

16 janvier 2020

Rapport de mi-parcours
Développement d'un banc d'essai expérimental
Raphaël TURPIN

Franck Morel Tuteur pédagogique
Fanny Buyens Responsable industriel
Christian Roussel Référent apprentissage



Table des matières

Introduction.....	3
Chapitre 1 : Organisation du projet présentation de l'équipe et planification.....	10
Organisation du projet	10
Présentation de l'équipe projet	11
Planification du projet.....	12
Chapitre 2 : Etablissement des indicateurs et pilotage du projet.....	14
Chapitre 3 : Avancements dans les étapes du projet.....	16
1. Caractérisation du banc de fatigue	16
2. Conception d'un support permanent pour l'instrumentation RX	17
3. Réalisation d'un alignement mécanique entre le tube RX, l'axe de rotation et le détecteur 17	
4. Quantifications des écarts résiduels d'alignement	18
CONCLUSION	19
ANNEXE 1 : Etude sur les défauts de coaxialité du système de rotation de la machine de fatigue	20
Contexte	20
Problématique	20
Mesure A : Mesure du désaxement du plateau au comparateur	21
Mesure A' : Mesure du désaxement du plateau au laser Tracker	22
Mesure B : Mesure de l'inclinaison du plateau au comparateur	23
Analyse générale.....	24
Conclusion	24
ANNEXE 2 : Cahier des charges du support du détecteur à reprise d'image	25

Introduction

Je réalise mon apprentissage au CEA Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives. Cet EPIC Etablissement Public à Caractère Industriel et Commercial de recherche scientifique. Emploie 16000 salariés avec un budget annuel de 5 milliards d'euros. Le CEA s'impose comme un leader dans la recherche scientifique avec plus de 6000 brevets actifs et 750 dépôts de brevets par an. Il se divise en quatre directions :

- La Direction des Applications Militaires (DAM) est consacrée à la Défense et la Sécurité pour assurer une indépendance stratégique.
- La direction de l'Énergie Nucléaire (DEN) mène des recherches sur la production électrique nucléaire et décarbonée pour assurer une indépendance énergétique.
- La Direction de la Recherche Fondamentale (DRF) mène des recherches sur les matériaux et les sciences du vivant.
- La Direction de la Recherche Technologique (DRT), son activité est le développement de technologies jusqu'à la preuve du concept et la démonstration technologique et le transfert aux industriels à travers 1000 projets par an et 600 partenariats industriels.

Je travaille à la DRT également appelée CEA Tech, cette direction emploie 4500 personnes et représente 650 millions d'euros de budget annuel, dont 25 % proviennent de subvention et 75 % de recettes internes, et dépose 630 brevets par an. Les partenariats industriels sont menés en collaboration avec des entreprises dans tous les secteurs d'activité de la plus traditionnelle à la haute technologie en s'appuyant sur un large spectre de compétences technologiques en réponses aux enjeux économiques et sociaux (économie, sécurité, démographie, climat). Prêt de 100 Start-up ont été créées.

La DRT se divise en quatre instituts :

- Le Leti : Laboratoire de recherche spécialisé dans les micro et nanotechnologies et leur intégration dans les systèmes.
- Le List : Laboratoire de recherche spécialisé dans les systèmes numériques intelligents.
- Le Liten : Laboratoire de recherche spécialisé dans les nouvelles technologies de l'énergie et les nanomatériaux.
- CEA Tech Régions : Institut de diffusion technologique en régions.

CEA tech en Régions a été créée en 2013 à la demande de l'Etat, dans l'initiative nationale de réindustrialisation de la France par l'innovation.

Le projet consiste à installer des « plates-formes régionales de transfert technologique », au service de la compétitivité industrielle française. Elles s'appuient sur les résultats de la recherche fondamentale et ont pour mission de diffuser des technologies clés génériques dans de multiples champs industriels. Le transfert doit bénéficier aux PME et ETI régionales.

La participation à l'animation des écosystèmes locaux, et la dynamisation du tissu industriel français par des technologies innovantes permet de gagner en compétitivité par la création de valeur.

CEA Tech s'est implanté dans les régions (Figure 1) :

- Hauts-de-France (Lille)
- Grand Est (Metz)

- Région Sud PACA (Cadarache et Gardanne)
- Occitanie Pyrénées-Méditerranée (Toulouse)
- Nouvelle-Aquitaine (Bordeaux)
- Pays de la Loire (Nantes)
- Bretagne (Quimper)

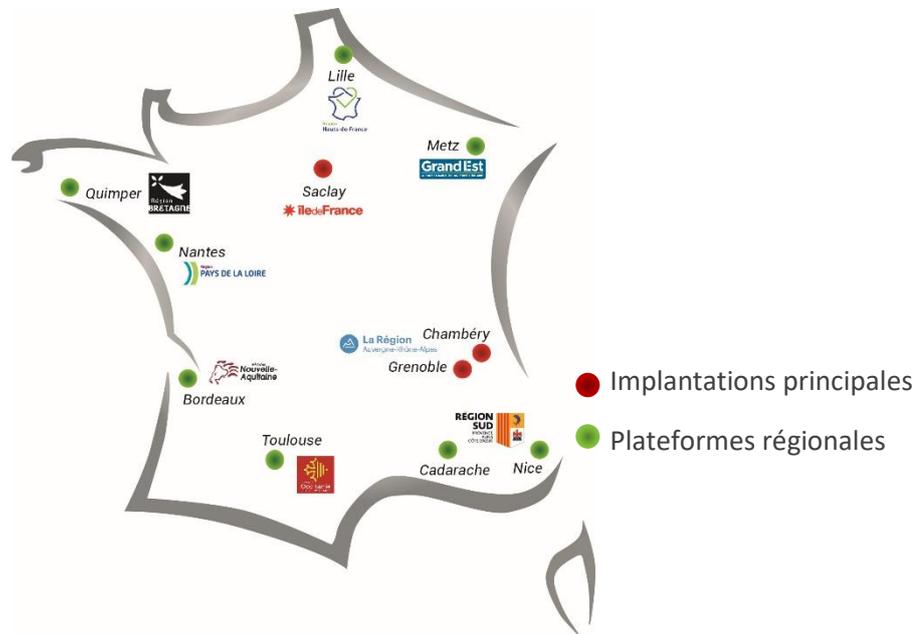


Figure 1 : Répartition des implantations en régions

Les plates-formes régionales travaillent en collaboration avec les acteurs locaux. CEA Tech déploie ces plates-formes régionales, en filiation avec les deux implantations historiques de Grenoble et Saclay.

Elles ont pour vocation de :

- diffuser les technologies clés génériques développées au CEA et dont l'accès est souhaité par l'ensemble des secteurs industriels,
- développer localement des activités de recherche spécifiques aux tissus industriels régionaux, complémentaires aux installations actuelles.

La Plateforme Régionale de Transfert Technologique des Pays de la Loire se répartie en thématiques :

- Matériaux, durabilité et caractérisation
 - Une plateforme d'imagerie RX robotisée, *Elixir* :
Cet équipement a pour but de développer des stratégies de contrôle robotisé par imagerie RX notamment pour les pièces à fort élancement et/ou à géométrie complexe, ainsi que les méthodes de reconstruction 3D associées pour permettre l'analyse et la caractérisation 3D des pièces inspectées. On y teste également des nouvelles technologies de détecteurs issus des laboratoires du CEA.
La plateforme intègre également un banc de fatigue qui, couplé à l'instrumentation RX, permet l'imagerie *in situ* des éprouvettes sollicitées en fatigue. L'objectif de ce banc expérimental est d'étudier les sites d'amorçage des endommagements ainsi que la propagation 3D des fissures dans la matière, afin de proposer in fine des modèles prédictifs de vieillissement des structures.

Cet équipement est un support à la mise au point de nouveaux procédés de fabrication et la mise en œuvre de nouveaux matériaux.

- La plateforme *Calipso* :

Cet équipement dispose de moyens de corrosion accélérée (brouillards salins) afin d'observer, d'analyser et de modéliser les mécanismes de corrosion. Il compte notamment un brouillard salin de grande dimension ainsi qu'un banc de fatigue équipé d'un brouillard salin pour caractériser le couplage fatigue corrosion sur les matériaux (l'éprouvette est ici sollicitée en fatigue sous atmosphère saline).

- Systèmes énergétiques

- L'Enceinte climatique de 55 m³ destinée aux tests sur des bancs électriques de 800 W de charges et décharges de batteries en évolution pour accueillir des tests sur piles à combustible.
- Un émulateur réseau électrique permet de modéliser le comportement des EMR (Energie Marine Renouvelable)

- Assistance au geste

- La réalité virtuelle est employée pour l'enregistrement de gestes et de mises en position.
- Des recherches sont menées sur l'assistance robotique notamment à travers la cobotique.

Le département des Pays de la Loire s'organise de la manière suivante : Un chef de département occupe la place de la direction. Un responsable d'installation s'assure du respect des conditions de sécurité sur les plateformes notamment. Les fonctions Ressources Humaines et Assistance Salariale est représentées sur la région. Une équipe commerciale est chargées des relations avec les industriels pour construire des partenariats et engager des projets. Sur chaque plateforme, un responsable est désigné. Enfin des ingénieurs, chercheurs, doctorants, post doctorants et technicien travaillent sur ces plateformes.

