

# PROJET

# POTENTIOSTAT SOLAIRE

## DOCUMENTATION

## TECHNIQUE

Client : CORNET Jean-François  
Réfèrent Polytech : LAFFONT Jacques  
Tuteur industriel : KERSULEC François

Étudiants : DELATTRE Nicolas – PRINET Thomas



Polytech Clermont – Génie Électrique  
20/01/2025

## TABLE DES MATIÈRES

1.	Introduction.....	1
2.	Fonctionnement d'une cellule PEC.....	2
2.1.	Introduction aux cellules PEC.....	2
2.2.	Modelisation electrique d'une cellule PEC .....	2
3.	Dimensionnement du circuit électronique.....	7
3.1.	Convertisseur DC/DC.....	7
3.1.1.	Presentation du montage.....	7
3.1.2.	Etude du fonctionnement .....	8
3.1.2.1.	Définition des équations .....	8
3.1.2.2.	Recherche des valeurs moyennes .....	9
3.1.2.3.	Contrainte sur l'inductance .....	11
3.1.2.4.	Contrainte sur le condensateur .....	12
3.1.2.5.	Contraintes sur les semis-conducteurs.....	14
3.1.3.	Choix des composants.....	15
3.1.3.1.	Grandeurs du circuit.....	15
3.1.3.2.	Choix de l'inductance .....	15
3.1.3.3.	Choix du condensateur.....	16
3.1.3.4.	Choix de la transistor.....	16
3.1.3.5.	Choix de la diode.....	16
3.2.	Circuits de mesures.....	17
3.3.	Interface Homme machine (IHM) .....	18
3.4.	Alimentation microcontrolleur .....	19
4.	Programmation du microcontrôleur.....	22
4.1.	Rôle de la régulation .....	22
4.2.	Structure du code et algorithme utilisée .....	23
4.2.1.	Algorithme général.....	23
4.2.2.	Description étape par étape.....	24
4.2.3.	Appel de la fonction de régulation.....	24
4.2.4.	Lecture des tensions.....	24
4.2.5.	Régulation et modification de la commande .....	25
5.	Création du PCB.....	27
6.	Notice de démarrage.....	28
7.	Tests et resultats .....	30
7.1.	Presentation des tests.....	30
7.1.1.	Test 1 : Convertisseur DC/DC et code de régulation .....	30
7.1.2.	Test 2 : Circuit de mesure .....	31

---

7.1.3.	TEST 3 : IHM.....	32
7.1.4.	Test 4 : Alimentation microcontrôleur.....	32
7.1.5.	Test final .....	34
7.2.	Presentation des resultats.....	35
7.2.1.	Test 1 : Boost et code de régulation .....	35
7.2.2.	Test 2 : Circuit de mesure .....	36
7.2.3.	TEST 3 : IHM.....	36
7.2.4.	Test 4 : Alimentation microcontrôleur.....	37
7.2.5.	Test final .....	39
8.	Bilan des tâches a réaliser .....	41
8.1.	Modifications du circuit .....	41
8.2.	Modifications du PCB.....	41
8.3.	Tests à réaliser.....	43
9.	Conclusion .....	44
10.	Annexes .....	45

## TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Photo d'une cellule PEC.....	2
Figure 2 : Représentation de la cellule PEC.....	2
Figure 3 : Evolution des potentiels des électrodes en fonction de la densité de courant.....	3
Figure 4 : Ddp vs Densité de courant (Sivula).....	3
Figure 5 : Ddp vs Densité de courant (Majumder).....	3
Figure 6 : Ddp vs Densité de courant (Sivula).....	4
Figure 7 : Ddp vs Surtension (Majumder).....	4
Figure 8 : Puissance de sortie en fonction de la surtension (Sivula).....	4
Figure 9 : Puissance de sortie en fonction de la surtension (Majumder).....	4
Figure 10 : Schématisation du modèle équivalent des cellules PEC.....	5
Figure 11 : Modèle équivalent pour la cellule idéale.....	5
Figure 12 : Modèle équivalent pour la cellule réelle.....	6
Figure 13 : Montage survolteur.....	7
Figure 14 : Montage équivalent - Première phase.....	8
Figure 15 : Montage équivalent - Seconde phase.....	9
Figure 16 : Evolution du courant $i_L$ dans le temps.....	11
Figure 17 : Evolution de la tension $u_C$ dans le temps.....	12
Figure 18 : Schéma circuits de mesure.....	17
Figure 19 : Montage potentiomètre.....	18
Figure 20 : Schéma programmation $u_C$ .....	18
Figure 21 : Montage affichage LEDs.....	19
Figure 22 : Montage communication USB.....	19
Figure 23 : Montage bouton démarrage.....	20
Figure 24 : Commutation avec relais VS commutation avec diodes.....	20
Figure 25 : Protection avec régulateur VS protection avec diodes.....	21
Figure 26 : Schéma cellule électrochimique.....	22
Figure 27 : Schéma électrique équivalent cellule électrochimique.....	23
Figure 28 : Architecture utilisée.....	24
Figure 29 : Timing lecture tensions.....	25
Figure 30 : Mise en route du système.....	28
Figure 31 : Position cavalier alimentation USB.....	29
Figure 32 : Branchement Pickit3.....	29
Figure 33 : Programmation avec MPLAB.....	29
Figure 34 : Schéma pour le test 1.....	30
Figure 35 : Circuits de mesure.....	31
Figure 36 : Schéma pour le test du bouton de démarrage.....	32
Figure 37 : Schéma pour le test de l'alimentation USB.....	33
Figure 38 : Position du cavalier pour le test USB.....	33
Figure 39 : Schéma pour le test de la protection $u_C$ .....	33
Figure 40 : Schéma pour le test du boost $u_C$ .....	34
Figure 41 : Schéma pour le test de la commutation d'alimentation.....	34
Figure 42 : Environnement du test 1.....	35
Figure 43 : Fonctionnement LEDs.....	37
Figure 44 : Programmation du microcontrôleur.....	37
Figure 45 : Résultats test cellule Majumder.....	39
Figure 46 : Résultats test cellule Sivula.....	39

Figure 47 : Modifications à réaliser sur le schéma - Partie 1.....	41
Figure 48 : Modifications à réaliser sur le schéma - Partie 2.....	42
Figure 49 : Modifications à réaliser sur le PCB .....	42

# 1. INTRODUCTION

Ce dossier technique complète le rapport de projet relatif au développement d'un potentiostat solaire, un dispositif destiné à optimiser la production d'hydrogène par photoélectrolyse de l'eau dans une cellule photoélectrochimique (PEC). Ce projet, mené en collaboration avec le groupe GePeb de l'Institut Pascal, s'inscrit dans une démarche d'innovation technologique en faveur des énergies renouvelables.

L'objectif principal est de fournir un support technique détaillé sur la conception, le dimensionnement, la programmation et les tests liés au système. Les défis techniques rencontrés, les solutions apportées et les résultats obtenus sont documentés pour offrir une vue complète du projet. Ce dossier constitue également un outil de référence pour toute reprise, évolution ou application à plus grande échelle du dispositif.

Le document aborde successivement le fonctionnement des cellules PEC, le dimensionnement des circuits électroniques, la programmation du microcontrôleur, la création du PCB, les tests réalisés, ainsi que les perspectives d'amélioration identifiées.

## 2. FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PEC

Avant toute chose, il est important de bien définir le fonctionnement d'une cellule PEC afin de bien comprendre les raisons des choix réalisés. Cette section propose donc une présentation du fonctionnement de ce type de cellule ainsi que sa modélisation électronique.

### 2.1. INTRODUCTION AUX CELLULES PEC

Dans le cadre de ce projet, le système de sortie est une cellule PEC (voir figure 1). Ce système est le réceptacle d'une réaction photoélectrochimique permettant de créer de l'hydrogène par photo-électrolyse de l'eau. Une représentation simplifiée de la cellule est donnée en figure 2.

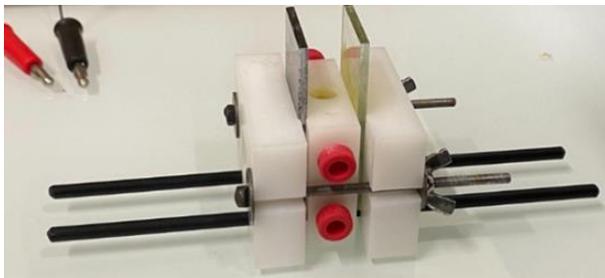


Figure 1 : Photo d'une cellule PEC

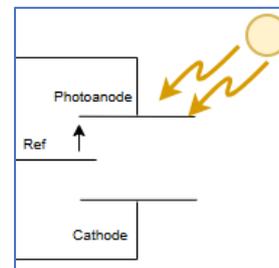


Figure 2 : Représentation de la cellule PEC

Comme il est possible de le voir sur la figure 2, la cellule PEC est composée de trois électrodes : une cathode, une photoanode et une référence. Dans le cas de réaction photoélectrochimique, la photoanode joue un rôle essentiel. En effet, une fois illuminée par un rayonnement lumineux, elle va emmagasiner l'énergie, ce qui va induire un potentiel sur cette dernière, appelé potentiel d'abandon. Cette différence de potentiel aura pour effet d'amorcer la réaction d'électrolyse et des électrons vont commencer à transiter de la photoanode vers la cathode, faisant apparaître un courant en boucle fermée.

Au final, être capable de piloter les différences de potentiels entre les électrodes permet de contrôler la réaction, ce qui est l'objectif principal de ce projet.

### 2.2. MODELISATION ELECTRIQUE D'UNE CELLULE PEC

Afin de pouvoir dimensionner ainsi que de valider le fonctionnement du système, il a été nécessaire de s'intéresser à l'aspect électronique de la cellule. A l'issue, cette modélisation va permettre de définir les ordres de grandeurs des courants et tensions appliqués à la cellule. Aussi, la cellule PEC n'étant pas à disposition durant le développement de ce système, cette modélisation sera nécessaire afin de pouvoir réaliser des tests avec une charge proche du système réel.

Dans le cadre de ce projet, l'étude a été réalisée dans l'optique de l'utilisation de cellules idéales de surfaces éclairées de 700mm<sup>2</sup>. Deux types de photoanodes ont été abordés :

- Meilleure photoanode existante (Majunder) ;
- Photoanode parfaite idéale (Sivula), la meilleure qu'il serait théoriquement possible de créer.

La première étape était de comparer l'évolution des potentiels de la cathode et des photoanodes. Ces évolutions sont visibles dans la figure 3 :

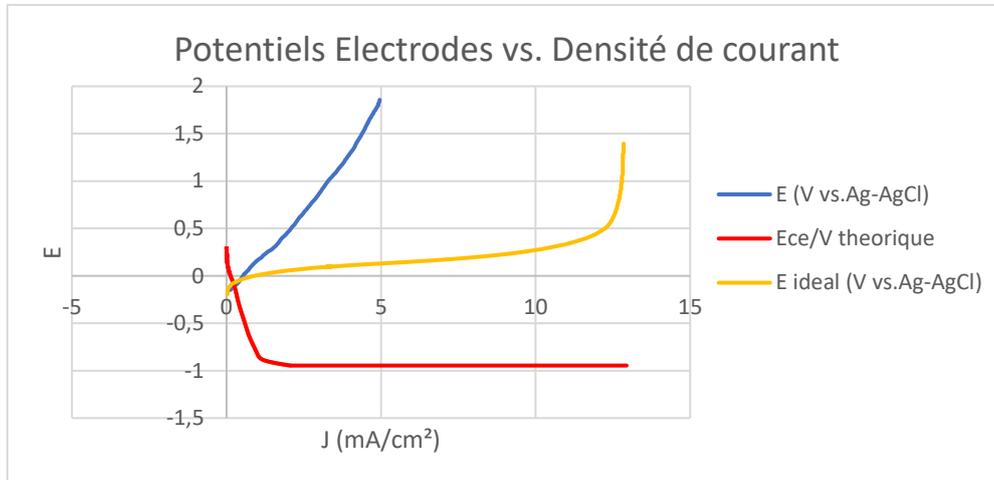


Figure 3 : Evolution des potentiels des électrodes en fonction de la densité de courant

Sur cette figure les potentiels sont donnés par rapport à une référence se type Ag-AgCl. En bleu est représenté l'évolution de la photoanode existante, en jaune celle de la photoanode idéale et en rouge l'évolution de la contre électrode (cathode).

Il est visible que l'écart entre les deux technologies de photoanodes va fortement impacter la modélisation de la charge.

Suite à cela, il était donc possible d'obtenir l'évolution de la différence entre le potentiel de la photoanode et de la contre-électrode en fonction de la densité de courant (figure 4-5) et de la surtension appliquée sur la photoanode (figure 6-7).

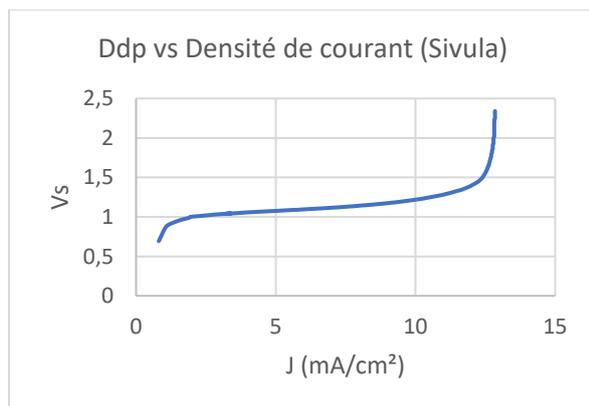


Figure 4 : Ddp vs Densité de courant (sivula)

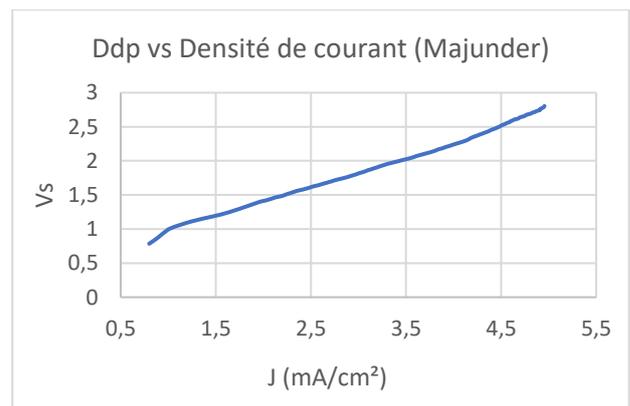


Figure 5 : Ddp vs Densité de courant (Majunder)

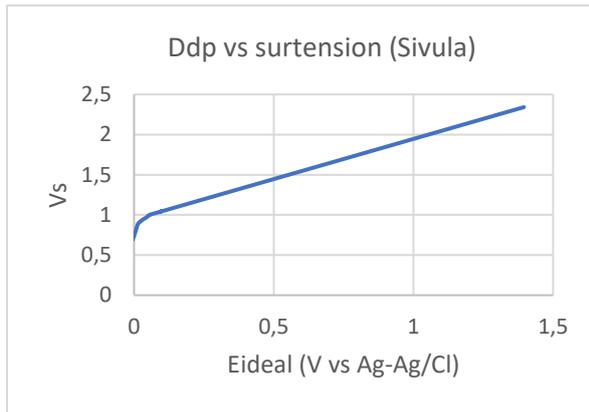


Figure 6 : Ddp vs Densité de courant (Sivula)

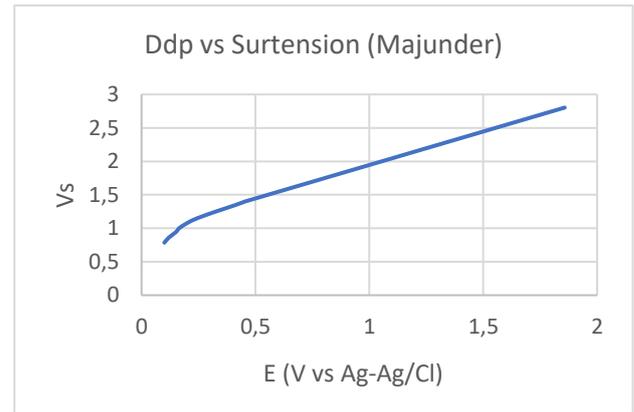


Figure 7 : Ddp vs Surtension (Majumder)

Grâce à ces courbes, il est possible de voir la tension nécessaire en sortie du convertisseur DC/DC. En effet, sachant que la surtension maximale requise par le CDC est 1V, les courbes montrent qu'il faudra environ 2V en sortie pour les deux technologies. Cette valeur sera donc à prendre en compte pour le dimensionnement du convertisseur.

