

**Université de Nantes**

Institut Universitaire Technologique (IUT) de Nantes

Département Génie Electrique et Informatique Industrielle (GEII)

**BUT 3ème année - Électronique et Systèmes Embarqués**

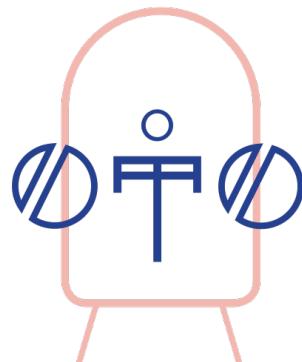
---

# **Fiabilisation des éléments électroniques et informatiques pour la transition vers une production industrielle**

---

Rapport de stage de fin d'études

18 mars au 16 juillet 2025



Entreprise : **LABAA (OTO)**

Maître de stage :

**M. Corentin LEMAITRE**

Directeur Général Délégué de LABAA

Tuteur académique :

**M. Nozar RAFII**

Étudiant :

**Céleste KOLOUSSA**

Année universitaire 2024-2025

# Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de mon stage et à la rédaction de ce rapport.

Je remercie tout d'abord **M. Corentin LEMAITRE**, Directeur Général Délégué de LABAA et maître de stage, pour son accueil au sein de l'entreprise, la richesse des missions confiées, sa disponibilité et ses conseils précieux. Son approche pédagogique et son expertise dans le développement technique et la production du fauteuil OTO ont grandement enrichi mon apprentissage.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à **M. Nozar RAFII**, mon tuteur académique, pour son accompagnement attentif, ses conseils avisés, ainsi que sa visite en entreprise. Mes remerciements vont aussi à **Mme Alexia AUDRAIN**, fondatrice de LABAA, pour m'avoir permis de participer à cette belle aventure. Son parcours inspirant, de la conception du premier prototype en tant qu'ébéniste jusqu'à la création de l'entreprise, m'a particulièrement marquée.

Je remercie chaleureusement toute l'équipe de LABAA, notamment **Hugo FAURE** du pôle technique, **Camille LAQUERRIÈRE** et **Margot AUBRY** du pôle commercial, pour leur accueil, leur disponibilité et la richesse de nos échanges autour du projet OTO.

Enfin, je remercie l'ensemble du **département GEII de l'IUT de Nantes** pour la qualité de l'enseignement dispensé, qui m'a permis d'aborder ce stage avec les compétences nécessaires.

# Distinction et reconnaissance

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude envers toute l'équipe OTO qui m'a permis d'obtenir le diplôme "Best Team Best Practices Innovation Team Member".

Cette reconnaissance témoigne de la qualité exceptionnelle de l'environnement de travail et de l'esprit d'innovation qui règne au sein de LABAA. Elle renforce ma conviction que l'innovation naît de la collaboration et que les meilleures pratiques émergent d'équipes qui partagent une vision commune d'excellence technique au service d'un impact social positif.



FIGURE 1 – Best Team Best Practices Innovation Team Member 2025

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>1</b>
<b>Distinction et reconnaissance</b>	<b>2</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>5</b>
1.1 Contexte du stage . . . . .	5
1.2 besoin thérapeutique . . . . .	5
1.3 Contexte de transition vers l'industrialisation . . . . .	5
<b>2 Présentation de l'entreprise</b>	<b>6</b>
2.1 LABAA : Histoire et création . . . . .	6
2.2 Reconnaissance et prix . . . . .	7
2.3 Organisation de l'entreprise . . . . .	7
2.4 Environnement de travail . . . . .	7
2.4.1 ICI Nantes : Écosystème d'innovation collaborative . . . . .	7
2.4.2 Outils et espace de travail . . . . .	8
2.4.3 Enjeux de l'industrialisation . . . . .	13
2.4.4 Défis techniques du système électronique embarqué . . . . .	13
2.5 Le produit : OTO . . . . .	14
2.5.1 Concept et fonctionnement . . . . .	15
2.6 Architecture électronique embarquée . . . . .	16
2.6.1 Carte MAIN : Gestion de l'alimentation et actionneurs . . . . .	18
2.6.2 Carte FRONT : Interface utilisateur et contrôle intelligent . . . . .	19
2.7 Principe de fonctionnement . . . . .	20
2.7.1 Configuration des limites . . . . .	20
2.7.2 Télécommande . . . . .	20
2.7.3 Validation clinique et déploiement . . . . .	20
<b>3 Missions et réalisations</b>	<b>22</b>
3.1 Fiabilisation du système électronique . . . . .	22
3.1.1 Analyse des cas de défaillance terrain . . . . .	22
3.1.2 Caractérisation technique de la défaillance . . . . .	22
3.1.3 Investigation méthodologique des pannes . . . . .	24
3.1.4 Défaillance de la diode BAT54 . . . . .	26
3.1.5 régulateur LM3671 . . . . .	27
3.1.6 Validation des améliorations . . . . .	30

3.1.7	Solution alternative : tests d'alimentations externes . . . . .	30
3.2	Activités SAV et remise en état . . . . .	31
3.3	Processus de production . . . . .	31
3.3.1	Développement PCB télécommande optimisé . . . . .	31
3.4	Développement d'outils de production . . . . .	34
3.4.1	Développement d'un outil de programmation et diagnostic . . . . .	34
3.4.2	Architecture du système embarqué . . . . .	34
3.4.3	Interfaces utilisateur développées . . . . .	36
3.4.4	Bilan des fonctionnalités . . . . .	37
3.5	Modernisation de l'architecture firmware . . . . .	37
3.5.1	Migration Arduino IDE vers PlatformIO . . . . .	37
3.5.2	Restructuration modulaire . . . . .	38
3.5.3	Gestion avancée des logs . . . . .	39
3.5.4	Tests fonctionnels et validation terrain . . . . .	40
3.5.5	Outils de debugging avancés . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Compétences développées</b>	<b>42</b>
4.1	Compétences techniques . . . . .	42
4.1.1	Électronique . . . . .	42
4.1.2	Programmation embarquée . . . . .	42
4.1.3	Développement logiciel . . . . .	42
4.1.4	Conception mécanique . . . . .	42
4.2	Compétences transversales . . . . .	43
4.2.1	Approche systémique . . . . .	43
4.2.2	Gestion de projet . . . . .	43
4.2.3	Analyse et résolution de problèmes . . . . .	43
4.2.4	Communication . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Conclusion et bilan du stage</b>	<b>44</b>
5.1	Synthèse de l'expérience . . . . .	44
5.2	Contributions techniques réalisées . . . . .	44
5.2.1	Fiabilisation du système électronique . . . . .	44
5.2.2	Optimisation des processus de production . . . . .	44
5.2.3	Modernisation du firmware . . . . .	44
5.2.4	Développement d'outils de diagnostic . . . . .	45
5.3	Compétences développées . . . . .	45
5.4	Points d'amélioration identifiés . . . . .	45
5.4.1	Développement par itérations courtes . . . . .	45
5.4.2	Documentation et traçabilité collaborative . . . . .	45
5.5	Perspectives d'évolution et futur . . . . .	46
5.6	Remerciements et conclusion . . . . .	46

# Chapitre 1

## Introduction

Le choix de mon stage s'est porté sur l'entreprise LABAA pour plusieurs raisons. Je recherchais une entreprise dont les valeurs correspondent aux miennes : je ne souhaitais pas travailler dans le secteur de l'armement et je voulais contribuer à un projet ayant un impact social positif. Le projet OTO, qui aide les personnes atteintes de troubles du spectre autistique (TSA), répond parfaitement à cette aspiration.

### 1.1 Contexte du stage

Ce stage de fin de cursus BUT GEII, d'une durée de 18 semaines, s'est déroulé du 12 mars au 16 juillet 2025 au sein de LABAA, une startup nantaise développant le fauteuil OTO destiné aux personnes atteintes de troubles autistiques.

### 1.2 besoin thérapeutique

Les personnes atteintes de TSA (trouble du spectre autistique) ressentent les informations sensorielles de manière amplifiée et ont souvent des difficultés de traitement sensoriel. Le fauteuil OTO répond à ces besoins spécifiques en offrant :

- **Environnement sécurisant** : Conception en forme de cocon isolant des stimuli extérieurs
- **Pression profonde contrôlée** : Étreinte via des cellules gonflables "enveloppant" l'utilisateur

Cette pression profonde, reconnue scientifiquement pour ses effets apaisants, procure un bien-être particulier aux personnes autistes.

### 1.3 Contexte de transition vers l'industrialisation

LABAA, ayant déjà livré plus d'une centaine de fauteuils OTO, est en transition vers une production en grandes séries. L'objectif est de fiabiliser l'ensemble des composants et d'améliorer les processus de production pour une montée en volume tout en réduisant les interventions SAV.

Durant ce stage, j'ai été intégrée au pôle technique avec pour mission principale de contribuer à cette démarche de fiabilisation et d'optimisation des aspects électroniques et informatiques qui limite la production.

# Chapitre 2

## Présentation de l'entreprise

### 2.1 LABAA : Histoire et création

LABAA a été fondée par Alexia AUDRAIN, ébéniste et designer, suite à un projet de fin d'études en BTMS ébénisterie. Durant sa formation, elle a conçu le premier prototype du fauteuil OTO en collaboration avec des personnes autistes, des éducateurs spécialisés et des psychomotriciens, notamment avec une école spécialisée à Blain (Loire-Atlantique).

L'inspiration vient des travaux du Dr Temple Grandin, scientifique autiste américaine, qui a développé la première "machine à serrer" après avoir observé l'effet apaisant de la pression sur le bétail. Alexia AUDRAIN a adapté ce concept dans un meuble au design non stigmatisant et esthétique.



FIGURE 2.1 – Prototype du fauteuil OTO

## 2.2 Reconnaissance et prix

L'innovation OTO a été reconnue par de nombreux prix majeurs entre 2020 et 2023 :

**Prix 2023 :** SantExpo (Prix innovation santé mentale), Start West ("Small Invest"), Région Pays de la Loire ("Trophée Joséphine"), Trophée Handitech ("Parcours et dispositifs de santé" + Coup de cœur BPI France), La Fabrique Abeille Assurance, Fonds Innovation Santé Nantes Métropole.

**Prix 2020-2022 :** Prix James Dyson (lauréat français, top 20 international), "Mon projet innovant" Loire-Atlantique, "Grand Prix de l'Idéation", "Grand Prix de l'innovation pour la santé de l'Enfant".

## 2.3 Organisation de l'entreprise

LABAA est organisée autour de deux pôles principaux :

### Pôle Marketing et Commercial

- **Alexia AUDRAIN** : Fondatrice et cheffe d'entreprise, responsable marketing et vision produit
- **Margot AUBRY** : Développement commercial et relation client (alternante)
- **Camille LAQUERRIÈRE** : Responsable communication et marketing (alternante)

### Pôle Technique

- **Corentin LEMAITRE** : Directeur Général Délégué, responsable technique et production
- **Hugo FAURE** : Ingénieur méthode et développement industriel (stagiaire)
- **Céleste KOLOUSSA** : Technicien en électronique et informatique industrielle (stagiaire)

## 2.4 Environnement de travail

### 2.4.1 ICI Nantes : Écosystème d'innovation collaborative

L'entreprise LABAA est structurée sur deux sites complémentaires. Les bureaux administratifs sont situés dans le bâtiment B19, tandis que les ateliers de production et R&D sont implantés au sein d'ICI Nantes, écosystème manufacturier unique sur 1 600 m<sup>2</sup> d'ateliers partagés.

ICI Nantes héberge des résidents aux savoir-faire complémentaires : artisans menuisiers, ébénistes, métalliers, designers, architectes et prototypeurs. Le site abrite la seule Matériauthèque du Grand Ouest, ressource précieuse pour la R&D matériaux. Installé sur le site historique de l'ancienne caserne Mellinet à Nantes, cet environnement collaboratif favorise l'innovation ouverte et les synergies interdisciplinaires.

### 2.4.2 Outils et espace de travail

L'efficacité du développement repose sur un écosystème d'outils intégrés couvrant l'ensemble du cycle de développement :

#### Développement logiciel :

- **Visual Studio Code + PlatformIO** : Développement firmware RP2040 avec debugging avancé
- **KiCad 6.0.4** : Conception PCB complète (schémas, routage, fabrication)
- **GitHub + CowLab** : Gestion de versions et collaboration sécurisée
- **Notion** : Organisation missions et documentation projets

**Instrumentation technique** : Oscilloscope, générateur de signaux, alimentation de laboratoire, station de soudure avec aspiration et lampe loupe, équipements de mesure et validation électronique.



