
Étude technique du filtrage d'un onduleur monophasé SiC

Rapport de dossier industriel



Sylvain DUBOIS
Candidat n°02340298142

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	OwnTech	2
1.2	Système global	2
1.3	Carte Twist	3
1.4	Choix du sujet : intérêt pédagogique	4
1.5	Problématique technique	4
2	Étude technique	6
2.1	Caractérisation expérimentale	6
2.1.1	Choix de la bobine	6
2.1.2	Caractérisation	7
2.2	Modélisation et simulation	8
2.2.1	Équations générales	9
2.2.2	Filtre	9
2.2.3	Charge RL	9
2.2.4	Charge complète	11
2.2.5	Norme pour injection réseau	11
2.2.6	Commande de l'onduleur	12
2.2.7	Résultats de la simulation : injection réseau (charge RL série)	12
2.3	Conclusion de l'étude technique	14
3	Exploitations pédagogiques	14
3.1	Exploitation pédagogique du système et de l'étude technique	14
3.1.1	Communication	14
3.1.2	Acquisition	15
3.1.3	Fabrication de la carte	15
3.1.4	Maquette pédagogique	16
3.2	Exploitation pédagogique en BUT GEII	16
3.2.1	Présentation de la filière	16
3.2.2	Présentation de la séquence	17
3.2.3	Prérequis	19
3.2.4	Organisation de la séquence	19
3.2.5	Modalités d'évaluation	30
3.2.6	Remédiations prévues	30
3.3	Exploitation pédagogique en terminale STI2D	31
3.3.1	Présentation de la filière	31
3.3.2	Présentation de la séquence	31
3.3.3	Organisation de la séquence	33
3.3.4	Projet de la séquence	34
3.3.5	Séquence détaillée	34
3.3.6	Évaluation	39
3.3.7	Remédiations prévues	40
4	Conclusion	40

1 Introduction

1.1 OwnTech

Initialement, OwnTech était une fondation et une association co-fondées à Toulouse en 2021 par Luiz Ferdinando VILLA, enseignant-chercheur, et par Jean Alinei, ingénieur d'études. L'objectif d'OwnTech était dans un premier temps de développer des produits avec une R&D financée principalement par le CNRS, puis de créer une startup fin 2023 afin de commercialiser les produits.

L'objectif principal de l'entreprise est de fabriquer des alimentations à découpage innovantes et open source. OwnTech soutient l'idée que cette technologie est une des clés pour électrifier et décarboner notre économie. Ainsi, cette technologie doit être accessible à tous.

Pour parvenir à une telle démocratisation, OwnTech mise sur une technologie open source (ouverte / libre de droit), ainsi que sur du matériel modulaire et des logiciels libres et faciles d'utilisation. L'entreprise propose actuellement à la vente ses microcontrôleurs (carte Spin) ainsi que des premières cartes de conversion de puissance (carte Twist) visibles Figures 1 et 2.

Sur le plan économique, la start-up est parvenue à vendre une soixantaine de cartes Twist fin 2023 et projette d'atteindre le millier de ventes en 2024. Son modèle de développement est similaire à celui d'Arduino et de Raspberry Pi dans le sens où OwnTech a pour objectif de démocratiser l'électronique de puissance.



FIGURE 1 – Carte de contrôle Spin actuellement proposée à la vente par OwnTech



FIGURE 2 – Carte de conversion Twist actuellement proposée à la vente par OwnTech

1.2 Système global

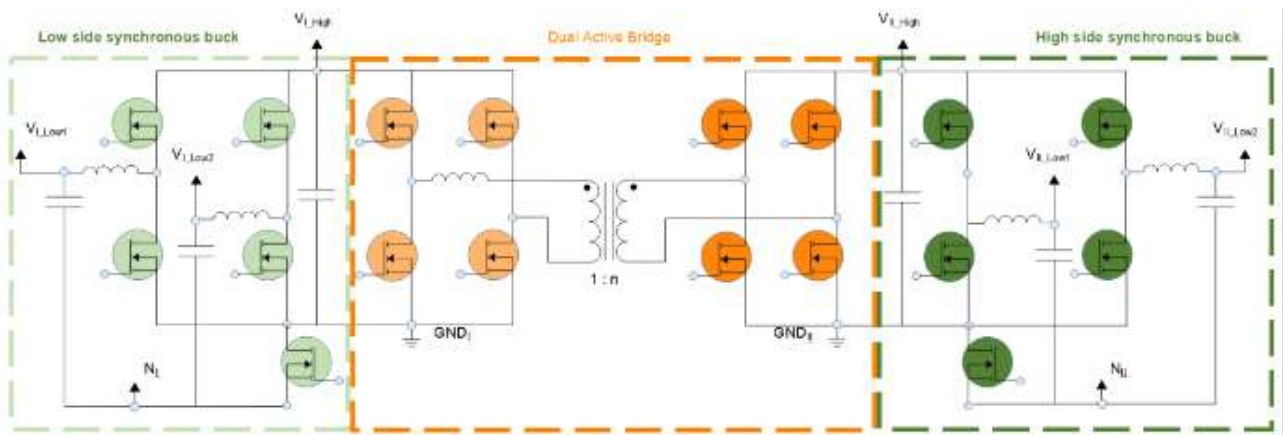


FIGURE 3 – Système complet en cours de développement : à gauche la carte TWIST actuellement vendue, au centre et à droite le DAB et la carte SWIRL en cours de développement

La topologie de puissance développée par OwnTech (fig.3) est composée de trois convertisseurs de puissance standards. Un abaisseur basse tension à courant élevé, un double pont actif (Dual Active Bridge, DAB) et un deuxième abaisseur haute tension à faible courant. Cette architecture de puissance permet des conversions bidirectionnelles de puissance, avec des capacités de gain élevées pour passer des niveaux de tension AC standard du réseau à pratiquement n'importe quel appareil électrique nécessitant des tensions plus basses pour fonctionner.

Une application importante de ce mode de fonctionnement bidirectionnel est d'injecter de la puissance dans un réseau à partir de sources à basse tension telles que des batteries.

Du point de vue de la conception, l'objectif est d'obtenir une efficacité maximale sur le plus grand nombre d'applications de puissance tout en minimisant les coûts.

Le DAB permet d'avoir un grand rapport de transformation tout en conservant un bon rendement, mais surtout il peut fonctionner à une fréquence de découpage très élevée afin de minimiser la masse et donc le coût du système.

1.3 Carte Twist

Les exploitations pédagogiques porteront sur la carte Twist qui est le premier étage de cette structure globale. Cette carte est toujours en cours de développement mais elle est déjà proposée à la vente en petite série (60 en 2023) pour quelques particuliers, principalement dans le milieu de l'enseignement attiré par son coût de 330 euros et les applications possibles.

Dans le cadre de mon dossier industriel j'ai pu passer une semaine dans les locaux de OwnTech à Toulouse, et j'ai notamment pu faire l'acquisition d'une carte gratuitement en aidant à la fabrication de trois cartes Twist, ce qui m'a aussi permis de documenter toutes les étapes de la fabrication.

La carte Twist est un hacheur 4 quadrants avec filtrage du bus DC et de chacun des deux bras qui peuvent fonctionner indépendamment. Comme visible Figure 5, la carte Twist est commandée par une carte Spin, des connecteurs Wago pour transmettre la puissance aux deux bras de puissance (qui sont identiques). On observe aussi un bloc d'alimentation qui permet de transformer une entrée comprise entre 11V et 110V en sortie de 6V et 0.5A avec une structure de type flyback fonctionnant en mode de conduction discontinue.

On retrouve Figure 4 le schéma électrique global d'un point de vue conversion statique. On observe une légère différence avec le schéma Figure 3 à savoir la disparition dans les dernières versions de la Twist du MOSFET permettant de réguler le courant de neutre, jugé inutile par OwnTech.

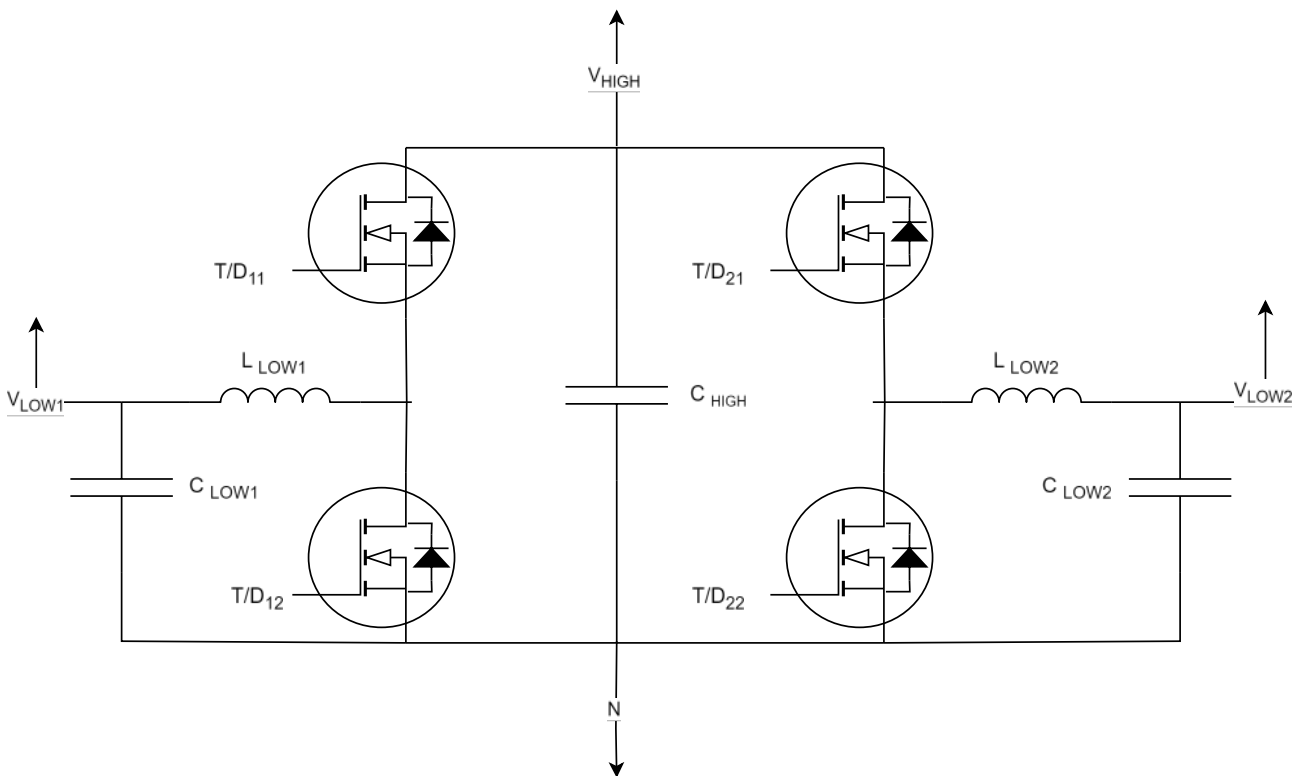


FIGURE 4 – Schéma électrique global de la TWIST

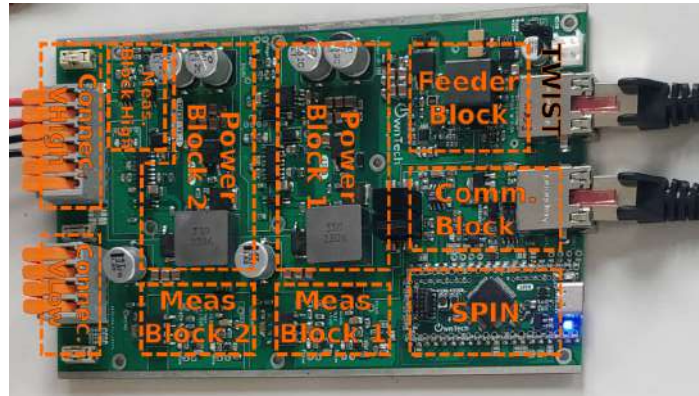


FIGURE 5 – Structure par blocs de la carte TWIST

1.4 Choix du sujet : intérêt pédagogique

J'ai choisi ce sujet car la carte Twist développée par OwnTech offre la possibilité aux élèves de manipuler en autonomie et en sécurité. Les niveaux de tensions (inférieurs à 100 V), la faible puissance (300 W max) et les diverses protections intégrées à la carte permettent d'accorder une grande liberté aux élèves. Cette carte a un coût abordable de 330 € qui devrait encore baisser par la suite (les moyens de production finaux sont en cours d'installation). La carte est au format Eurocard et possède une connectique de puissance Wago ce qui permet de la mettre facilement en rack ou dans un boîtier en plexiglass avec des fiches bananes. Aussi, la carte dispose de diverses protections dont des fusibles à 8A facilement accessibles, et ne nécessite pas d'alimentation externe pour fonctionner puisqu'elle prélève une partie de la puissance convertie pour alimenter la commande.

Un autre aspect qui a déterminé mon choix est la politique d'open source de l'entreprise. Elle permet d'avoir accès à un grand nombre de ressources techniques comme toutes les datasheets des composants, les fichiers KiCad et les schémas des différentes cartes mais surtout cela donne accès à un grand nombre de tutoriels et d'exemples d'applications avec les codes directement disponibles. Tous les logiciels nécessaires à l'utilisation de la carte par les élèves sont gratuits. Les cartes sont programmées via Visual Studio Code et OwnTech a également développé le logiciel OwnPlot qui permet de visualiser tous les signaux facilement. Enfin, OwnTech a regroupé une communauté d'utilisateurs sur un serveur discord contenant un grand nombre de projets accessibles au public, ce qui permet de faciliter la communication avec l'entreprise pour poser des questions ou pour discuter avec les nombreux enseignants qui utilisent leurs cartes.

1.5 Problématique technique

Actuellement la carte Twist convertit une puissance maximale de 300 W pour des tensions allant de 10 V à 100 V et une intensité limitée à 8 A. La carte Twist utilise des MOSFET en Silicium (IPD200N15N3) qui commutent à une fréquence de 200 kHz et admettent une tension maximale de 150 V. OwnTech veut aussi développer une carte qui puisse monter en puissance et en tension notamment pour réaliser de l'injection réseau. OwnTech souhaite pouvoir réaliser un onduleur triphasé à l'aide de 3 onduleurs monophasés, ce qui impose que le bus de ces cartes Swirl supporte une tension du bus DC de 650V. Afin de minimiser le coût de production de la carte et notamment le coût du filtrage, les composants doivent être montés en surface et la fréquence de découpage doit être élevée. Pour monter en tension tout en gardant une fréquence de découpage très élevée, une étude technico-économique sur le choix de la technologie et du modèle des nouveaux transistors a déterminé que les MOSFET SiC IMZ120R090M1H sont un choix idéal. Cependant, il faut encore dimensionner avec précision le filtrage de la nouvelle carte. En effet, l'augmentation de la tension maximale ainsi que la volonté d'augmenter la puissance et l'intensité maximale nécessitent un dimensionnement complet du filtrage notamment pour respecter les normes d'injection réseau.

Pour diminuer le coût global de la carte il faut optimiser l'utilisation des composants et donc prendre en compte les défauts du filtrage comme la saturation des bobines lorsque l'intensité augmente. Pour respecter la politique de développement open-source de l'entreprise et parce que les outils Matlab ne sont pas assez accessibles

(impossible de configurer précisément le comportement de la bobine), il est nécessaire de réaliser un outil de simulation du comportement du filtre directement sous Python.

Enfin, il faut caractériser les composants et leurs défauts pour les prendre en compte le plus fidèlement possible dans la simulation. En pratique il est difficile de les caractériser sans avoir la chaîne de commutation de la nouvelle carte. Je vais tout de même mettre en place et tester les protocoles de caractérisation expérimentale qui seront utilisés une fois la conception de la chaîne de commutation réalisée.

Toutes ces contraintes définies avec l'entreprise pour réaliser cette étude technique m'ont permis d'établir un premier cahier des charges simplifié, que l'on peut voir Figure 6 et qui recense les principales exigences.

L'étude technique s'articule en plusieurs parties dont les objectifs sont :

- 2.1) Mettre en place et tester un protocole de caractérisation expérimentale de la bobine pour obtenir un modèle fidèle à implémenter dans la simulation.
- 2.2) Modéliser le carte Swirl, son filtre ainsi que la charge pour concevoir un simulateur Python qui réalisera des simulations temporelles et des analyses fréquentielles afin d'étudier le respect ou non de la norme d'injection réseau.
- 2.3) Conclure sur les résultats de l'étude technique.

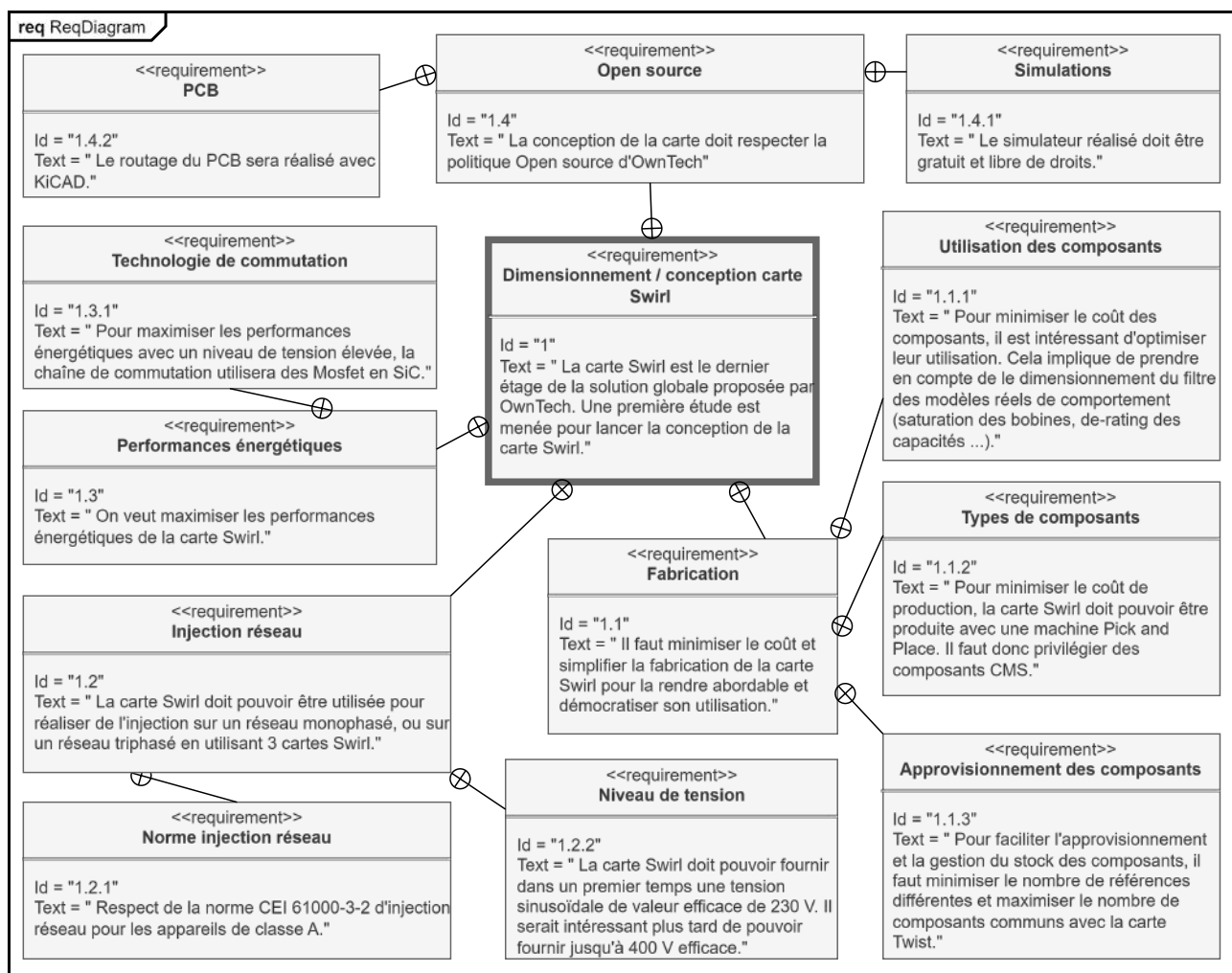


FIGURE 6 – Diagramme SysML partiel et simplifié des exigences de l'étude technique

2 Étude technique

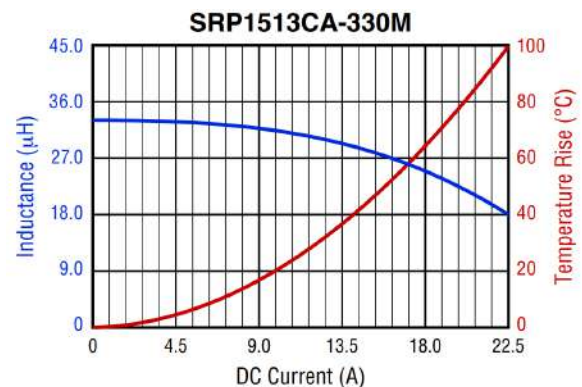
2.1 Caractérisation expérimentale

2.1.1 Choix de la bobine

Afin de simuler fidèlement le système réel, il est nécessaire de caractériser les bobines et leur saturation. Cependant, pour diminuer le coût de production des cartes, OwnTech a choisi de minimiser le nombre de composants traversants afin de pouvoir fabriquer les cartes principalement avec une machine "pick-and-place". Cela restreint fortement le choix pour les composants de filtrage, d'autant plus qu'OwnTech souhaite aussi utiliser le plus possible de composants en commun pour ses différentes cartes. Finalement, le choix de l'inductance de filtrage pour les cartes Twist et Swirl s'est porté sur la plus grosse bobine CMS de puissance blindée du producteur Bourns à savoir la SRP1510CA-330M. Comme visible sur la Figure 7, cette bobine commence à saturer à partir d'un courant DC d'une dizaine d'ampères avec une saturation conséquente pour une intensité typique I_{sat} de 19 A.

