
Rapport de Recherche

STM - Un microscope pour tous

Valorisation **Recherche**

Authors :

Kellian Cottart
Rébecca Fossa
Grégoire Lapert
Yann Messalati
Ulysse Simon-Vincenti

Mentor :

F. Muller

Soutient :

T. Guillemot

Résumé	Rendre accessible aux universités la technologie des microscopes à effet tunnel.
Contexte	Les universités ont un besoin grandissant en matériel scientifique. Réduire le coût de ces avancés serait bénéfique pour la recherche.
Résultats	Nécessité de rendre cet outil disponible pour le recherche.
Conclusions	Solution en la forme d'un STM open-source et faible coût.

TABLE 1 : Tableau de présentation du projet

Nous certifions que ce travail est original et qu'il a été rédigé en accord avec tous les membres du groupe présents.

Paris, 10 octobre 2022

Table des matières

I	Introduction	3
II	Documentation et terminologie	4
III	Raison d'être du projet	5
IV	Parties prenantes	6
V	Description du projet	7
V.I	Origine du projet	7
V.II	État de l'art	7
	V.II.1 Présentation des solutions	7
	V.II.2 Solutions matérielles	7
	V.II.3 Solutions logicielles	11
	V.II.4 Tableaux comparatifs de l'état de l'art logiciel	14
VI	Proposition de valeur	15
VII	Solution proposée	16
VII.I	Faisabilité	16
	VII.I.1 Contraintes économiques	17
	VII.I.2 Contraintes environnementales	18
	VII.I.3 Contraintes industrielles	18
	VII.I.4 Contraintes matérielles	19
	VII.I.5 Contraintes légales	19
VII.II	Cahier des charges de la partie matérielle	20
	VII.II.1 Fonctionnalités principales	20
	VII.II.2 Fonctionnalités secondaires	20
VII.III	Cahier des charges de la partie logicielle	21
	VII.III.1 Fonctionnalités principales	21
	VII.III.2 Fonctionnalités secondaires	21
VII.IV	Tâches des fonctionnalités	22
VIII	Mise en oeuvre du projet	23
IX	Réalisation technique	24
IX.I	Le prototype électronique	24
	IX.I.1 La carte de préamplification	24
	IX.I.2 Contrôle et acquisition des données	26
IX.II	Le prototype logiciel	26
	IX.II.1 L'architecture	26
	IX.II.2 Le simulateur	27
	IX.II.3 Le micro-logiciel embarqué	30
	IX.II.4 Les formats de sortie	32
	IX.II.5 L'interface	33
IX.III	Le prototype mécanique	36
	IX.III.1 Base mécanique	36
	IX.III.2 Base d'amortissement	38
	IX.III.3 Le piézoélectrique	40
X	Résultats obtenus	41
X.I	Le prototype électronique	41
	X.I.1 La carte de préamplification	41
	X.I.2 La carte de contrôle et d'acquisition des données	43
	X.I.3 La carte d'alimentation	43
X.II	Le prototype logiciel	44

X.III	Le prototype mécanique	44
X.III.1	Modélisation et simulation 3D	44
X.III.2	Base d'amortissement	46
X.III.3	Caractérisation du buzzer piézoélectrique	46
XI	Perspectives de développement	48
XI.I	Futur du simulateur	48
XI.II	Architecture du logiciel "interface graphique"	49
XI.III	Logiciel et micro contrôleur	50
XI.IV	La structure en Tenségrité	50
XI.V	Perspectives en reconnaissance de structures nanoscopique	51
XI.VI	Perspective pour la conversion du signal en image	51
XII	Conclusion	52
XIII	Annexe	54
XIII.I	Montage électronique	54
XIII.I.1	Schéma du préamplificateur	54
XIII.I.2	Carte de contrôle et d'acquisition des données	57
XIII.I.3	Carte d'alimentation	65
XIII.II	Blueprints de la structure plexiglas	67

English Abstract The **Scanning Tunneling Microscope** created in 1978 has revolutionized microelectronics but this technology remains **very expensive**.

We want to reduce the cost of this technology to offer an open-source and flexible solution for **research centers** and users throughout the world. To achieve this, we have separated the project into three parts. The first one is the **electronics**. We have **conceived and manufactured three boards** to build the STM. For the second part, we have the **IT**, which has made good progress on the development of a **simulator** to test without the electronics part and of a **graphical interface** to control and acquire images, as well as doing some image processing. Finally, the **physics** part which achieved a functional mechanical base and the **characterization of the piezoelectric**.

The results are **very encouraging**. It would be interesting to make a follow-up of the project by creating new PPE and PFE to allow the verification of the cards, the improvement and the completion of the interface and to further the work on image processing.

Keywords : Scanning Tunneling Microscopy, Electronics, Image Processing, Low-cost

Abstract en Français Le microscope à effet tunnel créé en 1978 a révolutionné la micro-électronique mais cette technologie à un **coût très élevé**. Nous cherchons à réduire le coût de cette technologie afin de proposer une solution open-source et modulaire disponible pour les centres de recherche ainsi que pour les particuliers dans le monde. Pour cela nous avons séparé le projet en trois pôles. Un premier pôle centré sur l'**électronique** a permis la **complétion et la manufacturation** des premières versions des cartes électroniques nécessaires au fonctionnement du STM.

Un second pôle centré sur la partie **informatique** a permis l'avancement du développement d'une **interface graphique de contrôle** et d'acquisition ainsi que sur la création d'un **simulateur de STM**. Enfin, l'équipe travaillant sur la partie **physique** a réalisé une **base mécanique fonctionnelle** et la **caractérisation du piézoélectrique**.

Les résultats étant **très encourageants**, nous pensons qu'il serait intéressant de relancer le projet sur une nouvelle période PPE et de PFE pour permettre la vérification des cartes, l'amélioration et la compléction de l'interface, et également l'amélioration du traitement de l'image.

Mots-clés : Microscope à Effet Tunnel, Électronique, Traitemet de l'image, Faible coût

I Introduction

Gerd Binning et Heinrich Rohrer créèrent en 1981 la technologie STM, utilisant une propriété de la mécanique quantique : l'effet tunnel. Cette invention, récompensé par un prix Nobel de physique, a permis à ses créateurs de révolutionner le monde de la miniaturisation électronique.

Cet outil est, par conséquent, très utile aux chercheurs mais l'est aussi pour des universités dans un but éducatif. Cependant, son coût représente un problème majeur. En effet, leur rareté et leur domaine d'application entraîne un coût élevé, considéré comme normal malgré une technologie aujourd'hui supposément accessible.

Le projet «**STM pour tous**» est né au sein de l'ECE en 2014. Son but était de rendre accessible la technologie des microscopes à effet tunnel. Il tentait de répondre au besoin croissant des universités et des chercheurs en équipement scientifique.

Nous avons décidé de reprendre à zéro ce projet pour le mener, cette fois, à bien. Demandant des partenariats et des associations avec des entreprises extérieures au groupe OMNES, nous avons dû créer une image de marque pour faire interface entre le projet et nos interlocuteurs.

MSTechnologies (Microscope Technologies) est donc le projet rassemblant les pôles informatique, mécanique et électrique de la création de ce STM.



FIGURE 1 : Logo du projet MSTechnologies

L'idée de départ de notre projet est de créer un STM (Scanning Tunneling Microscope) open-source et modulaire et de rendre sa construction simple et peu coûteuse.

Le choix de la valorisation recherche vient du besoin de la proximité avec le pôle recherche de l'ECE. Cette proximité s'est exprimée de nombreuses fois grâce aux différentes visites de laboratoires qui nous ont partagé leur expérience avec les STM. Il est donc naturel de continuer à travailler avec eux. Nous avons choisi en seconde valorisation l'open innovation, car le projet se veut open-source.

Ce document est le rapport d'une année de travail sur ce projet. Il présente le projet, les utilisateurs auxquels il s'adresse, notre positionnement dans le marché par le biais d'un état de l'art et les réalisations produites. Nous énoncerons l'ensemble des défis techniques à surmonter, c'est-à-dire la complexité du projet ainsi que les potentiels problèmes environnementaux que nous pourrons rencontrer, mais également les scénarios auxquels les utilisateurs feront face lors de l'utilisation du STM.

Dans la prochaine section, nous expliciterons l'ensemble des termes et acronymes utilisés dans un glossaire.

II Documentation et terminologie

Glossaire

AFM (Atomic force microscope) Microscope à Force Atomique. 8, 13, 15, 38

CAN (Convertisseur Analogique Numérique) Un convertisseur analogique-numérique (CAN, parfois convertisseur A/N, ou en anglais ADC pour Analog to Digital Converter ou plus simplement A/D) est un dispositif électronique dont la fonction est de traduire une grandeur analogique en une valeur numérique codée sur plusieurs bits. Le signal converti est généralement une tension électrique. [Convertisseur analogique-numérique](#). 26, 27

ImageJ ImageJ est un logiciel basé sur Java cross-platform de traitement d'image. 32

NumPy NumPy est une bibliothèque pour langage de programmation Python, destinée à manipuler des matrices ou tableaux multidimensionnels ainsi que des fonctions mathématiques opérant sur ces tableaux. . 32

STM (Scanning tunneling microscop) Microscope à effet tunnel. 3, 8, 10, 15, 17, 19, 26, 27

III Raison d'être du projet

Le but du projet « STM pour tous » est de rendre accessible la technologie des microscopes à effet tunnel.

Cette technologie utilise une propriété de la mécanique quantique : l'effet tunnel. Cette invention a permis à ses créateurs d'avoir un prix Nobel et à révolutionner le monde de la miniaturisation électronique.

Cet outil est par conséquent très utile aux chercheurs mais peut l'être aussi pour des universités dans un but éducatif.

Le gros problème de cette technologie est son coût. En effet, leur rareté et leur domaine d'application entraîne un coût élevé, considéré comme normal malgré une technologie aujourd'hui accessible.

Par conséquent, l'idée de départ de notre projet est de créer un STM (Scanning tunneling microscope) open-source et de rendre sa construction simple et peu coûteuse.

Notre projet se concentre sur trois objectifs précis du développement durable.

- Le premier objectif : « Industrie, Innovation et Infrastructure », se focalise sur le caractère innovant du STM, qui est une technologie récente encore utilisée aujourd'hui dans l'industrie électronique. Elle sert à observer les atomes et à produire des circuits intégrés à l'échelle du nanomètre. Notre valeur ajoutée pour ce projet est de diminuer les coûts de manufacture de cet instrument.
- Le second objectif : « L'éducation de qualité », est accompli par la mise à disposition du projet pour les universités et les chercheurs du monde entier, de manière à augmenter l'accessibilité et diminuer les coûts de l'éducation.
- Le troisième objectif : « Consommation et production responsables ». En réduisant les coûts, nous changeons les matériaux utilisés et les machines nécessaires à la conception du STM. Notre objectif est de permettre une réalisation plus écoresponsable en utilisant des matériaux moins polluants, par exemple du plexiglas pour remplacer de l'acier. Ce changement de matériaux permettrait de construire le STM avec une graveuse laser au lieu de faire appel à une entreprise externe.



FIGURE 2 : Objectifs du développement durable visés

La raison d'être de notre projet est de répondre aux besoins des universités et des chercheurs qui demandent un matériel à moindre coût.

A l'image des imprimantes 3D (Prusa), nous souhaitons faciliter l'accès à cette technologie, pour que tous aient la capacité d'observer des atomes et de créer ses propres transistors.

Notre problématique est directement tirée de cet état de fait :

Comment rendre accessible du matériel scientifique permettant d'imager les atomes à des universités avec peu de moyens ?

IV Parties prenantes

Le but du projet STM est de rendre accessible la technologie des microscopes à effet tunnel. Notre projet tente de répondre au besoin croissant des universités et des chercheurs en équipement scientifique et matériel à coût accessible.

Les bénéficiaires qui en découlent directement sont :

- Facilité l'accès du matériel pour les chercheurs en nanoscience, les étudiants en master et enseignants-chercheurs en doctorat
- Modularité d'un appareil de mesure de pointe et capacité de le réparer
- Possibilité de créer ses propres composants électroniques à un coût réduit

	Usage direct	Promoteur	Bénéficiaire
Laboratoires(ex : INSP, IRBA, etc ...)	X		
Université / Ecole d'ingénieur(ex : ECE, Sorbonne, Universités, etc ...)	X		
StartUp	X		
Makers / FabLab	X	X	X
Bibliothèque open-source		X	
Revue scientifique		X	
<i>Hackerspace</i> ¹		X	X
ECEBORG		X	X
Revue scientifique		X	
<i>Recherche Européenne</i> ²		X	
Communication ECE			X

TABLE 2 : Tableau des parties prenantes du projet

Notre projet est open-source, il n'a pas vocation à être commercialisé de façon exclusive. Il nous faudra toutefois promouvoir cette solution si l'on souhaite qu'elle évolue et s'améliore. La colonne promoteur représente cette catégorie.

Nous travaillons au développement de ce projet en partenariat direct avec le pôle de recherche de l'ECE Paris, ainsi qu'avec le laboratoire de l'INSP. D'autres entreprises telles que Inorevia nous ont aidé à la réalisation de ce projet, notamment avec l'apport de Mme. Nathalie Bonatout dans l'expertise des cartes électroniques.

¹Un hackerspace ou Hacker house est un tiers-lieu où des gens avec un intérêt commun (souvent autour de l'informatique, de la technologie, des sciences, des arts...) peuvent se rencontrer et collaborer. Les Hackerspaces peuvent être vus comme des laboratoires communautaires ouverts où des gens (les hackers) peuvent partager ressources et savoir. (def wikipedia)

²On entend ici par recherche européenne les instituts bureaucratiques dédiés aux financements par exemple et non les laboratoires scientifiques.

V Description du projet

V.I Origine du projet

Nous reprenons le projet d'un ancien PPE initié par Maxime Schneider en 2014. Ce projet, open-source et pensé à faible coût, a servi de base à la construction du cahier des charges de notre projet. La documentation laissée par ce groupe a permis de se rendre compte des potentiels attendus et de la valeur ajoutée que nous souhaitons apporter au projet.

Néanmoins, les composants utilisés pour ce projet ne sont parfois plus produits dû à l'évolution des composants électroniques au cours de ces dix dernières années. Les parties électroniques étaient parfois non-fonctionnelles, nous avons donc dû reprendre le projet à sa base. Pour ce faire, nous nous sommes inspirés de projets open-source tel que celui de M. Dan Berard [1].

V.II État de l'art

V.II.1 Présentation des solutions

Les solutions se divisent en deux catégories qui sont complémentaires. On propose alors de faire deux états de l'art :

- Solutions matérielles (hardware)
- Solutions logicielles (software)

V.II.2 Solutions matérielles

Parmi les différents STM existants, nous pouvons citer ceux-ci :

Le NaioSTM est un modèle de STM créé par l'équipe de nanosurf. Il a la particularité d'imager les atomes très rapidement. Il lui suffit d'approximativement 5 minutes pour un échantillon de 500 nm de longueur par 500 nm de largeur. La résolution du scan peut aller jusqu'à 7.6 pm de longueur par 7.6 pm de largeur pour une mesure. De plus, la résolution des images obtenue peut aller jusqu'à 2048 pixels par 2048 pixels. La spécificité de ce dispositif se trouve en la forme d'une boucle mécanique de stabilisation permettant d'effectuer des mesures sur n'importe quelle table, sans besoin de créer un vide artificiel pour s'abstraire des conditions environnementales. Le coût du NaioSTM est d'environ 12 000€.



FIGURE 3 : Image du NaioSTM



FIGURE 4 : Image du home-built STM

Le [home-built STM](#) de Dan Berard est un STM open-source. Ce STM permet d'imager les atomes sur une surface de 600 nm par 600 nm. Ce STM est stabilisé par un jeu de ressorts et d'aimants situés sous sa base. Enfin, il utilise un système de composants piezoélectriques peu coûteux, ce qui permet de drastiquement réduire ses coûts. Ce STM reste une version "faite-maison", ce qui implique qu'il n'est pas fidèle aux standards de l'industrie de la recherche. De plus, il est compliqué à calibrer et fourni des mesures approximatives et imprécises.

Le [NX20](#) de l'entreprise Park Systems est une solution STM/AFM. Celle-ci permet aux chercheurs de combiner deux instruments essentiels à leurs recherches. Cet appareil peut effectuer des mesures selon deux modes différents, STM ou AFM. Cela permet de réduire les coûts de l'achat de deux instruments différents. De plus, ce système peut être monté sur des actionneurs piezoélectriques qui vont permettre de réduire la quasi-totalité des bruits mécaniques et cela sans le besoin de la création d'un vide partiel. Le coût du NX20 de Park Systems est de 300 000€.



FIGURE 5 : Image du NX20 de Park Systems



FIGURE 6 : Image du STM Oxford Instruments

Le **LT STM** de Oxford Instruments est utilisé depuis 1996. Sa longévité nous permet de déduire la fiabilité de ce STM. Celui-ci peut imager une surface de 20 nm par 20 nm. Nous n'avons aucune information quant à la résolution de l'image mais celle-ci doit s'approcher de celle du NX20. Une des spécificités de ce STM est la capacité de créer une chambre à vide dans son enceinte. Enfin, il est capable de refroidir l'échantillon pour augmenter la précision et la stabilité des mesures. Ce STM est aujourd'hui un standard de l'industrie dû à sa stabilité et fiabilité. Néanmoins, il est très volumineux et coûte bien trop cher pour la plupart des laboratoires. Son coût est de 180 000€.

Notre **MSTechnologies STM** est une solution qui présente un compromis entre les avantages des précédents STM. Des avantages concernant la fiabilité des microscopes de grande marque et le faible coût des projets open-source. Son budget est porté aux alentours de 3 500€. Les contraintes environnementales ne pourront cependant pas être aussi bien atténuées que dans une chambre à vide partiel, ou avec un refroidissement à l'azote liquide. Néanmoins, le but sera de trouver une solution fiable, et aussi précise qu'on le peut.

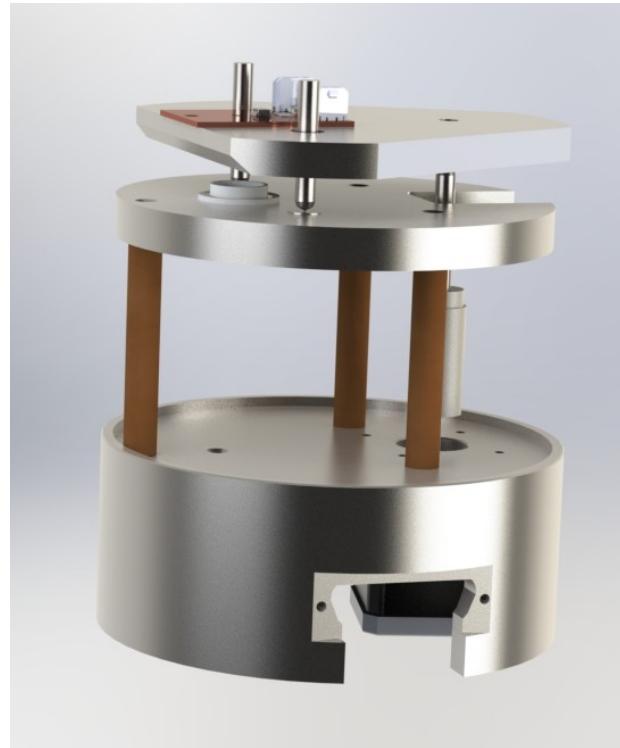


FIGURE 7 : Image de la base mécanique de notre STM

Solution	Prix	Accessibilité[1]	Scan maximal[2]	Résolution du scan[3]	Fiabilité[4]
Naio STM	12 000€	Elevée	500nm x 500nm	7.6pm x 7.6pm	Élevée
Home-built STM	2 000€	Moyenne	600nm x 600nm	10pm x 10pm	Faible
NX20	300 000€	Très faible	100µm x 100µm	3pm x 3pm	Très élevée
LT STM	180 000€	Très faible	10µm x 10µm	5pm x 5pm	Très élevée
MSTechnologies STM	~3 500€	Elevée	600nm x 600nm	10pm x 10pm	Moyenne

TABLE 3 : Tableau comparatif de l'état de l'art

Afin de pouvoir se positionner sur le marché, nous avons décidé de noter sur 5 chacun des points de l'état de l'art pour se rendre compte des points à défendre en priorité. Ces notes sont d'ordre qualitative. Le prix, par exemple, ne peut être représenté de façon proportionnelle.

Nous nous positionnons entre le STM de Dan Berard[1] et le NaioSTM, en proposant un prix et une fiabilité intermédiaire par rapport à ces deux solutions.

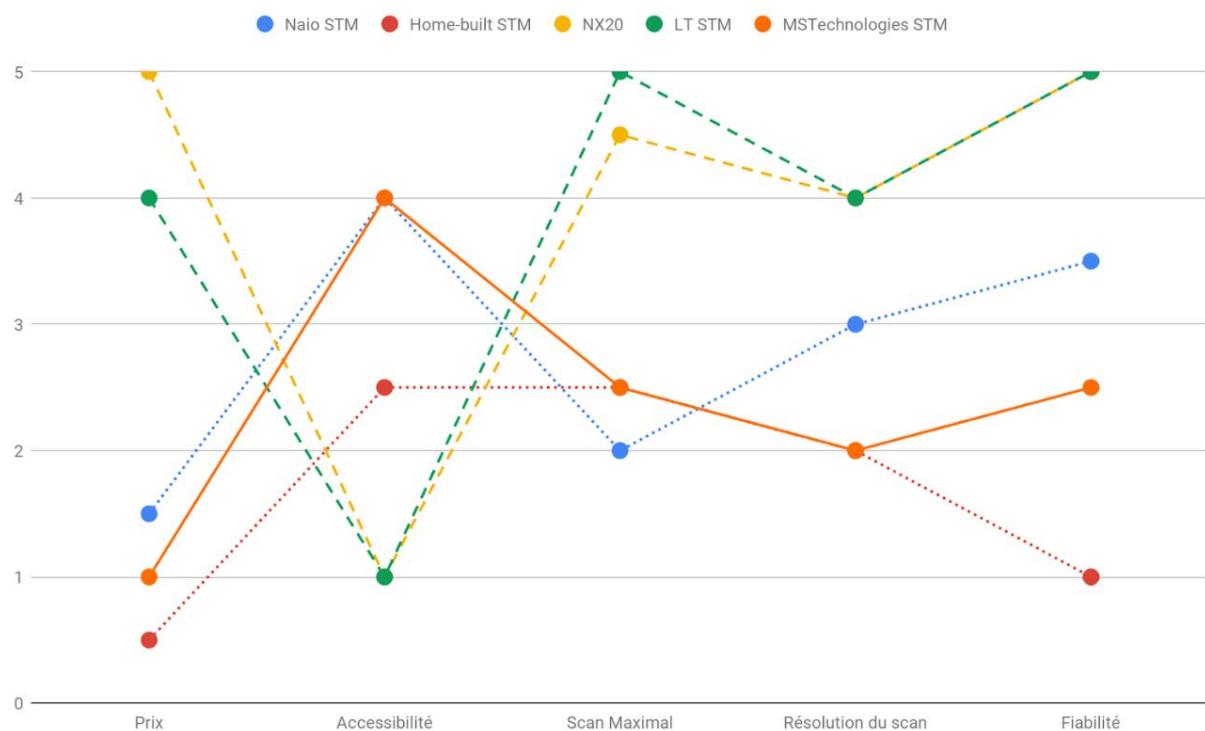


FIGURE 8 : Graphique comparatif de l'état de l'art, noté sur 5

Définitions des catégories du tableau :

[1] : Nous définissons l'accessibilité par la facilité d'utilisation et d'accès du produit. Un microscope pouvant s'utiliser sur table sera bien plus accessible qu'un microscope devant être utilisé dans un laboratoire, sous vide partiel et à une température de 0°K.

[2] : Le scan maximal représente la surface maximale pouvant être analysée, et correspond à la topographie maximale finale de l'échantillon réalisée par le STM.

[3] : La résolution du scan correspond à la précision de la mesure. Plus cette valeur est faible, plus le STM sera performant.

[4] : La fiabilité représente la fiabilité des mesures dans un milieu d'utilisation standard. Les STM en laboratoire

seront forcément plus précis dû aux fonctionnalités mises en place afin de contrer les perturbations extérieures. Par exemple, un vide partiel pour s'abstraire des potentielles vibrations qui viendraient parasiter les mesures, ou une température très faible pour que les atomes soient moins excités. Au contraire, pour les STM utilisables sur table, les mesures seront susceptibles d'être faussées par les conditions environnementales dû à l'absence partielle de ces fonctionnalités.

V.II.3 Solutions logicielles

Les solutions logicielles sont nombreuses. Sur les onze solutions que nous avons répertorié, nous avons sélectionné les 5 plus importantes à mettre en opposition avec notre projet.