FIGURE 2.2 – Oscilloscope utilisé pour le développement et debug des cartes électroniques



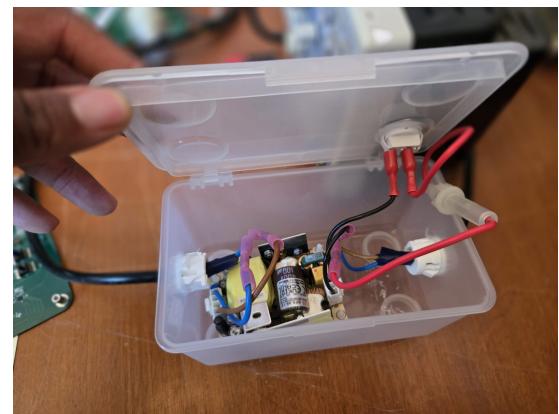
FIGURE 2.3 – Générateur de fonctions utilisé pour le développement et debug des cartes électroniques



FIGURE 2.4 – Alimentation de laboratoire utilisée pour le développement et debug des cartes électroniques

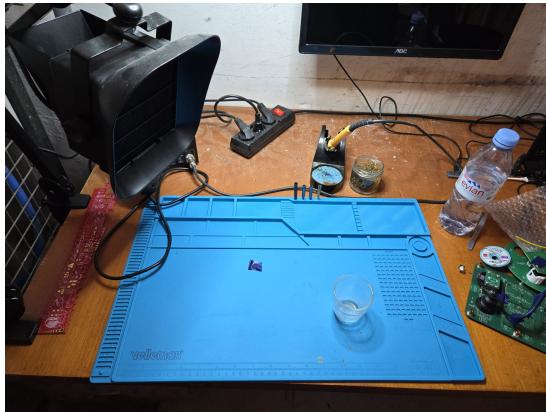


(a) Boîtier fermé



(b) Boîtier ouvert

FIGURE 2.5 – Alimentation 230VAC vers 12VDC dédiée au développement des cartes électroniques



(a) Espace de brasure



(b) Fer à souder



(c) Lampe loupe



(d) Aspiration de fumée de soudure

FIGURE 2.6 – Équipements de soudure utilisés pour le développement et la réparation électronique

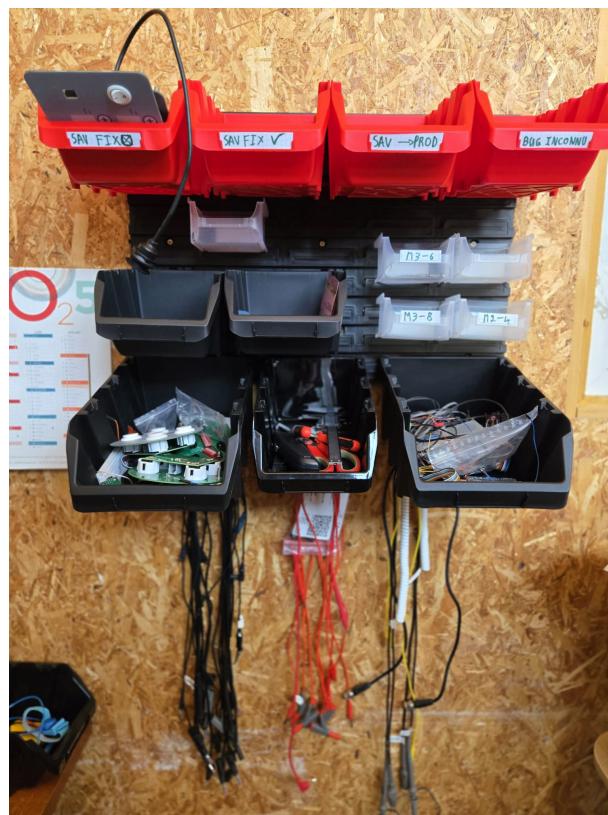


FIGURE 2.7 – Espace de rangement mural modulaire



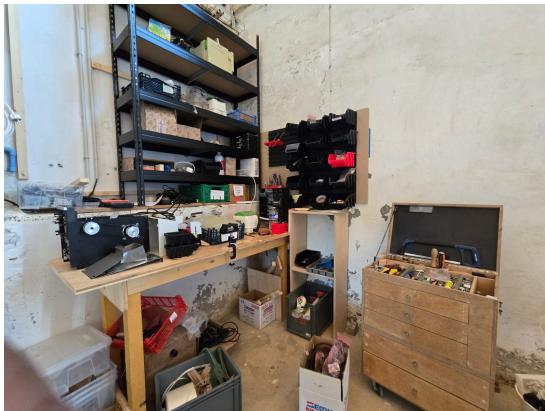
FIGURE 2.8 – Espace d'archivage des cartes électroniques et de stockage des composants électroniques



(a) Espace de travail SAV et développement mécanique



(b) Espace de stockage des composants électroniques et mécaniques



(c) Établi et servante de travail



(d) Espace de test et stockage des repose-pieds

FIGURE 2.9 – Environnement de travail et espaces de développement technique

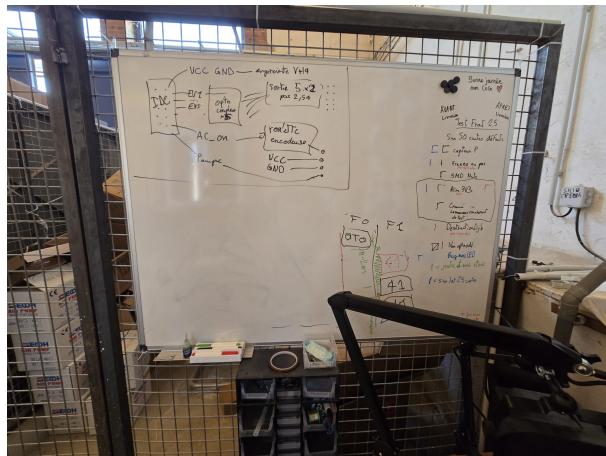


FIGURE 2.10 – Tableau blanc pour brainstorming et schématisation

### Synthèse de l'environnement technique

Cette infrastructure technique garantit la cohérence des développements via des outils standardisés, la traçabilité complète par versioning Git, et la qualité des réalisations grâce aux équipements professionnels. L'organisation spatiale optimise les flux en séparant les zones de conception, prototypage, test et stockage tout en maintenant une proximité permettant les itérations rapides.

### 2.4.3 Enjeux de l'industrialisation

Dans un contexte de croissance rapide avec plus de 100 fauteuils OTO déployés, LABAA fait face aux défis de la transition petite production vers grande production.

#### Reproductibilité et standardisation :

- **Chaîne d'assemblage** : Passage d'un assemblage artisanal à des processus reproductibles avec contrôle qualité intégré
- **Documentation technique** : Procédures standardisées pour réduire la variabilité inter-opérateurs
- **Sourcing industriel** : Sélection de fournisseurs capables de livrer en volumes croissants

#### Fiabilisation produit et réduction du SAV :

- **Retours terrain** : Analyse des cas SAV pour identifier les modes de défaillances récurrentes
- **Robustesse** : Renforcement de la résistance aux conditions d'usage intensif
- **Maintenance préventive** : Développement d'outils de diagnostic anticipé

#### Optimisation économique :

- **Réduction des coûts** : Diminution du coût de revient pour démocratiser l'accès
- **Sous-traitance qualifiée** : Externalisation des opérations à faible valeur ajoutée technique
- **Contrôle qualité** : Tests en réception et validation avant expédition

### 2.4.4 Défis techniques du système électronique embarqué

L'électronique constitue le cœur technologique du fauteuil OTO, intégrant microcontrôleur RP2040, capteurs de pression, matrices LED et interface pneumatique. Les enjeux industriels se traduisent par des défis techniques spécifiques qui ont structuré mes missions de stage.

#### Fiabilisation hardware :

- **Défaillances alimentation 3.3V** : 10% des cartes présentent des dysfonctionnements d'alimentation causant arrêt système et échauffement
- **Robustesse électromagnétique** : Résistance aux perturbations CEM en environnement hospitalier

**Architecture firmware industrialisable :**

- **Passage de prototype à produit** : Migration du code Arduino monolithique vers architecture modulaire maintenable
- **Traçabilité médicale** : Développement de logs détaillés pour suivi
- **Tests et validation** : Implémentation de tests unitaires pour garantir la qualité logicielle

**Optimisation des processus de production électronique :**

- **Élimination du sertissage manuel** : Développement de solutions PCB pour réduire les défauts d'assemblage télécommande
- **Automatisation de la programmation** : Création d'outils pour accélérer la mise en service des cartes
- **Standardisation des tests** : Développement de bancs de test pour validation systématique

Cette approche technique structurée autour de la fiabilité, de la maintenabilité et de l'efficacité de production constitue le fil conducteur de mes contributions durant ce stage.

## 2.5 Le produit : OTO



FIGURE 2.11 – Le fauteuil OTO et Alexia AUDRAIN, fondatrice de LABAA

### 2.5.1 Concept et fonctionnement

OTO est un fauteuil conçu spécifiquement pour répondre aux besoins des personnes atteintes de troubles du spectre autistique, d'anxiété ou de troubles sensoriels. Le concept technique repose sur la pression profonde, appliquée de manière contrôlée grâce à des cellules gonflables.

Ce dispositif offre une polyvalence d'usage remarquable dans différents contextes d'accompagnement. Il peut être utilisé comme outil de régulation émotionnelle, procurant un effet "câlin" apaisant qui aide les utilisateurs à retrouver leur équilibre sensoriel. Le fauteuil trouve également sa place en préparation à des activités stimulantes, permettant aux personnes de se préparer mentalement et sensoriellement avant d'aborder des situations potentiellement difficiles.

OTO peut servir de renforçateur positif dans le cadre d'activités éducatives ou rééducatives, offrant une expérience sensorielle plaisante qui encourage la participation et l'engagement. Son intégration dans les salles Snoezelen, ces environnements multisensoriels spécialement conçus pour la stimulation ou la relaxation, enrichit l'expérience sensorielle globale proposée aux utilisateurs.

Dans le domaine de l'intégration sensorielle, le fauteuil constitue un support précieux pour les professionnels qui accompagnent les personnes dans leur travail de traitement et d'organisation des informations sensorielles. Cette approche globale permet d'adapter l'utilisation du fauteuil aux besoins spécifiques de chaque utilisateur et à différents objectifs d'accompagnement.

## 2.6 Architecture électronique embarquée

L'ensemble de l'électronique est intégré dans le repose-pieds du fauteuil, garantissant un design épuré et une protection optimale des composants. Le système se compose de deux cartes électroniques principales reliées entre elles.