Par ailleurs, il est aussi possible de définir la puissance de sortie en fonction de la surtension (figures 8-9).

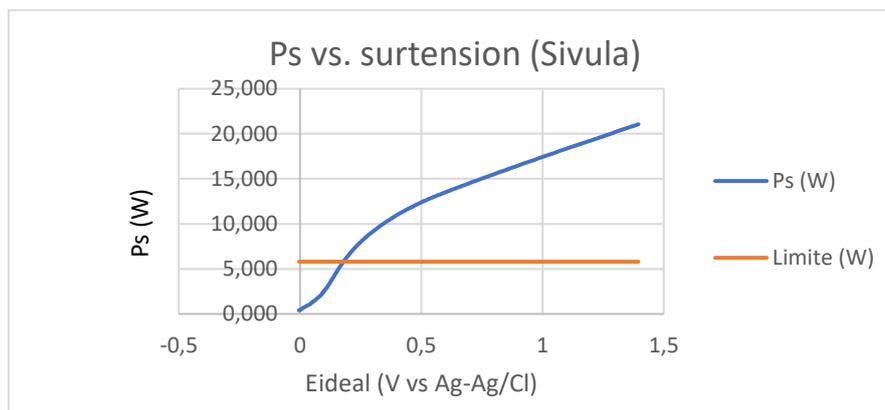


Figure 8 : Puissance de sortie en fonction de la surtension (Sivula)

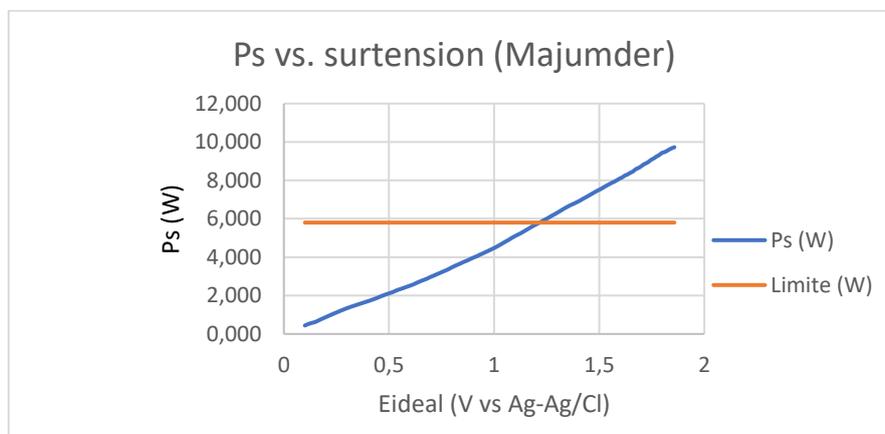


Figure 9 : Puissance de sortie en fonction de la surtension (Majumder)

Ces figures permettent de voir quelle puissance sera nécessaire en entrée du système afin de pouvoir assurer le bon fonctionnement de la cellule.

La figure 8 montre que, **lorsque 1V de surtension sera appliquée, la puissance nécessaire au fonctionnement optimal de la cellule PEC sera de 17,4W**. Considérant que la cellule PV ne fournira qu'une puissance de 5,8W maximum, cela implique que le rendement de la cellule PEC ne sera pas optimal.

La figure 9 montre que pour la meilleure photoanode actuelle, **une puissance de 4,6W sera suffisante afin d'obtenir un rendement maximal**. Cela veut dire que la cellule PV permettra le plein fonctionnement du système.

Enfin, toutes ces données ont permis de définir un modèle équivalent de chaque cellule. L'objectif de cette modélisation est de pouvoir définir un modèle résistif équivalent sur plusieurs points de fonctionnement afin de pouvoir réaliser des tests de validation du système final. Ce modèle peut être vu comme dans la figure suivante :

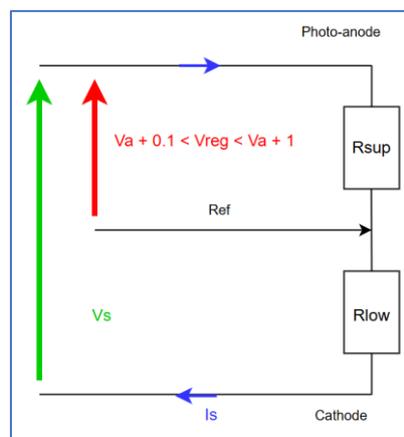


Figure 10 : Schématisation du modèle équivalent des cellules PEC

Sur ce schéma, il est possible de voir que ce modèle est composé de deux résistances, une entre la photoanode et la référence ( $R_{sup}$ ) et une entre la référence et la cathode ( $R_{low}$ ). Il est aussi possible de voir que c'est la tension aux bornes de  $R_{sup}$  qui est à contrôler.

Au final, ce travail a permis de définir les tableaux suivants donnant les valeurs de ces résistances ainsi que le courant qui doit circuler dans le circuit :

Données pour def de la charge de sortie (Sivula)						
Eideal (V vs Ag-Ag/Cl)	Vs	Current density (mA/cm <sup>2</sup> )	Courant (A)	Rtot (mohms)	Rsup (mohms)	Rlow (mohms)
0,1	1,05	3,553	2,49	421,0	40,2	380,8
0,2	1,15	8,301	5,81	198,0	34,4	163,6
0,3	1,25	10,521	7,36	169,6	40,7	128,9
0,4	1,35	11,662	8,16	164,8	49,0	115,8
0,5	1,45	12,268	8,59	169,2	58,2	110,9
0,6	1,55	12,491	8,74	177,2	68,6	108,6
0,7	1,65	12,607	8,82	186,5	79,3	107,2
0,8	1,75	12,696	8,89	197,3	90,0	107,3
0,9	1,85	12,750	8,92	207,3	100,8	106,4
1	1,95	12,794	8,96	217,3	111,7	105,7

Figure 11 : Modèle équivalent pour la cellule idéale

Données pour def de la charge de sortie (Majumder)							
Eideal (V vs Ag-Ag/Cl)	Vs	Current density (mA/cm <sup>2</sup> )	Courant (A)	Rtot (mohms)	Rsup (mohms)	Rlow (mohms)	
0,1	0,785	0,800	0,56	1401,8	178,6	1223,2	
0,2	1,114	1,250	0,88	1273,1	228,6	1044,6	
0,3	1,243	1,630	1,14	1089,4	262,9	826,5	
0,4	1,345	1,850	1,30	1038,6	308,9	729,7	
0,5	1,450	2,098	1,47	987,4	340,5	647,0	
0,6	1,551	2,333	1,63	949,3	367,3	582,0	
0,7	1,651	2,597	1,82	908,1	385,0	523,1	
0,8	1,752	2,856	2,00	876,3	400,2	476,0	
0,9	1,852	3,081	2,16	858,7	417,3	441,4	
1	1,953	3,299	2,31	845,5	433,0	412,5	

Figure 12 : Modèle équivalent pour la cellule réelle

Il est possible de voir dans ces tableaux que les jeux de résistances sont très différents selon la technologie de la photoanode. Cela correspond à l'hypothèse faite précédemment. Par ailleurs, la tension maximale de sortie est de 1,95V dans les deux cas, ce qui correspond à ce qui a été constaté grâce aux figures 6 et 7. Enfin, les courants circulant dans chaque cellule sont très différents selon la technologie. Au final, dans l'optique de dimensionner le convertisseur DC/DC, le courant de sortie maximal sera de 8,96A.

**En conclusion, ce travail de modélisation a été essentiel pour ce projet. En effet, il a permis d'obtenir des informations essentielles pour le dimensionnement du convertisseur DC/DC. Aussi, il a permis de mieux comprendre le fonctionnement électrochimique des cellules PEC et de voir les possibilités qu'offre le système dans les conditions du CDC.**

### 3. DIMENSIONNEMENT DU CIRCUIT ELECTRONIQUE

Cette section détaille toute la démarche réalisée afin de dimensionner les composants de chaque sous-circuit du système final.

#### 3.1. CONVERTISSEUR DC/DC

##### 3.1.1. PRESENTATION DU MONTAGE

L'objectif de ce circuit est d'amplifier la tension d'entrée issue de la cellule photovoltaïque afin de s'adapter aux besoins de la cellule photoélectrochimique. Le montage sélectionné est un hacheur parallèle (montage boost ou survolteur). Le circuit est le suivant :

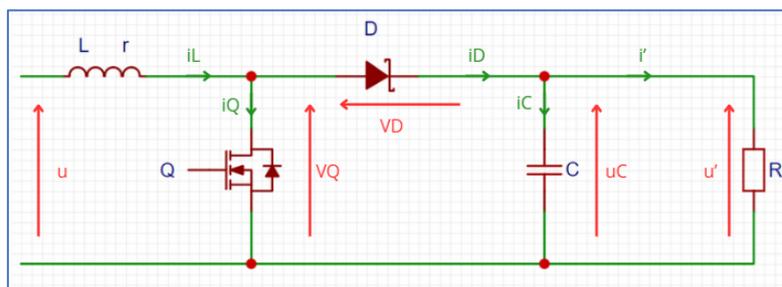


Figure 13 : Montage survolteur

Ce montage est composé de quatre composants :

- **Une inductance**

Ce composant est essentiel pour le fonctionnement de ce circuit. En effet, c'est ce dernier qui va permettre d'amplifier la tension de sortie. Cela est possible par le fait que l'inductance va se magnétiser et donc emmagasiner de l'énergie, puis restituer cette dernière afin d'augmenter la tension de sortie. Par ailleurs, l'inductance va permettre de limiter les variations de courant en entrée et donc protéger la source d'alimentation.

- **Un transistor**

Son rôle est de contrôler la commutation entre les phases de charge et de décharge de l'inductance. Il y a deux états possibles :

- Lorsqu'il est passant (ON), l'inductance va emmagasiner de l'énergie.
- Lorsqu'il est bloqué (OFF), l'inductance va se décharger dans la charge de sortie.

- **Un condensateur**

Cet élément a pour rôle de lisser la tension de sortie afin que cette dernière soit stable. Pour cela, le condensateur va emmagasiner de l'énergie durant la phase de décharge (OFF) de l'inductance et la restituera à la charge lors de la seconde phase (ON).

- **Une diode**

Ce composant permet la bonne circulation du courant dans le circuit. En effet, lors de la décharge de l'inductance (OFF), elle va conduire le courant vers la charge et le condensateur. Lors de la phase de charge (ON), la diode va permettre d'éviter que le courant issu de la capacité ne revienne vers l'inductance afin que ce dernier soit entièrement transmis à la charge.

### 3.1.2. ETUDE DU FONCTIONNEMENT

Cette section expose la réflexion menée afin de définir les contraintes sur les différents composants constituant ce montage.

#### 3.1.2.1. DEFINITION DES EQUATIONS

Dans un premier temps, une analyse du circuit doit être menée afin de définir les équations temporelles régissant le circuit.

- **Phases de fonctionnement**

Le signal de commande du transistor sera une PWM de période  $T$  et de rapport cyclique  $\alpha$ .

Pour  $0 < t < \alpha T$  :

Q passant  $\rightarrow v_Q = 0$  ;  $V_D(t) = -u'(t)$

Pour  $\alpha T < t < T$  :

Q bloqué  $\rightarrow v_Q = -u'(t)$  ;  $V_D(t) = 0$

- **Etude en régime établi**

Pour  $0 < t < \alpha T$  :

Le montage équivalent est le suivant :

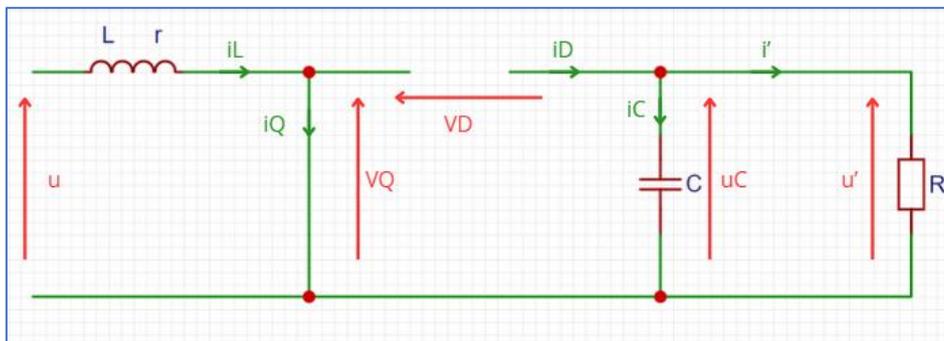


Figure 14 : Montage équivalent - Première phase

Les équations du circuit sont :

$$u'(t) = -R \cdot i_c = -RC \frac{du'(t)}{dt} \quad (1)$$

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + r \cdot i_L(t) \quad (2)$$

$$i_c(t) + i'(t) = 0 \rightarrow C \frac{du'(t)}{dt} + \frac{u'(t)}{R} = 0 \quad (3)$$

Pour  $\alpha T < t < T$  :

Le montage équivalent est le suivant :

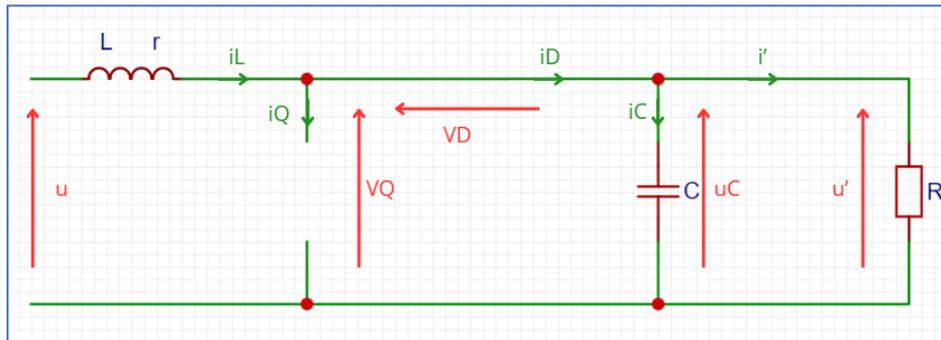


Figure 15 : Montage équivalent - Seconde phase

Les équations du circuit sont :

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + r \cdot i_L(t) + V_d + u'(t) \quad (4)$$

$$i_L(t) = i_C(t) + i'(t) = C \frac{du'(t)}{dt} + \frac{u'(t)}{R} \quad (5)$$

### 3.1.2.2. RECHERCHE DES VALEURS MOYENNES

A présent, l'objectif est de définir les valeurs moyennes du courant traversant l'inductance  $i_L$  et de la tension de sortie  $u'$  appliquée à la charge et au condensateur.

L'expression générale de la valeur moyenne de  $u(t)$  est la suivante :

$$\langle u \rangle = U = \frac{1}{T} \int_0^T u'(t) dt$$

En utilisant les relations (2) et (4), cette expression donne :

$$U = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\alpha T} L \left\langle \frac{di(t)}{dt} \right\rangle + r \cdot \langle i_L(t) \rangle dt + \int_{\alpha T}^T L \left\langle \frac{di(t)}{dt} \right\rangle + r \cdot \langle i_L(t) \rangle + \langle V_d \rangle + \langle u'(t) \rangle dt \right]$$

Or,

$$\left\langle \frac{di(t)}{dt} \right\rangle = 0 \text{ car les oscillations sont centrées}$$

$$\langle V_d \rangle = 0 \text{ car } c' \text{ est une constante}$$

$$\langle u'(t) \rangle = U'$$

Ainsi, l'expression de la valeur moyenne de la tension est :

$$U = r \langle i_L \rangle + (1 - \alpha) Vd + (1 - \alpha) U' \quad (6)$$

Par ailleurs, les équations (3) et (5) donnent :

$$C \left\langle \frac{du'(t)}{dt} \right\rangle + \frac{\langle u'(t) \rangle}{R} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\alpha T} 0 dt + \int_{\alpha T}^T \langle i_L(t) \rangle dt \right]$$

Ainsi :

$$(1 - \alpha) \langle i_L \rangle = \frac{U'}{R} \quad (7)$$

$$\rightarrow U' = (1 - \alpha) R \langle i_L \rangle \quad (8)$$

Afin d'obtenir la relation entre les valeurs moyennes des tensions d'entrée et de sortie, il suffit d'insérer l'équation (7) dans la (6) :

$$U = \frac{r}{R} \frac{U'}{1 - \alpha} + (1 - \alpha) Vd + (1 - \alpha) U'$$

$$\rightarrow U' = \frac{U}{1 - \alpha} - Vd \quad (1^*)$$

**Remarque :**

**En considérant cette expression et le fait que  $\alpha$  sera compris entre 0 et 1, l'expression (1\*) permet de justifier le choix du montage, car la valeur moyenne de sortie est plus grande que la valeur moyenne d'entrée.**

Enfin, en insérant l'expression (8) dans (6), il est possible de retrouver l'expression de la valeur moyenne de  $i_L$  en fonction de la valeur moyenne de la tension d'entrée :

$$U = r \langle i_L \rangle + (1 - \alpha) Vd + R(1 - \alpha)^2 \langle i_L \rangle$$

Si  $r \ll R$ , la relation devient :

$$\rightarrow \langle i_L \rangle = \frac{U - (1 - \alpha) Vd}{R(1 - \alpha)^2} \quad (2^*)$$

## 3.1.2.3. CONTRAINTE SUR L'INDUCTANCE

Comme exprimé dans la section 2, l'inductance a un rôle crucial, celui d'emmagasiner de l'énergie et de la restituer au moment propice. De plus, l'inductance va permettre de lisser le courant d'entrée. Ce point est important, car si le composant est mal dimensionné, le courant d'entrée repassera par zéro, ce qui correspond à un arrêt de transfert d'énergie et à une perte d'efficacité, voire même à une défaillance du convertisseur.