Dans les solutions non retenues, nous pouvons citer :

- [imageSXM](#)
- [MIDAS](#)
- [3D SurfXP Engine](#)
- [Gwyddion](#)
- [Femtoscan Online](#)
- [Pycroscopy Package](#)

Le **WSxM** est un logiciel utilisé à travers le monde pour la capture de données et l'analyse d'image de SPM³ ainsi qu'une large gamme d'autres techniques de microscopie. **WSxM** est un logiciel disponible sur Windows uniquement, il offre une large compatibilité de lecture de différents formats de fichiers. Une description plus en détails des fonctionnalités est disponible [ici](#).

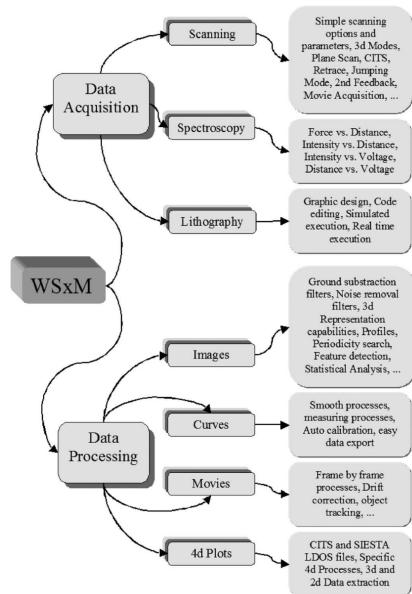


FIGURE 9 : Diagramme présentant les différentes fonctionnalités de WSxM

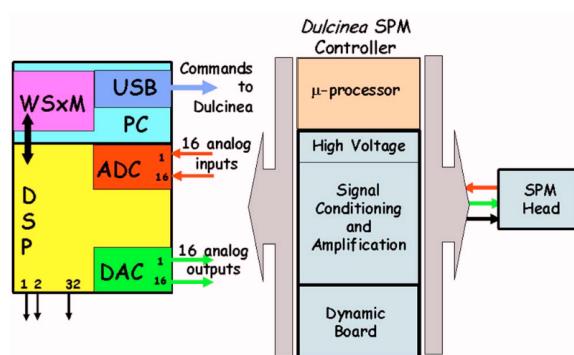


FIGURE 10 : Diagramme d'architecture d'un système avec WSxM

³SPM : Scanning Probe Microscopy est une branche de la microscopie formant des images de surfaces d'un échantillon. Cette branche a été créée en 1981 avec l'invention du STM.

Le **MountainsSPIP** est un logiciel créé par *Digital Surf* pour l'analyse d'images de différents types de microscope ou spectroscope. Cette solution est actuellement la plus complète que l'on a trouvé sur l'analyse. Ce logiciel permet de faire de la reconnaissance de matériaux et de la correction de data-set. Il est compatible avec une large gamme de microscopes. Il possède de nombreuses fonctionnalités, dont les plus notables sont : l'application de texture sur la surface 3D et la fusion sensorielle (utilise de multiple sources et cherche les corrélations pour les faire correspondre). Toutefois, ces fonctionnalités ne sont pas disponibles gratuitement ; le prix minimum de la "Starter Edition" de ce logiciel créé en France est de 2800€, et va jusqu'à 9300€ dans ses versions les plus complètes.

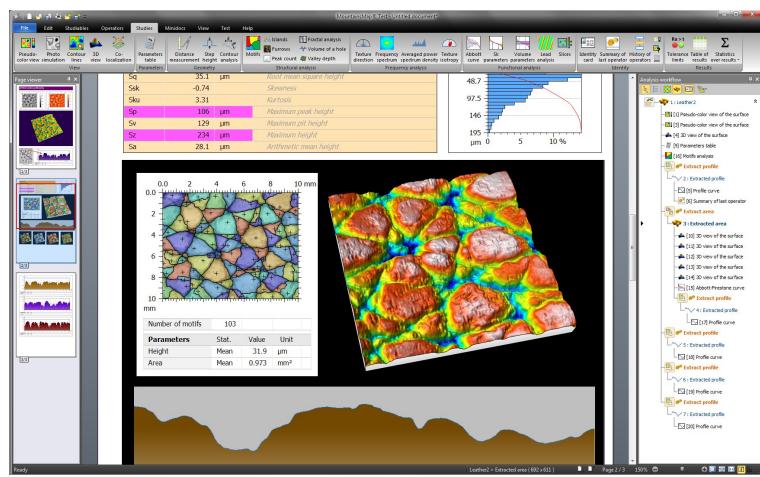


FIGURE 11 : Screenshot of the MountainsMap (part of the Mountains SPIP) Software

Le **NaioSTM** que nous avons présenté précédemment comporte une suite logicielle composée d'un logiciel de contrôle et d'un logiciel d'analyse. Cette suite **ANA control and analysis software** nécessite le logiciel **C3000** pour fonctionner correctement. Ces outils permettent de piloter le NaioSTM et de traiter les images fournies par celui-ci. De nombreuses fonctionnalités sont présentes comme le redimensionnement de l'image traitée, le nombre de points de données. La suite propose également de changer le modèle d'élasticité de traitement des données, en utilisant, par exemple, le modèle de Hertz. Le logiciel est gratuit et disponible à tous, mais pas open-source.

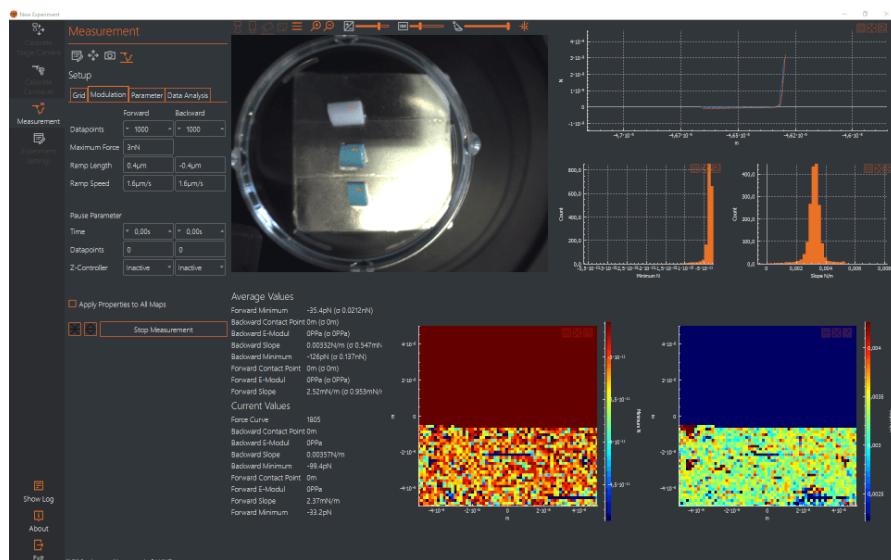


FIGURE 12 : Interface utilisateur du Naio STM

Le logiciel **Intelligent ScanT Sofware** [2] de NT-MDT a été conçu pour les AFM. Il permet une acquisition d'image rapide et de haute qualité avec des résultats fiables. Lors de son fonctionnement, il utilise un réseau de neurones afin de permettre une mise en place optimale des paramètres de scan afin d'obtenir la topographie des matériaux désirés de la manière la plus appropriée. L'algorithme **ScanT** identifie les défauts lors de la procédure de paramétrage et les élimine ou les réduit grâce à un système de rétroaction. Cela permet d'optimiser la mesure en ajustant le point de consigne, l'amplitude d'oscillation de la pique ou encore la vitesse de scan.

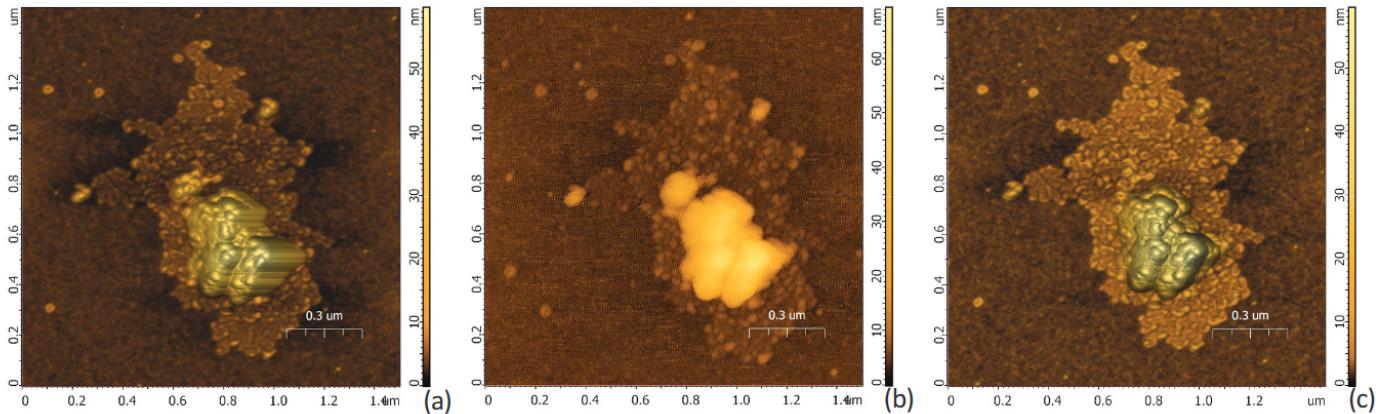


FIGURE 13 : Utilisation de ScanT pour corriger les mesures

Le logiciel **ImageJ** est un logiciel d'analyse d'image très populaire. Il tient son nom du célèbre langage de programmation Java qui a la particularité d'être cross-platform. Le logiciel est entièrement écrit en Java et permet d'être exécuté comme une simple application ou dans un navigateur. Il est très complet dans ses solutions d'analyse d'image. On peut observer une grande communauté de développeurs qui travaillent sur ce projet open-source, et une volonté de populariser le logiciel avec des modules Java sous forme de plugins.

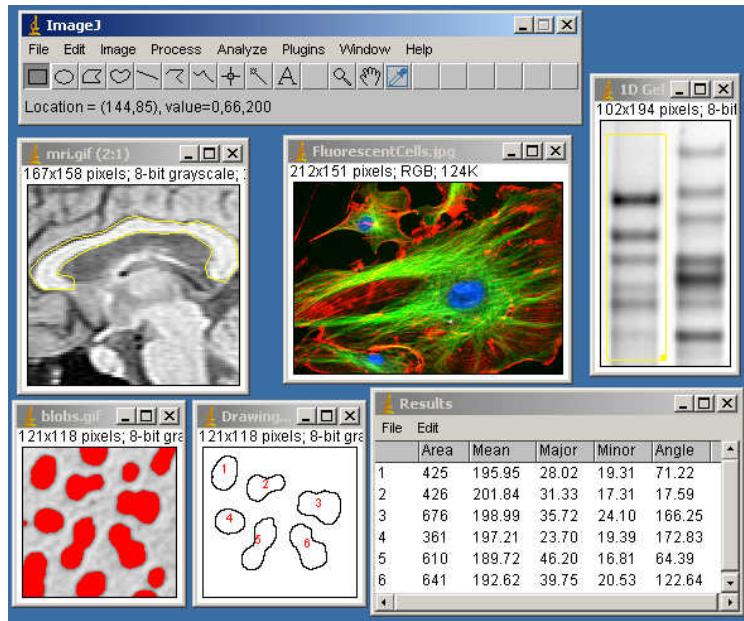


FIGURE 14 : Interface utilisateur d'ImageJ

Notre solution **MSTechnologies Software** se veut open-source et gratuite. Nous souhaitons intégrer l'analyse et le contrôle au sein d'un site généré en Python grâce à Flask, virtualisé dans un container Docker en proposant le pilotage du STM, l'affichage des données reçue du STM et la visualisation de ces données. Le traitement de l'image et la présence d'outils de mesure doivent faire partie intégrante du logiciel si nous souhaitons le rendre professionnel. Le logiciel se veut modulaire et cross-platform, au plus près de la réalité des laboratoires, qui pourront s'en servir pour programmer leurs propres modules, au besoin.

V.II.4 Tableaux comparatifs de l'état de l'art logiciel

Fonctionnalités de base :

Solution	Prix	Affichage Topologie 2D/3D	Contrôle des moteurs pas-à-pas	open-source	Applicable STM
WSXM	Gratuit	Oui	Oui	Non	Oui
MountainsSPIP	2800€/5900€/9300€	Oui	Non	Non	Oui
ANA control and analysis software	Gratuit	Oui	Oui	Non	Oui
Intelligent ScanT Sofware	TBD	Oui	Oui	Non	Oui
ImageJ	Gratuit	Oui	Non	Oui	Oui
MSTechnologies Software	Gratuit	Oui	Oui	Oui	Oui

TABLE 4 : Tableau comparatif de l'état de l'art logiciel sur les fonctionnalités de base

Fonctionnalités avancées :

Solution	Traitement de l'image	Planificateur d'analyse	Reconnaissance par réseau de neurones des molécules (bonus)	Reconnaissance d'erreurs et corrections (bonus)	Application modulaire (bonus)
WSXM	Oui	Non	Non	Non	TBD
MountainsSPIP	Oui	Non	Oui	Oui	TBD
ANA control and analysis software	Oui	Non	Non	Non	Non
Intelligent ScanT Sofware	Oui	TBD	Oui	Oui	TBD
ImageJ	Oui	Non	Non	Oui	Oui
MSTechnologies Software	Oui	Oui	TBD	TBD	TBD

TABLE 5 : Tableau comparatif de l'état de l'art logiciel sur les fonctionnalités avancés

VI Proposition de valeur

L'état de l'art nous a permis d'établir les axes majeurs de notre solution. Dans le graphique ci-dessous nous vous proposons de découvrir où nous souhaitons nous positionner dans le marché vis à vis de STM professionnels.

Il prend ainsi en compte bien plus de facteurs tels que :

- le prix,
- la précision,
- la facilité d'utilisation du logiciel,
- la présence d'un caisson sous vide,
- la nécessité d'un refroidissement de l'échantillon,
- la surface de scan,
- la facilité d'utilisation de l'outil matériel,
- la résolution du scan,
- la fiabilité,
- les dimensions du STM (la surface qu'il nécessite à sa mise en place),
- la possibilité d'effectuer des mesures AFM,
- la reconnaissance de structures moléculaires.

Nous avons classé ces différents critères entre les valeurs fortes et faibles. Toutefois, les critères AFM ou Refroidissement ne sont pas présents dans notre solution. Lorsqu'un point est situé sur la ligne du faible, il représentera donc l'absence.

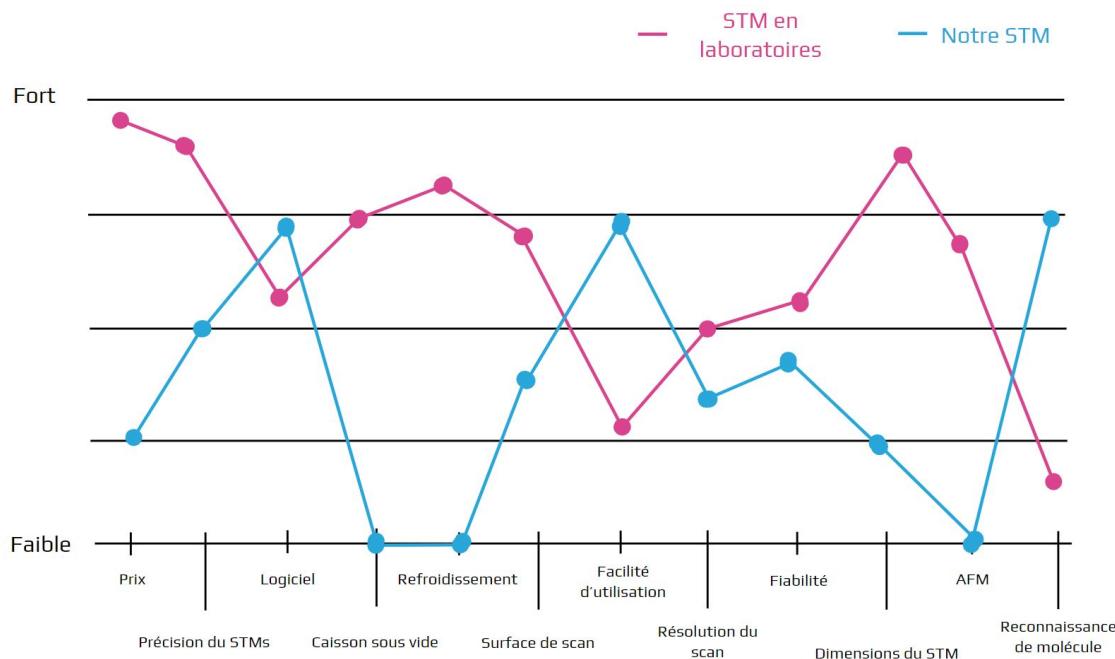


FIGURE 15 : Graphique de positionnement de notre projet dans le marché

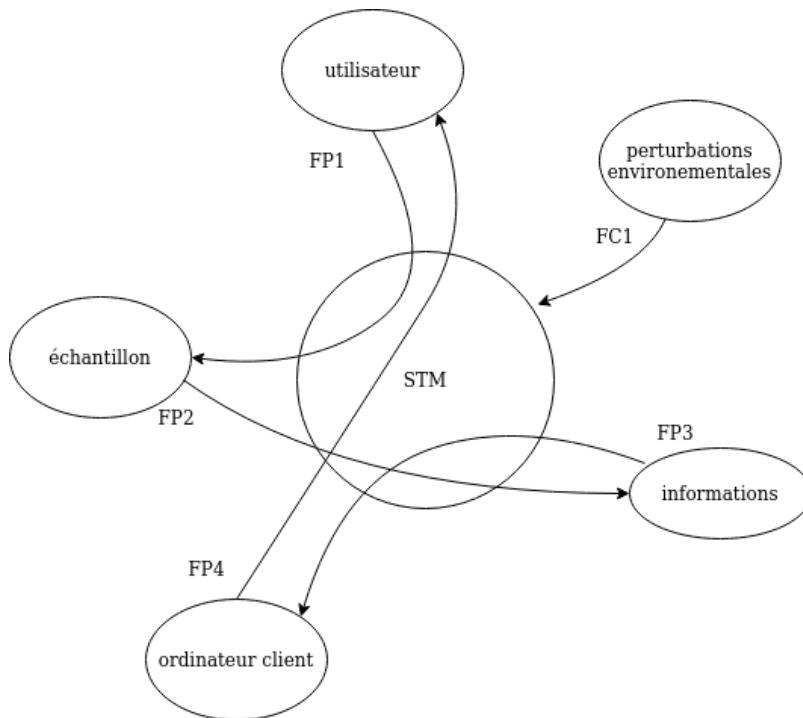
Tout en gardant en mémoire notre problématique, nous avons souhaité mettre en place une promesse :

Open-source, économique, éducatif et innovant, partout où il y a un atome, un STM surgit.

Cette promesse représente l'engagement que notre projet se doit de suivre lors de son entrée sur le marché.

VII Solution proposée

Un STM est un système complexe. Il possède de nombreuses fonctions. Dans le diagramme pieuvre ci-dessous, nous avons tenté de représenter les différents acteurs autour de notre système afin de visualiser au mieux les tâches à accomplir.



FC1 : L'environnement perturbe par interactions électromagnétiques et mécaniques

FP1 : Donne la possibilité de voir la composition atomique de l'échantillon à l'utilisateur

FP2 : Donne les informations sur sa composition

FP3 : Donne les informations à l'ordinateur qui va les traiter

FP4 : Affiche les résultats pour l'utilisateur

FIGURE 16 : Diagramme pieuvre

Le projet contient à la fois une partie logicielle et une partie matérielle. Cela implique qu'il y a des fonctionnalités à implémenter pour ces deux parties.

VII.I Faisabilité

La faisabilité de ce projet repose sur nos observations d'autres projets mais également des différents STM que nous avons pu observer lors de notre visite à l'INSP.

Le projet STM pour tous n'a pas abouti il y a de ça 8 ans, mais pour des raisons relevant plus de la qualité du matériel mis à disposition que par une difficulté technique.

Lors de nos recherches pour l'état de l'art nous avons pu trouver deux projets open-source assez anciens. Tout d'abord, celui de Dan Bérard [1], qui sera le plus proche de la solution que nous désirons apporter. Son projet fonctionne de manière adéquate, mais certains points ne sont pas explicites et les composants électroniques utilisés ne sont parfois plus produits. Dan Bérard cite dans ses explications un autre projet beaucoup plus low-cost, qui a pu imager de façon extrêmement grossière des atomes[3].

En ayant une vision de ces trois projets, voir le STM utilisé à l'INSP nous a rassuré sur la faisabilité de notre projet. La structure métallique est similaire, les systèmes d'absorption des vibrations externes que nous envisageons le sont également.

Ce projet s'avère, pour des élèves d'ING4, un défi de par sa complexité technique. Mais il s'agit d'une technologie ancienne qui a véritablement su faire ses preuves. Avec les technologies actuelles nous devrions être en capacité de reproduire un STM si cela a été possible en 1981. Il nous faudra simplement trouver les bons interlocuteurs afin de comprendre au mieux les parties les plus techniques du projet.

Nous sommes toutefois inquiets par les perturbations pouvant impacter notre projet en fonctionnement. L'école est à proximité du métro et du RER, les vibrations des passages peuvent fausser une manipulation. Il nous faudra, si les dispositifs mis en place ne suffisent pas, faire nos tests de nuit lorsque le métro et le RER sont coupés.

VII.I.1 Constraintes économiques

Le fonctionnement de l'appareil coûtera le prix de la pique. En effet, celle-ci est à utilisation quasi-unique. Son processus de création est relativement simple. Il suffit de couper avec un ciseau une barre de tungstène d'un millimètre de diamètre. Malheureusement, une pique de STM n'est pas toujours parfaite. Par conséquent, il est important de créer plusieurs pointes et de les tester pour obtenir la plus grande précision d'échantillonage possible.

De plus, une autre contrainte économique du projet est le coût en électricité. Le STM va fonctionner pendant plusieurs heures de suite. Bien que sa consommation soit réduite, les coûts énergétiques peuvent se faire ressentir.

Enfin, la dernière contrainte économique correspond à la possibilité de détruire l'échantillon. Cela peut venir d'une mauvaise calibration sur l'axe Z ou d'une suralimentation de l'échantillon.

Outils	Quantité	Prix		
Pique	3-10	0.15-10 €		
Échantillon	1	1-1000€		
Électricité	max 36Wh	Fournisseur	Prix du kWh en Heures Creuses (HC)	Prix du kWh en Heures Pleines (HP)
		EDF (particuliers)	0.1360 €	0.1821 €
		EDF (professionnels)	0.0785 €	0.1125 €

TABLE 6 : Coût estimé d'utilisation du STM

Dans le cadre de l'utilisation d'un STM, on prévoit plutôt une utilisation de nuit pour éviter le surplus de perturbations mécaniques. Il faut penser à le faire fonctionner durant les heures creuses pour limiter l'impact sur la facture énergétique.

Le STM ne demande pas d'entretien, il n'y a donc pas de frais supplémentaires autre que l'utilisation d'une pique. Il faut toutefois le conserver dans un environnement sec et à température ambiante. Nous pouvons alors prévoir un hypothétique achat de sachets déshumidifiants pour le maintenir à un degré d'humidité très faible.

Il faudra peut être renouveler les supports d'absorption sismique tels que les élastiques ou l'enceinte du STM. Enfin, pour assurer une bonne fiabilité des mesures, il est important de changer le câble coaxial qui relie le pré-amplificateur à la pique tous les ans pour une utilisation optimale.

Outils	Fréquence	Prix
Sachet déshumidifiant	Dépend du climat	10€
Enceinte du STM	Dépend du climat/matériel	50€
Élastiques de suspension	Tous les 3/4 ans	10€
Câble coaxial	Tous les ans	300€

TABLE 7 : Coût estimé d'entretien du STM

VII.I.2 Contraintes environnementales

La base mécanique du STM est utilisable sur plusieurs années. Le passage d'une structure en acier à une structure en plastique recyclable peut démontrer un certain avantage sur l'impact environnemental du projet.

Vous retrouverez dans le tableau suivant les différents impacts environnementaux de chacun des composants du projet.

Besoin	Quantité	Impact
Or	2-10g	FORT - The environmental impact of gold mines : pollution by heavy metals
PCB	2 ou 3	FORT - Environmental risk assessment of wastewaters from printed circuit board production : A multibiomarker approach using human cells
Moteur pas à pas (aimant)	1	FORT - Environmental impacts of the future supply of rare earths for magnet applications
Acier*	Taillé dans un tube de $\varnothing = 129mm$ $h = 100mm$	FORT - Steel production & environmental impact
Acrylique PMMA*	Taillé dans une feuille de PMMA de $l = 40cm$ $L = 40cm h = 10mm$	MOYEN - The unsustainable prevalence of plexiglass

TABLE 8 : Coût écologique estimé du STM

* Soit l'un, soit l'autre.

