

Client industriel – GCK Battery

Département Génie Électrique



**Représenté par**  
Arnaud VOYER :  
Ingénieur systèmes embarqués

**Tuteur GE**  
**Tuteur industriel**

Jacques LAFFONT  
Julian LAURENCE

# Conception d'un banc de test de batteries

Rapport de projet  
De septembre à décembre 2024



## Résumé

**GCK Battery** est un fabricant français de batterie au lithium-ion, il a confié la mission à notre groupe d'étudiants du département Génie-Électrique de concevoir un banc de cyclage pour batterie. Bien que la conception d'un tel système soit très sophistiquée, nous avons été impliqués dans ce projet seulement du point de vue génie électrique. Nous avons tout d'abord mis en place la phase de gestion de projet obligatoire pour assurer le respect des objectifs, la coordination et la communication. Ensuite, nous avons découpé ce projet en trois grandes parties principales afin de valider la faisabilité ; Premièrement, la **Phase initiale** du projet a été de comprendre parfaitement les besoins du client et définir l'architecture interne du système, c'est-à-dire, le choix des composants principaux, la manière dont sera organisé le banc de test, la stratégie choisie pour mesurer les grandeurs physiques demandées, etc.

Deuxièmement, une partie **Hardware (matériel)** qui se concentre sur la l'étude détaillée de l'acquisition de données et des systèmes de sécurités. Troisièmement, une partie **Software (logiciel)** qui se concentre sur la communication, l'interfaçage entre les différents organes du banc et l'interface utilisateur.

Nos solutions ont été réalisées grâce à un travail de recherche et d'étude de documentations techniques, mais elles n'ont en majorité pas pu être réalisées et testées pour preuve chez le client. Notre méthode de validation consistait à informer notre client qui est ingénieur en Génie Électrique d'une solution choisie, fonction par fonction, afin d'obtenir sa validation.

## Abstract

**GCK Battery** is a French manufacturer of lithium-ion batteries. The company entrusted a group of students from the Electrical Engineering department with the task of designing a battery cycling test bench. Although the design of such a system is highly sophisticated, we were involved in this project solely from the perspective of electrical engineering.

We first initiated the mandatory project management phase to ensure the achievement of objectives, coordination, and communication. Then, we divided the project into three main parts to assess feasibility:

- 1. Initial Phase:** The first stage of the project involved thoroughly understanding the client's needs and defining the system's internal architecture. This included selecting the main components, organizing the test bench, and determining the strategy for measuring the required physical quantities.
- 2. Hardware Component:** This phase focused on a detailed study of data acquisition systems and safety mechanisms.
- 3. Software Component:** This phase addressed communication, interfacing between the various components of the test bench, and the user interface.

Our proposed solutions were developed through research and technical documentation studies. However, most of these solutions could not be implemented and tested on-site for demonstration with the client.

Our validation method involved presenting each function's chosen solution to our client, an electrical engineering professional, and obtaining their approval.

## Remerciements

Tout d'abord, notre entière gratitude va à Arnaud VOYER le client, ingénieur en systèmes embarqués et représentant de l'entreprise GCK Battery. Nous sommes reconnaissants pour la confiance qu'il a donné au département Génie Électrique pour la réalisation d'un tel projet.

Nous tenons à remercier nos référents professeur en Génie Électrique Monsieur LAFFONT et Monsieur PASQUIER pour leur encadrement de projet et les nombreux conseils prodigués en revue de projet.

De plus, nous sommes très reconnaissants envers Monsieur LAURENCE, notre tuteur industriel pour son aide dans la gestion de projet et pour son expertise.

Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude à Madame DOGHMI pour son implication dans les cours de communication et d'expression, utiles à la réalisation de ce projet.

Pour finir, un grand merci à Madame QUANQUIN pour toutes les ressources mises à notre disposition sur Moodle qui se sont avérées très profitables et bien détaillées.

## Table des matières

Résumé.....	
Abstract .....	
Remerciements .....	
Table des figures.....	
Table des tableaux.....	
Glossaire.....	
Introduction .....	<b>1</b>
<b>1. Contexte du projet .....</b>	<b>2</b>
1.1. Client industriel .....	2
1.2. Problématique.....	3
1.3. Objectifs .....	4
1.4. Cahier des charges.....	4
<b>2. Gestion de projet .....</b>	<b>6</b>
2.1. Diagramme des tâches .....	6
2.2. Ordonnancement .....	7
2.3. Suivi de projet .....	8
<b>3. Solutions techniques proposées .....</b>	<b>12</b>
3.1. Architecture interne .....	12
3.2. Solution détaillée .....	14
3.2.1. Acquisitions de tension .....	15
3.2.2. Acquisition de courant.....	17
3.2.3. Acquisition de température .....	18
3.2.4. Traitements de données .....	18
3.2.5. Sécurité du banc.....	19
3.2.6. Communication Ethernet avec l'alimentation .....	20
3.2.7. Interface homme-machine.....	22
<b>Conclusion.....</b>	<b>27</b>

## Table des figures

Figure 1. Parrainage de la promotion 2026 d'élèves-ingénieurs de Polytech (gck.co).....	2
Figure 2. Production de batteries (gck-battery.com) .....	3
Figure 3. Illustration du banc existant à titre indicatif .....	3
Figure 4. Diagramme WBS .....	7
Figure 5. Diagramme de Gantt .....	8
Figure 6. Légende pour suivi de projet.....	10
Figure 7. Solution générale retenue pour l'acquisition - cartes modulaires ADAM-5000	13
Figure 8. Schéma simplifié de l'architecture du système .....	14
Figure 9. Schéma électrique carte conditionnement de tension .....	15
Figure 10. Simulation carte conditionnement tension .....	16
Figure 11. Tension entrée (rouge) batterie et tension sortie (verte) de la carte.....	16
Figure 12. Tension entrée (rouge) perturbé et tension sortie (bleue) filtrée .....	16
Figure 13. Routage carte conditionnement de tension .....	16
Figure 14. Fabrication carte conditionnement tension .....	17
Figure 15. Test carte conditionnement mesure .....	17
Figure 16. Mesure des courants.....	18
Figure 17. Mesure de températures .....	18
Figure 18. Traitement des données par les modules ADAM .....	19
Figure 19. Traitement des données par l'ordinateur .....	19
Figure 20. Arrêt d'urgence .....	20
Figure 21. Image extrait de la documentation .....	20
Figure 22. Port Ethernet de l'alimentation.....	21
Figure 23. Confirmation de dialogue entre le PC et l'alimentation .....	21
Figure 24. Écran d'affichage de l'alimentation .....	21
Figure 25. Affichage de l'interface homme-machine .....	23
Figure 26. Page de recherche de fichier de l'IHM .....	23
Figure 27. Exemple de profil de charge .....	24
Figure 28. Message de confirmation .....	24
Figure 29. Acquisition de données lancées sur l'IHM .....	24
Figure 30. Téléchargement des données mesurées dans un fichier texte .....	25
Figure 31. Graphique générée pas l'IHM en mode de fonctionnement auto .....	25

## Table des tableaux

Tableau 1. Cahier des charges .....	5
Tableau 2. Décomposition des tâches en temporel .....	8
Tableau 3. Taux de complétion - revue de lancement .....	9
Tableau 4. Taux de complétion - revue d'avancement .....	9
Tableau 5. Taux de complétion - revue finale .....	10
Tableau 6. Cahier des charges concernant les réglages de l'IHM.....	22
Tableau 7. Taux de complétion final du projet .....	27
Tableau 8. Respect du cahier des charges .....	28
Tableau 9. Estimation du coût total du banc de test.....	28

## Glossaire

Alimentation bidirectionnelle	C'est une alimentation électrique capable de fournir de l'énergie à la batterie pour la recharger mais également capable d'absorber l'énergie de la batterie pour la décharger, l'énergie absorbée à la batterie est réinjectée dans le réseau électrique
Banc de cyclage pour batterie	Permet de charger une batterie et la décharger, ceci est appelé un cycle, plusieurs cycles sont lancés pour estimer la durée de vie des batteries.
Battery Management System (BMS)	Dispositif intégrée à une batterie en usine qui permet de protéger et sécuriser la batterie en cas de surchauffe ou problème électrique.
Communication Ethernet	Technologie de réseau local (LAN) qui permet l'échange de données entre différents dispositifs connectés, tels que des ordinateurs, des serveurs, des imprimantes, ou des équipements industriels, via un réseau câblé ou sans fil.
Contacteur	C'est un interrupteur (état ouvert ou fermé) commandé électriquement, il permet de connecter ou déconnecter un circuit électrique sur ordre.
Courant électrique	Déplacement organisé de charges électriques (des électrons dans les conducteurs) à travers un matériau conducteur sous l'effet d'une différence de potentiel électrique (tension). C'est ce flux de charges qui permet le fonctionnement des appareils électriques.
Électronique de puissance	Discipline de l'ingénierie électrique qui s'intéresse à la conversion, au contrôle et à la gestion de l'énergie électrique à l'aide de composants électroniques.
Interface homme-machine (IHM)	Couche intermédiaire entre une machine et l'utilisateur présenté sous un affichage graphique et des boutons qui permet de saisir les données d'entrées que l'on souhaite.
Tension électrique	Grandeur physique qui représente la différence de potentiel électrique entre deux points dans un circuit. Elle mesure l'énergie nécessaire pour déplacer une charge électrique d'un point à un autre. En d'autres termes, c'est ce qui "pousse" les charges électriques à circuler dans un conducteur, créant ainsi un courant électrique.
Thermocouple	Capteur de température qui génère une petite tension électrique proportionnellement à sa déformation liée à l'exposition de la température.



## Introduction

Le sujet porte sur la conception d'un banc de cyclage de batterie du point de vue Génie Électrique, autrement-dit, un système qui réalisera des charges et décharges de batterie tout en mesurant des grandeurs physiques telles que la température, le courant et la tension. Le client GCK Battery a besoin en fin de ligne de production de tester ses batteries afin d'estimer leur durée de vie, ils ont déjà un système existant.

