



PROJET INGÉNIEUR N°15

Rapport Technique

« Conception et réalisation d'un équipement mesurant la position et la charge d'un individu en milieu industriel »



FERREIRA Emilie
GALLAUD Loïs
GHERIR Farah
GRILLET-NIESS Nathan
LEBAS Nathan

Date :
20 avril 2024
Version :
Première Version

Client :
BLANDET Thierry
Encadrante :
LABED Jelila
Mentore :
NOE Pauline

Remerciements

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à nos clients de l'équipe IGG, Thierry Blandet et Romaric Mathis, qui nous ont confié ce projet et ont contribué tant sur les aspects techniques que gestionnaires. Leur disponibilité et leur confiance, en nous permettant l'utilisation de leurs locaux et du matériel de l'équipe IGG en toute autonomie, ont grandement facilité le déroulement de notre mission. Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers Aude Bouillé, étudiante de Polytechnique réalisant son Projet de Fin d'Études au sein de l'équipe IGG, pour son aide et ses conseils lors des dernières étapes du projet.

Un merci tout particulier à Jelila LABED pour son dévouement, ses conseils éclairés et son soutien constant tout au long de l'année. Sans son implication, cette session de projets ingénieurs 2023-2024 n'aurait pas pu se dérouler de manière aussi fructueuse.

Nous exprimons également notre gratitude envers Piotr Szychowiak pour son suivi attentif de l'avancement du projet et ses conseils avisés en matière de gestion de projet. Nos remerciements s'étendent à toute l'équipe de pilotage pour son appui précieux et ses retours constructifs, notamment lors des revues de projet.

Nos remerciements vont également à Norbert Dumas, Baptiste Gomes, Loïc Cuvillon et Morgan Madec pour leurs conseils, leur formation et l'accès qu'ils nous ont accordé aux équipements disponibles au Fablab. Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers les équipes des projets ingénieurs PI06 de la session 2022-2023 pour leur disponibilité et leur précieuse assistance.

Ces collaborations ont grandement enrichi notre expérience et contribué au succès de notre projet. Nous sommes reconnaissants envers chacun pour leur implication et leur soutien tout au long de cette aventure ingénieure.

Résumé Exécutif

I. Résumé

VRGOCAPT est un projet ingénieur dont l'objectif est de développer et concevoir un équipement de capteurs pour un corps humain, sous la direction de Thierry Blandet de l'équipe Informatique Géométrique et Graphique (IGG) du laboratoire ICube de Strasbourg.

Le projet consiste à la réalisation d'un système de capteurs amovibles. Ils devront repérer les positions des différentes parties du corps et mesurer la charge portée par l'utilisateur afin d'en faire une simulation en réalité virtuelle. Ce système permet à un individu travaillant en milieu industriel d'améliorer la qualité de ses gestes à partir d'une récupération de données via un support externe ou en temps réel.

II. Description synthétique du projet

L'objectif principal de ce projet consiste à réaliser un équipement permettant d'interagir avec une plateforme de réalité virtuelle dans un milieu industriel afin d'améliorer la qualité des gestes et l'ergonomie des postes de travail. Pour se faire, la demande du client est de concevoir un équipement amovible permettant de visualiser les mouvements, avec ou sans charge. Le projet devra répondre à différentes contraintes : le poids du système, sa portabilité ou encore la précision du dispositif. Une fois réalisé, ce système sera testé en milieu industriel.

III. Abstract

VRGOCAPT is an engineering project aimed at developing and designing a sensor equipment for the human body, under the supervision of Thierry Blandet from the Geometric and Graphic Computing (IGG) team at the ICube laboratory in Strasbourg.

The project involves the creation of a removable sensor system. These sensors will be able to detect the positions of different body parts and measure the load borne by the user to simulate them in virtual reality. This system allows an individual working in an industrial environment to improve the quality of their movements based on data retrieval through an external support or in real-time.

The main objective of this project is to create equipment that can interact with a virtual reality platform in an industrial environment to improve the quality of movements and the ergonomics of workstations. To achieve this, the client's requirement is to design a removable equipment that allows visualizing movements, with or without load. The project must meet various constraints : the weight of the system, its portability, or the accuracy of the device. Once completed, this system will be tested in an industrial setting.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé Exécutif	ii
I. Résumé	ii
II. Description synthétique du projet	ii
III. Abstract	ii
Introduction	1
I. Présentation	1
I.1. Clients	1
I.2. Encadrante et mentore	1
I.3. Groupe de Projet Ingénieur	2
II. Contexte	3
Analyse du besoin	6
I. Analyse du besoin	6
I.1. Expression du besoin	6
I.2. Diagramme SADT	6
I.3. Diagramme des contraintes	8
I.4. Solution VRGOCAPT	9
Logiciels utilisés	11
I. Arduino	11
II. Solidworks	11
III. EasyEDA	11
Choix Techniques	13
I. Solution VRGOCAPT	13
II. Module inertiel	13
II.1. Composants	14
III. Module de charge	16
III.1. Choix capteur de charge	17
III.2. Intégration dans une chaussure	18
IV. Module de contrôle	18
IV.1. Composants	19
IV.2. Récupération et transfert des données	20
IV.3. Modules et coques	20
Hardware	21
I. Module Inertiel	21
I.1. Electronique	21
I.2. Impression 3D des modules	23

II.	Module de Contrôle	24
II.1.	Electronique	24
II.2.	Impression 3D du Module de Contrôle	26
III.	Module de Charge	28
III.1.	Choix capteur de charge	29
III.2.	Montage sur un banc de test	30
III.3.	Conception du produit	33
	Software	35
I.	Support Arduino	35
II.	Démarrer le système	35
II.1.	Initialisation	35
II.2.	Lancer l'enregistrement	36
III.	Transmission et sauvegarde des données	37
III.1.	Protocole UDP	37
III.2.	Sauvegarde sur support SD	38
IV.	Acquisition des données	38
IV.1.	Données des Modules Inertiels	38
IV.2.	Données des Modules de Charge	40
V.	Interface et Exploitation	40
V.1.	Interface Humain-Machine	40
V.2.	Exploitation des données	41
	Conclusion	43

Table des figures

2	Clients du projet VRGOAPT	1
3	Jelila Labeled, encadrante du projet ingénieur	2
4	Groupe de Projet Ingénieur n°15	2
5	Troubles Musculo-Squelettiques (source : Assurance Maladie 2017)	3
6	Illustration de la qualité d'un mouvement	4
7	Logo VR-Sys&Id, projet ingénieur 2022/2023	5
8	Expression du besoin	6
9	Diagramme SADT	7
10	Fonctions principales du projet	7
11	Diagramme des contraintes	8
12	Liste des contraintes	9
13	Photos du module inertiel	14
14	Corps équipé par le système VRGOAPT	14
15	Capteur inertiel BNO	15
16	Photos du module de charge	16

17	Capteur de pression FlexiForce A301	17
18	Prototype de l'intégration du module de charge	18
19	Photos du module de contrôle	18
20	Photo d'un microcontrôleur ESP32	19
21	Schéma électrique EasyEda du PCB du Module Inertiel	21
22	Photo d'un capteur CMPS, centrale inertielle	21
23	Contenu des registres du CMPS14, documentation CMPS14	22
24	Adresses disponibles du CMPS 14, documentation CMPS14	23
25	Capture d'écran des modèles 3D sur SolidWorks lors de la conception	23
26	Schéma de conception du Module Inertiel	24
27	Schéma électrique de la plaque électronique du Module de Contrôle .	25
28	Bus I2C	26
29	Schéma de conception du Module Inertiel	27
30	Photos du module de charge	28
31	Capteur de pression FlexiForce A301	29
32	Montage électrique pour l'utilisation du capteur FelxiForce A301 . . .	30
33	Photos du dispositif imprimé en 3D pour appuyer correctement sur la cellule du FlexiForce A301	31
34	Courbe pour une valeur de resistance choisie de 67,2 Ω	31
35	Photo du montage sur le banc de test	32
36	Poids mesuré en fonction du poids réel	32
37	Plan de la carte électronique conçu avec EasyEDA	33
38	Capture d'écran de la conception 3D sur SolidWorks du boîtier du Module de Charge	34
39	Glossaire des parties du corps (NaS = "Not a Sensor")	36
40	Rester appuyé sur le bouton du module de contrôle pour lancer l'en- registrement	37
41	Forme du fichier de configuration config.yaml	38
42	Type de données que souhaite recevoir le client par capteur à chaque tick	39
43	Liste des types de données issu de la documentation du CMPS14 . . .	39
44	Types de données acquises lors d'une requête vers un module de charge	40
45	Exemple de trame envoyée pour un tick	41

Introduction

I. Présentation

I.1. Clients

Thierry BLANDET est un ingénieur faisant partie de l'équipe IGG (Informatique Géographique et Graphique) au sein du laboratoire ICube à l'Université de Strasbourg. Actuellement, il occupe le rôle de responsable du pôle Visualisation et Interaction au sein de la plateforme de recherche GAIA. Son engagement professionnel se manifeste particulièrement dans le projet en cours, intitulé "V.I.R.T.Fac" (Virtual Innovative Real Time Factory).



(a) Thierry Blandet



(b) Romaric Mathis

FIGURE 2 – Clients du projet VRGOAPT

I.2. Encadrante et mentore

La réalisation de ce projet s'est déroulée avec le soutien constant de Jelila LABED, enseignante chercheuse au laboratoire ICube de l'Université de Strasbourg. Elle a obtenu son doctorat en physique de l'environnement terrestre dans le domaine infrarouge thermique de l'Université de Strasbourg et travaille désormais en tant que maître de conférences à l'Université de Strasbourg. Elle a été directrice des études à Telecom Physique Strasbourg en 2005, fonction qu'elle a quittée en 2010. Depuis 2010, elle enseigne la gestion de projets d'ingénierie, en plus de la physique expérimentale.



FIGURE 3 – Jelila Labeled, encadrante du projet ingénieur

I.3. Groupe de Projet Ingénieur

Nous constituons un groupe d'étudiants de l'école Telecom Physique Strasbourg, et c'est à nous qu'incombe la responsabilité de concrétiser le projet du client. De gauche à droite dans la photo, vous pouvez identifier Nathan Grillet-Niess, Emilie Ferreira, Nathan Lebas, Farah Gherir et Loïs Gallaud.

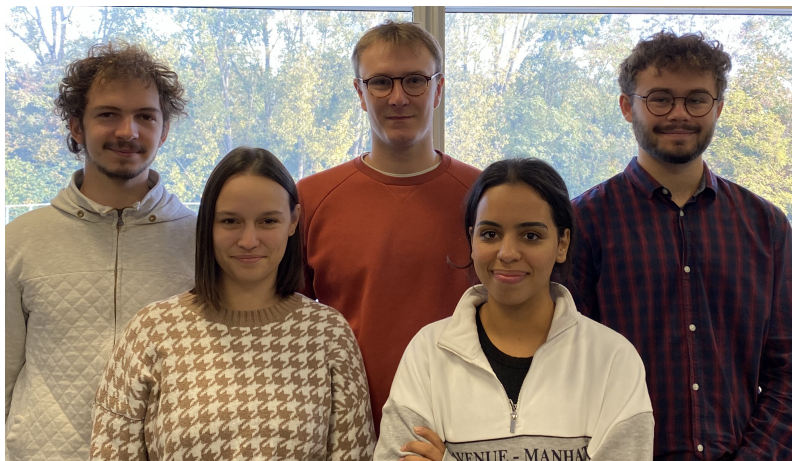


FIGURE 4 – Groupe de Projet Ingénieur n°15

Au centre de notre coordination et de notre dynamisme, Mlle.Ferreira, cheffe de projet, guide notre équipe avec vision et leadership pour assurer le succès de notre entreprise commune.

II. Contexte

Le projet est mené dans un contexte industriel, où les gestes répétitifs peuvent entraîner des conséquences graves sur la santé des utilisateurs, notamment au niveau des articulations. Les troubles musculo-squelettiques (TMS) sont particulièrement préoccupants dans ce domaine, étant la principale cause de maladie professionnelle en France. En 2018, 87% de ces maladies ont entraîné un arrêt de travail ou un dédommagement financier en raison de séquelles.

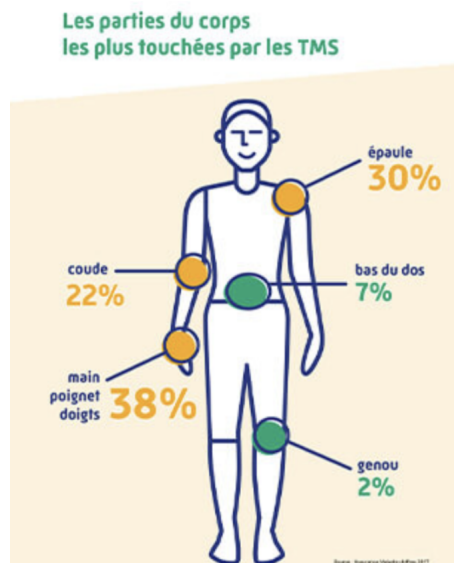


FIGURE 5 – Troubles Musculo-Squelettiques (source : Assurance Maladie 2017)

Ainsi, l'objectif est de minimiser les mouvements qualifiés de "mauvais". La solution envisagée consiste à utiliser la technologie de réalité virtuelle. Cette option est justifiée pour deux raisons principales. Tout d'abord, en ayant un suivi en temps réel avec un avatar en réalité virtuelle, il devient possible de mesurer directement la qualité d'un mouvement. Deuxièmement, la réalité virtuelle offre la possibilité de réaliser des simulations en reproduisant et en modifiant l'environnement de travail d'un utilisateur, ou en simulant de nouveaux gestes pour améliorer ses pratiques et ainsi prévenir les TMS à long terme. Pour illustrer cela, prenons un exemple : si un utilisateur doit se pencher pour déplacer des cartons quotidiennement, une simulation pourrait proposer une table sur laquelle les cartons seraient déposés, empêchant ainsi l'utilisateur de se pencher. De plus, il serait possible d'améliorer le geste effectué par l'utilisateur pour soulever les cartons.



