

PROJET

POTENTIOSTAT SOLAIRE

NOTE D'APPLICATION

Dimensionnement Convertisseur DC/DC

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

Étudiant : PRINET Thomas



TABLE DES MATIERES

1.	Introduction.....	3
2.	Présentation du montage	4
3.	Etude du fonctionnement	5
3.1.	Définiiton des équations	5
3.2.	Recherche des valeurs moyennes	6
3.3.	Contrainte sur l'inductance.....	8
3.4.	Contrainte sur le condensateur.....	9
3.5.	Contraintes sur les semis-conducteurs	12
4.	Choix des composants	13
4.1.	Grandeurs du circuit.....	13
4.2.	Choix de l'inductance	13
4.3.	Choix du condensateur	14
4.4.	Choix de la transistor	14
4.5.	Choix de la diode.....	15
5.	Conclusion	16
6.	Annexes	17

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Montage survolteur	4
Figure 2 : Montage équivalent - Première phase	5
Figure 3 : Montage équivalent - Seconde phase	6
Figure 4 : Evolution du courant i_L dans le temps.....	8
Figure 5 : Evolution de la tension u_C dans le temps.....	10

1. INTRODUCTION

Compte tenu du contexte climatique actuel, il est important de s'intéresser au domaine de l'énergie. En effet, aujourd'hui, les énergies consommées sont principalement d'origines fossiles ayant un grand impact sur l'environnement. L'un des enjeux actuels est donc de développer des alternatives plus durables et écologiques. Parmi ceux-ci l'hydrogène est une alternative en plein développement.

Le groupe GePeb de l'institut Pascal à Clermont-Ferrand, travail aujourd'hui sur des systèmes de création de carburant écologique. L'une des pistes en développement est la création d'hydrogène par photo-électrolyse de l'eau.

Afin de rendre viable leur système, le groupe a lancé le projet potentiostat solaire. Ce projet a pour objectif d'optimiser la réaction de photo-électrolyse. Pour cela, la visée de ce projet est de créer un système alimenté par une cellule photovoltaïque permettant de réaliser cette tâche.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de ce projet. Il offre une présentation détaillée du montage utilisé afin de réaliser un convertisseur de puissance essentiel afin de pouvoir assurer le fonctionnement du système final.

Dans un premier temps, une présentation du montage sera réalisée. Puis, ce document exposera une étude détaillée du fonctionnement du circuit. Enfin, ce travail justifiera les choix réalisés concernant le choix des composants utilisés afin de réaliser ce montage.

2. 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 :

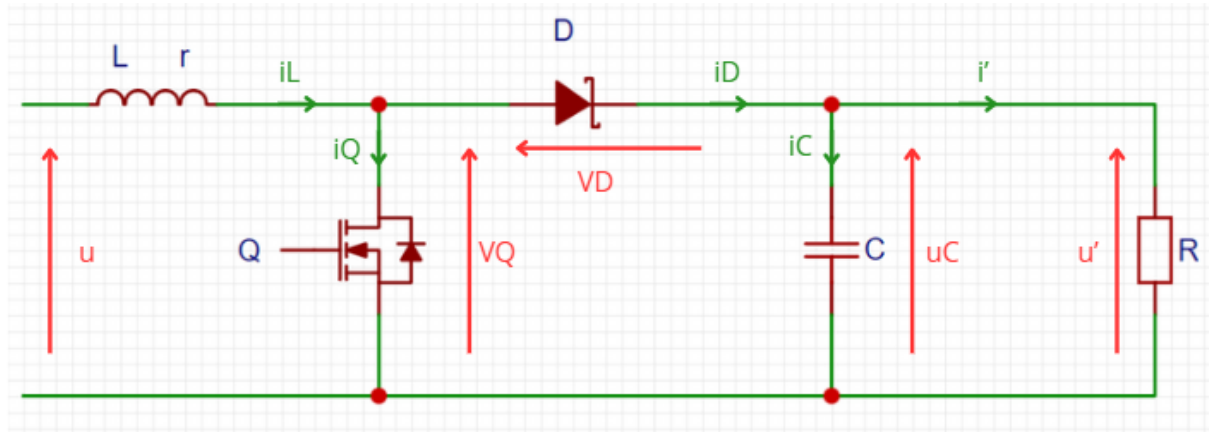


Figure 1 : Montage survolteur

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. ETUDE DU FONCTIONNEMENT

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

3.1. 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 α .