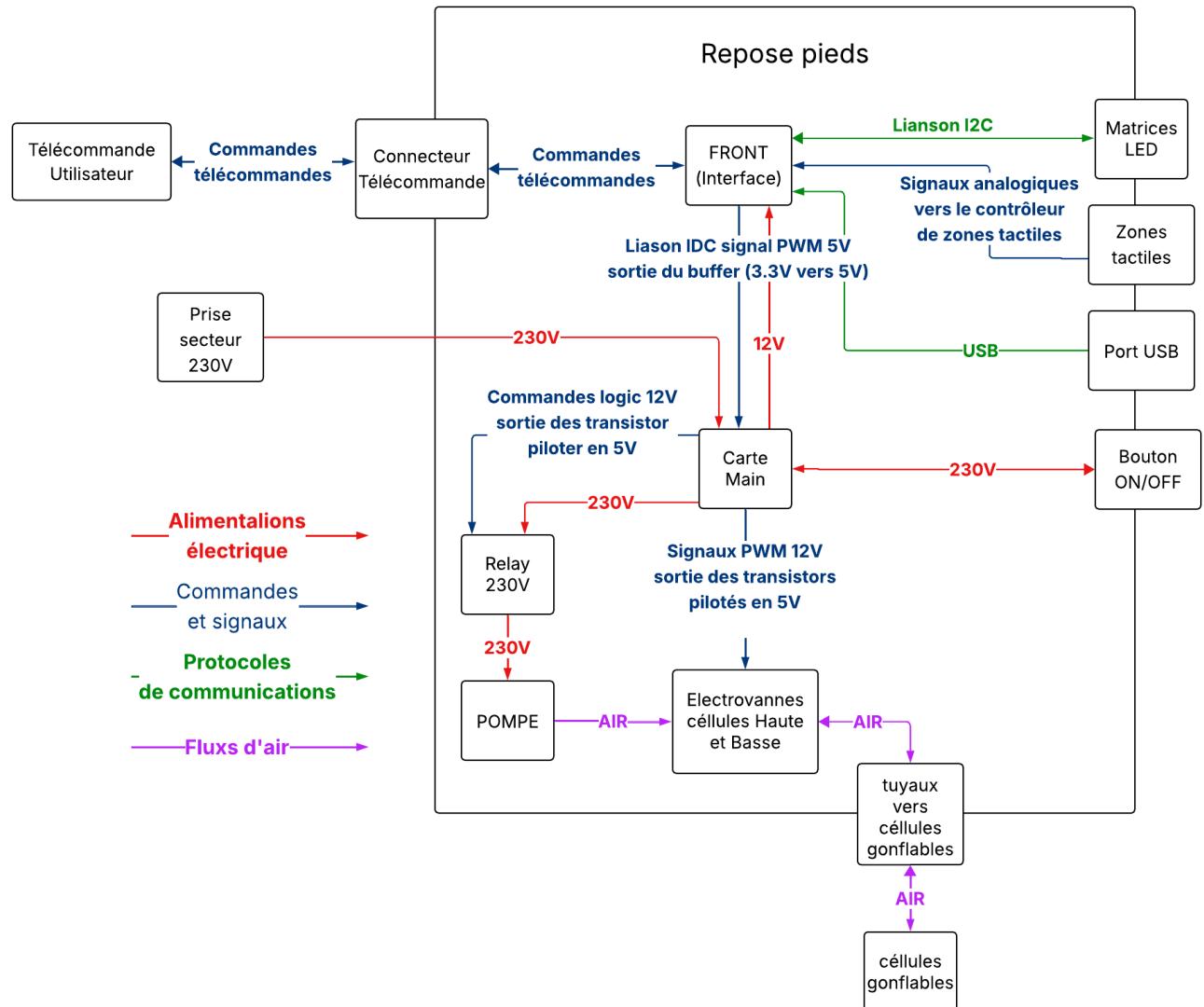


FIGURE 2.12 – Architecture électronique du fauteuil OTO



FIGURE 2.13 – repose-pieds du fauteuil OTO



FIGURE 2.14 – Intérieur du repose-pieds du fauteuil OTO

### 2.6.1 Carte MAIN : Gestion de l'alimentation et actionneurs

La carte MAIN constitue le cœur de l'alimentation électrique du système. Elle reçoit directement le 230V AC du secteur et assure plusieurs fonctions :

- **Conversion d'énergie** : Transformation du 230V AC en 12V DC stabilisé pour alimenter l'ensemble du système
- **Contrôle pompe** : Pilotage de la pompe à air 230V via un relais de puissance
- **Gestion pneumatique** : Commande des électrovannes pour contrôler la pression des cellules gonflables haute et basse
- **Interface système** : alimentation de la carte FRONT et signaux de contrôle des actionneurs

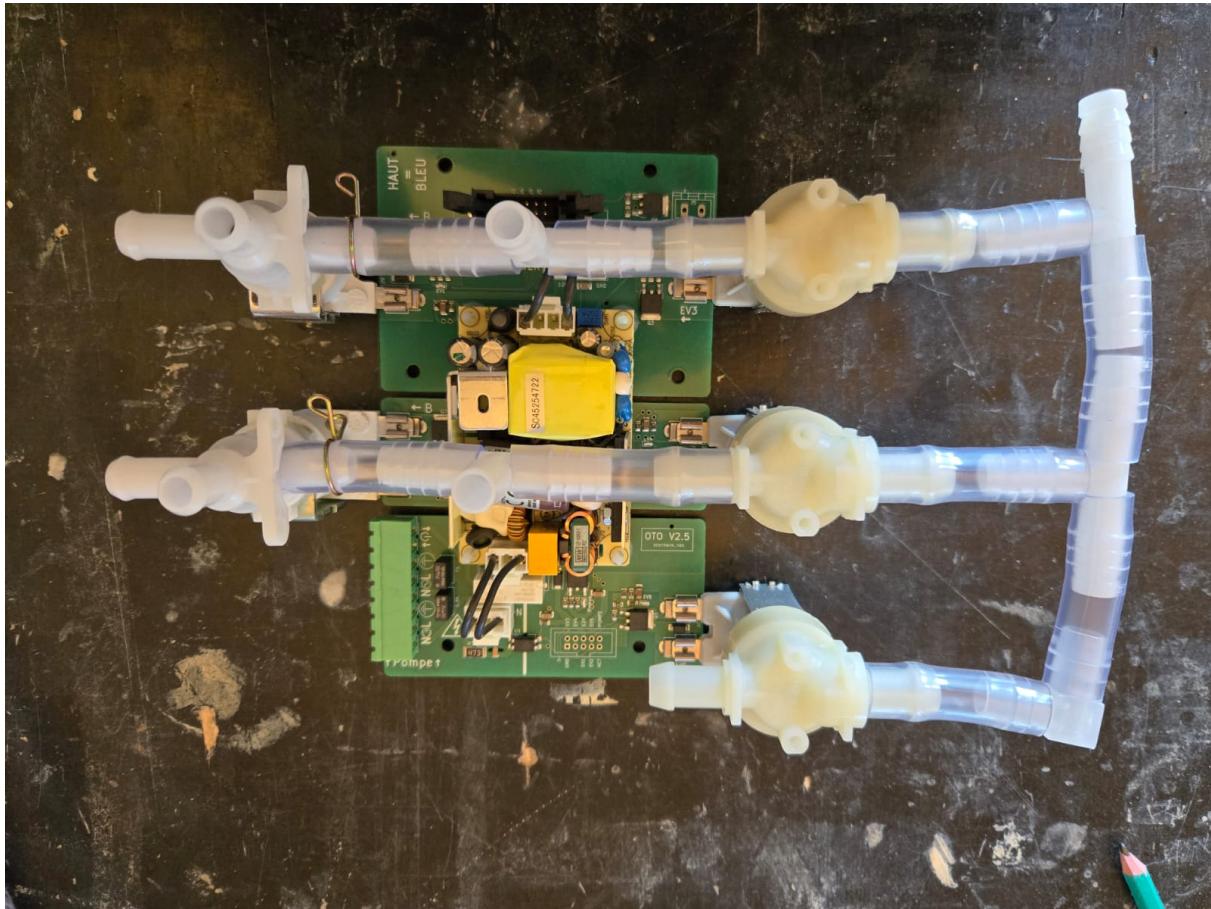


FIGURE 2.15 – Carte MAIN du fauteuil OTO avec alimentation et électrovannes

### 2.6.2 Carte FRONT : Interface utilisateur et contrôle intelligent

La carte FRONT embarque l'intelligence du système autour d'un microcontrôleur RP2040. Elle gère l'interaction avec l'utilisateur et le contrôle précis des pressions :

- **Microcontrôleur RP2040** : Traitement en temps réel des consignes et supervision générale
- **Capteurs de pression** : Surveillance continue des pressions dans les cellules haute et basse
- **Matrices LED** : Affichage visuel des niveaux de pression et de l'état du système
- **Zones tactiles** : Interface de configuration des pressions maximales par zone
- **Réception télécommande** : Communication avec la télécommande utilisateur