VII.I.3 Contraintes industrielles

Les contraintes industrielles de notre projet se doivent d'être faibles. En effet, le projet doit pouvoir être fait dans un FabLab ou Hackerspace. Ainsi, on peut lister les machines auxquels l'utilisateur intermédiaire (technicien/ingénieur qui construit le STM) doit avoir accès pour le fabriquer.

Type de machine	Spécificité
Tour à métaux*	Diamètre minimum d'usinage $\varnothing = 129mm$
Découpeuse laser CO ₂ *	Puissance du laser supérieur à 100W
Imprimante 3D SLA	Précision d'impression supérieur à 100µm
Matériel de sertissage	Pince MOLEX
Matériel de soudure	Aucune

TABLE 9 : Outils nécessaires à la fabrication du STM

* Soit l'un, soit l'autre.

VII.I.4 Contraintes matérielles

Les matériaux utilisés ont une durée de vie qui varie en fonction de l'utilisation et du climat dans lequel est entreposé le STM.

Matériaux	Partie	Quantité	Sensibilité
Acier*	Mécanique	$\varnothing = 129mm h = 100mm$	Oxydation
Acrylique PMMA*	Mécanique	$l = 40cm L = 40cm h = 10mm$	Rayure
PCB	Electronique	3	Humidité, Rayure, ESD
Serveur	Informatique	1	Problèmes de communication

TABLE 10 : Usure des matériaux du projet

* Soit l'un, soit l'autre.

VII.I.5 Contraintes légales

La carte de puissance du projet permet de générer une tension de 48V. Nous sommes légalement dans l'obligation de prévenir les utilisateurs du risque qu'ils encourrent s'ils touchent l'alimentation.

De plus, pour empêcher que ce projet soit réutilisé à but lucratif par d'autres entreprises, nous pouvons apposer une licence.

La liste des licences est disponible ici : [Liste des licenses](#).

License	Copyleft [1]	Open-source Initiative [2]	Pérennise [3]	Compatible GPL v3 [4]
GPL v2	Oui	Oui	Oui	Oui
GPL v3	Oui	Oui	Oui	Oui
MIT License	Non	Oui	Non	Oui
Intel OSL	Non	Oui	Oui	Oui
Microsoft License	Non	Oui	Oui	Oui

TABLE 11 : Tableau récapitulatif des licences open-source

Définitions des catégories du tableau :

[1] : [Copyleft](#) correspond à l'autorisation donnée par l'auteur d'un travail soumis au droit d'auteur d'utiliser, d'étudier, de modifier et de diffuser son œuvre, dans la mesure où cette même autorisation reste préservée.

[2] : Cette catégorie s'intéresse au fait qu'une licence soit répertoriée sur le site [OSI](#), c'est-à-dire que la licence suit les [principes officiels](#) de cette initiative.

[3] : La licence pérennise les projets et les conserve au cas où ils seraient supprimés.

[4] : Cette catégorie s'interroge sur compatibilité de la licence avec la [GNU GPL version 3](#) qui fixe les conditions légales de distribution d'un logiciel open-source.

Pour protéger les circuits imprimés du projet, ainsi que tout le design de la base mécanique et les autres aspects de la partie matériel du projet, nous souhaitons apposer une licence open hardware sur notre projet. Il existe deux types différents de licence open hardware, aussi appelé OHL (Open Hardware Licence). Ces deux licences sont représentées par la licence TAPR OHL et CERN OHL.

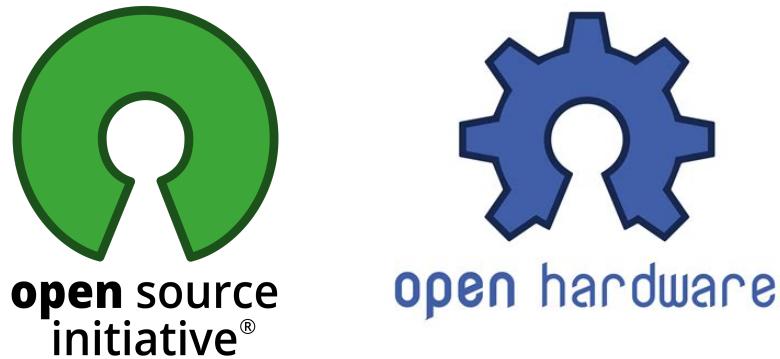


FIGURE 17 : Logo Open-source et Logo open hardware

VII.II Cahier des charges de la partie matérielle

Nous sommes restreint par une contrainte budgétaire pour cette partie. Cette contrainte impose que le coût de conception du produit ne doit pas s'élever à plus de 3500€. Elle est à prendre en compte lors de la réalisation des fonctionnalités.

VII.II.1 Fonctionnalités principales

Les fonctionnalités suivantes sont à implémenter en priorité, on parle alors de fonctionnalités principales. Notre STM :

- Doit pouvoir créer une matrice de voltage à deux dimensions correspondant à la représentation typologiques des atomes présents sur un échantillon.
- Doit contrôler avec précision les actionneurs de contrôle.
- Doit être contrôlé par un micro-ordinateur ou micro-contrôleur qui s'interface avec le logiciel d'interface utilisateur.
- Doit pouvoir être un minimum isolé de l'environnement (perturbations électromagnétiques/thermiques/mécaniques).
- Doit contenir un guide d'utilisation et de conditions limites d'utilisation.

VII.II.2 Fonctionnalités secondaires

Les fonctionnalités suivantes ne sont pas nécessaires à la complétion des objectifs finaux du projet. Toutefois, nous ne pouvons nous permettre de les soustraire au cahier des charges si nous voulons fournir une réalisation de qualité. On parle alors de **fondctionnalités secondaires**.

- Doit être en capacité de filtrer le flux d'information entrant.
- Doit avoir une base physique usinable facilement, à moindre coût et sans nécessiter de matériel de pointe.
- Doit veiller à la conservation des informations lors du passage de l'analogique au digital.

VII.III Cahier des charges de la partie logicielle

VII.III.1 Fonctionnalités principales

Les fonctionnalités suivantes sont à implémenter en priorité, on parle alors de **fonctionnalités principales**. L'application fournie avec le STM :

- Doit être disponible pour toutes les plateformes. (On parle d'une application "**cross-compatible**")
- Doit pouvoir sélectionner une image d'un autre STM affichant des atomes et transformer cette représentation en un champ de données formaté afin d'émuler⁴ une réception de données.
- Doit permettre la réception d'image d'un STM, c'est-à-dire d'accepter un champ de données formaté fourni par le microscope et d'afficher sur l'écran une représentation de ces données sous la forme d'un fichier visuel, montrant les atomes.

VII.III.2 Fonctionnalités secondaires

Les fonctionnalités suivantes ne sont pas nécessaires à la complétion de l'objectif du projet. Toutefois, nous ne pouvons nous permettre de les soustraire au cahier des charges si nous voulons fournir une réalisation de meilleure qualité à un moment ultérieur. On parle alors de **fonctionnalités secondaires**.

- Doit être ergonomique, facile d'utilisation et bien pensé.
- Doit permettre d'accéder au flux d'image direct du microscope, et permettre la gestion complète de l'interface physique du produit, en contrôlant le logiciel embarqué.
- Doit permettre d'effectuer un traitement d'image pour qu'elle soit proprement visible, cohérente et intelligible par un utilisateur.
- Doit permettre de proposer des échelles de mesure réglables.
- Doit pouvoir détecter un regroupement d'atome formant une structure nanoscopique (en commençant par : [4]). Compter ces structures et donner les indices de densité et de pureté du matériaux. Dans le cas de structure cristalline/analyse des lignes de brisure et perturbation dans l'organisation de la structure (en commençant par : [5]).
- Doit pouvoir déterminer automatiquement quelles molécules sont présentes sur l'image récupérée à l'aide d'interactions avec un réseau de neurones entraîné en les sauvegardant dans une base de donnée externe.
- Créer un module permettant la lecture de code LUA⁵ pour rendre le logiciel lui aussi modulable, permettant ainsi l'intégration de module d'analyse comme dans le papier de recherche "Deep learning-based oriented object detection for in situ image monitoring and analysis : A process analytical technology (pat) application for taurine crystallization" [6].

⁴La définition du terme émuler est « simuler, sur un ordinateur, le comportement de ». Il faut voir dans l'émulation une imitation du comportement physique d'un matériel par un logiciel, et ne pas le confondre avec la simulation, laquelle vise à imiter un modèle abstrait. L'émulateur reproduit le comportement d'un modèle dont toutes les variables sont connues, alors que le simulateur tente de reproduire un modèle mais en devant extrapolier une partie des variables qui lui sont inconnues (exemple : la simulation du comportement d'un trou noir).

⁵Lua est un langage de script libre, réflexif et impératif. Crée en 1993, il est conçu de manière à pouvoir être embarqué au sein d'autres applications afin d'étendre celles-ci.[wiki](#)

VII.IV Tâches des fonctionnalités

Tâche	Statut	Priorité
Evaluation des besoins énergétiques	V1	Important
Création d'une carte d'amplification	V1	Important
Gestion de contrôle moteur	Commencé	Important
Création d'une carte d'acquisition des données	V1	Important
Création d'une carte de puissance	V1	Important
Gestion du contrôle du mouvement de l'échantillon	Commencé	Important
Filtration des différentes perturbations extérieur (vibration, onde, etc.)	V1	Important
Alimentation de l'échantillon	Non commencé	Important
Modélisation base mécanique	V1	Moyenne
Filtrage numérique du signal	Commencé	Faible
Reproduction de la base physique acrylique	Commencé	Faible
Affichage de l'image	V1	Importante
Simulation du STM	V1	Importante
Traitemennt de l'image	V1	Moyenne
Outils de mesure	V1	Moyenne
Base de données Jarvis	V1	Faible
Planificateur d'analyse	Non commencé	Faible
Information sur le courant tunnel	Non commencé	Faible

TABLE 12 : Tableau des tâches

VIII Mise en oeuvre du projet

Afin de travailler de la façon la plus efficace possible nous avons décidé de diviser ce projet en 3 pôles.

Comme mentionné plus tôt dans ce rapport, ce projet est la reprise d'un ancien projet de l'ECE. Nous avions fait le choix de démarrer ce projet dès juin 2021 sous forme de stage au pôle recherche de l'ECE. Cette première équipe était composée de Grégoire Lapert, Ulysse Simon-Vincenti et Rébecca Fossa sous la tutelle de Thomas Guillemot et M. Muller.

Le projet a ensuite été poursuivi avec un PPE. Se sont alors rajoutés au groupe Kellian Cottart, Yann Messalati et Din Bach Nguyen. Toutefois, ce dernier n'a pas participé au projet, il n'est donc pas rédacteur de ce rapport et n'est cité dans aucun document. Le mentor de ce PPE est M. Muller.

Les différentes tâches de ce projet ont été réparties selon les compétences de chacun.

	Pôle électronique	Pôle informatique	Pôle mécanique
Equipe stage	Grégoire Lapert (SE)	Ulysse Simon-Vincenti (SE)	Rébecca Fossa (SE)
Ajout au PPE		Kellian Cottart (SI) Yann Messalati (SI)	

TABLE 13 : Répartition des groupes de travail

Même si le projet a débuté lors d'un stage, les mois d'octobre, de novembre et de décembre ont principalement été consacrés à la mise en place de la suite du projet et des rendus PPE. Courant décembre, nous avons pu commander certaines cartes électroniques et le matériel nécessaire à la base d'amortissement. Une fois la commande reçue en février, tout a pu s'accélérer jusqu'à la soutenance en avril.

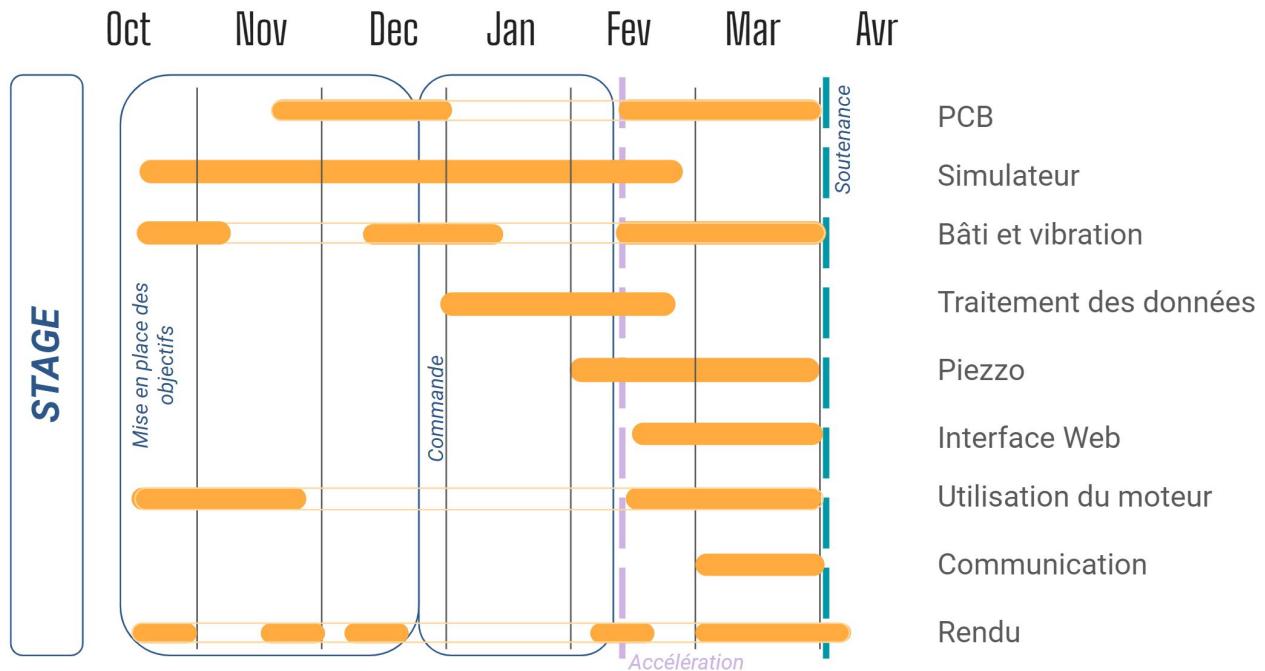


FIGURE 18 : Diagramme de Gantt

IX Réalisation technique

Suivant la répartition des tâches, les réalisations techniques se répartissent en 3 parties : électronique, logicielle et mécanique. Dans cette partie nous tenterons de vous présenter les enjeux de chaque réalisation. Nous verrons par la suite ces dernières.

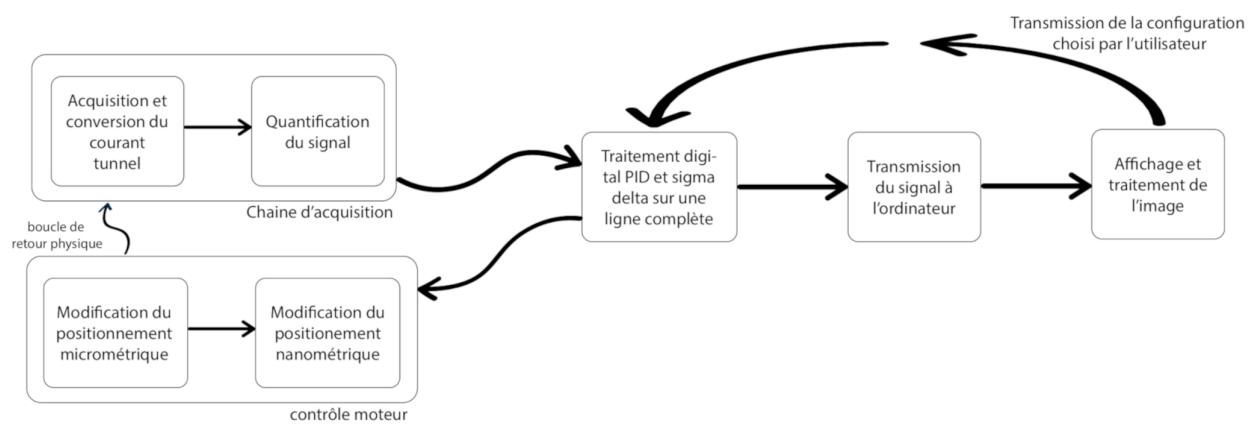


FIGURE 19 : Diagramme bloc montrant le fonctionnement du STM

IX.I Le prototype électronique

Le prototype électronique se concentre sur le bloc chaîne d'acquisition du diagramme ci dessous. Il a été nécessaire de créer 3 cartes électroniques : la carte de préamplification, la carte de contrôle et la carte de puissance. Les enjeux de ces trois cartes vont être explicités dans cette partie.

IX.I.1 La carte de préamplification

Afin de pouvoir convertir et amplifier le courant tunnel, nous avons créé une carte de préamplification. Cette carte est composée de deux composants principaux :

- Un amplificateur opérationnel en montage transimpédance.
- Un amplificateur différentiel.

Le montage utilisé autour de l'amplificateur opérationnel est le montage [transimpédance](#).

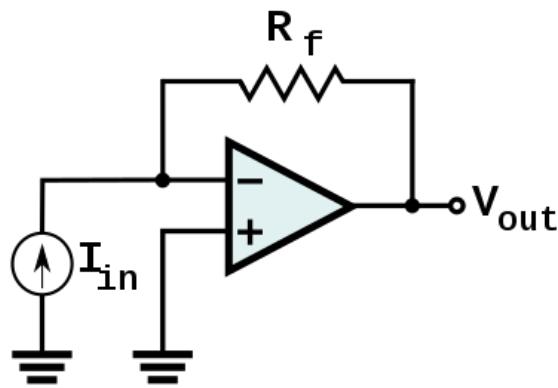


FIGURE 20 : Montage transimpédance [7]

$$-I_{in} = \frac{V_{out}}{R_f}$$

Pour permettre la création d'une solution modulaire, la carte de préamplification a été conçue en trois exemplaires. La différence entre ces trois cartes de préamplification est l'amplificateur opérationnel utilisé. En permettant au constructeur du STM de choisir quelle version de la carte de préamplification il décide d'utiliser, nous lui permettons de modular le STM en fonction de ses besoins et de ses moyens.

Les trois amplificateurs opérationnels sont :

- Le [ADA 4530-1](#)
- Le [OPA627](#)
- Le [LTC6268](#)

Afin de permettre une transmission sans bruit de la tension de sortie du montage transimpédance à la carte d'acquisition des données, on utilise un amplificateur différentiel.

Le rôle de l'amplificateur différentiel, ici un ADA 4950-1, est de séparer le signal de sortie de l'amplificateur opérationnel en deux signaux :

- Un signal positif.
- Un signal négatif.

Cette méthode, également utilisée par la communication USB permet de limiter le bruit basse fréquence. En sommant les deux signaux, positif et négatif, on peut négliger le bruit qui a pu être capté lors du transfert du signal dans le câble. La figure ci-dessous explique ce processus.

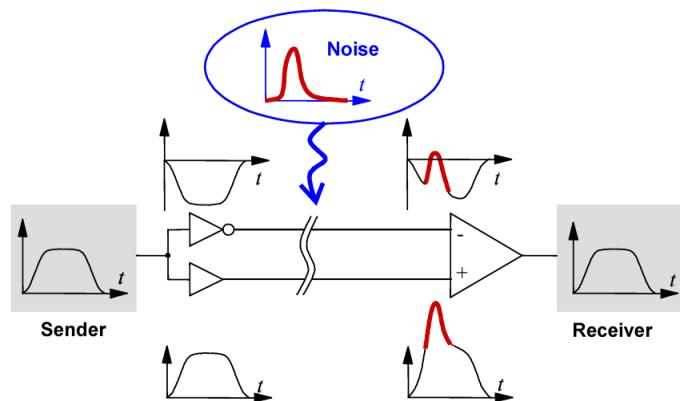


FIGURE 21 : Paire différentiel pour limiter le bruit basse fréquence [8]

Les schémas et une capture du modèle 3D du circuit imprimé peuvent être retrouvés en annexe [48](#).

IX.I.2 Contrôle et acquisition des données

La carte de contrôle et d'acquisition des données a pour but de récupérer le signal différentiel de la carte de préamplification, de convertir ce signal en valeur numérique à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique et de transmettre ces informations à l'ordinateur via une carte de développement Teensy 3.6.

De plus, ce circuit imprimé a pour objectif de contrôler les actionneurs de ce système. Nous pouvons en citer deux :

- Le **moteur pas à pas** qui permet le déplacement à l'échelle **millimétrique**.
- Le **buzzer piézoélectrique** qui permet le déplacement à l'échelle **nanométrique**.

Pour ce faire, la carte de contrôle utilise un convertisseur numérique-analogique 16 bit pour permettre la création d'un signal précis. Puis, afin de lisser le signal et de rendre plus précis le mouvement du buzzer piézoélectrique, la carte de contrôle utilise un réseau d'amplificateurs opérationnels.

Le schéma électronique de ce circuit imprimé peut être retrouvé en annexe [50](#).

IX.II Le prototype logiciel

Accès Open-source Le code source de la partie informatique est disponible sur le site internet Github. Il est disponible en cliquant [ici](#), ou en tapant dans son terminal la commande :

```
wget https://github.com/joaquimelerebel/STM_For_All.git
```

IX.II.1 L'architecture

L'environnement logiciel et l'environnement matériel doivent être indépendants afin d'assurer la continuité du projet.

En effet, l'équipe logiciel ne peut pas se permettre d'attendre la finalisation de la solution mécanique du STM pour commencer le développement de l'interface de contrôle et le traitement d'image. Il devient donc impératif d'implémenter une couche d'abstraction dans le projet.

Nous avons alors élaboré deux couches d'abstraction :

- La couche matérielle (allant de la simulation physique jusqu'au CAN (CONVERTISSEUR ANALOGIQUE NUMÉRIQUE))
- La couche de communication et les moyens d'acquisition de l'image (le simulateur)

Ces deux couches sont les étapes nécessaires au bon fonctionnement de notre interface graphique et permettent de simuler le système. Cette organisation permet alors de travailler en parallèle avec la partie matérielle, au lieu d'attendre la complétion de la première version du STM.

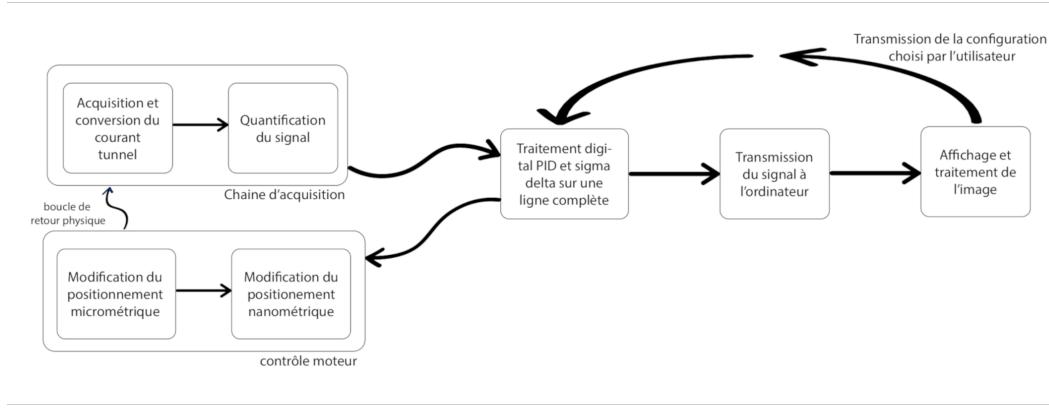


FIGURE 22 : Diagramme présentant le fonctionnement du système durant un scan normal

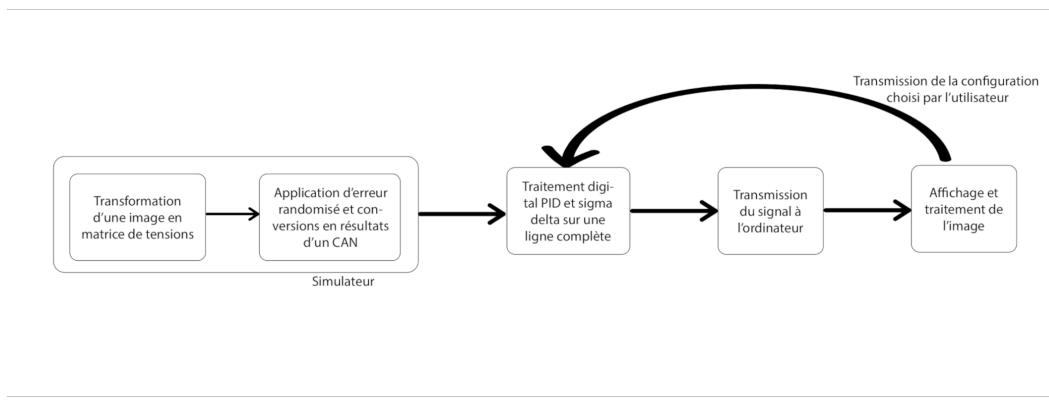


FIGURE 23 : Diagramme présentant le fonctionnement du système durant un scan en mode simulation

IX.II.2 Le simulateur

Notre simulateur se concentre sur le CAN (Convertisseur Analogique Numérique). Son objectif est de fournir une matrice de valeurs correspondant aux potentielles données reçues d'un STM dans son fonctionnement optimal.