FIGURE 6 – Illustration de la qualité d'un mouvement

Dès lors, il est crucial de définir correctement ce que l'on peut considérer comme un "bon" ou un "mauvais" mouvement. Des ergonomes ont déjà rencontré ce défi et ont élaboré une grille appelée "RULA" (Rapid Upper Limb Assessment). La grille RULA est un outil de dépistage des situations de travail susceptibles de causer des TMS. Il s'agit d'une méthode d'évaluation qui identifie les risques des postures de travail observées sur la partie supérieure du corps et les évalue à l'aide d'un score global et local. Le score global est attribué sur une échelle de 0 à 7, basé sur les angles formés par les membres les uns par rapport aux autres, un point crucial dans l'évaluation.

Actuellement, il existe des combinaisons de capteurs pour l'analyse des mouvements, cependant, ces ensembles préfabriqués présentent plusieurs inconvénients majeurs. Tout d'abord, leur coût élevé représente une barrière pour de nombreuses entreprises. De plus, ces combinaisons sont souvent contraignantes à enfiler et peuvent être peu pratiques à utiliser dans un environnement industriel. De manière critique, il est souvent difficile de connaître en détail la composition et la construction de ces systèmes commerciaux, ce qui limite la possibilité d'adapter précisément les fonctionnalités aux besoins spécifiques du projet.

En développant une solution personnalisée pour la détection de mouvement et de charge, les limitations actuelles peuvent être surmontées. Cette approche offre la possibilité de réduire les coûts tout en concevant un système modulaire adaptable aux besoins spécifiques du client et aux contraintes du milieu industriel. Elle garantit ainsi une meilleure adéquation entre les fonctionnalités du système et les exigences réelles de l'utilisateur final, tout en offrant une transparence et une maîtrise accrues

sur les composants et leur fonctionnement.

En plus des deux projets d'ingénierie précédents, menés respectivement en 2021-2022 et en 2022-2023, qui portaient sur la réalisation d'un "Système inertiel de repérage pour la réalité virtuelle" et d'un "Système inertiel pour la réalité virtuelle", le client nous propose de poursuivre ces efforts en réalisant un système de détection de mouvement et de charge pour un individu en milieu industriel.



FIGURE 7 – Logo VR-Sys&Id, projet ingénieur 2022/2023

Le fait de reprendre un ancien projet présente l'avantage d'avoir déjà une sorte de base établie. Nous pouvons nous appuyer sur les connaissances et les expériences acquises lors des projets antérieurs pour améliorer et adapter le nouveau système aux besoins spécifiques du client. Cela permet également d'accélérer le processus de développement en évitant de partir de zéro et en capitalisant sur les travaux antérieurs.

Analyse du besoin

I. Analyse du besoin

I.1. Expression du besoin

L'objectif du projet VRGOAPT est de permettre au travailleur dans un milieu industriel d'améliorer la qualité des ses gestes et l'ergonomie de son poste de travail en optimisant l'ergonomie de son environnement de travail par le biais de la réalité virtuelle.

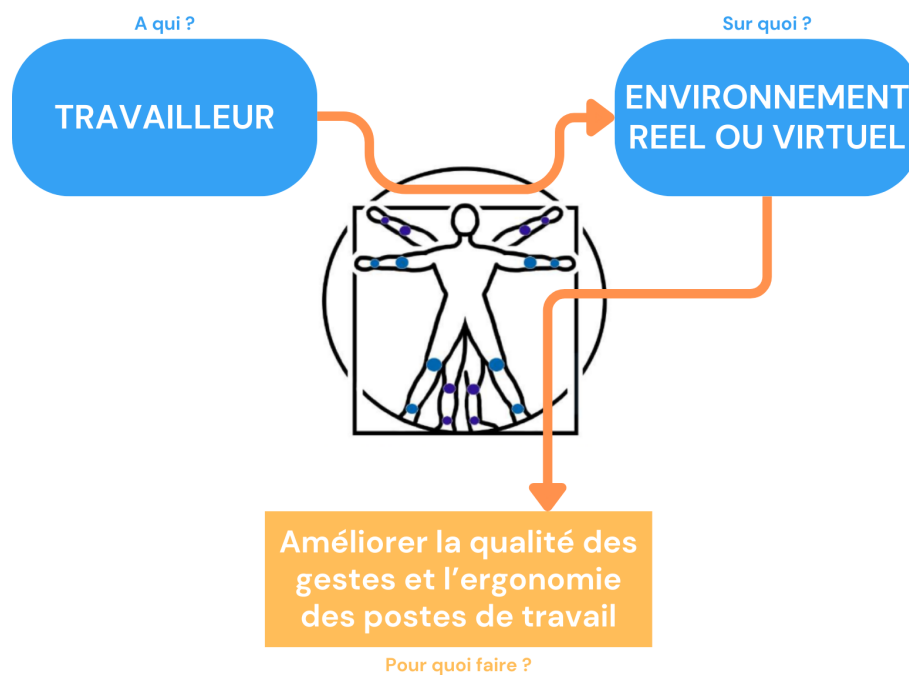


FIGURE 8 – Expression du besoin

L'expression du besoin offre une vision détaillée des exigences et des attentes des parties prenantes vis-à-vis du projet. Cette représentation graphique permet de clarifier les objectifs à atteindre, les fonctionnalités requises, ainsi que les contraintes à prendre en compte.

I.2. Diagramme SADT

Le diagramme SADT (Structured Analysis and Design Technique) propose une modélisation hiérarchique des fonctions et des interactions au sein du système étudié. Chaque boîte représente une fonction spécifique, tandis que les flèches indiquent les flux d'informations ou les relations entre ces fonctions. Cette visualisation permet de comprendre la structure et le fonctionnement global du système, facilitant ainsi son analyse et sa conception.

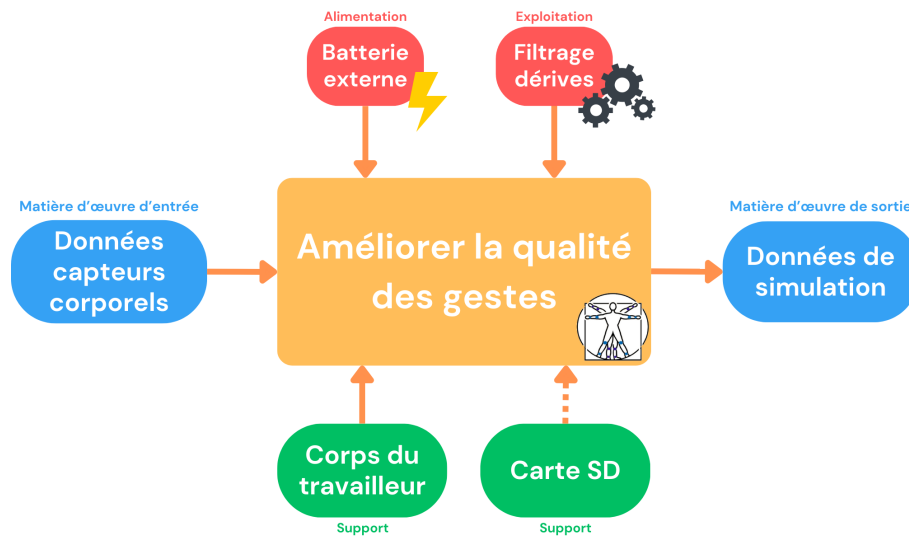


FIGURE 9 – Diagramme SADT

Nous avons déterminé les besoins du client afin d'atteindre l'objectif défini. Un Diagramme SADT a été réalisé, ce qui nous a permis de déduire la nécessité de prendre en compte certains éléments durant notre projet comme des ressources telles que la batterie externe ou le filtrage de données. Mais également certains supports nécessaires pour permettre aux données exploitées d'être pertinentes et d'être traitées.

- Pour cela nous avons distingué deux fonctions principales de notre équipement.
- Capturer les mouvements de l'utilisateur et les transmettre au système de réalité virtuelle
 - Détecter une charge portée par l'utilisateur

Fonction		Expression	Critère d'appréciation	Niveau de flexibilité
FP1 Capturer les mouvements de l'utilisateur et les transmettre au système de réalité virtuelle	FP1.1	Acquérir des données d'orientation et de position	Précision d'acquisition des données	Erreur position < 1cm Erreur orientation < 4°
	FP1.2	Transmettre sans fil des données	Portée et débit	Portée de 20m Minimum Débit : 20ko/s
FP2 Détecter une charge portée par l'utilisateur	FP2.1	Intégrer des modules de charge aux modules repérage	Les modules seront reliés par des câbles	
	FP2.2	Acquérir des données de charge	Précision d'acquisition des données	Erreur précision : 100 g

FIGURE 10 – Fonctions principales du projet

I.3. Diagramme des contraintes

Le diagramme des contraintes, représenté par la figure ci-dessous, offre une vue synthétique des différentes contraintes auxquelles le projet est soumis. Chaque branche de la pieuvre symbolise une contrainte spécifique, que ce soit en termes de budget, de délais, de ressources humaines, ou encore de spécifications techniques. Cette visualisation permet une compréhension rapide des principaux enjeux et limites du projet.

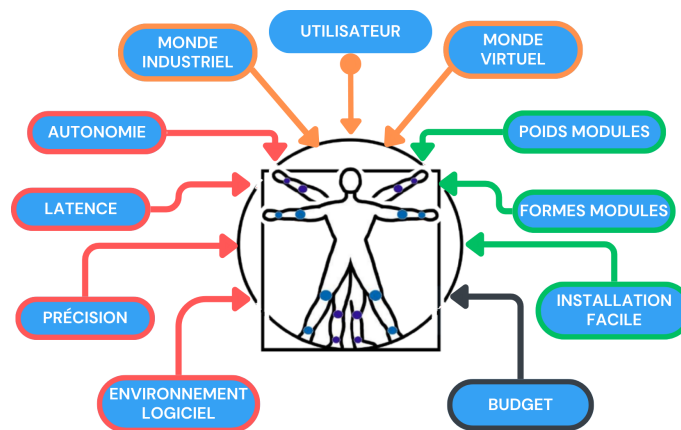


FIGURE 11 – Diagramme des contraintes

Voici ci-contre la liste des fonctions contraintes établies dans le cadre de notre projet.

FC1	Assurer l'autonomie du système	Gestion de l'alimentation grâce à une batterie externe et surveillance de l'autonomie par des voyants lumineux	5h minimum
FC2	Récupération des données	-Carte SD - Sans fil (wifi) -Fréquence d'acquisition compatible avec un usage en réalité virtuelle	Fréquence > 60 mesures par seconde
FC3	Sensibilité du système aux champs électromagnétiques	Peu sensible aux champs magnétiques	Zéro influence sur l'orientation du Nord lors de la calibration statique
FC4	Assurer la compatibilité avec les applications de réalité virtuelle	Données au format JSON	Aucune perte de données
FC5	Ne pas gêner l'utilisateur dans ses mouvements	Répartition du poids des modules	Taille maximale des capteurs : 5x3x1 cm
FC6	Assurer une compatibilité avec les équipements de travail	Modules indépendants les uns des autres	
FC8	Étanchéité des modules	Résistant aux produits de nettoyage et aux projections d'eau	Indice de protection IP44
FC9	Installation simple de l'équipement	Les capteurs se relient entre-eux avec des câbles	Temps d'installation < 15min
FC10	Acquérir les données de répartition du poids de l'utilisateur	Deux capteurs de charge sous chaque pied	Précision : 100g

FIGURE 12 – Liste des contraintes

I.4. Solution VRGOAPT

La solution proposée par le projet VRGOAPT vise à répondre efficacement aux besoins identifiés par les parties prenantes. En se basant sur une analyse approfondie du besoin, le projet s'engage à améliorer la qualité des gestes et l'ergonomie des postes de travail dans les milieux industriels en utilisant la réalité virtuelle comme outil d'optimisation.

Pour cela, plusieurs modules ont été développés pour constituer un système complet et fonctionnel. Le module inertiel détecte les mouvements de l'utilisateur dans l'espace tridimensionnel, tandis que le module de charge mesure en temps réel le poids de la charge portée, permettant ainsi de prévenir les risques de troubles musculo-squelettiques.

