

CONVERSION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE



Année 2015 – 2016

PROJET SOLAR IMPULSE

Groupe D

Laëtitia BOBET

Bétule PISKIN

Mathieu CHAVRET

13/05/2015

Samy BELALOUI

Alexandre BERTIER

Arnaud DEBOISDEFFRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
A. CAHIER DES CHARGES	4
1. Présentation générale du projet Solar Impulse	4
a. Historique du développement	4
b. Développement durable.....	5
c. Tableau récapitulatif du projet	5
2. Cadre de réponse : caractéristiques des deux versions du Solar Impulse	6
3. Simulation effectuée.....	7
B. CHAÎNE ÉNERGETIQUE	7
1. Présentation de la chaîne énergétique globale.....	7
2. Bilan énergétique.....	8
3. Détail de la chaîne électrique	9
C. ÉTUDE DES SOUS BLOC DE LA CHAÎNE	10
4. Modélisation du panneau photovoltaïque	10
a. Étude théorique	10
b. Modélisation sous LTSpice.....	11
5. Étude du hacheur.....	12
a. Approche théorique	12
b. Simulation sous LTSPICE	13
6. Étude de l'onduleur	14
a. Approche théorique	14
b. Simulation sous LTSPICE	15
7. Étude du transformateur.....	15
a. Approche théorique	15
b. Simulation sous LTSPICE	16
8. Modélisation du moteur	16
a. Approche théorique	16
b. Simulation sous LTSPICE	17
D. SIMULATION LTSPICE DE LA CHAÎNE	17
a. Vérification des différents signaux	17
b. Solution envisageable pour rectifier le problème rencontré en simulation	18
CONCLUSION	18
ANNEXES	19
1. Annexe A.1	19

2.	Annexe C.2	19
3.	Annexe C.3	20
4.	Annexe C.4	20
5.	Annexe C.5	21
6.	Annexe C.6	21
7.	Annexe C.7	22
8.	Annexe C.8	22
9.	Annexe C.9	23
10.	Annexe C.10.....	23
11.	Annexe C.11.....	24
12.	Annexe C.12.....	24
13.	Annexe 1.D	25
14.	Annexe 2.D	26
15.	Annexe 3.D	26
16.	Annexe 4.D	27
SOURCES		28

INTRODUCTION

Au cours de cette étude de cas, notre groupe s'est intéressé à l'avion Solar Impulse qui a récemment réalisé le tour du monde avec pour seule énergie l'énergie produite par des panneaux solaires situés sur ses ailes. Cet avion, à vocation écologique n'emploie pas de combustible mais alimente ses moteurs avec de l'électricité produite de façon autonome et écoresponsable. Ainsi, inspiré par les prouesses techniques mises en œuvre dans cet avion, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la chaîne de transmission de l'énergie des panneaux solaires vers les quatre moteurs de l'appareil. Nous avons ainsi pu nous interroger sur la nature des différents composants de cette chaîne, qui a été simplifiée pour les besoins de l'étude.

Dans cette chaîne, que nous allons détailler par la suite, nous ne nous sommes pas intéressé à l'alimentation, ni à la charge des batteries et des différents modules du Solar Impulse. De ce fait, nous allons dans un premier temps nous intéresser aux caractéristiques techniques connues du Solar Impulse afin de dresser un cahier des charges de notre projet. Puis nous verrons dans un deuxième temps la chaîne énergétique simplifiée qui fera l'objet de notre étude. Enfin, dans un troisième temps, nous verrons l'étude des différents éléments de la chaîne, tels les panneaux solaires, le hacheur, l'onduleur, le transformateur et le moteur. Enfin, nous verrons la simulation que nous avons pu faire de la chaîne, sous le logiciel Ltspice.

A. CAHIER DES CHARGES

1. Présentation générale du projet Solar Impulse



Bertrand Piccard

En moins d'un siècle l'avion est devenu un moyen de transport usuel, mais un avion consomme de l'énergie fossile, ce qui pose problème dans le contexte environnemental actuel. La conception d'un avion solaire, capable de voler jour et nuit sans carburant est une innovation capitale dans le secteur de l'aéronautique. Le développement d'un tel projet vise à promouvoir les énergies renouvelables et les technologies propres capables de diminuer la dépendance de notre société aux énergies fossiles. Médecin psychiatre, ingénieur aéronautique et pilote professionnel, c'est Bertrand Piccard qui a été à l'origine de ce projet après un tour du monde en ballon. Avant le Solar Impulse des avions solaires ont déjà volé, mais seulement au milieu de la journée et sans pouvoir stocker de l'énergie. Plusieurs variantes du Solar Impulse ont vu le jour sous la direction de Bertrand Piccard.

a. Historique du développement

2003 : L'étude de la faisabilité du projet débute en collaboration avec l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et plus particulièrement André Borschberg à qui le projet est confié.

3 décembre 2009 : Après 4 ans d'études et 2 ans de construction un premier prototype de l'Avion Solaire imaginé par Bertrand Piccard, le « Solar Impulse 1 » voit le jour. En Juillet 2010, le test est concluant : le Solar Impulse 1 réussit le premier cycle jour nuit à l'énergie solaire en 26h de vol, c'est un exploit historique. Le Solar Impulse 1 bat 8 records du monde et prouve la fiabilité des technologies utilisées.

2013 : Le Solar Impulse 2 est en construction avec quelques améliorations, plusieurs vols ont été effectués entre 2014 et 2016, on en compte 8 au total. Les résultats sont concluants, le Solar Impulse 2 est capable de réaliser des trajets intercontinentaux par la seule utilisation de l'énergie solaire. L'un des derniers vols en date, la traversée entre le Japon et Hawaï en Juillet 2015, a causé une surchauffe des batteries ce qui a nécessité une maintenance de l'avion, une des premières limitations du prototype a donc pu être mise en évidence.

