des utilisateurs finaux ont été largement positifs, soulignant plusieurs aspects du plugin :

- L'intuitivité permet une prise en main rapide sans nécessiter de formation approfondie pour utiliser les fonctionnalités proposées.
- La fiabilité des données est respectée avec de multiples validations avant la sauvegarde dans la base de données, ce qui renforce la confiance des utilisateurs dans les résultats qui sont fournis par le plugin.
- La réactivité et les performances permettent d'afficher des résultats malgré la quantité de données traitées (1Go par calibration en moyenne).

4. Insertion dans le milieu professionnel

Mon stage au sein du GP3 de l'IRFM du CEA Cadarache m'a offert une immersion précieuse dans le milieu professionnel de la recherche scientifique et technologique pour la fusion nucléaire.

4.1. Intégration et Adaptation

Dès mon arrivée, j'ai été accueilli et intégré dans une équipe d'ingénieurs et de chercheurs spécialisés. Mon tuteur, Monsieur Léo Dubus a joué un rôle crucial dans mon adaptation. Il m'a fourni les connaissances nécessaires sur le fonctionnement du Tokamak WEST. J'ai aussi rapidement rencontré Monsieur Victor MONCADA qui m'a montré comment fonctionne ThermaVIP et comment intégrer correctement un nouveau plugin.

4.2. Développement de compétences techniques

Travailler sur le développement du plugin de calibration m'a permis de renforcer et d'acquérir de nombreuses compétences techniques.

- J'ai renforcé mes compétences en programmation, avec l'utilisation de différentes méthodologies et de nouvelles spécificités du c++.
- J'ai acquis une compréhension approfondie de la gestion et de l'optimisation des bases de données complexes, ce qui est essentiel pour garantir la sécurité et l'intégrité des données.
- L'utilisation de la méthodologie Agile m'a permis de structurer et d'organiser de manière très efficace mon travail.

Sans cette insertion dans le monde professionnel au sein d'une entreprise spécialisée dans la recherche et développement, je n'aurais pas pu aborder des sujets aussi complexes et spécifiques.

4.3. Compétences en Communication et Collaboration

Bien que j'ai été le seul développeur sur ce projet, j'ai régulièrement collaboré avec des ingénieurs pour m'assurer que les fonctionnalités répondaient aux besoins opérationnels. Les réunions régulières ont été essentielles pour recueillir des retours d'expérience et ajuster le développement en conséquence. Cette interaction m'a permis de développer mes compétences en communication, en particulier dans la collecte des exigences et la présentation des résultats.

Conclusion

Mon stage au sein du GP3 de l'IRFM du CEA Cadarache, du 2 avril 2024 au 21 juin 2024, a été une expérience extrêmement enrichissante, tant sur le plan professionnel que personnel. Le principal objectif de ce stage était de développer un plugin de calibration pour les caméras IR du Tokamak WEST, intégré au logiciel ThermaVIP. Ce projet a abouti à des résultats pertinents et aujourd'hui ce plugin est utilisé par plusieurs personnes.

Grâce à une analyse approfondie des besoins et une compréhension détaillée de l'architecture existante, j'ai pu développer un plugin qui répond pleinement à ces exigences. Les résultats obtenus montrent qu'il répond non seulement aux besoins fonctionnels et non fonctionnels définis au départ, mais qu'il apporte également des améliorations significatives en termes de performance et de facilité d'utilisation. Les retours des utilisateurs finaux ont été extrêmement positifs, soulignant la pertinence et l'efficacité de l'outil développé.

J'ai lors de ce stage rencontré quelques difficultés comme l'adaptation aux applications spécifiques de l'entreprise, l'intégration dans l'écosystème complexe de ThermaVIP ainsi que l'application des principes des méthodes Agile.

Malgré ces difficultés, j'ai pu acquérir des compétences et des connaissances précieuses comme l'utilisation de méthodes de travail différentes, des outils très spécialisés comme ThermaVIP ainsi que la collaboration avec des ingénieurs et des chercheurs spécialisés et de différents domaines, ce qui m'a offert une vision approfondie des défis liés à la recherche sur la fusion nucléaire.

En conclusion, cette expérience au CEA Cadarache a été une étape clé dans mon parcours professionnel. Elle m'a permis de développer des compétences techniques et organisationnelles précieuses, tout en contribuant de manière significative à un projet innovant pour l'avenir des énergies de fusion.

Glossaire

BDD: Base de Données

CEA: Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

DL: Digital Level

GP3: Groupe de protection de la première paroi

IA: Intelligence Artificielle

IR: Infrarouge

IRFM: Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique

ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor

NUC: Non Uniformity Correction

SDK: Software Development Kit

SI2P: Service d'Ingénierie, des Internes et des Projets

SPPF: Service de Physique des plasmas de Fusion

STEP: Service Tokamak Exploitation & Pilotage

TI: Temps d'Intégration

Tokamak WEST: W Environment in Steady-state Tokamak

Lexique

Corps noir : Un corps noir est un appareil capable d'émettre un rayonnement infrarouge.

GitLab : GitLab est une plateforme complète qui propose des solutions de gestion de dépôt de code source, d'intégration continue (CI), de livraison continue (CD), de sécurité et de gestion de projet.