Dans le cadre de ce projet nous devons proposer une solution à moindre coût afin de réaliser l'acquisition de données des batteries, mais aussi la communication de données entre l'ordinateur et les différents composants du banc, l'interface homme-machine avec une possibilité de contrôler celui-ci manuellement ou automatiquement.

En tant qu'étudiant ingénieur, le défi est double ; mettre en application notre savoir scientifique et technique et satisfaire au maximum les attentes du client au cours de ce projet qui a duré 4 mois et 160 heures de projet. Notre travail implique une très bonne gestion de projet et une communication claire afin d'atteindre les objectifs techniques fixés par le cahier des charges.

Le sujet porte sur l'électronique de puissance\*, ce qui implique l'utilisation de matériel à la fois coûteux et potentiellement dangereux en raison des tensions\* et courants\* élevés, de plus, ce matériel n'est pas à notre disposition. Pour ces raisons, nous ne serons pas en mesure de réaliser et valider le fonctionnement complet du banc. En revanche, nous pourrions valider les solutions liées à l'électronique basse tension et à la programmation. Par conséquent, nous faisons valider les solutions par le client de la manière suivante : nous envoyons par courriel un document qui synthétise une solution détaillée pour chaque fonction, soit il valide la solution, soit il demande des modifications.

## 1. Contexte du projet

### 1.1. Client industriel

Le client industriel est une entreprise créée en 2019, la société GCK Battery qui développe et fabrique des batteries lithium-ion standard, modulaires et sur mesure à destination d'équipements professionnels et grand public. Les moyens de développement et de production mis à la disposition de ses clients garantissent un haut niveau de service et une adaptation très fine à leurs besoins. Cette entreprise est également le parrain de la promotion 2026 des étudiants ingénieur en Génie Électrique.



Figure 1. Parrainage de la promotion 2026 d'élèves-ingénieurs de Polytech (gck.co)

Arnaud VOYER est notre client qui représente GCK Battery, c'est un ancien étudiant du département Génie Électrique à POLYTECH Clermont de la promotion 2019, il est maintenant ingénieur systèmes embarqués.

Voici une photo donnant un aperçu des locaux de l'entreprise :



Figure 2. Production de batteries (gck-battery.com)

## 1.2. Problématique

Actuellement, l'entreprise utilise un banc de cyclage de batterie qu'ils ont directement acheté à un industriel, ce système est très coûteux, l'entreprise souhaite alors développer son propre banc de test pour son accroissement. C'est dans cet objectif que nous avons réalisé la conception d'un banc afin de garantir la faisabilité du projet au client.

Vous trouverez ci-dessous une image présentée pour donner une idée générale du système existant, mais elle ne reflète pas exactement le système réel :



Figure 3. Illustration du banc existant à titre indicatif



Vous pouvez observer une armoire de confinement pour protéger les batteries testées en cas de problème, notre conception n'impliquera pas un tel système mécanique de protection.

### 1.3. Objectifs

Ce projet se déroule sur quatre mois, de septembre à décembre 2024 en 160 heures de travail pour un étudiant et 120 heures pour le deuxième en raison de son double cursus master. L'objectif est de fournir au client deux livrables :

- D1 : Architecture interne validé
- D2 : interface utilisateur fonctionnelle

Le premier livrable consistera à fournir un dossier exhaustif qui contiendra tous nos choix, ce rapport technique contiendra, tous nos choix techniques justifiés, le référencement des composants électroniques avec leur coût et leur disponibilité, nos résultats de simulation, les schémas électriques des différentes fonctions du système et le coût total du banc.

Le deuxième livrable consistera à fournir un fichier texte avec le contenu du programme à exécuter pour afficher l'interface utilisateur.

### 1.4. Cahier des charges

Vous trouverez ci-dessous le cahier des charges fournit par le client, en rouge sont soulignés les éléments importants, le but est de concevoir le système capable de réaliser chaque fonction de ce cahier des charges :

Titre	Description	Critère de validation	Critère de négociation
<b>Nombre d'Élément Sous Test</b>	Le banc doit pouvoir accueillir 1 EST	N.A.	F0
<b>Alimentation bidirectionnel</b>	Le banc doit pouvoir commander une alimentation de la gamme Elektro-Automatik EA-PSB 10000.	N.A.	F0
<b>Alimentation +12V</b>	Le banc doit disposer d'une alimentation +12V pour alimenter le BMS	N.A.	F0
<b>Communication CAN</b>	Le banc doit pouvoir établir une communication CAN avec le BMS	N.A.	F0
<b>Acquisition de tensions</b>	Le banc doit pouvoir mesurer des tensions comprises entre <b>0 V</b> et <b>60 V</b>	Précision <b>+/- 1V</b> Fréquence d'acquisition 10Hz 3 voies de mesures	F0
<b>Acquisition de courant</b>	Le banc doit pouvoir mesurer des courants compris entre <b>-800 A</b> et <b>800 A</b>	Précision <b>+/- 1A</b> Fréquence d'acquisition 10Hz 3 voies de mesures	F0
<b>Acquisition de températures</b>	Le banc doit pouvoir mesurer des températures comprises entre <b>-40 °C</b> et <b>100 °C</b>	Précision de <b>+/- 3 °C</b> Fréquence d'acquisition 1Hz 10 voies de mesure	F0
<b>Arrêt d'urgence</b>	Le banc doit avoir un arrêt d'urgence coupant l'arrivée électrique de l'alimentation HV et déconnecter la sortie de l'alimentation HV de l'EST.	N.A.	F0
<b>Fusible</b>	Le banc doit disposer de fusibles 500A en sortie de l'alimentation HV	N.A.	F0
<b>Contacteur</b>	Le banc doit disposer de relais de puissance <b>LEV200</b> en sortie d'alimentation HV	N.A.	F0
<b>Log des données</b>	Le banc doit sauvegarder les données sélectionnées par l'utilisateur dans un fichier .csv	Les signaux suivants peuvent être loggés aux choix de l'utilisateur : - Températures - Courants - Tensions - Défauts BMS (Message XXX) - Températures batterie (Message XXX) - Tensions cellules (Message XXX)	F0
<b>Chargement et exécution de profils</b>	L'utilisateur doit pouvoir charger un profil au format .csv afin de le faire exécuter par le banc	Le profil contient les informations suivantes : - Profil de courant en fonction du temps - Tension Min/Max setpoint - Tension Min/Max - Température Min/Max - Courant Min/Max Le temps minimum entre deux points du profil peut être de 250ms.	F0
<b>Interface utilisateur</b>	Le banc doit disposer d'une interface utilisateur	L'interface doit afficher les informations suivantes : - Tensions - Températures - Courant - Tensions Cellule (message XXX) - Température cellules (message XXX).	F0

Tableau 1. Cahier des charges

Une fois le projet pris en main et le cahier des charges en notre possession, nous devons mettre en place une gestion de projet efficace.

## 2. Gestion de projet

### 2.1. Diagramme des tâches

Lorsque nous travaillons sur un projet d'envergure, notre stratégie est de découper le projet en plusieurs tâches afin d'atteindre l'objectif final.

Tout d'abord, nous avons décidé de créer une première tâche intitulé **Phase Initiale**. Cette tâche consistera à bien définir les besoins du client, c'est-à-dire collecter toutes les données d'entrées, effectuer des recherches et comprendre le fonctionnement d'un banc de cyclage de batterie de manière technique et définir une première idée de l'architecture interne du banc. Ceci nous amène par la suite à créer les deux tâches suivantes ; **Hardware** pour la conception matérielle qui concerne l'acquisition de données et les éléments de sécurité. Et **Software** pour la conception logicielle qui concerne la programmation incluant la communication avec la batterie et les différents autres composants, l'interface utilisateur, et la gestion de charge/décharge de la batterie testée.

Ces trois tâches doivent également être décomposée en sous-tâches qui pourra être réalisée une à une. Voici le détail :

- **Phase initiale**
  - **Analyse des besoins**

Cette sous-tâche nous permet de bien comprendre le fonctionnement d'un banc de cyclage et de comprendre parfaitement ce que le client souhaite
  - **Choix des composants**

Cette sous-tâche nous permet de commencer à définir l'architecture interne du banc de test par le choix des composants principaux qui seront les capteurs et l'unité de traitement des données
  - **Schéma de câblage**

Cette sous-tâche permet l'étude des documentations techniques des différents composants définitivement choisies et validés par le client pour les interfacier entre eux (les interconnecter) afin de réaliser un système complexe fonctionnelle
- **Hardware**
  - **Arrêt d'urgence**

Cette sous-tâche permet de concevoir un moyen d'arrêter en urgence la charge et la décharge de la batterie en cas d'appui sur un bouton, l'alimentation de la batterie sera déconnectée du réseau électrique
  - **Acquisition de températures**

Cette sous-tâche permettra de tester les capteurs de température et être capable d'afficher la valeur sur un poste d'ordinateur
  - **Acquisition de tensions électriques**

Cette sous-tâche est liée au développement d'une carte électronique permettant de lire la tension électrique de la batterie

- **Acquisition de courants électriques**  
Cette sous-tâche est liée au test des capteurs choisies pour mesurer un courant électrique à travers un câble
- **Software**
  - **Contrôle de l'alimentation de batterie**  
Cette sous-tâche est liée à la communication entre l'ordinateur et l'alimentation bidirectionnelle de la batterie afin de piloter les cyclages
  - **Communication avec la batterie**  
Cette sous-tâche permettra de lire les données critiques internes de la batterie afin de les exploiter pour piloter la commande automatique du banc
  - **Interface utilisateur**  
Cette sous-tâche permet de réaliser l'interface homme-machine\* qui affichera les données et appliquera des commandes.