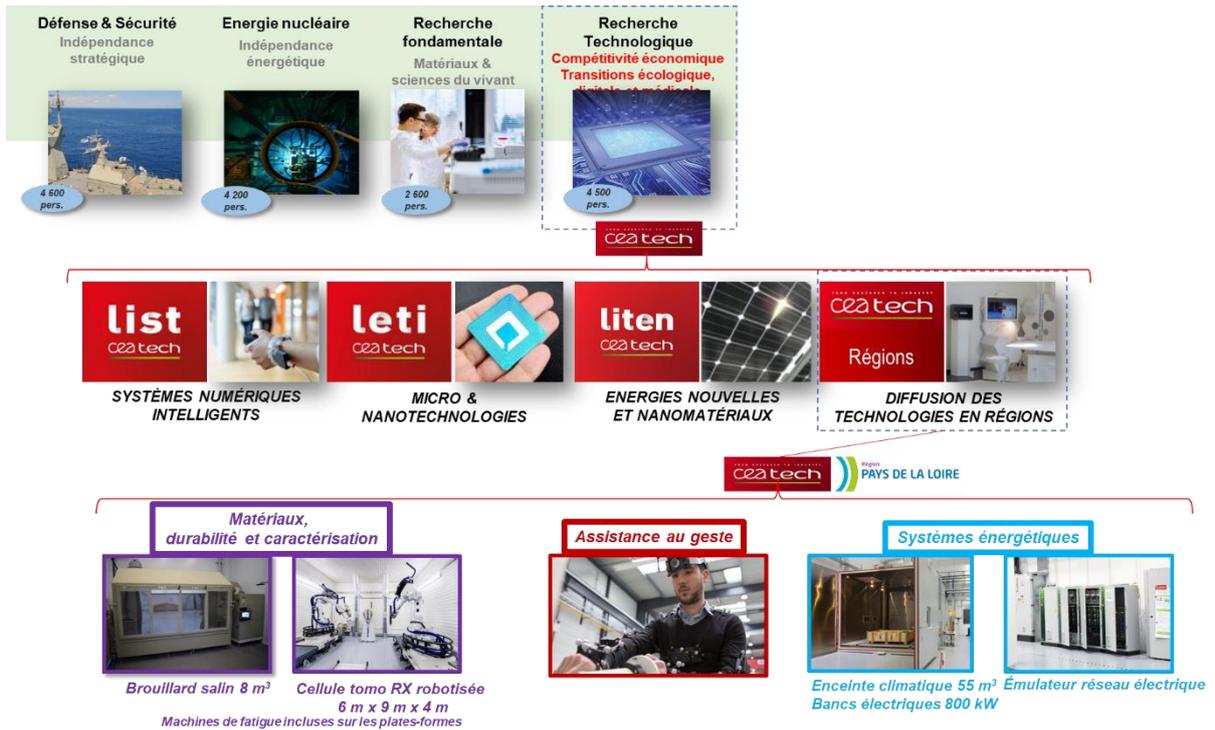


Figure 2 : Organigramme de présentation de CEA tech Pays de la Loire

Je travaille sur la plateforme d'imagerie RX robotisée dont la responsable est Fanny Buyens. Au cours de ma formation par apprentissage, j'ai réalisé la conception d'un support de pièce pour le positionneur, travaillé sur le déclenchement des acquisitions sur les détecteurs d'image par l'arrêt de l'instrumentation. J'ai également travaillé sur la simulation d'une fuite d'hydrogène dans l'enceinte climatique de test de bancs électriques.

Contexte :

Dans le cadre de recherches sur les matériaux, des essais de fatigue sont effectués pour déterminer la résistance des matériaux aux contraintes mécaniques (comportement, endommagement et rupture en fatigue) afin de modéliser et dimensionner de manière sûre leur durée de vie et le chargement admissible.

La plateforme Elixir, dotée d'un banc de fatigue, couple l'imagerie RX aux essais mécaniques pour étudier *in situ* les phases d'endommagement en 3D (initialisation et propagation des fissures dans la matière) sur des éprouvettes de différentes natures.

Les robots de la plateforme positionnent l'instrumentation RX (tube RX et détecteur bidimensionnel) de part et d'autre de l'éprouvette pour effectuer les acquisitions radiographiques. Le banc de fatigue est équipé d'une platine rotative (montée sur le vérin de torsion) faisant pivoter l'éprouvette sur elle-même permettant ainsi de radiographier l'éprouvette sous différents angles de vue. L'ensemble de ces données (~1600 images) est ensuite utilisé pour reconstruire le volume de l'éprouvette en 3D. Le nom donné à ce procédé d'imagerie est la tomographie RX, elle s'apparente à un scanner médical. L'éprouvette reste installée sur la platine rotative du banc de fatigue durant tout l'essai (~10⁶ cycles) ce qui permet de réaliser les mesures en charge (ouvrant ainsi les fissures) à intervalles définis, et d'automatiser la totalité de l'essai sans modification entre chaque acquisition.

La mise en œuvre de ce banc expérimental a montré des dérives de l'ordre de 200 µm dans la précision de positionnement robotique. Ces dérives sont préjudiciables pour l'atteinte des résolutions spatiales recherchées (~1-2 µm) pour ce type d'analyse matière. En effet, les robots sont des robots industriels dont le positionnement et la répétabilité par rapport à la commande donnée sont à repreciser pour assurer des volumes de reconstruction 3D sans artefacts.

Dans ce cadre, le projet de SFE consiste à modifier le banc expérimental (Figure 3) de façon à augmenter la précision de positionnement et d'alignement de l'instrumentation RX (tube à rayons X et détecteur 2D avec l'axe de rotation de la platine du banc de fatigue).

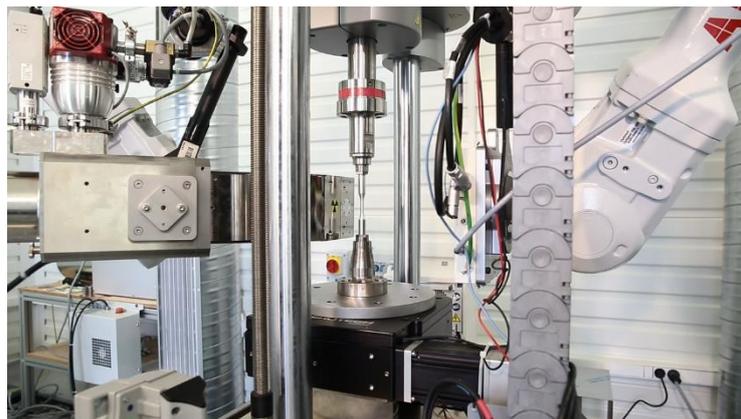


Figure 3 : Banc expérimental actuel : les robots viennent positionner l'instrumentation RX de part et d'autre de l'éprouvette en fatigue

Problématique :

La problématique de cette étude est de concevoir et installer un système permanent pour fixer l'instrumentation RX de part et d'autre du banc de fatigue. Il devra permettre des mouvements linéaires verticaux et transversaux pour régler le positionnement de l'instrumentation par rapport à l'éprouvette, et garder un alignement parfait entre le point d'émission du faisceau RX, l'axe de rotation de la platine du banc de fatigue et le centre détecteur.

L'espace volumique dédié à l'emplacement de ce système est restreint et non modifiable. Une attention particulière devra être portée à ce que le système ne gêne pas le fonctionnement de l'ensemble robotique inclus dans la cellule de radioprotection, ni l'accès aux différents éléments de la machine de fatigue. Il ne devra pas non plus altérer la sécurité des personnes lors de leur circulation dans la cellule, ni lors de la mise en œuvre d'expérimentations.

Enjeux :

Les enjeux scientifiques de ce projet sont la précision de positionnement, d'alignement et de stabilité du système pour atteindre la résolution spatiale nécessaire à l'étude de la microstructure interne des éprouvettes tout au long du cycle de fatigue. L'objectif est de permettre la réalisation de ce type d'étude en laboratoire en complément de travaux menés sur synchrotron dont les performances permettent d'atteindre de très hautes résolutions spatiales ($< 1 \mu\text{m}$) au détriment de volumes d'étude très petits ($< 1 \text{mm}^3$), non représentatifs de structures entières. Par ailleurs, les lignes de tirs des synchrotrons sont très demandées et les temps d'attente très longs.

Les résultats des essais illustreront le front de fissure de fatigue. Ils seront employés pour implémenter des modèles de comportement matériau. Ceci présente un fort intérêt pour les industriels sur les aspects dimensionnement et contrôle de pièces mécaniques.

Objectif :

L'objectif de ce projet est d'améliorer le banc de fatigue pour obtenir des résolutions de reconstruction de 1 à $2 \mu\text{m}$ sur la totalité de l'éprouvette.

J'ai mené des recherches sur les tubes RX, les résultats ont démontré que le tube existant sur la plateforme est adapté à l'application du projet Il sera conservé sur le banc expérimental avec un positionnement robotique.

L'atteinte de ces précisions requiert le respect des conditions d'alignement entre la source, l'axe de rotation de la table rotative et le détecteur (Figure 4) :

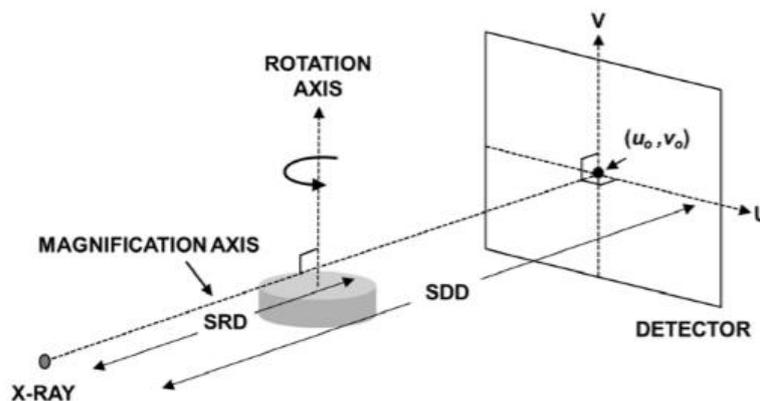


Figure 4 : conditions géométriques d'alignement d'un tomographe

- i. la projection du point de la source suivant l'axe de grandissement sur le détecteur est son centre
- ii. l'axe de grandissement est perpendiculaire au détecteur
- iii. l'axe de grandissement coupe l'axe de rotation de la table rotative de 90°
- iv. L'axe de rotation est parallèle aux bords du détecteur

Chapitre 1 : Organisation du projet présentation de l'équipe et planification

Ce chapitre fait l'objet de l'organisation du projet, de la présentation de l'équipe projet et de la planification des étapes.