Kit de développement : Un kit de développement logiciel, aussi appelé trousse de développement logiciel, est un ensemble d'outils logiciels destinés aux développeurs, facilitant le développement d'un logiciel sur une plateforme donnée (Wikipedia, 2023).

Multitasking : Le multitasking ou multitâche en français, est une capacité d'un système d'exploitation à exécuter plusieurs tâches ou processus simultanément. Dans le contexte informatique, cela permet à un ordinateur de gérer et d'exécuter plusieurs programmes ou opérations en même temps (Wikipedia, 2024).

Open Source : Un logiciel Open Source est un code qui est conçu pour être accessible à tous, tout le monde peut le modifier à sa convenance.

Plugin : Un plugin, également appelé module d'extension, est un logiciel additionnel qui s'intègre à une application principale pour lui ajouter des fonctionnalités spécifiques ou étendre ses capacités.

Temps d'Intégration (TI) : Le temps d'intégration correspond au temps pendant lequel le capteur doit être exposé à la lumière.

Tokamak : Un tokamak est un réacteur de fusion nucléaire permettant de créer et de confiner un plasma de fusion grâce à des champs magnétiques. Son principe est de créer et de confiner un plasma chaud à près de 150 millions de degrés dans une cage magnétique en forme d'anneau (CDE, 2013).

Bibliographie

- CDE. (2013, 06 05). *Tokamak et fusion nucléaire : définition, fonctionnement technique*. Récupéré sur [connaissancedesenergies.org](https://www.connaissancedesenergies.org/pedagogique/tokamak#:~:text=Un%20tokamak%20est%20une%20machine,Igor%20Tamm%20et%20Andre%C3%AF%20Sakharov): <https://www.connaissancedesenergies.org/pedagogique/tokamak#:~:text=Un%20tokamak%20est%20une%20machine,Igor%20Tamm%20et%20Andre%C3%AF%20Sakharov>.
- CEA. (2023, 01 30). *De la recherche à l'industrie - L'histoire de la création du CEA*. Récupéré sur [cea.fr](https://www.cea.fr/Pages/le-cea/histoire-creation-CEA.aspx#:~:text=Apr%C3%A8s%20avis%20du%20conseil%20d,%C3%A9nergie%20atomique%20(CEA)): [https://www.cea.fr/Pages/le-cea/histoire-creation-CEA.aspx#:~:text=Apr%C3%A8s%20avis%20du%20conseil%20d,%C3%A9nergie%20atomique%20\(CEA\)](https://www.cea.fr/Pages/le-cea/histoire-creation-CEA.aspx#:~:text=Apr%C3%A8s%20avis%20du%20conseil%20d,%C3%A9nergie%20atomique%20(CEA)).
- CEA. (2024, 06 05). *IRFM/ThermaVIP*. Récupéré sur Github: <https://github.com/IRFM/thermavip>
- Wikipedia. (2024, 04 19). *Multitasking*. Récupéré sur Wikipedia: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Multitasking>
- Wikipedia. (2023, 04 15). *Kit de développement*. Récupéré sur Wikipedia: https://fr.wikipedia.org/wiki/Kit_de_d%C3%A9veloppement

Résumé

Lors de mon stage, du 2 avril 2024 au 21 juin 2024 au cœur de l'Institut de Recherche sur la Fusion par Confinement Magnétique (IRFM) du CEA Cadarache, j'ai été chargé de développer un plugin de calibration pour les caméras infrarouge (IR) du Tokamak WEST. Intégré au logiciel de visualisation de films infrarouge ThermaVIP, cet outil a pour vocation de faciliter la visualisation et la gestion des données métrologiques des caméras. Ces caméras sont essentielles pour la protection de la machine lors des expériences de fusion nucléaire.

À travers l'analyse des besoins, l'organisation méthodique du projet, et l'intégration rigoureuse au sein de l'architecture existante de ThermaVIP, j'ai pu rencontrer des défis techniques et des exigences opérationnelles. Ce parcours m'a permis de maîtriser des compétences techniques avancées et de m'adapter aux complexités des applications scientifiques.

Le développement utilisant les méthodes Agile, avec des validations continues par les utilisateurs finaux, a garanti que le plugin réponde parfaitement aux attentes, tout en offrant une interface intuitive et des performances optimisées. Les résultats obtenus et les retours positifs des ingénieurs et chercheurs témoignent du succès de ce projet.

Ce stage au CEA Cadarache a été très enrichissant que cela soit sur le plan technique et professionnel. Il m'a permis de comprendre l'importance de la recherche et développement dans les énergies bas carbone.

Mots clés

- Base de données
- Calibration
- Communication
- Connaissances
- Découverte
- Développement
- Fusion par confinement magnétique
- Infrarouge
- Méthodes agiles
- Performances
- Plugin
- Tokamak
- Instrumentation

Feuille de Temps

ORTEA FABIEN	Rétroplanning Stage BUT 2 Développement d'un plugin de calibration pour les caméras infrarouges du Tokamak WEST													
	AVRIL				MAI				JUIN					
Tâches	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
Connaissances autour du sujet														
Recherches / Documentation														
Organisation														
Conception de l'Architecture														
Réalisation des requêtes SQL														
Développement de fonctionnalités														
Tests de performances														
Rédaction du rapport														

Figure 13 - Rétroplanning