Pour résumer, vous trouverez le diagramme visuel ci-dessous :

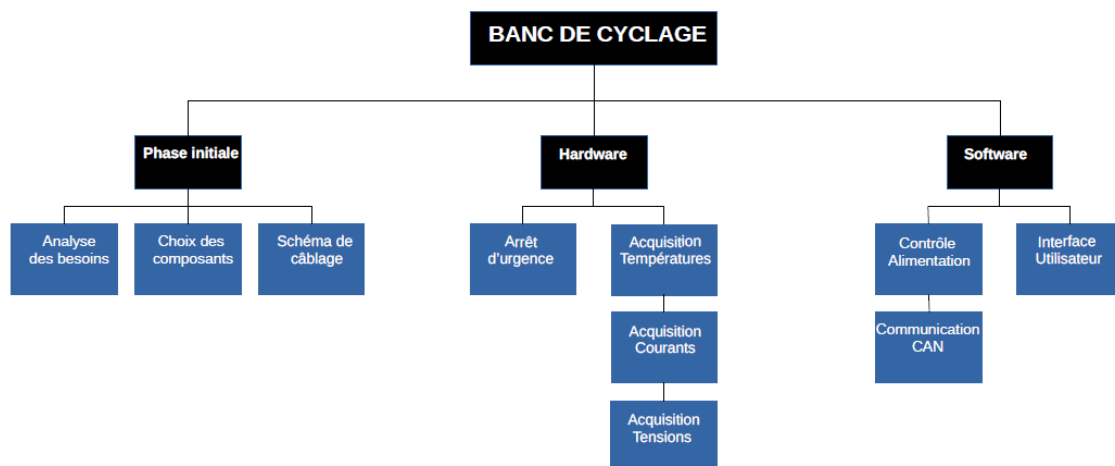


Figure 4. Diagramme WBS

Une fois ceci terminé, nous avons une idée plus claire de ce qu'il faut faire et par quoi nous pouvons commencer, mais il reste à définir le planning.

## 2.2. Ordonnancement

Maintenant nous allons définir une planification temporelle pour respecter les délais et anticiper d'éventuels problèmes. La décomposition suivante a été choisie :

Étape	Date de début	Durée	Date de fin
Analyse des besoins	13/09/2024	30	13/10/2024
Choix des composants	14/10/2024	15	29/10/2024
Revue de lancement	16/10/2024	1	17/10/2024
Hardware, acquisition données	30/10/2024	30	29/11/2024
Software, communication	30/10/2024	72	10/01/2025
Revue d'avancement	19/11/2024	1	20/11/2024
Interface utilisateur	10/11/2024	61	10/01/2025
Commande d'arrêt	01/12/2024	15	16/12/2024
Revue de projet	17/12/2024	1	18/12/2024

Tableau 2. Décomposition des tâches en temporel

Ceci décrit la même décomposition de tâche définie en section précédente mais certaines tâches dans la même thématique ont été rassemblées pour définir les objectifs. Vous trouverez ci-dessous un diagramme de Gantt :

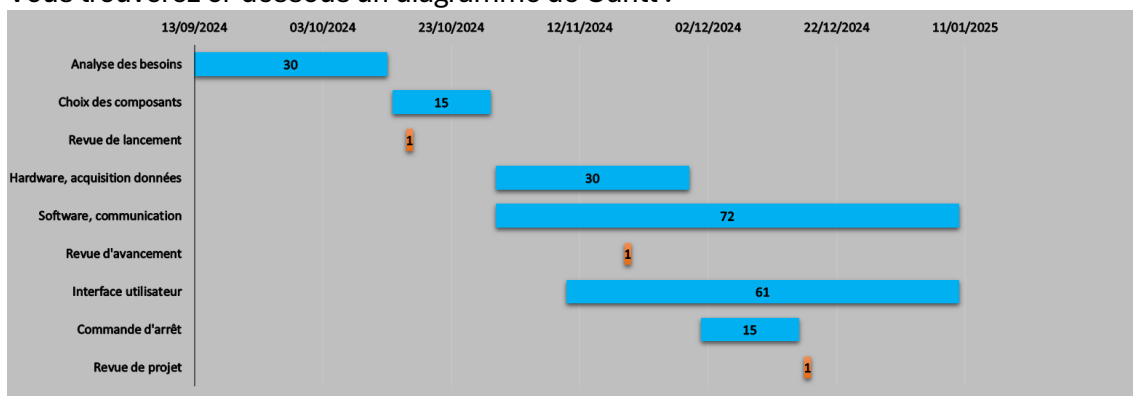


Figure 5. Diagramme de Gantt

Nous allons nous baser sur ce diagramme pour réaliser le projet, une fois cette gestion de projet définie, nous avons un objectif de délai à respecter, la difficulté réside dans le fait de faire les bons choix dans cette décomposition. Les durées de tâches seront amenées à être changées en raison de difficultés techniques non maîtrisées ou tout autre imprévue.

### 2.3. Suivi de projet

Maintenant, nous allons retranscrire le suivi de projet réalisé à travers les trois différentes revues de projet avec le client, ainsi vous pourrez comprendre notre avancement et nos difficultés tout au long de ces quatre mois. Nous allons vous présenter notre avancé et nos prévisions au fur et à mesure des trois revues de projet.

Ci-dessous les dates clés :

- 13/09/24 : Début du projet
- 16/10/24 : Revue de projet 1 - lancement
- 20/11/24 : Revue de projet 2 - avancement
- 18/12/24 : Revue de projet 3 - finale



- **16 octobre 2020 : Revue de lancement**

	Tâches	Taux de completion	Prévisionnel pour prochaine revue
Phase initiale	Analyse des besoins	100%	100%
	Choix des composants	50%	100%
	Schéma de cablage	0%	100%
Hardware	Mesure tension	0%	66%
	Mesure courant	0%	66%
	Mesure température	0%	66%
	Arrêt d'urgence	0%	0
Software	Contrôle alimentation	0%	100%
	Communication CAN	0%	0
	Interface utilisateur	0%	0
	Total	15,00%	59,80%

Tableau 3. Taux de complétion - revue de lancement

Nous étions seulement à **15%** du projet estimé pour 72 heures de travail écoulé sur 160 soit **44%** d'avancement temporel, nous avons déjà commencés en retard pour les raisons suivantes :

- Premièrement, la planification de projet du départ avait été mal anticipé, effectivement, la majorité des heures du projet étaient planifiées en début d'année, nous aurions dû mettre plus de tâches dans les premiers jours au lieu d'une seule. Nous aurions dû avancer en parallèle pour compléter plusieurs tâches en même temps
- Deuxièmement, la difficulté a été sous-estimé, nous avons eu besoin de bien plus de temps que prévu initialement, car après avoir proposé une première architecture interne au client, il a préféré opter pour une autre solution technique plus robuste dont nous n'avions jamais eu connaissance auparavant.

Nous avons prédit être à 59,8% du projet lors de la prochaine revue le 20 novembre.

- **20 novembre 2024 : Revue d'avancement**

Les sous-tâches en retard contrairement à ce qui avait été prédit sont en rouges.

	Tâches	Taux de completion	Prévisionnel pour prochaine revue
Phase initiale	Analyse des besoins	100%	100%
	Choix des composants	100%	100%
	Schéma de cablage	100%	100%
Hardware	Mesure tension	0%	80%
	Mesure courant	70%	70%
	Mesure température	70%	70%
	Arrêt d'urgence	0%	70%
Software	Contrôle alimentation	0%	50%
	Communication CAN	50%	50%
	Interface utilisateur	25%	50%
	Total	51,50%	74,00%

Tableau 4. Taux de complétion - revue d'avancement

A ce moment du projet, nous étions à 124 heures écoulés sur 160 heures, ce qui correspond à **75%** d'avancement du projet dans le temps contre un taux de complétion de **51,5%**, le retard avait été un peu rattrapé, mais pas totalement. Nous avons pris conscience des difficultés de développement technique dans la réalisation des tâches **Software** qui contient des éléments techniques que nous n'avions jamais vus auparavant, ce qui nous demandent plus de temps. Pour la revue finale, nous prédisions 74% de complétion.

- **17 décembre 2024 : Revue finale**

Concernant la complétion d'une sous-tâche, veuillez suivre la légende suivante pour comprendre l'avancement du projet :

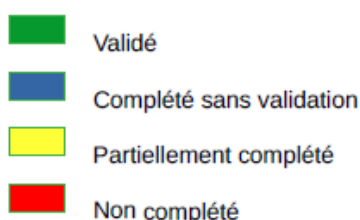


Figure 6. Légende pour suivi de projet

	Tâches	Taux de complétion
Phase initiale	Analyse des besoins	100%
	Choix des composants	100%
	Schéma de câblage	100%
Hardware	Mesure tension	80%
	Mesure courant	70%
	Mesure température	70%
	Arrêt d'urgence	70%
Software	Contrôle alimentation	50%
	Communication CAN	50%
	Interface utilisateur	0%
	Total	70,00%

Tableau 5. Taux de complétion - revue finale

Lors de la revue finale, nous avons estimé un taux de complétion à **70%** contre 74% prédit, néanmoins, ceci a été jugé insuffisant en termes d'exigence de la part du client. Les tâches qui n'ont pas été complétées sont dû à un manque de temps de développement et des difficultés techniques.

De notre côté, nous avons estimé que 160 heures de travail multiplié par deux élèves étaient insuffisantes pour terminer ce projet de conception d'un banc de cyclage de batterie. Nous estimons que nous aurions eu besoin de 60 heures supplémentaires par étudiant pour finaliser le projet.

Au cours de ces 4 mois et 160 heures de projet, nous avons constaté que notre estimation prévisionnelle de l'avancement du projet était erronée. Il s'est avéré très difficile de fournir une prévision fiable au client en nous basant sur des éléments techniques que nous ne maîtrisons pas entièrement. Pour anticiper ce problème, il aurait été judicieux de reconnaître dès le départ les difficultés potentielles et de solliciter davantage d'aide technique ainsi que l'intervention d'experts extérieurs.