Pour cela, nous avons décidé de permettre au simulateur de :

- Convertir une image provenant d'une base de donnée de résultats de STM.
- Convertir cette image en noir et blanc (Format L).
- Convertir les valeurs des pixels de l'image qui forment une matrice à deux dimensions de valeurs entre 0 et 255 vers une plage entre 0 et 1024 qui correspond à celle du CAN.

Cette conversion entre les pixels et les données du CAN peut se faire de différentes manières. Nous en avons sélectionné deux :

- La conversion linéaire, utilisant un simple produit en croix.
- La conversion exponentielle, suivant l'approche de Tersoff-Hamann [9]

Formule de **Tersoff-Hamann** :

$$n(r, E) = \sum_{\mu} |\psi_{\mu}(r)|^2 \delta(\sigma_{\mu} - E)$$

$$I(r, V) \propto \int_{E_F}^{E_F + eV} dE n(r, E)$$

avec :

- I : Courant tunnel
- r : Position de la pique
- V : Tension appliquée
- μ : Les différents états
- ψ_{μ} : Vecteurs propre de Kohn-sham
- ϵ_{μ} : Valeur propre de Kohn-sham
- E_F : L'énergie de Fermi⁶
- n : La densité locale de l'échantillon à la position r de la pique



La thèse "Interpretation of Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy of Magnetic Metal Surfaces by Electron Theory" de Wortmann pour l'université de Dortmund présente dans ses 4 premières parties, une vision exhaustives des outils mathématiques permettant la compréhension de la théorie nécessaire à la conversion de la matrice de voltage en une image. [9]

"This method is readily available in DFT software such as VASP62. Please note that plane-wave codes like VASP will not accurately describe the exponential decay of the wave functions far away from the atoms, and wave functions may need to be extrapolated in order for STM simulations at large heights such as 7 Å else it can show unphysical effects. Hence, we choose image height relatively close to surface. All the STM images are made at least 20 Å long in the xy plane by repeating the primitive unit cell. We choose height 2 Å above the surface (maximum of z-coordinate) during the simulations. For constant-current images, we identify iso-surfaces that have a constant IL DOS. The height of these iso-surfaces at each xy-coordinates produces the images." [10]



L'article cité parle de la création de la base de donnée Jarvis contenant une certaine quantité de scans de STM. Ces images sont actuellement utilisées pour l'entraînement d'un réseau de neurones de convolution pour l'identification des treillis de Bravais sur les scans. Ce réseau peut aider à l'identification et à l'analyse des défauts dans les images provenant de STM. [10]

Cette partie demande une étude plus approfondie et n'est pas encore implémentée. Avant que cela soit possible, nous devons contacter des chercheurs en mathématiques ou en physique afin de pouvoir utiliser de manière adéquate ces équations.

⁶L'énergie de Fermi, EF, en mécanique quantique, est l'énergie du plus haut état quantique occupé dans un système par des fermions à 0 K. Parfois, le terme est confondu avec le niveau de Fermi, qui décrit un sujet proche quoique différent, le niveau de Fermi représentant le potentiel chimique des fermions. Ces deux quantités sont les mêmes à 0 K, mais diffèrent pour toute autre température.[wiki](#)



Nous faisons une interprétation plus approfondie de ces approches dans la partie perspective plus bas.

En attendant, nous utilisons une simplification du modèle présenté dans le cours de Frantisek Maca [11] :

$$I_{tunnel} = A \times e^{2 \times K \times d}$$

- d : Épaisseur de la barrière,
- K = 1 Å⁻¹ pour un métal typique,
- I_{tunnel} : Courant tunnel
- A : Constante

Depuis cette formule, nous avons établi le modèle simplifié :

$$V = \frac{e^{image[x,y]} \times 5}{e^{255}}$$

avec :

- V : La tension
- image[x, y] : La valeur de l'image à la position x(horizontale), y(verticale)

Pour l'instant, nous utilisons principalement la forme linéaire de la conversion pour des questions de simplicité. La conversion linéaire se fait par un simple produit en croix :

$$V = \frac{image[x,y] \times 5}{255}$$

Interface avec le simulateur L'utilisateur peut commander le simulateur à travers une invite de commande ⁷ que l'on appelle plus communément un CLI (Command Line Interface) en anglais.

⁷Une interface en ligne de commande ou ILC (en anglais command line interface, couramment abrégé CLI) est une interface homme-machine dans laquelle la communication entre l'utilisateur et l'ordinateur s'effectue en mode texte :

- l'utilisateur tape une ligne de commande, c'est-à-dire du texte au clavier pour demander à l'ordinateur d'effectuer une opération,
- l'ordinateur affiche du texte correspondant au résultat de l'exécution des commandes tapées ou à des questions qu'un logiciel pose à l'utilisateur.

Une interface en ligne de commandes peut servir aussi bien pour lancer l'exécution de divers logiciels au moyen d'un interpréteur de commandes, que pour les dialogues avec l'utilisateur de ces logiciels. C'est l'interaction fondamentale entre un homme et un ordinateur (ou tout autre équipement informatique). [wiki](#)

```
~/Documents/STM_project/CODE/STM_For_All/docker_domain/src_sim (feat-flask-dynamic_scan x)••• python3 SIM_STM.py -h
usage: SIM_STM.py [-h] [-ot {ASCII,BIN_NP,BIN_MST,C_TABLE,C_TABLE16}] [-errM ERROR_MEAN] [-err ERROR]
                  [-errtype ERROR_TYPE] [-exp] [-vt VTIME] [-t TIME] [-stat] [-s SIZE] [-o PATH] [-serial PATH]
                  SIM_FILENAME

positional arguments:
  SIM_FILENAME      simulates from this file

optional arguments:
  -h, --help        show this help message and exit
  -ot {ASCII,BIN_NP,BIN_MST,C_TABLE,C_TABLE16}, --output_type {ASCII,BIN_NP,BIN_MST,C_TABLE,C_TABLE16}
                    outputs type for the file format (ASCII, BIN_NP, BIN_MST, C_TABLE, C_TABLE16)
  -errM ERROR_MEAN, --error_mean ERROR_MEAN
                    mean of the error(default : 0)
  -err ERROR, --error ERROR
                    maximum/standard error depending on the error model (default : 0)
  -errtype ERROR_TYPE, --error_type ERROR_TYPE
                    the error type can be : "normal" (ERROR is the standard deviation of the distribution and
                    the mean is 0) or can be "uniform" (ERROR is the maximum error, default) Be careful, the
                    error is applied before the uniform or exponential transformation to voltage
  -exp, --exponential scale the sim output exponentially
  -vt VTIME, --variation_time VTIME
                    variation in time between each sample outputed to the file or CLI(default : 0) in ms
  -t TIME, --time TIME time between each sample outputed to the file or CLI(default : 0) in ms
  -stat, --statistics give statistical overview of the input image and the output
  -s SIZE, --size SIZE size of an edge of the square image
  -o PATH, --save PATH output filepath
  -serial PATH      should use the serial output PATH
```

FIGURE 24 : Capture d'écran présentant les différentes options disponibles sur le simulateur

IX.II.3 Le micro-logiciel embarqué

Le code du micro-logiciel provient principalement du projet de Dan Berard [1]. Le micro-logiciel récupère une moyenne des valeurs prises sur le CAN en temps normal, les traite avec PID et sigma delta puis les concatène dans un tableau. De façons régulière, ce tableau est transmis en UART au logiciel Python.



Il serait donc intéressant de migrer la génération de bruit (du simulateur) sur le micro-logiciel grâce à des valeurs pseudo-randomisées et pré-calculées.

Avec cette solution micro-logiciel, nous avons créé un programme Python qui gère la communication série, sous partie de l'interface graphique. Toutefois, on peut les considérer séparé. En effet, l'interface va lancer des sous routines pour cette communication empêchant ainsi le blocage du serveur lors de l'attente d'évènements de communication. Cette communication série est en réalité contrôlée par l'interface, de sorte que l'interface soit le "master" ([modèle master/slave](#)).

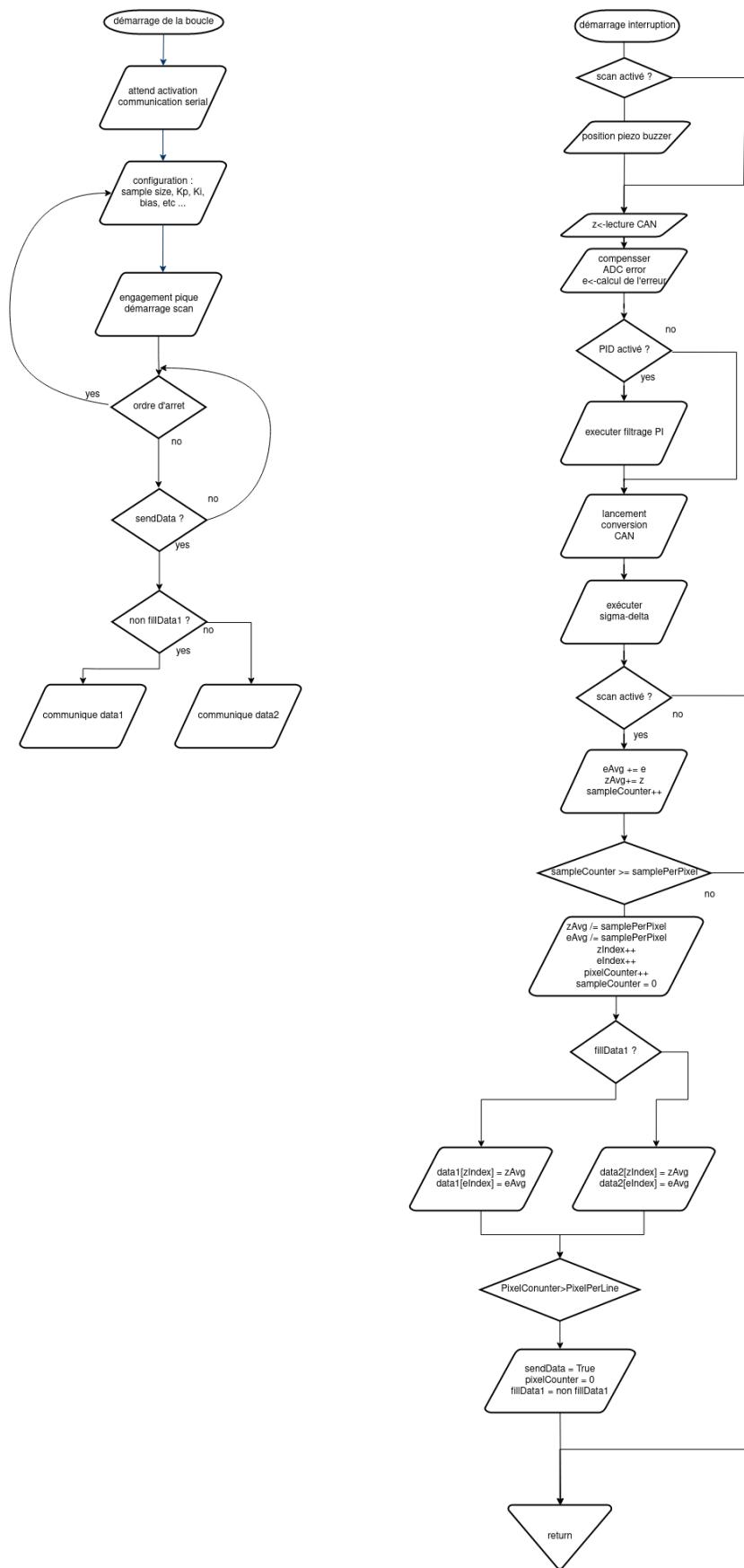


FIGURE 25 : Algorigramme du micro-logiciel utilisé

IX.II.4 Les formats de sortie

Plusieurs formats de sortie de l'image sont disponibles après traitement par l'interface ou par le simulateur :

- Une sortie ASCII correspondant à la matrice avec chaque pixel représentés sous format flottant (float).
- Une sortie sous format de fichier matriciel NumPy de l'image. Cela permet de réutiliser simplement l'image dans d'autres programmes utilisant NumPy.
- Un format de fichier binaire créé spécialement pour le projet (BST : Binary Scope Technologies, en référence au nom du projet, Microscope Technologies).
- Un format matriciel en fichier C utilisable par le micro-logiciel (non-utilisable sur l'interface graphique).
- Des formats d'image JPG, PNG, TIFF. (Le format TIFF est préférable car utilisable dans l'outil de traitement d'image ImageJ).

Le format BST Ce format utilise la norme Big Endian⁸ pour les données binaires.

	0	1	2	3	4	5	6	7						
0	'M'	'S'	'T'	version		patch		(1)						
8	hauteur				largeur									
16	metadata(2)													
24														
...	données													

TABLE 14 : Tableau présentant le format BST

(1) La taille des points est la taille que chaque point occupe dans le tableau en puissance de 2. Par exemple, si la donnée est stockée sur 16 bits, la taille sera 4.

(2) Metadata : correspond à toutes les informations supplémentaires lors de la prise de l'image (version du STM, Version du code du micro-logiciel, Information sur le PID⁹, etc...). Cette partie n'est pas encore présente car le PID n'est pas encore implémenté. Cependant tout est déjà prêt pour l'intégrer.

L'intérêt d'avoir un format de donnée spécialisé est qu'il permet d'avoir toutes les informations que nous désirons sans restriction de place, ainsi que les informations relatives au scan en lui-même dans un même fichier.

⁸Big Endian : Quand certains ordinateurs enregistrent un entier sur 32 bits en mémoire, par exemple 0xA0B70708 en notation hexadécimale, ils l'enregistrent dans des octets dans l'ordre qui suit : A0 B7 07 08, pour une structure de mémoire fondée sur une unité atomique de 1 octet et un incrément d'adresse de 1 octet. Ainsi, l'octet de poids le plus fort est enregistré à l'adresse mémoire la plus petite, l'octet de poids inférieur est enregistré à l'adresse mémoire suivante et ainsi de suite. [Gros Boutisme](#)

⁹Le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégral, dérivé) est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques. [wiki](#)

IX.II.5 L'interface

Afin de permettre une utilisation simple à un utilisateur, l'interface constitue un rôle primordial à l'utilisation du STM et à l'affichage des atomes.

Nous avons décidé de créer cette interface sous la forme d'un site Web en **Python** afin d'avoir une plus grande portabilité. Ainsi que la possibilité, par le plus grand nombre, d'apporter des modifications ou des modules lorsque le projet sera bien plus avancé. Nous travaillons avec des bibliothèques telles que : **NumPy**, **Pillow** ou encore **PySerial**.

Nous avons divisé cette interface en trois parties :

- Image
- Device
- Logs

Section Image La partie **Image** est un outil de test. Son but est avant tout pratique et nous permet de mettre en place des fonctionnalités de traitement d'image avant de les incorporer dans la partie device.

Pour utiliser les fonctionnalités de cette partie, l'utilisateur est demandé d'envoyer une matrice de voltage 2x2 au format .npy, .bst ou .mst. Cette matrice est ensuite convertie en image par l'interface Web. Pour le moment, nous n'avons implémenté que le traitement linéaire de l'image, comme nous l'avons expliqué dans la précédente partie. Le but, à terme, est d'avoir la véritable formule exponentielle afin d'avoir des résultats applicables à la réalité physique de notre matériel.

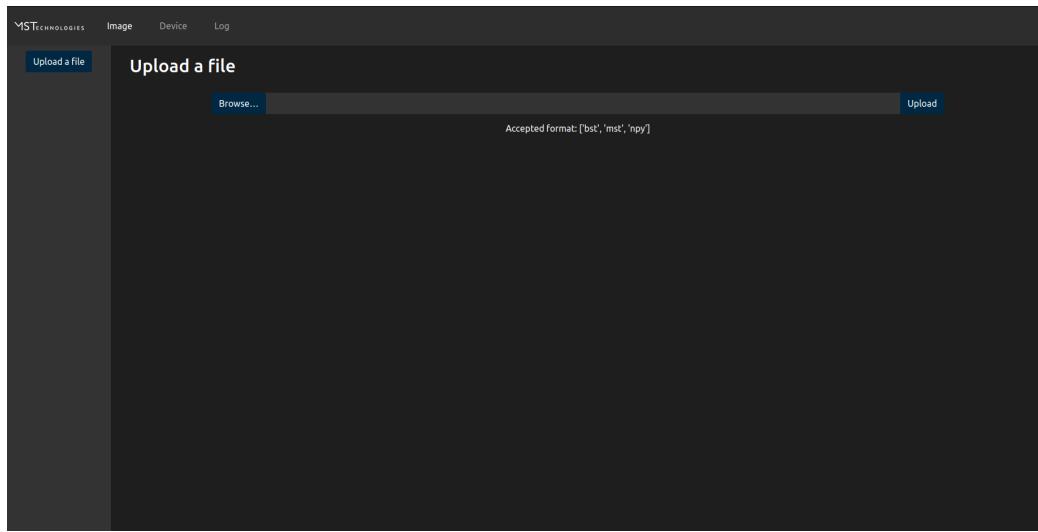


FIGURE 26 : Envoi de la matrice de voltage

Cette section de l'interface permet de convertir la matrice de voltage provenant du simulateur afin de former une image la plus fidèle possible. Le chemin logique se fait depuis le simulateur qui convertit une image d'une banque d'images de résultats de STM en matrice de voltage, puis l'interface Web retranscrit cette matrice en image. Nous affichons également les metadatas de l'image afin d'avoir des précisions sur la taille de l'image, le nom du fichier ou encore le format et le mode de couleur. Notre image retranscrite est ici en noir et blanc, donc en mode L for "luminosity".

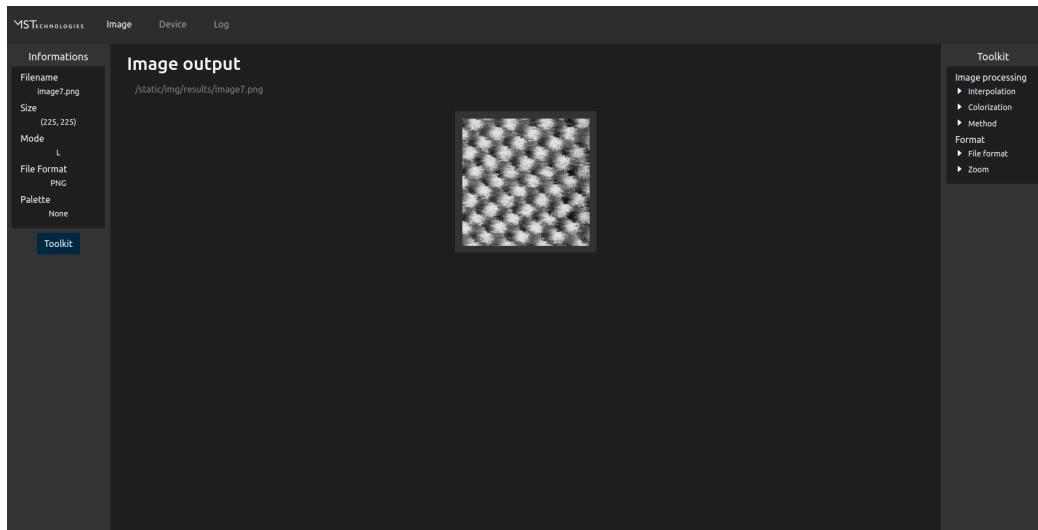


FIGURE 27 : Résultat de la retranscription de la matrice de voltage

L'onglet Image nous permet également de choisir la manière dont nous souhaitons colorer cette image grâce à la méthode **Colorize** du module **ImageOps** de **Pillow**.

Cette méthode permet un mapping des couleurs en gradient de trois points : des noirs aux blancs en passant par un point intermédiaire, permettant des résultats semblables à ceux récupérés des banques de données d'images STM.

Nous pouvons également tester les différents formats d'image (.png, .jpg, .tiff) et télécharger une image grâce à notre kit d'outils, qui n'est cependant pas complet.

Le but final est d'intégrer des modules d'interpolation, différentes méthodes de traitement de l'image, de la correction d'erreur, mais aussi des outils tel que des règles ou encore la possibilité de zoomer sur l'image.

L'utilisateur devra, à terme, être capable de pouvoir ajouter ses propres modules, de manière à pouvoir personnaliser son utilisation du logiciel en fonction de ses besoins.

Nous pouvons maintenant effectuer une comparaison entre l'image de la base de donnée et l'image que nous avons retranscrit.

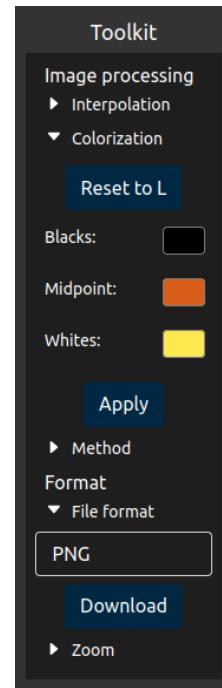


FIGURE 28 : Kit d'outils

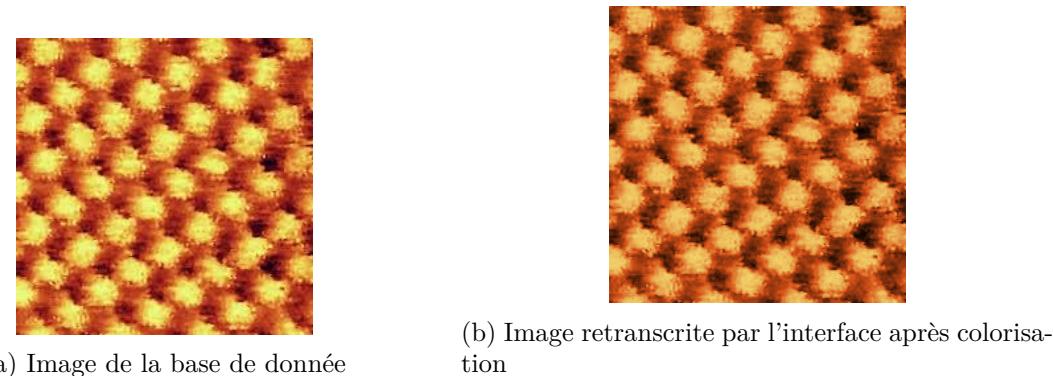


FIGURE 29 : Comparaison entre les deux images

Si nous connaissons avec précision les couleurs qui composent l'image de la base de donnée, il est possible de retranscrire une image similaire à celle-ci.

Section Device La partie **Device** est le **centre** de l'interface Web. Il s'agit de la partie qui effectue le traitement entre le micro-logiciel et l'interface Web. Elle permet la communication avec le programme de la Teensy à travers la bibliothèque **PySerial**.

La bibliothèque **PySerial** nous fourni les informations sur les périphériques connectés qui communiquent en série. Nous faisons par la suite une liste des périphériques USB en faisant du *parsing*¹⁰ de la sortie de la commande “*lsusb*”¹¹. Nous recoupons les informations récupérées depuis les deux sources et cherchons les périphériques USB utilisant du Serial. Le USB nous fourni le nom, le constructeur et l'identifiant du périphérique et le Serial nous fourni le fichier et l'interface avec lequel nous devons communiquer.

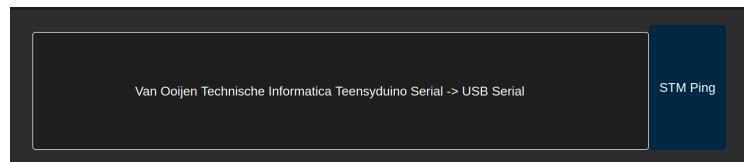


FIGURE 30 : Image présentant le ”<select>”¹² proposant les différents périphériques reconnus comme Serial et USB

Une sécurité existe avant de lancer la page centrale des scans. L'utilisateur doit lancer un Ping sur le périphérique. Ceci va écrire les bytes ”SE” au périphérique, attendre un certain temps pour une réponse (”SE”) et si elle n'arrive pas alors, on considère que le périphérique n'est pas un STM.