Le module de contrôle joue un rôle central dans l'orchestration de la collecte, du traitement et de la transmission des données. En intégrant les données des modules inertiel et de charge, il permet une analyse complète des mouvements de l'utilisateur. Les données collectées sont ensuite transmises de manière efficace vers un routeur

ou un serveur dédié, assurant ainsi une visualisation en temps réel des informations pertinentes.

Chaque composant a été soigneusement sélectionné pour sa performance et sa fiabilité, et intégré dans des coques spécialement conçues pour garantir un fonctionnement optimal du système dans des conditions industrielles exigeantes.

Ensemble, ces modules offrent une solution complète et innovante pour améliorer la qualité de vie au travail et prévenir les risques professionnels dans les environnements industriels. Grâce à VRGOAPT, les travailleurs bénéficient d'un outil puissant pour optimiser leurs gestes et leur environnement de travail, contribuant ainsi à une meilleure santé et productivité au sein des entreprises.

Logiciels utilisés

I. Arduino

Arduino est une plateforme open-source de prototypage électronique qui associe matériel et logiciel pour créer des projets électroniques.

Elle repose sur des microcontrôleurs programmables et un environnement de développement intégré (IDE), utilisant une version simplifiée du langage C/C++. Il est constitué de trois éléments fondamentaux qui sont essentiels pour notre projet : un microcontrôleur chargé d'exécuter les instructions données, un port USB permettant le téléversement du code, et des connecteurs d'entrée/sortie facilitant la connexion des composants externes aux internes.

II. Solidworks

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) qui offre un ensemble complet d'outils pour la modélisation 3D et la conception de produits. Il se compose de trois éléments fondamentaux : un environnement de modélisation intuitif pour créer des pièces et des assemblages, des fonctionnalités avancées pour la simulation et l'analyse, ainsi que des bibliothèques de composants standard pour faciliter le processus de conception. Que ce soit pour la création de prototypes virtuels, l'optimisation de la fabrication ou la visualisation réaliste des produits, SolidWorks est un outil indispensable pour les ingénieurs et les concepteurs à travers le monde.

Ce logiciel permet non seulement de modéliser des pièces et des assemblages, mais aussi de les assembler de manière précise. Dans notre cas, nous avons utilisé SolidWorks pour concevoir divers boîtiers intégrant nos capteurs et composants électroniques, assurant ainsi une intégration optimale. De plus, SolidWorks offre un accès à une variété de ressources en ligne, telles que des notices et des tutoriels, qui facilitent l'apprentissage et l'utilisation du logiciel pour nos besoins spécifiques.

III. EasyEDA

EasyEDA est une plateforme en ligne de conception de circuits imprimés (PCB) qui simplifie le processus de création de circuits électroniques. Elle guide les utilisateurs à travers différentes étapes pour transformer leurs idées en réalité fonctionnelle.

La première étape consiste à créer le schéma électrique du circuit. L'interface permet de placer les composants nécessaires et de les connecter entre eux. EasyEDA propose une vaste bibliothèque de composants pour faciliter cette étape. Une fois le schéma électrique terminé et vérifié, on passe à la conception du PCB. Dans cette étape, les composants sont disposés sur une plaque de circuit vierge, en prenant en compte leur disposition physique et leurs connexions électriques. EasyEDA offre des outils intuitifs pour faciliter ce processus. Ensuite, vient l'étape de routage, où les pistes de connexion entre les différents composants sur le PCB sont tracées.

EasyEDA dispose d'outils automatiques de routage, mais il est également possible d'ajuster manuellement les pistes selon les besoins. Enfin, une fois que le routage est terminé et que la conception est satisfaisante, les fichiers Gerber sont générés. Ces fichiers contiennent toutes les informations nécessaires pour fabriquer le PCB, y compris les couches de cuivre, les pistes, les trous, etc.

Choix Techniques

I. Solution VRGOAPT

La solution proposée par le projet VRGOAPT vise à répondre efficacement aux besoins identifiés par les parties prenantes. En se basant sur une analyse approfondie du besoin, le projet s'engage à améliorer la qualité des gestes et l'ergonomie des postes de travail dans les milieux industriels en utilisant la réalité virtuelle comme outil d'optimisation.

Pour cela, plusieurs modules ont été développés pour constituer un système complet et fonctionnel. Le module inertiel détecte les mouvements de l'utilisateur dans l'espace tridimensionnel, tandis que le module de charge mesure en temps réel le poids de la charge portée, permettant ainsi de prévenir les risques de troubles musculo-squelettiques.

Le module de contrôle joue un rôle central dans l'orchestration de la collecte, du traitement et de la transmission des données. En intégrant les données des modules inertiel et de charge, il permet une analyse complète des mouvements de l'utilisateur. Les données collectées sont ensuite transmises de manière efficace vers un routeur ou un serveur dédié, assurant ainsi une visualisation en temps réel des informations pertinentes.

Chaque composant a été soigneusement sélectionné pour sa performance et sa fiabilité, et intégré dans des coques spécialement conçues pour garantir un fonctionnement optimal du système dans des conditions industrielles exigeantes.

Ensemble, ces modules offrent une solution complète et innovante pour améliorer la qualité de vie au travail et prévenir les risques professionnels dans les environnements industriels. Grâce à VRGOAPT, les travailleurs bénéficient d'un outil puissant pour optimiser leurs gestes et leur environnement de travail, contribuant ainsi à une meilleure santé et productivité au sein des entreprises.

II. Module inertiel

Le capteur inertiel détecte les mouvements de l'utilisateur dans l'espace tridimensionnel. Leurs connectiques permettent de les relier entre eux par des câbles Tiny XLR, assurant ainsi une communication fiable entre les composants du système. Cette connectivité garantit une transmission précise des données de mouvement, permettant une surveillance optimisée des opérations industrielles.



(a) Avant-bras & main



(b) Connectiques du module inertiel

FIGURE 13 – Photos du module inertiel



(a) Vue Avant



(b) Vue Arrière

FIGURE 14 – Corps équipé par le système VRGOAPT

II.1. Composants

Capteur inertiel : Ce modèle de capteur a été sélectionné en raison de son utilisation de données en mode I2C, parfaitement adapté à nos besoins. Il se distingue par sa précision, sa rapidité de transmission de données et sa composition comprenant trois accéléromètres, trois gyroscopes et trois magnétomètres.

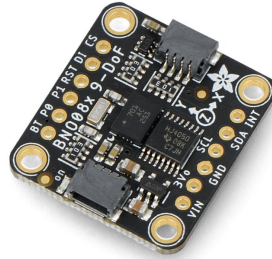


FIGURE 15 – Capteur inertiel BNO

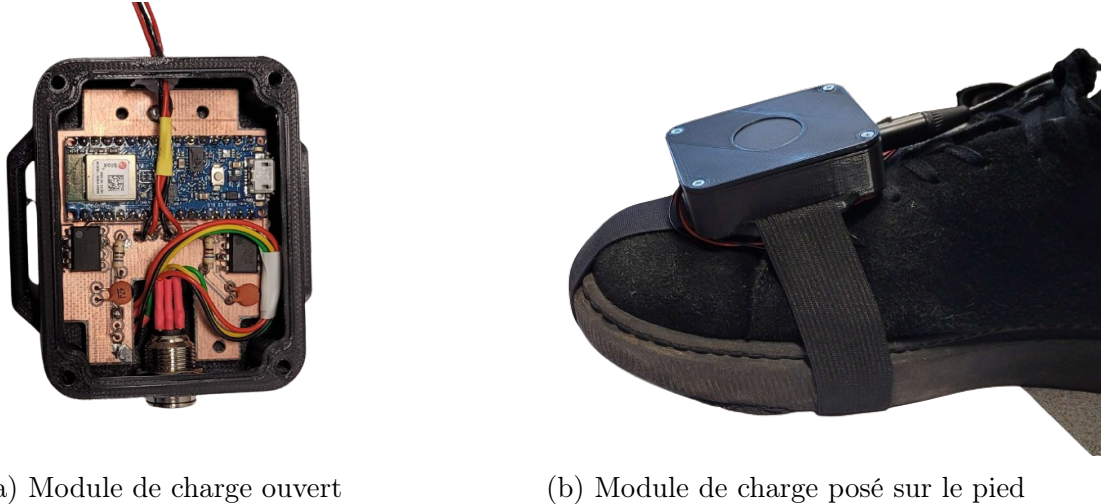
Connectiques mâles/femelles (Tiny XLR) : Les connecteurs mâles et femelles Tiny XLR ont été choisis en raison de leur petite taille et de leurs quatre broches, ce qui les rend idéaux pour la réception ou l'envoi des données des différents capteurs.

Câbles : Les câbles choisis sont de qualité et durables, assurant une transmission fiable des données entre les différents composants du système.

Coque imprimée 3D : Un boîtier imprimé en 3D a été conçu pour accueillir les deux connecteurs permettant d'envoyer et de recevoir les données des capteurs mis en série, ainsi que le capteur lui-même.

Module et coque : La coque du module de contrôle a été créée avec SolidWorks, offrant une flexibilité de conception. Les premières versions, imprimées en PLA Pro, ont permis d'identifier les problèmes du système. Cependant, après avoir constaté que le PLA Pro satisfait nos besoins, la version finale a été réalisée avec ce matériau, assurant un module fonctionnel de qualité.

III. Module de charge



(a) Module de charge ouvert

(b) Module de charge posé sur le pied

FIGURE 16 – Photos du module de charge

Le projet implique également la mesure en temps réel du poids de la charge portée par un individu. En effet, la manipulation d'objets lourds peut exercer des contraintes supplémentaires sur les articulations, augmentant ainsi le risque de développer des troubles musculo-squelettiques (TMS), que nous cherchons à prévenir.

Deux défis se distinguent rapidement. Le premier concerne les aspects techniques. Il est crucial que les capteurs utilisés puissent mesurer une charge totale (utilisateur + charge portée) d'environ 150 kilos avec une grande précision. De plus, ces capteurs doivent être précis afin de traiter les données et de fournir des interprétations fiables et cohérentes par la suite. Il est également essentiel de transmettre les données au module de contrôle pour qu'elles puissent être envoyées à un routeur. Ainsi, le choix des capteurs et du module d'envoi des données est primordial.

Le deuxième défi concerne la praticité. Nous devons concevoir un système qui puisse être rapidement installé dans des conditions réelles, notamment en milieu industriel. Cela implique de concevoir un système adaptable à un large éventail d'individus ayant des pointures différentes. Le système doit être maniable tout en étant résistant à diverses manipulations et à des éléments tels que les projections d'eau. Cette partie étant un projet de conception à part entière, elle a été confiée à une équipe spécialisée en prototypage de produits et d'outillage (PPO) de la licence professionnelle métiers de l'industrie : conception et processus de mise en forme des matériaux. Une collaboration étroite est entretenue avec cette équipe à travers des échanges fréquents. Leur objectif est de mettre en œuvre une solution technique répondant aux exigences identifiées précédemment.

III.1. Choix capteur de charge

La priorité identifiée était le choix d'un capteur approprié. Toutes les autres étapes du projet ont été basées sur cette décision. Nous avons donc effectué une analyse des capteurs disponibles sur le marché, suivi d'un tableau comparatif de leurs caractéristiques pour identifier celui répondant le mieux à nos besoins. Notre choix s'est porté sur le capteur Flexiforce A301 en raison de sa capacité de 4500 N, suffisante pour détecter les poids dans la plage spécifiée. De plus, sa petite taille (25,4 mm x 14 mm) offre une grande maniabilité et une facilité d'utilisation.

Après réception des capteurs, il était essentiel de les caractériser pour assurer leur bon fonctionnement. Nous avons donc conçu un banc de test qui a confirmé leur fiabilité. En parallèle, nous avons créé un module en impression 3D, incluant un montage électrique inverseur pour une lecture précise des données, ainsi qu'un Arduino Nano dédié à la transmission des données vers le module de contrôle. Le choix de l'Arduino Nano était évident, car il intègre un accéléromètre, répondant ainsi aux exigences initiales du cahier des charges qui spécifiait la présence d'un accéléromètre sur chaque pied.

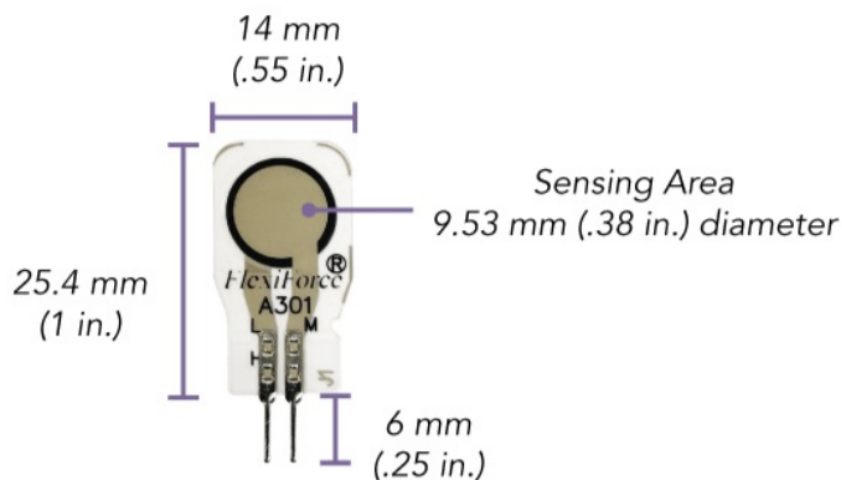


FIGURE 17 – Capteur de pression FlexiForce A301

Nous avons intégré ces modules de manière optimale avec le reste de l'équipement, en assurant une gestion efficace de la réception et de l'envoi des données, tout en fixant une attache pour une installation confortable du module. À présent, l'équipe de la licence PPO prend en charge l'intégration des capteurs dans des chaussures de sécurité adaptables.