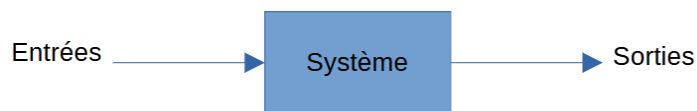
Par ailleurs, nous avons démarré le projet de zéro en cinquième année, car les étudiants de quatrième année qui y avaient travaillé auparavant ne nous avaient pas fourni d'éléments exploitables pour progresser. En connaissant cette situation dès le départ, nous aurions pu adopter une stratégie différente pour mieux anticiper.

### 3. Solutions techniques proposées

Nous allons maintenant passer au volet technique, vous trouverez dans cette section nos solutions techniques proposées au client pour la conception du système.

#### 3.1. Architecture interne

Tout d'abord, la conception d'un système repose sur le principe de bien connaître l'entrée du système et la sortie. L'entrée est quelque chose d'imposée, c'est ce qui est entrée dans le système pour avoir la sortie que l'on souhaite. Ceci peut être comparé à une fonction mathématique qui prends en entrée plusieurs variables et qui renvoie en sortie plusieurs autres variables. Les données d'entrées et de sorties sont du point de vue Génie Électrique seulement.



Voici une liste (non exhaustive) des entrées de notre système :

- Tension électrique nominale de la batterie
- Courant électrique maximale admissible
- Nombre de cycles à réaliser
- Gamme de température
- Capacité de charge et de décharge
- Mode de fonctionnement

Beaucoup de données d'entrée sont inconnues, nous les fixerons au fur et à mesure de la conception du système.

Voici une liste exhaustive des données de sorties :

- Courbe de charge et décharge temporelle
- Tension, courant, température instantanée pendant la charge et la décharge
- Ouverture du circuit d'alimentation sur appui de bouton d'arrêt d'urgence
- Ouverture du circuit si le courant électrique dépasse 500 Ampères.
- Commande automatique de l'alimentation pour gérer la charge et la décharge
- Résistance interne de la batterie
- Durée d'un cycle
- Nombre total de cycles terminés avant l'arrêt du test
- Anomalies détectées (lié à la lecture des données BMS)
- Profil thermique
- Interruption automatique ou manuelle

Toute ces données seront enregistrées dans un fichier texte d'extension CSV sur le poste d'ordinateur pour analyse, le principe du banc repose sur un poste ordinateur hôte qui gérera les cyclages en communiquant avec les différents composants.

Une fois les entrées et les sorties du système bien définies, il faut concevoir en premier lieu l'architecture interne qui fournit une vue d'ensemble du système. Nous n'allons pas détailler notre réflexion et nos échanges pour arriver aux choix finaux, mais seulement donner les résultats.

Le principe général du banc fonctionne de la manière suivante : l'utilisation d'une carte électronique ADAM-5000 contenant 8 slots pour y ajouter des modules électroniques dans le but de réaliser l'acquisition de données.

Ces cartes sont la partie intelligente du banc de cyclage, c'est une unité de traitement à la quelle on connectera les capteurs de tensions, courants, températures.

Les cartes ADAM-5000 sont modulaires et permettent d'ajouter ou de remplacer des modules en fonction des besoins spécifiques du projet, la configuration permet une large gamme de capteurs pris en charges, ces cartes supportent divers types de signaux tels que les entrées analogiques (tension, courant, température), les sorties numériques (pour la commande) et la communication via des protocoles industriels comme Modbus/TCP ou Ethernet\*.

De plus, ces cartes électroniques sont conçues pour fonctionner dans des environnements exigeants, avec une résistance aux interférences électriques et des protections, également compatible avec des langages de programmation comme Python. Voici un aperçu :



Figure 7. Solution générale retenue pour l'acquisition - cartes modulaires ADAM-5000

Vous trouverez ci-dessous le schéma simplifié de l'architecture du système :

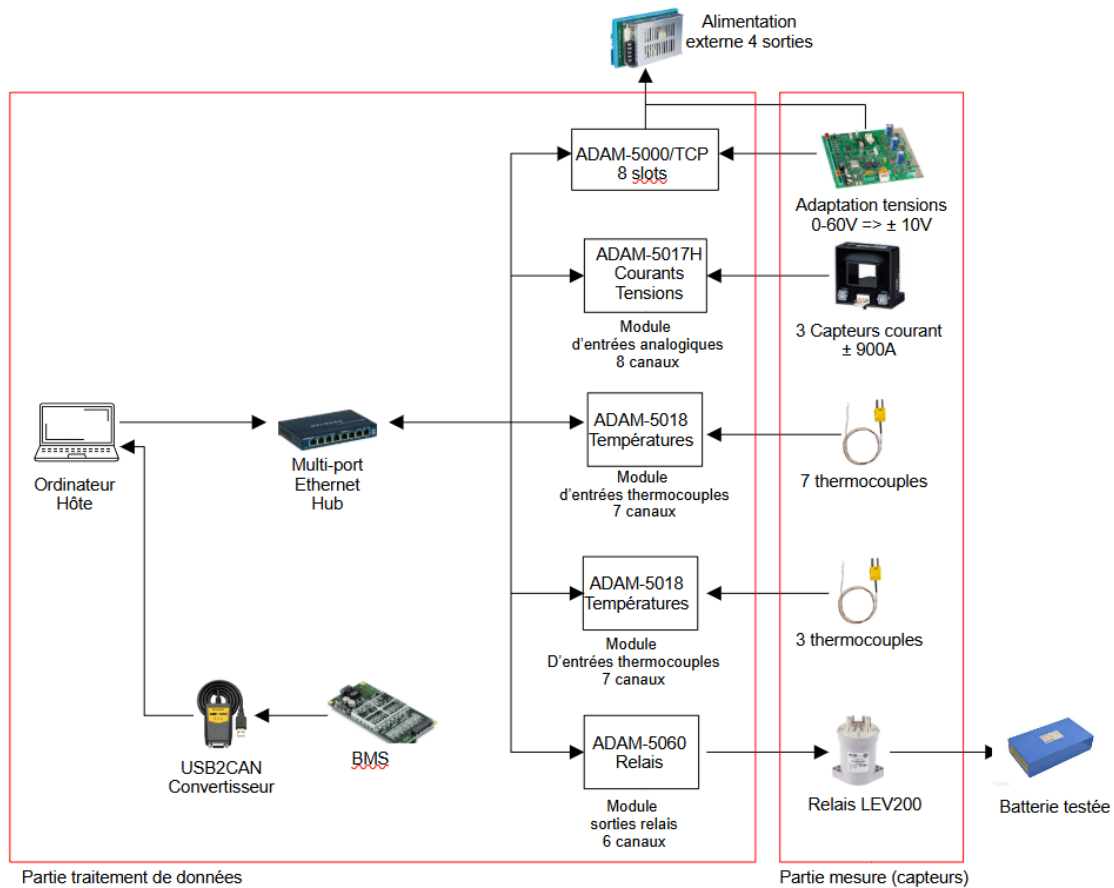


Figure 8. Schéma simplifié de l'architecture du système

Au milieu du schéma sont représentés dans les rectangles noirs les cartes modulaires de la série ADAM-5000 pour l'acquisition de toutes les données de la batteries (courant, tension, température).

On connecte à ces cartes les capteurs pour la mesure (à droite du schéma), tout ce système est relié par un multiport Ethernet connecté à un ordinateur. L'ordinateur communique également avec une carte électronique appelée BMS\* (Battery Management System) qui est liée d'usine directement à la batterie, afin de lire les données critiques interne à la batterie renvoyés directement.

Nous avons maintenant défini la stratégie principale utilisé pour réaliser le banc de cyclage, en revanche, ce schéma simplifié n'implique pas toutes les fonctions, il manque l'arrêt d'urgence par appui manuelle. Plus de détails seront apportés ultérieurement dans les sections correspondantes.

### 3.2. Solution détaillée

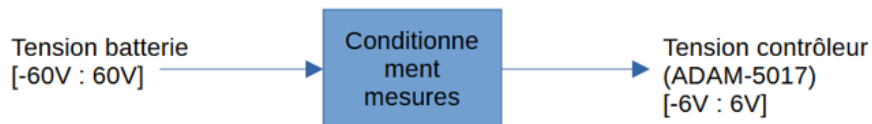
Dans cette section, nous allons présenter nos résultats de chaque solution technique répondant à une fonctionnalité. Nous allons présenter ces résultats sous la forme de schéma électrique. Bien que ces illustrations devraient normalement être incluses en annexe, dans notre cas, de nombreuses fonctionnalités du cahier des charges sont directement liées au choix des composants et à l'élaboration du schéma, puisque nous n'avons pas la possibilité de réaliser physiquement le montage.

### 3.2.1. Acquisitions de tension

Les batteries testées sont des batteries au Lithium-Ion, sa tension électrique à pleine charge est de 60 V continue. Cependant, le système de traitement de donnée de la série ADAM-5000 n'est capable que de lire des tensions continue jusqu'à 10 V. Il faut donc réaliser un sous-système qui agira le rôle de capteur de tension, cette carte électronique adaptera la tension pour la mesure de 60 V à 10 V, la solution n'existe pas sur le marché, nous allons donc la développer.

Le sous-système sera développé sous forme d'une carte électronique qui comprendra trois fonctions pour réaliser une mesure fiable :

- Division de la tension par un facteur de 10
- Filtrage des perturbation électromagnétiques
- Isolation galvanique (protection électrique entre la batterie et la carte électronique)



L'étape de conception du produit comporte cinq étapes pour garantir la réussite ; étude, simulation, routage, fabrication et expérimentation.