Electrical Specifications @ 25 °C										
Bourns Part Number	Inductance @ 100 kHz / 0.1 V		Q Typ. @ 100 kHz / 0.1 V	SRF (MHz) Typ.	DCR (mΩ) Typ.	DCR (mΩ) Max.	I _{rms} (A) Typ.		Isat (A) Typ.	
	L (μH)	Tol. (%)					20 °C Temp. Rise	40 °C Temp. Rise		
SRP1513CA-4R7M	4.7	20	40	13	3.0	3.3	23	31	44	
SRP1513CA-5R6M	5.6	20	40	11	3.5	3.9	22	29	40	
SRP1513CA-6R8M	6.8	20	40	10	3.8	4.2	21	27	37	
SRP1513CA-8R2M	8.2	20	40	9	5.1	5.74	20	26	33	
SRP1513CA-100M	10	20	40	8	6.3	7	19	25	30	
SRP1513CA-150M	15	20	40	7	6.8	7.5	16	22	25.5	
SRP1513CA-220M	22	20	40	6	12.6	13.86	12	17	22	
SRP1513CA-330M	33	20	40	5	18.5	22.2	9	14	19	

(a) Caractéristiques électriques générales



(b) Inductance et température en fonction du courant DC

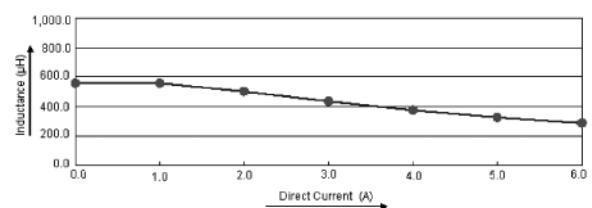
FIGURE 7 – Extrait de la datasheet pour la bobine SRP1510CA-330M de Bourns

Cela soulève un problème pour effectuer une telle caractérisation car la carte Twist n'est pas conçue pour de telles intensités (fusibles de 8A) et donc ne permet pas de caractériser la saturation des bobines. La chaîne de commutation de la Swirl étant actuellement en cours de développement, ce n'est pas non plus une possibilité pour le moment.

Finalement, j'ai décidé de réaliser dans un premier temps la caractérisation d'un autre modèle de bobine de technologie similaire, puisque aussi réalisée en ferrite, afin de mettre en place le protocole de caractérisation et d'avoir un premier modèle type de bobine proche de la réalité pour les simulations. Comme visible à la Figure 8 la saturation de la bobine MCAP115018077A-561LU a lieu avec une intensité inférieure à 10 A ce qui est actuellement réalisable avec le hacheur dont je dispose.

Electrical Characteristics			
Test Condition			
10kHz / 5mA		L	560μH ±15%
T _A = 25°C		DCR	77mΩ ±10% (Max.)
10kHz / 5mA I _{rms} = 10A		ΔT	Temperature rise 40°C (Max.)

(a) Caractéristiques électriques générales



(b) Inductance en fonction du courant DC pour une fréquence de 10 kHz

FIGURE 8 – Extrait de la datasheet pour la bobine MCAP115018077A-561LU

2.1.2 Caractérisation

On souhaite caractériser la bobine pour différentes intensités moyennes (I_{DC} allant de 0A à 9A) et sur une certaine plage de fréquence. La plage de fréquence est définie par celle de la chaîne de commutation dont je dispose et permet d'aller de 500 Hz à 35 kHz.

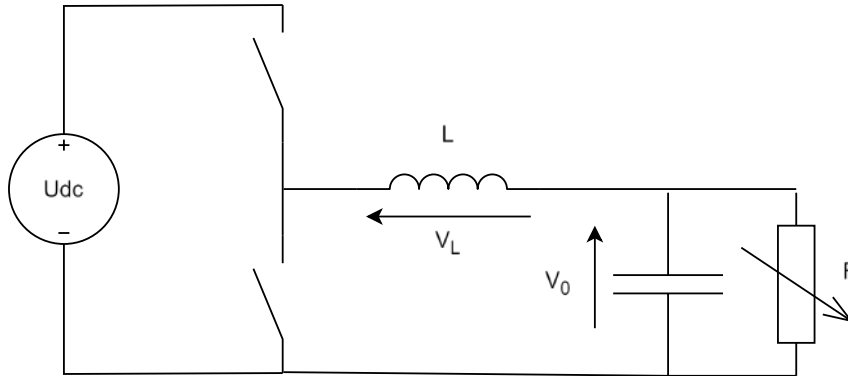


FIGURE 9 – Schéma électrique de la manip de caractérisation d'une bobine

Pour caractériser la bobine, on réalise le montage Figure 9, on fixe la tension d'alimentation U_{dc} à une valeur constante d'environ 100V et stable (bien filtrée) et on visualise l'intensité dans la bobine et la tension à ses bornes à l'oscilloscope. Pour minimiser les erreurs de mesure, il est judicieux de mesurer directement l'inductance de 40 bobines en série mais aussi de maximiser l'ondulation de courant en se plaçant à un rapport cyclique constant de 1/2. En effet :

$$\Delta I = \frac{\alpha(1 - \alpha)U_{DC}}{Lf}$$

$$\Delta I_{max} = \Delta I(\alpha = 0.5) = \frac{U_{DC}}{4Lf}$$

En choisissant une capacité suffisamment grande, on parvient à maintenir V_0 constante et pour un α donné, on peut faire varier le courant moyen dans l'inductance en réglant le rhéostat :

$$\langle I \rangle = \frac{V_0}{R} = \frac{\alpha U_{DC}}{R}$$

Enfin, on peut déduire l'inductance en mesurant la pente de l'intensité dans la bobine (droite) ainsi qu'en mesurant la tension aux bornes de la bobine qui est constante durant chacune des demi-périodes. Mesurer directement la pente et non l'ondulation de courant permet d'avoir une mesure plus précise (indépendamment de la fréquence). Finalement, on parvient bien à mesurer l'inductance en faisant varier la fréquence de commutation indépendamment du courant moyen dans la bobine.

On obtient les résultats Figure 10 et on observe que l'inductance mesurée expérimentalement est plus élevée que celle annoncée par le constructeur pour un très faible courant moyen et pour des fréquences plus faibles de commutation. Cependant, on constate expérimentalement que les bobines semblent davantage saturées lorsque l'intensité augmente. Cela peut s'expliquer par une différence dans les conditions expérimentales, ou par une caractérisation expérimentale réalisée avec plus de précision puisque j'ai utilisé 40 bobines en série. Ces résultats peuvent ensuite être utilisés comme données dans l'outil de simulation.

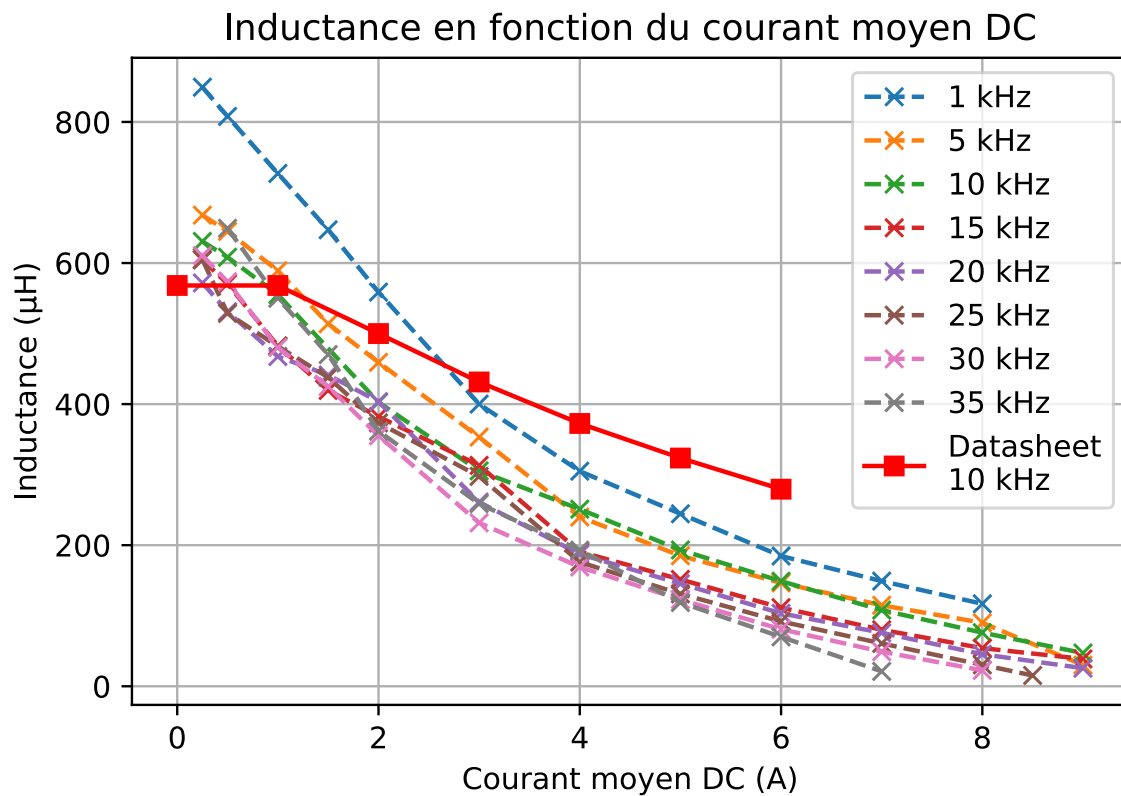


FIGURE 10 – Caractérisation expérimentale de l'inductance en fonction du courant moyen et de la fréquence de découpage

2.2 Modélisation et simulation

La modélisation de la carte Swirl adoptée pour cette étude technique est décrite Figure 11. On considère les deux capacités du bus DC comme des sources de tension idéales.

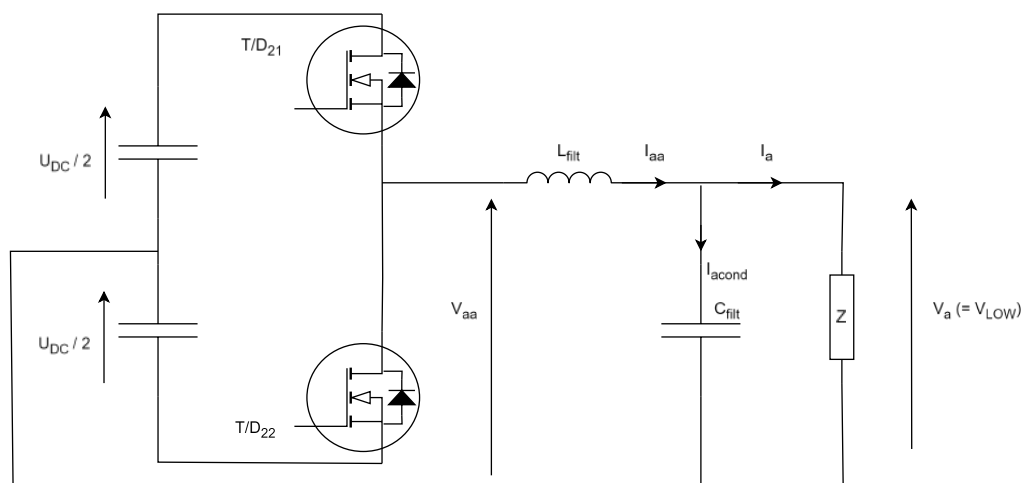


FIGURE 11 – Schéma électrique du filtrage de la Twirl relié à une charge Z quelconque

Comme il n'est pour le moment pas possible de caractériser la bobine actuellement utilisée pour la carte Twist et donc réutilisée pour la carte Swirl, j'ai pour le moment réalisé une interpolation depuis le graphique fourni dans la datasheet Figure 7 b. Cela m'a permis d'obtenir une fonction pour l'inductance variable que l'on peut voir Figure 12. L'inconvénient est que la datasheet ne fournit pas de données lorsque l'intensité devient trop importante, l'interpolation suppose qu'elle suit une certaine tendance mais par exemple on ne connaît pas le comportement lorsque l'inductance est complètement saturée.

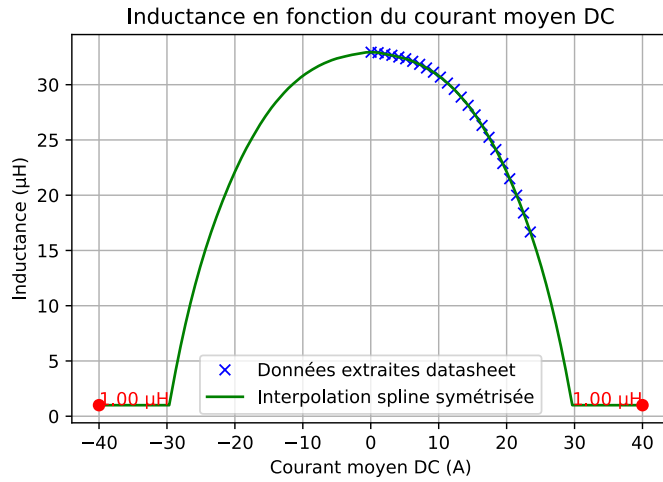


FIGURE 12 – Modélisation de l'inductance avec prise en compte de la saturation

2.2.1 Équations générales

Ces différentes équations électriques indépendantes entre elles, et qui ne dépendent pas encore de la charge sont la base de la simulation.

$$V_{aa} - V_a = L_{filt} \cdot \frac{dI_{aa}}{dt} \quad (1)$$

$$I_{acond} = C_{filt} \cdot \frac{dV_a}{dt} \quad (2)$$

$$\underline{V_a} = \underline{Z} \cdot \underline{I_a} \quad (3)$$

$$I_{aa} = I_a + I_{acond} \quad (4)$$

Dans notre modélisation, on considère que seule L_{filt} va saturer en fonction de l'intensité qui la traverse. Par soucis de clarté, cette dépendance est implicite bien qu'en réalité on devrait écrire : $L_{filt}(I_{aa})$

2.2.2 Filtre

A partir de ces quatre équations on peut calculer :

$$V_{aa} - V_a = L_{filt} \cdot \frac{dI_a}{dt} + L_{filt} \cdot C_{filt} \cdot \frac{d^2V_a}{dt^2}$$

Que l'on peut ensuite discrétiser à l'aide de la méthode d'Euler :

$$V_{aa}^n - V_a^n = L_{filt} \cdot \frac{I_a^n - I_a^{n-1}}{\delta t} + L_{filt} \cdot C_{filt} \cdot \frac{V_a^n - 2V_a^{n-1} + V_a^{n-2}}{\delta t^2} \quad (5)$$

Afin de résoudre le système, on doit maintenant utiliser l'équation (3). Pour cela il est nécessaire de considérer une certaine charge.

2.2.3 Charge RL

On cherche à modéliser le comportement fréquentiel du filtre dans le cas d'une charge RL série comme visible Figure 13. Ce type de charge permet de modéliser une consommation de puissance active et réactive, et donc de correspondre à différents cas d'injection réseau.

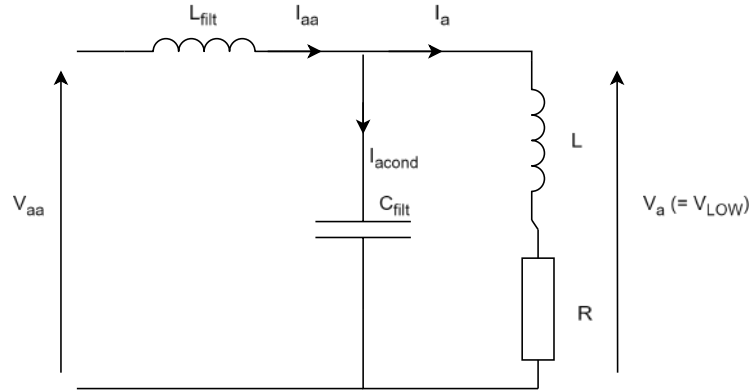


FIGURE 13 – Schéma électrique du filtrage de la Twist relié à une charge R L série

On discrétise alors la charge à l'aide de la méthode d'Euler pour obtenir :

$$V_a^n = L \cdot \frac{I_a^n - I_a^{n-1}}{\delta t} + R \cdot I_a^n$$

Soit :

$$I_a^n = \frac{V_a^n + \frac{L}{\delta t} \cdot I_a^{n-1}}{R + \frac{L}{\delta t}}$$

Que l'on peut réinjecter dans l'expression discrétisée (5) pour obtenir :

$$V_{aa}^n - V_a^n = \frac{L_{filt}}{\delta t} \cdot \left[I_a^n - I_a^{n-1} \right] + L_{filt} \cdot C_{filt} \cdot \frac{V_a^n - 2V_a^{n-1} + V_a^{n-2}}{\delta t^2}$$

On obtient finalement pour une charge R L série :

$$V_{aa}^n = A_0 \cdot V_a^n + A_1 \cdot V_a^{n-1} + A_2 \cdot V_a^{n-2} + B_1 \cdot I_a^{n-1}$$

Avec :

$$\begin{aligned} A_0 &= + \left[1 + \frac{L_{filt}}{\delta t} \cdot \frac{1}{R + \frac{L}{\delta t}} + \frac{L_{filt} \cdot C_{filt}}{\delta t^2} \right] \\ A_1 &= - \left[2 \cdot \frac{L_{filt} \cdot C_{filt}}{\delta t^2} \right] \\ A_2 &= + \left[\frac{L_{filt} \cdot C_{filt}}{\delta t^2} \right] \\ B_1 &= - \left[\frac{L_{filt}}{\delta t + \frac{L}{R}} \right] \end{aligned}$$

```
def calc_Va_RL_serie(Vaanew, Vaold1, Vaold2, Ia_old1, L_filt):
    A_0 = 1 + L_filt / (R * Te + L) + L_filt * C_filt / (Te ** 2)
    A_1 = -2 * L_filt * C_filt / (Te ** 2)
    A_2 = L_filt * C_filt / (Te ** 2)
    B_1 = -L_filt / (Te + L / R)
    return (Vaanew - A_1 * Vaold1 - A_2 * Vaold2 - B_1 * Ia_old1) / A_0
```

FIGURE 14 – Implémentation de la charge RL série dans le simulateur

2.2.4 Charge complète

Si l'on cherche à modéliser le comportement pour une charge plus générale, il est possible d'appliquer la même méthode avec le modèle de la Figure 15 et de modifier le simulateur pour correspondre au mieux au cas désiré.