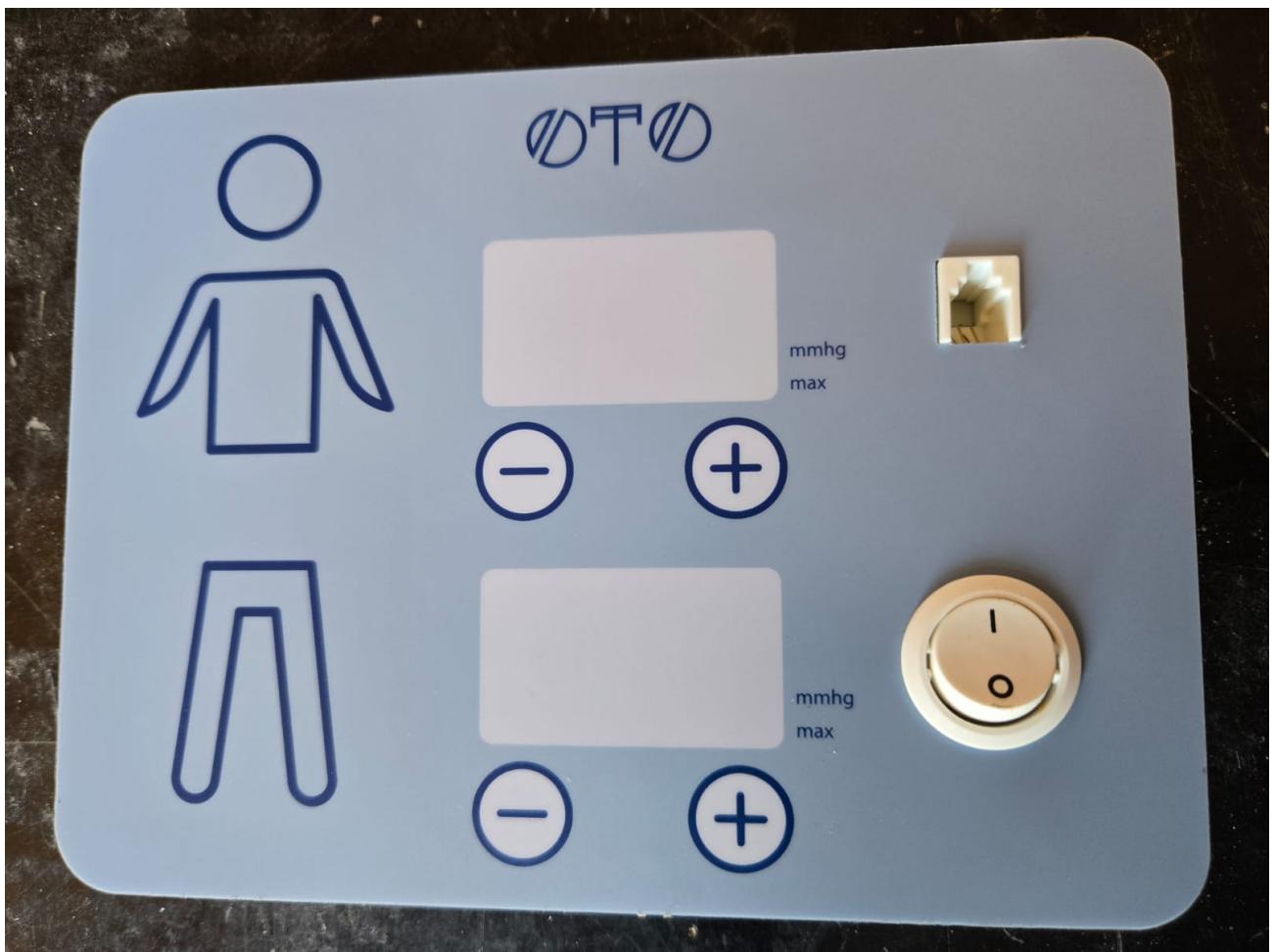


FIGURE 2.16 – Carte FRONT du fauteuil OTO vue de face

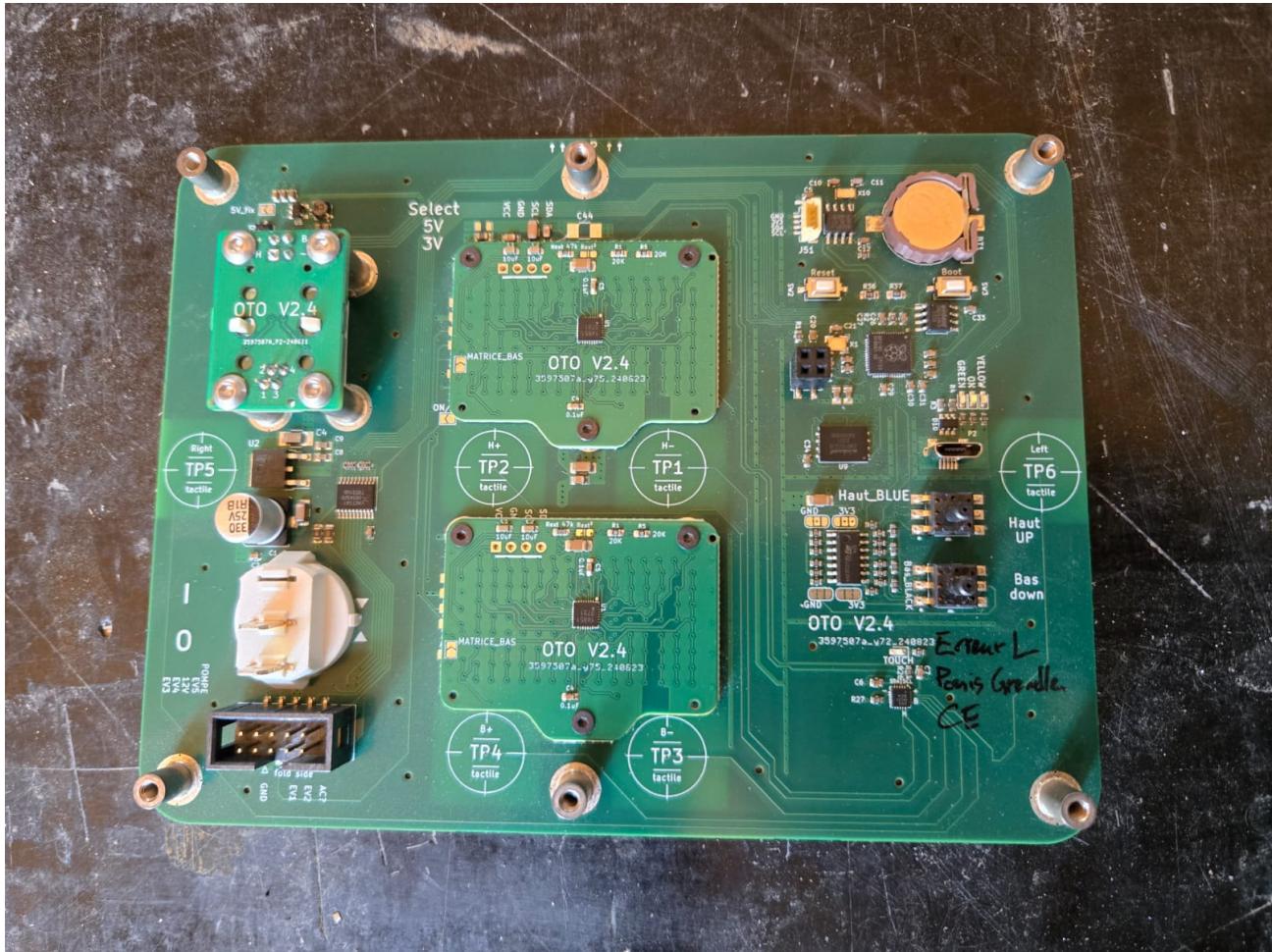


FIGURE 2.17 – Carte FRONT du fauteuil OTO vue de derrière

## 2.7 Principe de fonctionnement

### 2.7.1 Configuration des limites

L'utilisateur ou le thérapeute configure via les zones tactiles les pressions maximales autorisées pour chaque section (haute et basse). Ces valeurs sont stockées dans le microcontrôleur et visualisées sur les matrices LED.

### 2.7.2 Télécommande

Grâce à la télécommande, l'utilisateur peut ajuster en temps réel l'intensité de l'étreinte selon son ressenti, dans les limites pré-configurées. Les deux sections (haute et basse) gonflables fonctionnent de manière totalement indépendante.

### 2.7.3 Validation clinique et déploiement

Depuis 2021, LABAA collabore étroitement avec le Centre d'Excellence Autisme et Troubles du Neurodéveloppement (EXAC-T) du CHRU de Tours, dirigé par le Professeur Bonnet-Brilhault. Cette collaboration permet d'affiner la conception du fauteuil OTO grâce aux retours d'experts en neurodéveloppement et aux observations cliniques. Les échanges portent notamment sur l'optimisation des paramètres techniques (niveaux de pression, réduction du bruit, gestion de la luminosité) pour maximiser les bénéfices thérapeutiques.

Depuis le lancement commercial en 2021, plus de 100 fauteuils OTO ont été déployés dans des environnements diversifiés. Les établissements médico-sociaux (IME, FAM, MAS, SESSAD, ESAT) constituent le cœur de marché historique, suivis par les hôpitaux et centres spécialisés qui intègrent OTO dans leurs parcours de soins. Depuis 2024, l'ouverture vers les espaces publics marque une nouvelle étape avec des installations dans les aéroports parisiens, des musées, universités et des entreprises soucieuses d'accessibilité. Cette diversification des contextes d'usage témoigne de la polyvalence du dispositif et de sa capacité à s'adapter aux besoins spécifiques de chaque environnement.

# Chapitre 3

## Missions et réalisations

### 3.1 Fiabilisation du système électronique

#### 3.1.1 Analyse des cas de défaillance terrain

Durant la période de commercialisation, plusieurs cas de défaillance de l'alimentation 3.3V ont été identifiés sur le terrain. Ces incidents ont nécessité des interventions SAV urgentes et compromis la disponibilité du dispositif pour les utilisateurs.

##### Recensement de quelques incidents

Client	Date	Symptômes	Impact	Solution
CHRU Tours	21/03/2024	Arrêt total 3.3V après remplacement repose-pied	Indisponibilité immédiate	Remplacement repose-pied CE 36
École Blain	01/07/2024	Aucune alimentation processeur, traces thermiques, fumée composant D2	Perte totale fonctionnalité	Réparation sur site

TABLE 3.1 – Historique des défaillances alimentation 3.3V

##### Évaluation de l'impact et priorisation

L'analyse des incidents révèle un impact significatif nécessitant une attention prioritaire pour la résolution :

- **Impact sécuritaire** : Échauffement possiblement dangereux
- **Impact opérationnel** : Indisponibilité totale du fauteuil
- **Impact économique** : Interventions SAV urgentes et coûteuses

#### 3.1.2 Caractérisation technique de la défaillance

##### Comportement observé en défaillance

Le mode de défaillance présente des caractéristiques techniques spécifiques :

- **Symptôme principal** : Absence totale d'alimentation 3.3V sur le rail principal
- **Échauffement localisé** : Point chaud détecté en haut à droite de la carte front
- **Défaillance cascade** : Fumée du composant D2 lors de tentative de programmation USB ou pendant l'utilisation
- **Traces physiques** : Décoloration thermique visible sur le sticker de la carte

- **Irréversibilité** : Défaillance permanente nécessitant remplacement de composants

### Comportement attendu du système d'alimentation

Le système d'alimentation est conçu pour fournir une alimentation 3.3V stable selon le schéma suivant :

1. **Conversion primaire** : 230V AC → 12V DC via la carte MAIN
2. **Conversion secondaire** : 12V DC → 5V DC via régulateur linéaire
3. **Multiplexage** : Sélection automatique entre rail 5V principal et 5V USB via diode BAT54
4. **Conversion finale** : 5V → 3.3V via régulateur à découpage LM3671MF-3.3
5. **Distribution** : Alimentation des composants logiques (RP2040, LED, capteurs)

En fonctionnement normal, le rail 3.3V doit fournir une tension stable de  $3.3V \pm 3\%$  avec une ondulation résiduelle inférieure à 50mV crête-à-crête.

### Défi de la reproductibilité

La complexité de l'investigation réside dans le caractère non reproductible de la défaillance :

- **Aléatoire temporel** : Pas de corrélation identifiée avec la durée d'utilisation
- **Aléatoire contextuel** : Défaillances dans des conditions d'usage différentes
- **Absence de pattern** : Pas de relation évidente avec les conditions environnementales
- **Tests nominaux** : Cartes de production passent tous les tests de validation

Cette non-reproductibilité nécessite une approche d'investigation basée sur l'analyse post-mortem des cartes défaillantes et l'identification des points de fragilité potentiels par analyse théorique.

### 3.1.3 Investigation méthodologique des pannes

Historique long terme de la problématique :

Période	Événement	Actions menées
Avril 2024	Premier bug isolé	Identification d'un cas de défaillance sur le terrain
Juin 2024	Deuxième bug confirmé	Validation que le problème n'est pas isolé
Juillet-Septembre	Investigation interne	Tentatives d'identification des sources et reproduction de la panne
Octobre 2024	Collaboration externe	Intervention bureau d'études Agilack : recherche approfondie, mise en place de filtrage capacitif
Novembre 2024	Mise en production	Réception et déploiement de 50 cartes avec modifications
Janvier 2025	Récurrence du problème	3 nouveaux cas de défaillance sur les cartes modifiées
Mars 2025	Mon arrivée en stage	Reprise complète de l'investigation avec approche méthodologique

TABLE 3.2 – Chronologie des investigations sur les défaillances d'alimentation

#### Bilan des tentatives précédentes :

Les investigations menées par le bureau d'études externe (Agilack) avaient exploré plusieurs pistes :

- **Analyse comportementale** : Caractérisation du mode de défaillance
- **Filtrage capacitif** : Ajout de condensateurs de découplage sur l'alimentation
- **Vérification routage** : Contrôle des connexions et impédances PCB
- **Tests de contraintes** : Validation des spécifications composants

Malgré ces efforts, aucune solution technique viable n'avait été identifiée, et la récurrence des pannes en janvier 2025 sur les cartes "corrigées" a confirmé la nécessité d'une approche d'investigation alternative.

#### Nouvelle méthodologie adoptée :

Mon intervention en mars 2025 s'est basée sur une approche différente :

- **Investigation indépendante** : Reprise à zéro de l'analyse sans a priori
- **Focus sur les contraintes système** : Analyse des courants et charges réelles
- **Validation expérimentale** : Tests de validation systématiques
- **Solutions alternatives** : Exploration de nouvelles architectures d'alimentation

#### Plan d'action méthodologique adopté

À mon arrivée en mars 2025, j'ai établi un plan d'action structuré pour traiter de manière systématique la problématique des défaillances d'alimentation :

**Phase 1 : Analyse des sources communes**

- **Exploitation du volume** : Analyse comparative sur un grand nombre cartes pour identifier des patterns récurrents
- **Corrélation temporelle** : Recherche de liens entre date de fabrication, lot composants et défaillances
- **Cartographie des défaillances** : Localisation physique des composants défaillants sur PCB
- **Analyse post-mortem** : Décapsulation et inspection visuelle des composants critiques

**Phase 2 : Optimisation préventive des composants critiques**

- **Sourcing BAT54 → PMEG2005CT** : Remplacement par composant à plus fort courant ( $100\text{mA} \rightarrow 250\text{mA}$ )
- **Ajout slow start ENABLE** : Circuit RC pour démarrage séquentiel et élimination des transitoires
- **Filtrage capacatif renforcé** : Condensateurs de découplage additionnels sur rails critiques
- **Dimensionnement thermique** : Calculs de dissipation et optimisation layout PCB

**Phase 3 : Réduction de l'impact utilisateur**

- **Protection PTC fusible** : Limitation automatique des courants de défaillance à  $300\text{mA}$
- **Arrêt sécurisé** : Coupure propre pour éviter l'échauffement dangereux
- **Signalisation défaut** : Indicateurs LED pour diagnostic rapide
- **Réarmement automatique** : Reprise de fonctionnement après refroidissement

**Phase 4 : Élimination des facteurs externes**

- **Protection ESD** : Révision du routage et ajout de suppresseurs de surtension
- **Alimentation programmation** : Isolement galvanique USB/secteur pendant développement
- **Filtrage EMI/EMC** : Inductances de mode commun et condensateurs de ligne
- **Validation environnementale** : Tests de température, humidité et vibrations

**Phase 5 : Préparation solution alternative**

- **Emplacement PCB externe** : Zone dédiée pour modules d'alimentation de substitution
- **Interface standardisée** : Connectique universelle pour tests comparatifs
- **Validation modulaire** : Tests Adafruit MP3610, TI TLV62569 en conditions réelles
- **Intégration définitive** : Préparation de la révision PCB avec alimentation optimisée

### 3.1.4 Défaillance de la diode BAT54



FIGURE 3.1 – BAT54 double diode Schottky

#### Rôle de la diode BAT54 dans l'architecture d'alimentation

La diode double BAT54 (Infineon Technologies) joue un rôle de \*\*circuit de sélection d'alimentation\*\* pour le rail 3.3V du système. Elle permet de sélectionner automatiquement la source d'alimentation disponible entre :

- **Rail 5V principal** : Issu de l'alimentation secteur ( $12V \rightarrow 5V$ )
- **Rail 5V USB** : Alimentation directe via port USB pour programmation/maintenance

#### Principe de fonctionnement :

Lorsque les deux sources sont présentes, la diode ayant la tension la plus élevée conduit naturellement, assurant une \*\*commutation automatique par fonction OU\*\* sans composant actif. Cette architecture permet la programmation et le debugging via USB même lorsque l'alimentation principale est défaillante.

#### Problème de dimensionnement :

La diode BAT54 présente une limitation fondamentale pour cette application :

- **Courant maximum BAT54** : 200 mA total soit 100 mA par diode
- **Consommation mesurée du rail 3.3V** : 124,3 mA en pic

Ce sous-dimensionnement peut provoquer une dégradation progressive du composant, avec échauffement anormal et chute de tension excessive, compromettant la stabilité de l'alimentation 3.3V.