Organisation du projet

À la suite de l'établissement des contraintes relatives à l'atteinte de la résolution de reconstruction, j'ai fait le choix des quatre étapes suivantes :

- **1. Caractérisation du banc de fatigue**

Le banc de fatigue est un élément critique du banc expérimental. Une fois installée et mise de niveau, aucun élément de réglage ne permet de modifier la position et l'axe de rotation de l'éprouvette. Il est donc crucial de s'assurer de la précision géométrique de cette machine. Les objectifs de cette étape sont d'identifier les éventuels défauts du banc, de les corriger ainsi que d'évaluer sa stabilité.

- **2. Conception d'un support permanent pour l'instrumentation RX**

Les conditions géométriques d'alignement de l'instrumentation avec l'axe de rotation de l'éprouvette pour atteindre la résolution recherchée requièrent un support d'instrumentation permanent. L'objectif de cette étape est de réaliser un support permanent rigide pour l'instrumentation RX permettant les déplacements suivant y axe de projection et suivant z axe de l'éprouvette. Le support devra être adapté à son environnement.

- **3. Réalisation d'un alignement mécanique entre le tube RX, l'axe de rotation et le détecteur**

Afin de respecter les conditions géométriques du banc expérimental, un alignement mécanique de précision doit être réalisé et contrôlé régulièrement. L'objectif est de dresser un protocole d'alignement mécanique, facilement reproductible et applicable sur des délais courts.

- **4. Quantifications des écarts résiduels d'alignement**

L'alignement réalisé avec le protocole décrit dans l'étape 3 présentera des défauts géométriques inhérents à la mécanique. L'objectif de cette partie est de concevoir un élément capable d'évaluer ces défauts pour les prendre en compte à la reconstruction.

Présentation de l'équipe projet

Je me positionne en tant que chef de projet. Je dirige une équipe de six collaborateurs répartis sur les différentes étapes du projet. Parmi ces six collaborateurs, trois d'entre eux proviennent de l'ENSAM (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers). Ils apportent leurs compétences mécaniques et sur les essais mécaniques. Les autres membres sont salariés de CEA Tech et travaillent sur la plateforme Elixir.

Les collaborateurs avec qui je vais travailler dans ce projet forment l'équipe projet constituée de :

- Chef de projet : Raphaël Turpin formation d'ingénieur en apprentissage
- La responsable de la plateforme (tutrice) : Fanny Buyens
- Du technicien de la plateforme : Benoît Roman
- De l'ingénieur : Adrien Le Reun
- D'une ingénieure de recherche du LAMPA : Linamaria Gallegos Mayorga
- D'un ingénieur en conception mécanique de l'ENSAM : Damien Locufier
- D'un ingénieur de l'ENSAM : Jérôme Péju

L'organigramme du projet est le suivant :

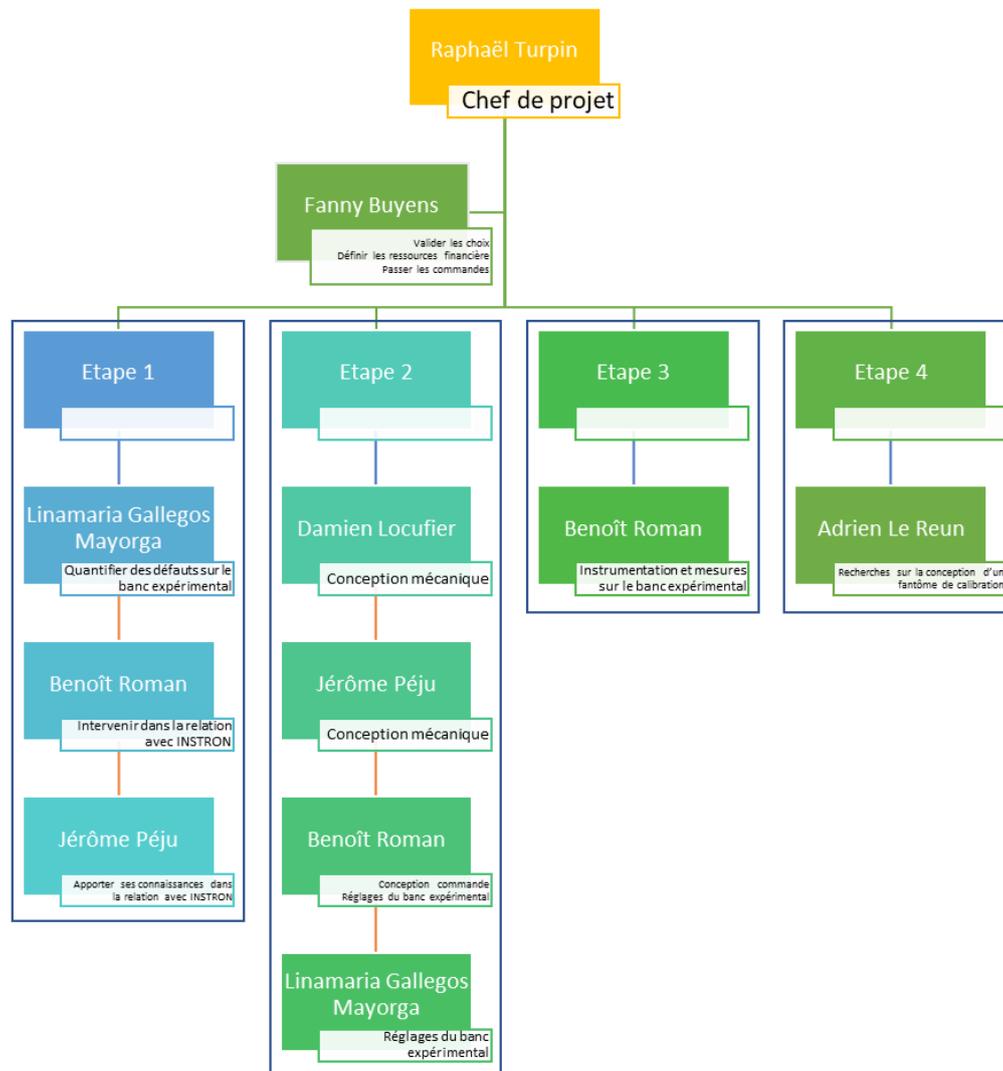


Figure 5 : Organigramme de l'équipe projet

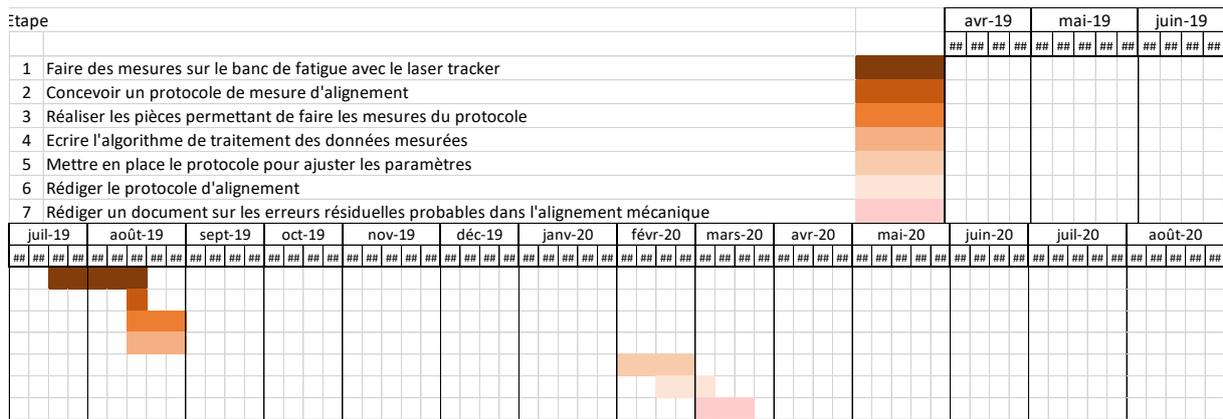


Figure 9 : Diagramme de Gantt de l'étape 3 : Réalisation d'un alignement mécanique entre le tube RX, l'axe de rotation et le détecteur

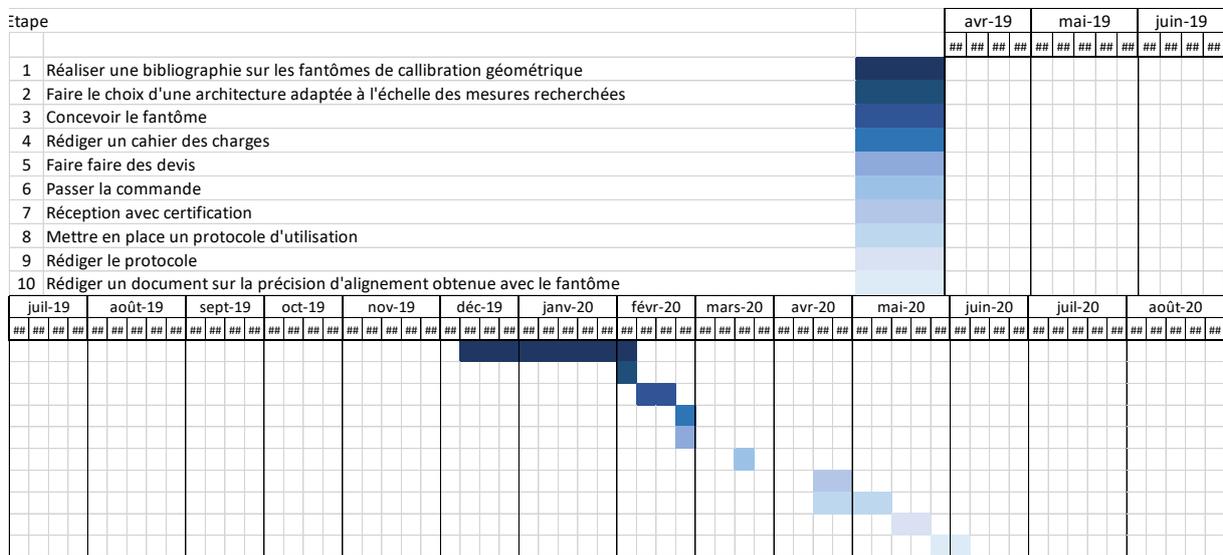


Figure 8 : Diagramme de Gantt de l'étape 4 : Quantifications des écarts résiduels d'alignement

Les marges employées sur la durée des étapes décrites dans le projet de SFE n'ont pas pu être reprises dans cette situation. En effet, si les risques de sources de retard avaient été établies, le retard accumulé sur le premier planning a conduit à ne pas les prendre en compte ici.