Afin d'éviter cela, il est important de définir une contrainte sur l'inductance afin de limiter les variations de courant et d'ainsi éviter la problématique de démagnétisation totale.

Les variations peuvent être assimilées aux cycles de charge et de décharge de l'inductance. Sa forme caractéristique est visible sur la figure ci-dessous :

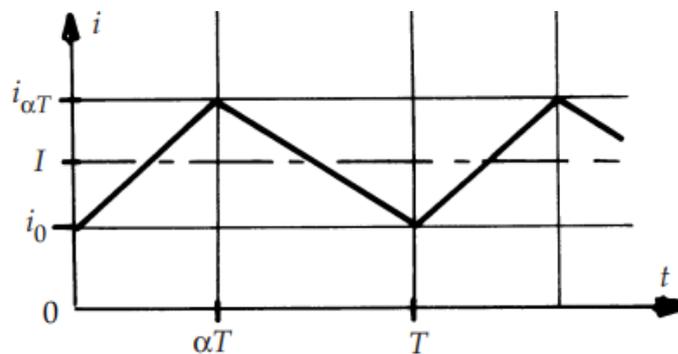


Figure 16 : Evolution du courant  $i_L$  dans le temps

- **Expression temporelle de  $i_L$**

Il est possible de définir l'expression temporelle de  $i_L$  pour chaque phase.

Pour  $0 < t < \alpha T$  :

$$i_L(t) = i_0 + \frac{U}{L} t$$

Pour  $\alpha T < t < T$  :

$$i_L(t) = i_{\alpha T} + \frac{U - V_d - U'}{L} (t - \alpha T)$$

- **Taux d'ondulation de  $i_L$**

En  $t = \alpha T$  ces deux expressions sont égales (continuité du courant dans une inductance). Ainsi :

$$\Delta i_L = i_{\alpha T} - i_0 = i_L(\alpha T) - \frac{U - V_d - U'}{L} (t - \alpha T) - i_L(\alpha T) + \frac{U}{L} \alpha T$$

$$\rightarrow \Delta i_L = \frac{U}{L} \alpha T \quad (9)$$

- **Contrainte sur L**

Au final, afin de minimiser l'ondulation, il faudra respecter la condition suivante avec I la valeur moyenne du courant de d'entrée :

$$\Delta i_L < I \rightarrow L > \frac{\alpha UT}{I} \quad (3 *)$$

### 3.1.2.4. CONTRAINTES SUR LE CONDENSATEUR

La présence du condensateur en sortie du montage est essentielle afin d'assurer une tension de sortie stable. Il est donc important de bien la dimensionner.

Tout comme pour le cas de l'inductance, les variations de tensions aux bornes du condensateur peuvent être assimilées aux cycles de charge et de décharge de condensateur. Sa forme caractéristique est visible sur la figure ci-dessous :

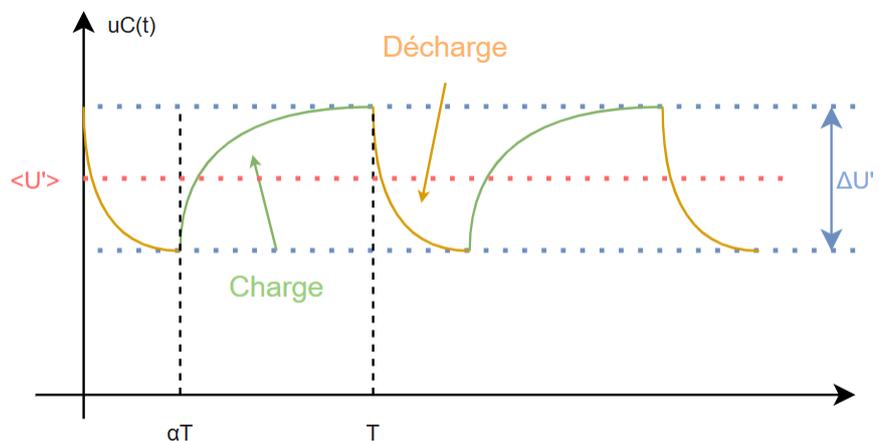


Figure 17 : Evolution de la tension  $u_C$  dans le temps

- **Expression temporelle de  $u_C$**

Les expressions temporelles pour chaque phase de fonctionnement sont les suivantes.

Pour  $0 < t < \alpha T$  :

$$u_C(t) = u'(t) = R \cdot i'(t) = -R \cdot i_C(t) = -RC \frac{du'(t)}{dt}$$

$$\rightarrow u'(t) = U'_0 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$$

Pour  $\alpha T < t < T$  :

$$u_C(t) = u'(t) = R \cdot i'(t) = R(i_L(t) - i_C(t)) = R \cdot i_L(t) - RC \frac{du'(t)}{dt}$$

$$\rightarrow u'(t) = R \cdot i_L(t) + (U'_{\alpha T} - R \cdot i_L(t)) \exp\left(-\frac{t - \alpha T}{RC}\right)$$

- Taux d'ondulation de  $u_c$

On cherche à définir  $U'_0$  et  $U'_{\alpha T}$  afin d'obtenir une expression du taux d'ondulation.

On sait que :

$$u'(\alpha T) = U'_0 \exp\left(-\frac{\alpha T}{RC}\right) = U'_{\alpha T} \quad (10)$$

$$u'(T) = R \cdot \langle i_L \rangle + (U'_{\alpha T} - R \cdot \langle i_L \rangle) \exp\left(-\frac{T - \alpha T}{RC}\right) = U'_0 \quad (11)$$

En insérant l'expression (10) dans (11) cela donne :

$$U'_0 = R \cdot \langle i_L \rangle \frac{1 - \exp\left(-\frac{(1-\alpha)T}{RC}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{RC}\right)} \quad (12)$$

Il est à présent possible de définir l'ondulation telle que :

$$\Delta U' = U'_0 - U'_{\alpha T} = U'_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha T}{RC}\right)\right)$$

$$\rightarrow \Delta U' = \frac{R \cdot \langle i_L \rangle \left( \left(1 - \exp\left(-\frac{(1-\alpha)T}{RC}\right)\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha T}{RC}\right)\right) \right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{RC}\right)} \quad (13)$$

Afin de simplifier cette formule, en considérant  $T \ll RC$ , les approximations suivantes sont valables :

$$\exp\left(-\frac{T}{RC}\right) = 1 - \frac{T}{RC} \quad ; \quad \exp\left(-\frac{\alpha T}{RC}\right) = 1 - \frac{\alpha T}{RC} \quad ; \quad \exp\left(-\frac{(1-\alpha)T}{RC}\right) = 1 - \frac{(1-\alpha)T}{RC}$$

Ainsi l'expression (13) devient :

$$\Delta U' = \frac{R \cdot \langle i_L \rangle \frac{(1-\alpha)T}{RC} \frac{\alpha T}{RC}}{\frac{T}{RC}} = \frac{R \cdot \langle i_L \rangle (1-\alpha)\alpha T}{RC} \quad (14)$$

Enfin, en insérant la formule (7) dans (14), il est possible d'obtenir une relation entre l'ondulation de la tension de sortie et sa valeur moyenne.

$$\Delta U' = \frac{U' \alpha T}{RC} \quad (15)$$

- **Contrainte sur C**

Au final, il sera possible de définir la valeur du condensateur en fonction de l'ondulation de tension prescrite par le cahier des charges. Cette contrainte est la suivante :

$$\Delta U' < \tau_{ond} \rightarrow C > \frac{U' \alpha T}{R \tau_{ond}} \quad (4 *)$$

### 3.1.2.5. CONTRAINTES SUR LES SEMIS-CONDUCTEURS

Enfin, il est important de connaître les contraintes appliquées au transistor et à la diode. Pour cela, il faut définir les tensions et courants maximums auxquels seront soumis ces composants. Les contraintes sont les suivantes :

$$V_Q \max > U'_0 = U' + \frac{\Delta U'}{2} = \frac{U'(2RC + \alpha_{max}T)}{2RC} \quad (5 *)$$

$$V_{Dinv} \max > U'_0 = \frac{U'(2RC + \alpha_{max}T)}{2RC} \quad (6 *)$$

$$I_Q \max = I_D \max > \langle i_L \rangle + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{U}{R(1-\alpha)^2} - \frac{Vd}{R(1-\alpha)} + \frac{U \alpha T}{2L} \quad (7 *)$$

### 3.1.3. CHOIX DES COMPOSANTS

Cette section donne les composants retenus pour le montage, ainsi qu'une justification de ces choix.

#### 3.1.3.1. GRANDEURS DU CIRCUIT

Afin de réaliser le dimensionnement, il a été fait une approximation par ordre de grandeur des contraintes sur les composants. Pour cela, nous avons défini les valeurs suivantes :

$0 < \alpha < 1; f \sim 10^5 \rightarrow T \sim 10^{-5}$  d'après les choix de réalisation du signal de commande

$U = 0.7V$  et  $\tau_{ond} \sim 10^{-1}$  d'après le cahier des charges

$R \sim 10^{-1}, U' \sim 10^0$  et  $I' \sim 10^1$  d'après la modélisation de la charge

$Vd \sim 10^{-1}$  d'après le choix de la diode (voir section 4.4)

Aussi, il faut une approximation de la valeur moyenne du courant d'entrée. Il est possible de l'obtenir par un bilan de puissance :

$$Pe = Ps \rightarrow U * I = U' * I'$$

$$\rightarrow I = \frac{U' * I'}{U} = \frac{10^0 * 10^1}{10^0} \sim 10^1 A$$

#### 3.1.3.2. CHOIX DE L'INDUCTANCE

- Afin de choisir l'inductance, il fallait utiliser la relation (3\*) :

$$L > \frac{\alpha UT}{I} \sim \frac{10^0 * 10^0 * 10^{-5}}{10^1} \sim 10^{-6} H$$

Il est donc possible de choisir une inductance avec une valeur en mH afin de réaliser ce montage. Ce choix permet d'assurer le maintien du régime permanent.

- Par ailleurs, il est important de sélectionner une inductance qui puisse supporter le courant qui la traversera. La relation (7\*) donne le courant maximal dans l'inductance.

$$I_Q \max > \frac{U}{R(1 - \alpha_{max})^2} - \frac{Vd}{R(1 - \alpha_{max})} + \frac{U \alpha T}{2L}$$

$$\sim \frac{10^{-1}}{10^{-1} * 10^{-1}} - \frac{10^{-1}}{10^{-1} * 10^{-1}} + \frac{10^{-1} * 10^0 * 10^{-5}}{10^{-3}} \sim 10^1 A$$

**Remarque :** étant donné que la tension de sortie maximale prévue ne nécessite pas un très grand rapport cyclique, il est possible de faire l'approximation suivante :  $(1 - \alpha_{max})^2 \sim 10^{-1}$

Au final, le composant sélectionné est une inductance de chez Würth Electronik. La référence fabricant est : **744824101**.

### 3.1.3.3. CHOIX DU CONDENSATEUR

- Afin de choisir l'inductance, il fallait utiliser la relation (4\*) :

$$C > \frac{U' \alpha T}{R \tau_{ond}} \sim \frac{10^0 * 10^0 * 10^{-5}}{10^{-1} * 10^{-1}} \sim 10^{-3} F$$

Le choix s'est donc porté sur un condensateur en mF afin de lisser correctement la tension de sortie.

- Il faut aussi considérer la tension maximale permise aux bornes du condensateur. Dans ce cas, la tension sera de l'ordre du volt ( $10^0$ ).

Le choix final s'est porté sur un condensateur venant de chez RS PRO. La référence est : **711-1668**.

### 3.1.3.4. CHOIX DE LA TRANSISTOR

- Afin de choisir le transistor, il fallait utiliser les relations (5\*) et (7\*) :

$$V_Q \max = V_{ds} \max > \frac{U'(2RC + \alpha_{max}T)}{2RC} \sim \frac{10^0 * (10^{-1} * 10^{-2} + 10^{-1} * 10^{-5})}{10^{-1} * 10^{-3}} \sim 10^1 V$$

$$I_Q \max = I_D \max > \frac{U}{R(1 - \alpha_{max})^2} - \frac{Vd}{R(1 - \alpha_{max})} + \frac{U \alpha T}{2L} \sim 10^1 A$$

- Par ailleurs, il est nécessaire que le transistor soit commandable par le microcontrôleur. Ce dernier fournissant un signal d'amplitude 5V, il faut que la condition suivante soit respectée :

$$V_{gs} \max > 5V$$

Le composant sélectionné pour ce système est un transistor MOSFET de chez Infineon. La référence fabricant est : **IRL7833PbF**.

### 3.1.3.5. CHOIX DE LA DIODE

- Afin de choisir la diode, il fallait utiliser les relations (6\*) et (7\*) :

$$V_{Dinv} \max > \frac{U'(2RC + \alpha_{max}T)}{2RC} \sim 10^1 V$$

$$I_D \max > \frac{U}{R(1 - \alpha_{max})^2} - \frac{Vd}{R(1 - \alpha_{max})} + \frac{U \alpha T}{2L} \sim 10^1 A$$

- Par ailleurs, afin de limiter la chute de tension et donc une perte d'énergie, il faut que cette diode ait une tension directe minimale. Aussi, la fréquence de commande étant grande, il faut que le temps de commutation de la diode soit réduit. Pour être en adéquation avec ces contraintes, le choix de technologie s'est porté sur une diode de type Schottky.

La diode utilisée pour cette application est donc une diode de chez STMicroelectronics. La référence est : **STPS10L25D/G**.

### 3.2. CIRCUITS DE MESURES

L'ensemble du système s'articule autour d'un microcontrôleur (uC). Ce dernier est en effet un élément central de la carte. C'est lui qui commande le convertisseur DC/DC présenté précédemment afin de réaliser la régulation. Pour faire cela, le uC a besoin de lire plusieurs tensions, comme la tension de sortie du montage boost ( $V_s$ ) ou bien la tension sur la broche de référence de la cellule PEC ( $V_{ref}$ ). Le schéma ci-après présente les circuits de mesures :

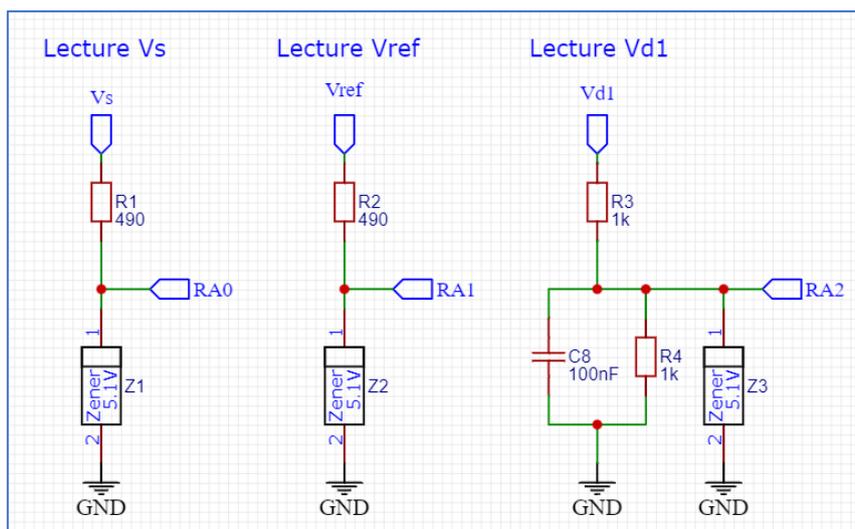


Figure 18 : Schéma circuits de mesure

Les circuits de mesure ont été dimensionnés pour que le uC lise une tension de 5V au maximum. Pour cela, une diode Zener ayant une tension inverse de 5.1V est présente. Elle permet de protéger le uC en cas de tension trop importante. En effet, si la tension est supérieure à 5.1V, la diode devient passante et ramène le potentiel à lire à la masse, soit 0V.