Premièrement, l'étude (conception) du schéma électrique de la carte :

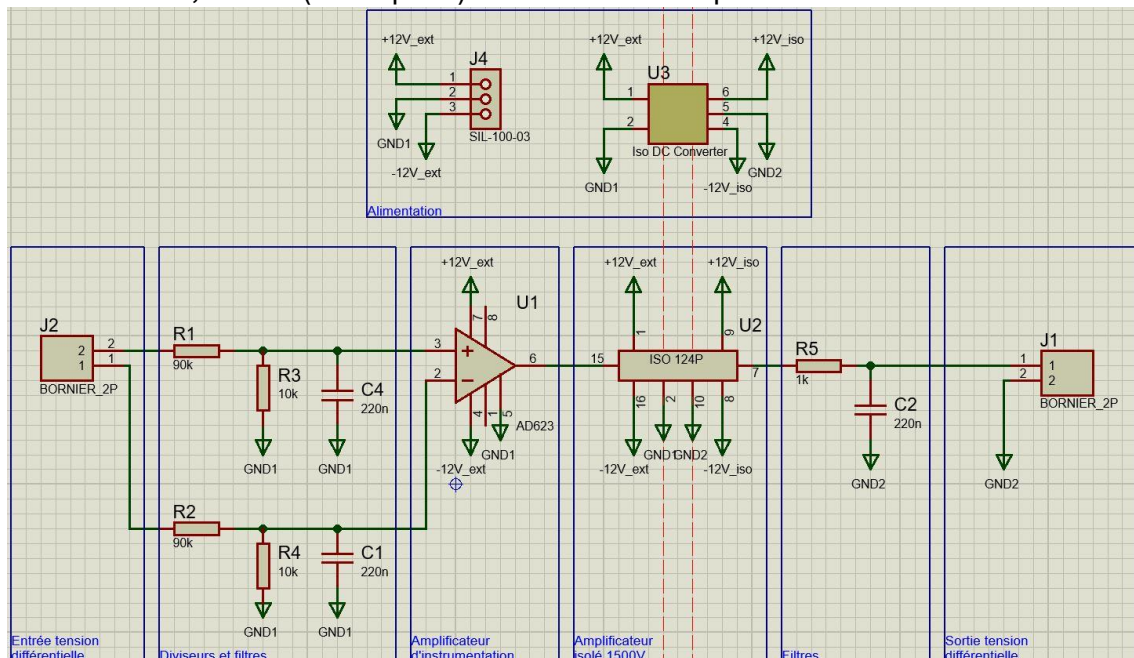


Figure 9. Schéma électrique carte conditionnement de tension

Deuxième étape, simulation sur un logiciel de circuit électronique pour vérifier le fonctionnement :



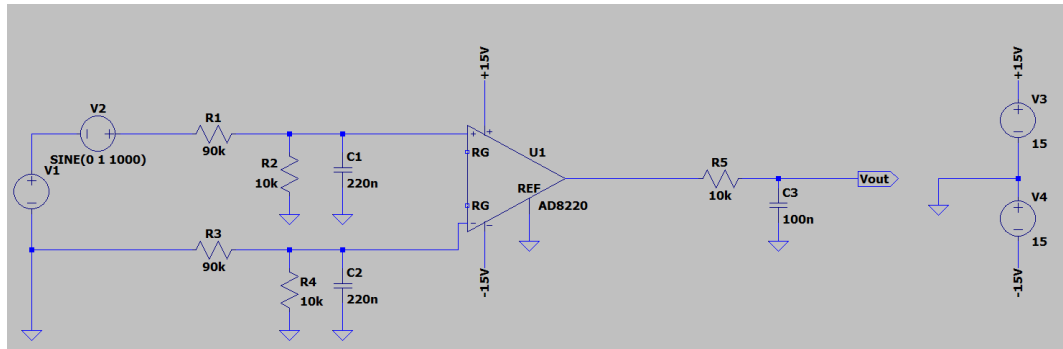


Figure 10. Simulation carte conditionnement tension

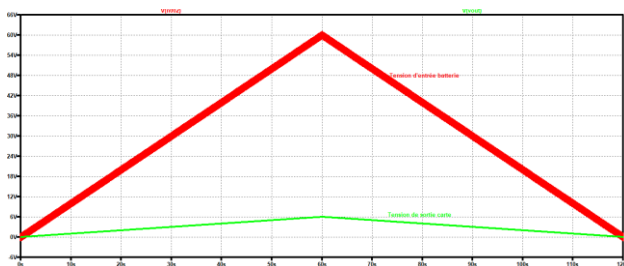


Figure 11. Tension entrée (rouge) batterie et tension sortie (verte) de la carte

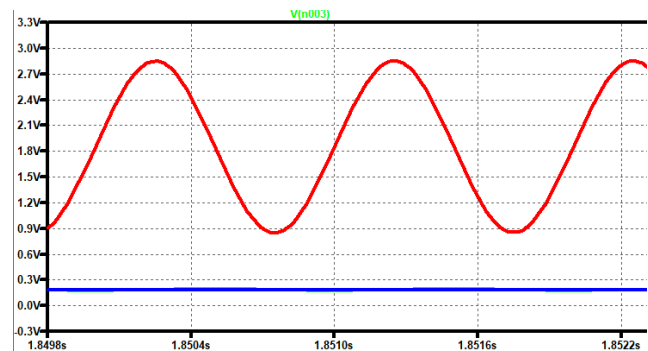


Figure 12. Tension entrée (rouge) perturbé et tension sortie (bleue) filtrée

On voit bien que la tension de la batterie est divisée par 10 et qu'elle est lissée.

Troisième étape, routage de la carte pour impression 3D :

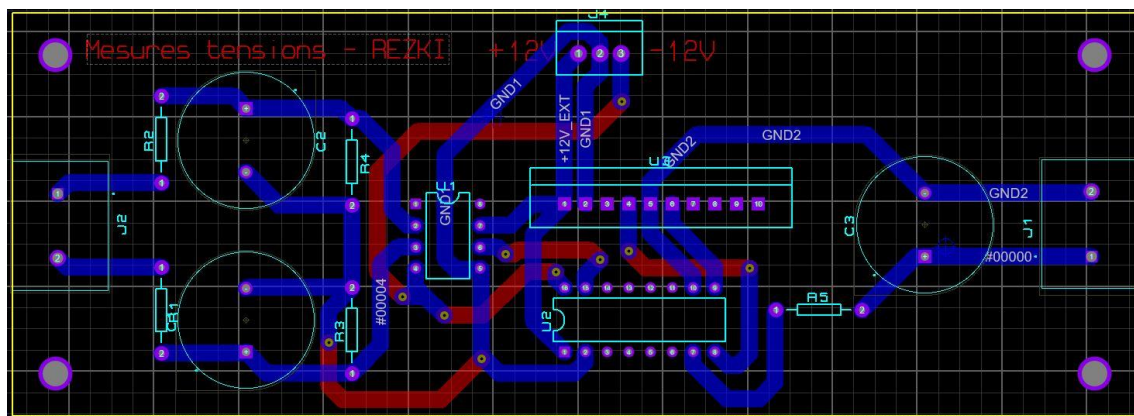


Figure 13. Routage carte conditionnement de tension

Quatrième étape, fabrication et soudure des composants :



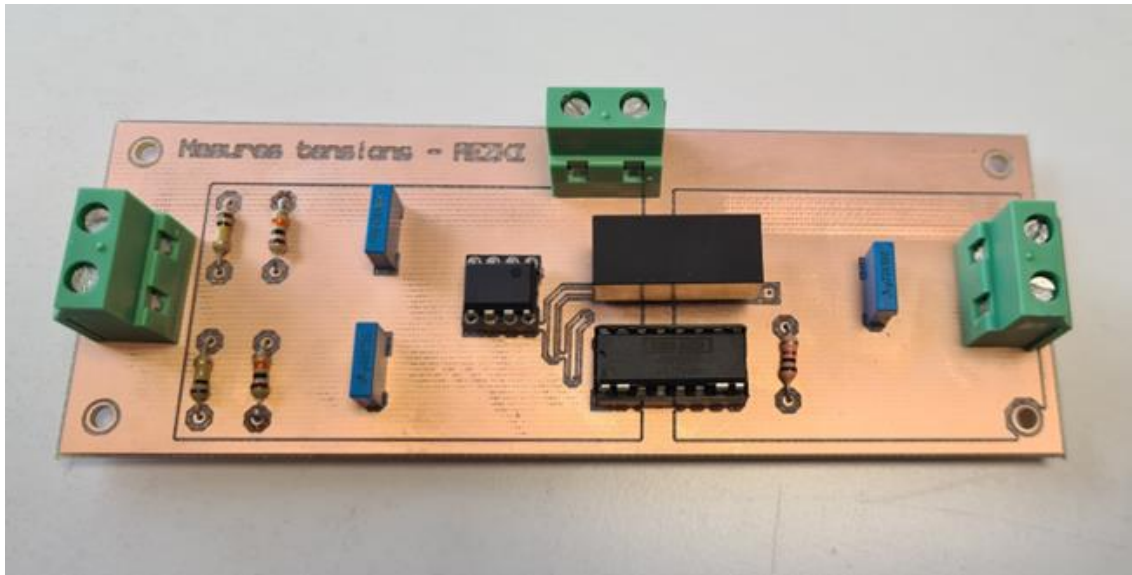


Figure 14. Fabrication carte conditionnement tension

Cinquième étape, expérimentation :