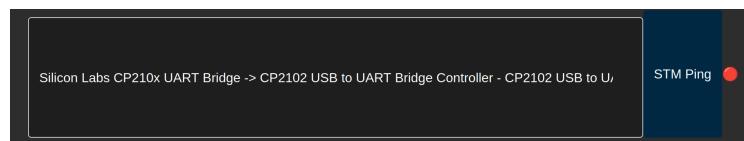


FIGURE 31 : Image présentant le ”<select>” proposant les différents périphériques reconnus comme Serial et USB avec le périphérique sélectionné qui n'a pas validé le test de ping

¹⁰Parcourir le contenu d'un texte ou d'un fichier en l'analysant pour vérifier sa syntaxe ou en extraire des éléments.

¹¹La commande *lsusb* permet d'afficher des informations relatives aux bus USB du système et aux périphériques qui y sont connectés.

¹²L'élément HTML <select> représente un contrôle qui fournit une liste d'options parmi lesquelles l'utilisateur pourra choisir.

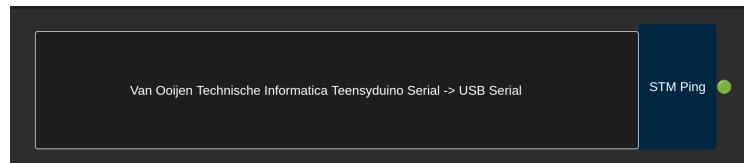


FIGURE 32 : Image présentant le ”<select>” proposant les différents périphériques reconnus comme Serial et USB avec le périphérique sélectionné qui a validé le test de ping

Nous présenterons cette section plus en détail lors du **scénario de fonctionnement**.

Depuis Device, nous pouvons régler :

- Le PID
- La taille de scan
- Le nombre de pixel dans l'image
- La position des moteurs
- Le biais d'échantillonage
- Le point de calibration

Ces réglages peuvent être définis avant de lancer le scan par le biais de fichiers JSON qui peuvent être importés ou exportés localement. Une fois le scan lancé, l'image apparaît progressivement en utilisant un système de **multi-threading** afin de récupérer les informations depuis la Teensy. Bien sûr, il est également possible de coloriser l'image et de l'exporter au format désiré.

Section Logs La partie **Logs** n'est pas encore implémentée. Il s'agit d'une section qui permet la récupération des erreurs et des informations complémentaires envoyées par l'interface Web afin de savoir si quelque chose s'est mal déroulé. Elle est en permanence gérée par un **mutex** qui évite aux tâches de fonctionner si elles ne le doivent pas.

IX.III Le prototype mécanique

La partie mécanique de ce projet comporte toute la structure physique permettant la mesure du courant tunnel. Cette structure, comme le reste de notre système, porte des contraintes fortes nécessaires au bon déroulement du relevé. Elle prend en compte la base mécanique, la base d'amortissement mais également le mécanisme de mouvement de l'échantillon.

IX.III.1 Base mécanique

La base mécanique est une des seules composantes conservée du projet originel. Elle a été fournie par le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives). Toutefois, nous ne connaissons pas le matériau d'origine et nous n'en possédons pas les plans. Nous savons simplement que la structure a été faite en métal afin d'amortir au maximum les vibrations. Toutefois, sa production semble être à la fois coûteuse et complexe. Pour répondre au mieux à notre problématique il a semblé important de comparer l'efficacité de cette structure métallique avec une structure faite en plexiglas, usinable à la découpeuse laser.

Pour cela, il a été nécessaire de reproduire en 3D la base du CEA. Nous nous sommes alors rendus compte que des modifications avaient été portées au cours du temps. Une adaptation à ces modifications a donc été nécessaire dans les nouveaux plans.

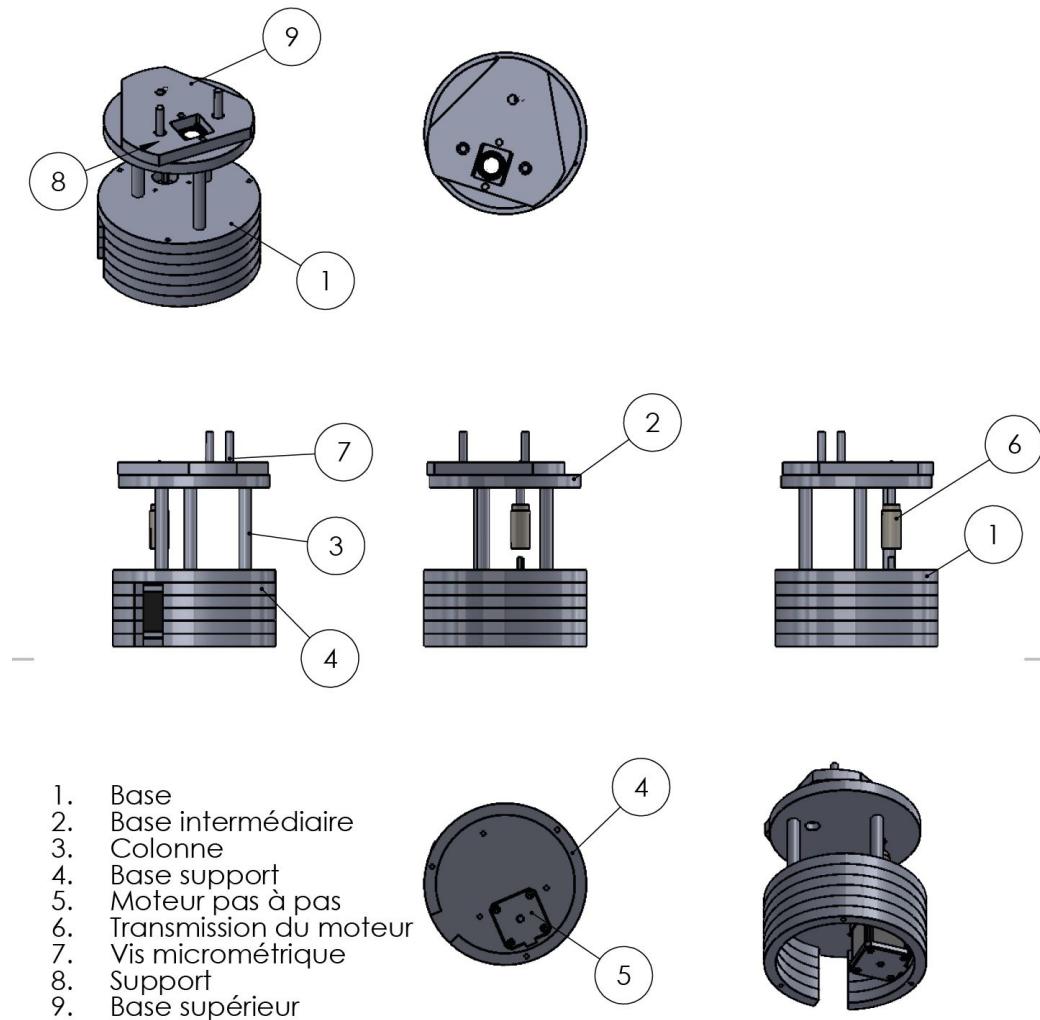


FIGURE 33 : Index des parties de la base mécanique

Afin de simplifier notre utilisation de la base mécanique, nous avons créé des dénominations pour chacune.

Comment fonctionne cette base mécanique ? L'échantillon se trouve sur la base intermédiaire. La carte de pré-amplification et la pique accrochée à elle se trouvent en face de l'échantillon sur la base supérieur. Nous avons trois étapes pour rapprocher la pique de l'échantillon :

La première étape est faite par l'utilisateur à l'aide des vis micrométriques. Il approche au plus près la pique. Pour qu'il puisse faire cela de façon optimale, une caméra microscope pourra être ajoutée sur le côté du STM.

Les deux étapes suivantes sont gérées de manière informatique :

- **Approche grossière ou détection de l'échantillon :** Pour démarrer le balayage nous devons identifier la valeur moyenne de la position en Z de la pique. L'approche s'effectue en étendant au maximum le piézoélectrique sur l'axe Z en cherchant la création de l'effet tunnel. Si le test est infructueux, on rétracte le piézoélectrique et on rapproche la pique par l'avancement du moteur pas à pas.

Il est important que le mouvement du piézoélectrique soit plus grand qu'un pas du moteur pas à pas. La distance permettant l'effet tunnel doit être atteinte par la précision du piézoélectrique. Auquel cas, si la pique rencontre l'échantillon, la pique peut se casser et détruire par la même occasion l'échantillon.

- **Approche précise :** Si la pique reçoit un effet tunnel et que le piézoélectrique est en fin de course sur son axe Z, nous effectuons une nouvelle approche grossière en effectuant cette fois la moitié d'un pas du moteur pas à pas. Ainsi l'échantillon sera situé dans la zone de mouvement du piézoélectrique.

Nous faisons le choix d'effectuer l'approche de précision grâce au piézoélectrique malgré sa complexité d'utilisation afin d'éviter au maximum les vibrations induites par le moteur pas à pas.

Dans le diagramme ci-dessous, deux techniques de balayages sont expliquées. La méthode (a) aurait pu être utilisée, toutefois nous avons décidé d'utiliser dans un premier temps la technique (b) pour sa simplicité d'utilisation au niveau des cartes électroniques.

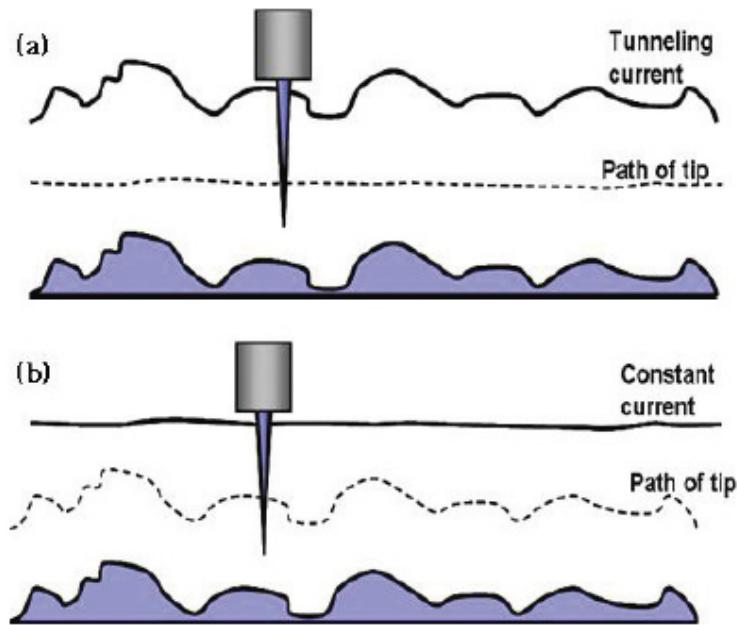


FIGURE 34 : Diagramme des différentes techniques de balayages d'un STM[12]

(a) l'échantillon est alimenté à 2V et bouge sur les axes x et y. La pique est connectée au préamplificateur et ne bouge pas. On étudie le courant tunnel mesuré par la pique.

(b) L'échantillon est alimenté en 2V et bouge sur les axes x, y et z. La pique est connectée au préamplificateur et ne bouge pas. Le but de cette technique est de conserver un courant tunnel constant. Pour cela, la distance entre l'échantillon et la pique est ajustée à chaque mesure. Cette technique est plus lente mais également plus précise.

Comme on peut le présupposer au vu des explications précédentes, l'échantillon doit être conducteur pour que l'effet tunnel puisse se créer. Si l'échantillon n'est pas conducteur, alors il faudra utiliser un AFM qui prend la mesure grâce à un laser.

IX.III.2 Base d'amortissement

Deux perturbations principales ont été identifiées concernant la base mécanique. La première concerne les perturbations mécaniques c'est-à-dire les perturbations vibratoires. La deuxième concerne les perturbations électromagnétiques. L'une comme l'autre peuvent avoir un impact sur la partie électronique au regard de la précision de certains composants. Pendant ce projet, nous nous sommes principalement concentrés sur les perturbations mécaniques, la partie électromagnétique reste à effectuer.

Les perturbations vibratoires venant du sol parisien sont principalement liées au transport. Nous avons pu entrer en contact avec l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris). Ils ont installé dans la cave de leur bâtiment, situé à côté du jardin des plantes, un sismomètre. Grâce à leurs relevés [13] et à leurs recommandations, nous avons pu déterminer que les bruits sismiques à absorber possèdent une longueur d'onde entre 4 et 10Hz. En recoupant d'autres

relevés effectués à Bruxelles [14], nous avons pu constater une corrélation quand au bruit généré par la mobilité en ville. Afin d'effectuer nos tests dans les meilleures conditions, nous devrons les effectuer de nuit durant la fermeture des transports en commun tel que le métro ou le RER, si possible en semaine : le mardi ou le mercredi.

Afin de concevoir un système d'amortissement, nous avons eu deux inspirations. La première vient de notre visite à l'INSP en juin 2021, la deuxième du STM de Dan Berard [1]. On se doit de différencier l'amortissement horizontal et vertical.



FIGURE 35 : A gauche le STM de l'INSP, à droite le STM de Dan Berard [1]

Ces deux systèmes utilisent un système de pendule pour l'amortissement vertical. Dans le cas de l'INSP, le pendule est retenu par 3 cordes d'escalade, dans le cas de Dan Berard par des ressorts. Afin de simplifier au maximum notre système, nous avons choisi d'opter pour des cordes d'escalade. Toutefois, le poids de notre STM n'est pas assez conséquent pour que le pendule soit tendu, il nous faudra donc peut être rajouter des poids afin de répartir au mieux le poids du système pour le deuxième amorti.

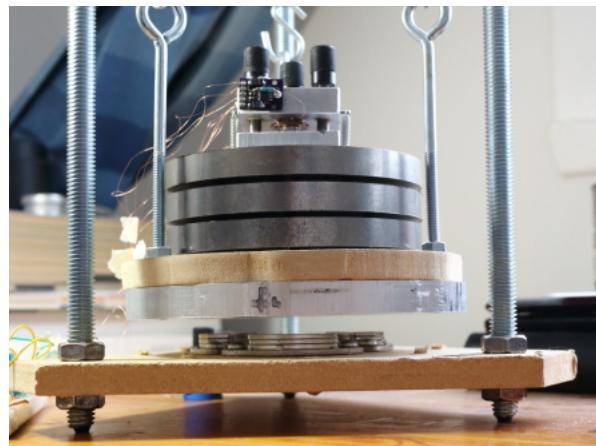


FIGURE 36 : Photo du système d'amortissement par aimant de Dan Berard

L'amortissement horizontal se fait quant à lui selon le modèle de Dan Berard, l'INSP n'en possédant pas. Il utilise trois piles d'aimants afin de prévenir les vibrations horizontales. Ici encore, les aimants choisis dépendront du poids du système supérieur.

Afin de rajouter un certain amorti au système, il serait judicieux de combiner plusieurs types d'isolants en dessous de notre base mécanique.

IX.III.3 Le piézoélectrique

Le dernier point abordé lors de ce projet concernant la partie mécanique est l'utilisation d'un élément piézoélectrique afin de déplacer l'échantillon.

Les composants piézoélectriques sont très utilisés dans le mouvement de précision puisqu'ils peuvent bouger du micromètre au nanomètre. Ce mouvement provient de la structure du composant. En effet, on devrait plutôt parler d'effet piézoélectrique. Les dimensions d'un matériau se trouvent changées lorsque l'on applique une certaine tension. Cet effet découvert en 1880 par les frères Curie est aujourd'hui utilisé à de nombreuses fins tel que les capteurs de force et d'accélération, la musique ou les microphones. Nous avons pu observer à l'INSP des systèmes d'amortissement des vibrations basés sur un système d'actionneurs piézoélectriques.

Tout comme il existe de nombreux domaines d'applications, les composants piézoélectriques prennent des formes très variées. Le projet STM initié il y a quelques années souhaitait utiliser un piézoélectrique cylindrique. Il permet un mouvement sur x, y et z en fonction des tensions appliquées. Vous pouvez en voir la représentation sur l'image ci-dessous.

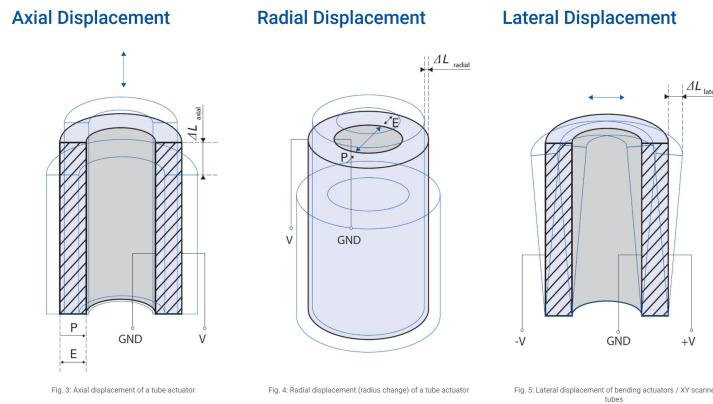


FIGURE 37 : Déplacement d'un piezo-électrique cylindrique en fonction des tensions appliquées [15]

Toutefois, ses propriétés sont spécifiques et l'obtention de tels composants est très coûteuse. Grâce au projet Scanning Probe Microscopy [3], il nous a été possible de trouver une alternative peu coûteuse, avec laquelle il était possible de faire de nombreux tests.

Nous avons donc fait le choix d'utiliser des buzzers piézoélectriques. Habituellement utilisés afin de générer du son, les informations données par le constructeur ne nous permettent pas de connaître ses caractéristiques (fréquence de résonance, déplacement). Cela a été notre travail lors de ce projet. S'agissant d'un disque et non d'un cylindre, son déplacement est légèrement différent de celui présenté précédemment. On applique toujours une tension entre la céramique et la plaque métallique du buzzer piézoélectrique. C'est cette tension qui le courbera. Afin de le contrôler sur l'axe x et y, la céramique sera découpée en quatre quart, chacun possédant une électrode. Ces électrodes seront alors reliées à la carte de contrôle.

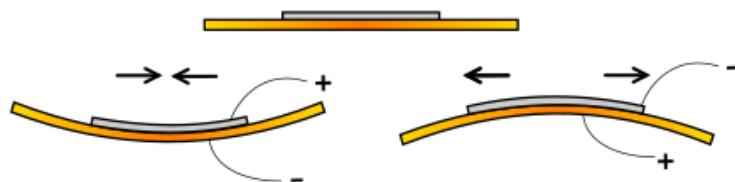


FIGURE 38 : Déplacement d'un buzzer piézoélectrique [3]

X Résultats obtenus

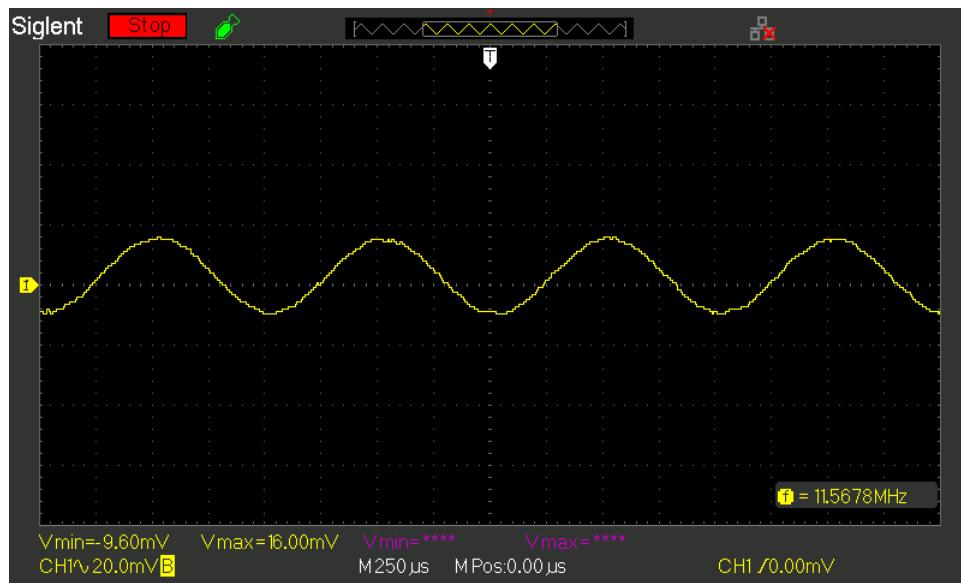
X.I Le prototype électronique

Le projet STM a beaucoup progressé cette année. On peut notamment citer, pour la partie électronique, les actions suivantes :

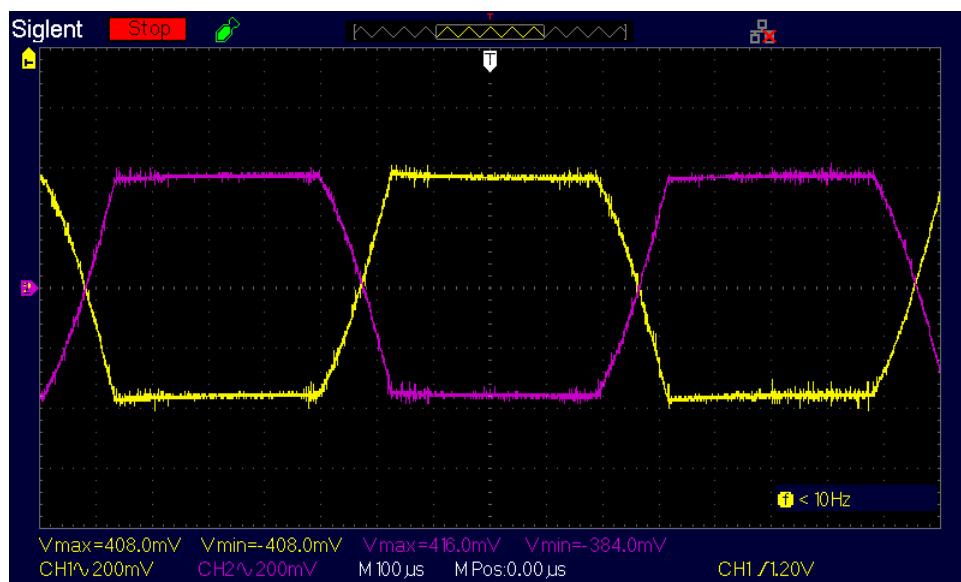
- La conception, manufacturation et le test de la carte de préamplification.
- La conception, manufacturation et le test de la carte d'alimentation.
- La conception, manufacturation de la carte de contrôle moteur et d'acquisition des données.

X.I.1 La carte de préamplification

Le test de la carte de préamplification a été réalisé à l'aide d'un générateur basse fréquence et d'un oscilloscope. Le signal d'entrée passe par le connecteur micro-coaxial. En utilisation standard, celui-ci est relié à la pique du STM. Le signal du générateur basse fréquence permet donc de simuler l'approche de la pique par rapport à un échantillon. Par conséquent, afin de tester la carte de préamplification, nous avons introduit dans ce connecteur un signal de 20 mV d'amplitude et avec une fréquence de 10MHz.



Le signal de sortie de la carte de préamplification est le suivant :



On voit que les signaux de sortie sont en opposition de phase. De plus, on peut aussi observer la rampe et la saturation du signal, ce qui permet de déduire que la carte est fonctionnelle. Néanmoins, on peut aussi voir que le signal de sortie est compris entre $\pm 400\text{mV}$. Cette valeur ne correspond pas à l'amplification théorique obtenue avec le calcul du montage transimpédance. Par conséquent, une erreur sur la carte a dû être réalisée.

En observant la sortie du montage transimpédance sur la carte, avec le même signal d'entrée, on obtient le signal suivant :

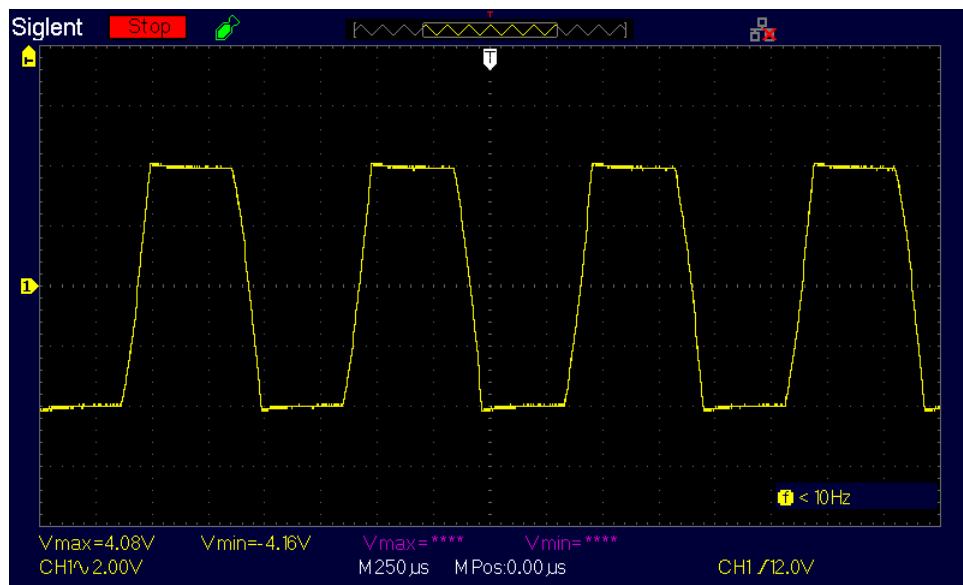


FIGURE 41 : Signal de sortie du montage transimpédance

Le signal de sortie du montage transimpédance, aussi nommé courant-tension, est bien compris en $\pm 5V$.