#### Solution technique : remplacement de la diode BAT54

La BAT54 a été remplacée par la PMEG2005CT (Nexperia) pour résoudre la limitation en courant :

Paramètre	BAT54	PMEG2005CT
Courant forward max	200 mA	500 mA
Courant par diode	100 mA	250 mA
Tension forward @ 100mA	0.4V	0.27V
Résistance thermique	625°C/W	280°C/W
Stock Octopart	1 269 609	615 247
Prix unitaire	0.059€	0.081€

TABLE 3.3 – Amélioration des caractéristiques de la diode

### Impact économique et approvisionnement :

Le remplacement de la BAT54 par la PMEG2005CT présente un impact économique négligeable pour la production. Avec un surcoût unitaire de seulement 0.022€ par carte, l'impact sur le coût total du fauteuil reste marginal. La disponibilité en stock des deux composants (plus de 600 000 unités pour la PMEG2005CT) garantit un approvisionnement sécurisé sans risque de rupture. Cette transition technique peut donc être mise en œuvre immédiatement sans contrainte budgétaire ou logistique significative.

#### 3.1.5 régulateur LM3671

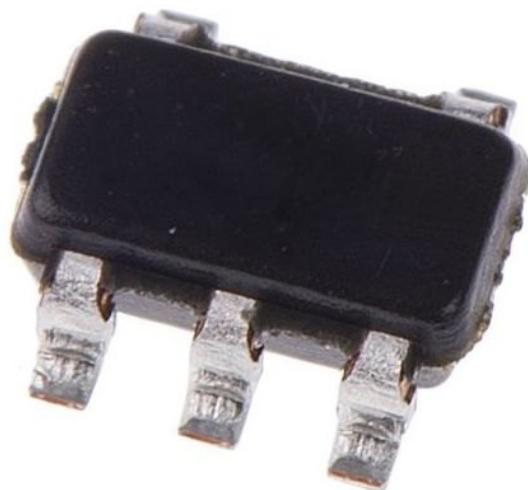


FIGURE 3.2 – Régulateur à découpage LM3671MF-3.3

Le régulateur à découpage LM3671MF-3.3 est utilisé pour fournir le rail 3.3V à partir du rail 5V principal. Il est conçu pour délivrer jusqu'à 600 mA avec une efficacité élevée.

Le régulateur est bien dimensionné pour la consommation globale du rail 3.3V :

#### Analyse de la charge du rail 3.3V :

- **RP2040 (microcontrôleur)** : Consommation nominale : 25-45 mA
- **Winbond W25N01GVZEIG (mémoire Flash NAND)** : Consommation en lecture : 15 mA
- **STMicroelectronics LM324DT (amplificateur opérationnel quad)** : Consommation totale (4 amp) : 6 mA

- **Matrices LED (affichage)** : Consommation max : 360 mA (luminosité max), moyenne : 240 mA

#### Bilan de consommation :

- **Consommation totale calculée** :  $45 + 15 + 360 + 6 = 426 \text{ mA}$
- **Consommation pic mesurée** : 420 mA (démarrage + luminosité max)
- **Capacité régulateur LM3671** : 600 mA maximum
- **Marge de sécurité** : 174 mA - Le régulateur est correctement dimensionné

#### Problème d'échauffement :

En mode dysfonctionnement, le régulateur LM3671 entre en limitation de courant, provoquant un échauffement :

$$P_{diss} = (V_{in} - V_{out}) \times I_{limit} = (5V - 3.3V) \times 0.8A = 1.63W \quad (3.1)$$

#### Solutions techniques : protection contre l'échauffement

##### Protection thermique par fusible PTC

Pour éliminer le risque d'échauffement dangereux, un fusible PTC réarmable a été intégré :

##### Composant sélectionné : Littelfuse 1812L010DR

- Courant de déclenchement : 300 mA
- Courant de maintien : 150 mA
- Tension nominale : 6V

##### Justification du seuil :

- Consommation normale : <200 mA
- Pics transitoires : 250-285 mA (autorisés)
- Courants de défaillance : >300 mA (coupés)
- Marge de sécurité : 15 mA au-dessus des pics normaux

##### Validation expérimentale du fusible PTC

##### Protocole de test :

- **Résistance de shunt** : 1 pour mesure de courant
- **Alimentation stabilisée** : Limitation en courant configurable
- **Instruments** : Oscilloscope VOLTCRAFT DSO-1202D, thermomètre infrarouge

##### Procédure expérimentale :

1. Configuration circuit de test avec fusible PTC 1812L010DR
2. Augmentation progressive du courant jusqu'au seuil de déclenchement
3. Provocation d'un court-circuit contrôlé
4. Mesures simultanées : courant

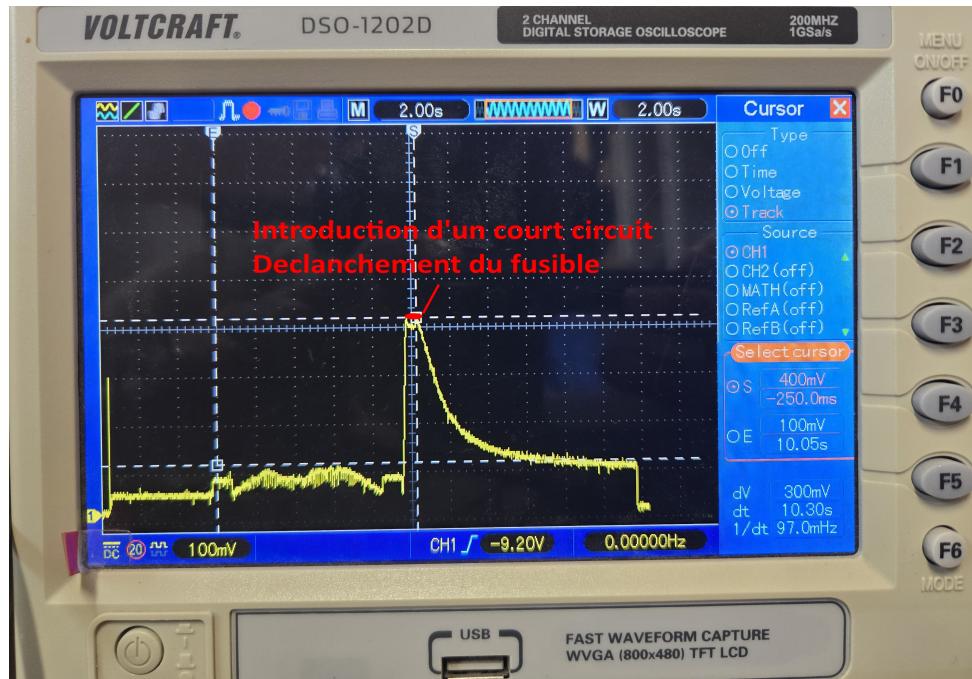


FIGURE 3.3 – Capture oscilloscope - Déclenchement du fusible PTC à 300mA

#### Résultats de validation :

- Courant de déclenchement mesuré : 300 mA (spécification :  $300 \text{ mA} \pm 15 \text{ mA}$ )
- Temps de réponse :  $< 500 \text{ ms}$
- Température maximale :  $35^\circ\text{C}$  (sécuritaire)
- Réarmement automatique : Fonctionnel après refroidissement

#### Circuit de démarrage progressif

Le régulateur LM3671 possède une entrée ENABLE avec un seuil de déclenchement fixé à 1.06V. Un circuit RC a été intégré pour créer un retard contrôlé au démarrage.

#### Principe de fonctionnement :

Le condensateur se charge exponentiellement selon la loi :

$$V_C(t) = V_{5V} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (3.2)$$

Le régulateur 3.3V ne s'active que lorsque  $V_C$  atteint 1.06V, soit :

$$t_{activation} = -RC \ln \left(1 - \frac{1.06}{5}\right) \quad (3.3)$$

#### Optimisation expérimentale :

Configuration	Temps calculé	Temps mesuré
R=15k, C=9.4F	33ms	60ms
R=100k, C=4.7F	112ms	200ms

TABLE 3.4 – Validation du démarrage séquentiel

Configuration finale retenue :  $R=100\text{k}\Omega$ ,  $C=4.7\mu\text{F}$

Cette solution garantit :

- Stabilisation du rail 5V sur 200ms avant activation du 3.3V
- Élimination des courants d'appel simultanés
- Suppression des oscillations au démarrage
- Séquencement prévisible des alimentations

### 3.1.6 Validation des améliorations

Un nouveau lot de 25 cartes intégrant les modifications a été commandé pour validation :

#### Résultats des modifications :

Les modifications apportées ont produit les effets techniques attendus :

- **Démarrage différé** : Fonctionnel, séquencement 5V puis 3.3V respecté
- **Réduction des transitoires** : Oscillations de démarrage éliminées
- **Amélioration thermique** : Diode PMEG2005CT opère dans ses spécifications
- **Sécurité renforcée** : Protection PTC évite l'échauffement dangereux

Cependant, le problème fondamental d'alimentation persiste sur 32% des cartes testées, indiquant la nécessité d'une approche architecturale plus profonde pour la suite du projet.

### 3.1.7 Solution alternative : tests d'alimentations externes

Face aux difficultés persistantes avec l'alimentation LM3671, une approche alternative a été mise en place. Un emplacement libre a été ajouté sur la nouvelle révision de carte pour permettre le test de modules d'alimentation externes.

#### Validation expérimentale des alimentations Adafruit

Des tests préliminaires ont été effectués en remplaçant directement l'alimentation défaillante sur des cartes SAV par des modules Adafruit. Les résultats ont été concluants :

- **Tests de court-circuit** : Sécurités intégrées fonctionnelles
- **Stabilité thermique** : Pas d'échauffement anormal en charge nominale
- **Robustesse** : Fonctionnement stable sur plus de 3h de test continu

#### Stratégie de développement modulaire

La nouvelle approche consiste à :

1. **Emplacement libre dédié** : Zone PCB standardisée pour modules d'alimentation externes
2. **Tests comparatifs** : Évaluation de différentes topologies d'alimentation
3. **Soudure directe** : Intégration du module retenu sur la carte de production
4. **Intégration finale** : Conception PCB intégrant directement l'alimentation validée

### Comparaison économique des solutions d'alimentation

Coût de l'alimentation actuelle (LM3671) :

Référence	Désignation	Valeur	Prix 50 unités (€)
C37	Condensateur céramique	470µF	0.14
C38-C41,C49	Condensateur céramique	4.7µF	$1.29 \times 5$
C47	Condensateur céramique	220pF	0.34
C48	Condensateur céramique	10µF	3.01
R30	Résistance	100kΩ	0.10
L1	Inductance	2.2µH	7.65
U5	Régulateur LM3671	-	35.70
<b>Total 50 unités</b>	<b>Solution actuelle</b>	-	<b>48.23€</b>
<b>Prix unitaire</b>	<b>Solution actuelle</b>	-	<b>0.96€</b>

TABLE 3.5 – Coût de la solution d'alimentation actuelle

Solutions alternatives à évaluer :

Module	Tension in	Courant max	Prix estimé (€)
Texas Instruments TLV62569DBVR	2.5-5.5V	2A	3.95
MPM3610 Buck Converter (Adafruit)	3.5-21V	1.2A	5.95

TABLE 3.6 – Modules d'alimentation alternatifs à tester

Cette approche modulaire permettra de sélectionner la solution optimale en fonction du compromis prix/performance/fiabilité avant l'intégration définitive dans le design final.

## 3.2 Activités SAV et remise en état

Parallèlement à l'analyse des causes, j'ai effectué la remise en état de cartes défectueuses :

- **Diagnostic et réparation** : Remise en état de cartes avec défaillance alimentation 3.3V sond nuts et autres
- **Développement testeur télécommande** : Création d'un banc de test télécommande à partir d'une carte SAV réparée
- **Retour d'expérience terrain** : Analyse des modes de défaillance pour validation des hypothèses
- **Documentation des pannes** : Création d'une base de données des défauts pour amélioration continue

## 3.3 Processus de production

**Objectif** : Optimiser qualité et temps de production des sous-ensembles électroniques.

### 3.3.1 Développement PCB télécommande optimisé

La télécommande OTO constitue l'interface principale entre l'utilisateur et le fauteuil. Cependant, le processus d'assemblage traditionnel par sertissage de câbles présente des défauts qualitaires récurrents et des temps de montage importants.