Chapitre 2 : Etablissement des indicateurs et pilotage du projet

Mon rôle dans le projet est celui du chef de projet il fait intervenir les compétences du manager :

- Diriger
- Piloter
- Animer
- Stimuler
- Evaluer

Je dois m'appuyer sur ces cinq compétences pour mener à bien le projet. Jusque-là, j'ai montré des faiblesses sur le plan managérial.

J'ai lancé le projet par une réunion « kick off » le 24 juin 2019. A ce moment le projet me paraissait clair, il y avait seulement quelques points relatifs à l'instrumentation RX à éclaircir. La réunion de lancement m'a permis d'introduire le sujet à l'ensemble de l'équipe et de commencer à répartir les tâches aux différents collaborateurs. Je m'appuyais sur la planification proposée en projet de SFE. J'ai réalisé le compte rendu de réunion que j'ai transmis à chacun. Un éclaircissement devait être mené sur l'instrumentation RX, j'ai mené des recherches sur les tubes et les détecteurs RX en oubliant de communiquer avec l'équipe. Je suis passé à côté du pilotage, de l'animation du projet pendant cette période et me suis isolé. Le résultat des recherches nous a conduit à faire évoluer le projet en le répartissant en quatre étapes. C'est l'opportunité pour moi de repartir sur des bonnes bases d'un point de vue de management de projet.

Je dois diriger mon équipe en répartissant les tâches en donnant des directives et en déléguant des travaux à mener pour assurer l'avancement du projet. Je rencontre des difficultés notamment dans la légitimité à exercer cette compétence et ai tendance à réaliser les tâches par moi-même. Cette difficulté je dois la surmonter en définissant clairement des objectifs SMART (Spécifique Mesurable Atteignable Réaliste Temporellement défini).

Mon plan d'action pour corriger mes erreurs de management du projet est le suivant :

Je vais relancer le projet en fin janvier en m'appuyant sur des outils managériaux par une réunion avec toute l'équipe. La présentation de l'évolution du projet est prévue. L'usage d'outils managériaux comme le SMART va m'aider dans mon rôle de chef de projet. A la suite de cette réunion, un point régulier sera organisé avec l'équipe toutes les deux semaines pour informer de l'avancée des différentes étapes du projet et ainsi stimuler le travail de chacun par une vision globale de l'avancée. J'organiserai un point individuel régulier (au moins une fois par semaine) avec les personnes travaillant sur leur tâche à réaliser pour m'assurer de la bonne compréhension des objectifs et mesurer l'avancement du projet.

En communiquant plus avec mes collaborateurs, je vais porter un regard particulier à la reconnaissance des travaux effectués. Ceci aura pour effet d'améliorer l'ambiance de travail mais également de stimuler l'équipe.

Afin de faciliter le pilotage et le suivi du projet je dois m'appuyer sur des indicateurs de performances traduisant notamment l'avancement dans le projet et quantifiant le travail restant à réaliser.

J'ai dressé des indicateurs temporels pour évaluer l'avancement du projet. Ils sont au nombre de 4 :

- Le retard au lancement d'une sous étape
- Le retard à la clôture d'une sous étape
- Le taux d'avancement d'une étape
- Le taux d'avancement pondéré à la durée prévue d'une étape

Ces indicateurs sont suivis dans un tableau Excel par comparaison avec la date mise à jour automatiquement. Un code couleur rouge indique un retard sur une sous étape alors qu'un code vert signifie que l'étape s'est réalisée dans les temps. Cet Excel doit être suivi quotidiennement et les dates de lancement et de clôture d'étapes répertoriées. Cet outil me permettra de m'appuyer sur des chiffres lors des réunions en équipe pour présenter le travail effectué et ce qu'il reste à faire.

Chapitre 3 : Avancements dans les étapes du projet

Ce chapitre est présent pour faire un point sur l'avancement des différentes étapes du projet en explicitant les travaux effectués pour atteindre les objectifs de l'étape et le travail qu'il reste à effectuer. L'organisation de ce travail est décrite dans le diagramme de Gantt.

1. Caractérisation du banc de fatigue

La première mission de cette étape a été de caractériser des défauts mécaniques observés lors des premiers essais et d'identifier leur origine.

J'ai réalisé cette mission avec Linamaria Gallegos Mayorga en employant deux instruments de métrologie. J'ai dans un premier temps employé un instrument laser. Les résultats obtenus quantifient les écarts de coaxialité entre le plateau de la table rotative et son axe de rotation.

Afin d'appuyer les résultats obtenus, Linamaria et moi avons employé un comparateur pour réaliser les mesures de coaxialité et de perpendicularité du plateau dont les résultats sont cohérents avec les précédents.

Nous avons cherché à identifier la cause de ce désalignement en étudiant le plan du banc de fatigue avec la table rotative. Nous avons observé l'absence de centrage entre la table rotative AEROTECH et le plateau. La mise en position consiste uniquement en un appui plan.

Nous cherchons à réduire ce défaut géométrique mais pour des questions d'assurance, il faut l'intervention d'INSTRON sur leur produit.

Avancement / Résultats :

Les résultats corroborent parfaitement entre les deux instruments. Ces travaux ont fait l'objet d'un rapport que nous avons partagé avec la société INSTRON, constructeur et fournisseur du banc de fatigue. Ce rapport est donné en annexe (ANNEXE 1).

Le rapport a été transmis à INSTRON et les défauts seront évoqués lors d'une rencontre avec un employé de l'entreprise. Il sera également question de la mise à niveau du banc de fatigue et d'un rapport géométrique qui précise la précision et stabilité de la machine et certifie sa précision et stabilité.

2. Conception d'un support permanent pour l'instrumentation RX

Pour répondre aux objectifs de conception d'un support permanent pour l'instrumentation RX, j'ai dressé un état des lieux des tomographes RX employées dans l'industrie (ANNEXE 2). Une analyse de leur structure mécanique par rapport à l'application du projet n'apporte pas de solutions directement applicables sur le banc expérimental. Cependant, elle apporte des idées pour la conception du support.

J'ai également réalisé des recherches sur un détecteur RX plus résolu que celui présent sur le banc expérimental. Je me suis penché sur un détecteur à reprise d'image qui permet avec un plus grand nombre de pixels d'obtenir des images plus résolues.

A partir de ces informations et de données relevées dans la cellule par rapport à l'espace disponible. J'ai rédigé un cahier des charges définissant les besoins du support et ses contraintes. La conception est réalisée en collaboration avec les ingénieurs des Arts et Métiers Damien Locufier et Jérôme Péju.

Avancement / Résultats :

Le cahier des charges est présent en ANNEXE 2, il concerne le support de détecteur. Le lancement de la conception sera réalisé début janvier. A l'issue de cette conception, je rédigerai un cahier des charges pour la fabrication. Enfin, je ferai des devis. La commande du support sera réalisée lors de la commande du détecteur à reprise d'écran.

3. Réalisation d'un alignement mécanique entre le tube RX, l'axe de rotation et le détecteur

Le premier objectif de cette étape est de mesurer l'axe de rotation de la table rotative. J'ai réalisé un système qui permet de d'identifier cet axe à partir de mesures laser.

A l'aide d'un repère défini par trois points de mesures laser sur la source et sur le détecteur, il est alors possible de représenter avec leur orientation ; la source, le détecteur et l'axe de rotation dans un repère commun. Il est ainsi possible de calculer les valeurs des différents paramètres géométriques et en déduire les corrections à apporter au robot source et au support de détecteur pour s'aligner par rapport à l'axe de rotation de la table rotative. J'ai réalisé un algorithme Python pour reconstruire la situation mesurée et évaluer les paramètres géométriques de l'ensemble.

Dans cette configuration, le laser a une précision de l'ordre de 10 μm , ce n'est pas suffisant pour obtenir les résolutions recherchées après reconstruction. Cependant, ces mesures sont traitées pour corriger mécaniquement, de manière la plus précise possible, la position et l'orientation de la source et du détecteur. La mécanique étant limitante dans ce projet la précision du Laser Tracker est largement suffisante pour cette opération.

Avancement / Résultats :

Les mesures effectuées sur la rotation de la table rotative sont satisfaisantes, il reste néanmoins à définir un repère sur la source et un second sur le détecteur et d'établir les paramètres qui relient les repères définis par les points et les vrais repères de l'instrumentation. Pour cette partie je travaillerai avec Benoît Roman.

L'algorithme de traitement nécessite d'être complété par une partie qui renvoie directement les paramètres à fournir au robot source et au support de détecteur pour les corriger.

4. Quantifications des écarts résiduels d'alignement

Pour évaluer les défauts résiduels inhérents à la mécanique, nous emploierons un fantôme de calibration géométrique.

Le fantôme de calibration géométrique est destiné à la correction des paramètres géométriques du système d'acquisition. Il est généralement constitué de billes métalliques dans un milieu quasi-transparent aux rayons X. Il est fixé sur la table rotative à la place de l'éprouvette et des radiographies sont acquises à différents pas angulaires. Les radiographies sont traitées et les centres des billes projetées sont retrouvées par traitement d'image. A partir d'une fonction définissant la position des points des billes projetées dans le cas idéal, on établit une fonction objective comme la somme des écarts au carré des points projetés. Les paramètres de la fonction sont des paramètres géométriques du banc expérimental, Avec une fonction d'optimisation, il est possible de remonter aux paramètres géométriques réels.

Je mène actuellement des recherches bibliographiques sur les fantômes de calibration afin d'établir lequel sera le plus adapté à notre application.

Avancement / Résultats :

Cette partie est en cours et s'appuie sur les travaux d'Adrien Le Reun concernant la mise au point d'un fantôme de calibration pour le banc d'imagerie RX robotisée. A la suite du choix du type de fantôme à utiliser, j'en concevrai un adapté au banc expérimental. Cette conception fera suite à un cahier des charges, des devis et la commande du fantôme avec un certificat métrologique. Je réaliserai également un algorithme de traitement des données obtenues pour évaluer les défauts résiduels et ainsi les prendre en compte dans l'algorithme de reconstruction.