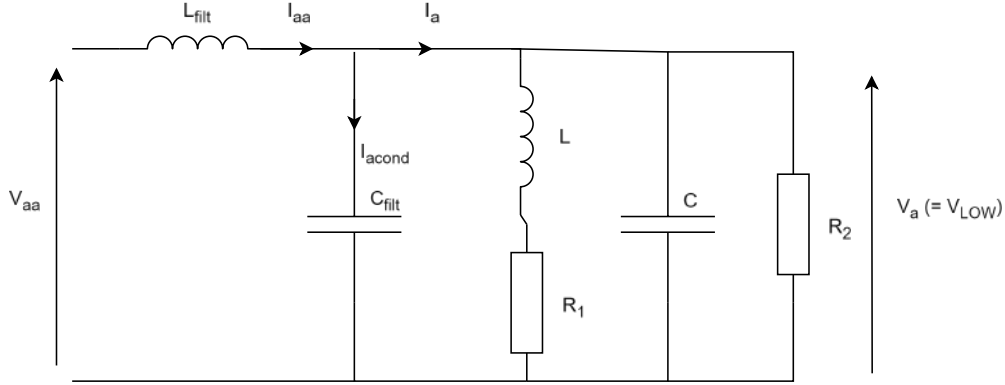


FIGURE 15 – Schéma électrique du filtrage de la Twist relié à une charge plus générale

Pour la charge générale de la Figure 15 on obtient :

$$V_{aa}^n = A_0 \cdot V_a^n + A_1 \cdot V_a^{n-1} + A_2 \cdot V_a^{n-2} + B_1 \cdot I_a^{n-1}$$

Avec :

$$\begin{aligned} A_0 &= + \left[1 + \frac{L_{filt}}{\delta t} \cdot \frac{b_0 + \frac{b_1}{\delta t} + \frac{b_2}{\delta t^2}}{a_0 + \frac{a_1}{\delta t}} + \frac{L_{filt} \cdot C_{filt}}{\delta t^2} \right] \\ A_1 &= - \left[\frac{L_{filt}}{\delta t} \cdot \frac{-\frac{b_1}{\delta t} - \frac{2b_2}{\delta t^2}}{a_0 + \frac{a_1}{\delta t}} + 2 \cdot \frac{L_{filt} \cdot C_{filt}}{\delta t^2} \right] \\ A_2 &= + \left[\frac{\frac{b_2}{\delta t^2}}{a_0 + \frac{a_1}{\delta t}} + \frac{L_{filt} \cdot C_{filt}}{\delta t^2} \right] \\ B_1 &= - \left[\frac{L_{filt}}{\delta t + \frac{a_1}{a_0}} \right] \end{aligned}$$

2.2.5 Norme pour injection réseau

La carte Swirl se catégorise comme un appareil de classe A au sens de la norme CEI 61000-3-2 qui est une norme internationale définissant les limites au niveau de la compatibilité électromagnétique (CEM). Comme visible Figure 16, cette norme impose des limites aux harmoniques de courants maximales autorisées. Ce sont ces limites qui sont prises en compte dans le simulateur pour savoir si le filtrage est suffisant pour réaliser de l'injection réseau dans chacun des cas.

Rang harmonique n	Courant harmonique maximal autorisé A
Harmoniques impairs	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \frac{15}{n}$
Harmoniques pairs	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \frac{8}{n}$

FIGURE 16 – Extrait de la norme CEI 61000-3-2 : Limites pour les appareils de classe A

Cette norme a été implémentée dans le simulateur, ainsi que les éléments d'analyse spectrales permettant de déterminer, pour chacune des simulations, si la norme est vérifiée ou non.

2.2.6 Commande de l'onduleur

Dans une première étape, une commande en boucle ouverte est réalisée.
Pour injecter dans un réseau monophasé 230V efficace avec une carte Swirl ou bien dans un réseau triphasé (avec neutre) à l'aide de trois cartes Swirl pour créer les tensions simples, il faut un niveau minimum de tension du bus DC. En effet, en boucle ouverte on a :

$$\alpha(t) = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{2} \cdot V_{eff}}{U_{DC}} \cdot \sin(\omega t)$$

Ce qui implique que :

$$U_{DC} > 2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{eff}$$

Et donc pour avoir une tension efficace de 230V on montre qu'on a besoin d'un bus DC d'au moins 650.5 V.

2.2.7 Résultats de la simulation : injection réseau (charge RL série)

Les résultats ci-dessous ont été obtenus en utilisant les paramètres du Tableau 1.

Symbole	Description	Valeur
U_{dc}	Tension du bus DC en entrée du circuit	650.5 V
F_d	Fréquence de découpage du hacheur	200 kHz
F_s	Fréquence du signal de sortie	50 Hz
T_e	Pas de temps de simulation en secondes	1×10^{-7} s
T_h	Durée de la simulation en secondes	1 s
C_{filt}	Capacité du filtre	50 μ F
R	Résistance	10 Ω
L	Inductance de la charge	16.5 μ H
L_{filt}	Inductance du filtre non saturée	33 μ H

TABLEAU 1 – Liste des paramètres

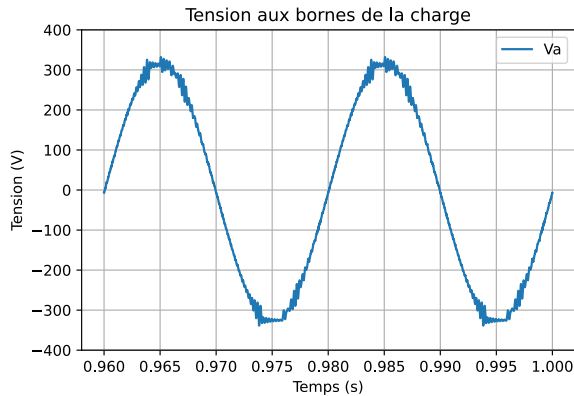


FIGURE 17 – Tension aux bornes de la charge avec bobine filtre idéale (sans saturation)

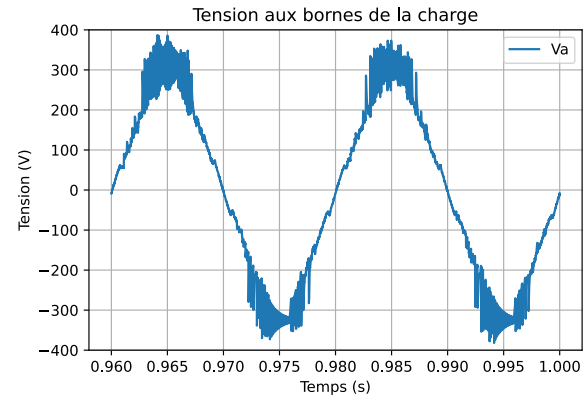


FIGURE 18 – Tension aux bornes de la charge avec bobine filtre saturante (modèle Figure 12)

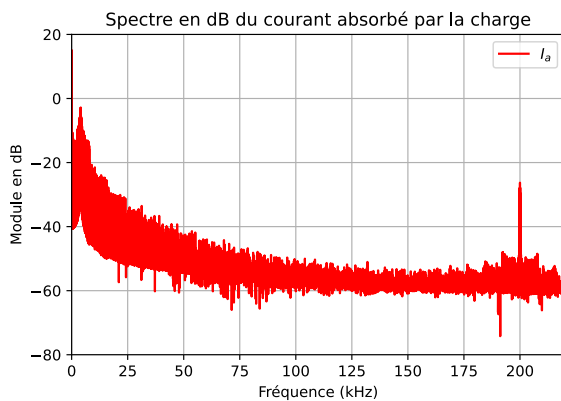


FIGURE 19 – Spectre en dB du courant absorbé par la charge avec bobine filtre idéale (sans saturation)

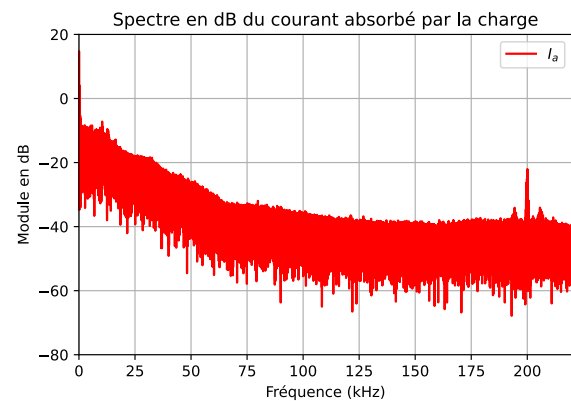


FIGURE 20 – Spectre en dB du courant absorbé par la charge avec bobine filtre saturante (Figure 12)

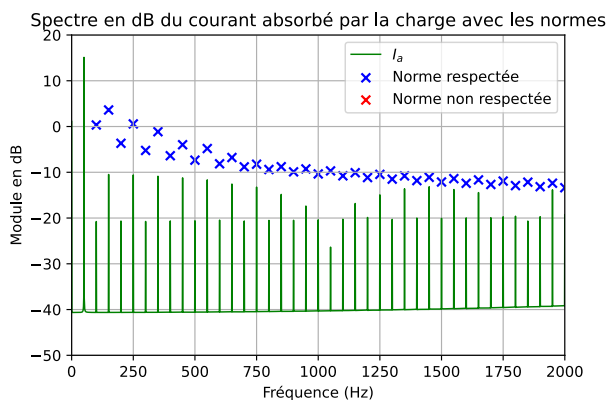


FIGURE 21 – Spectre en dB du courant absorbé par la charge avec bobine filtre idéale (sans saturation) pour conformité avec la norme CEI 61000-3-2

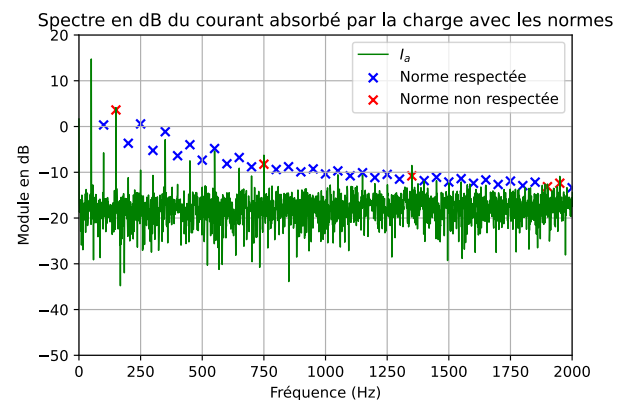


FIGURE 22 – Spectre en dB du courant absorbé par la charge avec bobine filtre saturante (Figure 12) pour conformité avec la norme CEI 61000-3-2

On observe dans les Figures 17 et 18 l'impact de la saturation des bobines sur la tension dans la charge (et l'intensité car charge principalement résistive). On observe que quand l'intensité devient importante (aux extremums des sinusoïdes) alors la bobine du filtre sature, et l'intensité (et donc la tension) est moins bien filtrée. Sur les analyses spectrales Figures 19 et 20 on observe ici aussi l'impact de la saturation des bobines qui engendre plus d'harmoniques dans l'intensité dans la charge. On retrouve aussi la composante haute fréquence

due à la fréquence de découpage à 200 kHz. Enfin, les Figures 21 et 22 mettent en évidence les conséquences que la saturation des bobines peut avoir sur la validation ou non de la norme. En effet, pour un même cas d'essai, la norme est validée avec une bobine idéale, alors que si on prend une bobine qui sature la norme n'est plus respectée pour cinq harmoniques différentes (dont l'harmonique de rang 3). Cela montre bien l'importance de prendre en compte la saturation des bobines dans notre cas, pour optimiser au maximum l'utilisation des composants et minimiser le coût de la carte Swirl.

2.3 Conclusion de l'étude technique

Dans cette étude technique, je suis parvenu à caractériser une bobine analogue à celle de la carte Twist pour confirmer le protocole de test qui permettra d'implémenter un modèle fidèle du comportement de la bobine dans le simulateur. Techniquement, tant que le chaîne de commutation n'est pas finie, il ne m'est pas possible de caractériser la bobine de la carte Twist mais j'ai contourné ce problème en interpolant les données constructeur pour avoir un premier modèle fidèle. J'ai ensuite modélisé la carte Swirl, son filtre et différentes charges pour réaliser un simulateur sous python. Une fois la simulation effectuée, une analyse temporelle des signaux permet de vérifier si le dimensionnement du filtre permet de respecter ou non la norme d'injection réseau CEI 61000-3-2. L'analyse des résultats dans différents cas a permis de mettre en avant l'importance du phénomène de saturation des bobines et l'impact qu'il peut avoir sur le respect ou non de la norme.

Finalement, cette première version du simulateur permet une analyse précise du comportement de l'onduleur monophasé. Il permet déjà de dimensionner le filtre pour des applications données, qu'il faudra déterminer avec la société OwnTech. Le simulateur prend en compte la saturation des bobines et vérifie la conformité du signal de sortie avec la norme CEI 61000-3-2. Cependant, pour avoir un dimensionnement complet du filtre il serait intéressant de rajouter le dé-rating des condensateurs céramiques multicouches MLCC - CMS engendré principalement par le niveau de tension, mais aussi la température. Une étude plus poussée de la thermique, notamment des bobines, serait aussi intéressante puisque la montée en intensité engendrera aussi une forte montée en température. Enfin, une fois que la conception de la chaîne de commutation de la carte Swirl sera finie, il sera évidemment intéressant d'appliquer le protocole expérimental de caractérisation complète aux bobines pour remplacer le modèle incomplet de la datasheet par celui déterminé expérimentalement.

3 Exploitations pédagogiques

3.1 Exploitation pédagogique du système et de l'étude technique

Le principal avantage avec un tel système open-source est la quantité de ressources accessibles. Par exemple, tous les fichiers KiCad sont disponibles ainsi que les datasheets de tous les composants. Il y a aussi une grande communauté sur un serveur discord qui permet de consulter divers projets réalisés en collaboration avec OwnTech, mais aussi de poser des questions aux membres de la communauté.

La partie commande de la Twist est réalisée à l'aide d'une carte Spin directement soudée sur la Twist. Cette carte Spin est un microcontrôleur qui peut être acheté séparément et qui est un concurrent direct aux cartes Arduinos, ESP32 ou encore STM32 notamment par la quantité de ressources accessibles mais aussi grâce au logiciel Ownplot qui permet une visualisation et une acquisition très faciles des différents signaux.

La carte Twist est tout aussi open-source que la carte Spin, et tous les fichiers KiCad ainsi que les datasheets des composants sont directement téléchargeables depuis le Git OwnTech. La carte est programmable depuis Visual Studio Code à l'aide d'une bibliothèque sous PlatformIO et de nombreux exemples de codes pour des applications classiques sont disponibles (Buck, Boost, Buck asservi en tension, Buck asservi en courant, Boost asservi en tension, Buck entrelacé, Buck Boost indépendants, Onduleur monophasé...).

3.1.1 Communication

La communication est possible avec la carte Spin via une liaison série, un moniteur série est d'ailleurs directement intégré dans l'environnement Visual Studio Code.

La carte Twist possède 2 ports RJ45 accessibles en façade qui permettent un accès facile à :

- un bus CAN,
- la synchronisation HRTIM,
- un bus RS485 de 20Mbps.

Cela permet d'utiliser la carte Twist pour des TP sur les bus de cartes. C'est une thématique présente dans différentes filières comme par exemple en BTS Cybersécurité, Informatique et réseaux, Électronique en option B "Électronique et réseaux" dans les compétences C04, C05 et C06.

3.1.2 Acquisition

Pour l'acquisition de signaux et de données, la carte Twist est équipée de :

- 3 mesures d'intensité (Low1, Low2 et High),
- 3 mesures de tension (Low1, Low2 et High),
- un circuit de conditionnement permettant d'ajouter facilement un capteur de température.

Ces capteurs sont aussi utilisables pour effectuer différents TP, d'autant que les mesures sont facilement visualisables avec le logiciel OwnPlot.

3.1.3 Fabrication de la carte

Pour mon dossier industriel, j'ai travaillé une semaine directement dans les locaux de OwnTech afin notamment de fabriquer trois cartes Twist. J'ai profité de cette occasion pour documenter le processus de fabrication en totalité, afin de pouvoir l'utiliser dans certaines séquences pédagogiques. On voit sur la Figure 23 que les PCB sont d'abord calés manuellement sur une table afin de bien les aligner par rapport au clinquant pour ensuite appliquer la pâte à braser (sérigraphie). Il a fallu ensuite placer tous les composants à la main aux bons endroits en suivant un guide sur une page internet permettant de recenser automatiquement les composants déjà placés. Cette étape très fastidieuse est en pratique réalisée par un robot pick and place mais cette machine n'était pas encore en fonctionnement à ce moment (elle l'est depuis). On observe Figure 24 que les cartes sont ensuite placées dans un four de refusion piloté pour suivre un certain profil de température afin de braser les composants aux PCB sans les endommager. Enfin, les cartes sont inspectées puis lavées dans un bain à ultra-sons rempli d'alcool isopropylique afin de dissoudre les résidus de flux des brasures. La dernière étape consiste à vérifier le bon fonctionnement de la carte et à calibrer les capteurs.

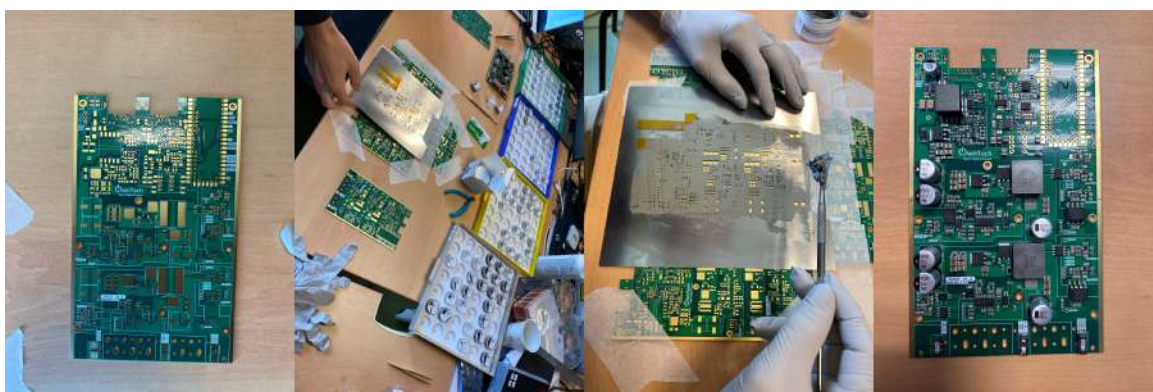


FIGURE 23 – Fabrication des cartes Twist 1/2

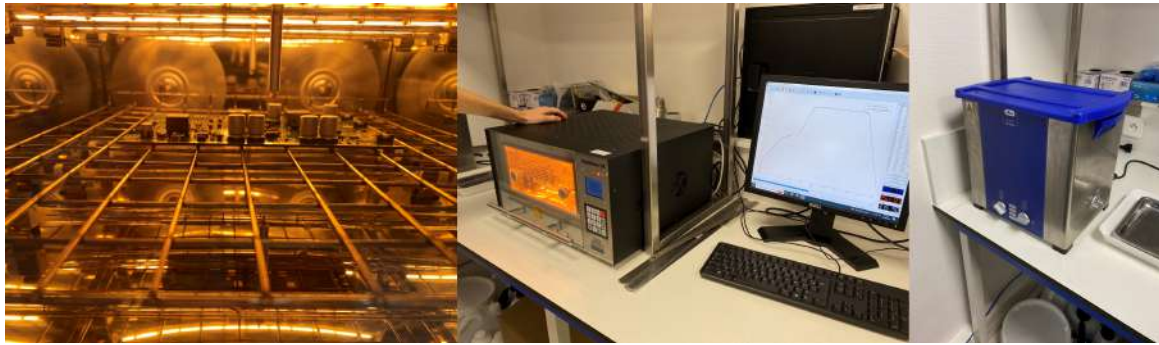


FIGURE 24 – Fabrication des cartes Twist 2/2

3.1.4 Maquette pédagogique

Pour garantir la sécurité des élèves, protéger le matériel et faciliter l'utilisation de la carte Twist en activité pratique, j'ai réalisé un boîtier pour la carte. Ce boîtier (visible Figure 25) a été réalisé par découpe laser dans du PMMA de 5 mm d'épaisseur afin de pouvoir en fabriquer plusieurs très rapidement. De plus, des fiches banane permettent une bonne connexion lors des manipulations, et des étiquettes sur les différents ports permettent de faciliter l'utilisation par les élèves. Cette maquette peut être reprogrammée facilement pour réaliser des TP par exemple en Buck, en Boost, en onduleur monphasé ou encore en redresseur actif.