Les équipes techniques ont donc étudié plusieurs options pour chauffer et refroidir les batteries pendant "les vols de très longue durée". La dernière étape franchie par le Solar Impulse II dans son tour du monde (*cf. Annexe A.1*) a été accomplie le 11 juin 2016 en se posant à New York.

b. Développement durable

Il est évident que la demande pour ce type de produit est très importante, car nous savons tous aujourd'hui que la survie de notre planète passe nécessairement par le développement durable. Réaliser un trajet en avion sans utiliser de carburant signifie non seulement une diminution de la pollution mais aussi une diminution des coûts pour ce type de transport. Le développement du Solar Impulse est donc un enjeu capital pour notre société actuel, c'est un produit innovant qui possède un avenir certain.

c. Tableau récapitulatif du projet

<u>Projet & Finalité</u>	<p>Conception d'un avion fonctionnant jour et nuit en utilisant uniquement l'énergie solaire obtenue par l'utilisation de panneaux photovoltaïque.</p> <p>Dans le cadre de notre simulation nous nous intéresserons à un fonctionnement de jour sans stockage d'énergie par utilisation de batterie.</p>
<u>Contexte</u>	<ul style="list-style-type: none"> <u>Situation du projet par rapport aux autres projets</u> Nous nous intéressons au dernier prototype en date, le Solar Impulse II qui présente des caractéristiques améliorées par rapport au Solar Impulse I (cf. Tableau des caractéristiques du Solar Impulse). <u>Etudes déjà effectuées et études menées sur des sujets voisins</u> Des avions solaires ont déjà volé mais de jour et sans stockage d'énergie. De plus, l'énergie solaire est une source très largement utilisée lorsqu'il s'agit d'indépendance énergétique et de développement durable. On peut trouver de nombreuses autres applications en automobile (voiture solaire), en téléphonie (smartphones rechargeables par énergie solaire) etc. Il existe un projet similaire est en cours de réalisation : le Solar Ship, un avion-cargo dont les ailes sont gonflées à l'hélium Propulsé grâce à l'énergie solaire à l'image de Solar Impulse, il serait capable de transporter 10 tonnes de fret et de se déplacer à une vitesse de 100 km/h. À terme, il pourrait notamment être utilisé dans le secteur de l'aide humanitaire. <u>Suites prévues</u> Les tests réalisés consistent à discerner les limites du Solar Impulse : la distance pouvant être parcourue selon des conditions spécifiques de jour et de nuit. Il s'agit d'améliorer ses performances pour chaque nouveau prototype. <u>Parties concernées par le déroulement du projet et ses résultats</u> Le projet est encore à l'état de recherche mené par Bertrand Piccard et André Borschberg à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Le projet débuté en 2003 occupe 70 personnes en 2012. Le 3 Juillet 2015 le Solar Impulse 2 a réalisé un record technologique : l'avion s'est posé à Hawaï après près de 8 000 km parcourus uniquement grâce à l'énergie solaire. C'était également un exploit humain, le pilote, André Borschberg a accumulé 117 heures de vol sans escale.

<u>Enoncé du besoin</u>	L'objectif premier de la conception d'un appareil tel que le Solar Impulse est de promouvoir des solutions écologiques aux problèmes énergétiques actuels, de promouvoir le développement durable. Ce type d'appareil pourrait remplacer les avions utilisant l'énergie fossile.
<u>Environnement du produit recherché</u>	La principale contrainte vient de l'accès à la source d'énergie solaire la nuit qui nécessite l'utilisation de batterie pouvant stocker suffisamment d'énergie pour alimenter l'avion de nuit. Or l'énergie solaire est la seule source à disposition pour l'appareil étudié.

2. Cadre de réponse : caractéristiques des deux versions du Solar Impulse

	<u>SOLAR IMPULSE I</u> <u>Prototype HB-sia</u>	<u>SOLAR IMPULSE II</u> <u>Prototype HB-sib</u>
Envergure	63,40 m	72,3 m
Longueur	21,85 m	22,40 m
Hauteur	6,40 m	XXXXXXXX
Poids	1 600 kg	2 300 kg
Matériaux	Structure en matériaux composites constitués de fibre de carbone et de nid d'abeille.	Structure en matériaux composites constitués de fibre de carbone et de nid d'abeille.
Motorisation	4 moteurs électriques 10 CV chacun	4 moteurs électriques 17,4 CV ↔ 12,8 kW chacun
Cellules solaires	11 628 de 150μ d'épaisseur Silicium monocristallin Légers Flexibles Rendement de 22 % Sur l'aile : 10 748 Sur le stabilisateur horizontal : 880	17 248 de 135μ d'épaisseur Silicium monocristallin Légers Flexibles Rendement de 22 %
Altitude de croisière	8 500 m	8 500 m
Vitesse moyenne	70 Km/h	90 Km/h de jour 60 Km/h de nuit
Vitesse maximale	XXXXXXXX	140 Km/h
Vitesse de décollage	35 Km/h	35 Km/h
Stockage d'énergie	Batterie au lithium polymère 4 x 200 Wh/kg 400 kg au total	Batterie au lithium polymère 4 x 260 Wh/kg 633 kg au total
Cockpit	1,3 m ²	3,8 m ²
Capacité	36 h de vol d'affilé	120 h de vol d'affilé

Mode de fonctionnement du Solar Impulse :

Lorsque le soleil brille, une partie de l'énergie solaire captée est consommée directement par les moteurs électriques (autoconsommation), le reste est stocké dans des batteries. La nuit ou par mauvais temps, l'énergie stockée dans les batteries permet d'alimenter les moteurs électriques.

3. Simulation effectuée

Nous nous sommes intéressés à la simulation électrique du Solar Impulse II pour un point de fonctionnement spécifique : un fonctionnement de jour sans l'utilisation de batterie.

B. CHAÎNE ENERGETIQUE

1. Présentation de la chaîne énergétique globale

D'un point de vue énergétique, la chaîne globale du *Solar impulse II* est la suivante :

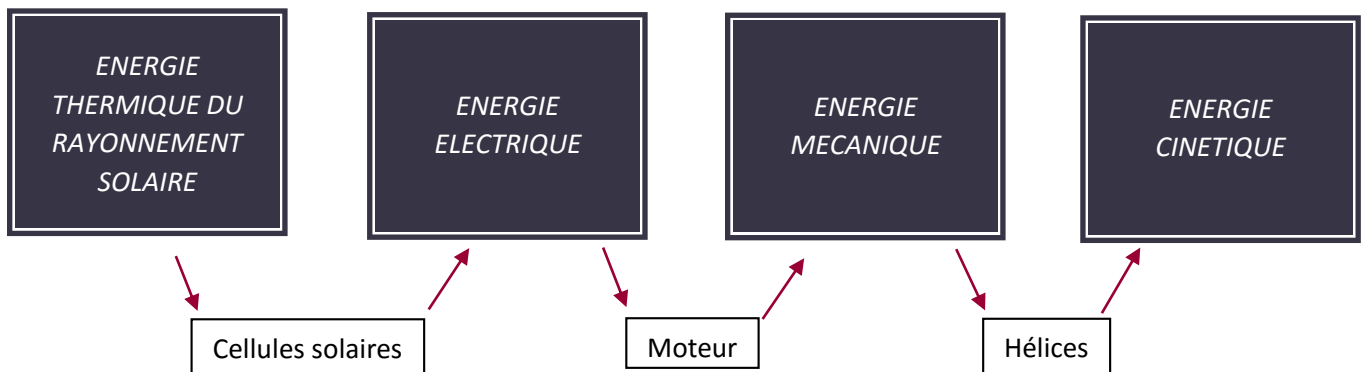


Figure 1 : Chaîne Energétique du *Solar Impulse II*

□ : Composant du Solar Impulse qui reçoivent ou fournissent de l'énergie

Trois composants sont indispensables au bon fonctionnement de l'avion solaire : les cellules photovoltaïques qui ont été sélectionnées pour leur rapport optimal poids/rendement, le moteur et les hélices. Pour alimenter le moteur qui fera tourner les hélices sous l'effet de l'énergie mécanique produite par ce dernier, il doit lui être fourni une énergie électrique. Cette énergie est obtenue en sortie des cellules solaires après avoir transformée l'énergie thermique provenant des rayonnements du soleil.