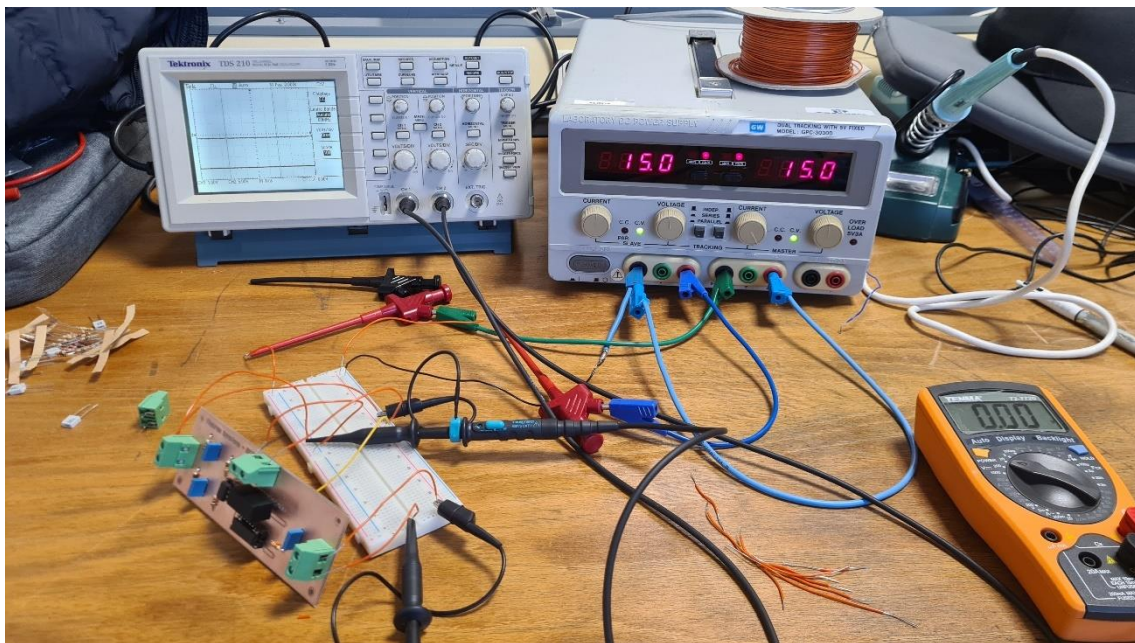


Figure 15. Test carte conditionnement mesure

Ceci fonctionne bien, on peut valider la solution. La fonction acquisition de tension est finalisé. Nous allons passer à la fonction acquisition de courant.

### 3.2.2. Acquisition de courant

La mesure de courant dispose d'un capteur industriel soigneusement choisi pour être compatible avec la carte modulaire ADAM-5000 et correspondre au cahier des charges. Le capteur est capable de lire le courant électrique en entrée et renvoie une

tension analogique en sortie proportionnelle à la mesure, par exemple 100 A correspondra à 1 V renvoyé, 200 A correspondra à 2 V, etc. Cette tension en sortie de capteur sera interprétée par la carte électronique module ADAM-5000 pour afficher à l'écran d'affichage de l'ordinateur connecté la bonne valeur de courant mesuré :

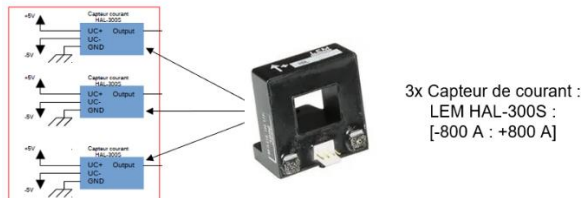


Figure 16. Mesure des courants

Nous n'avons pas pu tester cette fonctionnalité car nous n'avions pas le matériel à notre disposition, cependant le client nous a validé cette solution.

### 3.2.3. Acquisition de température

Nous utiliserons des capteurs de températures type thermocouple\* pour mesurer la température. Il fonctionne sur le principe du phénomène thermoélectrique. C'est-à-dire qu'une petite tension est générée proportionnellement, lorsque le capteur est exposé à une température différente.

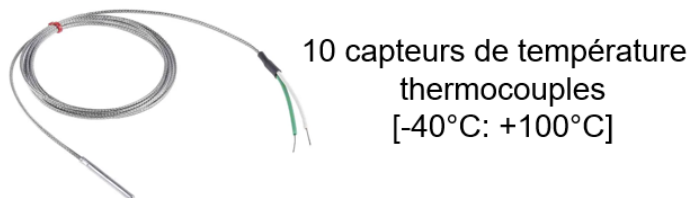


Figure 17. Mesure de températures

Nous n'avons pas pu tester cette fonctionnalité car nous n'avions pas le matériel à notre disposition, cependant le client nous a validé cette solution.

### 3.2.4. Traitements de données

Une fois la sélection des capteurs, voici le résultat de la partie traitement de donnée présenté sous forme de schéma électrique.

Solution générale pour l'acquisition de donnée du banc de test :

- Chaîne de traitement 1

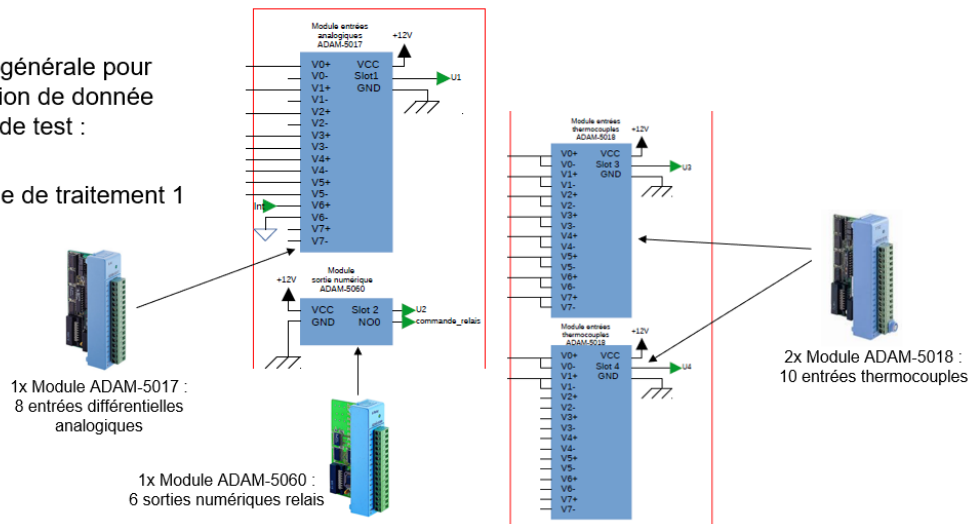


Figure 18. Traitement des données par les modules ADAM

Solution générale pour l'acquisition de donnée du banc de test :

- Chaîne de traitement 2

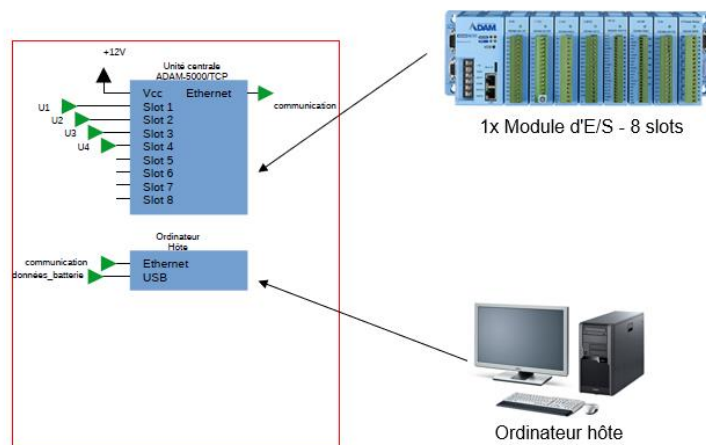


Figure 19. Traitement des données par l'ordinateur

Nous n'avons également pas pu tester cette fonctionnalité car nous n'avons pas le matériel à notre disposition, cependant le client nous a validé cette solution. Cette étape correspond à la tâche **Hardware**, les sous-tâches **acquisition de tension**, **courant** et **température** sont maintenant validées.

### 3.2.5. Sécurité du banc

Nous allons présenter dans cette partie nos résultats, le schéma électrique détaillé montré ci-dessous représente notre résultat fourni au client.

Solution générale pour l'acquisition de donnée du banc de test :

- Alimentation

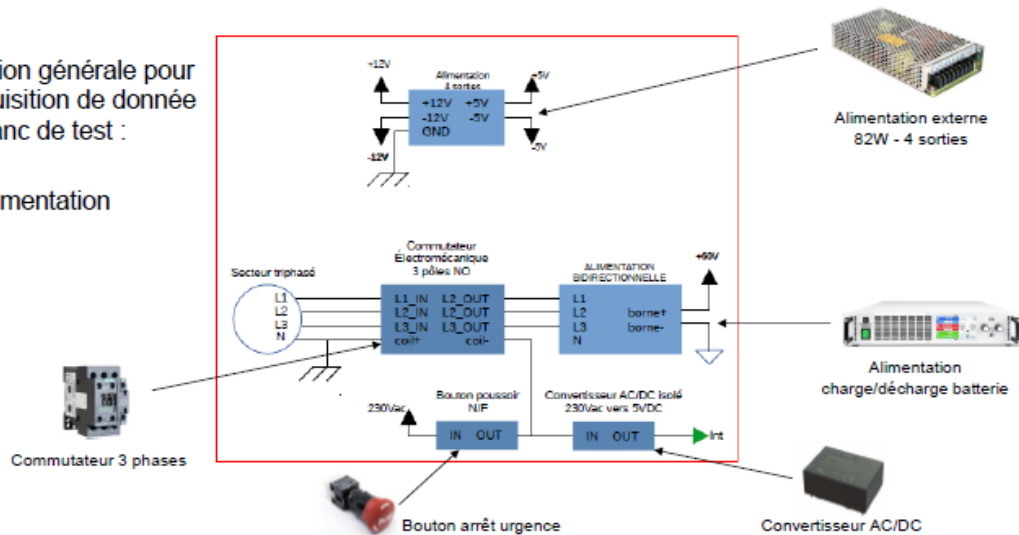


Figure 20. Arrêt d'urgence

La partie **Hardware** est dorénavant terminée, nous allons passer à la partie **Software**.