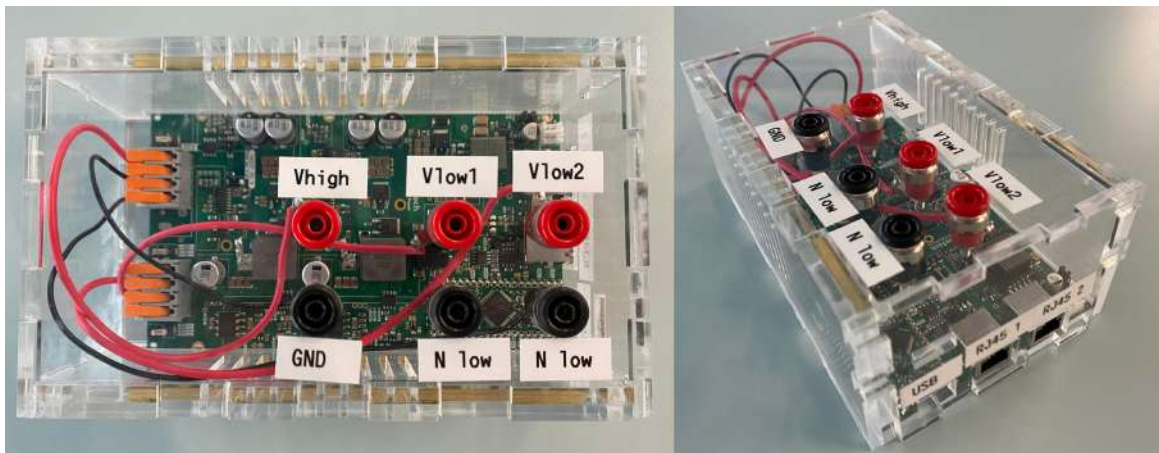


FIGURE 25 – Maquette sécurisée de la carte Twist pour faciliter l'utilisation en TP

3.2 Exploitation pédagogique en BUT GEII

3.2.1 Présentation de la filière

Le Bachelor Universitaire de Technologie en Génie Électrique et Informatique Industrielle (BUT GEII) est une formation de trois ans axée sur l'innovation et le développement technologique, préparant les étudiants à des carrières diversifiées. Elle permet l'acquisition de connaissances et le développement des compétences essentielles pour les domaines de la ville et de l'industrie du futur, les réseaux intelligents, les transports, l'aéronautique, les énergies renouvelables, la santé, l'audiovisuel, le spatial, etc. Les élèves qui choisissent cette formation sont principalement originaires de la filière STI2D (un peu plus de la moitié) et de filière générale (un peu moins de la moitié).

Cette formation polyvalente prépare les étudiants à diverses tâches professionnelles telles que la mise en place et la gestion d'installations électriques, la conception et la programmation de cartes électroniques, l'automatisation et le contrôle des processus industriels, ainsi que la gestion et la maintenance des réseaux informatiques industriels. Les étudiants choisissent une spécialisation progressivement à partir de la deuxième année, et bénéficient d'expériences pratiques grâce à des stages en entreprise d'au moins 22 semaines ou en alternance, ainsi que d'une ouverture internationale pour développer leurs compétences linguistiques.

L'objectif du BUT GEII est de former des cadres intermédiaires avec des compétences professionnelles solides, une large culture technologique et des compétences transversales telles que la gestion de projet et d'équipe, favorisant ainsi leur insertion professionnelle tout en offrant la possibilité de poursuivre des études supplémentaires.

Les 3 parcours spécialisés du BUT GEII sont :

- **Électronique et Systèmes Embarqués (ÉSE)** : Ce parcours forme les étudiants à analyser, concevoir et réaliser des systèmes électroniques. Les diplômés seront appelés à travailler dans des domaines tels que la domotique, la robotique, les transports, l'aéronautique, la santé, l'agriculture connectée, les objets connectés et l'intelligence artificielle.
- **Électricité et Maîtrise de l'Énergie (ÉMÉ)** : Axé sur la gestion de l'énergie, ce parcours prépare les étudiants à encadrer des équipes de techniciens et à travailler dans les secteurs de la production et de la distribution de l'énergie électrique, les transports, les énergies renouvelables, et l'efficacité énergétique. Les diplômés participent ainsi à la transition énergétique.
- **Automatisme & Informatique Industrielle (AII)** : Mettant l'accent sur l'automatisme et la robotique, ce parcours forme les étudiants à installer et à programmer des systèmes automatisés pour la conduite et le contrôle des procédés industriels. Les diplômés apprennent à utiliser les outils du numérique pour organiser les moyens de production, avec des compétences en supervision, interface homme-machine, et utilisation des technologies émergentes comme l'internet des objets et l'intelligence artificielle.

3.2.2 Présentation de la séquence

La séquence développée portera sur une première partie de la ressource R2.09 (Énergie) qui a lieu au deuxième semestre de première année de BUT GEII. Cette ressource permet de mobiliser des notions abordées dans la ressource R2.08 (Électronique) et permettra la préparation de la SAÉ 2.01 (Conception et vérification d'un prototype à partir d'un cahier des charges complet). Cette ressource est aussi très utile pour aider les étudiants dans leurs réalisations pour le portfolio.

Pour l'effectif, je considère que j'ai une promotion de 72 élèves qui peuvent avoir des cours magistraux tous ensemble mais qui autrement sont divisés en 3 groupes de 24 élèves, dédoublés pour les séances de travaux pratiques. Comme visible Figure 26, cette ressource fait appel à des apprentissages critiques dans les compétences :

- Concevoir la partie GEII d'un système
- Vérifier la partie GEII d'un système

Pour la compétence **Concevoir**, les apprentissages critiques sont :

- **AC 11.01** : Produire une analyse fonctionnelle d'un système simple
- **AC 11.02** : Réaliser un prototype pour des solutions techniques matériel et/ou logiciel

Ces apprentissages dans la compétence "Concevoir" sont de niveau 1 donc il s'agit de "Mener une conception partielle intégrant une démarche projet".

Et pour la compétence **Vérifier**, les apprentissages critiques sont :

- **AC 12.02** : Identifier un dysfonctionnement
- **AC 12.03** : Décrire un dysfonctionnement

	AC	SAÉ 2.01 Conception et vérification d'un prototype à partir d'un cahier des charges	PORTFOLIO Portfolio	R2.09 Énergie
Concevoir	AC11.01	X	X	X
	AC11.02	X	X	X
	AC11.03	X	X	
Vérifier	AC12.01	X	X	
	AC12.02	X	X	X
	AC12.03	X	X	X
Volume total				54
Dont TP				30
Adaptation Locale (SAÉ)		70		
Adaptation Locale (Ressources ou SAÉ)				
TP Adaptation locale				

FIGURE 26 – Tableau des compétences ciblées, du volume horaire ainsi que des apprentissages critiques de la ressource, de la SAÉ et du Portfolio

Ces apprentissages dans la compétence "Concevoir" sont de niveau 1 donc il s'agit de : "Effectuer les tests et mesures nécessaires à une vérification d'un système".

La séquence que j'ai prévue est la première partie de cette ressource qui se concentre sur la conversion statique (cf Figure 27). La ressource a un volume horaire total de 54 heures dont 30 heures de TP (cf Figure 26) et la séquence 1 que je propose se concentre sur les 14 premières heures.

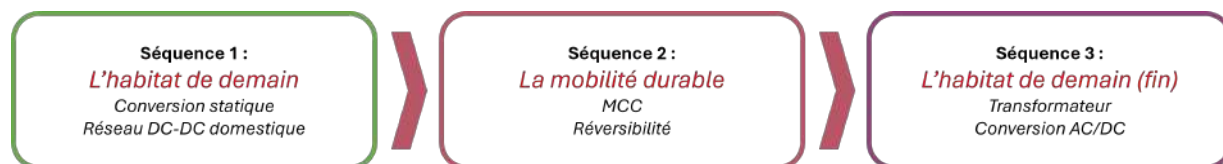


FIGURE 27 – Organisation de la ressource R2.09

La ressource est divisée en 3 séquences :

- **Séquence 1 - L'habitat de demain** : conception d'un système GEII de conversion statique pour un réseau domestique DC faisant intervenir les hacheurs série, parallèle et des notions de flux de puissance et de rendement.
- **Séquence 2 - La mobilité durable** : contrôle et variation de vitesse d'une MCC avec un hacheur 4 quadrants permettant un freinage régénératif.
- **Séquence 3 - L'habitat de demain** : reprise du projet vu en S1 pour faire la dernière partie qui traite de la conversion AC/DC et des transformateurs monophasés.

La première séquence est sous la forme d'un projet inductif faisant intervenir différents convertisseurs DC-DC utiles à la conception de l'habitat de demain (Figure 28). Aborder la conversion statique et les hacheurs série et parallèle en séquence 1 permet ensuite d'introduire la séquence 2 qui s'articule autour des mobilités de demain. Cette deuxième séquence traite principalement de conversion électromécanique. Pour garantir une bonne cohérence globale et parvenir à avoir des séances inductives, il était nécessaire d'avoir déjà abordé la conversion DC/DC. Un autre avantage de cette répartition est qu'une des problématiques de la séquence 2 sera le freinage régénératif de la mobilité durable, ce qui permettra d'introduire le hacheur 4 quadrants sans trop de difficulté après la séquence 1. Enfin, la séquence 3 est en réalité la dernière partie du projet de la séquence 1 : il faut maintenant concevoir la possibilité de relier l'habitat de demain au réseau électrique en cas de forte consommation, ou de faible production du panneau solaire. Il s'agira donc de mettre en place un redresseur, mais comme la carte Twist a une tension maximale de 100 V il faudra nécessairement ajouter un premier transformateur en amont. Ainsi, la séquence 3 traitera du transformateur et du redresseur.

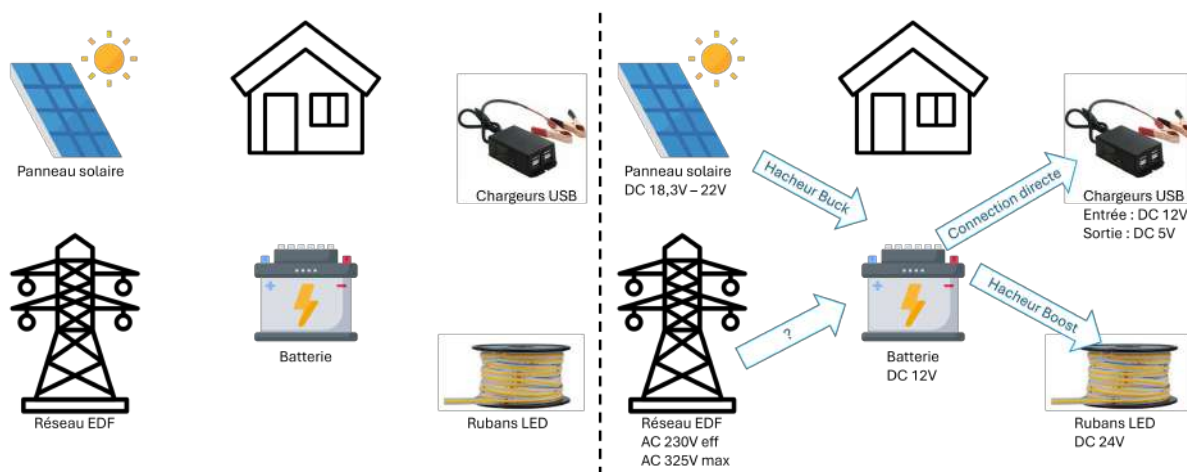


FIGURE 28 – Schéma fourni aux élèves (à gauche) pour réaliser leur première conception du projet (séquence 1) et version complétée (à droite)

3.2.3 Prérequis

Cette séquence permettra de mettre en oeuvre une pédagogie spiralaire en revoyant de nombreuses notions déjà abordées dans la ressource R1.09

Les étudiants auront appris une première fois à se servir des appareils de mesures au premier semestre dans la ressource R1.09 : Electronique (alimentation continue, GBF, multimètre, oscilloscope, mesures de puissances...) ainsi que les grandes fonctions en énergie électrique : production, stockage, transformations électromécaniques, conversions DC/DC, AC/DC, DC/AC, AC/AC, protection, commande... Ils auront par ailleurs suivi une formation à l'habilitation niveau B1V au premier semestre et auront déjà abordé les notions fondamentales pour manipuler en sécurité.

3.2.4 Organisation de la séquence

L'organisation générale de la séquence est présentée Figure 29 et les modalités d'évaluation de cette séquence seront détaillées dans la partie 3.2.5.

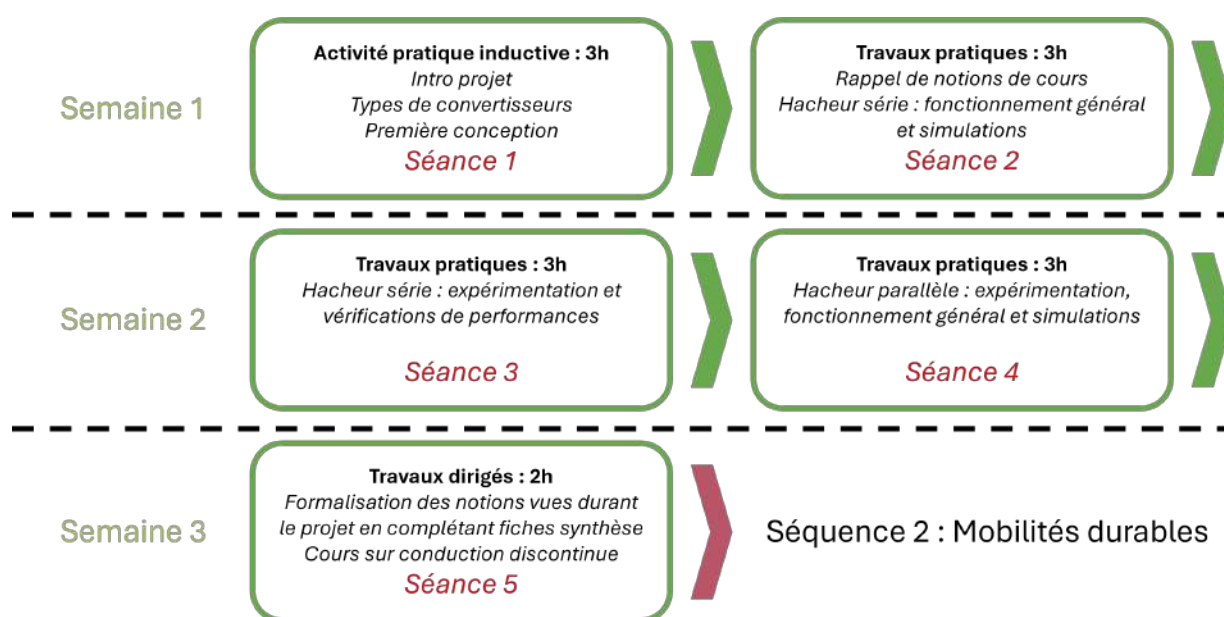


FIGURE 29 – Organisation détaillée de la première séquence de la ressource R2.09

Séance 1 : Séance inductive, introduction du projet de conversion statique (3h).

Objectif de la séance 1 : L'objectif de cette séance est dans un premier temps de contextualiser le projet qui sera le fil rouge de toute cette séquence. Ensuite les étudiants effectueront une identification des différents constituants du projet afin de dégager par eux-mêmes la nécessité de convertisseurs de puissance. Ils doivent ensuite compléter une carte mentale en effectuant des recherches sur les différents types de convertisseurs pour finalement parvenir à une première conception globale du projet. Les différentes séances qui suivront seront concentrées sur les différentes parties de leur conception globale, ce qui permet de garantir une contextualisation globale de chacune des séances. L'objectif général est de concevoir et mettre en œuvre chacune des parties du système global.

Contenu développé :

Analyse fonctionnelle - types de convertisseurs

Matériel et ressources à disposition :

- une batterie
- un panneau solaire
- un luminaire type ruban LED
- les fiches techniques des différents constituants

- une carte TWIST reprogrammable
- des voltmètres (mesures de tensions AC et DC)

I. Contexte du projet :

La première partie consiste à faire comprendre aux élèves le contexte général du projet, les différents éléments, les enjeux et les exigences (cf Figure 30).

Problématique générale :

On désire électrifier une maison en mettant en place un réseau de tension continue pour alimenter des lampes LED, le tout relié à une batterie qui peut être alimentée par un panneau solaire ou directement depuis le réseau de distribution (Enedis).

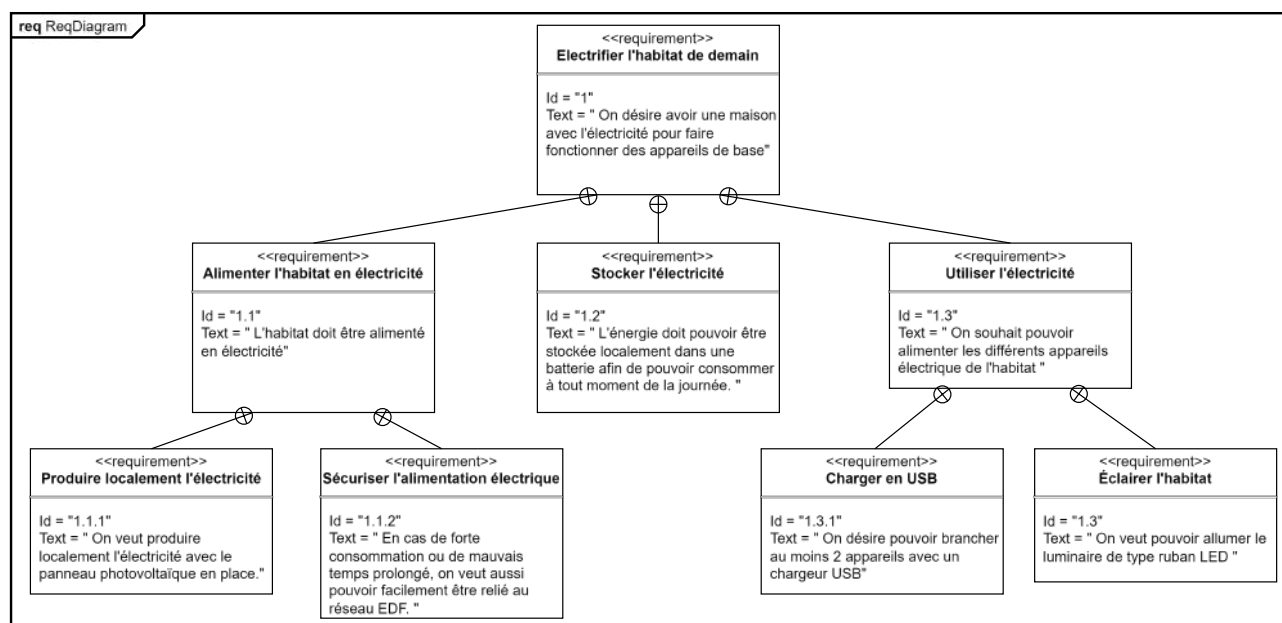


FIGURE 30 – Diagramme SysML des exigences de l'habitat de demain

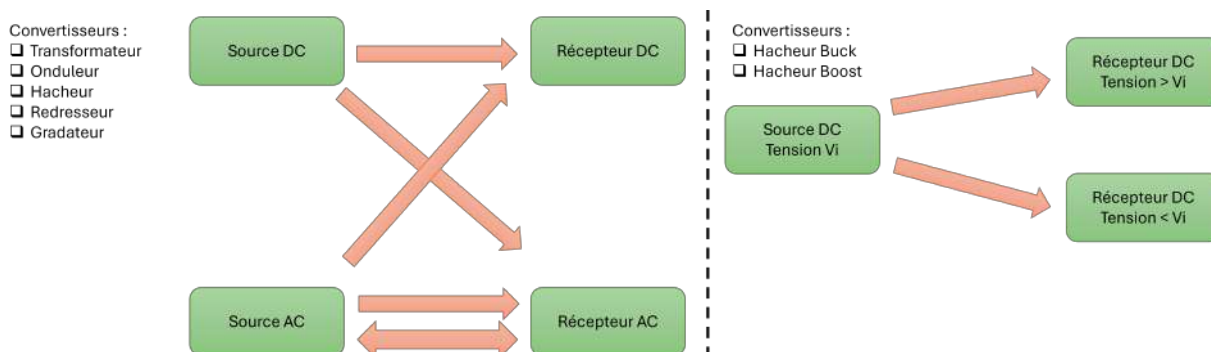


FIGURE 31 – Cartes mentales à compléter par les élèves

II. Identification expérimentale des constituants :

Ensuite, les élèves pourront se déplacer dans la salle où les différents constituants en état de fonctionnement seront présents dans le but de mesurer les types et niveaux de tension. Ils commenceront à compléter le schéma Figure 28 et à réfléchir à la conception du système général. Cette partie est importante parce qu'elle permet aux élèves de remobiliser des notions vues au premier semestre sur la mesure et les types de tension (DC, AC, max, efficace) mais surtout, car elle permet de susciter rapidement l'intérêt des élèves avec du concret dès la première

séance tout en leur permettant de bien comprendre le contexte et les enjeux du projet. Le but est que les élèves prennent conscience que c'est un projet réalisable et que chacune des séances permettra de traiter d'une partie du projet.