### Problématique de l'assemblage traditionnel

Méthode conventionnelle par sertissage :

Élément	Coût unitaire (€)	Temps (min)
Câbles (4 unités)	$0.40 \times 4 = 1.60$	-
Sertissage et câblage	-	2.0
Reste du montage	-	1.67
<b>Total temps</b>		<b>3.67</b>
<b>Coût main-d'œuvre</b>	$3.67 \times 1.00 = 3.67$	
<b>Total télécommande</b>	<b>5.27</b>	

TABLE 3.7 – Coût de l'assemblage traditionnel par télécommande

Défauts qualité identifiés :

- **Multiplicité des sources d'erreur** : Processus multi-étapes sensible aux variations
- **Contraintes de sertissage** : Respect strict du sens des cosses (repli vers le haut)
- **Positionnement** : Écartement housse silicone nécessaire pour insertion profonde
- **Force de pliage** : Pliage insuffisant des cosses = risque SAV
- **Variabilité opérateur** : Qualité dépendante de l'expertise technique
- **Temps de retouche** : temps supplémentaires par défaut détecté

### Solution PCB arcade\_top développée

Le PCB arcade\_top élimine le sertissage en intégrant directement les connexions des boutons arcade :

Principe technique :

- **Trous métallisés** : Accueillent directement les pins des boutons arcade
- **Soudure directe** : Liaison fiable sans connectique intermédiaire
- **Routage intégré** : Connexions PCB remplacent les câbles

Analyse économique comparative :

Élément arcade_top	Coût unitaire (€)	Temps (min)
PCB nus (5 unités)	$19.61 \div 5 = 3.92$	-
PCBA assemblage	$1.36 \div 5 = 0.27$	-
Montage télécommande	-	2.5
<b>Coût main-d'œuvre</b>	$2.5 \times 1.00 = 2.50$	2.5
<b>Total télécommande</b>	<b>6.69</b>	<b>2.5</b>

TABLE 3.8 – Coût de l'assemblage avec PCB arcade\_top

Bilan des améliorations :

Métrique	Méthode traditionnelle	PCB arcade_top	Differences
Temps assemblage	3.67 min	2.5 min	-1.17 min
Coût production	5.27€	6.69€	+1.42€

TABLE 3.9 – Comparaison des performances de production

Le surcoût de 1.42€ par télécommande est compensé par :

- **Réduction temps production** :  $1.17 \text{ min} \times 1\text{€}/\text{min} = 1.17\text{€}$  économisés
- **Élimination retouches**
- **Amélioration image qualité** : Réduction interventions SAV client

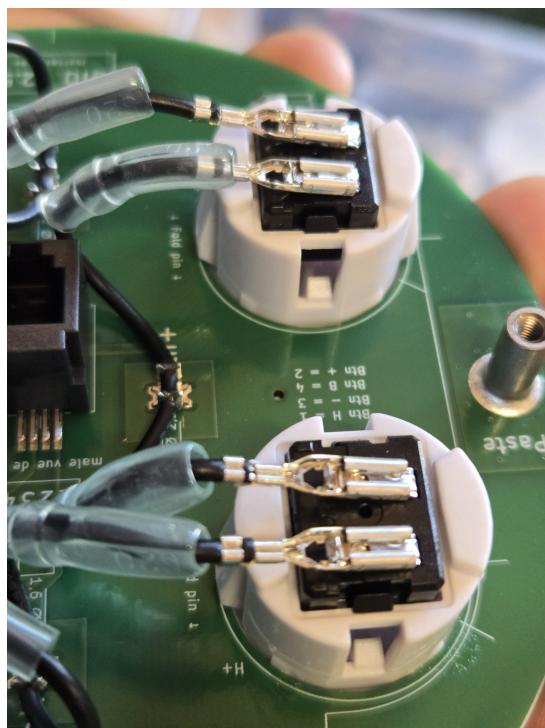
#### **Validation terrain et retour d'expérience :**

Suite à l'intégration de la solution PCB arcade\_top dans la production, les résultats observés confirment les améliorations attendues :

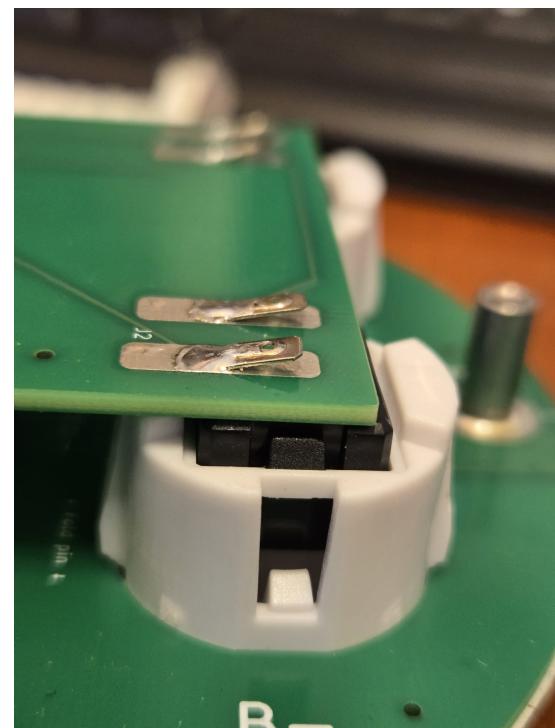
- **Réduction significative du temps de montage** : Le processus d'assemblage des télécommandes est désormais plus rapide grâce à l'élimination de l'étape de sertissage
- **Diminution des sources d'erreur** : La suppression des opérations manuelles de câblage et sertissage a considérablement réduit les défauts de production
- **Amélioration de la répétabilité** : Le processus est devenu plus robuste et moins dépendant du savoir-faire de l'opérateur

Le surcoût du PCB arcade\_top reste acceptable au regard des gains obtenus en termes de qualité et de productivité. Cette solution technique répond parfaitement aux objectifs d'industrialisation en apportant la fiabilité nécessaire à une production en série tout en maintenant une viabilité économique.

L'entreprise a décidé d'adopter définitivement cette solution pour toute la production future, confirmant ainsi la pertinence de l'approche développée.



(a) Télécommande avec câblage



(b) Télécommande avec PCB arcade\_top

FIGURE 3.4 – Comparaison des solutions de télécommande

## 3.4 Développement d'outils de production

Dans le cadre de l'optimisation de la production et du développement, j'ai créé plusieurs outils destinés à améliorer l'efficacité des processus techniques et faciliter la transition vers une production industrialisée.

### 3.4.1 Développement d'un outil de programmation et diagnostic

**Objectif :** Automatiser la programmation des cartes et faciliter la maintenance client.

### 3.4.2 Architecture du système embarqué

#### Plateforme matérielle

L'outil de programmation repose sur un Raspberry Pi 4B avec les spécifications suivantes :

- **Processeur** : Broadcom BCM2711 - Quad-core Cortex-A72 @ 1.5GHz
- **Mémoire** : 4GB LPDDR4-3200 SDRAM
- **Connectivité** : USB 3.0 pour interface RP2040, Ethernet pour télémétrie
- **GPIO** : 40 broches pour interface utilisateur et contrôle
- **Stockage** : µSD 32GB

#### Interface utilisateur minimaliste

L'interface se compose de :

- **Bouton-poussoir** : GPIO 18, pull-up interne activé
- **LED RGB** : PWM sur GPIO 12, 13, 19 (Rouge, Vert, Bleu)
- **Écran OLED 128x64** : Communication I2C pour affichage de statut (optionnel)

## Algorithme de programmation automatisée

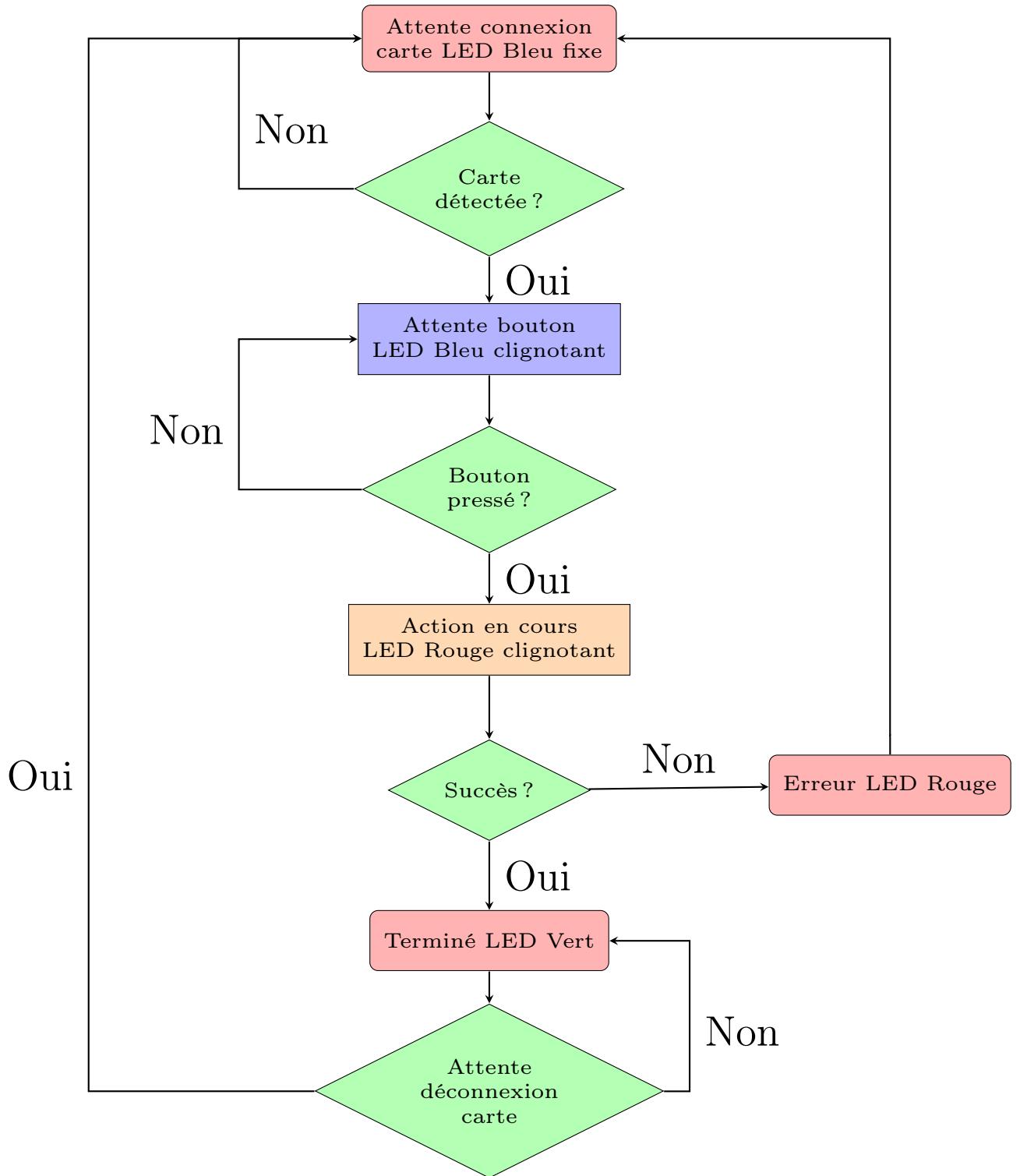
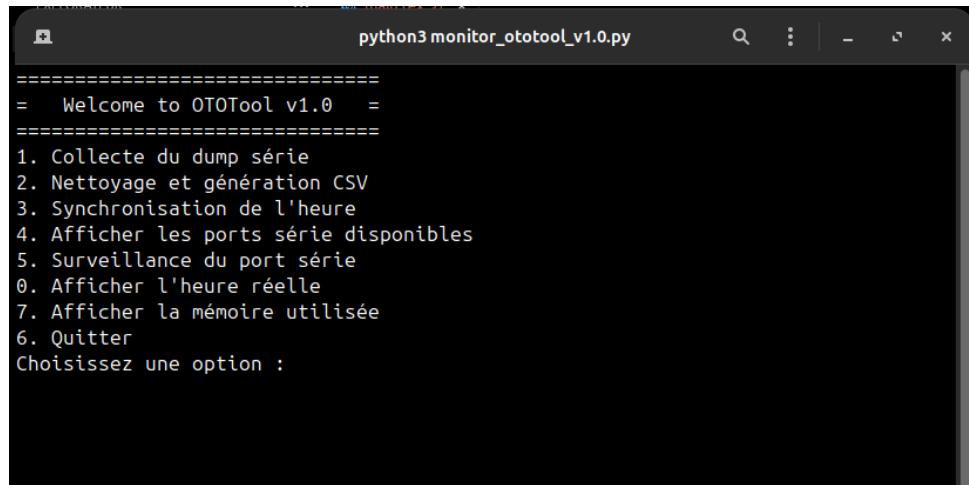


FIGURE 3.5 – Diagramme de flux de l'outil de programmation automatisée

### 3.4.3 Interfaces utilisateur développées

#### Interface en ligne de commande (CLI)



```
python3 monitor_otool_v1.0.py
=====
=   Welcome to OTOTool v1.0   =
=====
1. Collecte du dump série
2. Nettoyage et génération CSV
3. Synchronisation de l'heure
4. Afficher les ports série disponibles
5. Surveillance du port série
0. Afficher l'heure réelle
7. Afficher la mémoire utilisée
6. Quitter
Choisissez une option :
```