Attention : Des pertes d'énergie interviennent au niveau de ces trois composants, ce sont des pertes d'énergie thermique. Voyons ce qu'il en est d'un point de vue du rendement.

Le rendement total de la chaîne est d'environ 12%, ce qui est faible mais est dû aux pertes de rendement réalisées par chacun des composants de l'avion. En effet, leur rendement respectif est le suivant :

- Les cellules solaires : $\eta_s = 0,22$
- Le moteur : $\eta_m = 0,80$
- Les hélices : $\eta_h = 0,70$
- Les batteries : $\eta_b = 0,96$

Finalement, nous avons :

$$\eta_{total} = 0,22 \times 0,80 \times 0,70 \times 0,96 = 11,83 \%$$

Nous en concluons que l'énergie produite par les hélices est moins importante que l'énergie produite par les cellules solaires. Afin d'effectuer ce calcul, nous devons tenir compte des batteries d'accumulateurs dans notre calcul de rendement puisqu'elles seront nécessaires afin de stocker de l'énergie électrique fournie en journée lors de la présence du rayonnement solaire. Ce stockage d'énergie est essentiel au bon fonctionnement de l'avion dans le but de pouvoir voler, sans aucun problème de nuit, lorsque le *Solar Impulse II* sera privé de sa source d'énergie : le soleil. Les batteries au lithium-polymère sont donc placées en amont des moteurs puisque ce sont elles qui fourniront l'énergie électrique en pleine nuit aux moteurs.

2. Bilan énergétique

Avant toute chose, il faut savoir que les moteurs ne fonctionnent pas en continu mais se coupent fréquemment et régulièrement afin d'éviter toute surchauffe - les moteurs ne fonctionneraient qu'un quart du temps. Pendant ces périodes d'arrêt du moteur, l'avion plane (son amplitude diminue petit à petit). On considère les durées suivantes :

$$D_J = 14h$$

$$D_N = 10h$$

Soit D_J , la durée en journée pour laquelle l'avion utilise directement l'énergie solaire (de 6h à 20h) et D_N , la durée de nuit pour laquelle l'avion utilise l'énergie stockée dans les batteries. De plus, il est possible que l'avion soit exposé plus de **14 h** au soleil puisque lors des voyages du Solar Impulse, les aviateurs partaient de l'Est et allaient vers l'Ouest pour être exposé au maximum au soleil. Néanmoins, il se peut que la météo ne soit pas toujours au beau fixe.

❖ Energie disponible

▪ De jour :

Comme nous avons vu précédemment, le *Solar impulse II* possède 17 248 cellules d'une dimension de 12,5cm x 12,5cm sur une profondeur de 135,5µm. De plus, au voisinage du sol, une surface horizontale de 1m² reçoit de la part du soleil une puissance moyenne calculée sur 24h égale à 250 W. Par conséquent, la puissance d'irradiation sur une journée de **14 h** d'ensoleillement est d'environ :

$$E_{solaire} = S \times 250 \times 24 = 17\,248 \times 0,125 \times 0,125 \times 250 \times 24 = 943,3 \text{ kW} \cdot h \cdot m^{-2} \quad \text{avec } S = 269,5 \text{ m}^2$$

Ainsi, l'énergie électrique fournit sur une journée est :

$$E_{elec} = E_{solaire} \times \eta_s = 943,3 \cdot 10^3 \times 0,22 = 207,5 \text{ kWh}$$

▪ De nuit :

Il y a 633kg de batteries de densité énergétique de 260 Wh.kg⁻¹. La puissance totale fournit par les batteries est de :

$$E_{batterie} = 633 \times 0,260 \times 0,96 \times 4 = 632 \text{ kWh}$$

❖ Energie consommée

▪ De jour :

Chacun des moteurs a une puissance de 17,4 CH , soit 12,8 kW (1 CH ≈ 736 W). A eux quatre, ils consomment :

$$P_{moteur} = 4 \times 12,8 \times 0,80 = 41 \text{ kW}$$

Donc :

$$E_{moteur} = P_{moteur} \times \frac{D_J}{4} = 143,4 \text{ kWh}$$

Les panneaux solaires fournissent assez d'énergie pour les quatre moteurs.

▪ De nuit :

$$E_{\text{moteur}} = P_{\text{moteur}} \times \frac{D_N}{4} = 102,4 \text{ kWh}$$

Nous remarquons que les batteries fournissent beaucoup plus que ce qui est consommé. Cela permet de laisser une marge en cas d'intempéries ou de nuages en journée mais aussi de prévoir que les batteries ne soient pas totalement chargées.

Attention : De jour comme de nuit, nous ne tenons pas compte dans les calculs de la puissance consommée par les autres appareils de l'avion qui nécessitent de l'électricité.

3. Détail de la chaîne électrique

Nous nous sommes concentrés sur la chaîne principale permettant la conversion de l'énergie thermique du rayonnement solaire, reçu par les panneaux photovoltaïques en énergie électrique, fourni aux moteurs de l'avion. Nous l'avons décomposée comme suit :