### 3.2.6. Communication Ethernet avec l'alimentation

Au sein d'un banc de cyclage, l'alimentation bidirectionnelle\* est un élément clé. En effet, celle-ci permet l'exécution des différents cycles de charge/décharge de l'EST (Équipement Sous Test), justifiant l'existence de ce genre de technologies, bidirectionnelle signifie que l'alimentation sera tout autant capable de fournir de l'énergie pour recharger la batterie, et absorber de l'énergie pour décharger la batterie, l'énergie absorbée est réinjectée sur le réseau électrique.

L'assurance d'une bonne communication avec l'alimentation et la bonne configuration des cycles sont donc deux étapes cruciales du projet.

Comme stipulé dans le cahier des charges, l'alimentation qui sera utilisée tout au long de ce processus est de la gamme Elektro-Automatik EA-PSB 10000.



Figure 21. Image extrait de la documentation

D'après les indications du client, le mode de communication que l'on utilisera sera un protocole Ethernet. Pour cela, il est nécessaire de se connecter à l'alimentation en deux phases :

- De manière filaire, donc à l'aide d'un câble RJ45 branché à un port LAN (Ethernet) de l'alimentation.



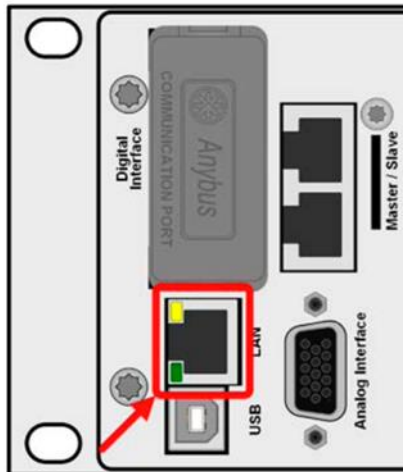


Figure 22. Port Ethernet de l'alimentation

- De manière numérique, aux mêmes réseaux que l'alimentation, donc en configurant sur l'ordinateur qui communique : le service réseaux (le nom du câble utilisé), le type de configuration IP (ici, « Manuellement », pour pouvoir modifier le reste des paramètres).

Voici les informations renvoyées par l'alimentation à l'ordinateur hôte attestant de sa bonne communication :

```
Connecté à l'alimentation.
Commande: *IDN?
Réponse: EA Elektro-Automatik GmbH & Co. KG, ELR 10200-50, 2775120003, V3.03 05.10.2022 V3.06 24.05.2023 V1.0.2.20,
```

Figure 23. Confirmation de dialogue entre le PC et l'alimentation

Voici l'affichage de l'alimentation indiquant en haut à droite que son fonctionnement est bien à distance (ETH : Ethernet) :



Figure 24. Écran d'affichage de l'alimentation

Le premier objectif est bien atteint. La suite est d'implémenter une nouvelle fonction en langage Python afin de simultanément modifier le courant et la tension qui permettra de commander la charge et la décharge de la batterie.

Seulement, sans réelle charge à tester, ni assistance technique concernant l'alimentation en elle-même (son fonctionnement intrinsèque et la communication réseau), l'objectif n'a pas été atteint dans les temps imposés. Nous estimons le temps de développement nécessaire à la réalisation de cette tâche à 20 heures.

Une fois la configuration effectuée sur logiciel, il est nécessaire d'interfacer les machines avec un ensemble commun, l'interface utilisateur programmée en langage Python qui fera office d'interface homme-machine et d'interface graphique pour l'utilisateur.

### 3.2.7. Interface homme-machine

Afin de permettre « facilement » à un quelconque utilisateur humain d'interagir optimalement avec l'appareil et de répondre à un besoin industriel ou de recherche, il est nécessaire de configurer une couche intermédiaire entre lui et la machine. Cette couche, appelée « IHM » pour Interface Homme-Machine, doit remplir plusieurs critères définis par le client.

L'IHM nécessitera :

- La présence de deux modes d'utilisation : Un mode auto et un mode manuel.
  1. En mode auto :
    - L'exécution d'un profil de cycle configuré par l'utilisateur
  2. En mode manuel :
    - La possibilité de commande du banc avec démarrage et arrêt manuel.
- L'acquisition, aux choix de l'utilisateur, des signaux suivants au sein d'un fichier csv. :
  - Tensions
  - Courants
  - Températures
  - Défauts BMS
  - Températures cellules
  - Tensions cellules
- L'affichage des :
  - Tensions
  - Courants
  - Températures
  - Tensions cellules
  - Températures cellules

Il est important de noter que les profils chargés seront de la forme :

Temps (s)	Courant (A)	Tension Min/Max	Courant Min/Max	Température Min/Max
$t_1$	$I(t_1)$	$V_{min1}/V_{max1}$	$I_{min1}/I_{max1}$	$T_{min1}/T_{max1}$
$t_2$	$I(t_2)$	$V_{min2}/V_{max2}$	$I_{min2}/I_{max2}$	$T_{min2}/T_{max2}$
...	...	...	...	...

Tableau 6. Cahier des charges concernant les réglages de l'IHM

Comme nous n'avons pas accès à une batterie ni à des relevés capteurs associés, aucune mesure ne peut être affichée. De plus, comme le programme de communication avec l'alimentation n'est pas opérationnel, le chargement d'un profil n'est pas utile. Nous allons donc utiliser une suite de valeurs (que des 0 pour le mode Auto et des relevés aléatoires pour le mode Manuel) afin d'être au moins capable de : distinguer les deux modes de fonctionnement, de charger un fichier csv., et d'afficher des données chargées en temporel.

L'IHM se présente ainsi :

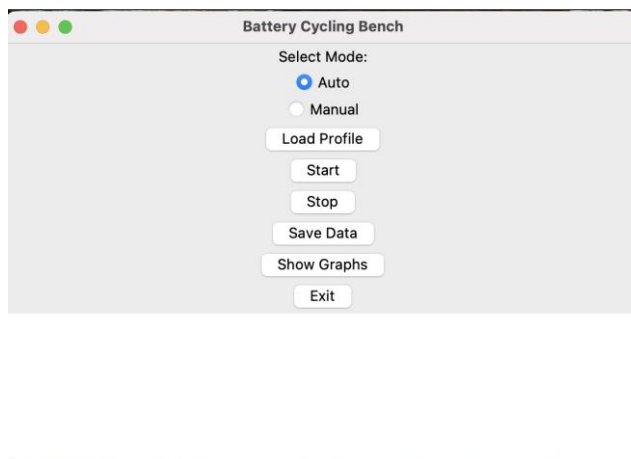


Figure 25. Affichage de l'interface homme-machine

Nous allons expliciter seulement le bouton « Load Profile ». Le bouton « Load Profile » ouvre une fenêtre de recherche de fichiers :

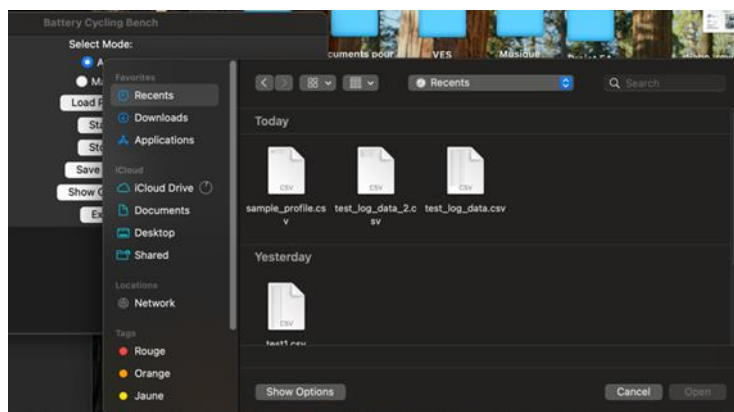


Figure 26. Page de recherche de fichier de l'IHM

Le profil chargé est arbitraire :

	A	B	C	D	E	F	G
	sample_profile						
1	Time	Voltage	Current	Temperature	BMS Faults	Cell Voltage	Cell Temperature
2	1736943899.5500178	3.7	0.5	25	No faults	3.7	25
3	1736943899.8000193	3.8	0.6	26	No faults	3.8	26
4	1736943900.0500205	3.9	0.7	27	No faults	3.9	27
5	1736943900.300021	4.0	0.8	28	No faults	4.0	28
6	1736943900.5500214	4.1	0.9	29	No faults	4.1	29

Figure 27. Exemple de profil de charge

Une fois, le profil chargé correctement, un message s’affiche :

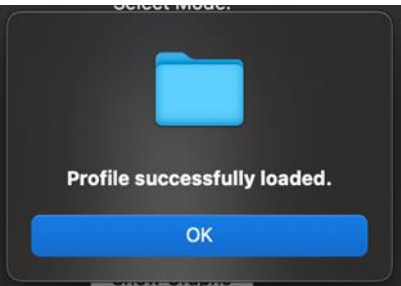


Figure 28. Message de confirmation

Nous cliquons maintenant sur « start » pour démarrer l’acquisition de données :



Figure 29. Acquisition de données lancées sur l'IHM

Quand l’acquisition est finie, il nous est alors possible de télécharger les données simulées dans un fichier texte d’extension .csv avec le bouton « Save Data » :



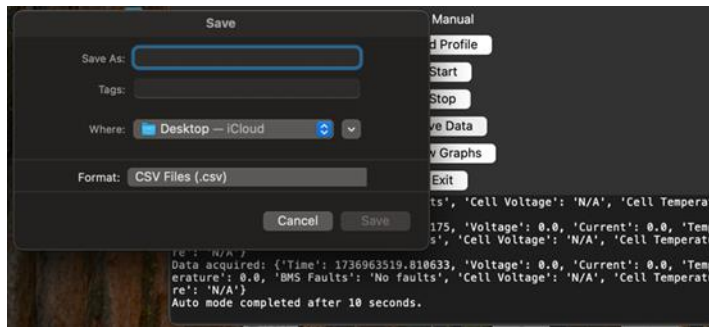


Figure 30. Téléchargement des données mesurées dans un fichier texte

Et l'interface homme-machine affiche les courbes de décharge et de charge en fonction du temps :