Ensuite, pour la lecture de  $V_s$  et de  $V_{ref}$ , afin de protéger cette dernière de courants trop importants, une résistance de 490Ω a été ajoutée. Cette résistance a été définie afin de limiter le courant à 10mA si les tensions lues venaient à atteindre 10V. La relation utilisée est la suivante :

$$R = \frac{V_{cc} - V_z}{i_{zmax}} = \frac{10 - 5.1}{10 * 10^{-3}} = 490\Omega$$

Enfin, concernant la lecture de la tension  $V_{d1}$ , soit la tension sortant du montage boost alimentant le uC, un pont diviseur est présent. En effet, la tension d'alimentation étant proche de la limite de la zener, soit 5V, il était nécessaire, afin d'avoir une régulation correcte, d'agrandir la plage de lecture de tension. C'est pour cela qu'un pont diviseur de tension a été ajouté afin de pouvoir lire des tensions comprises entre 0 et 10V. La valeur de la résistance  $R_3$  a été définie de la même manière que pour les résistances  $R_1$  et  $R_2$ . La résistance  $R_4$  a été définie afin d'ajuster la division de tension à deux. Enfin, la capacité de 100nF permet de stabiliser la tension (filtre passe-bas).

### 3.3. INTERFACE HOMME MACHINE (IHM)

La partie IHM regroupe les éléments suivants : réglage de la surtension, programmation du uC, communication USB et affichage lumineux par LEDs. Tous ces éléments vont être détaillés.

Tout d'abord, il y a le potentiomètre permettant de régler la valeur de la surtension. Pour cela, la broche centrale est directement reliée au uC pour une lecture de la tension. La figure ci-dessous montre le montage :

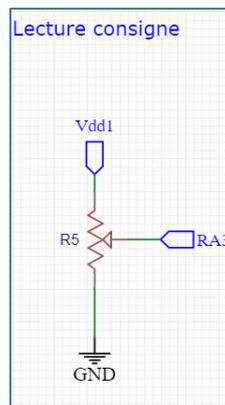


Figure 19 : Montage potentiomètre

Le potentiomètre étant relié directement à l'alimentation du uC, il n'est pas nécessaire d'ajouter un circuit de protection comme précédemment. Le potentiomètre a une valeur de 10k $\Omega$ .

Ensuite, la programmation du uC passe par un Pickit3. Ce dernier nécessite la mise en place d'un bornier de 6 broches. Le schéma est illustré ici :

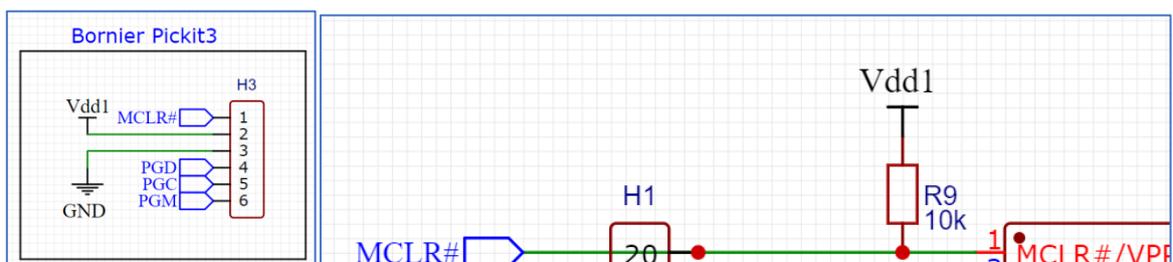


Figure 20 : Schéma programmation uC

Les broches MCLR#, PGD, PGC et PGM sont connectées aux broches correspondantes sur le uC. Une résistance de pull-up de 10k $\Omega$  est présente sur la MCLR#, comme préconisé dans la documentation du Pickit3.

Concernant l'affichage lumineux, il se fait par l'intermédiaire de deux LEDs. Il s'agit d'un montage basique permettant de les allumer ou de les éteindre avec le uC. Le montage est donné ci-après. Des résistances de 1k $\Omega$  sont présentes pour limiter le courant dans les LEDs.

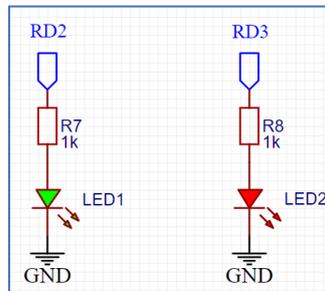


Figure 21 : Montage affichage LEDs

Enfin, il reste la communication USB. Ici un simple connecteur a été interfacé en suivant la documentation qui lui est associée. Le montage est donné sur la figure ci-dessous :

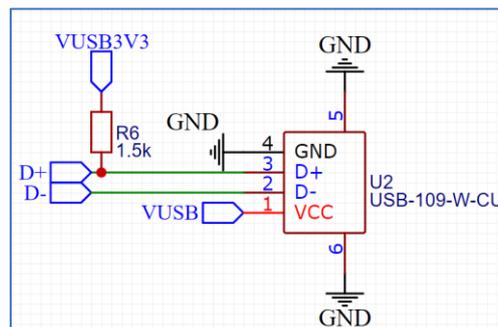


Figure 22 : Montage communication USB

### 3.4. ALIMENTATION MICROCONTROLEUR

Cette section se concentre sur la partie du système qui permet d'alimenter le uC. Cette section est composée des éléments suivants :

- Un convertisseur DC/DC de type boost permettant d'adapter la tension de la cellule PV au uC. Le dimensionnement de ce montage est similaire à celui détaillé dans la section 3.1.
- Un bouton de démarrage, permettant de mettre en route le système.
- Un module de commutation permettant de passer d'une alimentation par batterie à une alimentation par montage boost.
- Un bloc de protection permettant d'éviter la défaillance du uC.

Tout d'abord, le bouton de démarrage permet de mettre le uC sous tension en l'alimentant avec la batterie. Il a été câblé comme cela :

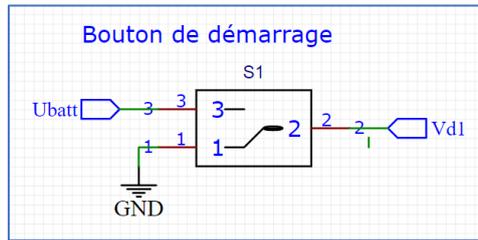


Figure 23 : Montage bouton démarrage

Le choix de cet élément s'est basé sur sa praticité et sur le fait qu'il puisse supporter les courants et tensions issus de la batterie.

**Remarque :**

La batterie doit fournir une tension de 4,8V.

Ensuite, il y a le bloc de commutation. Ici, deux solutions ont été envisagées :

- La première consiste à positionner un relais permettant de choisir le type d'alimentation (batterie ou montage boost). Au repos, l'alimentation par batterie serait active et dès que la sortie du montage boost permet d'alimenter le uC, ce dernier fait basculer le relais pour changer d'alimentation.
- La deuxième option serait de positionner deux diodes en face à face. Il y a donc une diode par type d'alimentation. Initialement, la sortie du boost du uC est à 0V, ce serait donc la diode de la batterie qui serait passante. Ensuite, lorsque la sortie du boost est supérieure à la tension de la batterie, la diode du montage boost devient passante, ce qui bloque la diode de la batterie. La transition se ferait donc naturellement.

Les figures ci-après illustrent les deux solutions :

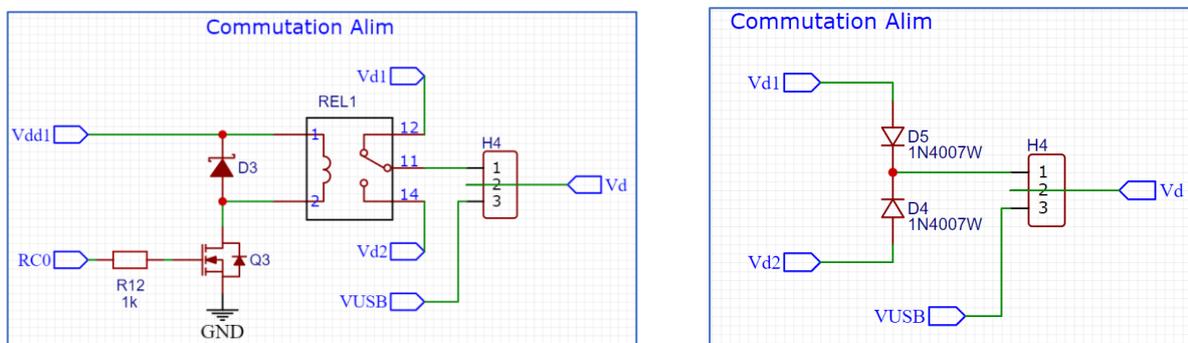


Figure 24 : Commutation avec relais VS commutation avec diodes

Dans les deux cas, les composants ont été choisis afin de supporter les courants et tensions issus du convertisseur et de la batterie. Concernant les diodes, il est nécessaire qu'elles disposent d'une faible chute de tension en mode passant, afin de limiter les pertes. Les diodes Schottky sont idéales. Cependant, par manque de temps, nous avons choisi des diodes classiques afin de valider le fonctionnement du circuit.

Les deux solutions seront testées par la suite.

Pour terminer, il reste le bloc de protection du uC. Deux solutions ont également été envisagées :

- La première solution consiste à simplement utiliser un régulateur de tension. Permettant de s'assurer d'avoir la tension requise en sortie. Il a été choisi afin d'assurer une régulation de 5V.
- La deuxième idée est d'utiliser une diode Zener afin de protéger le microcontrôleur. Le montage serait semblable aux circuits de mesure. Une résistance de  $20\Omega$  serait présente pour limiter le courant dans la diode. Le choix de ne pas surdimensionner la résistance a été fait afin de limiter la chute de tension sur cette dernière et d'éviter une trop grosse perte de puissance.

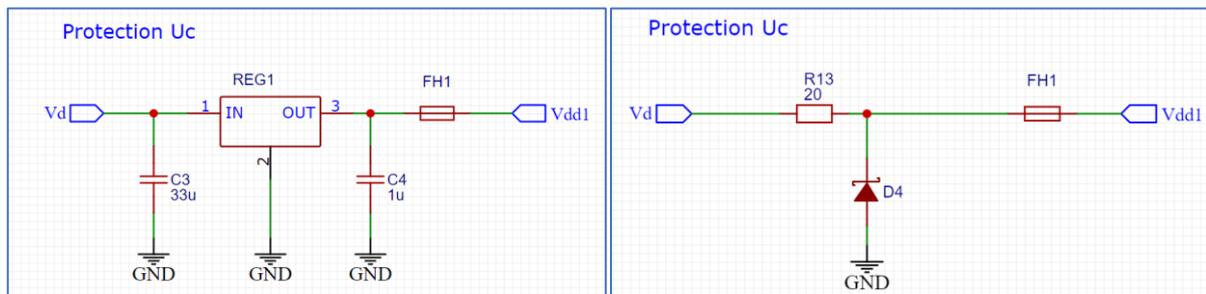


Figure 25 : Protection avec régulateur VS protection avec diodes

Dans les deux cas, un fusible de 500mA est placé à la sortie du montage afin de s'assurer de ne pas abimer le uC.

## 4. PROGRAMMATION DU MICROCONTROLEUR

La production d'hydrogène par photoélectrolyse de l'eau nécessite un contrôle précis des paramètres électriques pour garantir une réaction chimique optimale. En effet, actuellement, le simple fait de soumettre une cellule photoélectrochimique à la lumière visible du soleil ne permet pas à la réaction d'avoir lieu. Dans ce contexte, le projet Potentiostat Solaire vise à transformer l'énergie lumineuse restante (Infrarouge) en une surtension stable, permettant ainsi à l'électrolyse de s'effectuer correctement.

Cette partie se concentre sur le code de la partie commande du projet, en justifiant l'architecture choisie et le rôle de chaque fonction.

### 4.1. ROLE DE LA REGULATION

Avant d'aborder l'architecture du code de régulation, il est important de comprendre où la régulation va s'opérer. La figure 1 ci-dessous, présente le schéma de la cellule électrochimique. Cette dernière est composée de trois électrodes : une cathode, une électrode de référence et une photoanode.

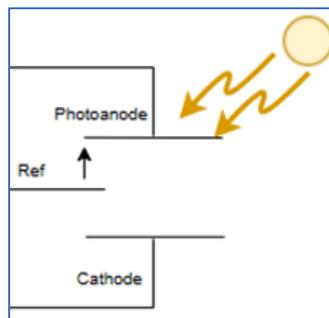


Figure 26 : Schéma cellule électrochimique

Lorsque la photo-anode est soumise à la lumière du soleil, une différence de potentiels entre la photo-anode et la référence apparaît. Il s'agit du potentiel d'abandon. Cependant, ce potentiel permet juste d'amorcer la réaction mais n'est pas suffisant pour réaliser l'électrolyse de l'eau. C'est pourquoi il est nécessaire d'appliquer une surtension entre ces deux électrodes. Cette dernière doit être réglable entre 0.1V et 1V par rapport au potentiel d'abandon.

De plus, le potentiel de référence étant fixé par les caractéristiques physiques de la cellule, il n'est pas possible de le contrôler. C'est pourquoi l'idée est donc de faire varier la tension entre la photo-anode et la cathode afin d'obtenir la surtension souhaitée. La figure 2 illustre le principe.

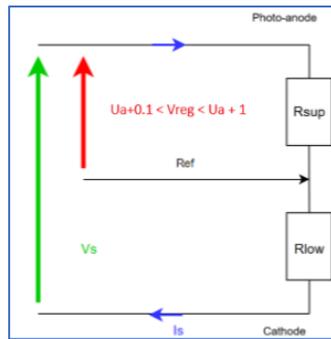


Figure 27 : Schéma électrique équivalent cellule électrochimique

C'est donc la tension  $V_s$  qui est contrôlée de façon à obtenir la bonne surtension  $V_{reg}$ . Pour diminuer la surtension, il suffit alors de diminuer  $V_s$  et inversement.

Enfin, la tension  $V_s$  est fourni par un montage boost ce qui signifie que son contrôle se fait en modifiant le rapport cyclique de la commande PWM appliquée au montage.

## 4.2. STRUCTURE DU CODE ET ALGORITHME UTILISEE

Maintenant que le principe de régulation a été expliqué, il est possible de passer à la présentation de l'algorithme utilisé, ainsi qu'à la description de chaque étape. Le programme a été conçu avec MPLAB pour un microcontrôleur PIC18f45k50.

### 4.2.1. ALGORITHME GENERAL

Le système devant être autonome en énergie, ce dernier est alimenté à partir d'une cellule photovoltaïque fournissant une puissance de 5.8W pour une tension de 0.7V. Cette tension ne permettant pas directement d'alimenter le microcontrôleur il est nécessaire de l'augmenter. Un deuxième montage boost a été implémenté de façon à obtenir une tension de 5V. Une deuxième régulation a donc été réalisée mais elle ne sera pas détaillée car elle est similaire, en tout point, à la régulation principale. La figure 3 présente la structure du programme global.

L'architecture choisie est une machine à deux états qui sont :

- Etat **DEMARRAGE** : Dans cet état, le microcontrôleur est alimenté à partir d'une batterie externe. Le microcontrôleur démarre la régulation de son alimentation et attend de mesurer cent fois la tension souhaitée (5V) avant de passer à l'état suivant.
- Etat **REGULATION** : Dans cet état, le microcontrôleur n'est plus alimenté par la batterie. Ce dernier réalise maintenant la régulation de sa tension d'alimentation ainsi que la régulation de la surtension appliquée à la cellule électrochimique. Si la tension d'alimentation devient trop faible, le microcontrôleur bascule de nouveau dans l'état de démarrage.