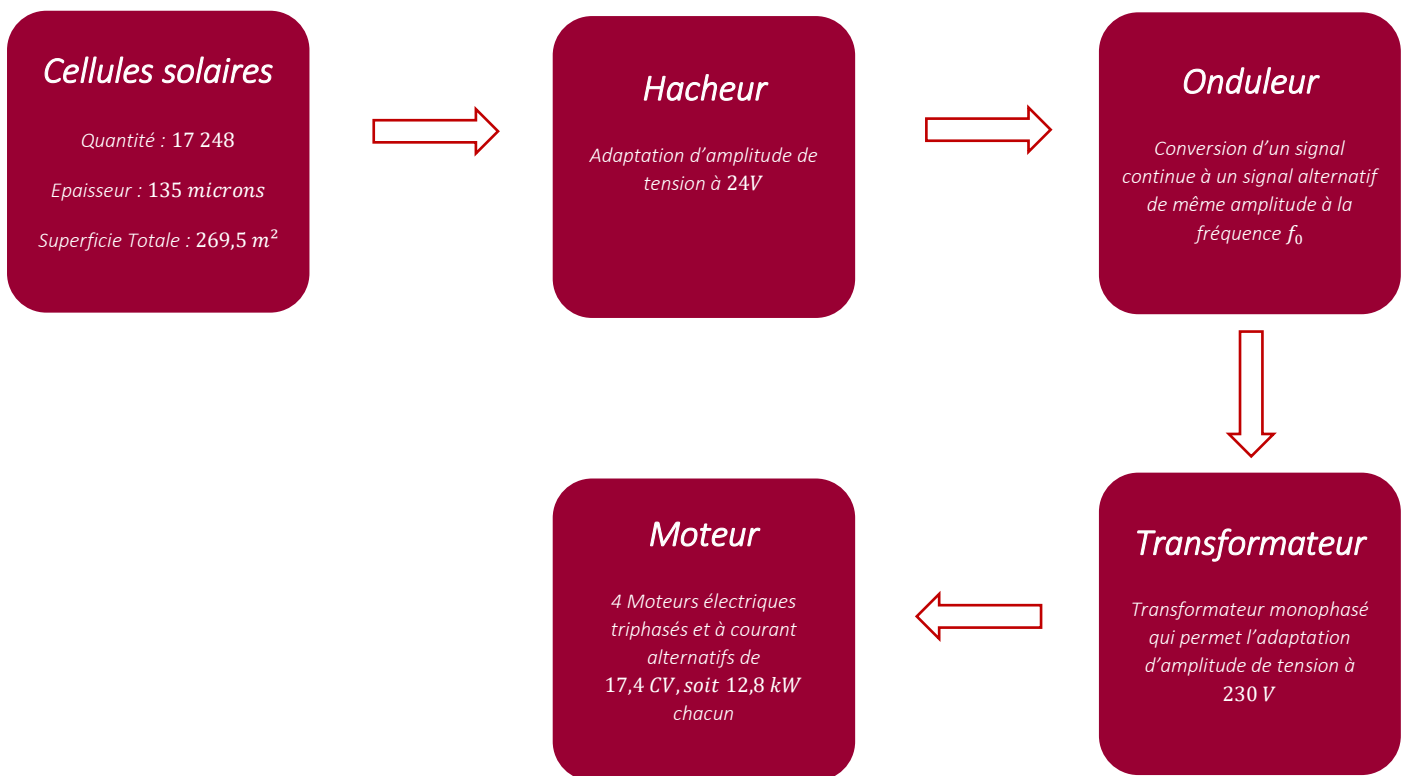


Figure 2 : Chaîne Electrique du Solar Impulse II

Pour notre simulation, nous avons réalisé la chaîne précédente afin d'adapter l'énergie électrique produite par les cellules solaires qui sera reçue par les quatre moteurs. En effet, les cellules solaires fournissent une tension continue de 12 V. Or, chacun des moteurs nécessite une tension alternative de 230 V. Les cellules solaires sont perçues comme une source de courant. C'est pourquoi, nous plaçons en premier lieu un hacheur parallèle permettant de passer d'une source de courant à une source de tension. De plus, le hacheur parallèle est un sur-élévateur. Par conséquent, nous passons d'une tension d'une valeur de 12 V à 24 V. Un onduleur est ensuite inséré dans le but de transformer le signal continu en un signal alternatif d'amplitude 24 V. Enfin, pour obtenir les 230 V d'amplitude, centrée autour de 115 V, nous avons mis un transformateur monophasé.

Nous nous sommes fixés à un point de fonctionnement de jour. C'est pourquoi, nous n'avons pas tenu compte des batteries et par conséquent des régulateurs qui permettent le chargement des batteries (chargement non continu, il y a des valeurs de tension à respecter)

C. ETUDE DES SOUS BLOC DE LA CHAÎNE

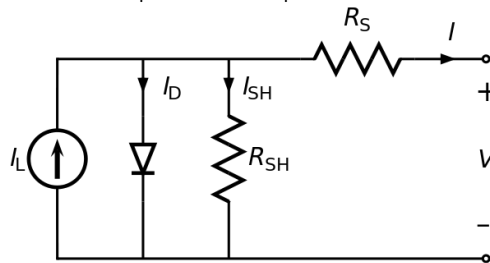
4. Modélisation du panneau photovoltaïque

a. Etude théorique

Dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux panneaux solaires utilisés par le Solar Impulse. Les hypothèses d'étude que nous allons prendre pour modéliser le fonctionnement des panneaux solaires sont les suivantes :

- Le Rayonnement solaire est constant tout au long de l'étude des panneaux.
- Nous ne considérons que le vol de jour, nous n'étudions donc pas le fonctionnement du Solar Impulse dans les conditions de vol de nuit

Le principe de fonctionnement d'un panneau solaire est le suivant, des photons sont absorbés par les matériaux semi-conducteurs du panneau, ce qui en retour va créer des paires électrons-trous autour de la bande de valence du semi-conducteur, créant ainsi un courant. Afin de pouvoir étudier plus en détail le fonctionnement de ces panneaux solaires, nous allons nous intéresser au modèle équivalent du panneau :



Ainsi, le modèle équivalent d'un panneau solaire est une source de courant en parallèle avec une diode. En pratique, un panneau solaire n'est pas idéal, ainsi, nous rajoutons une résistance de shunt, R_{SH} , ainsi que R_S la résistance série.

Equation caractéristique

Du modèle équivalent, il est évident que le courant produit par la cellule solaire est égal au courant produit par la source moins les courants de shunt et de diode. Nous avons donc l'équation suivante : $I = I_L - I_D - I_{SH}$

Avec I , le courant de sortie, I_L , le courant produit par la cellule, I_D le courant de diode, et I_{SH} , le courant de shunt. Le courant qui traverse ces éléments est commandé par la tension suivante : $V_J = V + IR_S$

Avec V_J , la tension aux bornes de la diode et de la résistance de shunt, V , la tension de sortie, I le courant de sortie, et R_S la résistance série. Ainsi, en utilisant l'équation de Shockley dans la diode, nous pouvons trouver le courant qui passe dans la diode : $I_D = I_0(e^{\frac{V_J}{nV_T}} - 1)$

Avec I_0 le courant de saturation, n le facteur d'idéalité de la diode (qui vaut 1 lorsque la diode est idéale), $V_T = \frac{kT}{q}$ avec q la charge élémentaire, k la constante de Boltzman, et T la température. Finalement, la loi d'Ohm nous donne le courant qui traverse la résistance de shunt : $I_{SH} = \frac{V_J}{R_{SH}}$

Ainsi, en reprenant la première équation, nous trouvons : $I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_{SH}}$