III.2. Intégration dans une chaussure

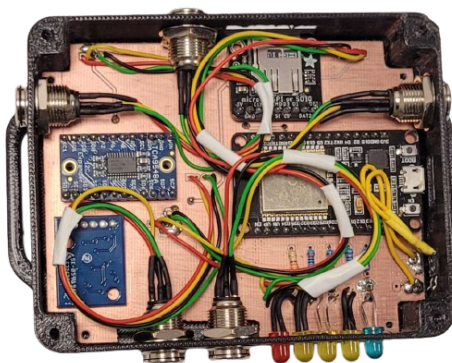


FIGURE 18 – Prototype de l'intégration du module de charge

À ce jour, l'équipe de PPO n'a pas encore progressé au-delà de la phase de réflexion. Il est important de noter que cette partie du projet n'est plus sous notre responsabilité, conformément à l'accord convenu avec le client.

IV. Module de contrôle

Au cœur du projet, le module de contrôle constitue le pivot qui orchestre la collecte, le traitement et la transmission des données cinématiques du corps de l'utilisateur.



(a) Module de contrôle ouvert



(b) Module de contrôle fermé

FIGURE 19 – Photos du module de contrôle

Lorsque le système enregistre les données, le module central récupère les données de chaque module inertiel et des modules de charge, compacte les données dans un

format peu coûteux en espace pour faciliter les transmissions sans-fil et le temps d'écriture dans la carte SD. Une fois les données compactées, elle sont envoyées sans-fil vers un routeur ou bien un serveur dédié (l'utilisateur du système peut configurer son utilisation). Les données sont ensuite écrites dans la carte SD avant de recommencer le cycle. Le temps que prend la récupération, l'envoi et l'écriture des données permet une visualisation avec un taux de rafraîchissement qui respecte les conditions du cahier des charges.

IV.1. Composants

Microcontrôleur :

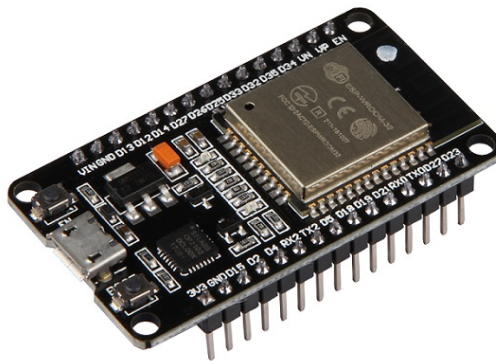


FIGURE 20 – Photo d'un microcontrôleur ESP32

Un microcontrôleur est un dispositif électronique qui combine un microprocesseur, de la mémoire et des interfaces de communication sur une seule puce. Sa conception compacte en fait un choix privilégié pour de nombreuses applications électroniques. L'ESP32, choisi pour notre application, se distingue par sa capacité à échanger des données via WiFi.

LED + Résistance : Les LEDs accompagnées de résistances sont utilisées pour visualiser l'état du code dans les projets électroniques. Les résistances limitent le courant traversant les LEDs, les protégeant ainsi, tandis que les LEDs programmées indiquent différents états du code, facilitant ainsi la compréhension de l'utilisateur.

Bouton poussoir : Le bouton poussoir est un composant clé qui permet de démarrer, réinitialiser ou arrêter le code en fonction de son état.

Multiplexeur : Le multiplexeur assure le tri et l'organisation des données provenant de divers capteurs avant de les transmettre de manière méthodique au microcontrôleur. Il permet de gérer efficacement les flux de données en provenance de plusieurs sources, augmentant ainsi le nombre de connexions I2C disponibles.

Carte SD : La carte SD permet la sauvegarde des données des simulations effectuées avec le système, sous un format normalisé convenu avec le client pour

faciliter le traitement ultérieur des données.

Routeur : Un routeur dirige le trafic de données entre les différents appareils connectés à un réseau, permettant la visualisation en direct des mouvements capturés par le système sur le logiciel de visualisation du client.

Coque imprimée 3D : Un boîtier imprimé en 3D a été conçu pour recevoir l'ESP-32, le multiplexeur, la carte SD, les LEDs, le bouton poussoir ainsi qu'un capteur inertiel et les connectiques nécessaires.

IV.2. Récupération et transfert des données

Pour obtenir les mouvements du corps de l'utilisateur, des dispositifs appelés centrales inertielles sont utilisés. Ces dispositifs mesurent des paramètres tels que l'accélération linéaire et la vitesse angulaire, et sont capables de détecter le champ magnétique. Les données recueillies sont ensuite traitées par une unité appelée IMU, qui calcule les angles de rotation du corps dans l'espace. Toutes ces informations sont envoyées au microcontrôleur via un protocole de communication appelé I2C, utilisant les canaux SDA et SCL pour la transmission des données.

IV.3. Modules et coques

La coque du module de contrôle a été créée à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur appelé SolidWorks. Ce logiciel permet une conception et une modification rapides des formes et des dimensions. Les premiers modèles ont été imprimés en PLA Pro, mais la version finale a été fabriquée en HIPS pour garantir un module de contrôle fonctionnel et de qualité.

Hardware

I. Module Inertiel

I.1. Electronique

L'électronique du module inertiel est relativement simple, conçue dans le but de permettre la connexion aisée d'un capteur inertiel CMPS14 aux connecteurs des boîtiers. Cette carte électronique est dotée de deux connecteurs femelles destinés à accueillir le capteur. La ligne H1 est constituée de 6 trous de 1,1 mm espacés de 2,54 mm, prévus pour le bus I2C, incluant les lignes SDA (Serial Data) et SCL (Serial Clock), ainsi que les connexions d'alimentation (3,3V et GND).

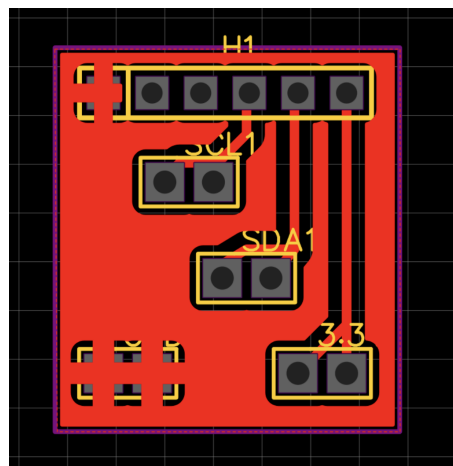


FIGURE 21 – Schéma électrique EasyEda du PCB du Module Inertiel

Le CMPS14 est une centrale inertielle complète, intégrant un accéléromètre 3 axes, un gyroscope 3 axes et un magnétomètre 3 axes.

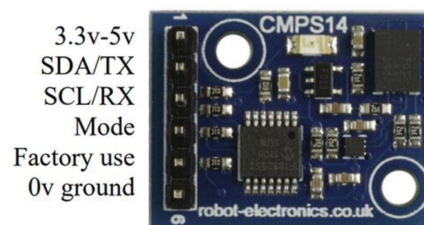


FIGURE 22 – Photo d'un capteur CMPS, centrale inertielle

Il offre également une fusion des données ainsi que la possibilité d'extraire les données désirées, comme le souligne la note ci-dessous.

Register	Function
0x00	Command register (write) / Software version (read)
0x01	Compass Bearing 8 bit, i.e. 0-255 for a full circle
0x02, 0x03	Compass Bearing 16 bit, i.e. 0-3599, representing 0-359.9 degrees. register 2 being the high byte. This is calculated by the processor from quaternion outputs of the BNO080
0x04	Pitch angle - signed byte giving angle in degrees from the horizontal plane (+/- 90°)
0x05	Roll angle - signed byte giving angle in degrees from the horizontal plane (+/- 90°)
0x06, 0x07	Magnetometer X axis (uTesla), 16 bit signed integer (register 0x06 high byte) Q point 4
0x08, 0x09	Magnetometer Y axis (uTesla), 16 bit signed integer (register 0x08 high byte) Q point 4
0x0A, 0x0B	Magnetometer Z axis (uTesla), 16 bit signed integer (register 0x0A high byte) Q point 4
0x0C, 0x0D	Linear acceleration Axis X, 16 bit signed integer (register 0x0C high byte) Q point 8
0x0E, 0x0F	Linear acceleration Axis Y, 16 bit signed integer (register 0x0E high byte) Q point 8
0x10, 0x11	Linear acceleration Axis Z, 16 bit signed integer (register 0x10 high byte) Q point 8
0x12, 0x13	Gyroscope raw X axis output, 16 bit signed integer (register 0x12 high byte)
0x14, 0x15	Gyroscope raw Y axis output, 16 bit signed integer (register 0x14 high byte)
0x16, 0x17	Gyroscope raw Z axis output, 16 bit signed integer (register 0x16 high byte)
0x1C, 0x1D	Roll angle 16 bit - signed byte giving angle in tenths of degrees from the horizontal plane (+/- 180°, 0x1C is the high byte)
0x1E	Calibration state, bits 0 and 1 reflect the calibration status (0 un-calibrated, 3 fully calibrated)
Software V5+ commands below	
0x1A, 0x1B	Pitch angle 16 bit - signed byte giving angle in tenths of degrees from the horizontal plane (+/- 90°, 0x1A is the high byte)
0x1F, 0x20	Accelerometer X axis output, 16 bit signed integer (register 0x1F high byte) Q point 8
0x21, 0x22	Accelerometer Y axis output, 16 bit signed integer (register 0x21 high byte) Q point 8
0x23, 0x24	Accelerometer Z axis output, 16 bit signed integer (register 0x23 high byte) Q point 8
0x25, 0x26	Gyroscope calibrated X axis output, 16 bit signed integer (register 0x25 high byte) Q point 9
0x27, 0x28	Gyroscope calibrated Y axis output, 16 bit signed integer (register 0x27 high byte) Q point 9
0x29, 0x2A	Gyroscope calibrated Z axis output, 16 bit signed integer (register 0x29 high byte) Q point 9

FIGURE 23 – Contenu des registres du CMPS14, documentation CMPS14

Ce capteur peut fonctionner de deux manières différentes : en mode I2C et en mode série (RX/TX). Cependant, le tableau ci-dessus se concentre uniquement sur le mode I2C, conforme à l'utilisation prévue dans notre projet.

Description des broches : - Broche 1 : Alimentation, le capteur fonctionne dans une plage de tension de 3,3V à 5,0V. - Broche 2 : TX (Série) / SDA (I2C) ; émission des données / données série envoyées sur le bus I2C, synchronisées par SCL. - Broche 3 : RX (Série) / SCL (I2C) ; réception des données / synchronisation des données du port de données (SDA). - Broche 4 : Mode : Broche à vide (0V) = I2C, Broche à +Vcc (Alimentation) = Série. - Broche 5 : Mode Usine : Si reliée à +Vcc, permet de réinitialiser les paramètres d'usine du capteur. - Broche 6 : GND : Masse à connecter à 5V.

En outre, le capteur a été sélectionné pour son éventail d'adresses disponibles sur le bus I2C. En effet, il est possible de choisir parmi 8 adresses différentes (0xC0,

0xC2,...,0xCE).

Address		flashes
Decimal	Hex	
192	C0	1
194	C2	2
196	C4	3
198	C6	4
200	C8	5
202	CA	6
204	CC	7
206	CE	8

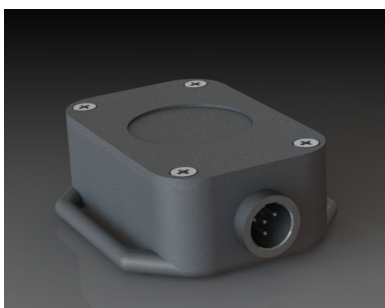
FIGURE 24 – Adresses disponibles du CMPS 14, documentation CMPS14

La procédure de récupération des données et de modification d'adresse est détaillée dans le manuel correspondant.

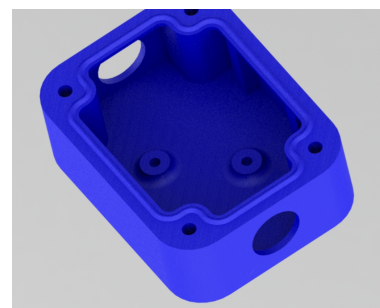
I.2. Impression 3D des modules

L'impression est effectuée sur une imprimante 3D avec une durée de 3 heures et 30 minutes par boîtier de module inertiel. Le modèle 3D est créé sur SolidWorks puis converti au format Gerber via Zortrax Slicer. Le choix du PLA est motivé par sa qualité de rendu et son caractère recyclable, s'inscrivant dans une démarche éco-responsable.

Voici ci-dessous des modèles 3D du Modules Inertiel ainsi qu'un schéma de conception.