Par conséquent, on a pu déterminer que le problème vient de l'ADC driver : le ADA 4950-1. Une deuxième version de la carte sans ce composant devra être effectué dans le futur.

X.I.2 La carte de contrôle et d'acquisition des données

La carte de contrôle a été réalisée en dernier et peu de tests ont pu être faits. Néanmoins, nous avons réussi à déterminer que le contrôle du moteur pas-à-pas et l'acquisition des données sont fonctionnels. De plus amples expérimentations devront être faites sur ce circuit imprimé afin de déterminer s'il répond à toutes nos attentes.

X.I.3 La carte d'alimentation

Une carte d'alimentation a été conçue et permet d'alimenter la carte de préamplification et la carte d'acquisition et de contrôle des moteurs. Cette carte utilise des [hacheurs séries](#) pour réduire une tension d'entrée de 48 V en :

- 24VDC
- $\pm 15VDC$
- $\pm 5VDC$
- 3.3VDC

Cette carte est complètement fonctionnelle et a permis de tester les autres circuits imprimés de ce projet.

X.II Le prototype logiciel

Afin de pouvoir évaluer le prototype logiciel, il faut prendre en compte trois aspects :

- Le code du micro-contrôleur
- Le simulateur en ligne de commande
- L'interface Web

Le code du micro-contrôleur Ce code nous permet de gérer la communication en temps réel avec l'interface Web. Il s'agit de transmettre des données qui correspondent aux mesures faites par une extrapolation des possibilités de résultat d'un STM (le matériel n'étant pas prêt à pouvoir recevoir des données).

Le simulateur Ce simulateur nous a permis de convertir des images de base de donnée de résultats de STM en matrice de voltage similaires aux résultats en sortie du convertisseur analogique numérique. Nous avons la possibilité d'incorporer de l'erreur dans la matrice de voltage afin de représenter les potentielles perturbations que pourraient engendrer l'environnement à un vrai STM. Cela permet une répétabilité des expériences menées, et un contrôle accru sur le traitement de l'image. Pour le moment, l'erreur est dans les résultats est du bruit blanc, normal ou uniforme. Ce simulateur a pour but d'être une abstraction complète de la partie matérielle du STM afin de pouvoir développer les deux en parallèle.

L'interface Web Comme présenté précédemment, nous arrivons à établir une connexion entre le micro-contrôleur (Teensy) et l'interface Web, menant aux premiers résultats : la reconstitution d'une image ligne par ligne, sa sauvegarde et sa colorisation. Nous avons également préparer le terrain pour le contrôle des mécanismes physiques comme la position des moteurs, la taille de scan ou encore le PID en incorporant un système de configurations en JSON.

X.III Le prototype mécanique

X.III.1 Modélisation et simulation 3D

La modélisation 3D a été effectué sous SolidWorks. Cette modélisation nous a permis de retracer les modifications apportées sur la base mécanique, de créer des plans pour une conception plexiglas, mais également de voir les points de déformations qui pourront poser des problèmes lors de l'utilisation.



FIGURE 42 : Modélisation 3D de la base mécanique

Sur cette modélisation 3D, on peut voir la différenciation entre les plaques en métal et les tiges en céramique. En reprenant les rendus des précédents projets, nous avons pu apprendre que ces tiges avaient été choisies en céramique en tant qu'isolant.

Ces modèles ont alors pu être adapté à une structure en plexiglas. Nous vous avons mis en annexe les plans [XIII.II](#).

Les vibrations étant un des éléments perturbateurs, nous avons simulé la déformation de la pièce tenant l'échantillon afin de savoir si nous pouvions en améliorer la conception. Solid Works a choisi les fréquences en fonction du matériau. La simulation suivante correspond au déplacement pour une fréquence de 3mHz.

Les déformations sur Z seront principalement causées au niveau de l'axe du moteur. La propagation ne devrait pas impacter l'échantillon.

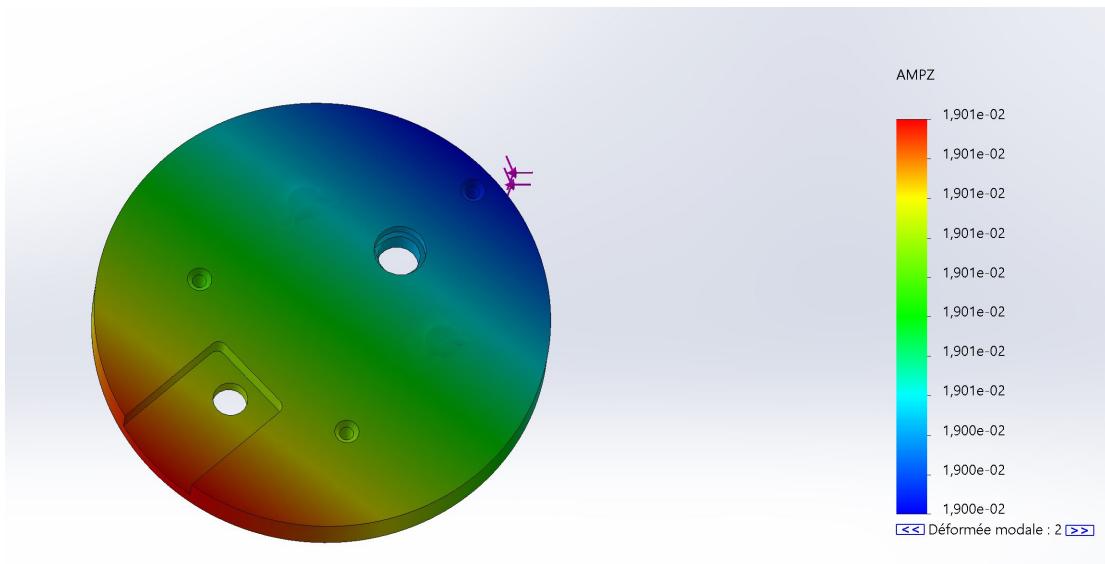


FIGURE 43 : Simulation fréquentielle de la base intermédiaire

X.III.2 Base d'amortissement

La base d'amortissement a été effectuée en plexiglas, avec des cordes d'escalades et d'aimants. La structure global fait 1m de hauteur.

Suite à cette première maquette nous avons pu constater que la masse influençait sur la stabilité globale. Si nous utilisons du plexiglas pour la base mécanique il nous faudra peut-être ajouter des poids pour la stabilité. Les aimants devront également être changé pour des aimants avec un plus gros champ magnétique. La distance d'action pour les aimants est actuellement trop faible pour pouvoir être stable.

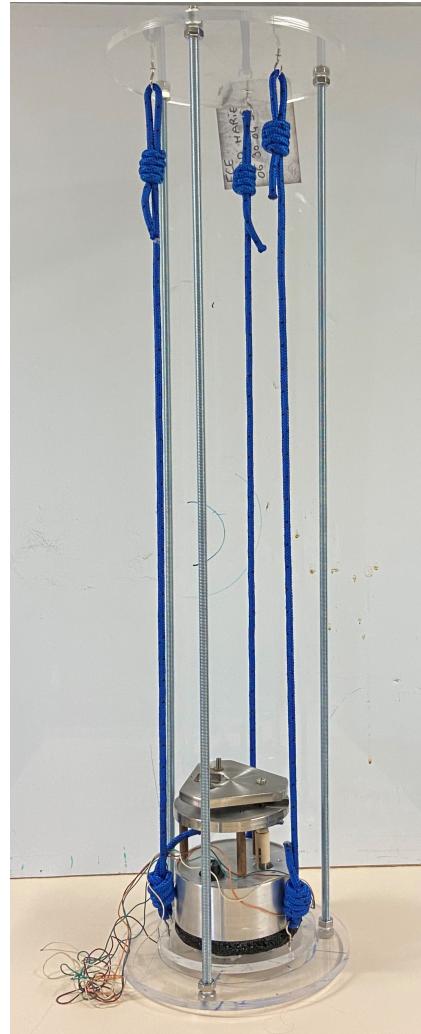


FIGURE 44 : Notre base d'amortissement

X.III.3 Caractérisation du buzzer piézoélectrique

Le buzzer piézoélectrique peut être caractérisé par sa fréquence de résonance et son déplacement en fonction de la tension.

Il existe deux méthodes afin de trouver la fréquence de résonance.

La première consiste à donner une impulsion dans le buzzer piézoélectrique. Celui-ci est émetteur, on pourra retrouver sa fréquence de résonance grâce à un oscilloscope.

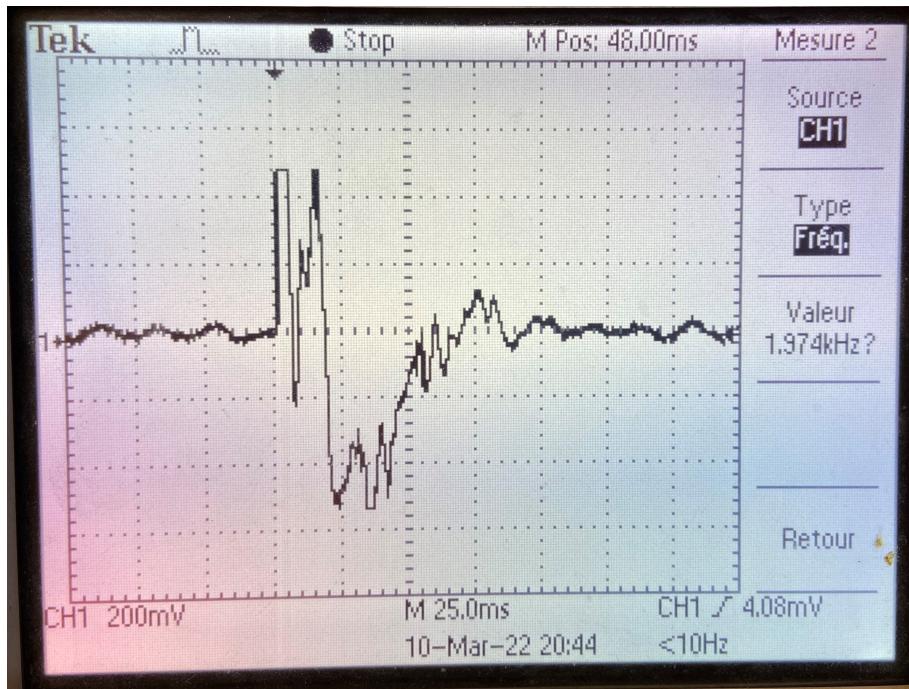


FIGURE 45 : Impulsion émise par un buzzer piézoélectrique

Toutefois, les résultats restent peu fiables et variables à chaque impulsion. Nous avons donc mis en application la deuxième méthode. Pour celle-ci, le buzzer devient récepteur. On lui transmettra un signal sinusoïdal de tension fixe mais avec une fréquence variable. En lisant la tension de sortie, on constate que la tension varie. La fréquence de résonance possède une tension plus élevée, c'est un pic.

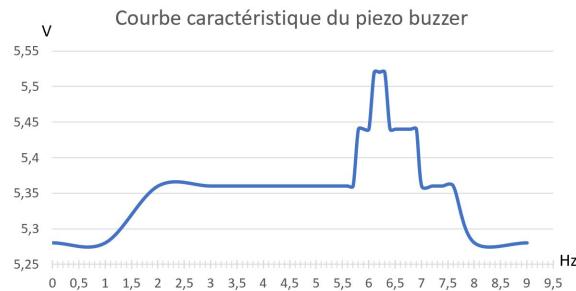


FIGURE 46 : Caractéristique de la tension d'un piezo buzzer en fonction de la fréquence

Grâce à la figure ci-dessus on peut en déduire que la fréquence de résonance est de 6.3 kHz.

La deuxième caractéristique que nous avons du déterminer est le lien entre la courbure du buzzer piézoélectrique et la tension appliquée. Cette courbure est infime de l'ordre du nanomètre, nous avons donc dû augmenter son rayon. La face métallique du buzzer est réfléchissante. En pointant un laser dessus, on peut le faire réfléchir et récupérer le mouvement sur un plan à plusieurs mètres. Nous n'avons pas pu voir une distance de plus de 4 mètres 50 entre le buzzer piézoélectrique et le plan. Un mouvement était visible mais trop infime pour pouvoir être mesuré. Il faudra donc ré-effectuer cette mesure à plus grande échelle. Grâce au théorème de Pythagore, nous pouvons estimer que le déplacement sera visible à 20 mètres de distance.

XI Perspectives de développement

Ce projet n'est pas encore fini, il reste encore de nombreuses fonctionnalités à développer. Chacun des membres actuels partant soit en double diplôme soit à l'étranger, aucun de nous ne pourra être présent à l'ECE l'année prochaine pour poursuivre ce projet. Toutefois, nous avons commencé à planifier la poursuite de ce projet. Dans le diagramme de GANTT suivant vous pouvez constater les prévisions sur deux ans que nous avons pu effectuer. Le projet devra peut-être être découpé en plusieurs PPE afin de garantir un avancement plus rapide.

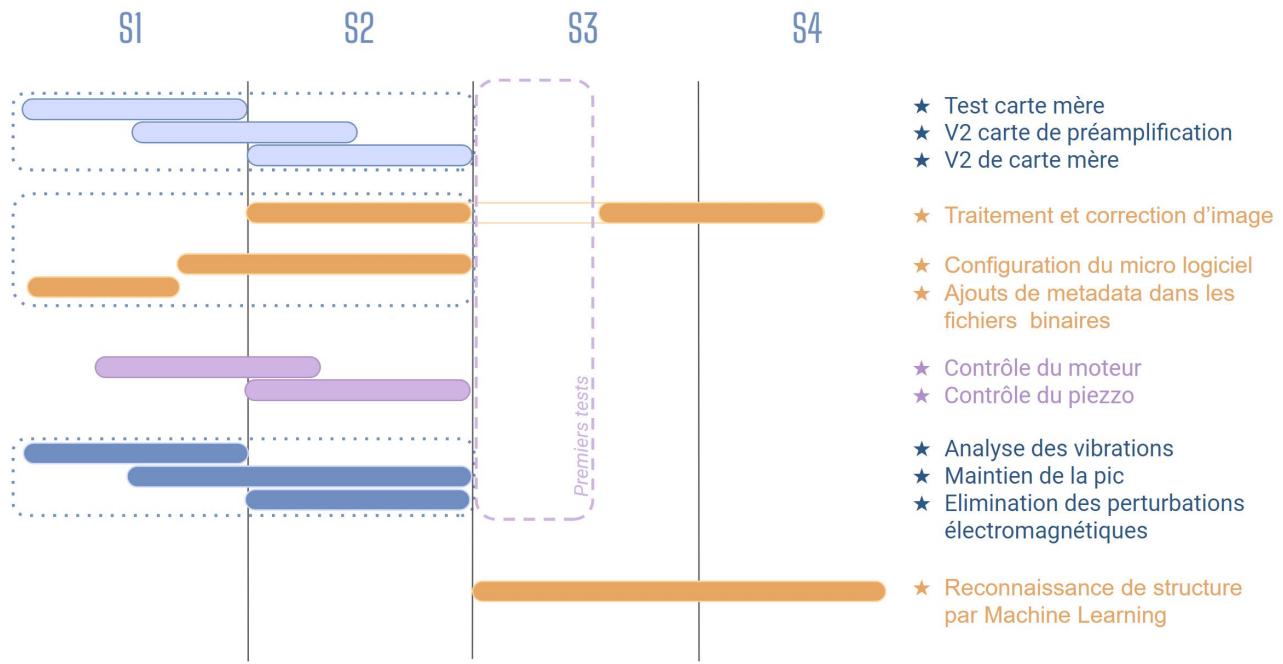


FIGURE 47 : Planification GANTT pour les deux prochaines années

XI.I Futur du simulateur

Nous avons pour but d'ajouter deux fonctionnalités supplémentaires au simulateur, qui sont déjà en développement :

- La création d'une interface Serial virtuelle qui fera croire à l'interface graphique qu'elle est en communication avec le micro-logiciel embarqué sur la Teensy.
- Le passage en "Serial over TCP"

Ces fonctionnalités pourraient permettre de faire des simulations partielles de scan depuis l'ordinateur, et sans composants supplémentaires.

Toutefois, cette approche est efficace pour les systèmes GNU/Linux¹³, mais elle peut être plus ardue pour les

¹³Linux ou GNU/Linux est une famille de systèmes d'exploitation Open-source de type Unix fondé sur le noyau Linux, créé en 1991 par Linus Torvalds. De nombreuses distributions Linux ont depuis vu le jour et constituent un important vecteur de popularisation du mouvement du logiciel libre. [wiki](#)

systèmes Windows ¹⁴ et Mac ¹⁵. C'est ici qu'intervient le "Serial ¹⁶ over TCP ¹⁷" pour le simulateur. Ce système utiliserait ainsi les sockets ¹⁸ réseaux pour effectuer la communication entre le simulateur et l'interface graphique avec une latence très faible, étant située sur le loopback ¹⁹ donc directement en communication locale.

XI.II Architecture du logiciel "interface graphique"

Le logiciel a vu quelques évolutions au cours du temps. Toutefois, la plus grande modification reste à venir car elle concerne un changement de paradigme pour une des fonctionnalités principales de l'outil. Le but final serait de permettre à un utilisateur principal de se connecter à la machine et de préparer un scan. La machine appartiendrait donc à ce moment à ce client. Il serait alors étrange que d'autres clients puissent se connecter et contrôler le scan en cours. Il devient alors intéressant de créer une forme de dépendance entre le client et le scan en cours. Toutefois, les autres clients se connectant au serveur devraient avoir accès au contenu créé en temps réel.

Il devient alors intéressant de passer du paradigme client/server ²⁰ à producer/consumer²¹. C'est pour cela que nous avons commencé à travailler la transition de Flask à Flask/socketIO²². La technologie socketIO²³ permet la création de "room"²⁴ qui sont des espaces de diffusion de message partagé. Elles sont particulièrement intéressantes dans les applications de type messagerie. Dans notre cas, chaque client recevra lors d'une modification du scan, une notification lui permettant d'accéder au lien d'une nouvelle image.

L'ajout de cette technologie complexifie le management et le développement horizontal de la plateforme web. L'utilité de telles modifications doit encore être étudié.

¹⁴Windows est au départ une interface graphique unifiée produite par Microsoft, qui est devenue ensuite une gamme de systèmes d'exploitation à part entière, principalement destinés aux ordinateurs compatibles PC. [wiki](#)

¹⁵macOS (auparavant Mac OS X) est un système d'exploitation partiellement propriétaire développé et commercialisé par Apple depuis 1998, dont la version la plus récente est macOS Monterey (version 12) lancée le 7 juin 2021. Avec iOS, iPadOS, watchOS et tvOS, il fait partie des systèmes d'exploitation d'Apple. [wiki](#)

¹⁶En informatique et en télécommunications numériques la transmission série est la modalité de transmission de données dans laquelle les éléments d'information se succèdent, les uns après les autres, sur une seule voie entre deux points. Elle s'oppose à la transmission parallèle, qui transmet simultanément les éléments d'information sur plusieurs voies. [wiki](#)

¹⁷Transmission Control Protocol (littéralement, « protocole de contrôle de transmissions »), abrégé TCP, est un protocole de transport fiable, en mode connecté, documenté dans la RFC 7931 de l'IETF. Dans le modèle Internet, aussi appelé modèle TCP/IP, TCP est situé au-dessus de IP. Dans le modèle OSI, il correspond à la couche transport, intermédiaire de la couche réseau et de la couche session. Les applications transmettent des flux de données sur une connexion réseau. TCP découpe le flux d'octets en segments dont la taille dépend de la MTU du réseau sous-jacent (couche liaison de données). [wiki](#)

¹⁸Sockets : Apparu dans les systèmes UNIX, un socket est un élément logiciel qui est aujourd'hui répandu dans la plupart des systèmes d'exploitation. Il s'agit d'une interface logicielle avec les services du système d'exploitation, grâce à laquelle un développeur exploitera facilement et de manière uniforme les services d'un protocole réseau.

¹⁹Loopback : Un rebouclage, loopback ou loop-back (de l'anglais signifiant "boucle arrière") est un système matériel ou logiciel en informatique, réseaux ou télécommunications, destiné à renvoyer un signal reçu vers son envoyer sans modification ni traitement, et qui peut par exemple être utilisé à des fins de tests.

²⁰Le protocole ou environnement client–serveur désigne un mode de transaction (souvent à travers un réseau) entre plusieurs programmes ou processus : l'un, qualifié de client, envoie des requêtes ; l'autre, qualifié de serveur, attend les requêtes des clients et y répond. Le serveur offre ici un service au client. [wiki](#)

²¹Le problème des producteurs et des consommateurs est un exemple informatique de synchronisation de ressources, qui peut s'envisager dans différents contextes de programmation concurrente, notamment en environnement multi-thread. Il s'agit de partager entre deux tâches, le producteur et le consommateur, une zone de mémoire tampon utilisée comme une file. Le producteur génère un élément de données, l'enfile sur la file et recommence ; simultanément, le consommateur retire les données de file. Ce problème peut être généralisé à plusieurs producteurs ou consommateurs. [wiki](#)

²²Flask-SocketIO permet aux applications Flask d'accéder à des communications bidirectionnelles à faible latence entre les clients et le serveur.

²³Socket.IO est une bibliothèque JavaScript pilotée par les événements pour les applications Web en temps réel. Il permet une communication bidirectionnelle en temps réel entre les clients Web et les serveurs. [doc](#)

²⁴Une "room" est un canal arbitraire que les sockets peuvent rejoindre et quitter. Il peut être utilisé pour diffuser des événements à un sous-ensemble de clients. [doc](#)

XI.III Logiciel et micro contrôleur

La carte de développement que nous utilisons permet un développement simple grâce à l'utilisation de librairies Arduino et de l'IDE Arduino pour le téléchargement par l'aide de la Teensyduino. Elle embarque un ARM M4 cadencé à 180MHz. Toutefois, il reste dans l'utilisation linéaire et la programmation procédurale.²⁵ du code fourni.

Nous aimerais pouvoir accéder à une architecture qui nous donne accès à de la lecture/écriture/traitement simultanés, une solution propre à notre projet permettant d'utiliser le potentiel entier des cartes électroniques développées. Il serait alors intéressant de développer notre propre architecture électronique pour le traitement le plus rapide possible des informations.

Nous comptons passer sur une technologie FPGA pour la suite du développement embarqué. La technologie FPGA²⁶ permet d'accéder à la vitesse de traitement électronique tout en gardant la flexibilité du développement logiciel.

Ce changement de technologie d'une solution logiciel à une solution matériel permettrait de traiter les différents capteurs de manière parallèle, optimisant ainsi la vitesse de capture. Les solutions actuellement sur le marché utilisent ce que l'on appelle des DSP²⁷. De nombreuses IPs²⁸ de DSP sont open-source ou comprises dans les librairies de base utilisable fournie par le constructeur de la carte. Grâce à l'utilisation d'un FPGA, nous accéderons à des architectures similaires aux solutions professionnelles tout en gardant un coût bas et une modularité avancée. Le développement d'une architecture FPGA permettant de remplacer le micro-logiciel embarqué est un travail conséquent et serait le sujet d'un projet à lui seul.

Toutefois, cette solution est elle aussi un ajout de complexité dans le développement de la solution. Il serait alors plus complexe pour les utilisateurs finaux d'intervenir sur le projet.

XI.IV La structure en Tenségrité

Le but de la structure physique du STM reste l'amortissement des ondes mécaniques environnantes. Une des idées formulées lors du stage serait d'aller plus loin dans le projet de suspension du STM. Il serait alors intéressant d'utiliser les architectures par tenségrité²⁹ pour supporter la structure du microscope. Cette structure mettrait en tension et pression la structure sur les axes en x, y et z. Cette tension et pression serait appliquée à travers des câbles ayant une elasticité plus forte qu'une simple structure solide. Il serait alors intéressant d'étudier la stabilité d'une telle structure. On peut utiliser [springie](#), un simulateur de tenségrité pour commencer la recherche de la structure la plus adaptée. Pour aller plus loin dans l'étude de la stabilité des tenségrités, l'article de J.Y. Zhang "Stability conditions for tensegrity structures" a une approche théorique intéressante qui propose un modèle permettant de trouver les conditions de stabilité de la structure [16].