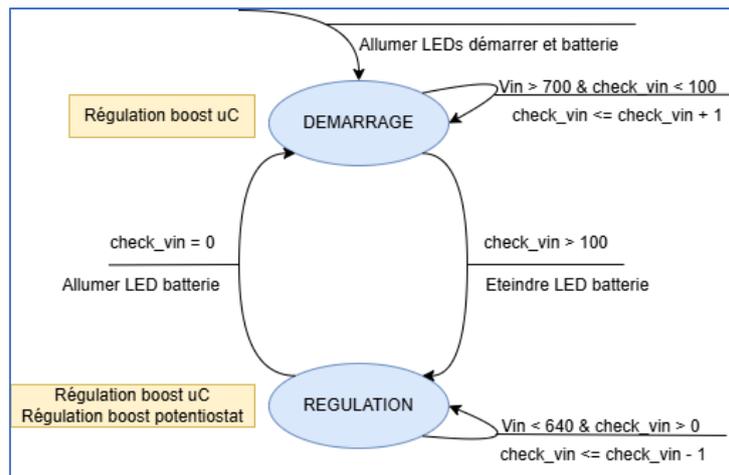


Figure 28 : Architecture utilisée

Concernant la régulation, les étapes sont les suivantes :

- Lectures des tensions nécessaires. Il s'agit des potentiels sur la référence et la photoanode ainsi que de la tension de consigne. La consigne est commandée avec un potentiomètre.
- Calcul de l'erreur par rapport à la consigne et calcul de la correction nécessaire.
- Application de la correction sur la commande du montage boost.

L'appel des fonctions de régulation est effectué périodiquement grâce à un timer. Le fonctionnement de chaque étape est décrit ci-après.

#### 4.2.2. DESCRIPTION ETAPE PAR ETAPE

Les étapes vont être décrites dans l'ordre où elles sont exécutées.

#### 4.2.3. APPEL DE LA FONCTION DE REGULATION

Pour que la régulation fonctionne correctement, la fonction associée doit être appelée périodiquement. Un timer est donc présent pour réaliser ces appels de fonction. C'est le timer 2 du PIC18f45k50 qui est utilisé. Il s'agit d'un timer sur 8 bits paramétré pour fonctionner à 16kHz. Lorsqu'il arrive à sa valeur maximale, soit 255, une interruption d'overflow est déclenchée ce qui permet d'appeler la fonction de régulation. Le timer est ensuite remis à zéro et recommence à compter.

#### 4.2.4. LECTURE DES TENSIONS

Chaque lecture de tension est effectuée au moyen d'un ADC sur 10 bits. La valeur obtenue en binaire est donc comprise entre 0 et 1023. Une valeur de 0 correspond à une tension de 0V et une valeur de 1023 correspond à une tension de 4V. Les ADC sont configurés pour être déclenchés avec le CCP2 (module Capture/Compare/PWM du timer 2). Il est utilisé une tension de référence interne fixe de 4.096V. De plus, la fréquence d'acquisition est de 1MHz et les résultats obtenus sont alignés à droite.

Cependant, afin de limiter le bruit lié à la lecture, il est important de réaliser les lectures au bon moment. En effet, la régulation passe par la modification de la commande d'un montage boost. Cette commande est en réalité un simple signal PWM (Pulse With Modulation). Il s'agit d'un signal carré alternant entre une valeur maximale (ici 5V) et une valeur minimale (ici 0V). Ce signal permet de faire commuter le transistor présent dans le montage boost, ce qui introduit, à chaque commutation, du bruit sur la tension de sortie. Ce signal est également généré à partir du timer 2 ce qui est problématique.

Afin de pallier cela, un deuxième timer a été ajouté. Ce dernier a pour rôle d'appeler la fonction de régulation juste avant la commutation du transistor. Il s'agit du timer 0, lui aussi sur 8 bits et fonctionnant à 16kHz. L'objectif étant qu'il déclenche la fonction de régulation avant la fin du timer 2. Dans ce but, le timer 0 ne compte pas jusqu'à 255 mais jusqu'à 156, ce qui permet d'obtenir le fonctionnement illustré en figure 4.

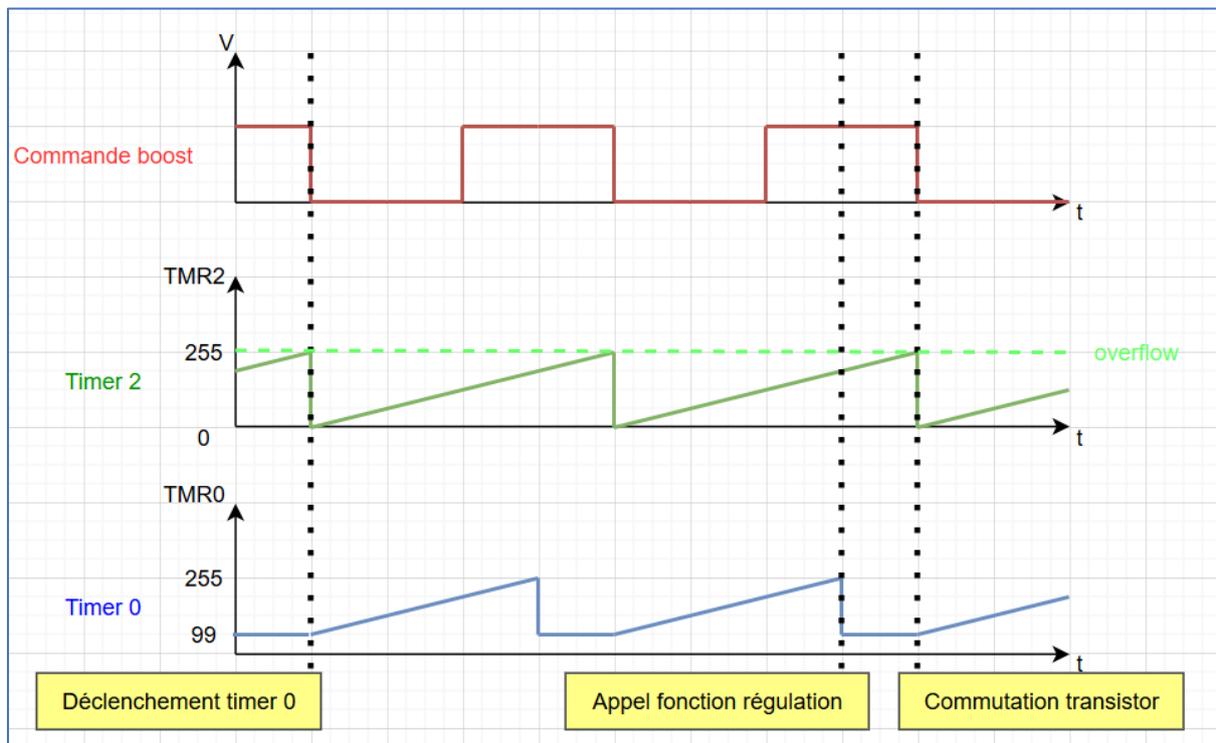


Figure 29 : Timing lecture tensions

Lorsque le timer 2 atteint son overflow, le timer 0 est alors démarré. Etant donné qu'il ne compte pas jusqu'à 255, le timer 0 atteint son overflow avant le timer 2, ce qui permet d'appeler la fonction de régulation avant la prochaine commutation du transistor.

#### 4.2.5. REGULATION ET MODIFICATION DE LA COMMANDE

Comme expliqué précédemment, le signal de commande est un signal PWM généré à partir du module CCP2 du timer 2. Ce module permet de générer ce signal très facilement en spécifiant uniquement le rapport cyclique souhaité, c'est-à-dire le pourcentage du temps pendant lequel le signal est à l'état haut sur une période. La fréquence est définie par le timer 2. Le rapport cyclique est codé sur 10 bits, soit une valeur comprise entre 0 et 1023. Les tensions mesurées étant elles aussi sur 10 bits, aucune conversion n'est nécessaire pour passer d'une tension à un rapport cyclique.

Le processus de régulation est le suivant :

- Tout d'abord, afin de réduire le bruit des mesures, le calcul de l'erreur est réalisé quatre fois et est sommé. Cette somme est stockée dans une variable  $d_{PWM}$  représentant la variation de rapport cyclique à appliquer pour corriger le système.
- Ensuite, une correction proportionnelle est appliquée. Les calculs suivants sont donc effectués :

$$d_{PWM} = \frac{d_{PWM} \cdot K}{4}$$
$$new_{PWM} = PWM + d_{PWM}$$

Avec :

- $d_{PWM}$  : la variation de rapport cyclique à appliquer pour corriger le système. La valeur est divisée par 4 pour faire une moyenne des erreurs précédemment sommées.
  - $K$  : le gain du correcteur (ici  $K = 1$ ).
  - $PWM$  : la valeur actuelle du rapport cyclique.
  - $new_{PWM}$  : la nouvelle valeur du rapport cyclique après correction.
- Puis, cette nouvelle valeur est bornée entre 0 et 963 afin de garder un rapport cyclique correcte et ainsi éviter des comportements inattendus.
  - Enfin, la nouvelle valeur est écrite dans le module CCP2 afin d'appliquer le changement de rapport cyclique.

## 5. CREATION DU PCB

Pour la création du PCB, il a été utilisé le logiciel EasyEDA. Ce choix a été fait car ce logiciel est open source et que les librairies sont disponibles en ligne. De plus, ce logiciel offre la possibilité de collaborer sur le même projet en simultanément ce qui a permis de respecter les délais.

Afin de pouvoir imprimer la carte directement à Polytech, les règles de conceptions suivantes ont été définies :

- **Pistes d'alimentations :**
  - Diamètre : 1.5mm ;
  - Isolation : 0.25mm ;
  - Diamètre via : 1.5mm ;
  - Perçage via : 0.7mm ;
  
- **Pistes standards :**
  - Diamètre : 0.4mm ;
  - Isolation : 0.152mm ;
  - Diamètre via : 1.5mm ;
  - Perçage via : 0.7mm ;

Après impression, l'isolation des pistes s'est avérée assez faible, ce qui rendait le brasage des composants délicat. Pour une impression à Polytech, il est donc recommandé de fixer **l'isolation** au moins à la moitié du diamètre des pistes d'alimentations, soit **0.75mm pour toutes les pistes**.

La taille de la **grille** est fixée à **2.54mm** soit 0.1 pouces.

Finalement, le schéma et le PCB réalisés sont visibles en annexe 1.

## 6. NOTICE DE DEMARRAGE

Cette section présente la marche à suivre pour démarrer le système. Voici les étapes de mise en route :

- 1) Positionner le cavalier d'alimentation afin d'utiliser l'alimentation provenant de la carte (batterie ou montage boost). **Placer le cavalier sur la gauche.**
- 2) **Connecter la cellule PEC** sur les connecteurs situés en haut à droite de la carte.
- 3) **Ajouter la batterie** (en bas à droite).
- 4) **Brancher la cellule PV** (en haut à gauche).
- 5) Démarrer le système en positionnant le **bouton de démarrage sur la droite.**
- 6) Les LEDs s'allument, le système est prêt.

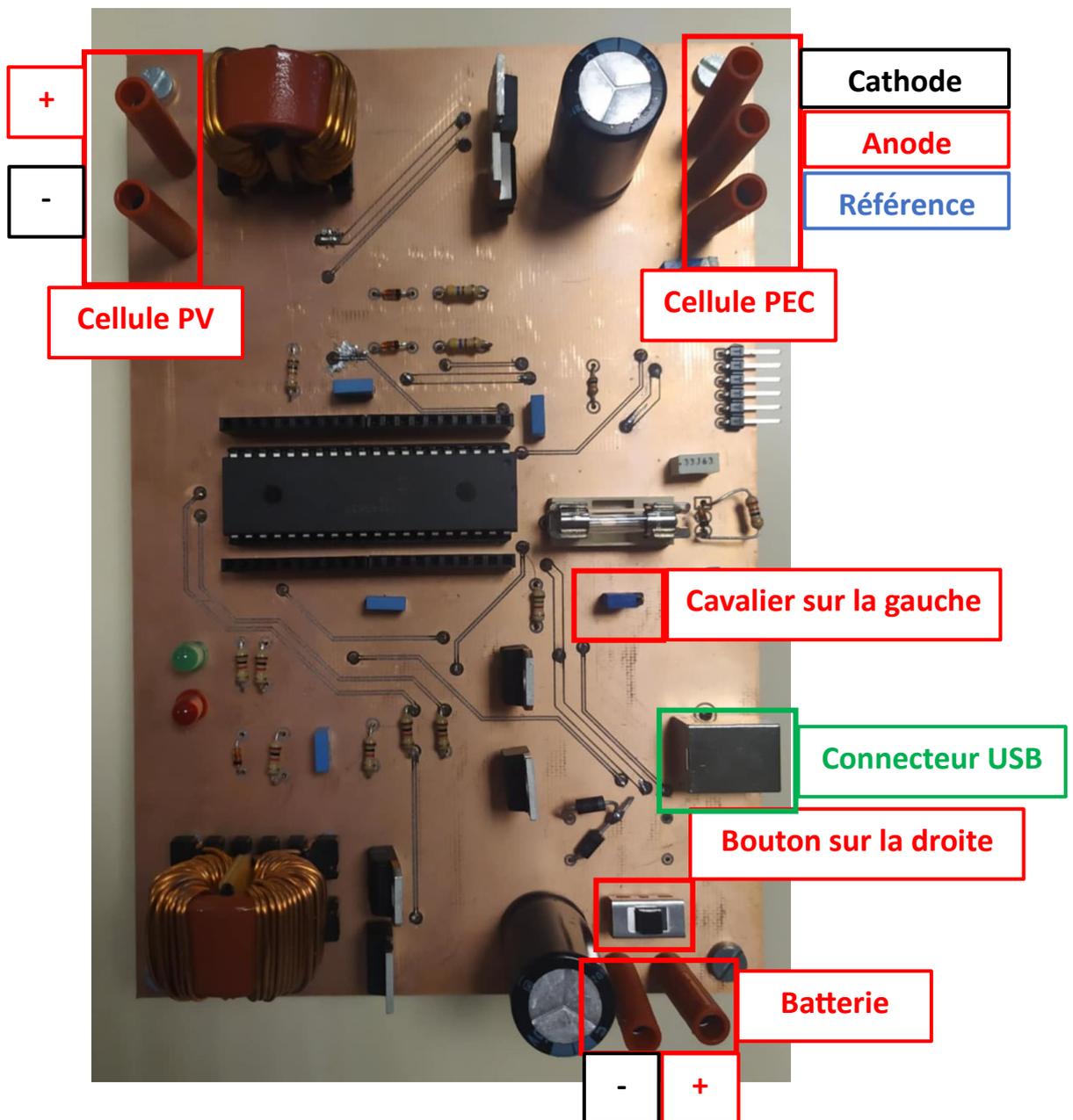


Figure 30 : Mise en route du système

Afin de reprogrammer le microcontrôleur, la procédure est la suivante :

- 1) **Ouvrir le projet MPLAB** avec le code souhaité.
- 2) **Positionner le cavalier sur l'alimentation USB (à droite).**



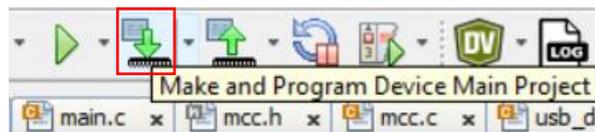
Figure 31 : Position cavalier alimentation USB

- 3) **Connecter le Pickit3** (face contre terre).



Figure 32 : Branchement Pickit3

- 4) **Brancher le câble USB** (voir figure 30). Le système s'allume et le Pickit3 doit être détecté par MPLAB.
- 5) **Démarrer la programmation avec MPLAB.**



```
Currently loaded firmware on PICkit 3
Firmware Suite Version.....01.56.09
Firmware type.....PIC18F

Target voltage detected
Target device PIC18F45K50 found.
Device Revision ID = 2

Device Erased...

Programming...

The following memory area(s) will be programmed:
program memory: start address = 0x0, end address = 0xeff
configuration memory
Programming/Verify complete
```

Figure 33 : Programmation avec MPLAB

## 7. TESTS ET RESULTATS

### 7.1. PRESENTATION DES TESTS

#### 7.1.1. TEST 1 : CONVERTISSEUR DC/DC ET CODE DE REGULATION

L'idée de ce test était de valider le choix du montage du convertisseur DC/DC (boost). Ce test permet de vérifier le fonctionnement du convertisseur mais aussi du code de régulation et du capteur de consigne. Il n'a donc pas été réalisé sur le PCB final mais sur une plaque de tests.