III. Convertisseurs de puissance :

Une fois les différents constituants identifiés, les étudiants se rendent compte par eux-mêmes du besoin de convertisseurs statiques pour relier les différents blocs entre eux. Une carte mentale à compléter (Figure 31) leur est fournie avec une liste des noms des convertisseurs. Une vidéo accompagnée d'une ressource présentant les différents convertisseurs et leurs principales fonctions est aussi fournie pour compléter la carte mentale. Le fait de chercher les réponses et compléter la carte par soi-même facilite l'apprentissage de ces notions.

IV. Conception générale :

Maintenant que les élèves ont compris le contexte du projet, ont identifié les constituants et sont parvenus à identifier les différents types de convertisseurs statiques, ils possèdent tous les éléments pour effectuer une première conception générale du système. Le but ici est de parvenir à compléter le premier schéma à l'aide de la carte mentale pour obtenir une première conception (visible Figure 28). Les deux hacheur Buck et Boost seront le sujet principal de la séquence 1. Ensuite les élèves verront en séquence 2 la mobilité douce avec notamment la MCC et le hacheur 4 quadrants pour finalement revenir en 3ème séquence sur la liaison entre la batterie et le réseau de distribution (Enedis). En effet, l'idée est de bien ancrer la conversion DC/DC lors des deux premières séquences pour finalement effectuer de la conversion AC/DC avec un redresseur. Ils doivent se rendre compte qu'il n'est pas possible d'utiliser la carte Twist en tant que redresseur puisque la tension serait trop élevée, et donc qu'il faut ajouter un transformateur en amont de la carte Twist. Je n'attends pas des élèves qu'ils comprennent cela dès la première séance, c'est pour cela que j'ai mis un point d'interrogation sur la zone en question sur le schéma car les élèves peuvent ne pas se rendre compte du problème pour le moment, ou bien s'en rendre compte et proposer différentes solutions. Dans tous les cas, cette partie de la conception sera revue en séquence 3 après une première séance sur les redresseurs, justement pour dégager l'intérêt du transformateur (AC/ AC). Enfin, la séance 1 devrait se terminer par une mise en commun des cartes mentales et de la conception, ce qui devrait notamment mettre en évidence la possibilité de connecter directement la chargeur USB à la batterie. Cette expérimentation sera donc réalisée devant les élèves qui pourront attester du bon fonctionnement en chargeant par exemple leur téléphone. Je pense que parvenir à finir la première séance en ayant réussi à faire fonctionner un des sous-systèmes est une bonne chose pour maintenir l'intérêt des élèves pour ce projet.

Séance 2 : Travaux pratiques, fonctionnement simulé du hacheur série (3h).

Objectif de la séance 2 : Comprendre le fonctionnement du hacheur buck et son paramétrage pour pouvoir recharger une batterie DC 12V à l'aide d'un panneau photovoltaïque DC 18.3V .

Contenu développé :

Rapport cyclique - Hacheur série en conduction continue - filtre

Simulations python :

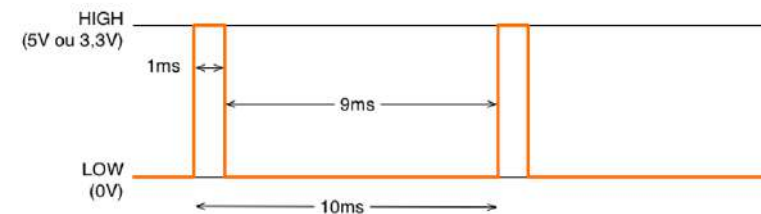
J'ai codé plusieurs versions plus ou moins simplifiées de simulateurs sur python qui sont utilisées dans plusieurs séances. Pour chaque simulateur les élèves disposent directement d'une application .exe pour en simplifier l'utilisation. Cependant, pour chaque application les élèves disposent aussi du code python du simulateur et d'un fichier texte qui détaille entièrement toutes les étapes pour installer et configurer miniconda et spyder pour que les plus curieux qui le désirent puissent utiliser le code python correspondant dans d'autres projets ou pour leur portfolio.

I. Évaluation diagnostique et formative : rapport cyclique

Le but de cette première partie est d'évaluer et de remobiliser les notions de base sur les signaux analogiques vues au premier semestre dans la ressource R1.09 : Electronique. Normalement ces notions ont déjà été vues mais il est important, en mettant en œuvre de la pédagogie spiralaire, de les revoir car il est indispensable de parfaitement maîtriser la notion de rapport cyclique et de valeur moyenne pour cette séquence. Comme on peut le voir sur la Figure 32, l'objectif est de remettre à niveau cette connaissance à l'aide d'un rappel de cours et d'un petit exercice d'application sur la valeur moyenne qui serait traité au tableau rapidement.

Définition : le rapport cyclique d'un signal périodique à deux états est le rapport entre la durée de l'état actif et la période du signal.

Exemple :



Ici le rapport cyclique : $\alpha = \frac{1}{10} = 0.1 = 10\%$

Exercice application :

Pour un signal périodique à deux états V_{high} et V_{low} , la valeur moyenne du signal peut s'exprimer en fonction du rapport cyclique : $\langle V \rangle = V_{low} \cdot \alpha + V_{high} \cdot (1 - \alpha)$

FIGURE 32 – Rappel de cours sur le rapport cyclique et la valeur moyenne et exercice d'application

II. Hacheur série : fonctionnement général et simulations

Schémas électriques :

Le schéma électrique du hacheur est fourni pour bien définir les notations et les conventions qui seront conservées durant toute la séquence afin de ne pas perturber les élèves (Figure 33). Les deux schémas équivalents en fonction de la conduction de l'interrupteur (Figure 34) sont également fournis par soucis de clarté et de gain de temps. Cependant les élèves devront justifier par la suite la conduction de la diode.

Aussi, dans cette séance le hacheur sera considéré comme fonctionnant en conduction continue afin de simplifier dans un premier temps son étude. Cette hypothèse est mentionnée dans le sujet mais n'est pas détaillée puisqu'elle sera traitée dans une autre séance.

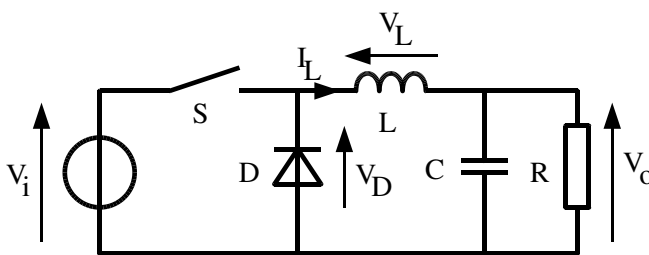


FIGURE 33 – Schéma électrique du convertisseur Buck

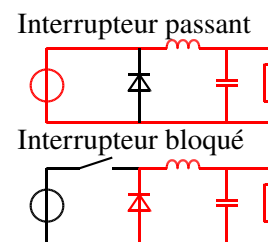


FIGURE 34 – Schémas électriques du Buck dans les deux phases de conduction ¹

Tensions préfiltre :

Les objectifs de cette partie sont :

- observer la tension V_d pour justifier la conduction de la diode
- maîtriser parfaitement la notion de rapport cyclique
- comprendre l'influence du rapport cyclique sur la tension V_d

1. Images extraites de https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck

Pour cela un simulateur simplifié (Figure 35) permettant de visualiser le signal de commande de l'interrupteur, la tension V_d et la tension en sortie du hacheur est fourni. L'élève peut alors modifier le rapport cyclique et la tension V_i .

Les tâches réalisées sont :

- observer la tension V_d et en déduire sa valeur en fonction de l'interrupteur
- justifier la conduction de la diode et les deux schémas électriques (possibilité de faire un point sur la caractéristique d'une diode si la notion est mal remobilisée)
- tracer des chronogrammes pour divers rapports cycliques
- calcul de rapports cycliques (détailler le calcul, possibilité de vérifier avec le simulateur)

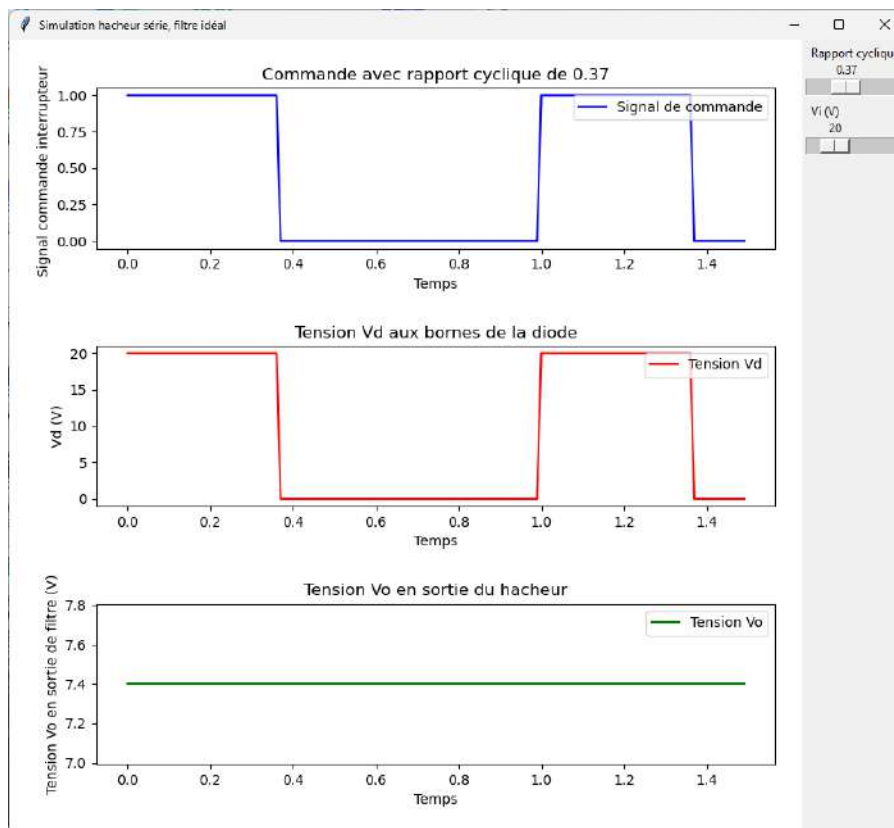


FIGURE 35 – Simulateur simplifié pour visualiser les principales tensions

Ajout du filtre :

Dans cette partie, les étudiants disposent d'un simulateur plus complet (Figure 36) mais on suppose toujours le condensateur comme un condensateur idéal infini. Dans ce simulateur les élèves peuvent modifier les différents paramètres en utilisant des curseurs mais ces paramètres sont choisis de manière à rester en conduction continue. La conduction continue n'est pas encore abordée dans cette séance, elle sera abordée à la séance 5. En effet, la carte Twist découpe à une fréquence de 200 kHz et possède une inductance suffisamment élevée pour ne pas avoir besoin d'évoquer la conduction discontinue pour le moment dans ce projet. On rappelle cependant que la carte Twist peut être réversible. Mais lorsqu'on la programme en hacheur série ou parallèle, il est possible de garder le deuxième Mosfet ouvert pour avoir un comportement plus fidèle à la topologie désirée. Techniquement, cela permettrait d'avoir un régime de conduction discontinue.

Les objectifs de cette partie sont :

- dégager l'intérêt du filtre
- mesurer la loi entrée sortie en tension
- comprendre l'impact de l'inductance sur l'ondulation de courant

Les tâches réalisées par les élèves dans cette partie sont :

- expliquer l'utilité du filtre et le nommer
- à l'aide d'un tableur, obtenir la caractéristique en tension du hacheur en fonction du rapport cyclique (en conduction continue), conclure sur l'utilisation d'un tel hacheur pour le projet
- pour ceux qui sont plus rapides : à l'aide d'un tableur, évaluer l'impact de l'inductance et de la fréquence sur l'ondulation de courant

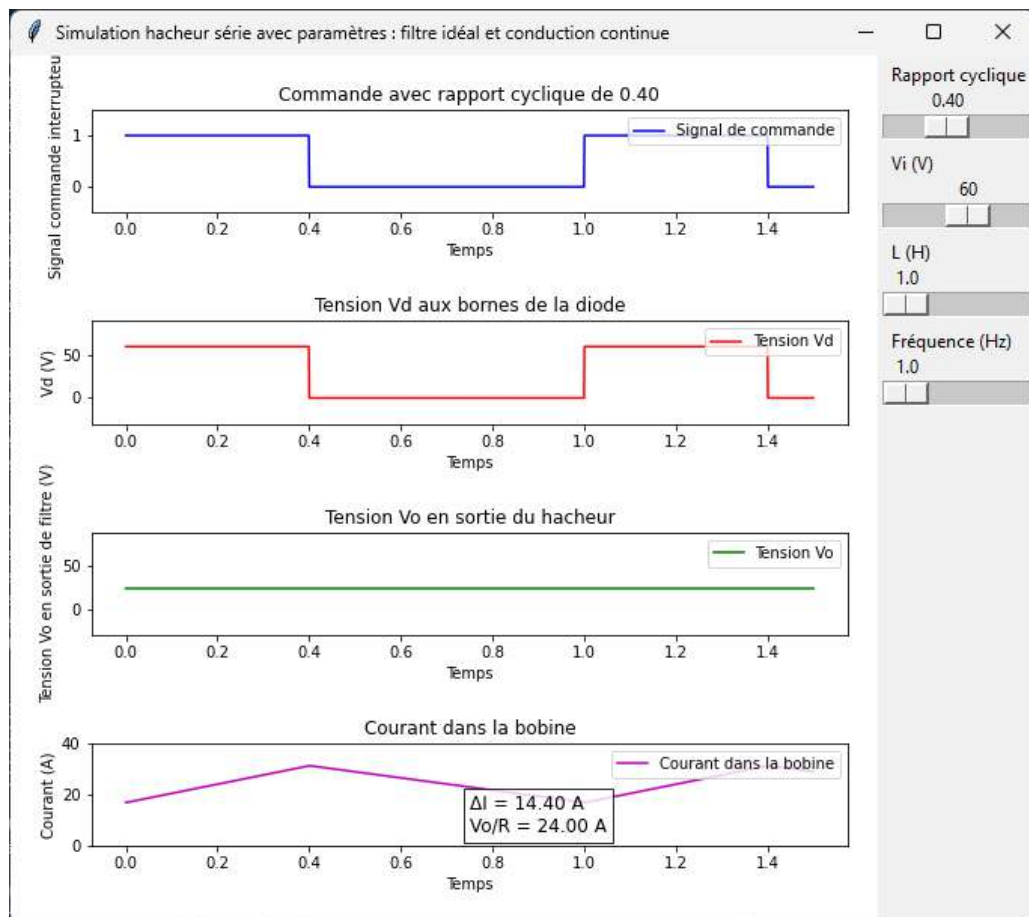


FIGURE 36 – Simulateur plus complet du hacheur Buck en conduction continue

A la fin de cette séance les élèves auront traité le fonctionnement du hacheur série en conduction continue. Ils auront aussi obtenu à l'aide de la simulation une caractéristique du hacheur, ce qui leur aura permis de justifier de sa fonction et de son intérêt dans le projet pour recharger la batterie avec un panneau photovoltaïque qui sera l'objet de la séance suivante.

Séance 3 : Travaux pratiques, mise en place d'un hacheur buck pour la recharge solaire (3h).

Objectif de la séance 3 : Mettre en place et vérifier les performances du système de conversion pour recharger une batterie DC 12V à l'aide d'un panneau photovoltaïque DC 18.3V .

Contenu développé :

Hacheur série en conduction continue - Puissance - Performances énergétiques / rendement

Matériel et ressources à disposition :

- une carte Twist de conversion de puissance (programmée en Buck et limitant l'intensité maximale)
- une batterie 12 V

- un rhéostat (permet de régler et d'avoir une consommation de puissance constante)
- un panneau solaire
- les appareils de mesures électrique classiques (Voltmètre, Ampèremètre, sonde de tension différentielle, pince de courant, oscilloscope, wattmètre, . . .)

I. Conception

Dans un premier temps on veut recontextualiser cette séance et la précédente dans le projet. On demande donc d'abord aux élèves de réaliser une conception théorique globale du chargeur solaire pour avoir une vision globale du système.

Les tâches réalisées par les élèves dans cette partie sont :

- Proposer un schéma électrique pour recharger le supercondensateur et rappeler sur le schéma les différents types et niveaux de tension.
- Exprimer le rapport cyclique théorique pour régler la carte twist.

II. Vérification

Maintenant que les élèves ont intégré l'enjeu de la séance, ils vont devoir mettre en place la chaîne de conversion. Cependant, pour garantir une bonne compréhension de la fonction du hacheur série, les élèves vont dans un premier temps le caractériser expérimentalement.

Pour contextualiser cela, le sujet explique qu'avant de mettre en application le protocole de la partie I, on aimerait vérifier expérimentalement que la carte Twist est bien programmée et qu'il n'y a pas de dysfonctionnement. Pour cela on va d'abord la brancher à une alimentation DC similaire au panneau solaire mais avec une tension constante tout au long de la vérification.

Les élèves doivent alors :

- Proposer un protocole permettant de vérifier que la carte se comporte bien comme un hacheur Buck. Préciser notamment les appareils de mesure utilisés, leur câblage et le type de résultat attendu.
- Après vérification de l'enseignant, réaliser la caractérisation du hacheur et conclure sur le fonctionnement de la carte Twist.

Il est important que les élèves réalisent eux-mêmes les protocoles et les schémas de câblage. Cette autonomie dans la procédure de travail sera essentielle dans les situations professionnelles et cela les incite à réfléchir et comprendre ce qu'ils font. C'est aussi un moyen pour l'enseignant de diagnostiquer certaines lacunes que les élèves peuvent avoir.

Une fois la caractérisation expérimentale de la carte Twist réalisée, les élèves vont pouvoir mettre en œuvre et évaluer les performances de la solution qu'ils avaient envisagée dans les phases de conception.

III. Validation conception et évaluation performances

Réalisation partie GEII du système :

Maintenant qu'on a vérifié que la carte Twist fonctionne bien, on peut passer à la mise en place et au test du chargeur solaire. On va notamment s'intéresser aux performances énergétiques de cette solution. Pour s'assurer d'avoir une puissance consommée par la batterie constante et indépendante du niveau de charge de la batterie, il est possible de remplacer la batterie par une simple résistance.

Dans cette partie il est demandé aux élèves de mettre en place la chaîne de conversion et de régler le rapport cyclique de la carte Twist afin d'obtenir une tension adéquate au niveau de la batterie.

Évaluation performances énergétiques :

A ce stade, une ressource dans le sujet permet de revoir le calcul d'une puissance active dans le cas de tensions et intensités continues, ainsi que la notion de rendement. Cette ressource permet ainsi de traiter les principales difficultés attendues. Cela permet aussi de remobiliser des notions vues au premier semestre et de s'assurer que

les élèves ne vont pas être bloqués à causes de potentielles lacunes.

Dans cette partie les élèves doivent :

- Proposer un protocole et un schéma électrique faisant apparaître les différents appareils de mesure permettant d'évaluer le rendement de la carte Twist.
- Après vérification de l'enseignant, mettre en place le protocole et conclure sur le rendement de la carte Twist. Proposer une explication de la valeur trouvée.
- A partir de l'étiquette, déduire la puissance nominale du panneau solaire et son rendement. Proposer une explication sur le rendement trouvé. Proposer une expérience qui pourrait conforter cette explication.

Les élèves les plus rapides peuvent commencer à évaluer l'impact de l'exposition du panneau solaire sur sa puissance fournie, notamment en recouvrant partiellement le panneau solaire ou en rajoutant devant des projecteurs. Ce point est ensuite abordé avec l'effectif complet sur la fin du cours pour mutualiser cette notion.

Séance 4 : Travaux pratiques, mise en place et caractérisation d'un hacheur boost pour alimenter un éclairage LED (3h).

Objectif de la séance 4 : Mettre en place et vérifier les performances du système de conversion pour alimenter un éclairage LED (DC 24V) à l'aide d'une batterie (DC 12V).

Contenu développé :

Hacheur parallèle en conduction continue - Valeur moyenne d'un signal et de sa dérivée

Matériel et ressources à disposition :

- une carte Twist de conversion de puissance (programmée en Boost et limitant l'intensité maximale)
- une alimentation 12V (équivalent batterie avec tension constante)
- un rhéostat (optionnel)
- un luminaire LED DC 24V
- les appareils de mesures électrique classiques (Voltmètre, Ampèremètre, sonde de tension différentielle, pince de courant, oscilloscope, wattmètre, . . .)