CONCLUSION

L'objectif de ce projet est d'améliorer le banc d'essai expérimental de fatigue et d'imagerie RX *in situ*. Il évolue avec le temps et les recherches réalisées. Les tâches réalisées couplés aux travaux sur la plateforme permettent de caractériser les éléments actuels du banc expérimental. La recherche sur différents types de détecteurs a permis d'identifier un détecteur plus résolu pour atteindre des résolutions d'images plus fines. L'état des lieux des solutions employées dans l'industrie est source d'inspiration pour la conception du support de détecteur. Il reste encore de nombreuses tâches à réaliser pour atteindre l'objectif de résolution de reconstruction. Cependant, les recherches et mesures réalisées en ont bien éclairci les enjeux.

Ce travail à mi-parcours est l'occasion de remettre en question mes pratiques managériales de relancer le projet. Les recherches m'ont permis de redéfinir les enjeux du banc expérimental et de revoir l'organisation du projet. L'état d'avancement des étapes correspond à la récente planification. L'importance des outils managériaux vont m'apporter de l'aide dans le suivi de ce planning et la communication au sein de l'équipe. La répartition des tâches, la gestion des priorités sont cruciales pour parvenir à suivre le planning.

ANNEXE 1 : Etude sur les défauts de coaxialité du système de rotation de la machine de fatigue

Contexte

Dans le cadre de recherches menées sur la thématique des matériaux, la plateforme Elixir d'imagerie à RX robotisée de CEA Tech Pays de la Loire s'est procuré une machine de fatigue INSTRON *ElectroPuls™ | E10000 Linear-Torsion All-Electric Dynamic Test Instrument* équipée d'une table rotative AEROTECH AGR200. Les essais de fatigues réalisés sur cette machine comprennent des séries de radiographie RX à différents angles de rotation de l'éprouvette (~1600 radiographies). Ces radiographies sont utilisées pour reconstruire l'éprouvette en 3D. La résolution recherchée pour la reconstruction est inférieure à 10µm.

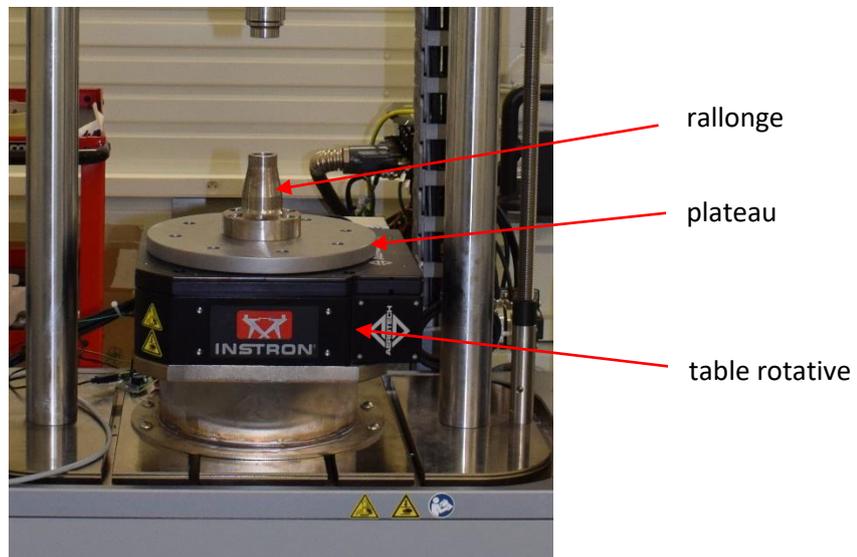


Figure 10 : Ensemble rotatif

Sur les mesures effectuées nous constatons des déplacements horizontaux de l'éprouvette lors de sa rotation. Ces déplacements conduisent à des artefacts de reconstruction lors de la reconstruction 3D de l'éprouvette. La source des défauts provient notamment d'un désaxement du plateau par rapport à la table rotative.

Problématique

La problématique de cette étude est de quantifier les défauts d'alignement et d'inclinaison du plateau par rapport à la table rotative. Les raisons de ces défauts sont également identifiées.

Mesure A : Mesure du désaxement du plateau au comparateur

Objectif : La distance relative mesurée apporte des informations sur le désaxement du plateau par rapport à l'axe de rotation.

Procédure :

Le comparateur (précision 0,01mm) est placé sur la paroi latérale du plateau (figure 20) et est fixe par rapport au marbre de la machine. Il mesure le déplacement relatif du bord du plateau au cours de sa rotation.

Deux séries de mesures (aller, retour) sont réalisées avec un relevé de points tous les 15°.



Figure 11 : Positionnement du comparateur sur la machine pour la mesure A

Résultat :

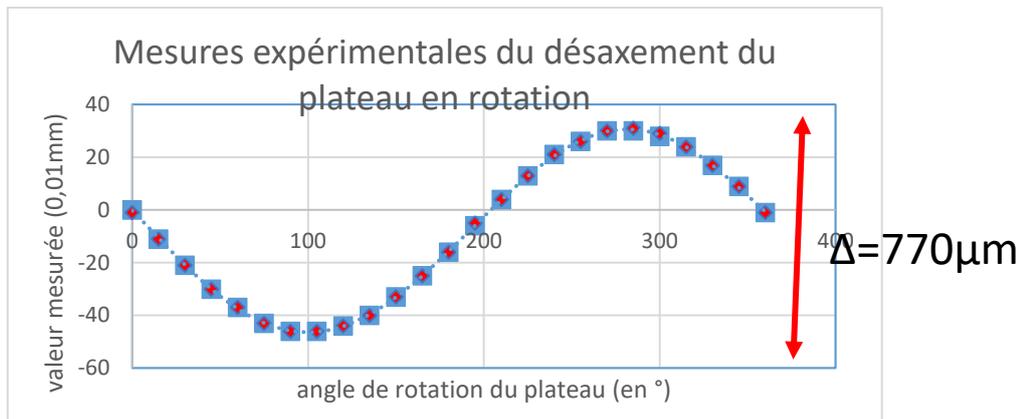


Figure 12 : Résultat de la mesure A

Analyse :

L'amplitude du déplacement mesuré au comparateur (figure 21) est le double de la valeur du désaxement (Dans le cas d'un alignement, la valeur mesurée serait systématiquement nulle). La valeur de désaxement est alors de 385μm.

Cette valeur s'explique par une erreur de conception du système : aucun centrage n'est assuré entre le plateau et la table rotative.

Mesure A' : Mesure du désaxement du plateau au laser Tracker

Objectif : La position du centre du plateau dans un repère global permet d'identifier un désaxement du plateau par rapport à la table rotative.

Procédure :

Le laser Tracker mesure les coordonnées d'une bille dans l'espace. La mesure consiste à déplacer la bille le long du plateau en relevant les points au laser Tracker. Les coordonnées des centres du plateau sont obtenues en fittant des cercles sur les points de mesures.

Une série de mesure est réalisée sur deux tours (aller, retour) avec un relevé de valeur tous les 45°.

Pour chaque relevé de valeur le centre des cercles est représenté dans un plan.

Résultats :

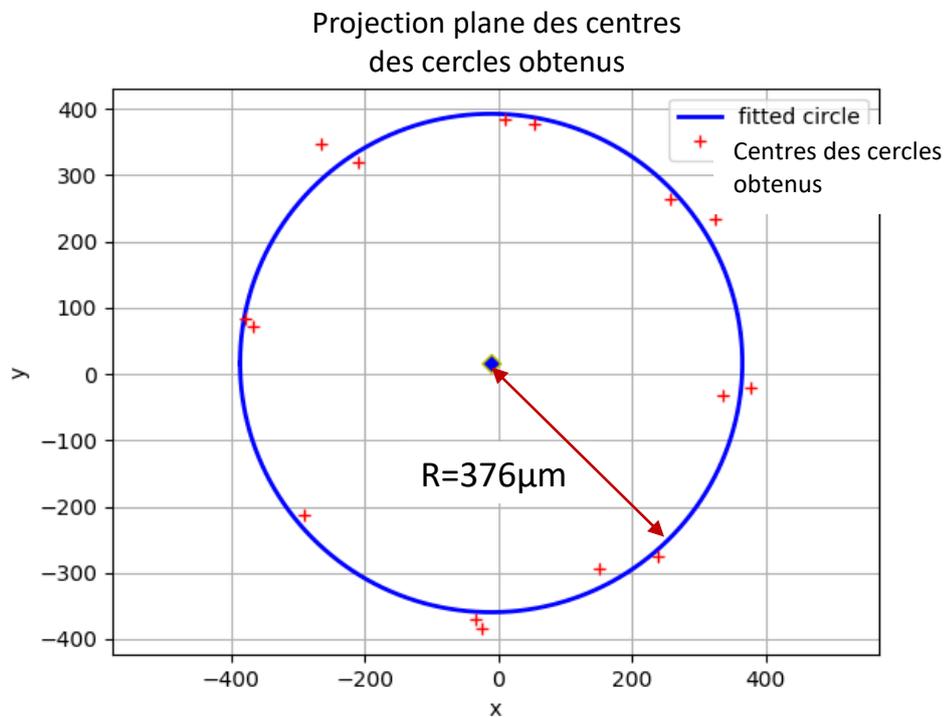


Figure 13 : résultat de la mesure A'

Analyse :

Les résultats montrent que (figure 22) l'axe de rotation du plateau est désaxé d'environ 376 µm. La précision de cette valeur dépend de la précision des mesures avec le déplacement de la bille autour du plateau et du post traitement. Cette valeur est cohérente avec celle obtenue dans l'essai A.

Mesure B : Mesure de l'inclinaison du plateau au comparateur

Objectif : La distance relative apporte des informations sur l'inclinaison du plateau par rapport à l'axe de rotation.