Ce test consiste à alimenter le montage par une alimentation de laboratoire. En sortie du montage, il faut connecter un potentiomètre permettant de simuler un système à trois électrodes comme la cellule PEC.

Le montage est détaillé dans la figure 34 :

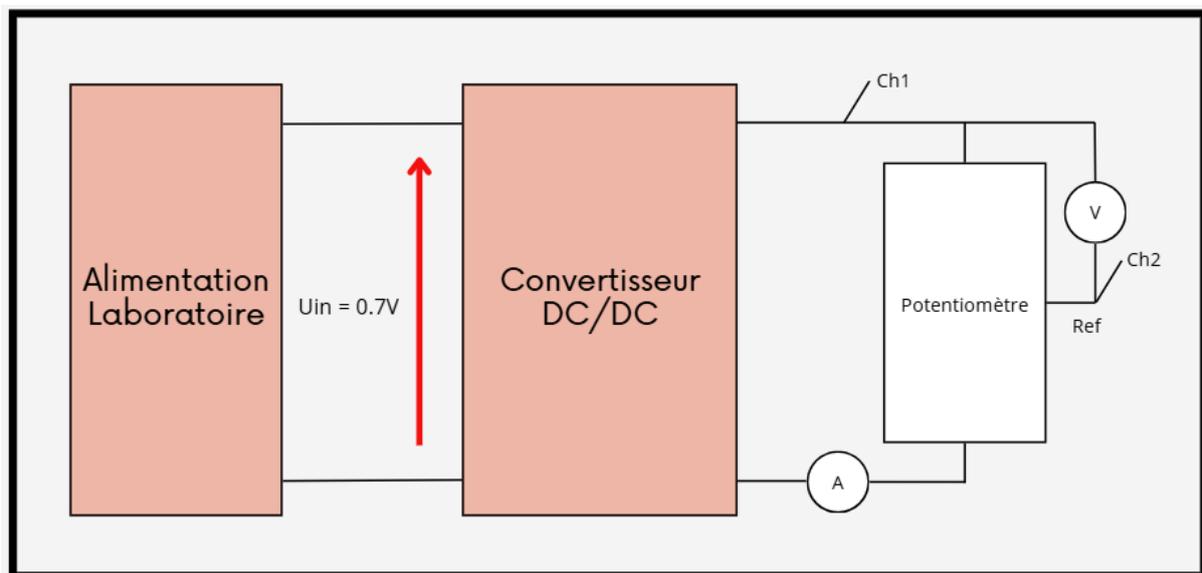


Figure 34 : Schéma pour le test 1

Les trois points à vérifier lors de ce test étaient :

- **La plage de réglage de la surtension.** Pour cela, il faut faire varier le capteur de consigne et s'assurer que la surtension varie entre 0,1 et 1V.
- **La stabilité de la régulation.** Cette vérification se fait en faisant varier le point milieu du potentiomètre et s'assurer que la régulation reste stabilisée (précision de 0.01V).
- **L'amplification de la tension.** L'idée est de regarder si la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée, ce qui est l'objectif recherché dans ce convertisseur.

## 7.1.2. TEST 2 : CIRCUIT DE MESURE

Pour rappel, chaque circuit de mesure est composé d'une résistance suivie d'une diode Zener permettant de protéger le microcontrôleur en cas de tension trop élevée. La mesure est réalisée entre la résistance et la diode.

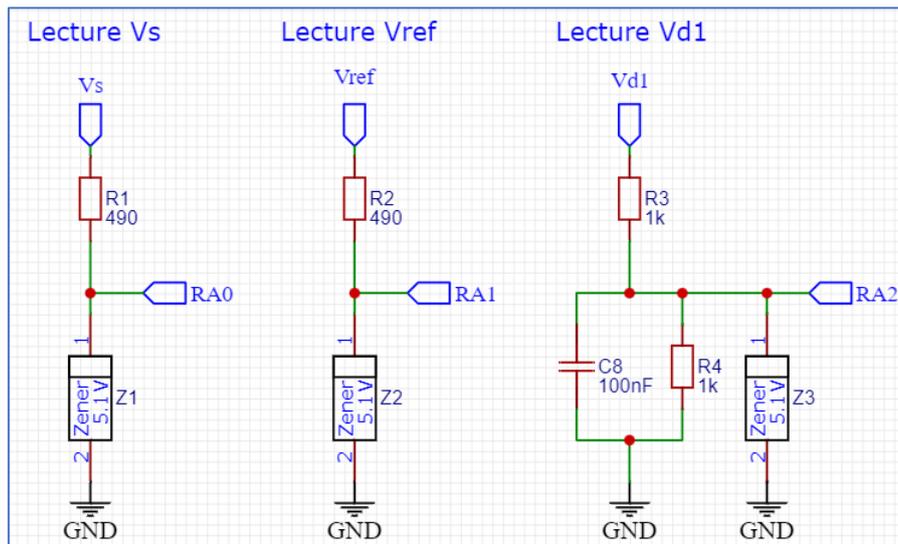


Figure 35 : Circuits de mesure

Le test de ces modules consiste simplement à mesurer différentes tensions et à vérifier la cohérence de la mesure. Il est bon de noter que le microcontrôleur convertit les tensions qu'il mesure en une valeur binaire sur 10 bits comprise entre 0 et 1024. Une conversion est donc nécessaire afin de retrouver la valeur en décimale. L'équation ci-après donne le calcul à réaliser :

$$V_{mes}(décimale) = \frac{V_{mes}(binaire) \cdot V_{ref}}{2^n - 1}$$

Avec :

- $V_{mes}(décimale)$  : la tension mesurée en valeur décimale ;
- $V_{mes}(binaire)$  : la tension mesurée en valeur binaire ;
- $V_{ref}$  : la tension de référence utilisée pour la mesure (ici  $V_{ref} = 4.096V$ ) ;
- $n$  : le nombre de bits utilisé pour la conversion (ici  $n = 10$ ).

Les tensions mesurables par le microcontrôleur sont comprises entre 0 et  $V_{ref}$ , soit entre 0 et 4,096V.

Pour récupérer les valeurs mesurées au format binaire, le code a été exécuté en mode « debug » sur MPLAB afin de pouvoir lire le contenu des variables. Le microcontrôleur ne gérant pas les nombres à virgules, les valeurs au format binaire ont été converties en décimale à la main.

### 7.1.3. TEST 3 : IHM

La partie IHM regroupe le réglage de la surtension avec le potentiomètre, l'affichage de l'état du système par LEDs, la programmation du microcontrôleur avec un Pickit3 et la communication par USB. Le code de la partie USB n'ayant pas pu être effectué, cette partie-là n'a pas été testée.

Pour le réglage de la surtension avec le potentiomètre, l'objectif était de vérifier que ce dernier permettait de régler une consigne de surtension comprise entre 0,1V et 1V. Pour cela, l'idée est de positionner le potentiomètre sur ses positions extrêmes et de regarder la consigne qui est interprétée par le microcontrôleur dans les deux cas. Pour cela, il faut faire tourner le code en mode « debug » sur MPLAB.

Concernant l'affichage par LEDs, il s'agit, dans un premier temps, de vérifier que la LED verte, indiquant que le système est démarré, s'allume bien. Pour cela, il suffit de mettre le montage sous tension et d'observer la LED. Le deuxième test vise à contrôler le fait que la LED rouge, indiquant si le système utilise la batterie ou non, s'allume correctement. Pour cela, une tension batterie est appliquée en permanence au montage. Ensuite, une tension simulant la sortie du montage d'alimentation du microcontrôleur est appliquée. Si cette tension est suffisante, la batterie n'est alors plus utilisée et la LED doit s'éteindre. Lorsque la tension diminue et ne suffit plus, la batterie prend alors le relais et la LED doit s'allumer de nouveau. Un contrôle visuel sera donc réalisé.

Enfin, pour tester la programmation avec le Pickit3, il faut dans un premier temps vérifier que le microcontrôleur est bien détecté et reconnu sous MPLAB. Ensuite, il est possible de tenter une programmation. Lors du test, le microcontrôleur sera alimenté avec l'USB.

### 7.1.4. TEST 4 : ALIMENTATION MICROCONTROLEUR

La partie alimentation uC possède plusieurs points à vérifier :

- **La commutation du bouton de démarrage.** Afin de tester cet élément, il faut connecter une alimentation (batterie) sur les connexions dédiées. Ensuite, il faut mesurer la tension de sortie et regarder si celle-ci est en adéquation avec la position de l'interrupteur (+Vbatt ou 0V).

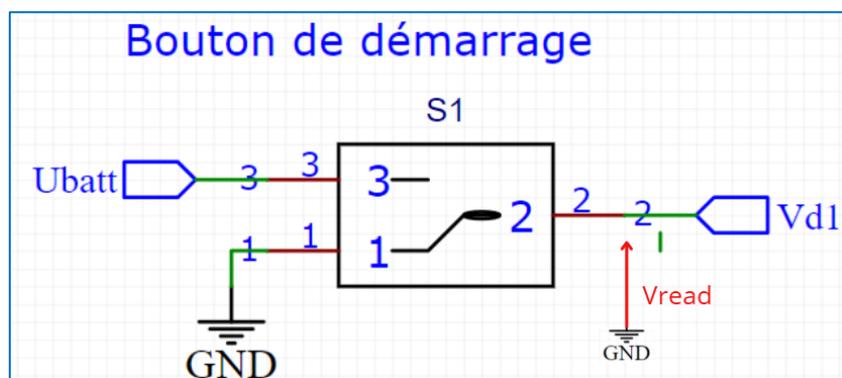


Figure 36 : Schéma pour le test du bouton de démarrage

- **L'alimentation USB.** L'idée est de vérifier que la tension d'alimentation de l'USB atteint bien la sortie du cavalier. Pour cela, il faut connecter la carte à un ordinateur, par exemple. Ensuite, on observe si la tension à la sortie du cavalier correspond avec la position de ce dernier afin de valider le test.

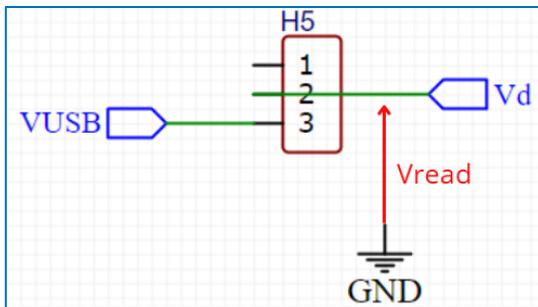


Figure 37 : Schéma pour le test de l'alimentation USB



Figure 38 : Position du cavalier pour le test USB

- **La protection uC.** Afin de réaliser ce test, il faut connecter une alimentation sur les connectiques de la batterie. Ensuite, il faut placer le cavalier afin d'alimenter le uC à partir de la batterie, puis démarrer le système à l'aide du bouton de démarrage. Une fois tout ceci réalisé, il faut faire varier la tension de l'alimentation entre 0 et 10V puis observer la tension de sortie du régulateur et celle à l'entrée du uC. Si ces deux tensions sont régulées à 5,1V lorsque la tension d'alimentation dépasse 5,1V, cela indique que le système fonctionne.

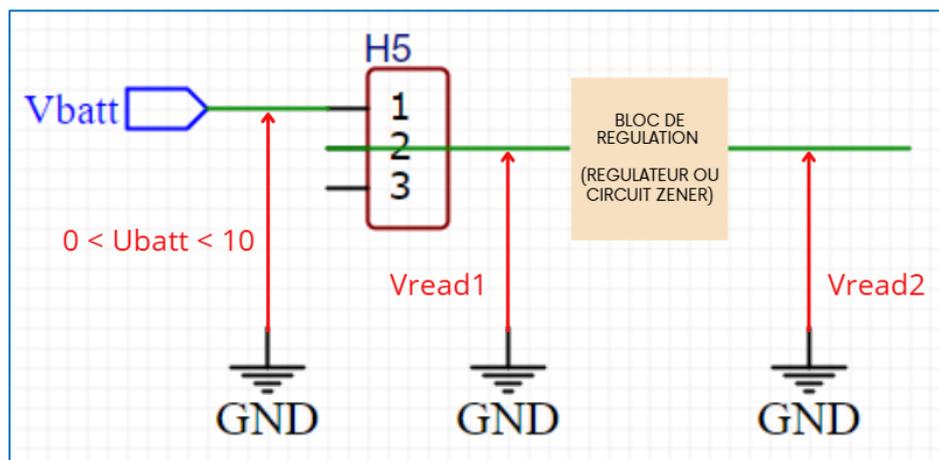


Figure 39 : Schéma pour le test de la protection uC

- **Le montage boost uC et son code.** Pour ce test, il faut faire les mêmes manipulations que pour le test précédent. Ensuite, il faut programmer le uC en connectant le PicKit à son bornier. En plus de cela, il faut brancher une alimentation sur les connectiques dédiées à la cellule PV. Puis, il faut la régler à 0,7V afin de simuler la sortie du PV. Une fois toutes ces étapes réalisées, il faut observer si la tension de sortie du boost se stabilise à la tension définie dans le code. Si c'est le cas, le test est validé.

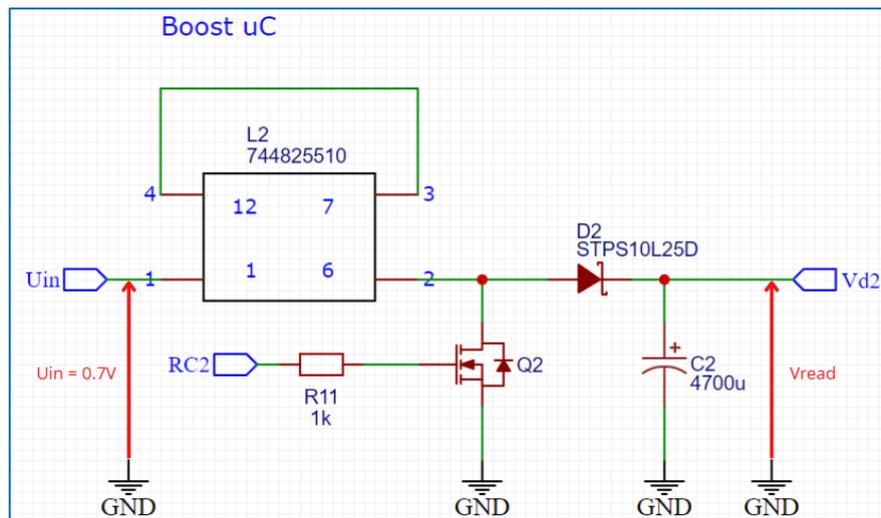


Figure 40 : Schéma pour le test du boost uC

- **La commutation d'alimentation.** Afin de réaliser ce test, il faut faire toutes les connexions expliquées dans le test précédent. Le test consiste à observer la tension de sortie du composant de commutation (relais, diode). Dans un premier temps, il faut mettre la tension PV à 0V. Dans ce cas, la tension lue doit correspondre à la tension batterie et la LED rouge doit être allumée. Dans un second temps, il faut régler la tension PV à 0,7V. La tension lue doit maintenant correspondre à la tension issue du boost et la LED doit être éteinte.

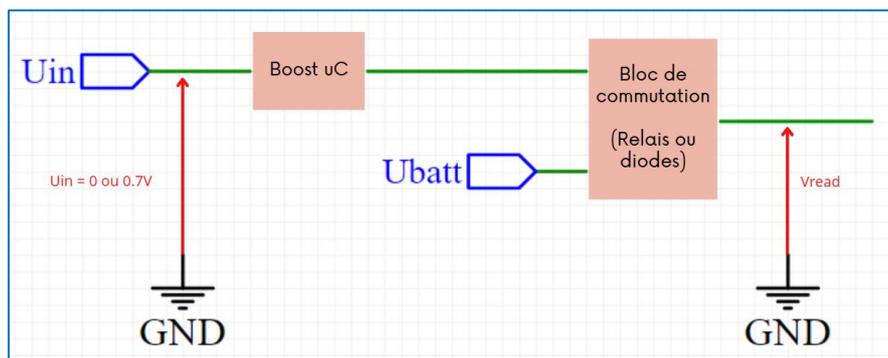


Figure 41 : Schéma pour le test de la commutation d'alimentation

### 7.1.5. TEST FINAL

Le test final a pour objectif de valider le fonctionnement global du système. Pour le réaliser, il faut suivre les étapes présentées dans la procédure de mise en route.