I. Expérimentation

Pendant les séances 2 et 3 le hacheur série a été étudié d'abord par la simulation et l'analyse de son fonctionnement, et ensuite expérimentalement, ce qui était une approche principalement déductive. Ici pour le hacheur parallèle on décide de changer de méthode pour une approche essentiellement inductive et on commence par une étude expérimentale avant d'analyser le fonctionnement à l'aide d'une simulation.

Caractérisation expérimentale du hacheur :

La carte Twist est actuellement programmée en hacheur parallèle. On sait que ce hacheur parallèle permet de transmettre de la puissance d'une entrée vers une sortie avec une tension plus élevée, le tout étant paramétré par le rapport cyclique.

Les élèves doivent :

- Proposer un protocole pour caractériser le fonctionnement de ce hacheur. La caractéristique attendue devra prendre la forme d'un graphique sur Excel
- Après vérification de l'enseignant, mettre en place le protocole. On veillera à garder un rapport cyclique $\alpha \in [0 ; 0.8]$ (la sécurité de la carte empêchera des valeurs plus élevées).
- Conclure sur le fonctionnement général du hacheur parallèle.

Réalisation partie GEII du système :

Maintenant que l'on a caractérisé le hacheur, il est possible de concevoir et de réaliser la chaîne de conversion pour alimenter correctement l'éclairage à l'aide de la batterie. Tâches réalisées par les élèves :

- Sur la caractéristique obtenue, tracer le point de fonctionnement qui permet d'alimenter le luminaire.
- En utilisant cette fois-ci le luminaire et la batterie, proposer un protocole pour alimenter correctement le luminaire.
- Après vérification avec l'enseignant, mettre en place le protocole et conclure sur le résultat observé.

Maintenant que les élèves ont caractérisé expérimentalement le hacheur parallèle afin de mettre en place la chaîne de conversion, ils s'agit dorénavant de comprendre et d'expliquer son fonctionnement.

II. Hacheur parallèle : fonctionnement général et simulations

Schémas électriques :

Le schéma électrique du hacheur est fourni pour bien définir les notations et les conventions qui seront conservées durant toute la séquence afin de ne pas perturber les élèves (Figure 37). Les deux schémas équivalents en fonction de la conduction de l'interrupteur (Figure 38) sont également fournis par soucis de clarté et de gain de temps, cependant les élèves devront justifier par la suite la conduction de la diode.

Aussi, dans cette séance le hacheur sera considéré comme fonctionnant en conduction continue afin de simplifier dans un premier temps son étude mais cette notion est ici explicitée clairement. Le sujet mentionne que la conduction continue correspond au fait que le courant ne s'annule pas dans la bobine mais cette hypothèse sera justifiée à la séance suivante.

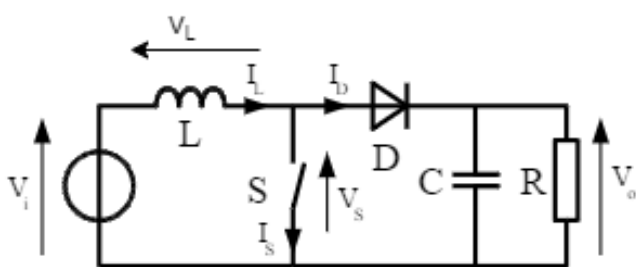


FIGURE 37 – Schéma électrique du convertisseur Boost

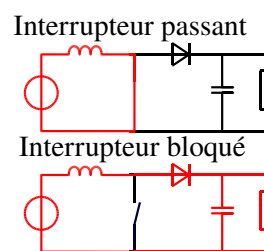


FIGURE 38 – Schémas électriques du Boost dans les deux phases de conduction ²

Tension aux bornes de la bobine en conduction continue :

Dans cette partie les élèves doivent aborder analytiquement le fonctionnement du hacheur parallèle pour retrouver la loi entrée sortie en tension qui sera comparée à la caractéristique obtenue expérimentalement. Les élèves ont à leur disposition un simulateur simplifié pour obtenir les chronogrammes en tension du hacheur parallèle en conduction continue (cf Figure 39). Une des notions qui pourrait bloquer les élèves dans l'analyse du fonctionnement du hacheur est le fait que la valeur moyenne de la tension aux bornes de la bobine est nulle. Dans un premier temps les étudiants vont donc devoir le constater avec le simulateur mais ce point sera démontré mathématiquement dans la dernière partie.

Les tâches réalisées par les élèves dans cette partie sont :

- A partir du premier schéma électrique, exprimer analytiquement la tension aux bornes de la bobine V_L dans les deux cas.
- En déduire l'expression de la valeur moyenne de V_L que l'on notera $\langle V_L \rangle$.
- A l'aide du simulateur, calculer $\langle V_L \rangle$ pour plusieurs rapports cycliques différents.
- En admettant que le résultat précédent est toujours vrai, déduire des deux questions précédentes l'expression analytique de la tension V_0 en fonction de V_i et de α .
- Comparer au résultat obtenu expérimentalement dans les questions 1, 2 et 3. (Un tracé graphique est attendu).

2. Images extraites de https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Boost

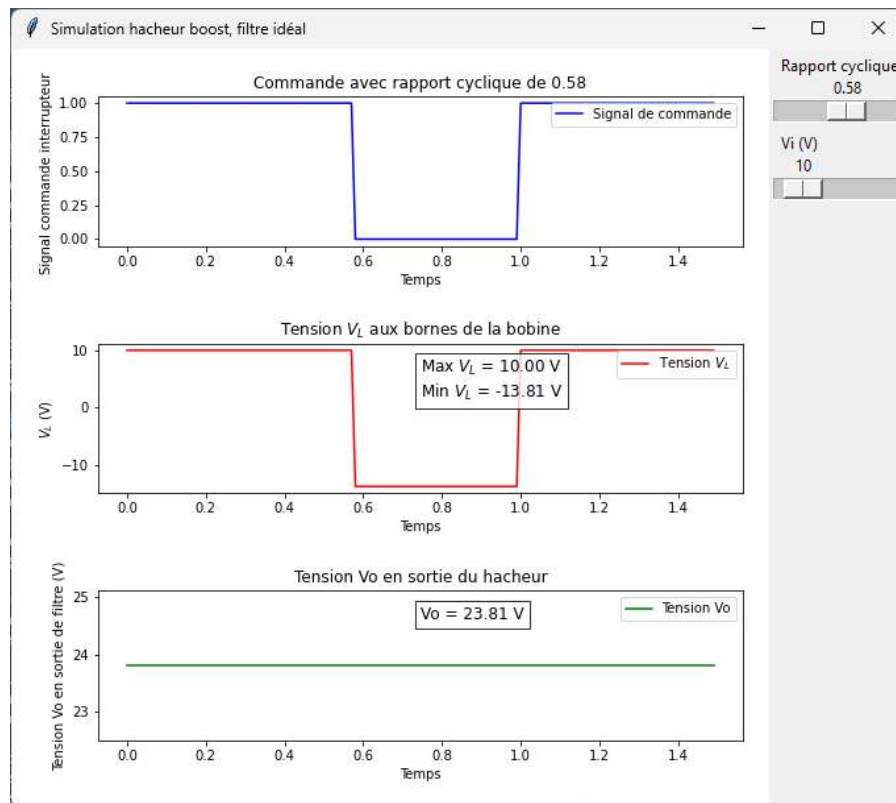


FIGURE 39 – Simulateur simplifié pour visualiser les tensions du hacheur boost en conduction continue

III. Signaux d'un hacheur : généralités sur la valeur moyenne

Dans la partie précédente, les étudiants ont obtenu la loi entrée-sortie en tension du hacheur en conduction continue. Pour obtenir cette expression, ils ont eu recours à la simulation pour trouver que $\langle V_L \rangle = 0$ afin de ne pas être bloqués par des notions mathématiques et aussi pour qu'ils se familiarisent avec le chronogramme en tension. Le but de cette dernière partie est de revenir sur ce point pour le démontrer correctement. Un complément de cours se trouve dans le sujet (cf Figure 40) et les étudiants doivent montrer pourquoi la valeur moyenne de la tension aux bornes d'une bobine est toujours nulle. Les étudiants les plus rapides devront aussi montrer pourquoi la valeur moyenne de l'intensité dans un condensateur est nulle. Ces deux points sont très importants, c'est pourquoi ils sont traités dans une partie séparée et seront revus dans la séance suivante s'ils n'ont pas été abordés par tous.

Complément :

On rappelle la définition mathématique de la valeur moyenne d'un signal $X(t)$ T -périodique :

$$\langle x(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot dt$$

Maintenant, calculons la valeur moyenne d'un signal $Y(t)$, qui est lui-même la dérivée temporelle d'un signal T -périodique $S(t)$:

$$\begin{aligned} \langle Y(t) \rangle &= \left\langle \frac{dS(t)}{dt} \right\rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{dS(t)}{dt} \cdot dt \\ \langle Y(t) \rangle &= \left[\frac{S(t)}{T} \right]_0^T = \frac{1}{T} [S(T) - S(0)] = 0 \quad \text{car } S \text{ est } T \text{ périodique} \end{aligned}$$

Finalement, si $S(t)$ est un signal périodique, alors : $\left\langle \frac{dS(t)}{dt} \right\rangle = 0$

FIGURE 40 – Complément de cours permettant de justifier que $\langle V_L \rangle = 0$

Séance 5 : Travaux dirigés, formalisation des notions et fiches de synthèses (2h).

Objectifs de la séance 5 :

Revoir les notions fondamentales en mathématique / analyse de signal.

Reprendre le fonctionnement du hacheur série avec ajout de conduction discontinue.

Reprendre le fonctionnement du hacheur parallèle avec ajout de conduction discontinue.

Déroulement de la séance :

Cette séance est une séance de TD où les élèves formalisent toutes les notions vues durant la séquence. Cela se présente sous la forme d'exercices dirigés qui permettent de réaliser des fiches de synthèse. Le but est que les élèves écrivent leur propre cours. Cela commence par une reprise des notions mathématiques (Figure 41). Ensuite il s'agit de revoir les hacheurs série et parallèle (Figure 42 et Figure 43) en mettant un accent sur la conduction ou non des diodes puisque c'est ce point qui permet de traiter du cas de la conduction discontinue (lorsque le courant dans la bobine s'annule et que la diode cesse de conduire). Les élèves font le cours sous forme de TD et vont aussi tracer les divers chronogrammes (qui ne figurent pas sur les fiches de synthèse).

Les élèves écrivent les raisonnements et les réponses au papier afin d'annoter au mieux leur cours et de commencer le processus d'apprentissage. Cependant, les fiches de synthèse sont distribuées et publiées en ligne à la fin du cours pour s'assurer que tout le monde a bien accès aux notions traitées.

I. Mathématiques

Signal périodique:

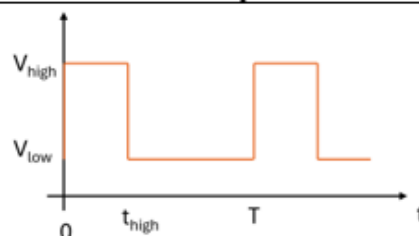
Un signal $S(t)$ est dit périodique de période T si pour chaque instant t :

$$S(t) = S(t + k \cdot T) \text{ avec } k \text{ un entier}$$

Rapport cyclique:

Le rapport cyclique α d'un signal $S(t)$ T-périodique ayant un état haut V_{high} est défini :

$$\alpha = \frac{t_{high}}{T}$$



Valeur moyenne:

La valeur moyenne d'un signal $x(t)$ T-périodique est définie :

$$\langle x(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot dt$$

On notera que si $S(t)$ est un signal T-périodique, alors : $\left\langle \frac{dS(t)}{dt} \right\rangle = 0$

Cas particulier d'un signal en escaliers :

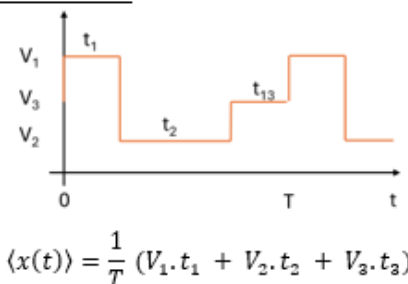
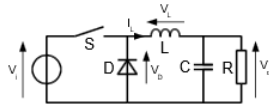


FIGURE 41 – Fiche de synthèse sur les notions mathématiques de la séquence

II. Hacheur série (Buck) :

Schéma électrique:



Le rapport cyclique général du hacheur α est défini avec le signal de commande de l'interrupteur. Ainsi, l'interrupteur S est fermé et conduit lorsque $0 < t < \alpha \cdot T$ et est ouvert et ne conduit pas lorsque $\alpha \cdot T < t < T$.
Le condensateur C permet de lisser la tension et on supposera V_0 constante.
Attention, l'intensité dans la diode ne peut pas être négative ! C'est pourquoi lorsque l'interrupteur est ouvert, si l'intensité dans la bobine diminue jusqu'à s'annuler alors la diode va cesser de conduire le courant, il y aura donc une troisième phase de conduction.

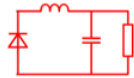
$0 \leq t < \alpha T$:



Loi des mailles : $V_L = V_1 - V_0$

Tension dans une bobine : $V_L = L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow V_1 - V_0 = L \frac{\Delta I}{\alpha T}$ et donc : $\Delta I = \alpha \frac{V_1 - V_0}{L \cdot T}$

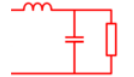
$\alpha T \leq t < (\alpha + \beta) T$:



Loi des mailles : $V_L = -V_0$

Tension dans une bobine : $V_L = L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow -V_0 = L \frac{-\Delta I}{\beta T}$ et donc : $\Delta I = \beta \frac{V_0}{L \cdot T}$

$(\alpha + \beta) T \leq t < T$:



Loi des mailles : $V_L = 0$

Bilan :

Valeur moyenne de la tension de la bobine : $\langle V_L \rangle = 0 \Leftrightarrow V_0 = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \cdot V_1$

En conduction continue : $\alpha + \beta = 1 \Rightarrow V_0 = \alpha \cdot V_1$

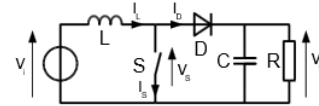
En conduction discontinue : $\alpha + \beta < 1$

Aussi on observe que pour minimiser l'ondulation de courant dans la bobine on peut augmenter l'inductance et la fréquence de découpage.

FIGURE 42 – Fiche de synthèse sur le hacheur série

III. Hacheur parallèle (Boost) :

Schéma électrique:

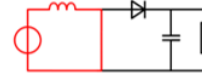


Le rapport cyclique général du hacheur α est défini avec le signal de commande de l'interrupteur. Ainsi, l'interrupteur S est fermé et conduit lorsque $0 < t < \alpha \cdot T$ et est ouvert et ne conduit pas lorsque $\alpha \cdot T < t < T$.

Le condensateur C permet de lisser la tension et on supposera V_0 constante.

Attention, l'intensité dans la diode ne peut pas être négative ! C'est pourquoi lorsque l'interrupteur est ouvert, si l'intensité dans la bobine diminue jusqu'à s'annuler alors la diode va cesser de conduire le courant, il y aura donc une troisième phase de conduction.

$0 \leq t < \alpha T$:



Loi des mailles : $V_L = V_1$

Tension dans une bobine : $V_L = L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow V_1 = L \frac{\Delta I}{\alpha T}$ et donc : $\Delta I = \alpha \frac{V_1}{L \cdot T}$

$\alpha T \leq t < (\alpha + \beta) T$:



Loi des mailles : $V_L = V_1 - V_0$

Tension dans une bobine : $V_L = L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow V_1 - V_0 = L \frac{-\Delta I}{\beta T}$ et donc : $\Delta I = \beta \frac{V_0 - V_1}{L \cdot T}$

$(\alpha + \beta) T \leq t < T$:



Loi des mailles : $V_L = 0$

Bilan :

Valeur moyenne de la tension de la bobine : $\langle V_L \rangle = 0 \Leftrightarrow V_0 = \frac{\alpha + \beta}{\beta} \cdot V_1$

En conduction continue : $\alpha + \beta = 1 \Rightarrow V_0 = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot V_1$

En conduction discontinue : $\alpha + \beta < 1$

Aussi on observe que pour minimiser l'ondulation de courant dans la bobine on peut augmenter l'inductance et la fréquence de découpage.

FIGURE 43 – Fiche de synthèse sur le hacheur parallèle

3.2.5 Modalités d'évaluation

Pour l'évaluation formative et diagnostique, un compte rendu au format papier ou numérique (.pdf) par binôme est attendu à la fin des séances 2, 3 et 4 afin d'évaluer les compétences AC 11.02, AC12.02 et AC12.03. En effet, en activité pratique les élèves réalisent des prototypes de chaîne de conversion de puissance (AC11.02). Ils vérifient également le bon fonctionnement des hacheurs et du système GEII complet en mettant en place des protocoles de caractérisation expérimentale et en effectuant des mesures. Cela permet d'introduire les apprentissages critiques AC12.02 et AC12.03 qui seront abordés plus en détail durant la séquence 2. Ces comptes rendus sont corrigés et rendus avant la séance 5 qui permettra de revenir sur les points problématiques et de formaliser les notions abordées en TP.

Pour évaluer la compétence AC11.01 les élèves présentent les résultats de l'analyse fonctionnelle qu'ils ont menée en séance 1 et qui est aussi reprise lors de la séquence 3 pour la réalisation de la fin du projet. Cette présentation reprend les différentes étapes du projet dans sa globalité.

Enfin, la ressource se termine par une évaluation sommative individuelle de 2h à l'écrit qui permet de s'assurer de la bonne compréhension et de la maîtrise des principales notions abordées durant la ressource. Avant cette évaluation, les élèves peuvent réviser et s'entraîner avec des exercices en ligne qui reprennent les principales notions abordées dans cette ressource. Les exercices sont de difficulté progressive et les élèves ont la correction et des explications une fois l'exercice terminé. Cela fournit aux élèves un moyen supplémentaire pour les guider dans leurs révisions en autonomie.

3.2.6 Remédiations prévues

La remédiation de cette séquence est principalement effectuée durant la dernière séance, qui reprend et formalise toutes les principales notions. Cependant, comme cette séquence a une forte composante de travaux

pratiques il est aussi possible de faire des petits points de remédiation durant ces séances en faible effectif. Enfin, après la correction des comptes rendus, une séance de remédiation sur cette première séquence est prévue au début de la séquence 3 qui repart de la fin de cette première séquence. Cela permet de laisser aux élèves du temps pour prendre un certain recul sur cette séquence qui introduit les notions fondamentales de la conversion statique, avant de les approfondir en séquence 3.

3.3 Exploitation pédagogique en terminale STI2D

3.3.1 Présentation de la filière

La filière STI2D forme des élèves à concevoir des produits innovants en intégrant les sciences, les technologies et l'ingénierie. L'enseignement technologique de la filière STI2D est organisé autour du **triptyque Matière, Énergie, Information dans un contexte de développement durable**. Cette filière met l'accent sur l'éco-conception et le développement durable, en favorisant les projets collaboratifs et concrets. Les enseignements abordent les dimensions socioculturelles, scientifiques, techniques, d'ingénierie et de design. Les élèves développent des compétences en analyse, expérimentation, simulation et résolution de problèmes techniques. La filière ouvre la voie à des études supérieures en BTS, BUT, écoles d'ingénieurs, et universités spécialisées dans les secteurs technologiques et industriels. La série STI2D prépare aux études supérieures dans les domaines scientifiques et technologiques, avec une approche interdisciplinaire et collaborative. En classe terminale, les projets pluri-technologiques permettent aux élèves de mettre en pratique leurs connaissances et compétences. Les spécialités "Innovation technologique" et "Ingénierie et développement durable" fusionnent en classe terminale pour former la spécialité "Ingénierie, innovation et développement durable" (cf Figure 44). Des enseignements spécifiques couvrent des domaines tels que l'architecture, les énergies, l'innovation technologique et les systèmes d'information. La filière STI2D offre ainsi une formation complète et polyvalente dans les sciences et technologies de l'industrie et du développement durable.