Or, comme les paramètres I_0 , n , R_S , et R_{SH} ne peuvent pas être mesurée de façon directe, lorsque R_S est non nulle, nous utilisons la fonction W de Lambert pour résoudre :

$$I = \frac{(I_L + I_0) - \frac{V}{R_{SH}}}{1 + \frac{R_S}{R_{SH}}} - \frac{nV_T}{R_S} W \left(\frac{I_0 R_S}{nV_T \left(1 + \frac{R_S}{R_{SH}} \right)} \exp \left(\frac{V}{nV_T} \left(1 - \frac{R_S}{R_S + R_{SH}} \right) + \frac{(I_L + I_0) R_S}{nV_T \left(1 + \frac{R_S}{R_{SH}} \right)} \right) \right)$$

Lorsque l'on rajoute une charge, il suffit d'ajouter sa valeur à R_S . D'autre part, nous pouvons résoudre pour V , toujours en utilisant la fonction W de Lambert :

$$V = (I_L + I_0) R_{SH} - I(R_S + R_{SH}) - nV_T W \left(\frac{I_0 R_{SH}}{nV_T} \exp \left(\frac{(I_L + I_0 + I) R_{SH}}{nV_T} \right) \right)$$

La forme générale de la solution est une courbe décroissante à mesure que V augmente.

Effet de la taille

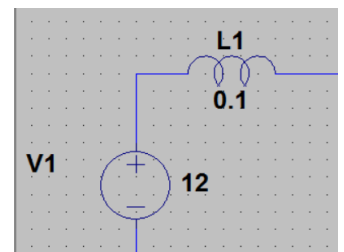
Les valeurs de I_0 , I_L , R_S , et R_{SH} sont dépendantes de la tailles des panneaux solaires, ainsi, en comparant des cellules identiques (sauf du point de vue surfacique), une cellule qui aura le double de jonctions p-n, aura en principe un I_L et un I_0 doublé. De la même manière, la résistance série R_S sera divisée par deux, pour le courant dit vertical. De ce fait, l'Equation caractéristique devient, en termes de densité de courant :

$$J = J_L - J_0 \left(\exp \left[\frac{q(V + Jr_s)}{nkT} \right] - 1 \right) - \frac{V + Jr_s}{r_{SH}}$$

Avec J la densité de courant, J_L la densité de courant générée par effet photoélectrique, J_0 l'inverse de la densité de saturation de courant, r_s la résistance spécifique série, et r_{SH} la résistance spécifique de shunt. Cependant, la taille n'est pas le seul élément à prendre en compte pour modéliser l'ensemble des cellules solaires du Solar Impulse. En effet, il faut aussi tenir compte de la température des cellules, de leur architecture microscopique, ainsi que de l'angle avec lequel elles reçoivent l'ensoleillement.

b. Modélisation sous LTSpice

Ainsi, après avoir pris en compte les différents éléments abordés dans l'étude théorique des cellules solaires, nous avons modélisé la source d'énergie que sont les panneaux solaires de deux façons, tout d'abord, nous avons créé le montage tel que présenté dans la partie théorique. Cependant, afin de simplifier le schéma, à l'instar du cours, nous avons remplacé cette source de courant par une source de tension en série avec une bobine, ce qui se comporte exactement comme la source de courant précédemment utilisée. La modélisation sous LTspice devient alors celle-ci contre.



Ainsi, avec cette modélisation, nous avons respecté les hypothèses de travail que nous nous étions fixés, en considérant que le courant fourni par les cellules du Solar Impulse est constant sur toute la durée de nos simulations, ce qui s'explique par nos hypothèses d'ensoleillement constant, et d'idéalité des cellules solaires.

5. Etude du hacheur

a. Approche théorique

Comme expliqué dans la partie précédente, on modélise le panneau solaire comme étant une source de courant que l'on modélise par une source de tension en parallèle d'une bobine.

Pour augmenter la tension en sortie du panneau et permettre l'adaptation à l'entrée de l'onduleur, on utilise un hacheur parallèle survolteur. On inclut donc dans le circuit, un montage RC en parallèle permettant d'élever la tension : on veut passer du 12V délivré par le panneau à 24V nécessaire à l'entrée de l'onduleur.

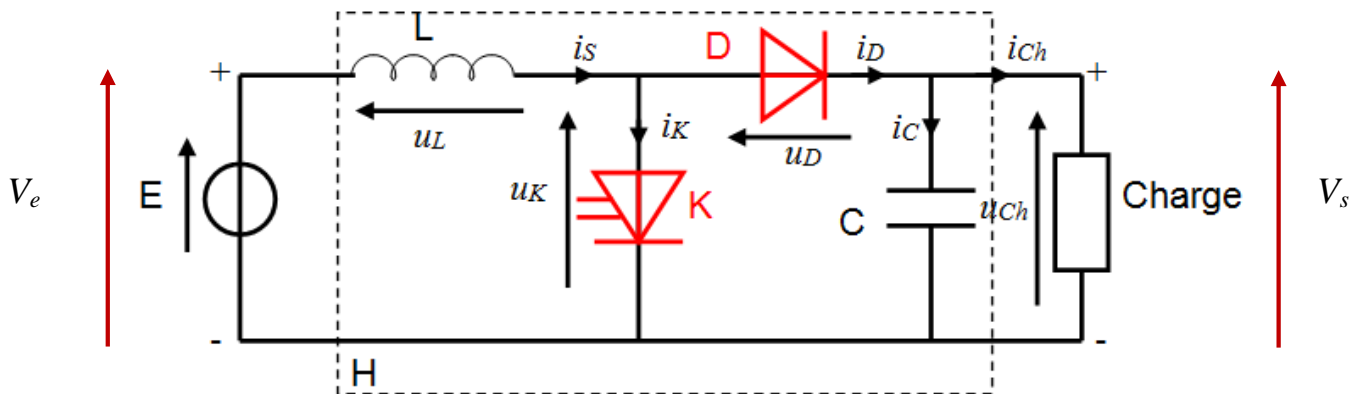


Figure 1 : Schéma du Hacheur Survolteur

Source : http://physique.vije.net/BTS/index2.php?page=hacheur_p2

Données :

- $V_e = E = 12V$ et on veut $V_s = 24V$
- $i_s = 8A$ $I_{S_{MAX}} = I_s \times \sqrt{2} = 11,31$
- Puissance en entrée $P_e = 250 W$ et on veut $P_s = 250 W$ dans l'idéal

En régime établi :

- Le courant moyen dans un condensateur est nul $I_{C_{moy}} = 0$
- La tension moyenne aux bornes d'une inductance est nulle $V_{L_{moy}} = 0$

On peut distinguer deux phases de fonctionnement :

- **De 0 à αT :** Accumulation d'énergie

L'interrupteur K étant fermé, il y a augmentation du courant dans l'inductance L et donc stockage d'énergie sous forme magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est déconnectée de l'alimentation.