La procédure de test est semblable à celle présentée dans le test 1. En effet, l'idée est de venir connecter en sortie de montage un jeu de résistance correspondant au modèle de la cellule PEC. Suite à cela, il faut régler la valeur de la surtension et visualiser le courant circulant dans la charge. Afin de valider le fonctionnement, il faut que le courant en sortie corresponde au courant prédéfini par la modélisation.

## 7.2. PRESENTATION DES RESULTATS

### 7.2.1. TEST 1 : BOOST ET CODE DE REGULATION

Pour rappel, ce test visait à valider le choix de convertisseur DC/DC. Ce test a été réalisé sur une plaque de test et non sur la carte finale. La photo suivante montre les conditions de tests :

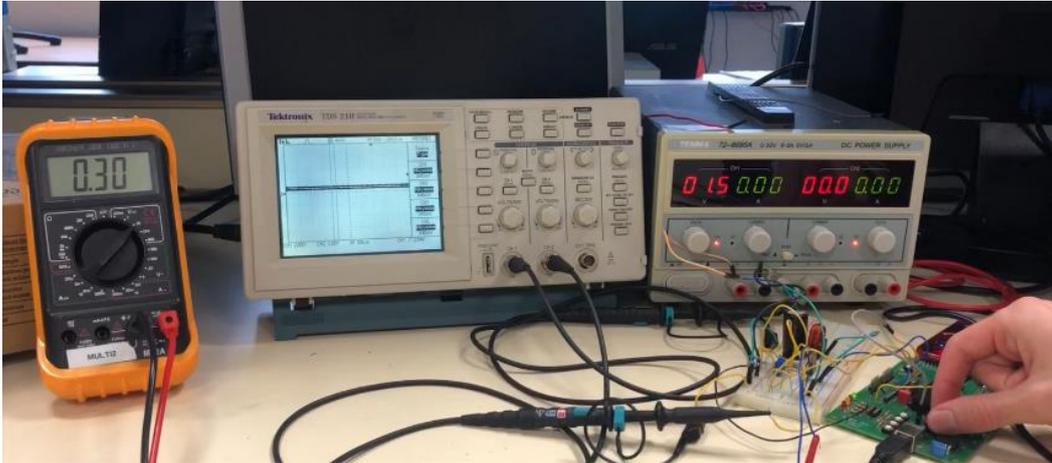


Figure 42 : Environnement du test 1

Pour ce test, deux éléments de mesure ont été utilisés :

- Un voltmètre afin d'avoir la valeur de la surtension appliquée.
- Un oscilloscope qui affiche la tension à la sortie du boost (Ch1) et la tension obtenue au point de référence (Ch2).

Il y a un générateur qui permet d'alimenter le convertisseur. Aussi, deux cartes sont utilisées :

- Une carte de test sur laquelle a été réalisé le convertisseur.
- Un PCB qui permet d'utiliser le uC ainsi que le potentiomètre permettant la commande de la surtension.

Lors de ce test, dans un premier temps, l'idée était de modifier la commande de surtension. Durant cette phase, la valeur affichée par le voltmètre a varié entre 0,1 et 1V comme requis par le CDC. Aussi, la valeur affichée correspondait aux signaux visualisés sur l'oscilloscope. **Cela permet de valider le fonctionnement du code qui permet de définir la valeur de la consigne.**

Dans un second temps, c'est le point de référence qui était modifié afin de faire varier la charge. Cette fois-ci, la consigne était fixe. Lorsque la manipulation a été réalisée, il était possible de voir sur l'oscilloscope que les tensions appliquées variaient mais que la tension affichée par le voltmètre restait stable. **Cela a permis de valider la stabilité de la régulation ainsi que le code de commande en lui-même.**

Enfin, dans ces deux phases, il était possible de voir sur l'oscilloscope que la tension de sortie du convertisseur était supérieure à la tension d'alimentation. Ainsi, **cela montre que le choix du convertisseur est cohérent.**

### 7.2.2. TEST 2 : CIRCUIT DE MESURE

Concernant le circuit de mesure, il a été choisi de faire varier la tension à lire entre 0V et 4V avec un pas de 0.5V. Quelques valeurs intermédiaires ont été ajoutées pour s'assurer de la cohérence des mesures. Le tableau ci-après présente les résultats obtenus.

Tension à mesurer (V)	Tension mesurée binaire	Tension mesurée décimale (V)
0.10	25	0.100
0.50	125	0.500
1.00	250	1.001
1.50	375	1.501
1.70	425	1.702
2.00	500	2.002
2.50	625	2.502
3.00	750	3.003
3.30	825	3.303
3.50	875	3.503
4.00	1000	4.004

Tableau 1 : Résultats tests circuit de mesure

Il est possible de remarquer que plus la tension à mesurer s'approche de la référence (4,096V), plus l'erreur augmente. Cela s'explique par le fait que l'arrondi effectué lors de la conversion au format binaire augmente également. En effet, l'arrondi est toujours effectué au supérieur, ce qui signifie que pour une conversion dont le résultat donne, par exemple, 824,1, la valeur binaire sera 825.

Cependant, cette erreur reste faible et la précision obtenue est du dixième de volt (0,01V), ce qui correspond au cahier des charges. **Le test est donc validé.**

### 7.2.3. TEST 3 : IHM

Pour la partie IHM, le premier test à avoir été réalisé est celui du potentiomètre. Pour rappel, le but est de vérifier qu'il est possible de fixer la consigne de surtension entre 0,1V et 1V. Pour cela, en plaçant le potentiomètre dans ses deux positions extrêmes, la valeur de la consigne obtenue par le microcontrôleur a été observée sous MPLAB en mode Debug. Les résultats suivants ont été obtenus :

Position potentiomètre	Consigne correspondante (binaire)	Surtension (V)
Minimum	0	0
Maximum	256	1

Tableau 2 : Résultats test potentiomètre

Ensuite, concernant les LEDs, deux tests ont été réalisés. Le premier a permis de vérifier si la LED verte indiquant que le système est démarré est bien allumée. Pour cela, la carte a simplement été mise sous tension en utilisant l'alimentation USB et la LED s'est allumée, preuve que le microcontrôleur tourne. **Le test est donc validé.**

Concernant l'autre LED, le test consistait à alimenter la carte par batterie et à régler la tension du panneau solaire à 0,7V. Lorsque la tension de la cellule PV est à 0V, le montage est alimenté par la

batterie et la LED rouge est bien allumée. De plus, en augmentant progressivement la tension de la cellule PV, la tension en sortie du boost pour le microcontrôleur augmente aussi. Dès lors que cette tension est supérieure à celle de la batterie, le montage boost prend le relai et la LED rouge s'éteint. La batterie n'est alors plus utilisée. La figure ci-dessous illustre ce fonctionnement. **Le test est donc validé.**

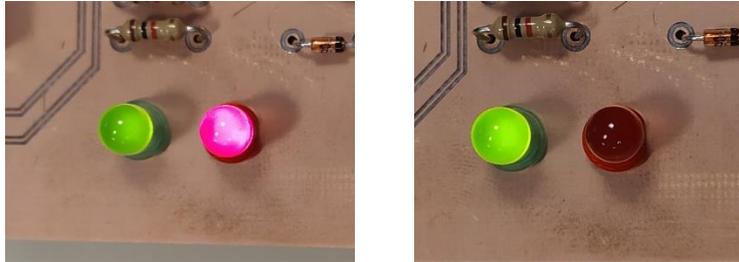


Figure 43 : Fonctionnement LEDs

Enfin, le dernier point concerne la partie programmation du microcontrôleur avec le Pickit3. Le test consiste à envoyer un programme sur le microcontrôleur depuis un ordinateur avec MPLAB. Pour cela, le Pickit3 a été branché et a bien été détecté par l'ordinateur. Ensuite, un code a été envoyé depuis MPLAB et la programmation a fonctionné, comme le montrent les images ci-dessous. **Le test est donc validé.**



Figure 44 : Programmation du microcontrôleur

#### 7.2.4. TEST 4 : ALIMENTATION MICROCONTROLEUR

##### - La commutation du bouton de démarrage

Pour ce test, la tension appliquée était de 5V. La commutation de signal s'est bien effectuée. **Le test est donc validé.**

##### - L'alimentation USB

Lorsque le test a été réalisé, selon la position du cavalier, la tension de sortie était soit de 0V soit de 5V, ce qui correspond à la tension d'alimentation fournie par le port USB. **Le test est validé.**

#### - La protection uC

Ce test a été réalisé deux fois.

Lors de la première réalisation, le test portait sur le montage avec régulateur. Lors de ce test, la tension a bien été régulée à 5V. Toutefois, lorsque la tension d'entrée était aux abords des 5V, il était possible de voir une chute de tension générée par le régulateur. Ce qu'il faut donc retenir de ce test, c'est que la tension nécessaire en entrée de montage afin d'obtenir 5V en sortie doit être supérieure à 7V. Cela implique qu'il y aura des pertes de puissance dues à ce composant, ce qui n'est pas souhaité pour ce système.

Lors de la seconde réalisation, le test était effectué sur le montage avec diode Zener. Les résultats de ces tests sont comparables à ceux obtenus avec le régulateur. En effet, une chute de potentiel est induite par la résistance de protection. Toutefois, celle-ci est inférieure à celle obtenue avec le régulateur (environ 0,2V).

**Finalement, les montages testés réalisent la bonne fonction. Toutefois, ils induisent des pertes qui sont à réduire. Il faudra donc revoir ce montage afin de résoudre ces soucis de puissance. Toutefois, le fusible n'induit pas de chute de potentiel, ce qui fait qu'il n'est pas utile de le supprimer.**

#### - Le montage boost uC et son code

Ce test a été réalisé. La tension de sortie est en adéquation avec la valeur souhaitée. **Le montage est donc validé.**

#### - La commutation d'alimentation

Ce test a été réalisé deux fois.

Lors de la première réalisation, le test a été fait avec un relais. Lors de ce test, la commutation ne s'effectuait pas comme escompté. Dans les faits, le temps de commutation du relais était trop grand, ce qui impliquait que le uC restait trop longtemps non alimenté, ce qui provoquait son extinction. Il était donc impossible de passer sur l'alimentation issue du montage boost. Il était donc nécessaire de changer soit de montage, soit de composant.

Lors de la seconde réalisation, le test a été effectué sur le montage avec les diodes. Lors de celui-ci, la commutation se réalise correctement. En effet, dans un premier temps, le uC est alimenté par la batterie (LED rouge allumée). Puis, lorsque le boost a été alimenté, la commutation s'est effectuée (LED rouge éteinte). Les tensions lues en sortie correspondaient aux phases de commutation. Toutefois, deux points gênants ont été relevés. Le premier est qu'il y a une chute de potentiel induite par les diodes. Le second est que la tension de batterie doit être légèrement inférieure à celle fixée pour la sortie du boost afin que la commutation s'effectue.

**Finalement, la seconde réalisation permet de valider le second montage. Toutefois, il serait intéressant de remplacer les diodes par des diodes Schottky ayant une plus basse tension directe. Cela permettrait de réduire les pertes et donc d'améliorer les performances du système.**

## 7.2.5. TEST FINAL

Pour rappel, ce dernier test a pour but de vérifier le fonctionnement de la carte afin de réaliser sa tâche finale. Pour cela, ce test a été réalisé pour deux modèles de cellules PEC différents. Le premier modèle représente une cellule photoélectrochimique à l'état de l'art actuel, c'est-à-dire la meilleure cellule qu'il existe actuellement (Majumder). Le deuxième illustre une cellule considérée comme idéale qu'il serait possible de réaliser d'ici quelques années (Sivula). La procédure de test décrite précédemment a donc été faite pour ces deux cellules.

Tout d'abord, le test a été effectué pour la cellule à l'état de l'art (Majumder). Pour chaque jeu de résistances, la bonne valeur de surtension a été appliquée au moyen du potentiomètre, et le courant dans la charge a été mesuré à l'aide d'un multimètre. Les résultats suivants ont été obtenus :

Test sur carte finale (Majumder) avec rapport de 1000							
Surtension	Rtot (ohms)	Rsup (ohms)	Rlow (ohms)	Courant (mA)	Error Rtot (%)	Error Current (%)	Err abs (mA)
0,1	1367	167	1200	0,46	2,48	17,86	0,10
0,2	1225	225	1000	0,57	3,78	34,86	0,31
0,3	1070	250	820	0,92	1,78	19,37	0,22
0,4	1030	310	720	1,2	0,83	7,34	0,10
0,5	1001	345	656	1,5	1,37	2,14	0,03
0,6	950	377	573	1,6	0,07	2,05	0,03
0,7	912	390	522	1,9	0,43	4,50	0,08
0,8	873	400	473	2,1	0,37	5,06	0,10
0,9	855	415	440	2,2	0,43	2,00	0,04
1	845	433	412	2,4	0,05	3,92	0,09

Figure 45 : Résultats test cellule Majumder

Comme le montrent les résultats, l'erreur absolue en courant est inférieure à 0,3mA. Cette erreur provient de l'approximation introduite dans le choix des valeurs des résistances. En effet, en pratique, il n'était pas possible d'obtenir les valeurs exactes des résistances à utiliser. Cependant, cette erreur est acceptable. **Le test est donc validé.**

A présent, le test a été recommencé pour l'autre cellule (Sivula). La procédure était exactement la même. Les résultats obtenus sont donnés ci-après :

Test sur carte finale (cellule Sivula) avec rapport de 1000							
Surtension (V)	Rtot (ohms)	Rsup (ohms)	Rlow (ohms)	Courant (mA)	Error Rtot (%)	Error Current (%)	Err abs (mA)
0,1	423	33	390	3,4	0,48	36,71	0,91
0,2	193	33	160	6,5	2,54	11,87	0,69
0,3	167	47	120	6,8	1,53	7,66	0,56
0,4	167	47	120	8,6	1,32	5,35	0,44
0,5	176	56	120	9	4,04	4,80	0,41
0,6	168	68	100	9	5,19	2,93	0,26
0,7	182	82	100	8,9	2,42	0,85	0,08
0,8	200	100	100	8,2	1,39	7,73	0,69
0,9	210	100	110	9,2	1,32	3,09	0,28
1	220	110	110	10,1	1,24	12,78	1,14

Figure 46 : Résultats test cellule Sivula

Les erreurs absolues en courant sont plus importantes que lors du test précédent. L'erreur maximale est de 1,14mA. Cela s'explique par le fait que l'erreur sur le choix des résistances est également plus grande. Cependant, cette erreur reste acceptable et **le test est validé.**

Ainsi, les tests sur les deux cellules différentes ont été effectués et montrent des résultats satisfaisants. Dans chaque cas, le courant obtenu est proche de la valeur théorique et la régulation s'effectue correctement autour de la consigne fixée par le potentiomètre, avec une précision de 0,01V, comme demandé dans le cahier des charges.

**Remarque :**

Par ailleurs, lorsqu'il a été envisagé de réaliser les tests pour le modèle réel, le souci de l'alimentation à utiliser s'est posé. Cela a fait émerger une erreur de dimensionnement concernant le convertisseur DC/DC. En effet, par manque de temps dû aux dates limites concernant la commande des composants et à la définition finale du CDC, le choix d'un dimensionnement par ordre de grandeur a été réalisé.

**Cependant, cette stratégie a fait que le courant d'entrée du boost a été sous-dimensionné.**

En effet, en appliquant le bilan de puissance dans le cas de la cellule PEC idéale (Sivula), pour les vraies valeurs, le courant moyen d'entrée est d'environ **25A**. Cette erreur fait que l'inductance et la diode du convertisseur DC/DC ont été sous-dimensionnés pour cette application. **Il est donc nécessaire de les remplacer afin de pouvoir réaliser le test pour ce type de cellule PEC.**

Toutefois, il est à noter que le choix actuel permet de réaliser les tests pour le second type de cellule (Majumder) car le courant moyen d'entrée maximal nécessaire est de **6,5A**.

## 8. BILAN DES TACHES A REALISER

Cette section est un récapitulatif qui propose des idées de modifications afin de pouvoir résoudre les problématiques soulevées par les tests. Il sera donc nécessaire de s'y intéresser dans une possible reprise en main du projet.