Procédure :

Le comparateur (précision 0,01mm) est placé sur la paroi supérieure du plateau (figure 23) et est fixe par rapport au marbre de la machine. Il mesure le déplacement relatif d'un point en extrémité du plateau au cours de sa rotation.

Deux séries de mesures (aller, retour) sont réalisées avec un relevé de points tous les 15°.

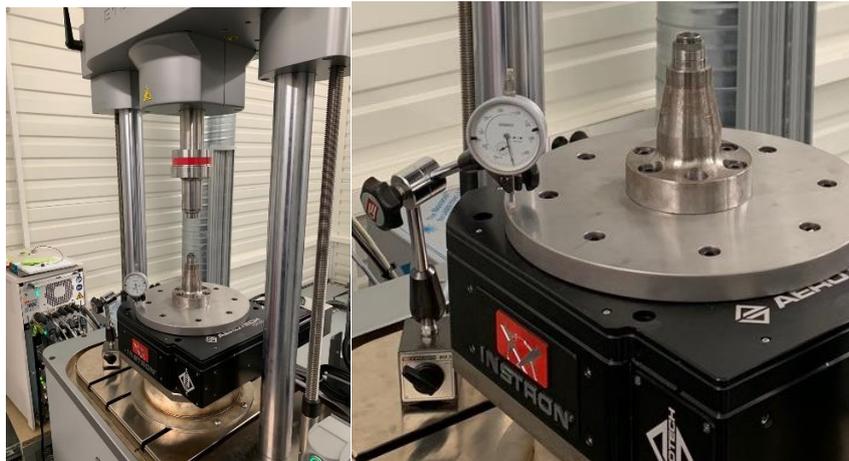


Figure 14 : Positionnement du comparateur sur la machine pour la mesure B

Résultat :

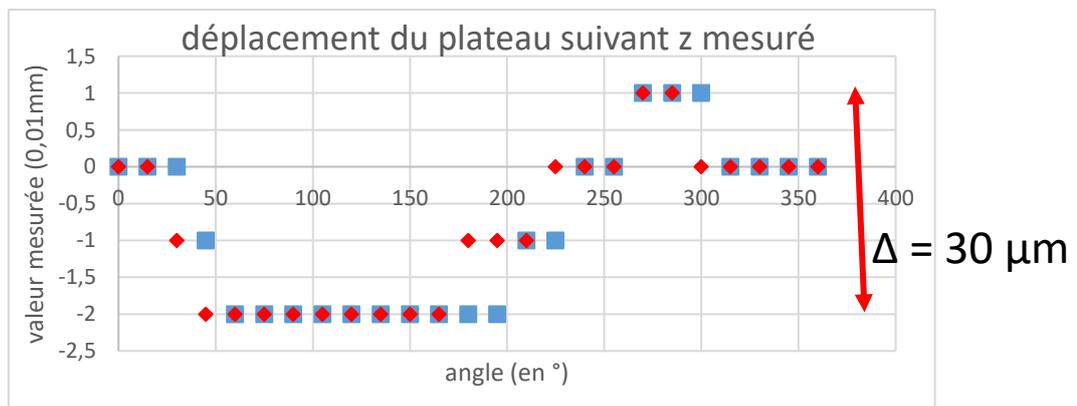


Figure 15 : Résultat de la mesure B

Analyse :

Le comparateur n'est pas suffisamment précis dans cette situation (figure 24). L'amplitude de 30 μm et l'allure sinusoïdale se traduisent par une inclinaison de 105 μrad .

Sur la documentation de la table rotative *EGR200*, l'erreur d'inclinaison est inférieure à 49 μrad .

Ce résultat s'explique également avec les tolérances géométriques du plateau. La tolérance de parallélisme entre les deux surfaces du plateau est de 30 μm .

Analyse générale

En recherchant l'origine des écarts, nous avons identifié un problème dans la conception et une tolérance géométrique trop souple sur le plateau.

Le problème identifié dans la conception est l'absence de centrage entre le plateau et la pièce rotative de la table. La liaison réalisée par appui plan et maintien en position par les vis n'assure pas la coaxialité du plateau avec l'axe de rotation de la table rotative tandis qu'un centrage assurerait l'alignement.

La tolérance de parallélisme de 30 μm de la surface supérieure du plateau par rapport à sa surface inférieure n'est pas assez exigeante pour les applications de l'installation. En effet l'inclinaison du plateau occasionne un déplacement horizontal de l'éprouvette proportionnel à la longueur de la rallonge. De plus, la machine est destinée à des essais de fatigue, sensibles à l'alignement de l'effort.

Conclusion

En raison de la précision recherchée pour nos études, nous souhaitons modifier des éléments du système afin de corriger les défauts mentionnés ci-dessus. Dans cette démarche, nous souhaiterions obtenir les fichiers CAO (Conception Assistée par Ordinateur) du système pour proposer d'autres solutions. Nous restons également ouverts aux solutions correctives que vous pourriez vouloir mener.

ANNEXE 2 : Cahier des charges du support du détecteur à reprise d'image

1. Contexte et définition du problème :

La plateforme d'imagerie RX robotisée ELIXIR de CEA Tech à Nantes oriente une partie de ses recherches autour des comportements des matériaux sollicités en fatigue. L'objectif du projet est d'observer la propagation de la fissure de fatigue dans une éprouvette afin de corréliser des modèles numériques par éléments finis avec l'expérimentation réelle. On cherche à avoir une précision de l'ordre du micromètre sur les mesures.

La technologie employée pour réaliser ces mesures est basée sur la radiographie RX et l'absorption des photon X par la matière du matériau observé. La réalisation de radiographies successives couplées à une rotation de l'objet permet, avec des algorithmes, de reconstruire l'objet en trois dimensions, c'est ce qu'on appelle la tomographie. Dans le cas du projet, on parle de microtomographie. L'enjeu principal d'un tel banc expérimental est d'assurer l'alignement, entre la source, l'axe de rotation de l'objet et le détecteur, et des conditions idéales d'alignement et d'orientations, illustrées ci-dessous, pour la réalisation de la mesure.

Géométrie du système d'acquisition idéale (Figure 16) :

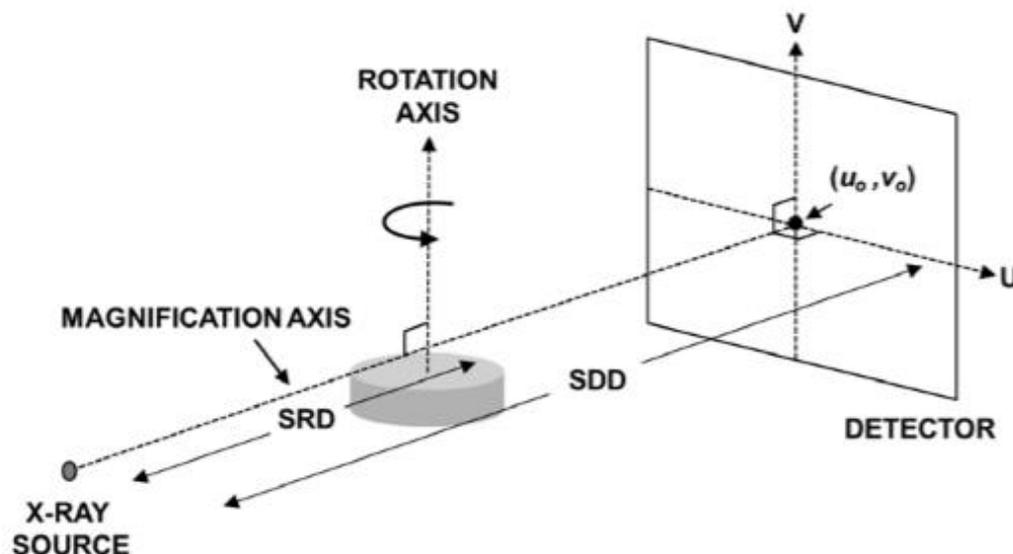


Figure 16 : Géométrie idéale pour la tomographie / Ferrucci et al 2018

Pour réaliser ces mesures la plateforme est équipée de deux robots six axes installés sur des tracks qui positionnent l'instrumentation RX de part et d'autre de l'objet étudié (tube RX microfoyer, et détecteurs plan flatpanel). Un banc de fatigue INSTRON à vérin rotatif et équipé d'une platine de rotation, assure les cycles de fatigue de l'éprouvette et la rotation de celle-ci. La plateforme est une enceinte en plomb climatisée pour maintenir une température et un taux d'humidité constant et homogène dans l'enceinte.

Pour atteindre une résolution de reconstruction de l'ordre du micromètre sur la reconstruction, un détecteur à reprise d'image (Figure 26 : Schéma d'un détecteur à reprise d'image) plus résolu sera employé. Un tel détecteur est plus volumineux qu'un flatpanel et ne peut pas être installé sur un robot. L'objectif est de concevoir un support adapté à ce détecteur qui atteigne des précisions de positionnement satisfaisantes.