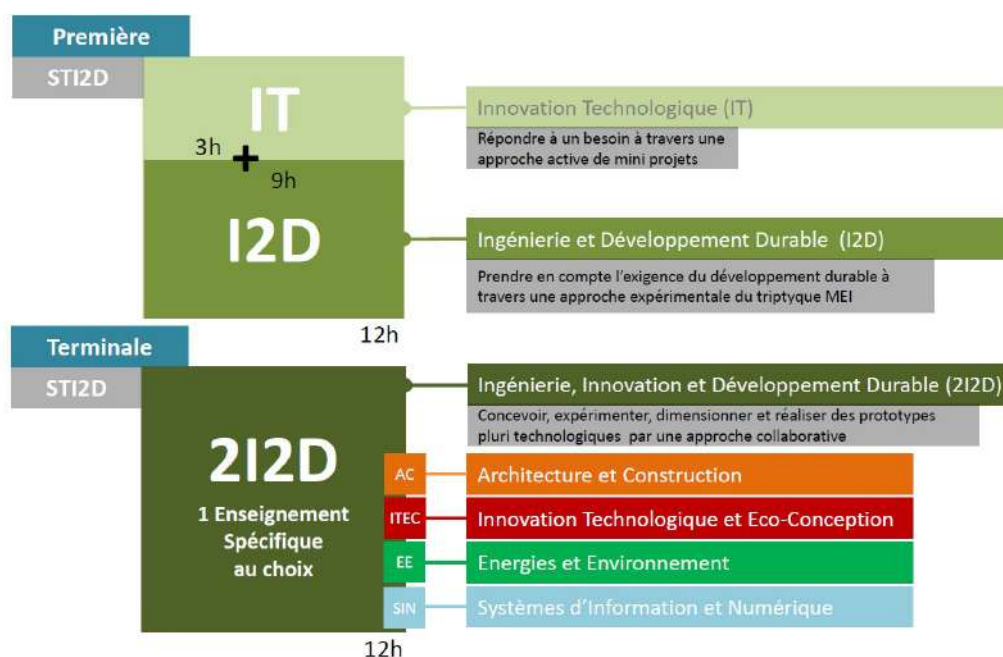


FIGURE 44 – Enseignements de spécialité du bac STI2D ³

3.3.2 Présentation de la séquence

Cette séquence prend la forme d'un projet par groupes de 6 élèves (2 de chaque spécialité : ITEC, EE et SIN) avec des points de travaux dirigés et de cours pour formaliser les notions mises en évidence par le projet. Le but de cette séquence de 28h est de mettre en application directe la démarche de l'ingénieur dans le cadre d'un projet pluridisciplinaire mobilisant des connaissances dans les trois spécialité (EE, ITEC et SIN). Cette séquence

3. Image extraite de <https://sti2d-jbd.fr/bac-sti2d-2019/>

s'inscrit dans les deux thématiques "Améliorer l'efficacité énergétique d'un produit" et "Concevoir l'habitat de demain" puisqu'elle a pour thème : Comment électrifier l'habitat de demain ?

Ce projet est principalement axé sur la démarche de réalisation et d'implantation d'une solution technique et moins sur la simulation d'un système qui aura déjà été abordée à plusieurs reprises en première et en début de terminale. Il s'agira d'aborder et de mettre en place un système de conversion d'énergie pour les EE, de concevoir et fabriquer des pièces pour les ITEC. Enfin, les SIN devront concevoir et implémenter une chaîne d'information. Les connaissances abordées en tronc commun dans cette séquence sont toutes de niveau taxonomique 2 et celles traitées en enseignement spécifique sont de niveau 3. Il s'agira en partie d'approfondir des notions déjà abordées en première et depuis le début de l'année en terminale notamment en les mettant en application dans une démarche de projet réalisé autant que possible en autonomie. Les compétences et les connaissances du bulletin officiel développées dans cette séquence sont visibles Figure 45.

Objectifs de formation		Compétences développées	Connaissances abordées
Dimension scientifique et technique	O3 - Analyser l'organisation fonctionnelle et structurelle d'un produit.	CO3.4. Identifier et caractériser des solutions techniques.	1.2.2 - Ingénierie système : analyse du besoin
	O4 - Communiquer une idée, un principe ou une solution technique, un projet, y compris en langue étrangère.	CO4.1. Décrire une idée, un principe, une solution, un projet en utilisant des outils de représentation adaptés.	1.1 - La démarche de projet 4.1.2 - Schéma architectural (mécanique, énergétique, informationnel)
Dimension ingénierie design	O5 - Imaginer une solution, répondre à un besoin.	CO5.1. S'impliquer dans une démarche de projet menée en groupe.	6.1 - Prototypage de pièces et de la chaîne d'information 3.3 - Comportement énergétique des produits 4.1.2 - Schéma électrique 5.2 - Constituants de puissance 4.3.4 - Conception numérique d'une pièce
		CO5.3. Mettre en évidence les constituants d'un produit à partir des diagrammes pertinents.	
		CO5.5. Proposer des solutions à un problème technique identifié en participant à des démarches de créativité, choisir et justifier la solution retenue.	
		CO5.8. Concevoir :	
		EE1 : Définir (ou modifier) la structure, les choix de constituants, les paramètres de fonctionnement d'une chaîne d'énergie afin de répondre à un cahier des charges ou à son évolution. ITEC1 : Définir à l'aide d'un modèleur numérique, les formes et dimensions d'une pièce d'un produit à partir des contraintes fonctionnelles, de son procédé de réalisation et de son matériau. ITEC2 : Définir, à l'aide d'un modèleur numérique, les modifications d'un sous-ensemble mécanique à partir des contraintes fonctionnelles. SIN1 : Proposer/choisir l'architecture d'une solution logicielle et matérielle au regard de la définition d'un produit. SIN2 : Rechercher et écrire l'algorithme de fonctionnement puis programmer la réponse logicielle relative au traitement d'une problématique posée.	
Dimension d'ingénierie design	O7 - Expérimenter et réaliser des prototypes ou des maquettes.	CO7.6. Expérimenter	6.2 - Expérimentations et essais : de constituants de la chaîne de puissance 6.2 - Expérimentations et essais : de procédés 6.2 - Expérimentations et essais : de constituants de la chaîne d'information
		EE1 : Des procédés de stockage, de production, de transformation, de récupération d'énergie pour aider à la conception d'une chaîne de puissance. EE2 : Tout ou partie d'une chaîne de puissance associée à son système de gestion dans l'objectif d'en relever les performances énergétiques et d'en optimiser le fonctionnement. ITEC1 : Des procédés de réalisation pour caractériser les paramètres de transformation de la matière et leurs conséquences sur la définition et l'obtention de pièces. SIN1 : Des moyens matériels d'acquisition, de traitement, de stockage et de restitution de l'information pour aider à la conception d'une chaîne d'information. SIN2 : Des architectures matérielles et logicielles en réponse à une problématique posée.	

FIGURE 45 – Compétences et connaissances exploitées dans la séquence : en noir le tronc commun, en vert l'enseignement spécifique pour les EE, en orange pour les ITEC et en bleu pour les SIN

Prérequis de la séquence :

Les prérequis communs aux trois spécialités portent principalement sur l'analyse fonctionnelle et sur la démarche de groupe, notions qui auront déjà été abordées tout au long de la classe de première. Il faut surtout que les élèves soient capables d'analyser un diagramme SysML et être habitués à la démarche de projet en groupe. Les ITEC devront être familiers avec un logiciel de CAO (comme Solidworks, FreeCAD ou autre) et avoir une connaissance première des procédés de fabrication en prototypage. Les EE doivent être capables d'utiliser un voltmètre et un ampèremètre et les SIN doivent connaître le principe de fonctionnement d'un microcontrôleur et avoir déjà téléversé un code via l'IDE arduino.

3.3.3 Organisation de la séquence

Cette séquence est répartie sur environ deux semaines et l'emploi du temps général est présenté en Figure 46. Les élèves sont en classe entière en début de semaine pour pouvoir présenter les projets, échanger en groupe, mettre en commun ou encore identifier et se répartir les tâches qui seront effectuées en enseignement spécifique dans la semaine. Les élèves ont aussi deux séances de 3h d'activité pratique d'enseignement spécifique durant lesquelles ils pourront effectuer leurs tâches spécifiques dans le projet. Enfin, les élèves disposent d'une heure en classe entière d'enseignement technologique en langue vivante (ETLV) en fin de semaine. Cette séance leur permet de formaliser le travail et les résultats obtenus dans la semaine afin de mettre en commun et de communiquer avec le reste du groupe. Cette répartition vise un bon équilibre entre travail de groupe et travail en enseignement spécifique pour garantir une bonne démarche de projet et faciliter la communication au sein du groupe durant cette séquence.

Sem	Séance commune (1h)	Activité pratique commune (3h)	Séance d'enseignement spécifique (2h)	Activité pratique d'enseignement spécifique (3h)	Activité pratique d'enseignement spécifique (3h)	ETLV (1h)
N° séance	6	7	8	9	10	11
1		Introduction du projet, analyse fonctionnelle, répartition des tâches, identification des constituants	Types de modulation commandée et adaptation de puissance Utilisation du pied à coulisse et TP rappels utilisation Solidworks Constituants de l'information	Caractérisation électrique des constituants Mesures dimensions et modélisation Solidworks Mesure de tension avec ESP32 et nécessité pont diviseur de tension	Dimensionnement électrique de la chaîne de puissance Modélisation Solidworks du boîtier Fonctionnement pont diviseur de tension, câblage et mise en évidence pb résolution	Préparation de la présentation (notamment le schéma architectural global)
N° séance	6	7	8	9	10	11
2	Cours prototypage	TP prototypage / procédés de fabrications	Schéma électriques et flux de puissance Représentation de plans et obtention depuis différents assemblages. Conditions géométriques et cotations. Convertisseurs CAN et résolution	Branchement et validation du cahier des charges Fabrication du boîtier et reprise Solidworks Ajout d'une sonde de température	Mesure et analyse des performances énergétiques Fabrication du boîtier et validation cahier des charges Ajout écran LCD et validation cahier des charges	Préparation de l'oral de la présentation finale
N° séance	6	7	8	9	10	11
3		1h30 = 10 min présentation en anglais et 5 min de questions (par le prof et un autre groupe) puis 1h30 de reprise et de remédiation				

FIGURE 46 – Répartition des séances et emploi du temps général de la séquence

Le tableau Figure 47 récapitule les compétences abordées durant les différentes séances. On observe bien que toutes les compétences sont bien traitées et plusieurs fois.

Séance n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Connaissance abordées	Activité pratique commune (3h)	Séance d'enseignement spécifique (2h)	Activité pratique d'enseignement spécifique (3h)	Activité pratique d'enseignement spécifique (3h)	ETLV (1h)	Séance commune (1h)	Activité pratique commune (3h)	Séance d'enseignement spécifique (2h)	Activité pratique d'enseignement spécifique (3h)	Activité pratique d'enseignement spécifique (3h)	ETLV (1h)	Activité pratique commune (3h)
1.2.2 - Ingénierie système : analyse du besoin	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1.1 - La démarche de projet	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X
4.1.2 - Schéma architectural (mécanique, énergétique, informationnel)	X				X						X	X
6.1 - Prototypage de pièces et de la chaîne						X	X	X	X	X	X	X
3.3 - Comportement énergétique des produits	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X
5.2 - Constituants de puissance		X		X	X			X	X	X	X	X
4.1.2 - Schéma électrique								X	X	X	X	X
6.2 - Expérimentations et essais : de constituants de la chaîne de puissance			X	X					X	X		
4.3.4 - Conception numérique d'une pièce		X	X	X	X			X	X	X	X	X
6.2 - Expérimentations et essais : de procédés									X	X		
5.3 - Constituants de l'information (Capteurs, conditionneurs, IHM)	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X
6.2 - Expérimentations et essais : de constituants de la chaîne d'information			X	X					X	X		

FIGURE 47 – Tableau récapitulatif des compétences traitées durant la séquence

3.3.4 Projet de la séquence

La séquence porte sur un projet pluridisciplinaire d'électrification de l'habitat de demain. Le diagramme des exigences de ce projet est défini Figure 49 et on y voit une répartition par couleur en fonction des spécialités : **EE**, **ITEC** et **SIN**. Concrètement, l'architecture générale du projet est représentée Figure 48. Les **EE** doivent réaliser un chargeur solaire en utilisant une carte Twist configurée en Buck pour recharger une batterie 12V à partir d'un panneau photovoltaïque (20V). Les **SIN** réalisent une chaîne d'information pour monitorer la tension de la batterie et la température intérieure. Ces données seront affichées sur un écran LCD à l'intérieur de l'habitat. Enfin, les **ITEC** devront réaliser soit le boîtier pour protéger la batterie, celui de la carte Twist ou bien celui qui contiendra l'électronique de la chaîne d'information.

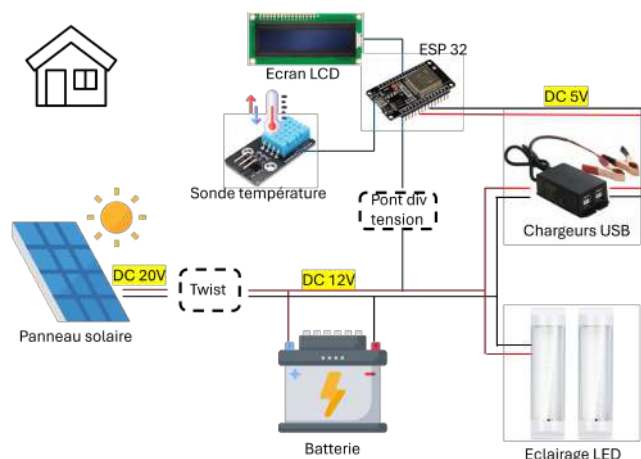


FIGURE 48 – Présentation générale du projet : architecture globale

3.3.5 Séquence détaillée

Première séance : Présentation et lancement du projet (3h).

Objectifs de la séance 1 : L'objectif de cette séance est dans un premier temps de contextualiser le projet qui sera le fil rouge de toute cette séquence, d'identifier les besoins et les constituants et enfin de commencer à répartir les tâches au sein du groupe.

Contenu : La séance commence par une première présentation rapide du projet, des enjeux et des attendus qui est projetée au tableau. Ensuite, les élèves sont répartis en 5 groupes de 6 (2 ITEC, 2 SIN et 2 EE). Les élèves disposent alors d'un cahier des charges du projet sous forme d'un diagramme des exigences qui leur permettra dans un premier temps de se répartir les tâches en fonction des spécialités. Ils devraient normalement obtenir une répartition comme celle visible avec les couleurs sur la Figure 49. A partir de ce diagramme d'exigences, les élèves vont devoir identifier les différents constituants du projet et commencer à chercher des solutions pour répondre aux diverses exigences.

Les **EE** parviennent à comprendre le besoin et la fonction du panneau solaire et de la batterie. Ils savent d'après le diagramme des exigences qu'ils auront besoin d'un convertisseur de puissance mais n'en connaissent pour l'instant pas l'intérêt. C'est pourquoi le principal objectif de cette séance sera d'effectuer des mesures de tension au voltmètre sur le panneau solaire et la batterie pour dégager le besoin du convertisseur de puissance (la carte Twist). Les élèves disposent aussi dans la salle des autres systèmes du projet et devront commencer à effectuer des schémas pour savoir quels blocs relier et commencer à représenter la chaîne de puissance.

Les **ITEC** identifient le besoin de concevoir des boîtiers pour contenir certains constituants. Cependant, dans cette séquence chaque groupe se concentrera sur la conception d'un seul des trois systèmes qui sont par difficulté croissante le boîtier de la batterie, celui de la carte Twist et enfin celui qui contient l'électronique (l'ESP et l'écran). En fonction des différences de niveaux (notamment pour l'utilisation du logiciel de CAO) ce sera au professeur

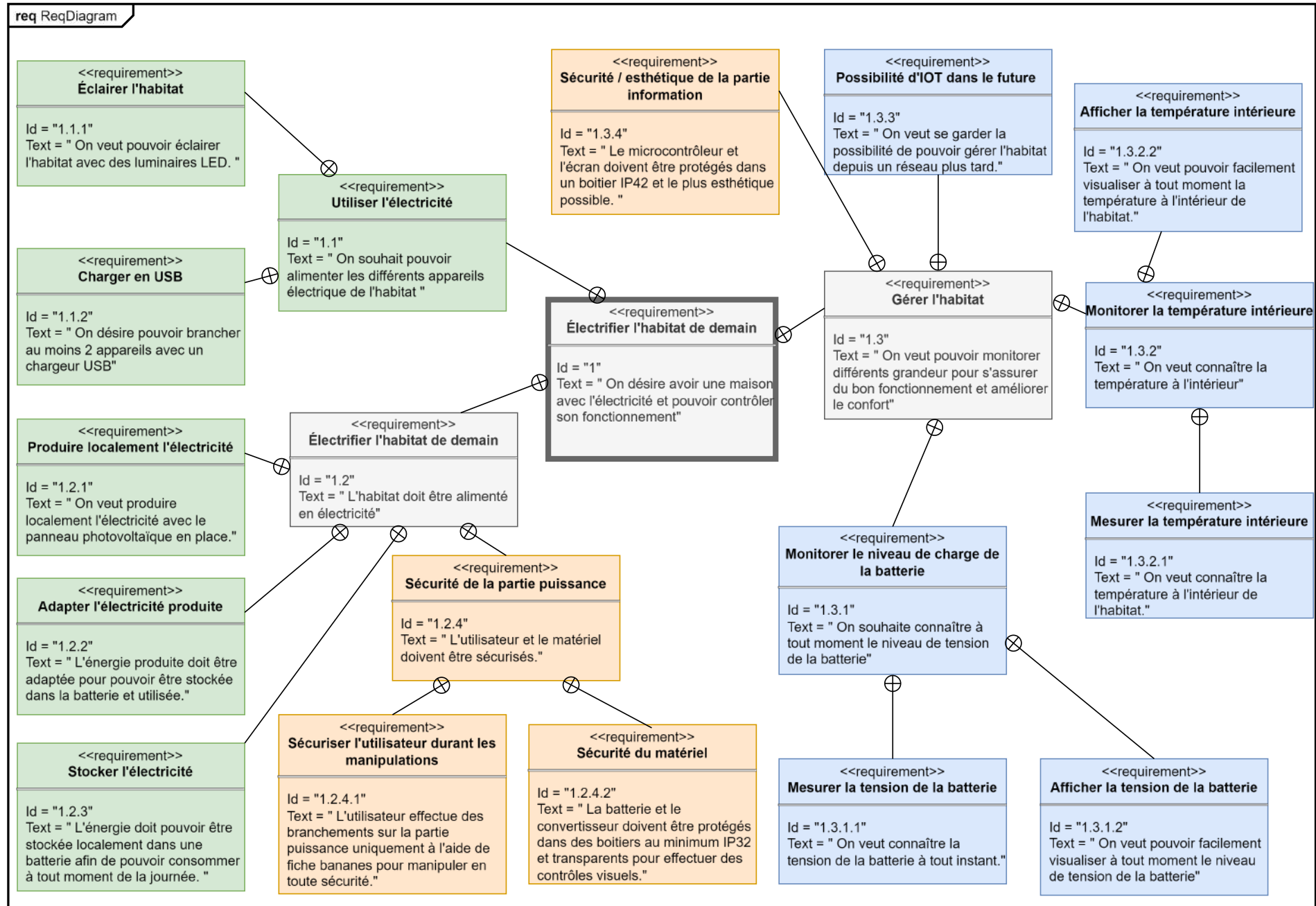


FIGURE 49 – Diagramme SysML des exigences du projet colorié en orange pour la partie des ITEC, en vert pour les EE et en bleu pour les SIN

ou aux élèves de choisir parmi les trois à concevoir. Durant cette séance, les élèves doivent identifier les exigences auxquelles devra répondre leur conception. Ils effectueront des premières mesures et des premiers schémas des pièces. Le but n'est pas de se lancer directement dans l'utilisation d'outils de CAO mais d'abord de faire des mesures et une conception sur le papier avec des formes, des dimensions ou encore des premiers choix de matériaux.

Les SIN identifient les différents constituants et commencent à schématiser la chaîne d'information. Ils doivent notamment faire un choix pour le microcontrôleur, même si en réalité le choix est implicitement très guidé puisque pour répondre à l'exigence "Possibilité d'IOT dans le future" ils devraient tourner leur choix vers l'ESP 32 qu'ils ont déjà utilisé en classe de première et qu'ils réutiliseront plus tard dans l'année justement dans une thématique d'IOT. Cela permet de bien les habituer à utiliser ce microcontrôleur dans divers projets et de s'inscrire ainsi dans une pédagogie spiralaire. Progressivement, les élèves choisissent des composants pour répondre à toutes les exigences et les composants leurs sont fournis au fur et à mesure. Les élèves reçoivent aussi les références des composants qui leurs sont fournis pour pouvoir chercher des informations en autonomie sur internet.