(a)



(b)

FIGURE 25 – Capture d'écran des modèles 3D sur SolidWorks lors de la conception

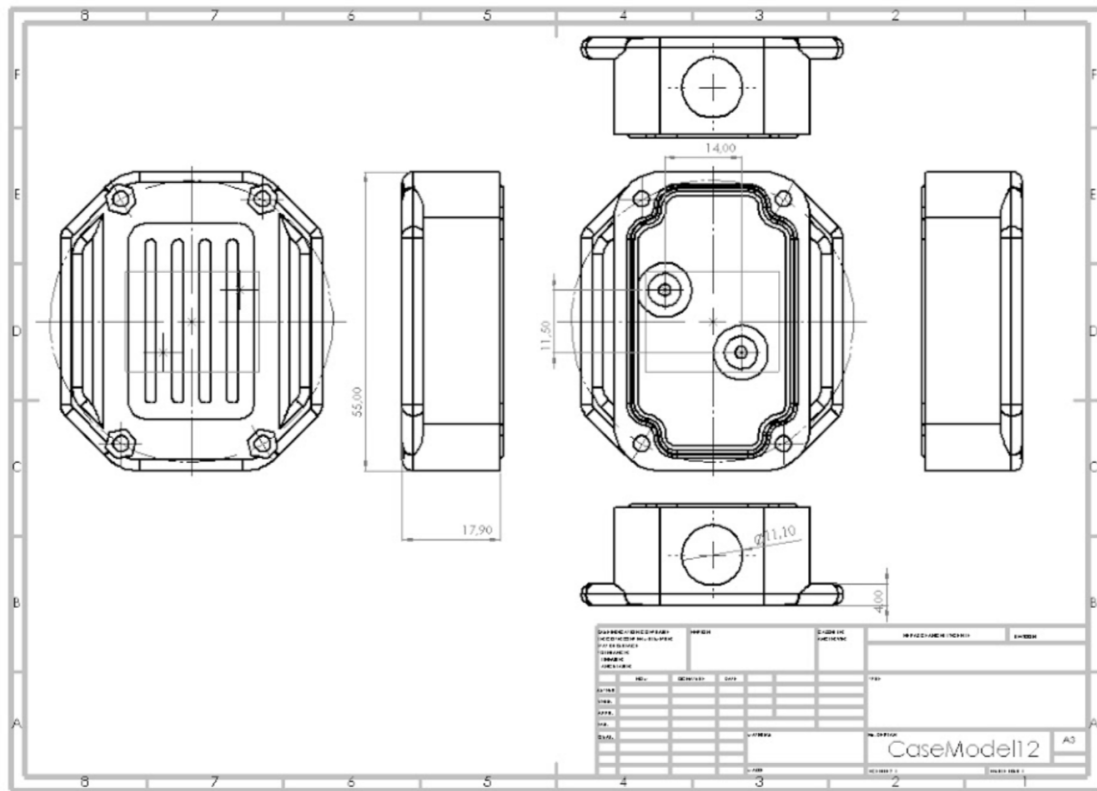


FIGURE 26 – Schéma de conception du Module Inertiel

II. Module de Contrôle

II.1. Electronique

Notre montage de module de contrôle a été conçu avec plusieurs composants clés pour répondre aux besoins spécifiques définis sur le PCB (circuit imprimé) ci dessous :

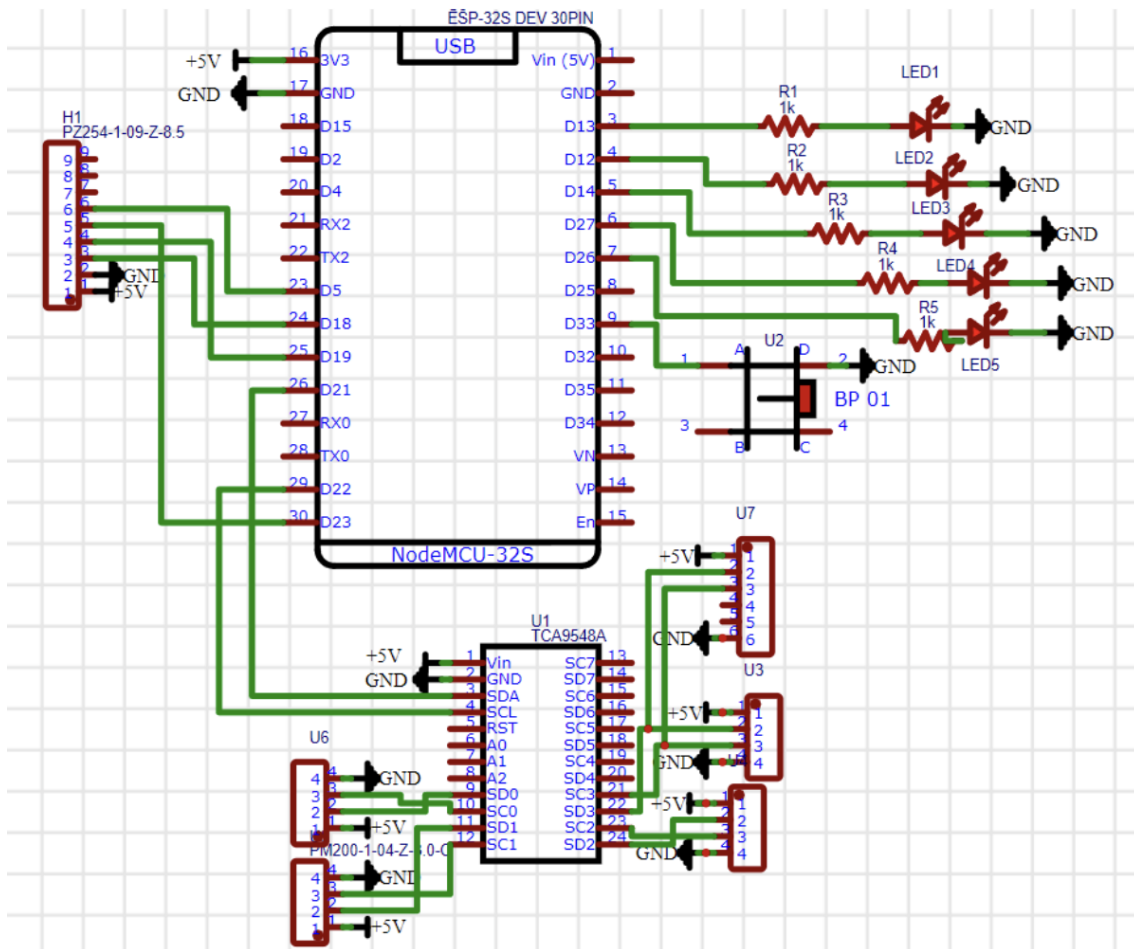
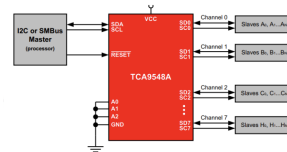


FIGURE 27 – Schéma électrique de la plaque électronique du Module de Contrôle

Nous avons intégré un ESP32, un microcontrôleur réputé pour sa puissance et sa polyvalence, doté de 30 broches d'entrée/sortie. Dans notre conception, nous exploitons seulement 14 de ces broches : celles du côté droit sont connectées aux résistances (330Ω) qui contrôlent les LEDs et le bouton, tandis que celles du côté gauche sont reliées au multiplexeur et au module SD. L'ESP32 se distingue par sa rapidité et sa facilité d'utilisation, ce qui en fait un choix idéal pour notre projet. Les instructions sont envoyées à l'ESP32 par Arduino, permettant ainsi de coordonner efficacement les différentes opérations de notre système.



(a) Photo d'un bus I2C utilisé dans le Module de Contrôle



(b) Schéma bus I2C

FIGURE 28 – Bus I2C

L'interface WiFi offre la possibilité de créer un point d'accès sans fil, d'héberger un serveur et de se connecter à Internet pour partager des données. Programmable directement depuis l'IDE Arduino (avec une extension nécessaire), il offre une flexibilité d'utilisation et une intégration aisée dans divers projets.

Ensuite, nous avons ajouté un multiplexeur TCA9548A à notre montage. Ce multiplexeur joue un rôle important en triant et en transmettant les données provenant des connectiques et du capteur situé dans la boîte. Grâce à ses capacités de commutation, le multiplexeur dirige les données vers l'ESP32 de manière sélective en utilisant l'I2C, assurant ainsi un traitement efficace et une utilisation optimale des ressources.

II.2. Impression 3D du Module de Contrôle

Le développement du module de contrôle a été guidé par plusieurs contraintes spécifiques. Il devait impérativement intégrer cinq connectiques femelles, le multiplexeur, l'ESP32, la carte SD, ainsi qu'un capteur inertiel, un bouton et des leds visibles sur le côté de la boîte. Malgré ces exigences, nous avons réussi à concevoir trois versions distinctes du module pour ne retenir que celle qui optimise le plus de place. Cependant, en raison d'un problème technique lors de l'impression warping, nous avons été contraints de produire six exemplaires au lieu de trois.

Pour remédier au problème de wrapping de la machine lors de l'impression des modules de contrôle, du PETG a été utilisé à la place du PLA. Le PETG est connu pour offrir une meilleure adhérence au lit d'impression, réduisant ainsi les risques de déformation.

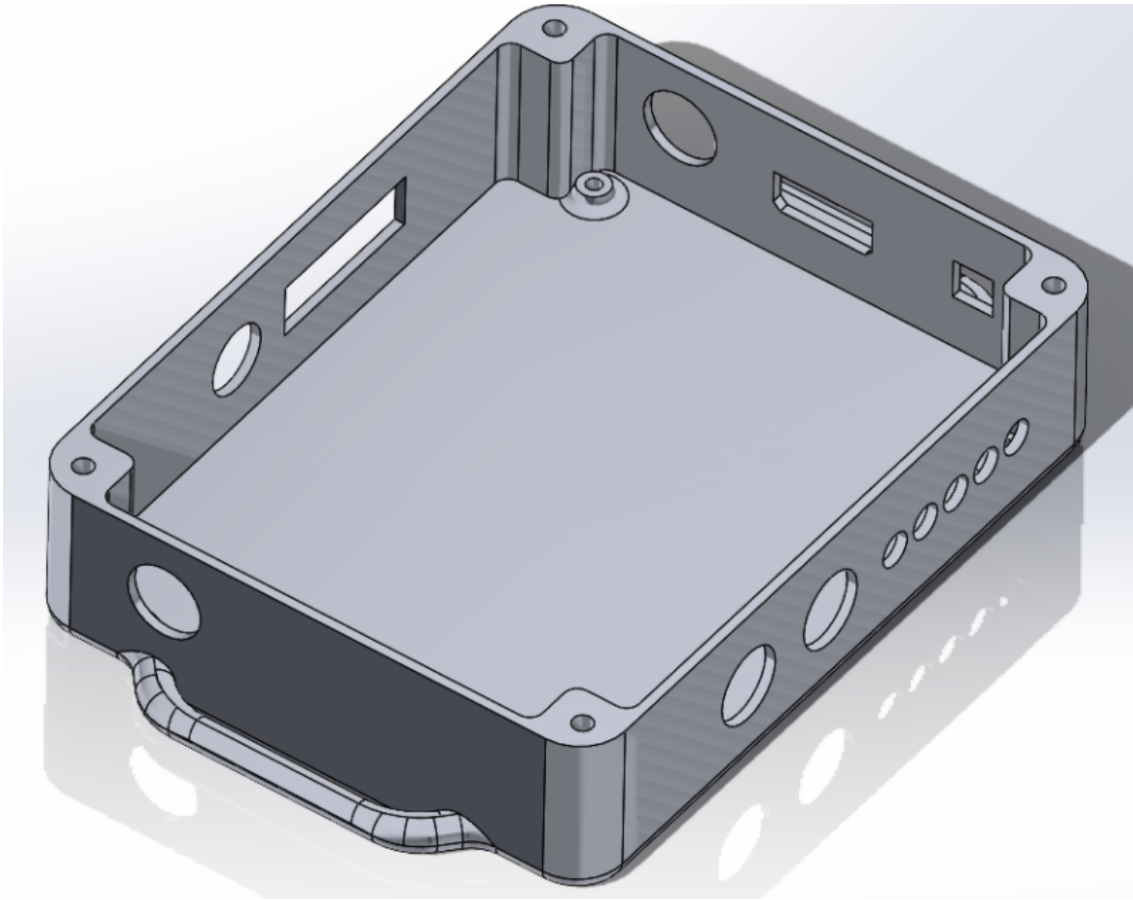


FIGURE 29 – Schéma de conception du Module Inertiel

La conception des modules a été effectuée à l'aide du logiciel SolidWorks. Des instructions détaillées sur l'assemblage et l'utilisation des modules sont disponibles en ligne, facilitant ainsi leur utilisation par les utilisateurs finaux.