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 :

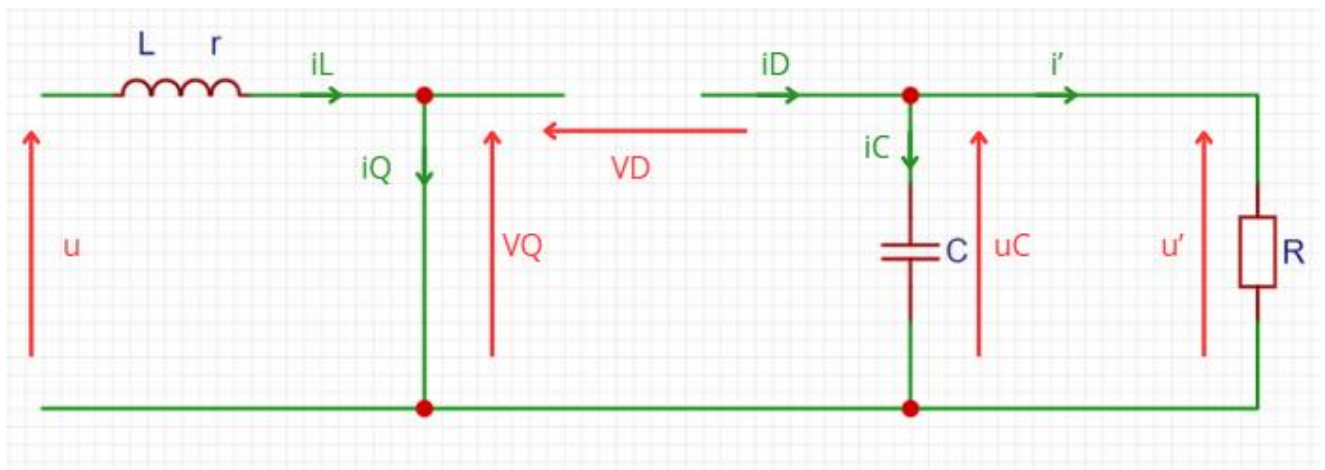


Figure 2 : Montage équivalent - Première phase

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 :

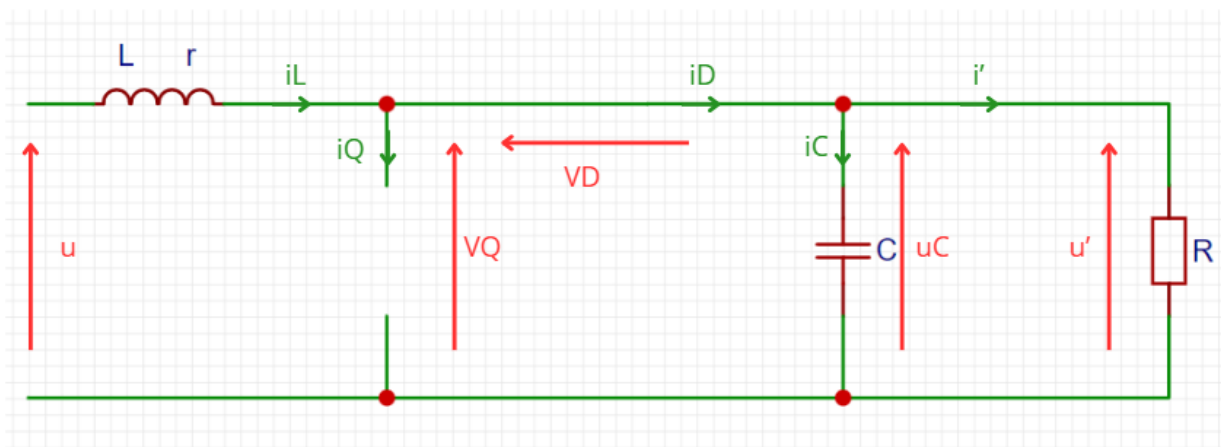


Figure 3 : Montage équivalent - Seconde phase

Les équations du circuit sont :

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

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

3.2. 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 :

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

Or,

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

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

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

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 α 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 :

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

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

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

3.3. 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 :