²⁵En informatique, la programmation procédurale est un paradigme qui se fonde sur le concept d'appel procédural.

Une procédure, aussi appelée routine, sous-routine ou fonction (à ne pas confondre avec les fonctions de la programmation fonctionnelle reposant sur des fonctions mathématiques), contient simplement une série d'étapes à réaliser. N'importe quelle procédure peut être appelée à n'importe quelle étape de l'exécution du programme, y compris à l'intérieur d'autres procédures, voire dans la procédure elle-même (récursivité). [wiki](#)

²⁶FPGA est l'abréviation de "Field-programmable gate array", ce qui peut être traduit en français par "réseau de portes programmables sur site". C'est un circuit intégré fait pour être (re)programmé par l'utilisateur après sa fabrication en utilisant un langage informatique spécifique, donc sans modifier le matériel. [def](#)

²⁷Un DSP (de l'anglais « Digital Signal Processor », qu'on pourrait traduire par « processeur de signal numérique » ou « traitement numérique de signal ») est un microprocesseur optimisé pour exécuter des applications de traitement numérique du signal (filtrage, extraction de signaux, etc.) le plus rapidement possible. [wiki](#)

²⁸Dans le domaine de la conception électronique, un noyau de propriété intellectuelle pour semi-conducteurs (noyau SIP), un noyau IP ou un bloc IP est une unité réutilisable de logique, de cellule ou de conception d'agencement de circuit intégré qui est la propriété intellectuelle d'une partie. Les noyaux de propriété intellectuelle peuvent être concédés sous licence à une autre partie ou être détenus et utilisés par une seule partie. Le terme vient de l'octroi de la licence du brevet ou du droit d'auteur du code source qui existe dans la conception. Les concepteurs de circuits intégrés spécifiques à une application (ASIC) et de systèmes de logique FPGA (field-programmable gate array) peuvent utiliser les noyaux IP comme blocs de construction. [wiki](#)

²⁹La tenségrité est, en architecture, la faculté d'une structure à se stabiliser par le jeu des forces de tension et de compression qui s'y répartissent et s'y équilibrivent. Les structures établies par la tenségrité sont donc stabilisées, non pas par la résistance de chacun de leurs constituants, mais par la répartition et l'équilibre des contraintes mécaniques dans la totalité de la structure. [wiki](#)

XI.V Perspectives en reconnaissance de structures nanoscopique

Un des objectifs de ce projet est la reconnaissance de structure nanoscopique. C'est un travail de recherche complet qui est en cours au "National Institute of Standards and Technology". Le développement de la base de donnée JarvisDFT[10] nous a déjà bien aidé durant le développement de l'outil GUI. Toutefois, cette base de donnée n'avait pas pour finalité le partage d'image de STM mais bien le développement de réseaux neuronaux pour le développement de systèmes de reconnaissance de structure nanoscopique. Pour un premier travail, nous pourrions aussi s'inspirer du travail fait sur la reconnaissance de cristaux à partir de microscopes optiques[4]. Nous pourrions compter ces structures et donner les indices de densité et de pureté du matériaux. Dans le cas de structure cristalline/analyse des lignes de brisure et des perturbations dans l'organisation de la structure (en commençant par : [5]). Nous pourrions même utiliser la recherche sur la détection de brisures dans le cristal pour la correction d'erreur de saut de ligne ou de décalage de la pique.

XI.VI Perspective pour la conversion du signal en image

L'équation de Kohn-Sham défini que l'état au sol de l'énergie totale fonctionnel est minimale pour la bonne densité de l'état au sol par rapport à toutes les densités environnantes qui influent sur le nombre d'électrons présents.

Dans ce théorème, Kohn établie l'expression de l'énergie totale pour pouvoir déterminer la fonction de densité :

$$E[n] = T[n] + E_{ext}[n] + E_H[n] + E_{xc}[n]$$

- $T[n]$ est l'énergie cinétique d'un gaz d'électron qui n'interagit pas dont la densité sera "n"
- E_{ext} décrit l' interaction avec le potentiel externe V_{ext}
- E_H contient l'interaction de Coulomb
- E_{xc} est la corrélation d'échange d' énergie

Cette fonction est ensuite injectée dans la formule de densité au sol pour pouvoir faire des itérations jusqu'à obtenir convergence de la densité. Ce procédé sert à minimiser les calculs pour définir la propriété de l' état actuel sans avoir à calculer l'équation de Dirac ³⁰ de toutes les particules interagissant entre elles. Cette minimisation est faite par 2 approximations : l'approximation de Born-Oppenheimer³¹ à position de tous les nucléus des particules et le théorème de Hohenberg-Kohn³² qui s'occupe des électrons restants.

Le modèle de Tersoff-Hamann : Le modèle est basé sur l'interprétation de Bardeen[9], supposant un système du STM comme 2 sous-systèmes indépendants : la pique et l'échantillon. Son approche consiste à introduire des perturbations, dépendantes du temps, pour en générer des approximations.

Le modèle de Tersoff-Hamann est donc basé sur celui de Bardeen et cherche à simplifier la matrice résultant de ses calculs. La simplification consiste à remplacer les structures électroniques inconnues de la pique par une fonction d'onde, et plus précisément "*atomic s-wave-function*". Pour eux puisque la fonction d'onde décroît exponentiellement

³⁰L'équation de Dirac est une équation formulée par Paul Dirac en 1928 dans le cadre de sa mécanique quantique relativiste de l'électron. Il s'agit au départ d'une tentative pour incorporer la relativité restreinte à des modèles quantiques, avec une écriture linéaire entre la masse et l'impulsion. [wiki](#)

³¹L'approximation de Born-Oppenheimer consiste à découpler le mouvement des électrons de celui des noyaux, du fait de leurs masses très différentes. Les électrons sont considérés comme capable de s'adapter instantanément ce qui permet de faire les retirer des calculs. Cette approximation calcule l'énergie totale sans les électrons. [wiki](#)

³²La théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT, sigle pour Density Functional Theory) est une méthode de calcul quantique permettant l'étude de la structure électronique, en principe de manière exacte. Au début du XXIe siècle, il s'agit de l'une des méthodes les plus utilisées dans les calculs quantiques aussi bien en physique de la matière condensée qu'en chimie quantique en raison de son application possible à des systèmes de tailles très variées, allant de quelques atomes à plusieurs centaines.[wiki](#)

dans le vide et que seul les orbites localisés à l'extrémité de la pique ont un impact sur l'effet tunnel, la simplification peut donc être réalisée.

Cependant ce modèle a 2 défauts : le premier est une nécessité de tension faible car les tensions fortes impliquent un changement des constantes de l'équation. De plus, le modèle de Bardeen fait aussi des approximations nécessitant une tension en dessous de 1V.

Le deuxième est que l'ondulation observée sur les surfaces métalliques denses sont trop grandes par rapport aux prédictions. Ce problème est résolu avec l'implémentation de l'extension de Chen : il considère une approximation en "*dz 2 -wave tip orbital*" plutôt que "*s-wave tip orbital*"

Ces 2 théorèmes nous serviront à déterminer une meilleure approximation de la pique, et donc l'expression pour convertir notre matrice de voltage en position pour l'image. La formule passerait donc d'un modèle linéaire à un modèle réel.

XII Conclusion

La réalisation d'un microscope à effet tunnel représente un travail titanésque. Malgré cela, nous avons réussi à compléter une partie du projet, ce qui permet de se projeter vers l'avenir. Pour résumer succinctement ce qui a été réalisé, nous mentionnerons :

- La réalisation des **premières versions** de la carte d'alimentation, de la carte de préamplification ainsi que la carte de contrôle moteur et d'acquisition des données.
- La réalisation d'un **simulateur** permettant la création de matrice de voltage depuis une image de base de donnée de résultats de STM.
- La réalisation d'une **interface graphique web en Python** permettant la lecture de matrices de voltage, qu'elles proviennent du simulateur ou de la communication avec le micro-contrôleur (Teensy).
- La réalisation d'un modèle 3D du bâti.
- La réalisation d'une première version de la base d'amortissement.

Nous approchons d'un système cohérent afin de mettre au point la première version du STM.

Pour cela, nous devrons effectuer la conception d'une deuxième version de la carte de préamplification, élément le plus sensible du système électronique. Nous devons également créer le maintien de la pique sur le préamplificateur. Il faudra finir le contrôle du moteur pas à pas et du piezzo buzzer.

Ensuite, nous pourrons implémenter l'approche de Tersoff-Hamann dans le simulateur et l'interface Web. Il serait aussi intéressant d'obtenir plus d'informations sur le réseaux neuronaux proposés dans le papier de Choudhary et Kamal[10].

Le projet présente un véritable défi, que nous avons su approcher pas-à-pas. Les résultats sont convaincants, il faut maintenant les faire perdurer, et les améliorer.

Références

- [1] D. Berard, "Home built stm." <https://dberard.com/home-built-stm/>, January 2015. accessed June 2021.
- [2] NT-MDT, "Intelligent scant software - application note 104."
- [3] T. N. John Alexander, Marco Tortonese, "Scanning probe microscopy project home." http://web.archive.org/web/20010417002032/http://www.geocities.com/spm_stm/Project.html.
- [4] T. Fu, Y. Zang, Q. Zou, C. Nuckolls, and L. Venkataraman, "Using deep learning to identify molecular junction characteristics," *Nano Letters*, vol. 20, no. 5, pp. 3320–3325, 2020. PMID : 32242671.
- [5] R. Liu and G. Spraggan, "Image-based crystal detection : A machine-learning approach," *Acta crystallographica. Section D, Biological crystallography*, vol. 64, pp. 1187–95, 01 2009.
- [6] Y. Wu, Z. Gao, and S. Rohani, "Deep learning-based oriented object detection for in situ image monitoring and analysis : A process analytical technology (pat) application for taurine crystallization," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 170, pp. 444–455, 2021.
- [7] Wikipédia, "Transimpedance amplifier," 9 2021.
- [8] S. Sattel, "What is differential signaling?," 5 2019.
- [9] D. Wortmann, *Interpretation of Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy of Magnetic Metal Surfaces by Electron Theory*, pp. 26–29. Universitat Dortmund, 02 2000.
- [10] K. Choudhary, K. F. Garrity, C. Camp, S. V. Kalinin, R. Vasudevan, M. Ziatdinov, and F. Tavazza, "Computational scanning tunneling microscope image database," *Scientific Data*, vol. 8, p. 57, Feb 2021.
- [11] F. Maca, *Interpretation of STM*, p. 9. Charles University Faculty of Mathematics and Physics, 12 2013.
- [12] P. SYSTEMS, "Scanning tunneling microscopy (stm)." <https://www.parksystems.com/park-spm-modes/94-electrical-properties/241-scanning-tunneling-microscopy-stm>. accessed June 2021.
- [13] C. Satriano, "Le confinement vu par le sismomètre de l'ipgp." <http://www.ipgp.fr/fr/confinement-sismometre-de-ipgp>, 4 2020.
- [14] T. Lecocq, "Ground motion displacement rms vs time." <https://github.com/ThomasLecocq/SeismoRMS>, 5 2020.
- [15] P. Ceramic, "Displacement modes of piezoelectric actuators." <https://www.piceramic.com/en/expertise/piezo-technology/properties-piezo-actuators/displacement-modes/>.
- [16] J. Zhang and M. Ohsaki, "Stability conditions for tensegrity structures," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, no. 11, pp. 3875–3886, 2007.

XIII Annexe

XIII.I Montage électronique

XIII.I.1 Schéma du préamplificateur

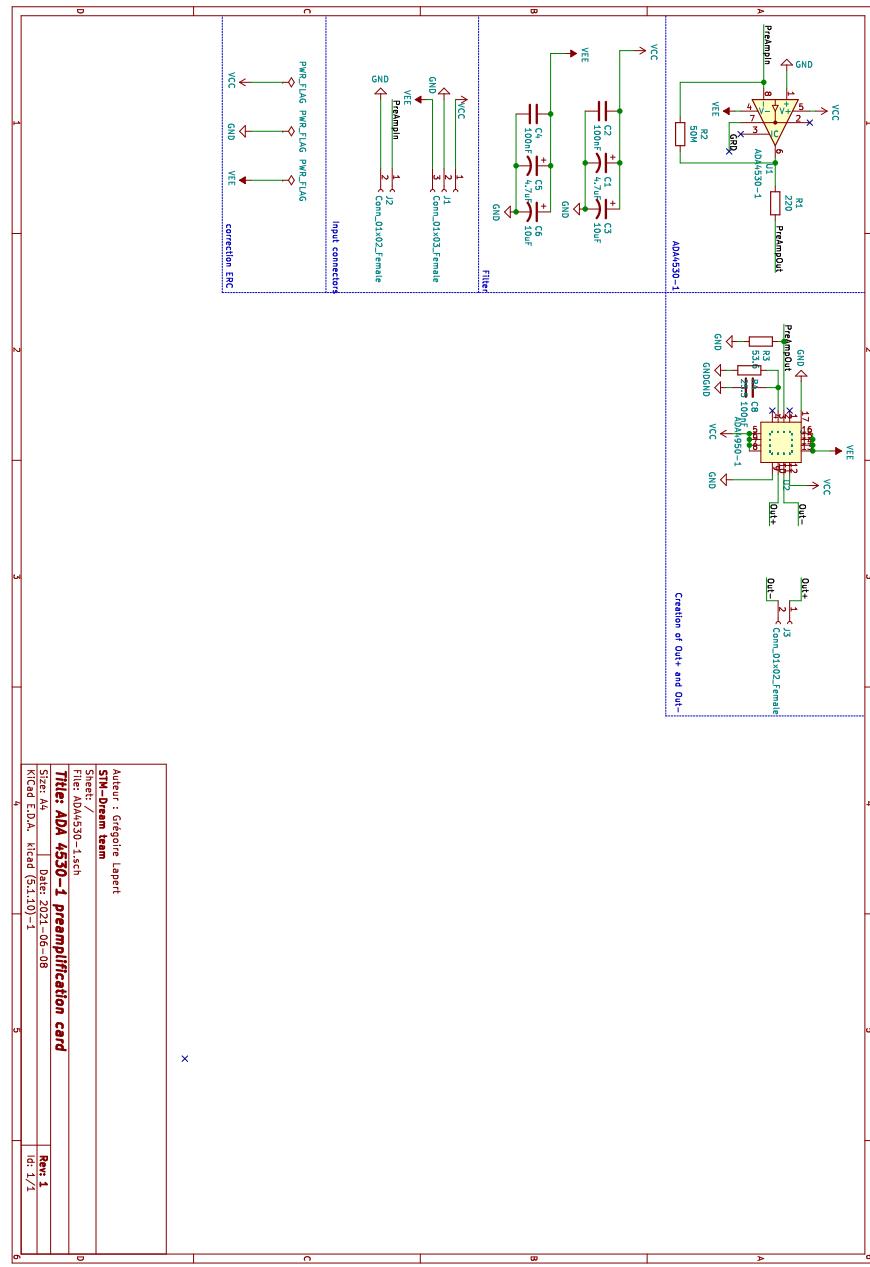


FIGURE 48 : Schéma électrique du préamplificateur

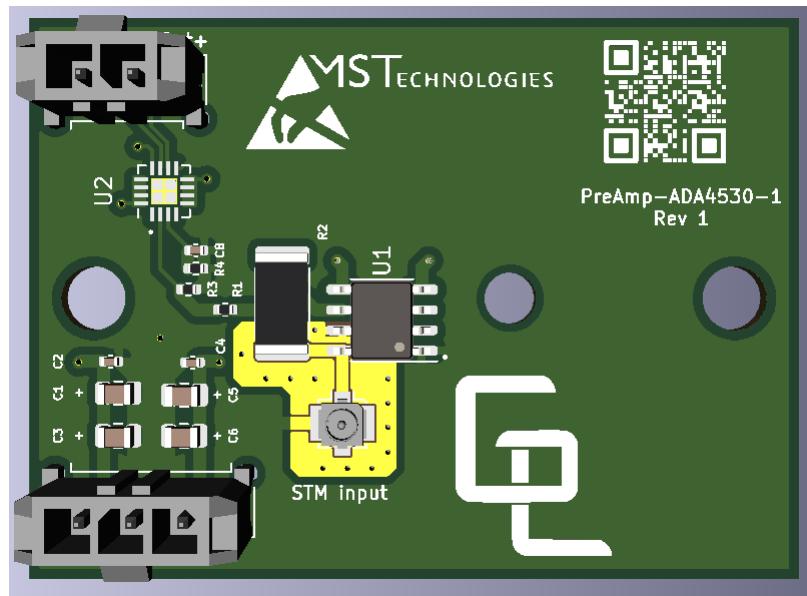


FIGURE 49 : Modèle 3D du circuit imprimé du préamplificateur

XIII.I.2 Carte de contrôle et d'acquisition des données

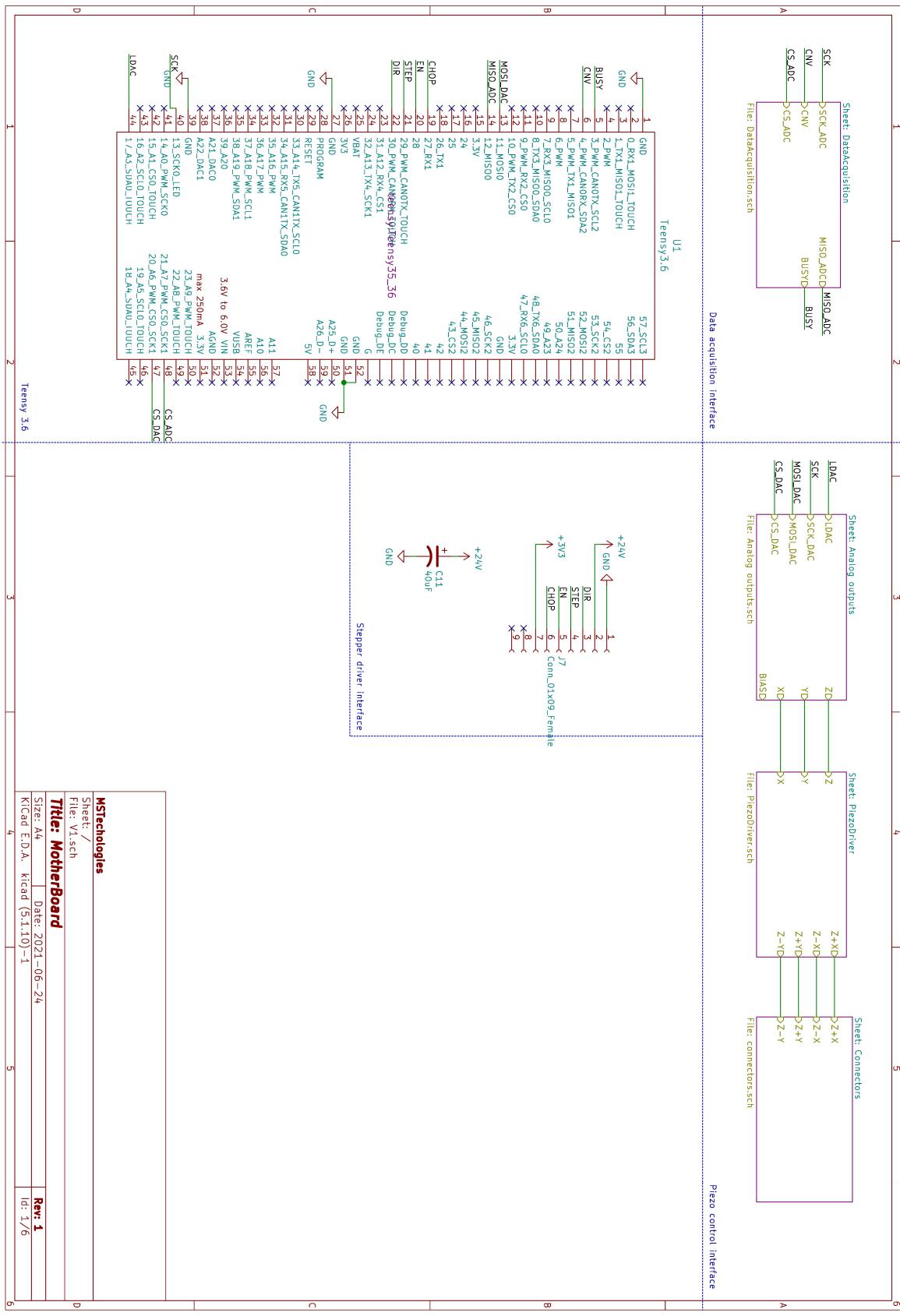


FIGURE 50 : Schéma de la carte de contrôle et d'acquisition des données : Top schematic

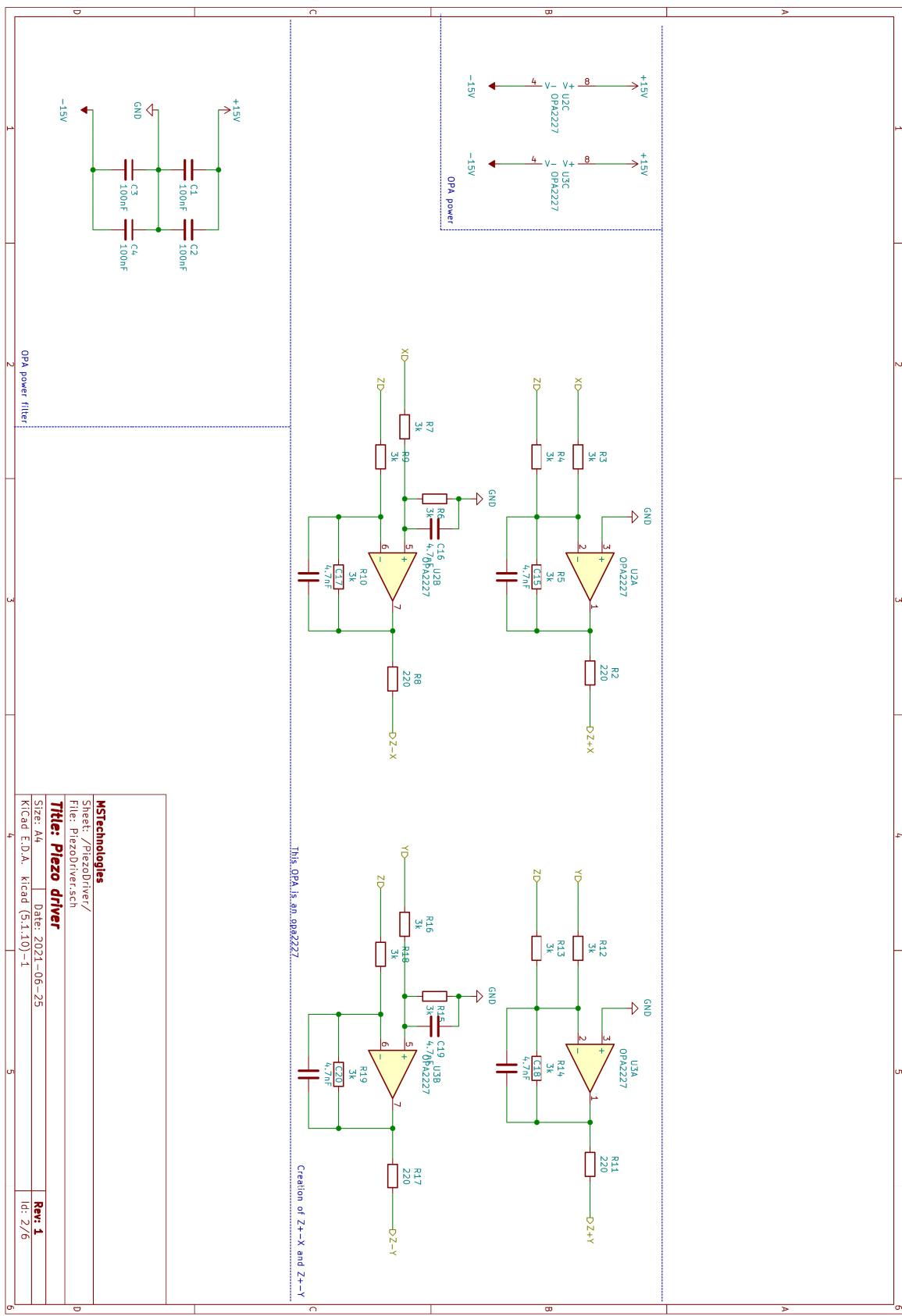


FIGURE 51 : Schéma de la carte de contrôle et d'acquisition des données : Piezo driver