$$U_L = V_e = L \frac{di_s}{dt} \rightarrow \Delta I_{Son} = \int_0^{\alpha T} di_s(t) dt = \int_0^{\alpha T} \frac{V_e}{L} dt = \frac{V_e \alpha T}{L}$$

$$\Delta I_{Son} = I_{Smax} - I_{Smin} \rightarrow I_{Smax} = \frac{V_e \alpha T}{L} + I_{Smin}$$

Dimensionnement de l'inductance : $L = \frac{V_e \alpha T}{I_{Smax}} = \frac{V_e \alpha}{I_{Smax} f} = \frac{12 \times 0,5}{11,31 \times 400} = 1,3 mH$

Généralement la fréquence des moteurs en aéronautique est de : $f = 400 Hz$

On suppose $I_{Smin} = 0$

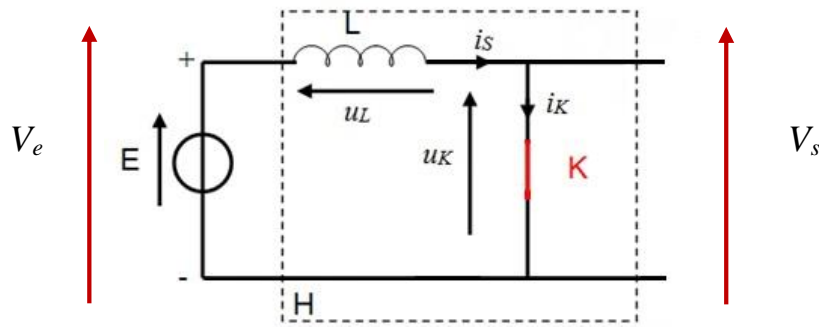


Figure 2 : Schéma du Hacheur Survolteur avec interrupteur fermé

- **De αT à T :** Conduction du courant dans la charge

L'interrupteur K étant ouvert l'inductance se trouve alors en série avec le générateur : leur f.e.m s'ajoutent, c'est l'effet survolteur. Avec ce schéma on met en évidence un transfert d'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité qui va fixer la tension de sortie.

$$U_L = V_e - V_s = L \frac{di_s}{dt} \rightarrow \Delta I_{soff} = \int_0^{\alpha T} di_s(t) dt = \int_0^{\alpha T} \frac{V_e - V_s}{L} dt = \frac{(V_e - V_s)(\alpha - 1)T}{L}$$

$$\Delta I_{soff} = I_{smax} - I_{smin} \rightarrow I_{smax} = \frac{(V_e - V_s)(\alpha - 1)T}{L} + I_{smin}$$

- **Dimensionnement du condensateur :**

$$\text{Charge fournie : } dQ = Ic \times \alpha \times T \text{ et } dV_s = \frac{dQ}{C} \rightarrow C = \frac{dQ}{dV_s} = \frac{Ic \times \alpha \times T}{V_s - V_e} = \frac{Ic \times \alpha}{(V_s - V_e)f} = \frac{11,3 \times 0,5}{(24 - 12) \times 400} = 1,2 \text{ mF}$$

Sans charge en sortie du montage : $I_c = I_s = I_{smax}$

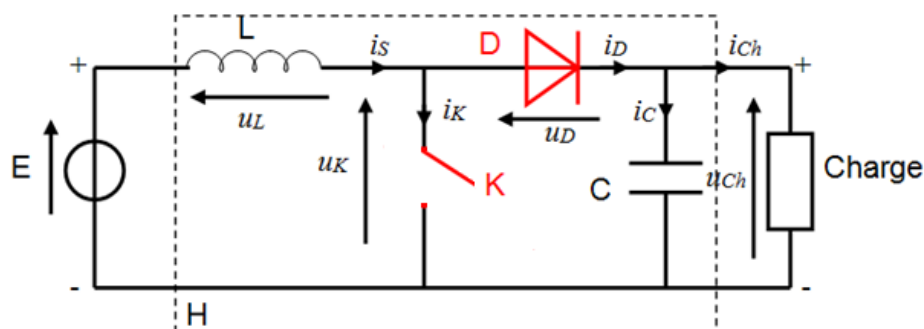


Figure 3 : Schéma du Hacheur Survolteur avec interrupteur fermé

Résultats graphiques :

- On sait que le courant moyen dans un condensateur est nul : $I_{son} + I_{soff} = 0 \rightarrow \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{\alpha - 1}$
 α est le rapport cyclique et on veut $\frac{V_s}{V_e} = 2 \rightarrow \alpha = 0,5$

b. Simulation sous LTSPICE

Nous simulons sur 150ms le hacheur construit sur LTSpice (cf. Annexe C.2). Nous utilisons dans notre cas une source de tension continue 12V pour simuler la tension issue des panneaux photovoltaïques et une charge de 2kΩ pour simuler le reste de la chaîne. Dans notre choix d'interrupteur commandé à l'ouverture et à la fermeture, nous avons

opté pour un transistor de type MOSFET NPN. Cet interrupteur est dans notre cas commandé grâce à une source « Pulse ». Les paramètres du pulse sont présentés *cf. Annexe C.3*.

Nous avons, dans notre cas, fixé un rapport cyclique α tel que $\alpha = \frac{T_{on}}{T} = \frac{0,7}{2} = 0,35$ et paramétré une résistance série de 50Ω .

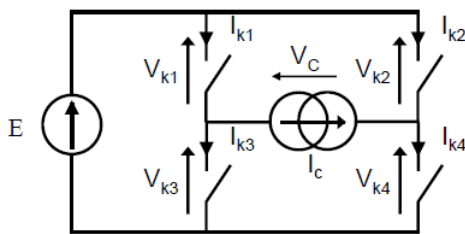
Résultats de la simulation :

Le résultat de la simulation nous est présenté *cf. Annexe C.4*. L'amplitude de la tension d'entrée est bel et bien de 12 V comme nous le souhaitions (*droite verte*). En sortie du hacheur (*courbe bleue*), même s'il existe un laps de temps plus ou moins long, l'amplitude de la tension de sortie est de 24 V . Néanmoins, nous constatons que la tension ne passe pas directement de 12 V à 24 V , mais met un certain temps. En effet, c'est après environ 50 ms que le signal commence à se stabiliser aux alentours de 24 V , mais la tension de sortie ne les atteint réellement qu'à 150 ms . Ce temps de transition peut être dû au temps de retard causé par l'amorçage de la commande du transistor mais également dû aux états de transitions des composants du circuit. De plus, nous remarquons que les deux tensions sont continues. Nous répondons donc, comme il se doit au cahier des charges.