FIGURE 3.6 – Interface terminal de l’outil OTOTool v1.0

L’interface terminal propose un menu interactif avec les fonctionnalités suivantes :

1. **Collecte du dump série** : Extraction automatique des données de diagnostic
2. **Nettoyage et génération CSV** : Traitement et formatage des logs
3. **Synchronisation de l’heure** : Mise à jour de l’horloge RTC embarquée
4. **Surveillance du port série** : Monitoring temps réel

#### Interface graphique (GUI)

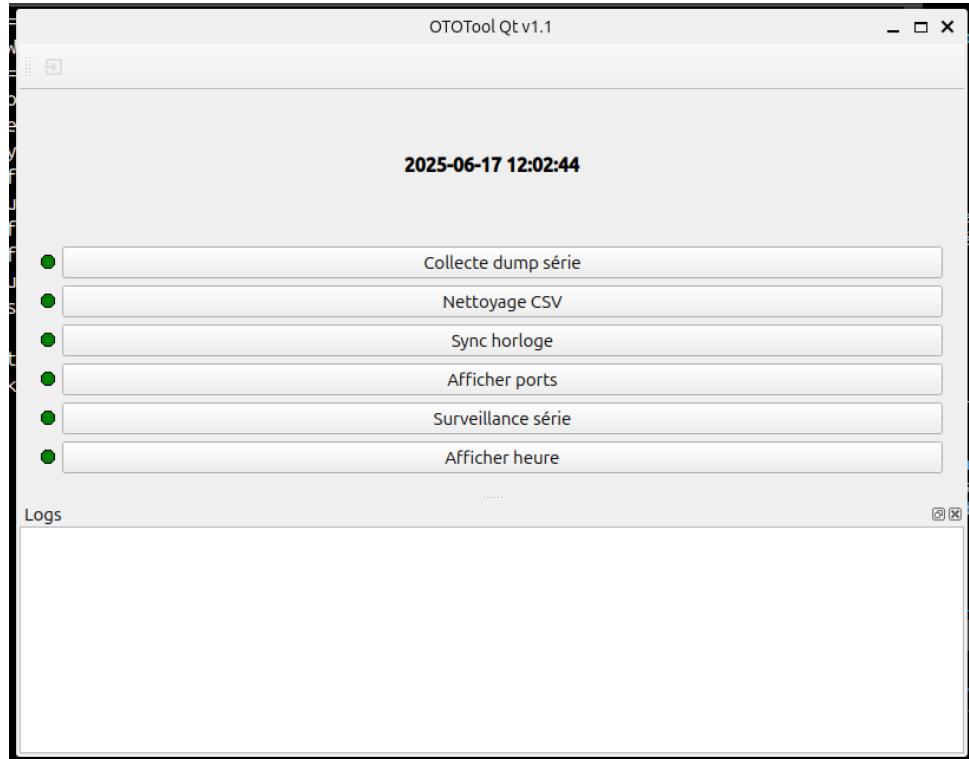


FIGURE 3.7 – Interface graphique OTOTool Qt v1.1

L'interface Qt offre une approche plus intuitive avec :

- **Boutons d'action uniques** : Interface simple pour opérateurs non-techniques
- **Horodatage automatique** : Affichage temps réel
- **Indicateurs visuels** : LEDs pour validation des étapes
- **Zone de logs intégrée** : Suivi des opérations en cours

### 3.4.4 Bilan des fonctionnalités

L'outil développé permet désormais de répondre aux besoins de programmation et diagnostic. Le processus de programmation automatisé permet de programmer rapidement une série de repose-pieds en production et peut être transporté en intervention chez un client pour récupérer les logs et mettre à jour le firmware. Cette amélioration est particulièrement critique pour les interventions SAV chez les clients.

## 3.5 Modernisation de l'architecture firmware

L'objectif principal était d'améliorer la plateforme de développement et de structurer le code de manière modulaire pour assurer la maintenabilité du produit industriel.

### 3.5.1 Migration Arduino IDE vers PlatformIO

#### Justification technique de la migration

Critère	Arduino IDE	PlatformIO
Gestion dépendances	Manuelle	Automatique avec versioning
Structure projet	Fichiers .ino	Architecture modulaire
Tests unitaires	Aucun	Framework Unity intégré
Débogage	Limité	CMSIS-DAP intégré VS Code
Analyse statique	Aucune	Cppcheck + PVS-Studio
Intégration continue	Impossible	GitHub Actions natif
Cross-compilation	Complexe	Multi-plateforme automatique
Gestion librairies	Manuelle	Dépendances sémantiques

TABLE 3.10 – Comparaison Arduino IDE vs PlatformIO

#### Configuration PlatformIO

La configuration adoptée privilégie la robustesse et la maintenabilité :

```

1 [env:pico]
2 platform = https://github.com/maxgerhardt/platform-raspberrypi.git
3 board = pico
4 framework = arduino
5 build_type = debug
6 debug_tool = cmsis-dap
7 debug_speed = 1000
8 board_build.core = earlephilhower
9 monitor_speed = 115200
10 upload_protocol = picotool
11 upload_port = /dev/picoto
12 build_flags =

```

```

13      -OO -g3
14      -D PICO_STDIO_USB=1 -D PICO_STDIO_UART=0
15      -D PICO_ENTER_USB_BOOT_ON_EXIT=1
16      -I src/ -I src/hardware/actuators/display
17      -I src/hardware/actuators/ev
18      -I src/hardware/sensors/clock_rtc
19      -I src/hardware/sensors/memory
20      -I src/hardware/sensors/pads
21      -I src/hardware/sensors/press
22      -I src/hardware/sensors/remote
23      -I src/hardware/utils
24      -I src/software/app
25      -I src/software/windows/main
26      -I src/software/windows/sleep
27      -I src/software/windows/press
28      -I src/software/app/app_events/air
29 lib_deps =
30     Wire
31     adafruit/RTClib@^2.1.1
32     adafruit/Adafruit_BusIO@^1.14.1
33     arduino-libraries/SD@^1.2.4
34     paulstoffregen/OneWire@^2.3.5
35     adafruit/Adafruit_Kypad@^1.3.0
36     adafruit/Adafruit_MPR121@^1.1.1
37     adafruit/Adafruit_GFX_Library@^1.11.5
38     squaresausage/Winbond_W25N@^0.2.5
39     adafruit/Adafruit_IS31FL3731_Library@^2.0.2

```

Listing 3.1 – Configuration PlatformIO pour le projet OTO

### 3.5.2 Restructuration modulaire

#### Architecture en librairies réutilisables

La refactorisation du code monolithique s'articule autour de 8 modules spécialisés :

- **Module APP** : Orchestrateur principal et machines à états de session
- **Module AIR** : Gestion pneumatique et séquences temporisées sécurisées
- **Module PRESSURE** : Interface capteurs avec calibration automatique
- **Module REMOTE** : Communication télécommande matricielle anti-rebond
- **Module MEMORY** : Gestion logs circulaires et mémoire flash partitionnée
- **Module DISPLAY** : Affichage LED double-buffer avec anti-scintillement
- **Module PADS** : Interface tactile capacitive 12 électrodes
- **Module EV** : Contrôle électrovannes PWM avec gestion type NO/NC

#### Machines à états optimisées

L'architecture implémente trois machines à états principales garantissant la cohérence du système :

**Machine à états de session** gérant le cycle de vie utilisateur avec quatre états principaux : INIT\_PRESS (état initial forcé 2,8 secondes au démarrage), SLEEP (mode veille avec affichage minimal), PREVIEW (mode aperçu avec pixels et valeurs numériques), MAIN (interface complète avec barres de progression), et PRESS (mode interaction avec retour haptique temps réel).

**Machine à états pneumatique** contrôlant les séquences de gonflage/dégonflage avec protection multi-niveaux : séquence gonflage (EV ouverture → délai 50ms → pompe ON → surveillance pression → pompe OFF → délai 60ms → EV fermeture), protection emergency (arrêt immédiat si 3+ boutons simultanés), double-drop (dégonflage total par maintien H- et B- pendant 1 seconde), et priorité absolue (boutons moins prioritaires sur plus).

### 3.5.3 Gestion avancée des logs

#### Contexte et besoin client

Les établissements médico-sociaux expriment des besoins croissants de traçabilité pour le suivi médical, les rapports d'activité, la recherche clinique et la maintenance préventive.

#### Architecture mémoire Winbond W25N01GVZEIG

Paramètre	Valeur
Capacité totale flash	128 Mo (1 Gigabit)
Nombre total de pages	65 536 pages
Taille d'une page	2 048 octets
Nombre total de blocs	1 024 blocs
Pages par bloc	64 pages
Endurance	100 000 cycles/page
Rétention	10 ans à 25°C

TABLE 3.11 – Spécifications mémoire W25N01GVZEIG

#### Système de logs optimisé

Allocation	Capacité
Taille d'une ligne de log	10 octets
Pages allouées aux logs	32 768 pages (50%)
Mémoire allouée aux logs	64 Mo
Records par page	204 logs
Capacité totale de stockage	6 684 672 logs
Autonomie à 1 log/minute	12,7 ans
Endurance théorique	270 ans

TABLE 3.12 – Partitionnement mémoire pour logs

#### Structure de données optimisée :

```

1  typedef struct __attribute__((__packed__)) _log_storage {
2      uint32_t tm;           // Horodatage Unix (4 octets)
3      int16_t pressure_top; // Pression capteur haut en mmHg (2
4          octets)
5      int16_t pressure_bottom; // Pression capteur bas en mmHg (2
6          octets)
7      uint8_t cmd;           // Commande ex cut e (1 octet)
8      uint8_t error_code;    // Code d'erreur syst me (1 octet)
} log_storage;               // Total : 10 octets (optimisation
                            m moire)

```

Listing 3.2 – Structure de log embarqué optimisée

### Gestion circulaire avec wear-leveling

L'implémentation adopte une stratégie d'écriture circulaire avec répartition de l'usure :

```

1  bool LogManager::appendLog(const log_storage &lg) {
2      // Validation données entrantes
3      if (!validateLogData(lg)) {
4          return false;
5      }
6
7      // Avancement circulaire avec protection d'abordement
8      writeIndex = (writeIndex + 1) % usableRecords;
9
10     // Calcul position avec vérification bornes
11     uint32_t recIdx = writeIndex + METADATA_RECORDS;
12     uint32_t pageOffset = recIdx / RECS_PER_PAGE;
13     uint32_t byteOffset = (recIdx % RECS_PER_PAGE) * RECORD_SIZE;
14
15     // écriture atomique en trois phases
16     flash.pageDataRead(abs.getPage());                                // Phase 1: Lecture
17     flash.loadProgData(byteOffset, &lg, RECORD_SIZE);                // Phase 2: Buffer
18     flash.ProgramExecute(abs.getPage());                                // Phase 3: écriture
19
20     return saveIndex();    // Persistance dans les données
21 }
```

Listing 3.3 – Algorithme d'écriture circulaire sécurisé

#### 3.5.4 Tests fonctionnels et validation terrain

La validation du firmware s'est basée sur des tests fonctionnels en conditions d'usage intensif et des scénarios de stress. L'approche adoptée incluait des tests de stress (utilisation intensive), des scénarios d'usage limites (situations extrêmes), des corrections itératives (debug et résolution immédiate) et une validation terrain (tests sur fauteuils en production).

Cette approche pragmatique a permis d'identifier et de corriger les bugs tout en validant la stabilité du firmware dans les conditions d'utilisation réelles.

#### 3.5.5 Outils de debugging avancés

##### Module IDC Bridge - Analyseur de bus embarqué

Le module IDC Bridge permet l'analyse en temps réel des communications entre les cartes MAIN et FRONT via connecteur IDC 10 broches. Cet outil offre une visibilité

complète sur les signaux de contrôle du système pneumatique avec fonctionnalités de monitoring (signal pompe, électrovannes, alimentations, communication série), contrôle d'alimentation intégré (switch de coupure, mode maintenance, protection court-circuit) et interface utilisateur (LEDs d'état, points de test, connecteur débrochable).

### Création d'une Pico Probe pour débogage CMSIS-DAP

Pour améliorer les capacités de débogage du système embarqué RP2040, j'ai développé une sonde de débogage personnalisée basée sur un Raspberry Pi Pico W. Cette sonde implémente le protocole CMSIS-DAP, standard ARM pour le débogage et la programmation de microcontrôleurs.

La Pico Probe utilise un Raspberry Pi Pico W comme interface de débogage pour un autre RP2040. Le premier RP2040 (sonde) exécute le firmware CMSIS-DAP et communique avec l'ordinateur hôte via USB, tandis qu'il contrôle le second RP2040 (cible) via les signaux SWD (Serial Wire Debug).