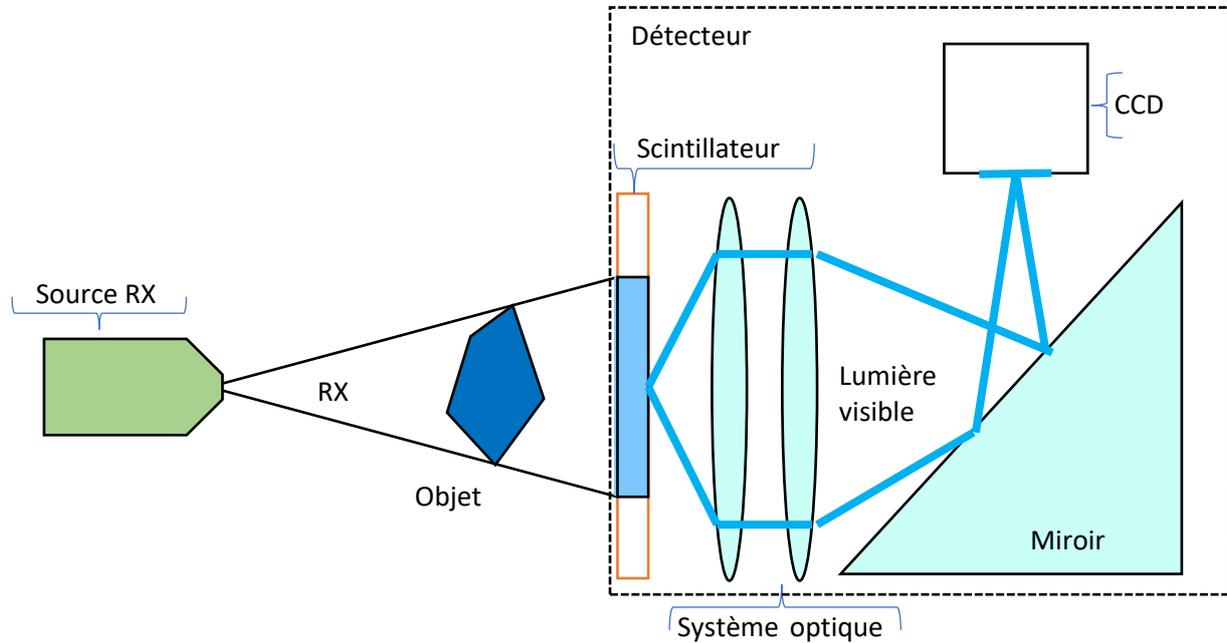


Figure 17 : Schéma d'un détecteur à reprise d'image

2. Objectif du projet

Nous cherchons à positionner le détecteur dans l'alignement Source / axe de rotation / détecteur. Le détecteur devra suivre le robot de la source RX dans son déplacement suivant l'axe vertical z d'une amplitude de 200 mm et avoir un déplacement possible suivant l'axe y axe de rayonnement pour régler le grandissement de l'image mesurée. Ce support doit assurer une grande stabilité du détecteur pour éviter des flous liés à des vibrations ou autres bruits.

3. Périmètre

Le support sera réalisé en un unique exemplaire comme upgrade de la plateforme, et sera utilisé dans le cadre de projets de R&D.

4. Description fonctionnelle du besoin

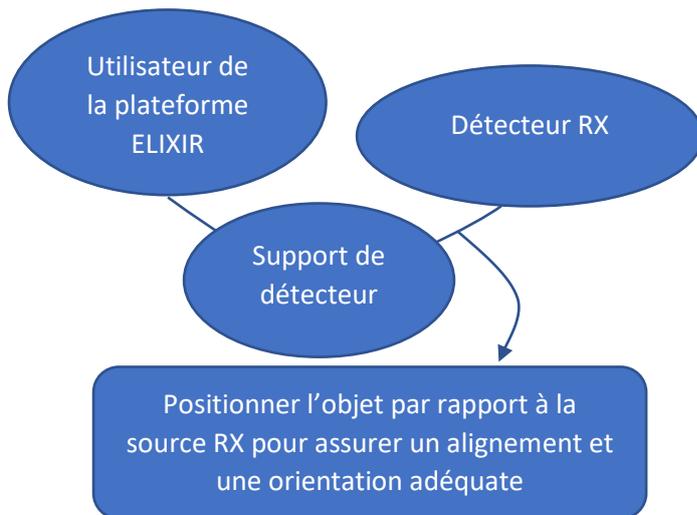


Figure 18 : Schéma du besoin

Le besoin énoncé :

Le produit rend service à l'utilisateur de la plateforme ELIXIR en lui permettant de positionner le détecteur de sorte à assurer un alignement géométrique avec l'axe de rotation de l'objet et la source et une orientation adéquate (Figure 27).

Phases de vie du produit :

- Fabrication
 - Normes environnementales
 - Normes de sécurité
 - Entreprise fabricante
 - Matière première
 - Opérateurs
 - Machines
- Transport
 - Moyen de transport
 - Emballage
 - Outils de manutention
 - Opérateur de manutention
 - Plateforme ELIXIR
 - Entreprise fabricante
- Montage
 - Entreprise fabricante
 - Normes de sécurités
 - Plateforme ELIXIR
 - Chef d'installation
 - Instrumentation RX
- Métrologie/test d'intégration
 - Entreprise fabricante
 - Rapport de métrologie
- Installation / mise en œuvre
 - Fantôme de calibration
 - Utilisateur
- Validation
 - Société de certification
 - Normes de sécurité
- Utilisation normale
 - Banc de fatigue
 - Eprouvette
 - Utilisateur
 - Normes de sécurité
 - Détecteur RX
 - Environnement de la plateforme
 - Robot 1 (source)
 - Robot 2 (détecteur)
- Maintenance
 - Entreprise fabricante
 - Plateforme ELIXIR

On s'intéresse particulièrement à la phase de vie Utilisation normale

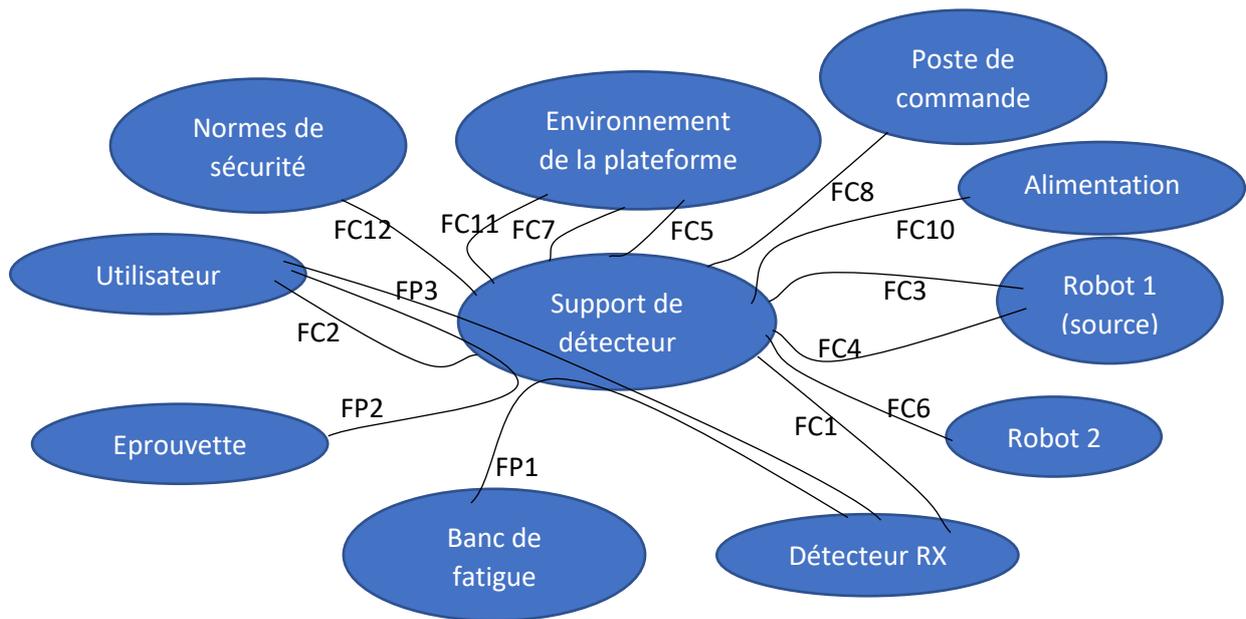


Figure 19 : Diagramme des inter-acteurs

Cahier des charges fonctionnel

Repères	Fonctions	Critères	Niveaux	flexibilité
FP1	Permettre de positionner le détecteur RX par rapport à l'axe de rotation de la table rotative sur le banc de fatigue	Angle axe de rotation / plan du détecteur	<0.01°	F1
		Parallélisme axe de rotation / bord du détecteur	<0.01°	F1
FP2	Permettre à l'utilisateur d'installer l'éprouvette	Volume d'accès	L(800 mm) *H(2000 mm) *P(800 mm)	F0
FP3	Permettre à l'utilisateur de régler la position du détecteur manuellement	Éléments de réglages	0.002 mm 0.005°	F1
FC1	Doit supporter et déplacer le détecteur	Masse	30kg	F0
		Volume (mm)	468*468*600	F1
FC2	Permettre à l'utilisateur de jouer sur le grandissement avec un déplacement suivant y (horizontal)	Course	500 mm	F0
		Commande	LabVIEW	F5
FC3	Suivre le déplacement du robot 1 suivant z (verticale)	Course	200 mm	F0
		delta	0.02 mm	F0
FC4	Doit être asservit au robot 1	Branchement sur la baie robotique actuelle	moteur ABB	F0
FC5	Doit être de niveau	Angle de niveau	0.001°	F1
FC6	Doit laisser l'accès au robot 2	Encombrement Volume	Cf photos * et CAO	F0
FC7	Doit être stable	Raideur de la structure	grande	F0
FC8	Doit être commandé par le poste de commande	Poste de commande actuel	Technologie compatible	F1

			(ABB, LabVIEW)	
FC9	Doit assurer une distance de sécurité avec l'éprouvette permettant un grandissement important	Distance	>1m	F1
FC10	Doit être alimenté par une alimentation électrique	Tension	230V/400V triphasé 24V continu (armoie/ commande)	F1
		Longueur des câbles	>10m	
FC11	Doit supporter l'exposition aux RX	Protection de l'électronique au plomb		F1
FC12	Doit assurer la sécurité de l'utilisateur	Risques (pincement écrasement)	Nuls	F0

*La description de la zone ou installer le support est décrite à travers les figures 29 à 32