III. Module de Charge

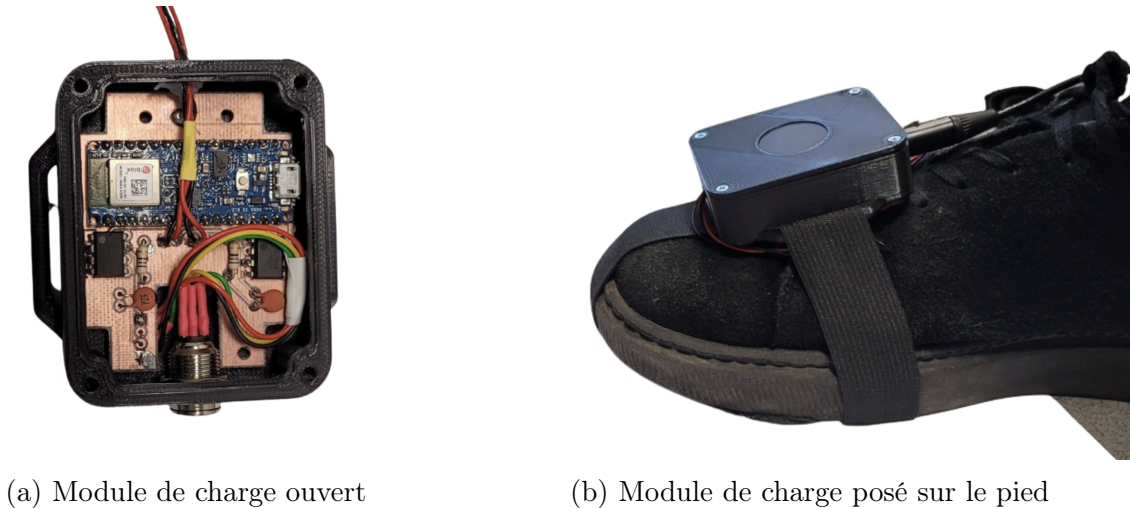


FIGURE 30 – Photos du module de charge

Le projet implique également la mesure en temps réel du poids de la charge portée par un individu. En effet, la manipulation d'objets lourds peut exercer des contraintes supplémentaires sur les articulations, augmentant ainsi le risque de développer des troubles musculo-squelettiques (TMS), que nous cherchons à prévenir.

Deux défis se distinguent rapidement. Le premier concerne les aspects techniques. Il est crucial que les capteurs utilisés puissent mesurer une charge totale (utilisateur + charge portée) d'environ 150 kilos avec une grande précision. De plus, ces capteurs doivent être précis afin de traiter les données et de fournir des interprétations fiables et cohérentes par la suite. Il est également essentiel de transmettre les données au module de contrôle pour qu'elles puissent être envoyées à un routeur. Ainsi, le choix des capteurs et du module d'envoi des données est primordial.

Le deuxième défi concerne la praticité. Nous devons concevoir un système qui puisse être rapidement installé dans des conditions réelles, notamment en milieu industriel. Cela implique de concevoir un système adaptable à un large éventail d'individus ayant des pointures différentes. Le système doit être maniable tout en étant résistant à diverses manipulations et à des éléments tels que les projections d'eau. Cette partie étant un projet de conception à part entière, elle a été confiée à une équipe spécialisée en prototypage de produits et d'outillage (PPO) de la licence professionnelle métiers de l'industrie : conception et processus de mise en forme des matériaux. Une collaboration étroite est entretenue avec cette équipe à travers des échanges fréquents. Leur objectif est de mettre en œuvre une solution technique répondant aux exigences identifiées précédemment.

III.1. Choix capteur de charge

La priorité identifiée était le choix d'un capteur approprié. Toutes les autres étapes du projet ont été basées sur cette décision. Nous avons donc effectué une analyse des capteurs disponibles sur le marché, suivi d'un tableau comparatif de leurs caractéristiques pour identifier celui répondant le mieux à nos besoins. Notre choix s'est porté sur le capteur Flexiforce A301 en raison de sa capacité de 4500 N, suffisante pour détecter les poids dans la plage spécifiée. De plus, sa petite taille (25,4 mm x 14 mm) offre une grande maniabilité et une facilité d'utilisation.

Après réception des capteurs, il était essentiel de les caractériser pour assurer leur bon fonctionnement. Nous avons donc conçu un banc de test qui a confirmé leur fiabilité. En parallèle, nous avons créé un module en impression 3D, incluant un montage électrique inverseur pour une lecture précise des données, ainsi qu'un Arduino Nano dédié à la transmission des données vers le module de contrôle. Le choix de l'Arduino Nano était évident, car il intègre un accéléromètre, répondant ainsi aux exigences initiales du cahier des charges qui spécifiait la présence d'un accéléromètre sur chaque pied.

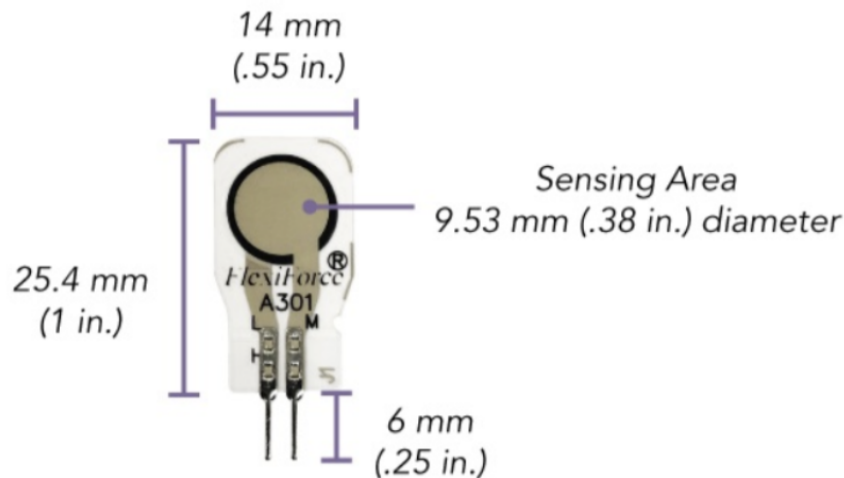


FIGURE 31 – Capteur de pression FlexiForce A301

Nous avons intégré ces modules de manière optimale avec le reste de l'équipement, en assurant une gestion efficace de la réception et de l'envoi des données, tout en fixant une attache pour une installation confortable du module. À présent, l'équipe de la licence PPO prend en charge l'intégration des capteurs dans des chaussures de sécurité adaptables.

Le FlexiForce A301 fonctionne avec le montage électrique suivant.

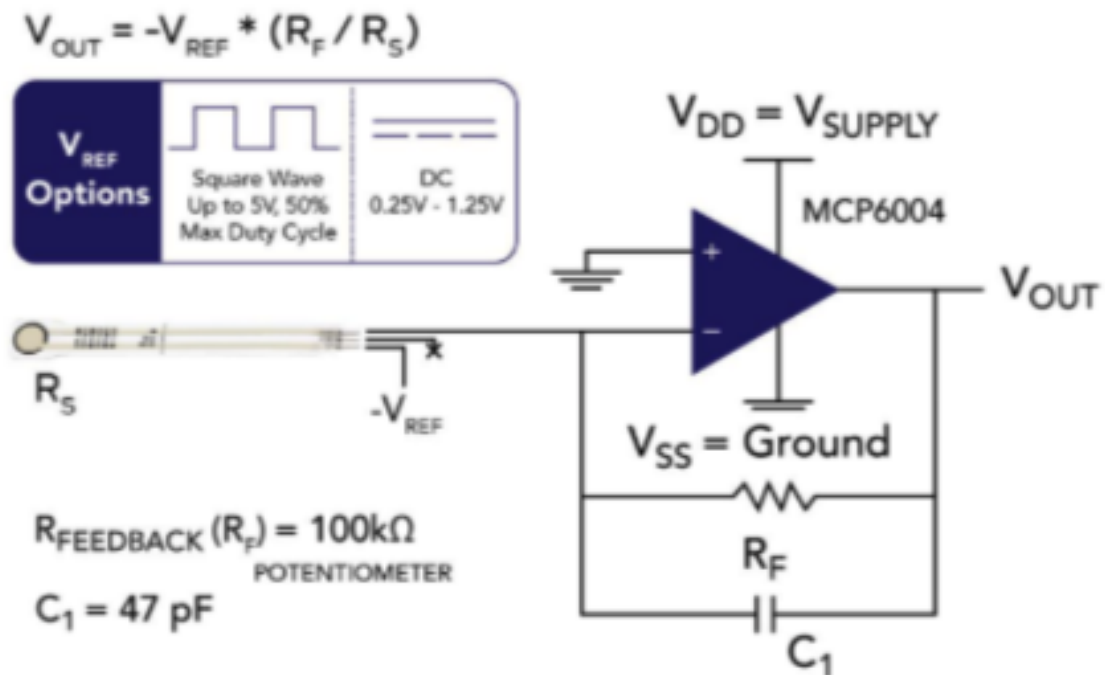
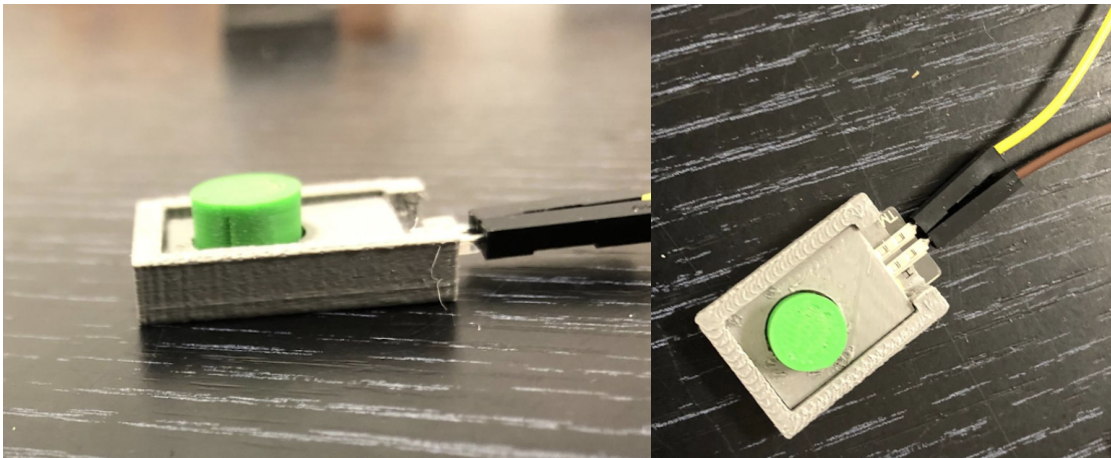


FIGURE 32 – Montage électrique pour l'utilisation du capteur FelxiForce A301

Ce montage présente une résistance R_F dont la valeur nominale du fabricant est de 100 kilo-ohms. Cependant, c'est le choix de cette résistance qui influence la plage de poids que le capteur peut détecter. Afin de sélectionner une résistance appropriée, nous avons mis en place un banc d'essai afin de déterminer les caractéristiques des capteurs et ainsi de connaître précisément la plage de poids détectable

III.2. Montage sur un banc de test

Pour bien appuyer sur la cellule du capteur, nous avons conçu en 3D le dispositif suivant :



(a)

(b)

FIGURE 33 – Photos du dispositif imprimé en 3D pour appuyer correctement sur la cellule du FlexiForce A301

Suite à cela, nous avons fait les mesures suivantes pour caractériser le FlexiForce A301 :

$R = 67,2 \text{ Ohm}$

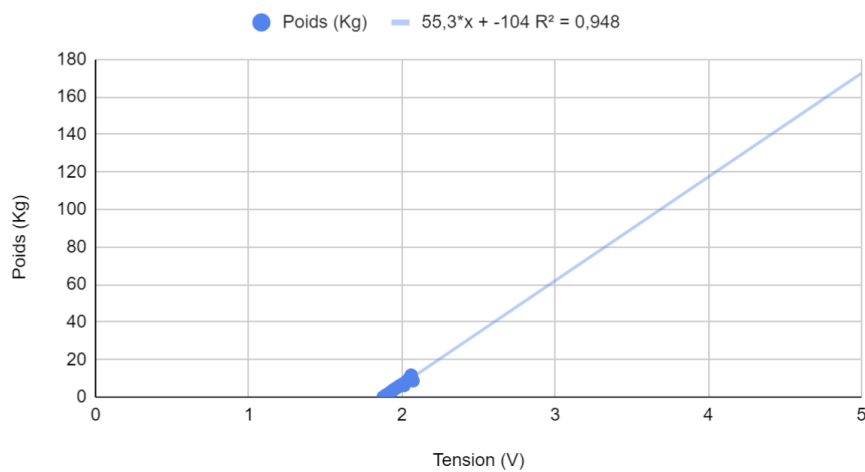


FIGURE 34 – Courbe pour une valeur de resistance choisie de $67,2 \Omega$

Nous avons donc opté pour l'utilisation de résistances de $67,2 \text{ ohms}$ afin de pouvoir détecter une charge d'au moins 175 kg sur un capteur, que ce soit au niveau de l'avant ou de l'arrière d'un pied, étant donné qu'il y a deux capteurs par pied. Il est raisonnable de supposer que la charge maximale qu'une personne peut supporter sur la pointe ou le talon d'un pied est de 60 kg , même si son poids total peut

atteindre jusqu'à 120 kg. Suite à cela, l'objectif a été de faire fonctionner les 4 capteurs ensemble et de moyenner le poids reçu par les capteurs. Nous avons donc fabriqué un nouveau banc de test ou nous pouvions tester les 4 capteurs ensemble.