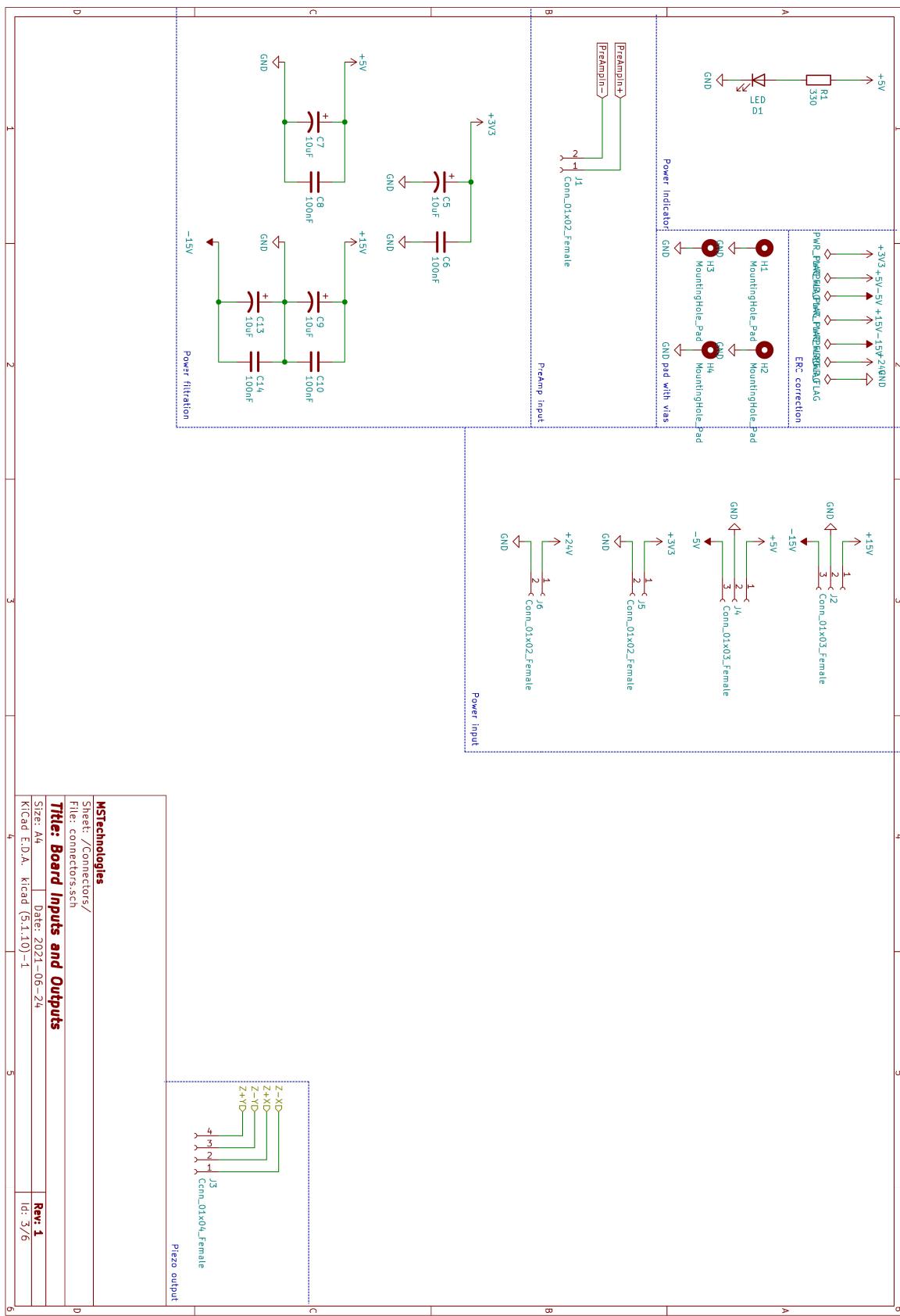


FIGURE 52 : Schéma de la carte de contrôle et d'acquisition des données : Board inputs and outputsPage 59

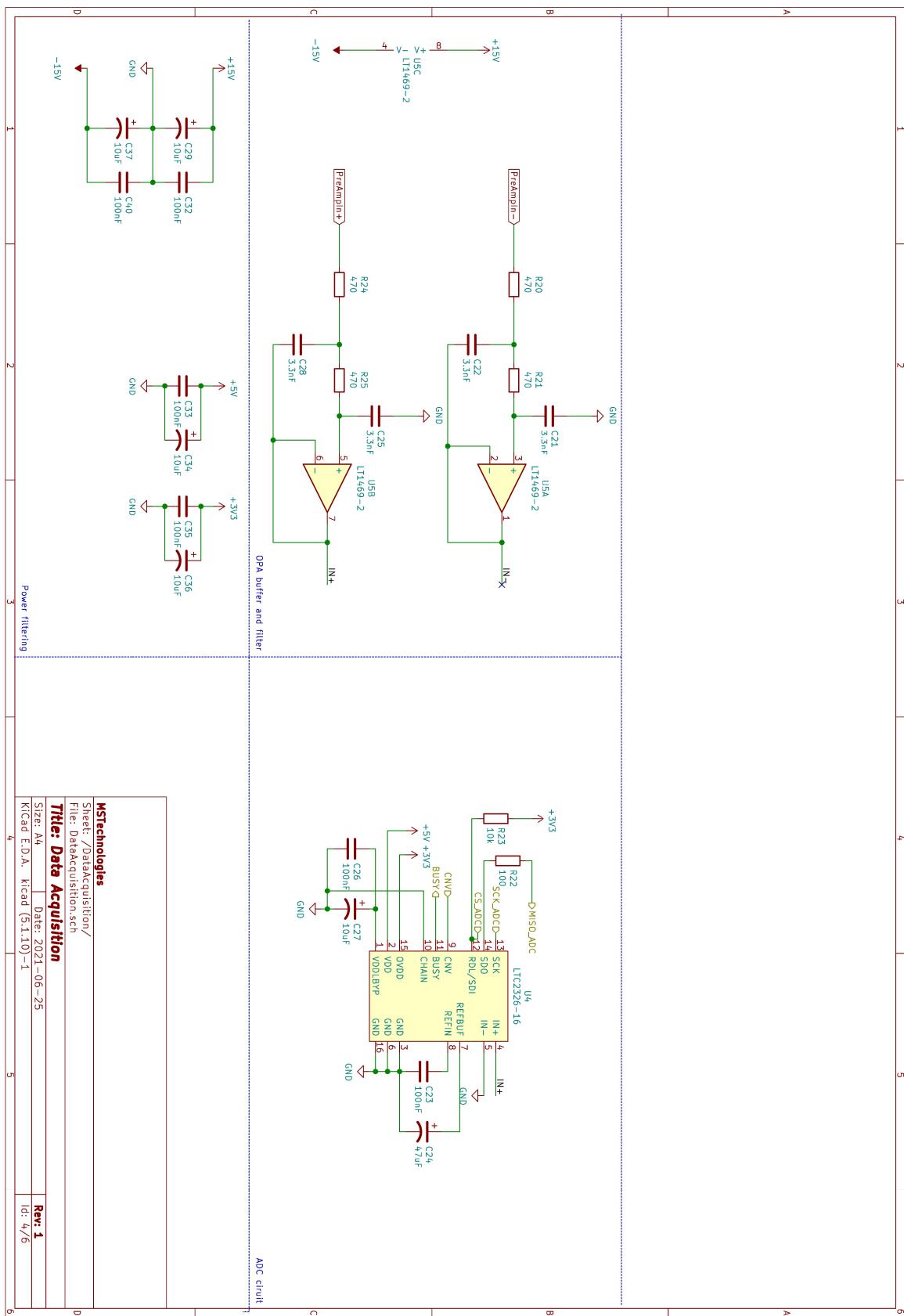


FIGURE 53 : Schéma de la carte de contrôle et d'acquisition des données : Data acquisition

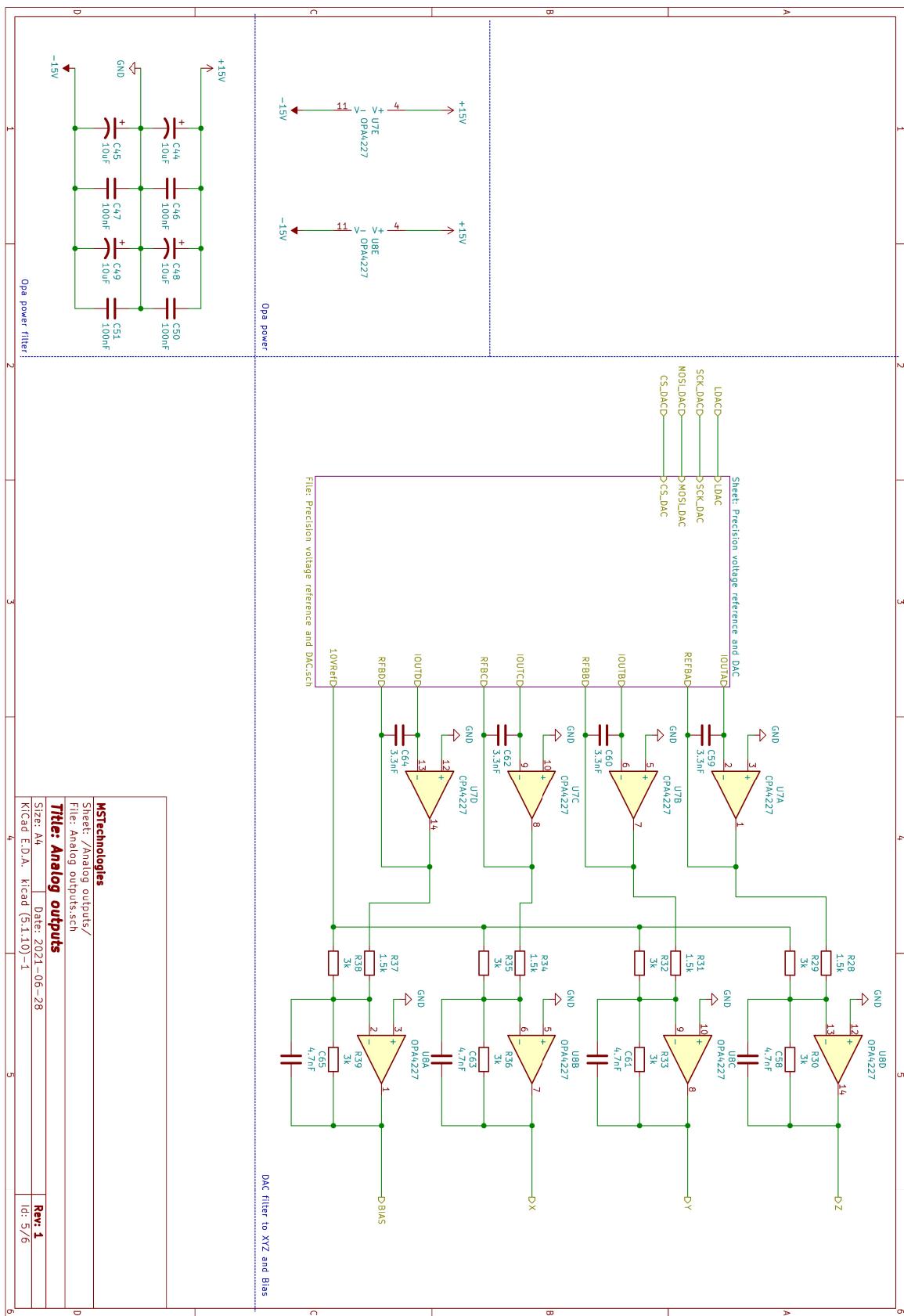


FIGURE 54 : Schéma de la carte de contrôle et d'acquisition des données : Analog outputs

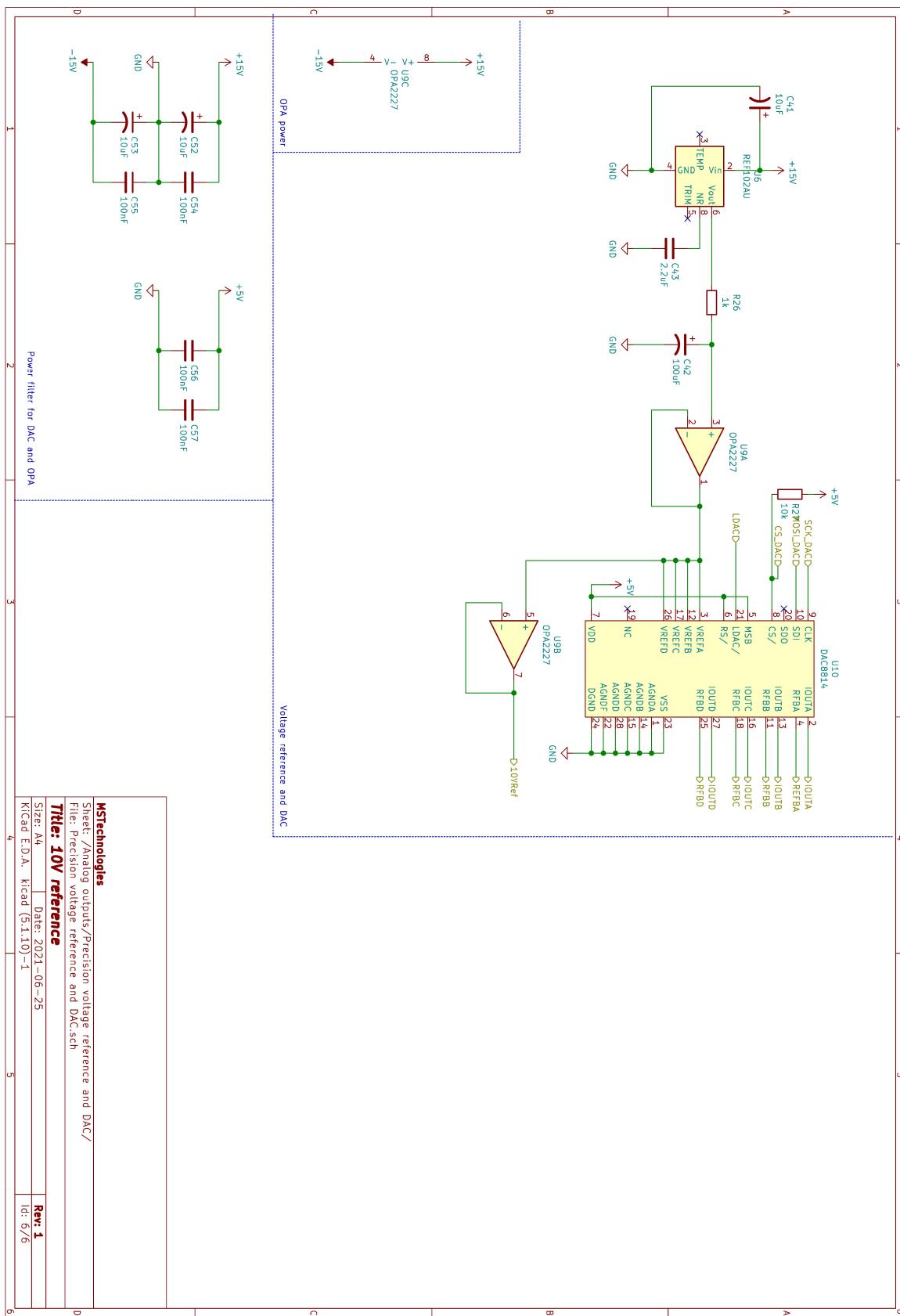


FIGURE 55 : Schéma de la carte de contrôle et d'acquisition des données : 10V reference

MSTechnologies
 Sheet: /Analog outputs/Precision voltage reference and DAC/
 File: Precision voltage reference and DAC.sch

Title: 10V reference

Size: A4	Date: 2021-06-25
Kicad E.D.A.	kicad (5.1.10)-1
Rev: 1	
Id: 6/6	

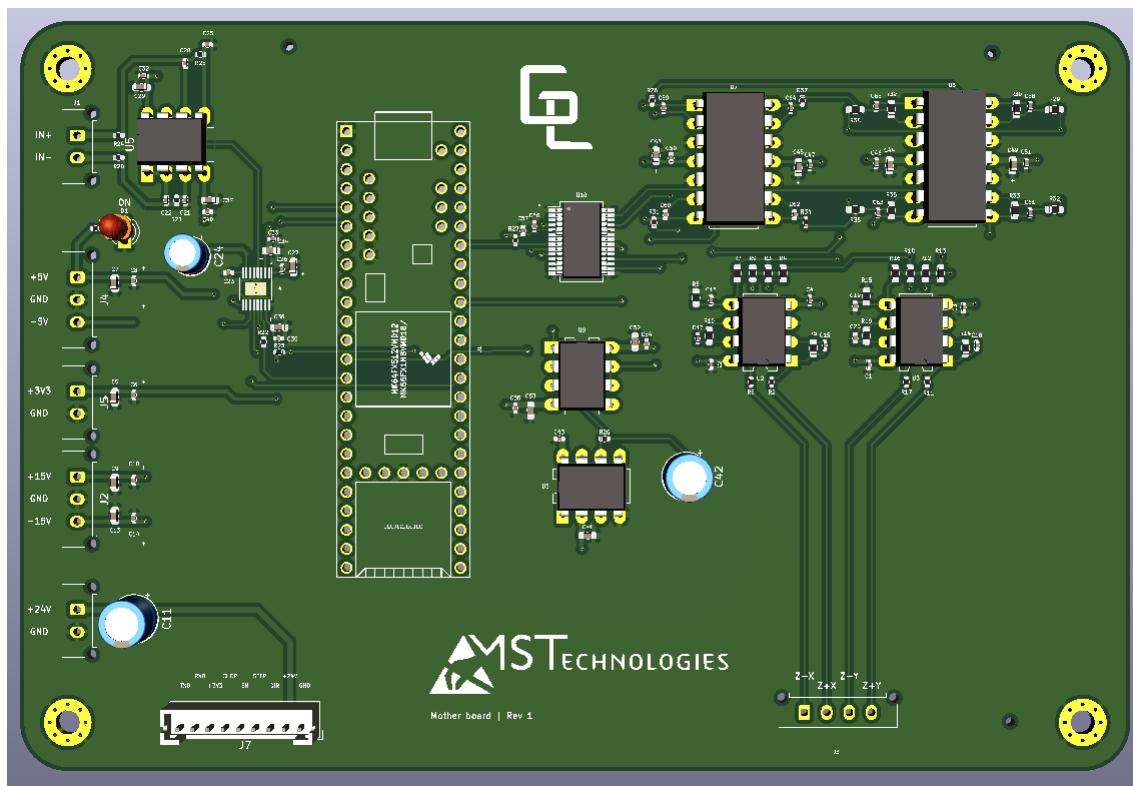


FIGURE 56 : Modèle 3D de la carte de contrôle et d'acquisition des données

XIII.I.3 Carte d'alimentation

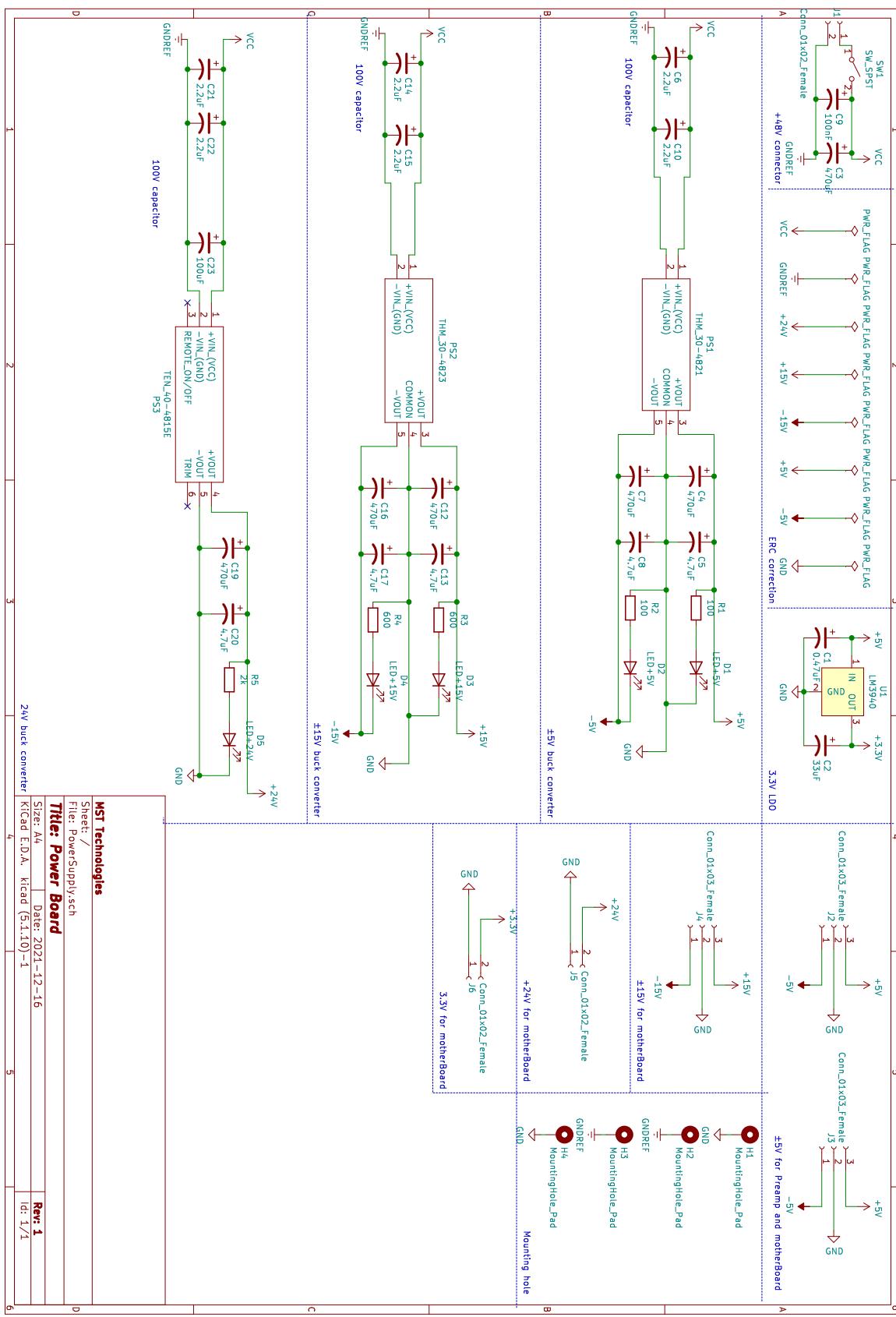


FIGURE 57 : Schéma du circuit de la carte d'alimentation

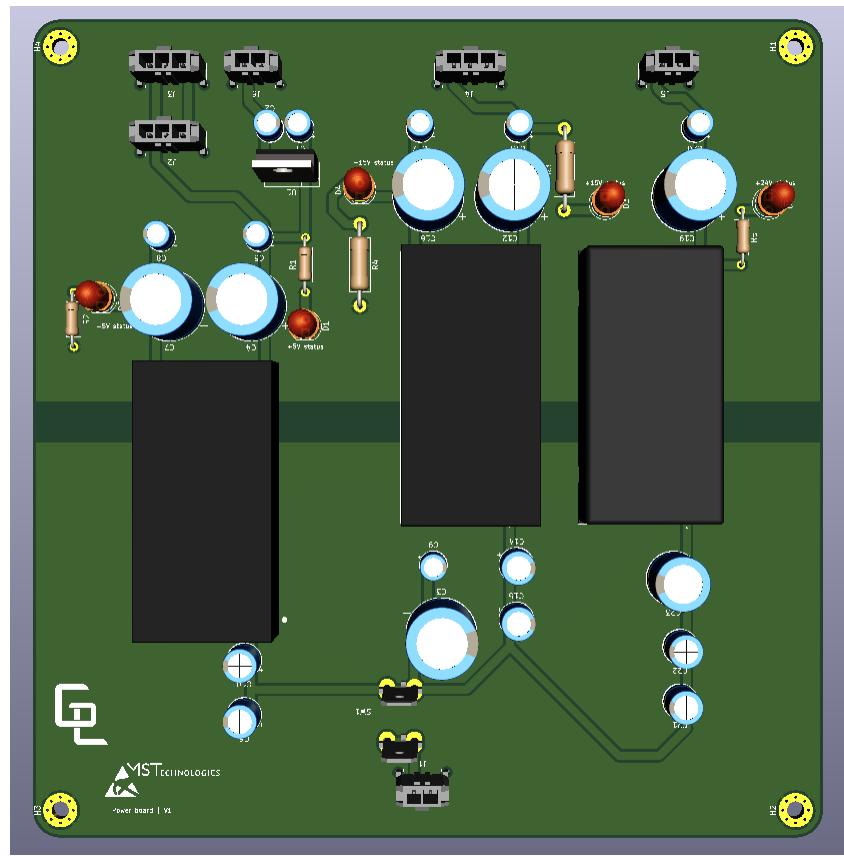


FIGURE 58 : Modèle 3D de la carte d'alimentation

XIII.II Blueprints de la structure plexiglas