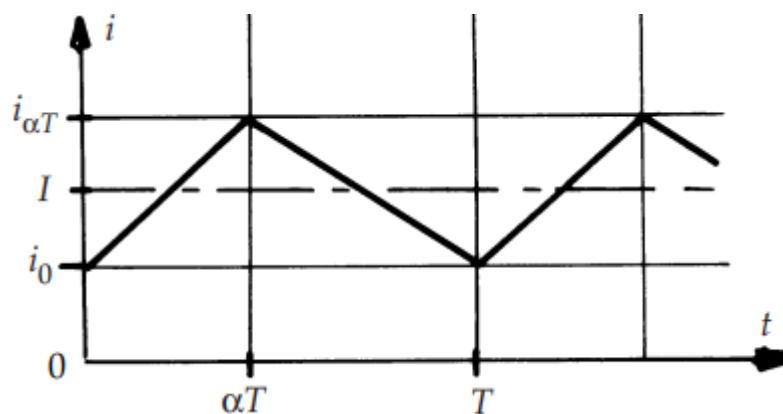


Figure 4 : Evolution du courant i_L dans le temps

- **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**

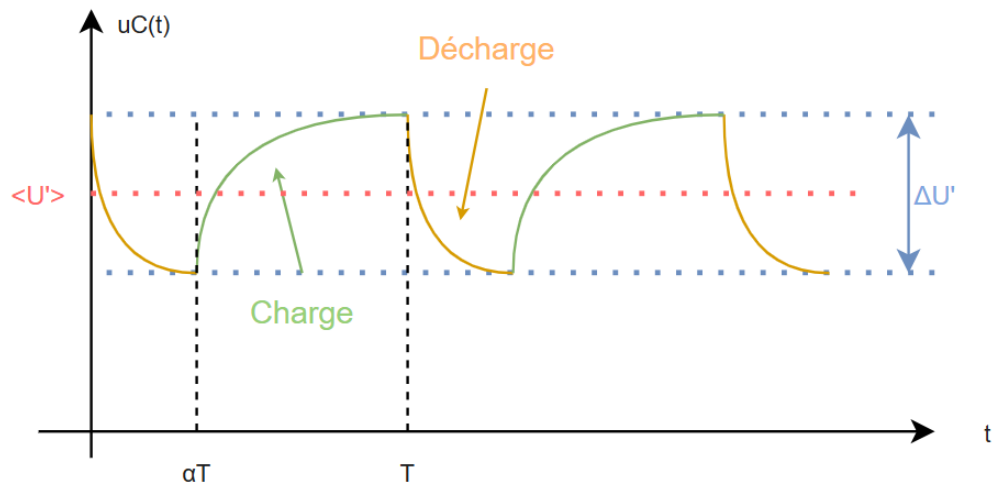
Au final, afin de minimiser l'ondulation, il faudra respecter la condition suivante avec I la valeur moyenne du courant de sortie :

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

3.4. CONTRAINTE 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 5 : 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 :

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

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

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

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

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 :

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

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 :

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

3.5. 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 :

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

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

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

4. CHOIX DES COMPOSANTS

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

4.1. 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)

4.2. 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 Elektronik. La référence fabricant est : **744824101**.

4.3. 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**.

4.4. 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**.

4.5. 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**.

5. CONCLUSION

Le but du projet potentiostat solaire étant de créer un système permettant l'optimisation de la création d'hydrogène par photo-électrolyse de l'eau, il a été nécessaire d'intégrer un convertisseur de puissance. Ce dernier a pour rôle d'adapter le signal électrique issu d'une cellule photovoltaïque aux besoins d'une cellule photoélectrochimique.

Dans l'optique de justifier les choix réalisés dans la conception de ce convertisseur, ce travail a tout d'abord présenté le montage retenu. Dans un second temps, il a été réalisé une étude complète du circuit. Les résultats obtenus ont permis de déterminer dans un dernier temps les contraintes appliquées sur les composants et de choisir ces derniers afin de répondre au cahier des charges du projet.

En conclusion, ce travail a permis de réaliser un prototype du convertisseur de puissance, qui, une fois combiné à d'autres sous-systèmes, permettra de répondre aux besoins du projet qui est de créer de l'hydrogène.

6. ANNEXES

Voici un tableau détaillé des composants retenus pour la réalisation de ce montage.

Composant	Fabricant	Référence fabricant	Fournisseur	Référence fournisseur
Inductance 1mH - 10A	Würth Elektronik	744824101	RS component	489-0318P
Condensateur 4700uF - 63V	RS PRO	711-1668	RS component	711-1668
MOSFET 30V - 150A	Infineon	IRL7833PBF	RS component	688-7193
Diode Schottky 10A	STMicroelectronics	STPS10L25D	RS component	102-3567