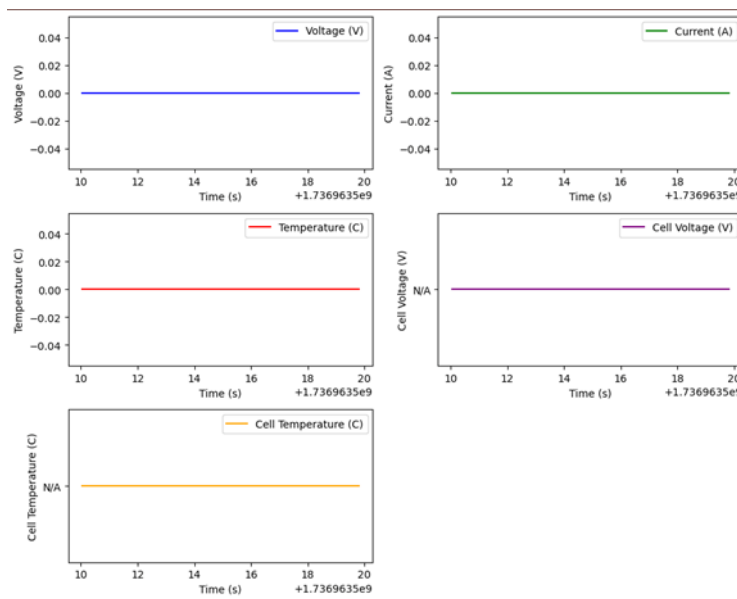


Figure 31. Graphique générée par l'IHM en mode de fonctionnement auto

Les relevés sont tous nuls puisque nous avons choisi le mode auto et que nous n'avons pas accès à de véritables mesures de quelconques capteurs. Cependant, les 5 mesures demandées dans le cahier des charges, apparaissent bien : Tensions, Courants, Températures, Défauts BMS, Températures cellules, Tensions cellules.

Les détails concernant le mode manuel et les autres fonctionnalités sont dédiés au rapport technique.

L'étape finale concernant cette fonctionnalité aurait été de lier le programme définitif de communication avec l'alimentation de la batterie au programme de l'interface homme-machine pour lancer et arrêter les cycles de charges/décharges. Ensuite, de configurer les capteurs et pour créer les fichiers texte d'extension .csv contenant les données mesurées et les afficher.

Pour conclure sur cette partie, nous avons **une interface utilisateur** et **une communication validée** avec l'alimentation de la batterie. En revanche, nous ne sommes pas capables d'appliquer des commandes pour piloter le cyclage de la batterie.

La principale difficulté réside dans la nécessité de valider certaines tâches préalablement avant de pouvoir progresser vers les suivantes. De plus, le domaine d'application de ce travail concerne l'informatique industrielle, un domaine relativement éloigné de notre spécialité en option A de formation, axée sur l'électronique de puissance et la conversion d'énergie. Cette contrainte implique un temps de développement supplémentaire ainsi que l'intervention technique d'un expert familiarisé avec ce domaine.

Nous estimons le temps nécessaire à la finalisation de cette fonctionnalité est de **30 heures** (15 heures pour la commande de l'alimentation et 15 heures pour l'interface homme-machine).

## Conclusion

Pour terminer sur ce projet, nous avons pu valider le fonctionnement de la mesure de tension et de l'interface homme-machine. Il aurait néanmoins été crucial d'effectuer le montage complet du système et de configurer les cartes modulaires ADAM-5000, pour afficher les valeurs mesurées à l'aide de notre interface utilisateur, tâche qui n'a pas été réalisée. Pour cela, il aurait été nécessaire de se rendre sur site de l'entreprise pour effectuer le montage final du banc et tester l'ensemble des fonctionnalités. Cependant, le matériel n'était pas encore disponible chez le client, de plus, le temps requis pour réaliser le montage et la programmation s'avère trop conséquent.

Voici une liste correspondant aux actions qu'ils restent à faire :

- Assemblage et test des modules d'entrée/sortie de la série ADAM 5000
- Programmation finalisée de l'interface utilisateur communicante avec les modules, l'alimentation et la batterie (BMS)
- Tester la mesure de tension
- Tester la mesure de courant
- Tester la mesure de température
- Tester l'arrêt d'urgence

Nous estimons cette durée totale à environ **60 heures**.

Pour récapituler, le taux de complétion finale du projet est représenté ci-dessous :

	Tâches	Taux de completion
Phase initiale	Analyse des besoins	100%
	Choix des composants	100%
	Schéma de câblage	100%
Hardware	Mesure tension	80%
	Mesure courant	70%
	Mesure température	70%
	Arrêt d'urgence	70%
Software	Contrôle alimentation	50%
	Communication CAN	50%
	Interface utilisateur	50%
	Total	74,00%

Tableau 7. Taux de complétion final du projet

Par ailleurs, voici un tableau qui indique le respect du cahier des charges :

Titre	Description	Critère de validation	Critère de négociation	Résultat atteint ?	Remarque
Nombre d'Elément Sous Test	Le banc doit pouvoir accueillir 1 EST	N.A.	F0	oui	
Alimentation bidirectionnel	Le banc doit pouvoir commander une alimentation de la gamme Elektro-Automatik EA-PSB 10000.	N.A.	F0	non	Pas encore réalisé
Alimentation +12V	Le banc doit disposer d'une alimentation +12V pour alimenter le BMS	N.A.	F0	oui	
Communication CAN	Le banc doit pouvoir établir une communication CAN avec le BMS	N.A.	F0	oui	
Acquisition de tensions	Le banc doit pouvoir mesurer des tensions comprises entre 0 V et 60 V	Précision +/- 1 V Fréquence d'acquisition 10Hz 3 voies de mesures	F0	oui	
Acquisition de courant	Le banc doit pouvoir mesurer des courants compris entre -800 A et 800 A	Précision +/- 1 A Fréquence d'acquisition 10Hz 3 voies de mesures	F0	non	Précision +/- 1,8 A
Acquisition de températures	Le banc doit pouvoir mesurer des températures comprises entre -40 °C et 100 °C	Précision de +/- 3 °C Fréquence d'acquisition 1Hz 10 voies de mesure	F0	oui	
Arrêt d'urgence	Le banc doit avoir un arrêt d'urgence coupant l'arrivée électrique de l'alimentation HV et déconnecter la sortie de l'alimentation HV de l'EST.	N.A.	F0	oui	
Fusible	Le banc doit disposer de fusibles 500A en sortie de l'alimentation HV	N.A.	F0	oui	
Contacteur	Le banc doit disposer de relais de puissance LEV200 en sortie d'alimentation HV	N.A.	F0	oui	
Log des données	Le banc doit sauvegarder les données sélectionnées par l'utilisateur dans un fichier .csv	[...]	F0	non	Pas encore réalisé
Chargement et exécution de profils	L'utilisateur doit pouvoir charger un profil au format .csv afin de le faire exécuter par le banc	[...]	F0	non	Pas encore réalisé
Interface utilisateur	Le banc doit disposer d'une interface utilisateur	[...]	F0	non	Pas encore réalisé

Tableau 8. Respect du cahier des charges

On fournit également une estimation du coût final du banc de test, avec les éléments suivants non pris en comptes : alimentation bidirectionnelle fourni par le client et le temps de développement du projet

Fonction	Dénomination	Prix unitaire	Quantité	Prix total
Mesures	Capteur de courant HAL-300S	53,00 €	3	159,00 €
	Carte de mesure tensions	150,00 €	1	150,00 €
	Thermocouples	14,27 €	10	142,70 €
Traitement	Ordinateur	500,00 €	1	500,00 €
	ADAM 5000/TCP	463,00 €	1	463,00 €
	Module 5017	190,00 €	1	190,00 €
	Module 5018	235,00 €	2	470,00 €
	Module 5060	115,00 €	1	115,00 €
	Relais LEV200	200,00 €	1	200,00 €
	Sonde CAN/USB	70,00 €	1	70,00 €
Alimentation	Alimentation externes 4 sorties	100,00 €	1	100,00 €
	Contacteur Arrêt d'urgence	347,00 €	1	347,00 €
	Bouton poussoir	39,00 €	1	39,00 €
	Convertisseur AC/DC	20,00 €	1	20,00 €
	Fusible 500A	135,00 €	1	135,00 €
			<b>Prix total</b>	<b>3 100,70 €</b>

Tableau 9. Estimation du coût total du banc de test

Selon nos recherches, le banc de test actuel du client coûte très approximativement 200 000 euros. Notre projet démontre néanmoins la faisabilité de développer une alternative. Ce banc de cyclage de batteries à moindre coût constitue une solution viable pour soutenir l'accroissement de la production de l'entreprise. Toutefois,

il incombe au client de finaliser le projet en s'appuyant sur nos travaux, nous estimons le temps de développement nécessaire à environ **60 heures**. Nous allons fournir au client les deux livrables, **D1 : architecture interne** (non complètement validé) et **D2 : interface utilisateur** (non complètement fonctionnelle).

Bien que nous ayons entamé ce projet en cinquième année, et malgré la contrainte de temps de projet inférieure liée au double cursus master suivi par l'un des deux étudiants désignés, nous n'avons pas pu mener le projet à son terme (validation). Cela s'explique principalement par la technicité élevée du projet et la complexité des enjeux qu'il impliquait. Ce projet exigeait certaines compétences pointues dans un domaine qui déborde du cadre de notre spécialisation initiale. Cependant, cette expérience a été extrêmement enrichissante, ce sont ces difficultés qui nous ont permis de développer des compétences transversales, d'approfondir nos connaissances dans un nouveau domaine et de renforcer notre capacité à collaborer avec des experts externes. Ces apprentissages constituent une base solide pour relever de futurs défis professionnels avec davantage d'assurance et de préparation.