6. Etude de l'onduleur

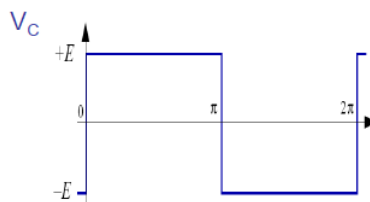
a. Approche théorique

Comme expliquer précédemment, nous avons obtenu avec l'utilisation du hacheur une tension de 24V . Pour aller plus loin dans la chaîne de puissance, nous avons maintenant besoin d'avoir une tension alternative et non plus continue. C'est la raison pour laquelle un onduleur est nécessaire.



Comme visible sur le schéma ci-dessus, nous utilisons des interrupteurs (k_1, k_2, k_3 et k_4) afin de créer la tension alternative voulue aux bornes de la charge. Diverses règles sont à respecter afin d'assurer le bon fonctionnement de l'onduleur, ce qui va donc décider des ouvertures/fermetures des interrupteurs : Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée, donc $K_1 = \overline{K_3}$ et $K_2 = \overline{K_4}$
Une source de courant ne doit jamais être ouverte, donc $K_1 = K_4$ et $K_2 = K_3$
Cette configuration correspond à une commande pleine onde de l'onduleur.

Le résultat escompté est le suivant :



Pour obtenir une tension $V_c = +E$ sur la période $0 < t < T/2$, les interrupteurs k_1 et k_4 seront fermés. Puis pour obtenir une tension $V_c = -E$ sur la période $T/2 < t < T$, les interrupteurs k_2 et k_3 seront fermés.

Afin de commander notre onduleur, nous allons utiliser des transistors MOSFET NPN dont le fonctionnement est décrit *cf. Annexe C.5*.

Dans notre cas, la charge que nous utilisons est résistive et inductive. Les équations électriques sont donc les suivantes :

- sur la période $0 < t < T/2$: $E = L \frac{di}{dt} + Ri$ et $i(t) = \frac{E}{R} - \left(I_M + \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau}}$
- sur la période $T/2 < t < T$: $-E = L \frac{di}{dt} + Ri$ et $i(t) = \left(I_M + \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{t-T/2}{\tau}} - \frac{E}{R}$

Ainsi, l'établissement de notre tension sinusoïdale sera celle décrite *cf. Annexe C.6.*

ATTENTION : les interrupteurs k3 et k4 sont inversés sur ces illustrations.

b. Simulation sous LTSPICE

Nous simulerons l'onduleur avec le schéma proposé (*cf. Annexe C.7*). Nous utilisons ici une source de tension continue 24V pour simuler la sortie du hacheur. Nous mettons en œuvre dans cet étage un onduleur monophasé composé de 4 diodes (D1, D2, D3, D4), de 4 interrupteur bidirectionnels (transistor MOSFET NPN M1, M2, M3, M4) stimulés par 2 pulse. Nous utiliserons une commande pleine-onde et appliquerons des créneaux de tensions sur la charge. De ce fait, les interrupteurs M1 et M4 seront commandés de 0 à αT par le pulse1 et les interrupteurs M1 et M4 seront commandés de αT à T par le pulse2. Nous prélèverons ensuite la tension de sortie aux bornes de la charge RL.

Résultats de la simulation :

Pour notre simulation LTspice, nous avons choisi une résistance $R1 = 500 \Omega$ et une inductance $L1 = 200 \text{ mH}$. La tension d'entrée V1 est de 24 V, tension obtenue à la sortie du hacheur décrit précédemment. Les résultats obtenus avec ce montage sont visualisables *cf. Annexe C.8*. On peut constater que la tension est bien sinusoïdale comme voulu avec une amplitude de 24 V.

7. Etude du transformateur

a. Approche théorique

Grâce au hacheur et à l'onduleur, on a une tension carrée allant de 0 à 24V à partir d'une tension continue. L'objectif maintenant, est d'augmenter cette tension afin d'alimenter correctement nos moteurs, c'est-à-dire avec une tension entre 0 et 240V. On s'est donc tourné vers le transformateur monophasé pour réaliser cette partie.

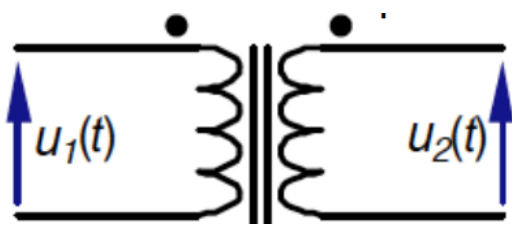


Schéma du transformateur monophasé

Rappels : Le transformateur est un appareil statique qui permet de transférer l'énergie électrique en modifiant les niveaux de tensions et de courant entre deux réseaux de même fréquence. Il est constitué de deux enroulements isolés l'un de l'autre, bobinés sur un circuit magnétique. Il assure aussi l'isolation électrique entre le circuit secondaire du circuit primaire.

Il faut savoir qu'en pratique, la mise en place d'un tel transformateur engendre des pertes au primaire ainsi qu'au secondaire telles qu'on peut le voir sur ce schéma suivant :

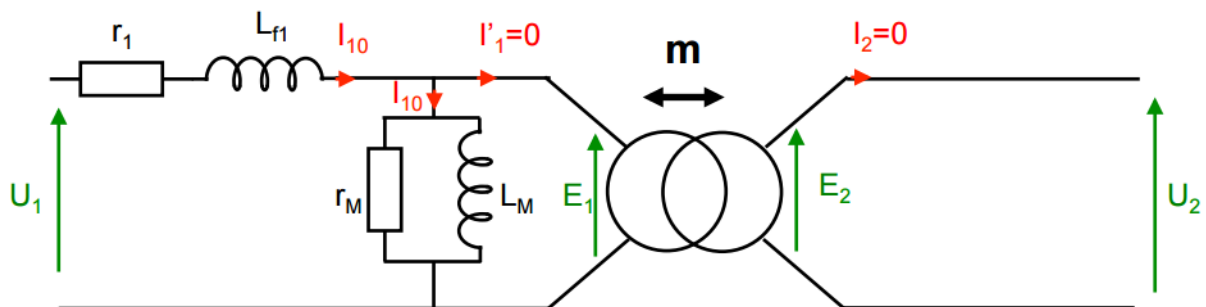


Schéma du transformateur monophasé

Avec r_m la résistance représentant les pertes magnétiques que l'on observe avec le transformateur à vide en pratique (pertes fer, etc...). Pour la modélisation de ce bloc, il faut savoir qu'on s'est placé dans le cas d'un transformateur parfait, c'est-à-dire qu'on ne prend pas en compte les différentes pertes au primaire ou au secondaire présentées ci-dessus, on a ainsi un rendement est égal à 1.