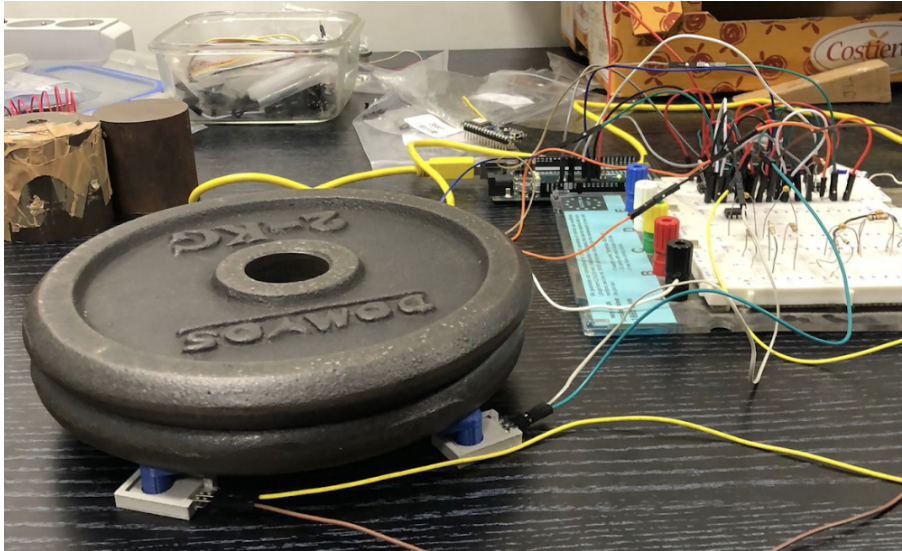


FIGURE 35 – Photo du montage sur le banc de test

Avec ce montage, nous avons pu tracer la caractéristique du dispositif pour vérifier le fonctionnement notre caractéristique nous avons cette fois comparés les résultats donnés par la caractéristique avec un poids connu.

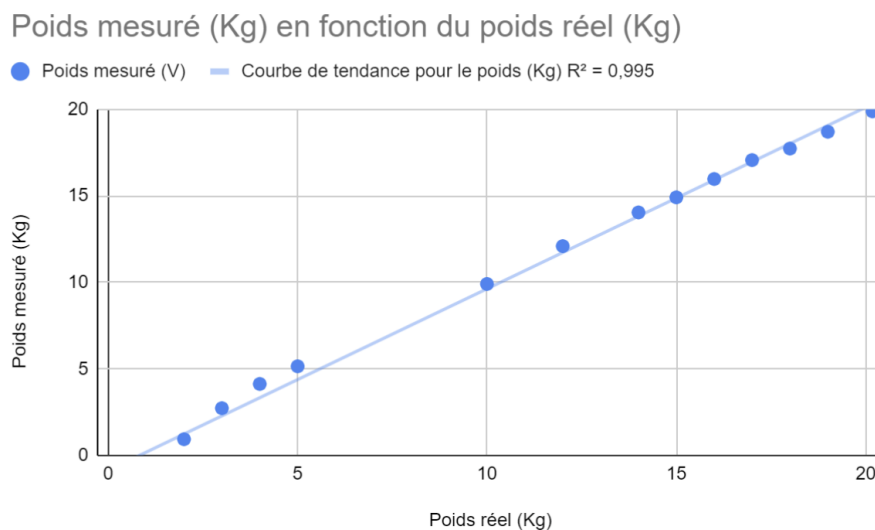


FIGURE 36 – Poids mesuré en fonction du poids réel

III.3. Conception du produit

À ce jour, l'équipe de PPO n'a pas encore progressé au-delà de la phase de réflexion. Il est important de noter que cette partie du projet n'est plus sous notre responsabilité, conformément à l'accord convenu avec le client.

Cependant, nous avons conçu une carte électronique, et conçu un boîtier imprimé en 3D à l'aide de SolidWorks.

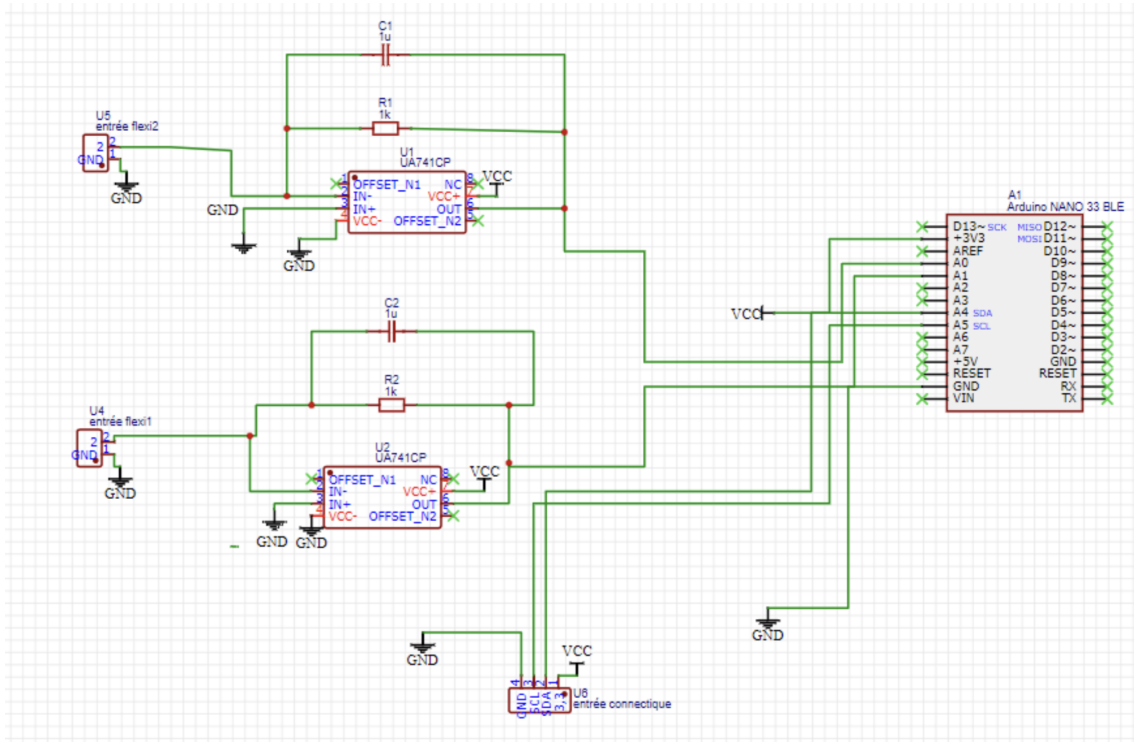


FIGURE 37 – Plan de la carte électronique conçu avec EasyEDA

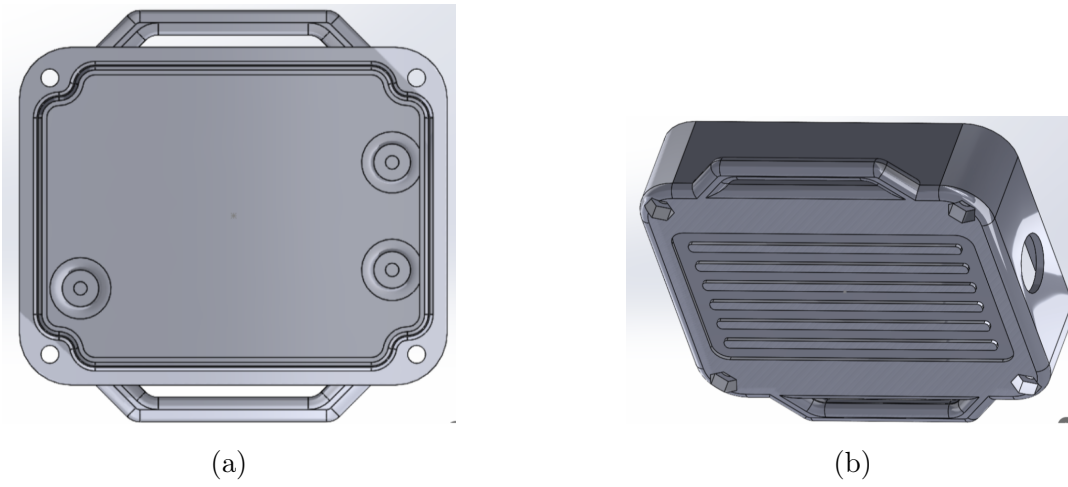


FIGURE 38 – Capture d'écran de la conception 3D sur SolidWorks du boîtier du Module de Charge

Software

I. Support Arduino

Le langage de programmation utilisé est le C++, choisi pour sa compatibilité avec l'environnement de développement Arduino et sa capacité à gérer efficacement les contraintes matérielles. La conception du code a été guidée par les exigences uniques des microcontrôleurs Arduino, ainsi que par les fonctionnalités requises pour le système en question. Pour garantir une implémentation robuste et une interaction fluide avec les composants matériels, plusieurs bibliothèques ont été intégrées dans le code. Chaque bibliothèque apporte son lot de fonctionnalités spécifiques, couvrant un large éventail de besoins, allant de l'écriture de données sur une carte SD grâce à la librairie "SdFat", l'envoi de données via UDP avec les bibliothèques "WiFi" et "WiFiUdp", et la communication avec d'autres capteurs de l'équipement via le protocole I2C grâce à la librairie "Wire" et la librairie "PWFusion_TCA9548A" pour la multiplexation I2C.

Voici les versions utilisées pour chaque librairies importées dans le script final du système VRGOAPT :

- PWFusion_TCA9548A (Playing With Fusion) : 1.0.1
- ArduinoJson (Benoit Blanchon) : 7.0.4
- SdFat (Bill Greiman) : 2.2.2
- Wire (natif Arduino)
- WiFi (natif Arduino)
- WiFiUdp (natif Arduino)
- SPI (natif Arduino)

II. Démarrer le système

II.1. Initialisation

Lorsque le système est mis sous tension, le microcontrôleur exécute immédiatement le script compilé. Dans sa phase d'initialisation, le script fait un requête via le protocole I2C sur chaque adresse de chaque canal du multiplexeur I2C. Si un capteur reçoit une requête, il renvoie automatiquement une donnée, si la requête n'aboutit pas, cela veut dire que personne n'est au bout de la requête et donc que l'adresse qui a été interrogée est vide.

Grâce à cette phase, nous sommes en mesure de contruire un masque sur toutes les adresses du multiplexeur I2C. Puisque nous connaissons les emplacements de chaque parties du corps sur chaque adresses, il est donc possible de construire **un glossaire des parties du corps**.

```
[  
  "lShoulder", "lArm", "lForearm", "lHand", // CHAN0  
  "lThigh", "lLeg", "NaS", "lFoot", // CHAN1  
  "rThigh", "rLeg", "NaS", "rFoot", // CHAN2  
  "belt", "back", "NaS", "head", // CHAN3  
  "rShoulder", "rArm", "rForearm", "rHand", // CHAN4  
],
```

FIGURE 39 – Glossaire des parties du corps (NaS = "Not a Sensor")

Ainsi, si l'utilisateur décide de brancher uniquement un seul membre, disons les capteurs sur le bras gauche, le glossaire des parties du corps construit à l'issue de la phase d'initialisation sera : "lShoulder", "lArm", "lForearm", "lHand".

II.2. Lancer l'enregistrement

En appuyant longuement sur le bouton situé sur le côté du module de contrôle, l'utilisateur peut lancer l'enregistrement des données sur les capteurs détectés lors de la phase d'initialisation. Trois leds s'allument consécutivement avec un délai d'une seconde entre l'allumage de chaque led pour s'assurer que l'utilisateur ne peut pas lancer ou stopper l'enregistrement des données.

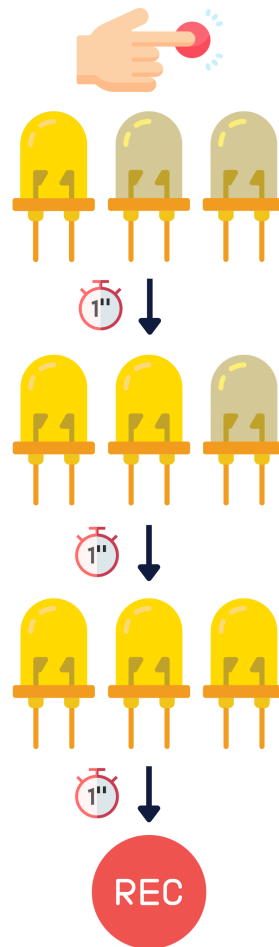


FIGURE 40 – Rester appuyé sur le bouton du module de contrôle pour lancer l'enregistrement

III. Transmission et sauvegarde des données

III.1. Protocole UDP

Pour envoyer des données vers une destination, des bibliothèques Arduino telles que WifiUdp sont disponibles. Avec cette bibliothèque, il est possible de configurer des paquets, de les remplir avec des données, et de les envoyer vers une destination via le protocole UDP. Ce protocole permet un transfert de données rapide sans établir de connexion préalable ni garantir leur livraison, ce qui est avantageux pour des applications où la vitesse prime sur la fiabilité, comme les jeux en ligne ou la diffusion de vidéos en direct. De plus, l'utilisateur souhaite pouvoir configurer la destination de ses données. Pour ce faire, une seconde bibliothèque permet de lire des fichiers au format YAML, souvent utilisé pour les fichiers de configuration.

```
ssid: "*****"  
password: "*****"
```

FIGURE 41 – Forme du fichier de configuration config.yaml

Lors de l'initialisation, après la détection de tous les capteurs, le microcontrôleur tente de se connecter au routeur avec le nom précisé "SSID". Si la connexion est établie, le programme continue son exécution et les données sont envoyées en UDP à ce routeur. Sinon, après un certain délai appelé timeout, le programme considère qu'il a attendu suffisamment longtemps pour une poignée de main de la destination de la requête (handshake) et passe à la phase d'initialisation de la carte SD.