### 8.1. MODIFICATIONS DU CIRCUIT

Les modifications à réaliser sont les suivantes :

- Ajout de la fonction d'affichage.
- Ajout du capteur de courant.
- Revoir la protection de tension uC afin de limiter les pertes (détaillé en section 7.2.4).
- Changer le type de diodes utilisé dans le circuit de commutation d'alimentation pour limiter les pertes (détaillé en section 7.2.4).
- Redimensionner le boost de l'alimentation uC afin de limiter les pertes et réduire les coûts.
- Revoir le dimensionnement du convertisseur DC/DC pour réaliser des vérifications.
- Réitérer le choix de l'inductance et de la diode du convertisseur DC/DC pour adapter le système à la cellule PEC idéale (détaillé en section 7.2.5).

### 8.2. MODIFICATIONS DU PCB

Les modifications de conception du PCB à réaliser sont présentées sur les figures suivantes :

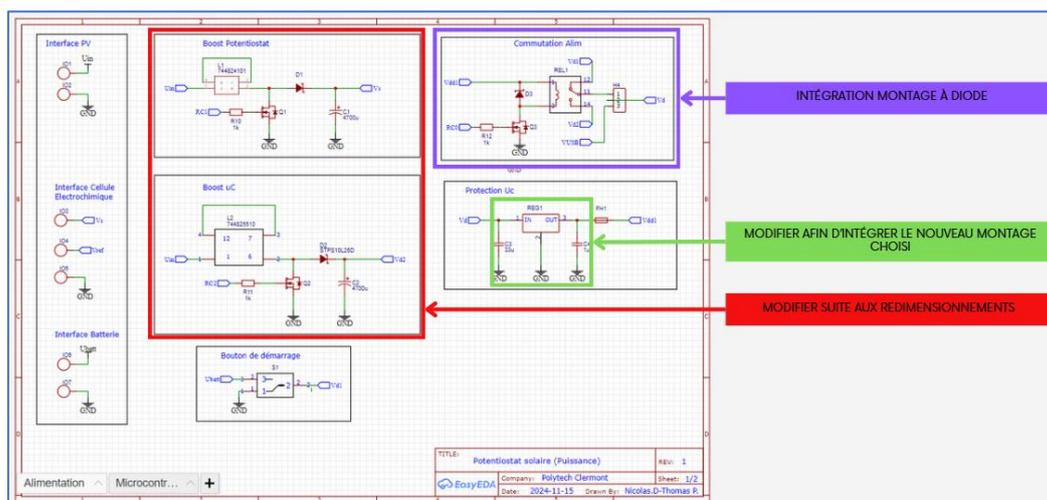


Figure 47 : Modifications à réaliser sur le schéma - Partie 1



### 8.3. TESTS A REALISER

Pour terminer, il faudra réaliser des tests afin de valider le fonctionnement du système. Ces tests sont les suivants :

- Réalisation des tests finaux comme présentés dans la section 7.1.5.
- Réalisation du test final avec non plus une alimentation de laboratoire, mais le système global avec la cellule PV.
- Réalisation d'un test avec alimentation de laboratoire sur une véritable cellule PEC.
- Test du système en conditions réelles (cellule PV et cellule PEC).

## 9. CONCLUSION

Ce dossier technique illustre le travail réalisé pour concevoir un potentiostat solaire fonctionnel et adapté aux exigences spécifiques des cellules PEC. En complément du rapport de projet, il offre une vue exhaustive sur l'ensemble des aspects techniques, du choix des composants à l'analyse des résultats des tests.

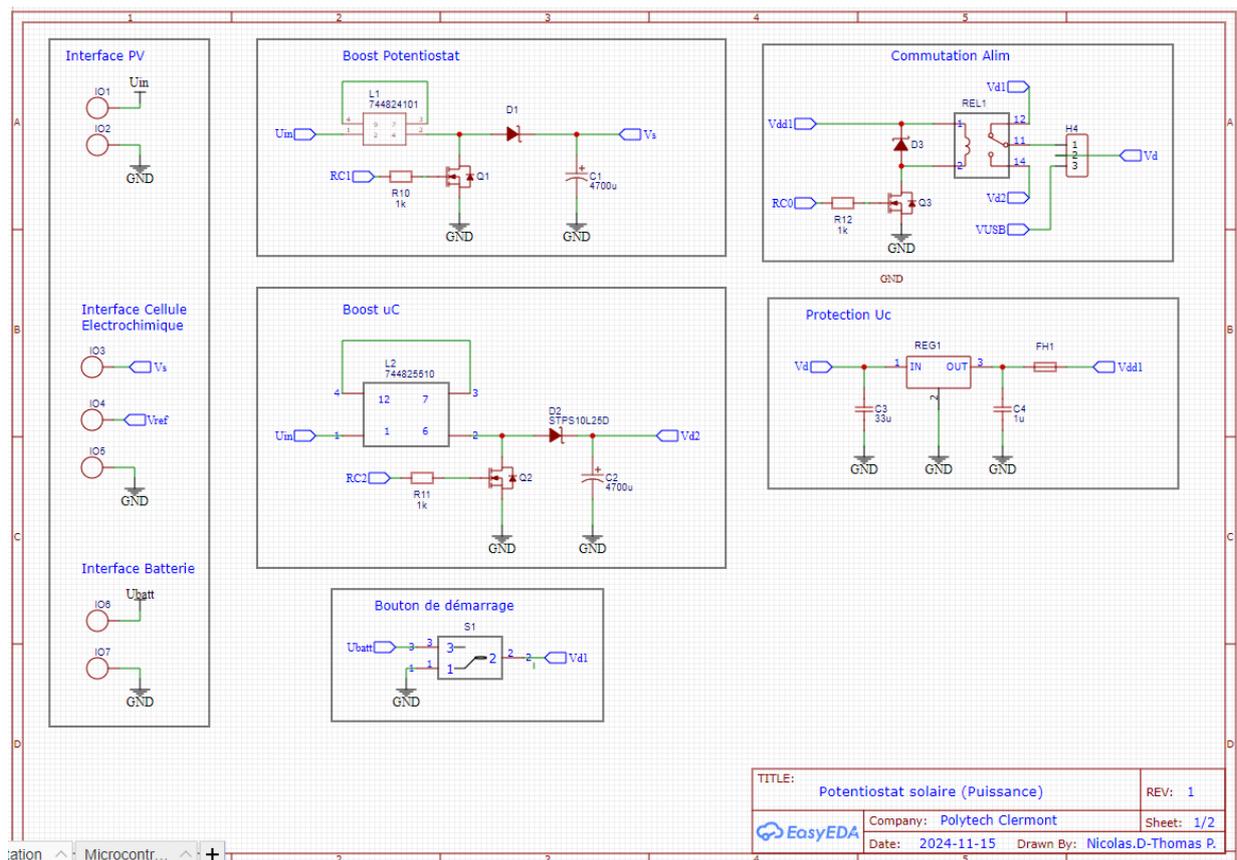
Si les objectifs initiaux ont été atteints pour la plupart des aspects, notamment en matière de régulation et d'autonomie énergétique, certains points nécessitent des ajustements pour optimiser le système. La documentation fournie ici permet de poursuivre ces améliorations et d'envisager des applications concrètes, que ce soit pour la recherche ou pour des projets industriels.

Pour résumer, ce dossier met en évidence l'importance d'une démarche structurée et efficace pour concevoir des systèmes adaptés aux défis actuels des énergies renouvelables. Ce projet constitue une base pour des applications futures, qu'il s'agisse de recherches complémentaires ou d'intégration dans des projets industriels. Il montre également que des ajustements techniques peuvent encore être apportés pour maximiser le potentiel du système et répondre aux exigences d'une production d'hydrogène plus durable.

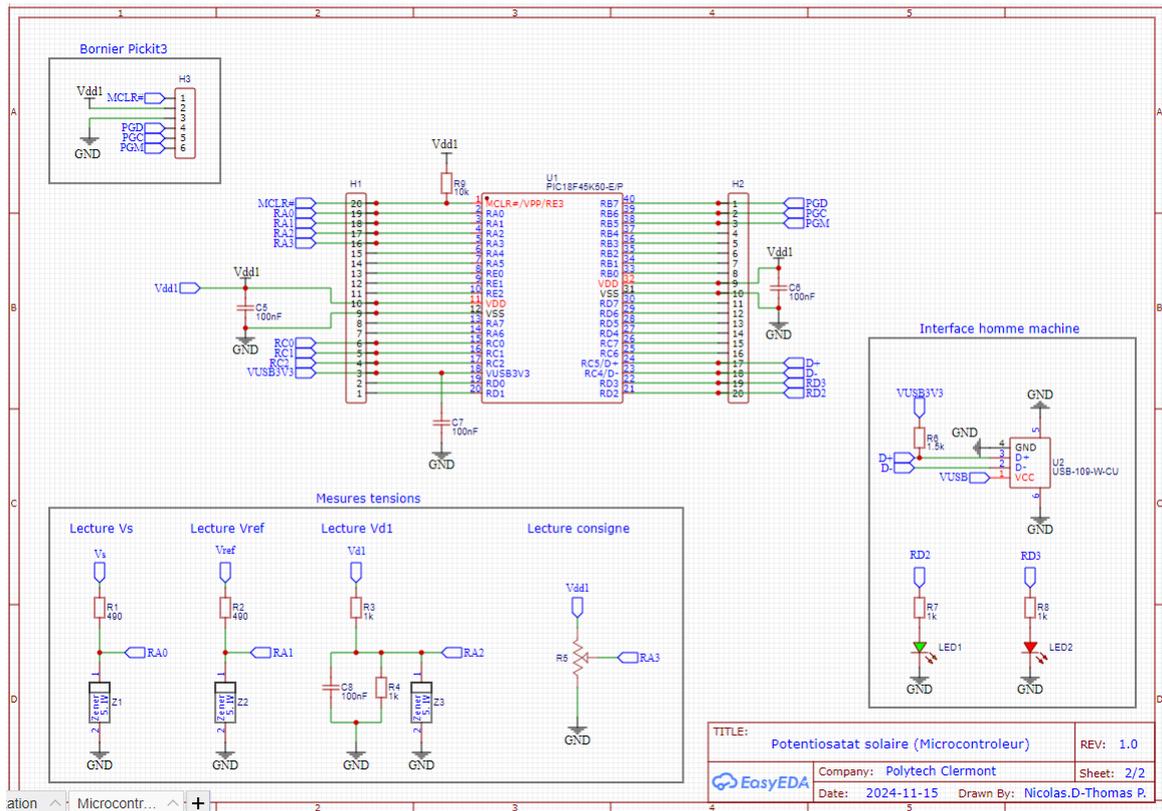
# 10. ANNEXES

ID	Name	Designator	Footprint	Quantity
1	4700u	C1,C2	CAPACITOR D16	2
2	33u	C3	CAP-TH_L7.5-W4.5-P5.00-D0.5	1
3	1u	C4	CAP-TH_L7.5-W4.5-P5.00-D0.5	1
4	100nF	C5,C6,C7,C8	CAP-TH_L7.5-W4.5-P5.00-D0.5	4
5	STPS10L25D	D1,D2,D3	TO-220AC-2_L10.5-W4.5-P5.08-L	3
6	6,96101E+11	FH1	FUSE-TH_L22.0-W9.0-P22.60	1
7	HDR-F-2.54_1x20	H1,H2	HDR-F-2.54_1X20	2
8	HDR-F-2.54_1x6	H3	HDR-F-2.54_1X6	1
9	HDR-F-2.54_1x3	H4	HDR-F-2.54_1X3	1
10	Banana2	IO1,IO2,IO3,IO4,IO5,IO6,IO7	BANANA2MM	7
11	744824101	L1	744824101	1
12	744825510	L2	FOOTPRINT 744825510	1
13	LED-TH-5mm_G	LED1	LED-TH_BD5.0_GREEN	1
14	LED-TH-5mm_R	LED2	LED-TH_BD5.0_RED	1
15	IRL7833PBF-VB	Q1,Q2,Q3	TO-220-3_L10.0-W4.6-P2.54-L	3
16	490	R1,R2	R_AXIAL-0.3	2
17	1k	R3,R4,R7,R8,R10,R11,R12	R_AXIAL-0.3	7
18	3310Y-001-103L	R5	TRIM_3310Y-001-103L	1
19	1.5k	R6	R_AXIAL-0.3	1
20	10k	R9	R_AXIAL-0.3	1
21	L7805ACV-DG	REG1	TO-220-3_L10.0-W4.5-P2.54-L	1
22	Rele_5V_1per1	REL1	PE014005	1
23	304-03-439	S1	304-03-439_FOOTPRINT	1
24	PIC18F45K50-E/P	U1	PDIP-40_L52.3-W13.8-P2.54-LS15.2-BL	1
25	USB-109-W-CU	U2	USB-C-SMD_USB-109-W-CU	1
26	Zener Diode 5.1V	Z1,Z2,Z3	ZENER 5.1V	3

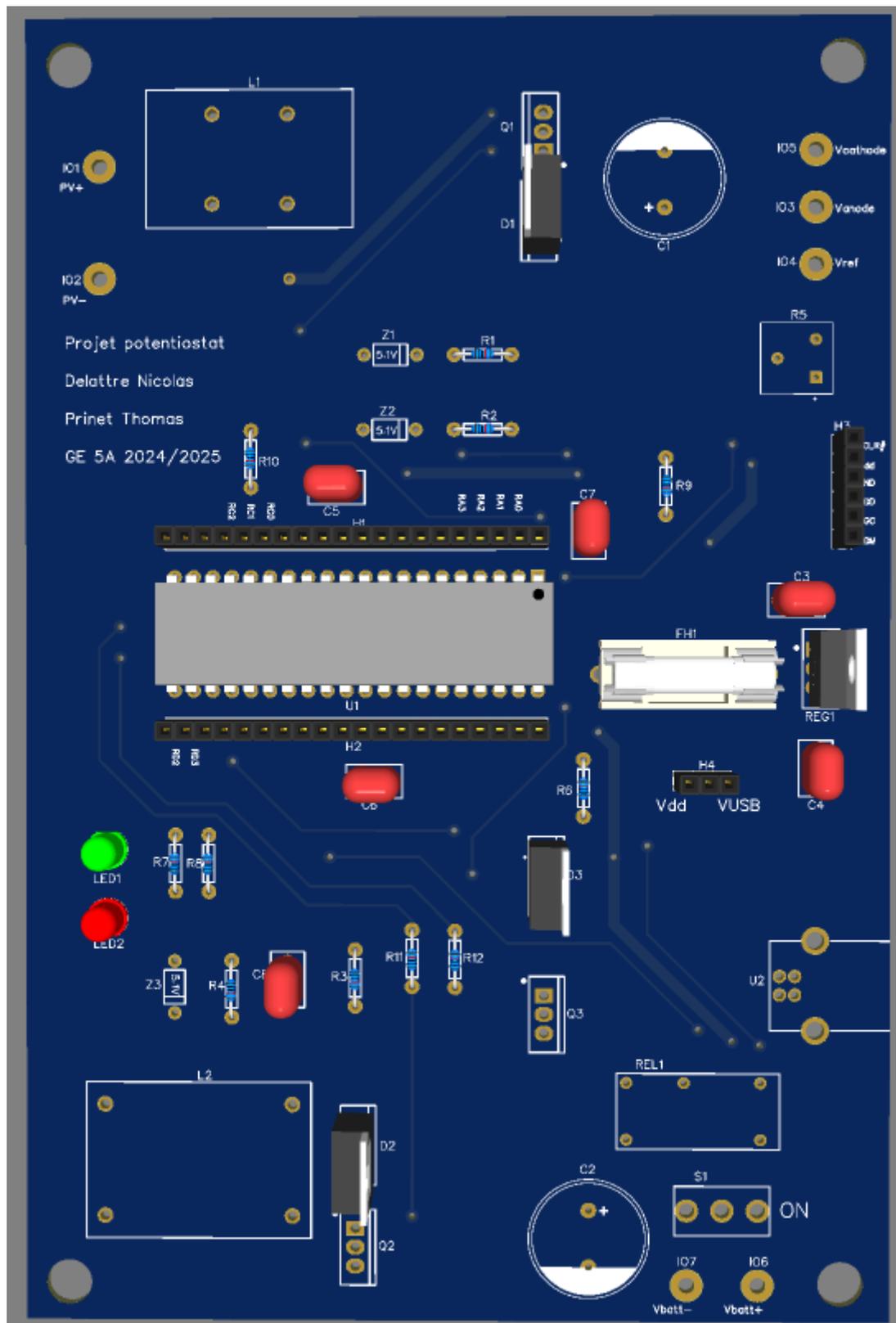
Annexe i : Liste des composants



Annexe ii : Schéma partie alimentation



Annexe iii : Schéma partie microcontrôleur



Annexe iv : Vue 3D de la carte