#### Schéma de connexion :

Signal	Pico Probe (GP)	Cible RP2040
SWDIO	GP2	SWDIO
SWCLK	GP3	SWCLK
GND	GND	GND
3.3V (optionnel)	3V3(OUT)	3V3

TABLE 3.13 – Connexions Pico Probe vers cible RP2040

#### Configuration PlatformIO pour débogage :

```

1 [env:pico_debug]
2 platform = https://github.com/maxgerhardt/platform-raspberrypi.git
3 board = pico
4 framework = arduino
5 debug_tool = cmsis-dap
6 debug_port = /dev/ttyACM0
7 upload_protocol = cmsis-dap
8 build_type = debug
9 build_flags = -O0 -g3

```

Listing 3.4 – Configuration debug avec Pico Probe

#### Validation fonctionnelle :

La Pico Probe développée permet désormais :

- **Débogage pas-à-pas** : Points d'arrêt et inspection des variables en temps réel
- **Programmation flash** : Upload direct du firmware sans bouton BOOTSEL
- **Monitoring série** : Communication UART simultanée avec le débogage
- **Analyse des registres** : Accès complet aux registres RP2040 et périphériques

Cette solution de débogage sur mesure a considérablement accéléré le développement et la mise au point du firmware, permettant une résolution plus rapide des bugs et une meilleure compréhension du comportement temps réel du système.

# Chapitre 4

## Compétences développées

### 4.1 Compétences techniques

#### 4.1.1 Électronique

- Conception PCB avec KiCad 6.0.4
- Analyse de défaillances hardware
- Debug avec oscilloscope et multimètre
- Soudure CMS et composants traversants
- Calculs thermiques et dimensionnement composants

#### 4.1.2 Programmation embarquée

- Développement firmware C++ pour RP2040
- Architecture temps réel et machines à états
- Gestion mémoire flash avec optimisations cache
- Communication I2C, SPI, UART
- Tests unitaires et validation

#### 4.1.3 Développement logiciel

- Python pour outils d'automatisation
- Git pour la gestion de versions
- Migration Arduino vers PlatformIO
- Interface de debug série avancée

#### 4.1.4 Conception mécanique

- CAO avec Autodesk Inventor
- Impression 3D et prototypage rapide
- Conception de raccords et connectiques
- Validation mécanique et tests d'endurance

## 4.2 Compétences transversales

### 4.2.1 Approche systémique

- Vision globale des problématiques interconnectées
- Analyse de causes racines méthodologique
- Priorisation basée sur l'impact quantifié
- Coordination de solutions techniques multidisciplinaires

### 4.2.2 Gestion de projet

- Méthodologie agile avec points quotidiens
- Documentation technique
- Suivi des versions et traçabilité
- Planification et respect des délais

### 4.2.3 Analyse et résolution de problèmes

- Méthodologie rigoureuse d'investigation
- Proposition de solutions court/long terme
- Validation par prototypage et tests
- Optimisation continue des processus

### 4.2.4 Communication

- Présentation des solutions techniques
- Rédaction de documentation
- Travail en équipe pluridisciplinaire
- Formation des opérateurs

# Chapitre 5

## Conclusion et bilan du stage

### 5.1 Synthèse de l'expérience

Ce stage de 18 semaines chez LABAA a été une expérience professionnelle enrichissante qui m'a permis de contribuer à un projet porteur de sens. Travailler sur le développement du fauteuil OTO, destiné aux personnes atteintes de troubles du spectre autistique, a donné une dimension humaine et sociale à mes contributions techniques.

L'entreprise m'a confié des missions variées et responsabilisantes dans un contexte de transition entre prototype et industrialisation. Cette période charnière a nécessité une approche globale des problématiques hardware, software et processus de production.

### 5.2 Contributions techniques réalisées

Durant ce stage, j'ai pu apporter des solutions concrètes aux défis techniques de l'entreprise :

#### 5.2.1 Fiabilisation du système électronique

L'investigation méthodologique des défaillances d'alimentation 3.3V a permis d'identifier plusieurs pistes techniques et de développer des solutions préventives. Bien que le problème de base persiste, les modifications apportées (remplacement de la diode BAT54 par la PMEG2005CT, ajout de protections thermiques PTC et circuit de démarrage progressif) ont permis d'améliorer la robustesse du système et de réduire l'impact des défaillances sur l'utilisateur.

#### 5.2.2 Optimisation des processus de production

Le développement du PCB arcade\_top a éliminé les problèmes de sertissage manuel, réduisant le temps d'assemblage de 32% tout en améliorant la qualité et la répétabilité du processus.

#### 5.2.3 Modernisation du firmware

La migration d'Arduino IDE vers PlatformIO et la restructuration modulaire du code ont posé les bases d'une architecture maintenable et évolutive, essentielle pour un produit industriel.

### 5.2.4 Développement d'outils de diagnostic

La création d'interfaces de programmation automatisées a permis de standardiser les processus et de rendre les opérations de diagnostic accessibles aux opérateurs non-techniques. Ces outils peuvent être déployés directement chez les clients pour effectuer la maintenance à distance sans intervention d'un technicien spécialisé.

## 5.3 Compétences développées

Cette expérience m'a permis de développer une polyvalence technique appréciable : analyse de défaillances et résolution de problèmes complexes, conception PCB et choix de composants, programmation embarquée avec architecture temps réel, développement d'outils logiciels d'automatisation, et vision systémique des problématiques industrielles.

Au-delà des aspects techniques, j'ai également développé des compétences transversales en gestion de projet, communication et travail en équipe pluridisciplinaire.

## 5.4 Points d'amélioration identifiés

L'auto-évaluation de mes méthodes de travail révèle des axes d'amélioration importants pour mon développement professionnel.

### 5.4.1 Développement par itérations courtes

Je dois adopter systématiquement une approche de développement séquentiel en divisant chaque intégration complexe en petits blocs fonctionnels. Durant ce stage, j'ai eu tendance à intégrer plusieurs modifications simultanément, ce qui a parfois compliqué l'identification des sources d'amélioration ou de régression. Cette approche, bien que parfois plus rapide en apparence, peut s'avérer contre-productive.

À l'avenir, je dois adopter une méthodologie de développement par petits blocs, en testant et validant chaque modification individuellement avant d'en intégrer de nouvelles. Cette approche garantit une validation étape par étape en testant chaque modification avant l'intégration suivante, permet une isolation précise des problèmes et des sources de dysfonctionnement, assure une robustesse accrue avec une architecture plus stable et maintenable, et offre une réversibilité permettant de revenir à un état fonctionnel rapidement.

Cette méthodologie, certes plus longue, garantit une meilleure fiabilité et facilite considérablement le debugging et la validation des solutions.

### 5.4.2 Documentation et traçabilité collaborative

Le travail en équipe nécessite une documentation exhaustive de tous les éléments de développement. Durant ce stage, j'ai parfois manqué de détails techniques lors de la rédaction du rapport, nécessitant des retours en arrière pour reconstituer certaines séquences d'investigation.

Cette faiblesse peut compromettre la reproductibilité des résultats et la transmission de connaissances à l'équipe. Je dois améliorer ma discipline de prise de notes en documentant systématiquement les décisions techniques avec justification des choix archi-

tecturaux et alternatives écartées, les résultats d'expérimentation avec conditions de test et paramètres et observations détaillées avec horodatage, les problèmes rencontrés avec description précise des bugs et solutions appliquées, ainsi que les optimisations identifiées et leur impact mesuré.

Cette documentation détaillée améliore la transmission de connaissances au sein de l'équipe et facilite la reprise de travaux par d'autres développeurs, tout en garantissant la reproductibilité des résultats.

## 5.5 Perspectives d'évolution et futur

Cette expérience confirme mon intérêt pour le développement de systèmes embarqués dans des domaines à fort impact social. Le secteur biomédical, où se rencontrent innovation technique et amélioration de la qualité de vie, correspond parfaitement à mes aspirations professionnelles.

Les compétences acquises en fiabilisation hardware, architecture firmware et optimisation de production constituent une base solide pour la poursuite de mon parcours académique et professionnel. Je vais poursuivre ma formation en intégrant l'École d'Ingénieur EPF (campus de Redon-Saint-Nazaire) en Systèmes d'Information avec l'option Électronique Avancée.

Cette formation d'ingénieur me permettra d'approfondir les aspects théoriques sous-jacents aux problématiques rencontrées durant ce stage, notamment en architecture des systèmes embarqués, traitement du signal et conception de circuits électroniques complexes. L'approche systémique développée lors de mes missions chez LABAA sera enrichie par une vision d'ingénieur capable de concevoir des solutions techniques innovantes à l'intersection de l'électronique et de l'informatique industrielle.

L'objectif est de développer une expertise en ingénierie biomédicale ou dans l'innovation technologique appliquée au domaine médical et social, secteurs où l'impact humain de l'innovation technique prend tout son sens.

## 5.6 Remerciements et conclusion

Je tiens à remercier l'ensemble de l'équipe LABAA pour leur accueil, leur confiance et l'autonomie accordée dans la réalisation des missions. Cette expérience m'a permis de mesurer l'importance du travail collaboratif dans le développement de produits innovants.

Ce stage représente une étape importante dans mon parcours professionnel, confirmant ma vocation pour l'ingénierie au service de l'innovation sociale. Les défis techniques relevés et les compétences développées me donnent confiance pour aborder les prochaines étapes de ma formation d'ingénieur à l'EPF avec ambition et détermination.

L'impact concret des solutions développées sur la fiabilité du produit OTO et l'efficacité de production démontre que l'ingénierie peut être un vecteur d'amélioration de la société, renforçant ma motivation à poursuivre dans cette voie.

# Bibliographie

- [1] Raspberry Pi Ltd. (2024). *RP2040 Datasheet*. <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>
- [2] Texas Instruments. (2024). *LM3671 600-mA Step-Down DC-DC Converter Datasheet*. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3671.pdf>
- [3] Nexpria. (2024). *PMEG2005CT Datasheet*. <https://assets.nexpria.com/documents/data-sheet/PMEG2005CT.pdf>
- [4] Infineon Technologies. (2024). *BAT54 Small Signal Schottky Diodes Datasheet*. [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BAT54-DataSheet-v01\\_01-EN.pdf](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BAT54-DataSheet-v01_01-EN.pdf)
- [5] Littelfuse. (2024). *1812L Series PTC Resettable Fuses Datasheet*. [https://www.littelfuse.com/~/media/electronics/datasheets/resettable\\_ptcs/littelfuse\\_ptc\\_1812l\\_datasheet.pdf](https://www.littelfuse.com/~/media/electronics/datasheets/resettable_ptcs/littelfuse_ptc_1812l_datasheet.pdf)
- [6] Winbond Electronics. (2024). *W25N01GV Datasheet*. <https://www.winbond.com/resource-files/w25n01gv%20revh%20032516.pdf>
- [7] KiCad. (2024). *KiCad Documentation*. <https://docs.kicad.org/>
- [8] PlatformIO. (2024). *PlatformIO Documentation*. <https://docs.platformio.org/>
- [9] Grandin, T. (1992). *Calming Effects of Deep Touch Pressure in Patients with Autistic Disorder, College Students, and Animals*. Journal of Child and Adolescent Psychopharmacology, 2(1), 63-72.
- [10] Ayres, A. J. (2005). *Sensory Integration and the Child : Understanding Hidden Sensory Challenges*. Western Psychological Services.
- [11] Unity Technologies. (2024). *Unity Test Framework Documentation*. <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.test-framework@1.1/manual/index.html>
- [12] ARM Limited. (2024). *CMSIS-DAP Interface Firmware*. <https://github.com/ARMmbed/DAPLink>

- [13] The Qt Company. (2024). *Qt Documentation*. <https://doc.qt.io/>
- [14] Python Software Foundation. (2024). *Python Documentation*. <https://docs.python.org/3/>
- [15] Microsoft. (2024). *Visual Studio Code Documentation*. <https://code.visualstudio.com/docs>
- [16] GitHub Inc. (2024). *GitHub Documentation*. <https://docs.github.com/>
- [17] Bonnet-Brilhault, F., et al. (2022). *Évaluation clinique des dispositifs sensoriels dans l'accompagnement des troubles du spectre autistique*. CHRU de Tours, Centre d'Excellence EXAC-T.
- [18] Micron Technology. (2023). *Wear Leveling in NAND Flash Memory*. Technical Note TN-29-42.
- [19] IEC 60601-1-2. (2020). *Medical electrical equipment - Electromagnetic disturbances - Requirements and tests*. International Electrotechnical Commission.
- [20] European Commission. (2021). *Medical Device Regulation (MDR) 2017/745*. Official Journal of the European Union.