III.2. Sauvegarde sur support SD

Concernant la sauvegarde sur support SD, la bibliothèque SdFat permet d'écrire facilement sur une carte SD connectée au microcontrôleur. Pour la configurer, aucune démarche particulière n'est requise, si ce n'est de s'assurer qu'elle est correctement insérée lors de l'initialisation du système, sinon le code attendra indéfiniment. Ce choix est motivé par la nécessité de ne pas perdre de données lors de l'enregistrement. Étant donné qu'une connexion sans fil peut devenir instable et rencontrer des problèmes lors de l'initialisation ou de l'enregistrement, il est préférable de compter prioritairement sur la disponibilité du support SD en le rendant indispensable pour l'initialisation et l'enregistrement des mouvements de l'utilisateur. Ainsi, si la carte SD n'est pas insérée, le programme "panique" et attend que la connexion soit rétablie. En cas de tel événement, il est toujours recommandé de redémarrer le système en s'assurant que la carte SD est bien branchée.

IV. Acquisition des données

IV.1. Données des Modules Inertiels

À chaque tick d'horloge du microcontrôleur, les capteurs inertiels envoient un ensemble de données défini par le client.

```
[
    "time",
    "magx", "magy", "magz",
    "accx", "accy", "accz",
    "gyrx", "gyry", "gyrz",
],
```

FIGURE 42 – Type de données que souhaite recevoir le client par capteur à chaque tick

Ces données peuvent être obtenues en ciblant l'adresse appropriée dans chaque capteur. Le processus de collecte de données commence par l'itération sur chaque canal. Ensuite, pour chaque canal, les capteurs correspondants sont interrogés séquentiellement. Si un capteur est actif (tel que déterminé par le masque de capteur), ses données sont lues.

Register	Function
0x00	Command register (write) / Software version (read)
0x01	Compass Bearing 8 bit, i.e. 0-255 for a full circle
0x02, 0x03	Compass Bearing 16 bit, i.e. 0-3599, representing 0-359.9 degrees. register 2 being the high byte. This is calculated by the processor from quaternion outputs of the BNO080
0x04	Pitch angle - signed byte giving angle in degrees from the horizontal plane (+/- 90°)
0x05	Roll angle - signed byte giving angle in degrees from the horizontal plane (+/- 90°)
0x06, 0x07	Magnetometer X axis (uTesla), 16 bit signed integer (register 0x06 high byte) Q point 4
0x08, 0x09	Magnetometer Y axis (uTesla), 16 bit signed integer (register 0x08 high byte) Q point 4
0x0A, 0x0B	Magnetometer Z axis (uTesla), 16 bit signed integer (register 0x0A high byte) Q point 4
0x0C, 0x0D	Linear acceleration Axis X, 16 bit signed integer (register 0x0C high byte) Q point 8
0x0E, 0x0F	Linear acceleration Axis Y, 16 bit signed integer (register 0x0E high byte) Q point 8
0x10, 0x11	Linear acceleration Axis Z, 16 bit signed integer (register 0x10 high byte) Q point 8
0x12, 0x13	Gyroscope raw X axis output, 16 bit signed integer (register 0x12 high byte)
0x14, 0x15	Gyroscope raw Y axis output, 16 bit signed integer (register 0x14 high byte)
0x16, 0x17	Gyroscope raw Z axis output, 16 bit signed integer (register 0x16 high byte)
0x1C, 0x1D	Roll angle 16 bit - signed byte giving angle in tenths of degrees from the horizontal plane (+/- 180°, 0x1C is the high byte)
0x1E	Calibration state, bits 0 and 1 reflect the calibration status (0 un-calibrated, 3 fully calibrated)
Software V5+ commands below	
0x1A, 0x1B	Pitch angle 16 bit - signed byte giving angle in tenths of degrees from the horizontal plane (+/- 90°, 0x1A is the high byte)
0x1F, 0x20	Accelerometer X axis output, 16 bit signed integer (register 0x1F high byte) Q point 8
0x21, 0x22	Accelerometer Y axis output, 16 bit signed integer (register 0x21 high byte) Q point 8
0x23, 0x24	Accelerometer Z axis output, 16 bit signed integer (register 0x23 high byte) Q point 8
0x25, 0x26	Gyroscope calibrated X axis output, 16 bit signed integer (register 0x25 high byte) Q point 9
0x27, 0x28	Gyroscope calibrated Y axis output, 16 bit signed integer (register 0x27 high byte) Q point 9
0x29, 0x2A	Gyroscope calibrated Z axis output, 16 bit signed integer (register 0x29 high byte) Q point 9

FIGURE 43 – Liste des types de données issu de la documentation du CMPS14

IV.2. Données des Modules de Charge

Pour les modules de charge, une attention particulière est portée à la gestion des adresses et à la lecture des données. Si le capteur est situé sur un module de charge (déterminé par son adresse), et si le canal actuel correspond à celui associé à ce module, une quantité spécifique de données est lue. Tels qu'ils sont conçus, les modules de charge se comportent comme les modules inertiels à la différence près qu'ils renvoient 4 octets de données en plus, qui correspondent aux données de charge avant et arrière du pied. Ainsi dans le protocole d'acquisition des données, lorsque le programme interroge une des deux adresses des module de charge, il demande 4 octets de plus.

```
[  
  "time",  
  "magx","magy","magz",  
  "accx","accy","accz",  
  "gyrx","gyry","gyrz",  
  ("frontLoad", "backLoad"),  
],
```

FIGURE 44 – Types de données acquises lors d'une requête vers un module de charge

Ainsi, lors de l'exploitation des données, lorsqu'une trame correspondra à un des deux pieds, cette trame contiendra les données des capteurs de charge.

V. Interface et Exploitation

V.1. Interface Humain-Machine

Pour l'interface Humain-Machine, le module de contrôle est doté de cinq LEDs, chacune remplissant un rôle précis pour faciliter l'interaction avec l'utilisateur :

- LED Rouge : Cette LED agit comme un indicateur d'erreur. Lorsqu'elle s'allume, elle signale la présence d'un dysfonctionnement dans l'exécution du programme. Son activation entraîne l'arrêt immédiat du système, incitant l'utilisateur à prendre des mesures correctives.
- Trois LEDs Jaunes : Ces LEDs sont utilisées pour un compte à rebours, créant une interface intuitive pour l'utilisateur. Lorsque le bouton est maintenu enfoncé, les trois LEDs jaunes s'allument successivement avec un délai d'une seconde entre chaque allumage. Une fois les trois LEDs jaunes éteintes, l'utilisateur sait qu'il peut relâcher le bouton pour déclencher le processus d'enregistrement des données.

- LED Bleue : Cette LED sert à indiquer que l'enregistrement des données est en cours. Lorsqu'elle est activée, l'utilisateur sait que le système est en train de collecter les données des capteurs, offrant ainsi une rétroaction visuelle claire sur l'état opérationnel du dispositif.

En cas de détection d'une erreur pendant l'exécution du programme, la LED rouge est immédiatement activée pour alerter l'utilisateur, tandis que les autres LEDs restent éteintes. Cette signalisation visuelle rapide permet à l'utilisateur de réagir rapidement et de prendre les mesures nécessaires pour résoudre le problème.

V.2. Exploitation des données

Pour exploiter les données, le client doit utiliser les glossaires fournis au début de chaque enregistrement de données. Ces glossaires sont inclus soit en en-tête de chaque fichier d'enregistrement sur le support SD, soit en en-tête de la trame envoyée en UDP au routeur.



```
[lThigh,lLeg,lFoot,lFrontLoad,lBackLoad,hips,],
['time','magx','magy','magz','accx','accy','accz','gyrx','gyry','gyrz'],

[
    3,170,326,-748,-6,3,0,0,-9,1,
    5,-285,575,514,1,0,-1,0,-1,-1,
    8,-1,0,25,0,0,-1,-4,5,-6,187,21,
    10,-248,-143,574,-16,-13,-11,-19,4,-56,
],
```

FIGURE 45 – Exemple de trame envoyée pour un tick

Pour simplifier, pour déterminer depuis quels membres du corps les données inertielles ont été envoyées, il suffit de consulter le premier glossaire (glossaire des parties du corps). Ainsi, une trame contiendra autant de lignes que de parties du corps émettant des données. Pour comprendre le contenu d'une donnée, il suffit de compter son index à partir du début de sa ligne et de regarder le numéro de l'indice correspondant dans le glossaire des types de données.

En résumé, une trame est un tableau de taille NxM, où N représente la longueur du glossaire des parties du corps et M la taille du glossaire des types de données envoyées.

Cependant, il convient de mentionner le cas particulier des pieds. Lorsque le client traite les données, il doit prendre en compte qu'une ligne correspondant aux données d'un pied dans la trame contiendra **deux données supplémentaires** à la fin, représentant les données de charge avant et arrière du pied. Ce processus a été proposé par le client et convenu avec son accord.

Enfin, pour reconstituer le mouvement final de l'opérateur, il suffit d'itérer sur toutes les trames envoyées successivement pour obtenir un mouvement décomposé position par position.

Conclusion

Le projet VRGOCAPT, dirigé par Thierry Blandet de l'équipe Informatique Géométrique et Graphique (IGG) du laboratoire ICube de Strasbourg, visait à développer un équipement de capteurs pour le corps humain afin d'améliorer la qualité des gestes dans un environnement industriel, en simulant des mouvements en réalité virtuelle.

Pour répondre aux exigences du client, nous avons conçu et développé trois modules principaux : le module de contrôle, le module inertiel et le module de charge. Le module de contrôle, central dans le système, a été élaboré autour d'un microcontrôleur ESP32, permettant la collecte, le traitement et la transmission des données cinématiques du corps de l'utilisateur. Nous avons également intégré des composants tels que des LEDs, un bouton poussoir, un multiplexeur, une carte SD et un routeur, le tout dans une coque imprimée en 3D pour assurer un fonctionnement efficace et une facilité d'utilisation.

Le module inertiel a été équipé de capteurs BNO et de connectiques Tiny XLR pour capturer les mouvements du corps en 3D. Nous avons également développé une coque imprimée en 3D pour intégrer ces composants de manière optimale.

Quant au module de charge, nous avons sélectionné le capteur Flexiforce A301 pour mesurer la charge portée par l'utilisateur. Nous avons réalisé des tests pour caractériser les capteurs et avons conçu un module en impression 3D pour intégrer les capteurs et assurer la transmission des données vers le module de contrôle.

En collaborant étroitement avec l'équipe de la licence professionnelle métiers de l'industrie : conception et processus de mise en forme des matériaux (PPO), nous avons progressé dans l'intégration des capteurs de charge dans des chaussures de sécurité adaptables, répondant ainsi aux exigences de praticité du projet.

En conclusion, le projet VRGOCAPT a été mené à bien, et le produit livré répond aux demandes du client. Grâce à notre approche méthodique et collaborative, le client dispose désormais d'un équipement fonctionnel qui lui permettra d'améliorer la qualité des gestes dans son environnement industriel.

Resumé

VRGOCAPT est un projet ingénieur dont l'objectif est de développer et concevoir un équipement de capteurs pour un corps humain, sous la direction de Thierry Blandet de l'équipe Informatique Géométrique et Graphique (IGG) du laboratoire ICube de Strasbourg.

Le projet consiste à la réalisation d'un système de capteurs amovibles. Ils devront repérer les positions des différentes parties du corps et mesurer la charge portée par l'utilisateur afin d'en faire une simulation en réalité virtuelle. Ce système permet à un individu travaillant en milieu industriel d'améliorer la qualité de ses gestes à partir d'une récupération de données via un support externe ou en temps réel.

Abstract

VRGOCAPT is an engineering project aimed at developing and designing a sensor equipment for the human body, under the supervision of Thierry Blandet from the Geometric and Graphic Computing (IGG) team at the ICube laboratory in Strasbourg.

The project involves the creation of a removable sensor system. These sensors will be able to detect the positions of different body parts and measure the load borne by the user to simulate them in virtual reality. This system allows an individual working in an industrial environment to improve the quality of their movements based on data retrieval through an external support or in real-time.

The main objective of this project is to create equipment that can interact with a virtual reality platform in an industrial environment to improve the quality of movements and the ergonomics of workstations. To achieve this, the client's requirement is to design a removable equipment that allows visualizing movements, with or without load. The project must meet various constraints : the weight of the system, its portability, or the accuracy of the device. Once completed, this system will be tested in an industrial setting.