Par souci de concision, je détaillerai ci-dessous principalement les séances communes et surtout la séquence vue par les SIN. En effet, les ITEC font majoritairement de la CAO et de la fabrication de pièces et les EE traitent de la chaîne de puissance pour la réalisation d'un chargeur de batterie solaire, ce qui correspond à une thématique d'électrotechnique que j'ai déjà abordée dans ma séquence en BUT, contrairement à la séquence des SIN qui est plus axée sur la chaîne d'information. Je vais donc rapidement résumer la séquence des EE et des ITEC avant de détailler un peu plus celle des SIN.

Séance commune et activité commune semaine 2 : Cours et activité pratique sur le prototypage (1h + 3h).

La première semaine de projet a mis en évidence le besoin de prototyper. La connaissance 6.1 sur le prototypage de pièces et de la chaîne d'information est commune aux trois spécialités, c'est pourquoi les moyens de prototypages rapides sont vus en séance commune. Cette notion est aussi utile dans la majorité des projets et a déjà été abordée. Elle est ici abordée avec un niveau taxonomique plus élevé puisqu'il s'agira de choisir judicieusement différents procédés de fabrication pour le prototypage de pièces. La séance commence par un cours d'environ 45 min sur les procédés de fabrications en prototypage (différents types d'impression 3D, découpe laser...) et sur les choix des procédés en fonction des besoins. Ensuite, les élèves mettent directement en application le cours avec un TP pendant la séance d'activité pratique commune. Ce TP sur le prototypage commence par une partie de choix de procédé de fabrication pour différentes pièces. La deuxième partie concerne une imprimante 3D particulière qui possède un tapis roulant pour pouvoir imprimer à l'infini selon un axe. Cela permet d'éveiller la curiosité des élèves qui doivent regarder des vidéos sur son fonctionnement pour comprendre sa particularité technique, et en déduire l'enjeu caché derrière cette innovation ainsi que l'intérêt industriel. La troisième partie permet de remobiliser des notions de base de cinématique déjà vues en classe de première et revues en début de terminale. Il s'agit de comprendre la cinématique qui se cache derrière le fonctionnement d'un extrudeur d'imprimante 3D. Dans la partie suivante, les élèves sont incités à se servir du slicer utilisé au lycée pour optimiser l'orientation d'une pièce en fonction de contraintes esthétiques, environnementales (économie de matière) et d'une contrainte de temps. Ensuite, une partie aborde la notion de contrainte mécanique en fonction de l'orientation de la pièce lors de son impression. Enfin, pour les plus rapides il y a une partie facultative portant sur le G-code.

L'objectif est qu'à la fin de ces deux séances, les élèves soient capables de choisir le procédé de fabrication optimal pour le prototypage d'une pièce.

Séquence globale des EE :

Les EE ont d'abord une séance d'enseignement spécifique (2h) sur les types de modulation commandée et sur l'adaptation de puissance puisqu'en projet ils sont parvenus à mettre en évidence le besoin d'un convertisseur de puissance entre le panneau solaire et la batterie. La séance prend la forme de travaux dirigés appliqués aux convertisseurs du projet (panneau solaire et éclairage) ainsi qu'à un moteur électrique. Le but est d'identifier les types d'énergies en jeu, le sens de transfert de l'énergie, de porter attention aux grandeurs efforts/flux et aux caractéristiques de transfert des constituants, en privilégiant l'utilisation de formulaires et d'abaques. Il sera

question aussi de traiter de la modulation de l'énergie avec le variateur de vitesse du moteur et un variateur de luminosité du luminaire LED du projet.

Durant les deux séances d'activité pratique d'enseignement spécifique (2 x 3h) les EE doivent caractériser électriquement les différents constituants. Dans la séance 3, ils vont principalement caractériser expérimentalement la carte Twist qui sera programmée pour fonctionner en Buck asservi en tension pour que les élèves puissent facilement régler le niveau de tension en sortie avec les touches du clavier. Les élèves vont s'assurer du bon réglage et faire des mesures de puissance. Dans la séance 4 ils se concentrent sur le dimensionnement de la chaîne de puissance : puissance du panneau solaire, de la carte Twist, tensions et intensité maximale, capacité de la batterie et consommation des appareils.

La deuxième semaine est axée sur la représentation et la mise en œuvre de la conception. La séance d'enseignement spécifique des EE porte sur les schémas électriques et les flux de puissance. Elle est réalisée sous la forme de travaux dirigés directement sur Matlab. Les élèves disposent de constituants de chaînes de puissance (sous forme de simples blocs) qu'ils doivent brancher électriquement pour ensuite faire varier des grandeurs (puissance produite, modulation de la puissance...). Le but est de mettre en avant les flux de puissance et la réversibilité ou non de certains constituants.

Les deux séances d'activité pratique en enseignement spécifique portent d'abord sur la réalisation d'un schéma électrique permettant le branchement du système et la validation du cahier des charges. Puis la deuxième séance permet d'effectuer des mesures de puissances en écho avec la séance d'enseignement spécifique en début de semaine puisque les élèves doivent mesurer et analyser les performances énergétiques, notamment comprendre où va la puissance lorsque la batterie est complètement chargée.

Séquence globale des ITEC :

Les ITEC ont d'abord une séance d'enseignement spécifique sur la métrologie. En effet, pour pouvoir réaliser les pièces ils vont devoir effectuer des mesures et donc se servir par exemple du pied à coulisse. Pour cela une ressource leur est fournie avec une notice et un exercice de lectures de mesures. Cette séance sous la forme de travaux dirigés permet aussi de faire des rappels sur l'utilisation du logiciel de CAO. Par exemple, les élèves effectuent sur le logiciel des lectures de cotation, des modifications, importent des modèles 3D (comme celui de la carte Twist, de la batterie...) et s'entraînent à gérer des assemblages.

Durant les deux séances d'activité pratique d'enseignement spécifique (2 x 3h) les ITEC effectuent des mesures et modélisent en 3D la pièce qu'ils vont devoir fabriquer. On rappelle que pour le boîtier de la batterie et de la carte Twist, le diagramme des exigences impose un matériau transparent et les élèves devront donc utiliser la découpe laser. Pour la troisième pièce les élèves sont plutôt incités à utiliser l'impression 3D. Une justification plus complète du choix du procédé de fabrication sera possible dans la deuxième semaine après le cours/TP sur le prototypage.

La deuxième semaine permet de fabriquer les premières pièces et de revenir sur la modélisation 3D, au besoin pour faire des ajustements. Les élèves vont pouvoir expérimenter différents procédés de prototypage qu'ils auront déjà rencontrés en première et en début de terminale mais cette fois-ci avec une autonomie accrue. Les élèves fabriquent leurs pièces et doivent les modifier selon leur jugement pour parvenir à valider le cahier des charges.

Séquence globale des SIN :

Séance d'enseignement spécifique (2h) :

Cette séance porte sur la thématique des constituants de l'information, et plus particulièrement les capteurs, les interfaces homme-machine et les microcontrôleurs. Cette thématique a été introduite durant la première séance du projet et permet de formaliser et d'approfondir les notions mises en évidence par le projet.

La séance commence par un rappel rapide sur le formalisme de la chaîne d'information qui sera utile pour finir la chaîne d'information du projet. On rappelle les principales fonctions des constituants de la chaîne d'information et comment la représenter en prenant directement pour exercice d'application le projet. Cela permet de faire une mise en commun qui est nécessaire pour les séances suivantes, afin que tous les élèves comprennent bien la

forme de la chaîne d'information qu'ils vont devoir implémenter.

La suite de la séance traite de la thématique des capteurs. La différence entre un signal analogique, logique (TOR) et numérique est abordée en cours et directement mobilisée en exercice jusqu'à la fin du cours. Les élèves doivent dire pour chaque capteur si le signal qu'il fournit est du type analogique, logique (TOR) ou numérique et, si possible, donner ses caractéristiques de sortie (tension, courant, nombre de bits). Pour chaque capteur le fonctionnement est décrit et les caractéristiques principales sont données. Il y a : un capteur de fin de course, deux de position, un capteur de distance, un de proximité et enfin un capteur de température. Les différents capteurs sont répartis entre les élèves qui passent à plusieurs au tableau pour corriger.

Activités pratiques d'enseignement spécifique (2 x 3h) :

La première séance porte sur la mesure de tension avec un ESP 32. La séance commence par un rappel et un exercice sur l'utilisation des ESP32 (téléverser le code qui fait clignoter une LED) puis les élèves vont devoir réaliser un code pour mesurer la tension de piles AAA (1.5V) et CR2032 (3V). Le but est de rendre la séance ludique en recouvrant l'étiquette des piles et de manipuler en autonomie sans risque d'endommager les ESP32. La séance se termine par la mise en évidence que la tension de la batterie 12V est trop élevée pour être mesurée directement.

La deuxième séance porte ainsi sur le pont diviseur de tension. Une explication simplifiée de son fonctionnement est donnée et ce sera aux élèves de trouver le nombre de résistances à ajouter pour avoir une division permettant une mesure sur une plage de 0V à 16,5V (division par 5). Il s'agira ensuite de câbler le montage sur platine d'expérimentation (breadboard) pour vérifier le bon fonctionnement du système. A partir du code et de leurs observations expérimentales, les étudiants essayent de déterminer la résolution de la mesure. Cette notion permet d'introduire la séance d'enseignement spécifique de la deuxième semaine.

Séance d'enseignement spécifique (2h) :

Dans un premier temps, l'enseignant projette au tableau le moniteur série d'une mesure de tension en utilisant un arduino et un pont diviseur de tension de gain dix. Le CAN des arduinos est plus linéaire que les ESP32 et sa résolution est moins bonne puisque son CAN est sur 10 bits (au lieu de 12 pour l'ESP32). Ainsi, les élèves observent une tension qui varie et prend les valeurs 12.85V 12.90V et 12.95 V. Cette petite manipulation devant la classe permet de bien mettre en évidence le problème aux yeux de tous les élèves, pour qu'ils intègrent bien l'intérêt de cette séance.

Une fois le problème mis en évidence, une petite phase de cours sur la fonction d'un CAN, le quantum $q = \frac{V_{ref}}{2^n}$ ainsi que la loi entrée-sortie (Figure 50) et la formule $N = \frac{V_e}{q}$ vont permettre de réaliser la suite du cours en travaux dirigés. En travaux dirigés, les élèves disposent du simulateur de CAN (Figure 50) ainsi que d'un modèle Simulink avec une tension analogique réglable avec un potentiomètre et un bloc CAN et doivent répondre à plusieurs questions par ordre de difficulté croissante : identification des entrées et sorties, calcul de résolution et conversions pour différents signaux.

Le cours se termine par le cas de l'ESP32 dans le projet. Le calcul de la résolution est réalisé ensemble pour recontextualiser cette séance dans le projet, et pour que tous les élèves disposent de ce résultat pour la suite (notamment leurs présentations).

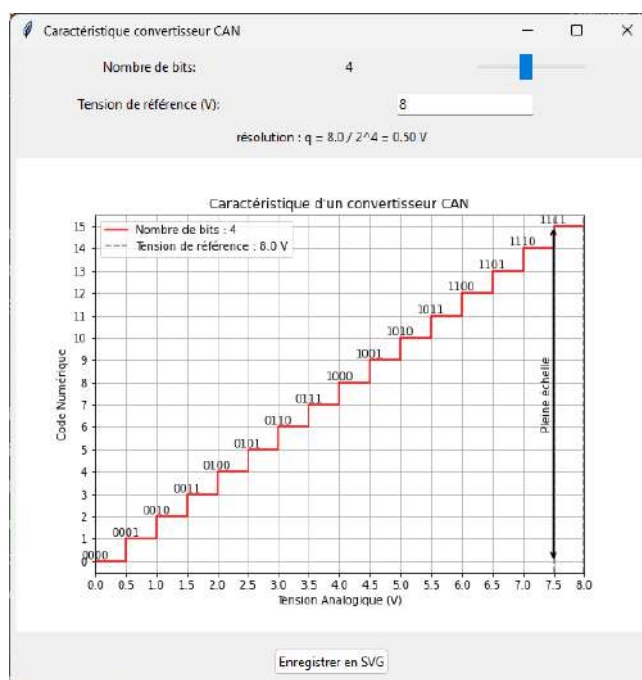


FIGURE 50 – Simulateur sur python permettant de tracer les caractéristiques de CAN pour différents paramètres (nombre de bits et tension de référence)

Activités pratiques d'enseignement spécifique (2 x 3h) :

Les deux dernières séances d'enseignement spécifique vont permettre aux élèves d'implémenter la sonde de température et l'écran LCD pour répondre au cahier des charges. Durant la première séance, il est demandé aux élèves de câbler la sonde de température DHT11 à partir du pinout fourni Figure 51. Un code (Figure 54) permettant de configurer la sonde avec une librairie leur est fourni ainsi qu'une explication des deux fonctions de lecture de température et d'humidité que les élèves vont devoir utiliser. Le but de cette séance est de concevoir un schéma de câblage simple, de le réaliser et de programmer avec des fonctions simples pour obtenir une mesure de la température dans le moniteur série.

La deuxième séance est consacrée à l'écran LCD et l'implémentation complète de la chaîne d'information. Les élèves disposent directement d'un schéma de câblage et doivent le réaliser. Ils ont aussi un exemple de code qui utilise une librairie pour rendre facile l'affichage de valeurs. Durant cette séance ils vont devoir parvenir à afficher la température sur l'écran et vérifier le bon fonctionnement avec un thermomètre, et un petit sèche-cheveux réglé au minimum pour observer les variations de température.



FIGURE 51 – Pinout de la DHT11

```
1 #include <LiquidCrystal_I2C.h> // Librairie de l'écran LCD
2
3 // nombre de lignes et de colonnes de l'écran
4 int lcdColumns = 16;
5 int lcdRows = 2;
6
7 // constructeur de l'écran LCD pour la librairie
8 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, lcdColumns, lcdRows);
9
10 void setup(){
11     lcd.init(); // initialise l'écran LCD
12     lcd.backlight(); // Allume le rétro-éclairage de l'écran
13 }
14
15 void loop(){
16     // place le curseur colonne 0 ligne 0
17     lcd.setCursor(0, 0);
18     // affiche message
19     lcd.print("Bonjour !");
20     delay(1000);
21     // efface tout sur l'écran
22     lcd.clear();
23     // place le curseur colonne 0 ligne 1
24     lcd.setCursor(0, 1);
25     lcd.print("La STI2D c'est super!");
26     delay(1000);
27     lcd.clear();
28 }
```

FIGURE 53 – Code exemple fourni aux élèves pour utiliser l'écran LCD

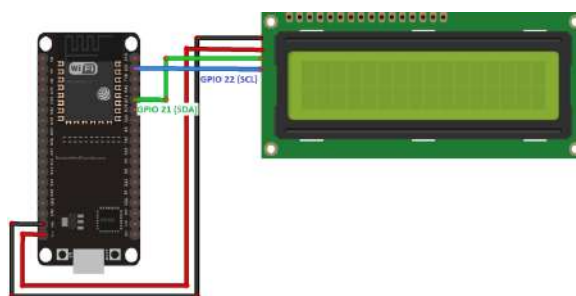


FIGURE 52 – Câblage et pinout pour brancher l'écran LCD à l'ESP32

```
1 #include "DHT.h" // inclut la librairie qui gère la sonde DHT11
2
3 #define DHTPIN 17 // pin de data de la sonde
4 #define DHTTYPE DHT11 // modèle de la sonde pour la librairie
5
6 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // constructeur pour déclarer la sonde
7
8 void setup() {
9     Serial.begin(115200);
10    dht.begin();
11 }
12
13 void loop() {
14     delay(1000); // La DHT11 renvoie au maximum une mesure toute les 1s
15
16     float humidite = dht.readHumidity();
17     float temperature = dht.readTemperature();
18
19     Serial.print("Humidite: ");
20     Serial.print(h);
21     Serial.print("% Temperature: ");
22     Serial.print(t);
23     Serial.print("°C, ");
24 }
```

FIGURE 54 – Code fourni aux élèves pour programmer la sonde de température, la partie surlignée n'est pas fournie c'est la correction

3.3.6 Évaluation

Les élèves sont évalués en binômes à l'écrit sur un compte rendu complet réalisé durant l'activité de prototypage sur les 4h en commun de la deuxième semaine.

Chaque groupe sera évalué à l'oral dans la dernière séance. Pendant 1h30 environ les groupes passent à l'oral, ils ont 10 minutes pour présenter chacun son tour en anglais le travail effectué dans le projet et ensuite il y a 5 minutes de questions en français avec l'enseignant mais aussi avec un autre groupe. Cet autre groupe aura pour responsabilité de trouver chacun une question pertinente à poser à ses camarades. Cela permet de dynamiser l'échange, d'imposer une certaine écoute des groupes et de poser des questions avec un point de vue différent. Je

rappelle que tous les groupes n'ont pas effectué le même travail dans le projet notamment en ITEC où les élèves auront choisi des pièces différentes à réaliser. Les EE n'ont pas tous effectué les mêmes mesures ou protocoles pour caractériser les performances énergétiques et les SIN les plus rapides avaient la possibilité de personnaliser l'affichage ou d'ajouter des LED par exemple à leur projet. Les élèves pourront aussi montrer leur réalisation durant la présentation, et échanger avec le professeur à la fin des présentations.

3.3.7 Remédiations prévues

Différents points d'avancement sont prévus tout au long de la séquence. Par exemple, les 15 dernières minutes des séances d'activité pratique d'enseignement spécifique permettent de faire un point de remédiation avec les élèves par groupe d'enseignement spécifique au moins deux fois par semaine.

En fin de séquence, la dernière heure et demie de cette séance est consacrée à une remédiation collective en classe entière. Les points problématiques observés dans les comptes rendus de l'activité de prototypage sont revus en cours. Il y a aussi une remédiation à la suite des présentations sur les points clés du projet. Le but est aussi d'avoir une bonne vision d'ensemble du projet.

Ainsi, une remédiation continue est prévue tout au long de la séquence pour traiter les potentielles lacunes et s'assurer du bon apprentissage des connaissances.

4 Conclusion

Pour lutter contre le réchauffement climatique, la transition écologique vers des énergies renouvelables doit s'effectuer rapidement, et à plusieurs échelles. Pour permettre à tout un chacun de participer à son niveau, OwnTech a pour objectif de démocratiser les moyens de conversion de puissance électrique. Cette démocratisation passe par la conception de cartes peu coûteuses, open-sources et faciles à utiliser. Dans cette optique, la carte Twist permet déjà d'effectuer de la conversion de puissance d'environ 300 W pour diverses applications. OwnTech est à la fois une start-up ayant comme objectif de commercialiser des cartes, mais aussi une association et une fondation. Le premier client visé par la fondation est le monde de l'enseignement. La carte Twist peut être programmée dans différents modes et est facile d'utilisation, ce qui en fait un support didactique idéal pour traiter et expérimenter dans le domaine de la conversion de puissance en toute sécurité.

Une étude technique sur le filtrage de la nouvelle carte d'Owntech (la carte Swirl) a été menée. Elle a notamment permis de mettre en évidence l'impact de la saturation des bobines sur la conformité ou non aux normes d'injection réseau. Ainsi, l'outil de simulation développé dans cette étude technique permet une optimisation de l'utilisation des composants de filtrage, en prenant en compte le plus fidèlement possible leurs défauts.

La carte Twist s'est avérée être le support idéal pour le développement d'une séquence pédagogique en BUT GEII. Elle a permis d'aborder la ressource R2.09 sur l'énergie avec une démarche inductive et une approche par projet. Ce projet d'électrification de l'habitat de demain fait intervenir la carte Twist à plusieurs reprises, pour réaliser la fonction de différents convertisseurs statiques comme un hacheur série permettant la recharge solaire d'une batterie, ou encore un hacheur parallèle pour alimenter un luminaire LED depuis la batterie. Cette utilisation de la carte Twist comme support dans le cadre d'un projet se retrouve dans la deuxième séquence développée. Cette séquence développée en terminale STI2D est basée sur un projet mobilisant des notions vues par les trois enseignements de spécialité (EE, ITEC et SIN). Cela engendre une dynamique riche en termes de pluridisciplinarité au sein d'un même groupe de projet.

Les ressources et codes de ce dossier industriel sont disponibles :

https://github.com/SylvainDubois92/dossier_industriel