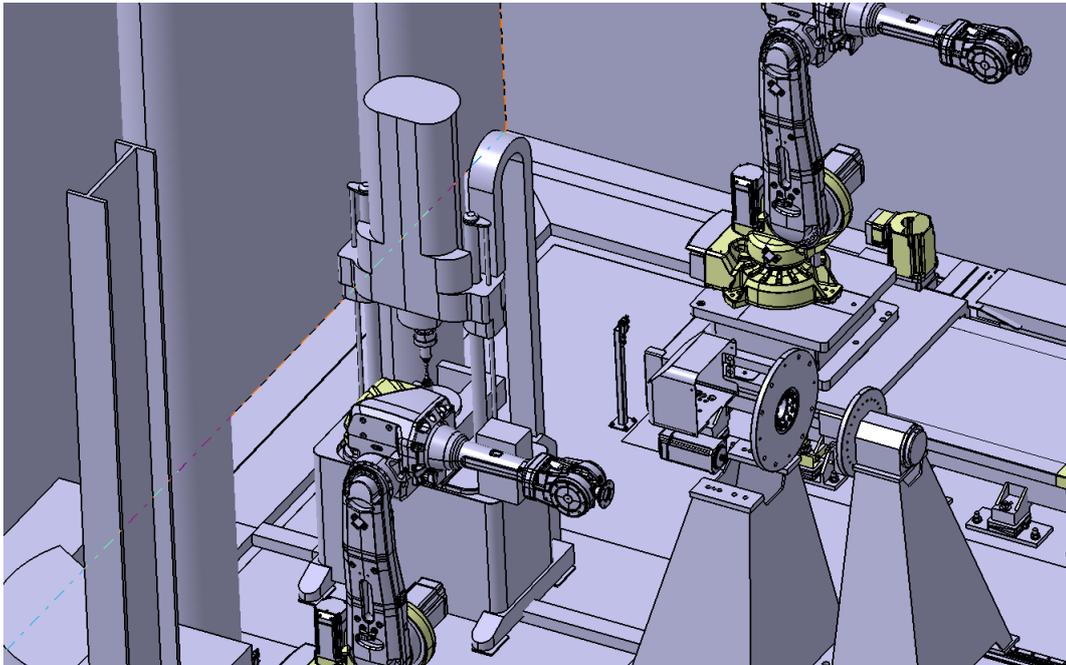


Figure 20 : zoom sur l'enceinte en CAO avec le banc de fatigue et les robots

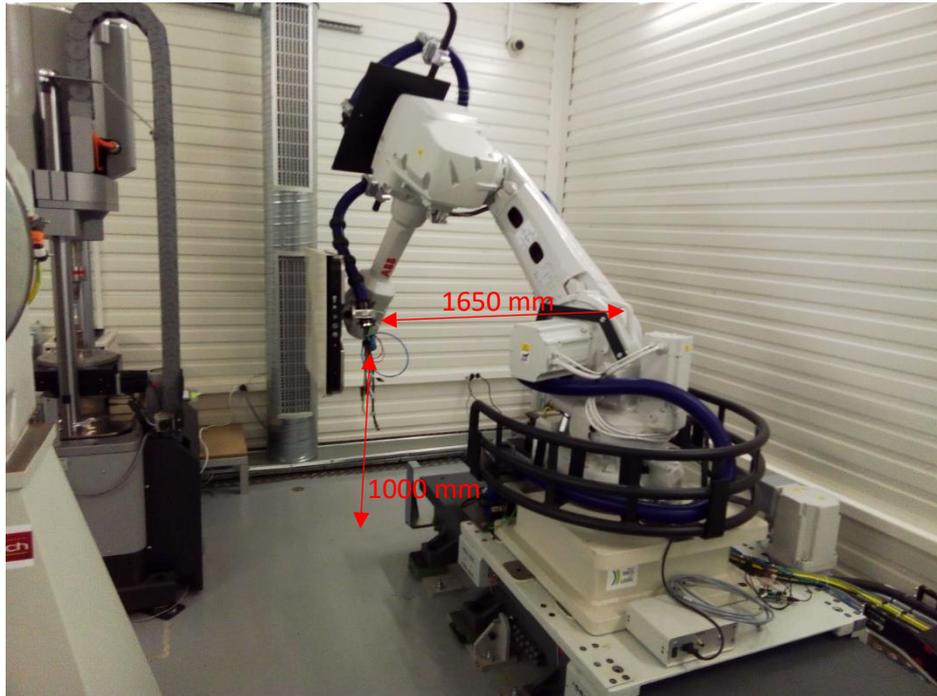


Figure 21 : Robot 2 en position de mesure avec le flatpanel Perkin Helmer (distance poignet/mur et poignet/sol)

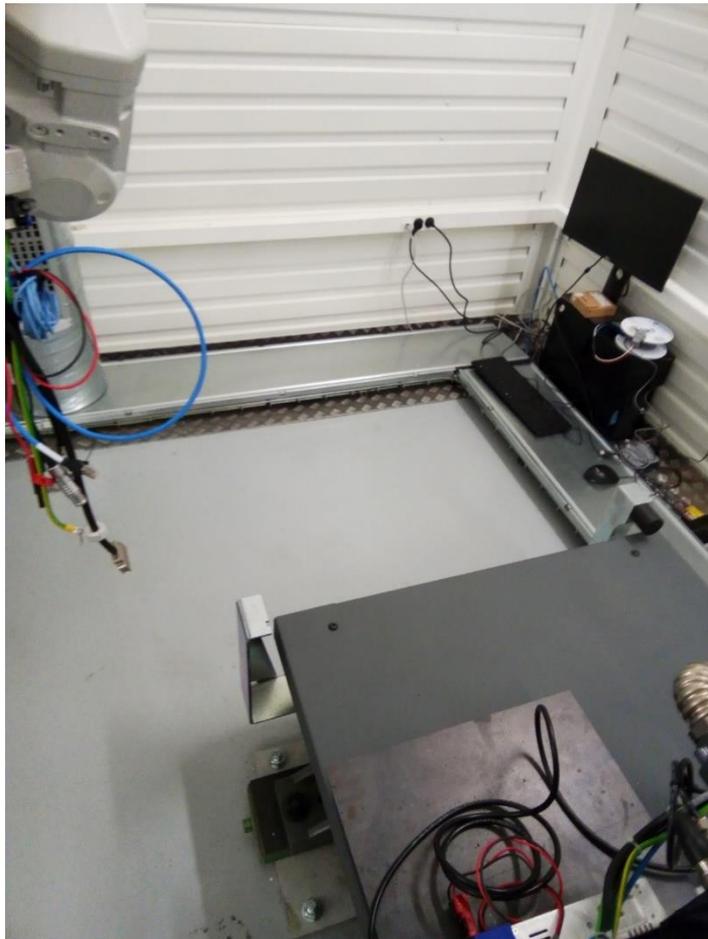


Figure 22 : Zone disponible pour le support

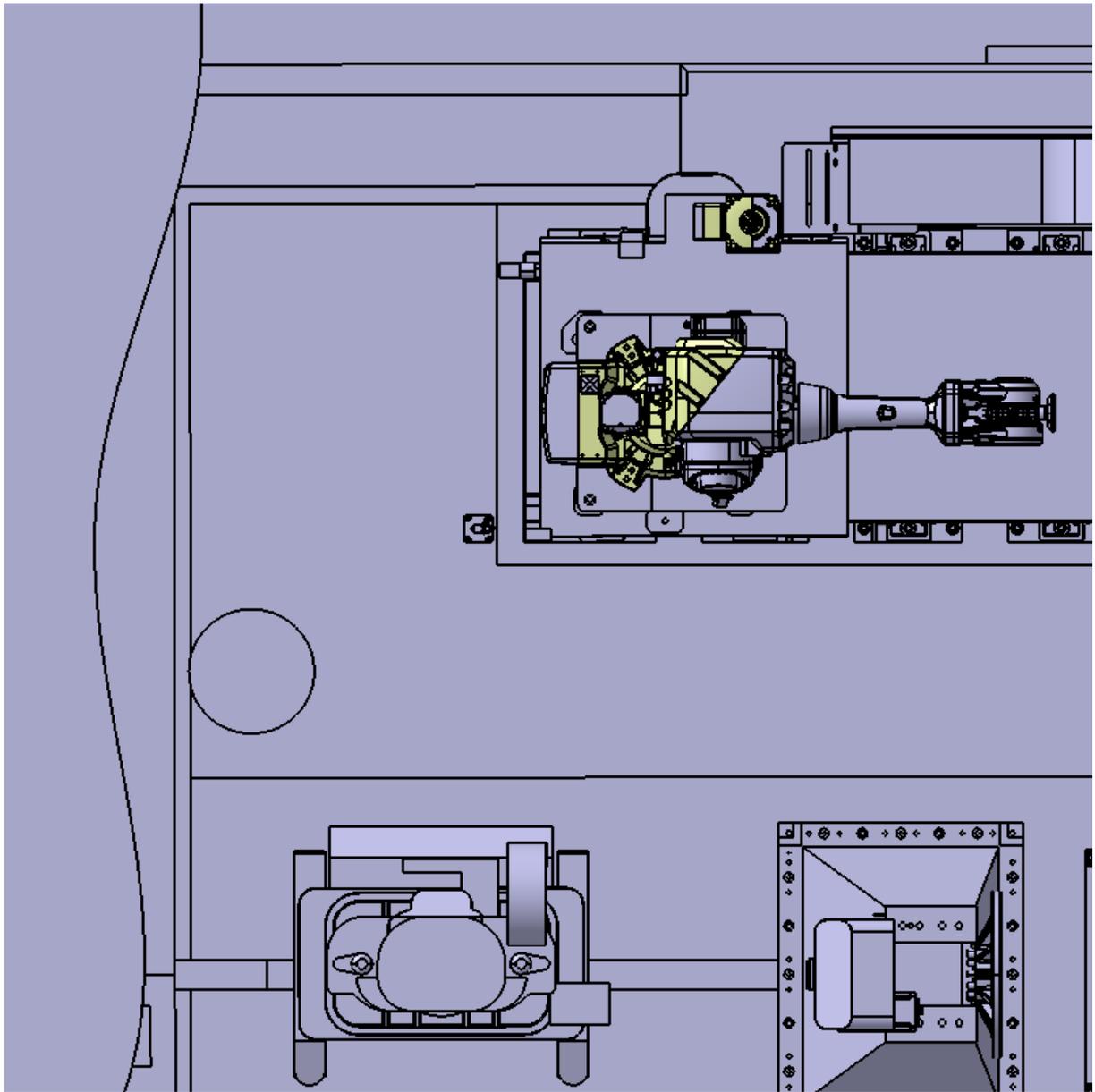


Figure 23 : Emplacement du support, vue de haut