Puisque le transformateur modifie les niveaux de tensions entre le primaire et le secondaire, on a par conséquent un rapport de transformateur m qui est égal au rapport de la tension au secondaire sur la tension au primaire ($m = \frac{u_2(t)}{u_1(t)}$ ou $m = \frac{N_2}{N_1}$ avec N le nombre de spires). Comme on souhaite passer de 24V à 240V, notre rapport de transformation m est égal à 10. Or on a la relation : $\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 = \frac{L_2}{L_1}$

Ainsi, puisqu'on a un rapport de transformation m égal à 10, il nous faut un ratio de 100 entre les deux inductances.

b. Simulation sous LTSPICE

Dans cet étage, nous mettons en œuvre un transformateur monophasé (*cf Annexe C.9*). Nous utilisons une source de tension créneau pour simuler la sortie de l'étage onduleur ainsi qu'un bobinage primaire d'inductance 1mH et un bobinage secondaire d'inductance 0.6H. La charge est ici de type RL pour simuler le futur moteur.

Résultats de la simulation :

Nous utilisons une source de tension créneau pour simuler la sortie de l'étage onduleur ainsi qu'un bobinage primaire d'inductance 1mH et un bobinage secondaire d'inductance 0.1H, puisque notre rapport de transformation est de 10. La charge est ici de type RL pour simuler le futur moteur. Après simulation, on obtient le résultat *cf. Annexe C.10*.

On observe notre tension d'entrée allant de 0 à 24V (celle qu'on va avoir en sortie du hacheur puis onduleur). Puis en bleu foncé notre tension au secondaire, parcourant notre charge RL simulant nos moteurs, allant de 0 à 240V. Le fonctionnement est donc celui attendu et respecte bien le cahier des charges. Ce schéma peut être donc intégré au schéma global pour simuler le fonctionnement intégral de notre système.

8. Modélisation du moteur

a. Approche théorique

Toute la chaîne de puissance a pour but d'alimenter un moteur qui permettra la rotation des hélices de l'avion. Le principe de fonctionnement d'un moteur est le suivant : un champ magnétique B est créé dans le moteur à l'aide d'un aimant ou d'une excitation. Ceci va permettre la mise en circulation d'un courant dans un conducteur et ainsi créer une force mécanique à la sortie.

Le moteur est modélisé par une résistance et une inductance en série comme suit :

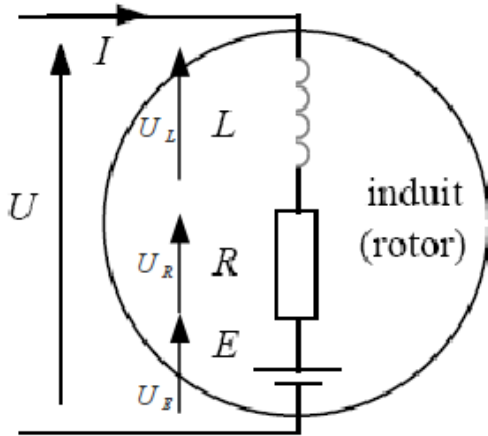


Schéma du moteur

Son équation est la suivante :

$$U(t) = U_L(t) + U_R(t) + U_E(t) = L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot I(t) + E(t)$$

$E(t)$, la force électromotrice, est induite par la variation du champ magnétique B reçu par les bobinages et s'exprime ainsi :

$$E(t) = k \cdot \phi \cdot \Omega(t) = K \cdot \Omega(t)$$

où K est une constante électromagnétique.

Le couple ainsi exercé par le moteur est donné par :

$$C(t) = k \cdot \phi \cdot I(t) = K \cdot I(t)$$

La puissance transmise par le moteur est :

$$\begin{aligned} P_{em}(t) &= C(t) \cdot \Omega(t) \\ &= E(t) \cdot I(t) = U(t) \cdot I(t) - R \cdot I(t)^2 \end{aligned}$$

puissance mécanique
puissance électrique

b. Simulation sous LTSPICE

Dans notre simulation (*cf. annexe C.11*), le moteur est placé à la sortie du transformateur. Les valeurs utilisées pour les éléments de simulation sont les suivantes : $R = 1 \text{ k}\Omega$ et $L = 20 \text{ mH}$.

Ainsi, pour alimenter le moteur, nous avons bien une tension alternatif dû à l'onduleur et d'une valeur de 220 V due au transformateur (*cf. annexe C.12*). Le cahier des charges est donc bien respecté pour l'alimentation du moteur.

D. SIMULATION LTSPICE DE LA CHAÎNE

On peut observer le schéma complet de la chaîne de montage (*cf. annexe D.1*), configurée pour le point de fonctionnement décrit dans le cahier des charges : fonctionnement de jour et sans l'utilisation de batterie. On met en évidence sur ce schéma les différents blocs étudiés précédemment, l'objectif de cette partie est de vérifier si une fois assemblés, ces blocs fonctionnent ensemble pour donner un système fonctionnel.

a. Vérification des différents signaux

Annexe 2.D : Signaux observés à la sortie entre le hacheur et l'onduleur dans le schéma complet

- **En vert :** Signal issu de la source de tension continue de 12 V modélisant les cellules solaires.
- **En bleu :** Signal de sortie du hacheur survolteur. On peut voir que la tension passe bien de 12 V continue à 24 V continu au bout de 70 ms environs.
- **En rouge :** Signal de sortie de l'onduleur. On obtient bien un signal pratiquement carré dont l'amplitude augmente de 0 à 70 ms en même temps que l'amplitude du signal bleu et se stabilise après 100 ms. On obtient finalement un signal carré d'amplitude variant dans l'intervalle $[-29 \text{ V}, 27 \text{ V}]$ au lieu de $[-24 \text{ V}, 24 \text{ V}]$. L'écart entre les deux intervalles étant relativement faible, on peut considérer que cette partie du montage est fonctionnelle.

Annexe 3.D : Signaux observés à l'entrée du transformateur

- **En vert :** Signal entrant sur la borne positive du transformateur. Ce signal est dynamique, presque carré et varie dans l'intervalle $[-1 \text{ V}, 26 \text{ V}]$ à partir de 70 ms. Il a donc une amplitude de 26 V, qui est donc très proche des 24 V souhaités.
- **En bleu :** Signal entrant sur la borne négative du transformateur. Ce signal est dynamique, presque carré et varie dans l'intervalle $[0 \text{ V}, 27 \text{ V}]$ à partir de 70 ms. Il a donc une amplitude de 27 V, qui est donc très proche des 24 V souhaités.

Annexe 4.D : Signal observés en sortie du transformateur

On peut voir que le signal en sortie du transformateur et délivré au moteur est un signal dynamique, presque carré qui varie dans l'intervalle $[-100 \text{ V}, 120 \text{ V}]$ à partir de 100 ms. Il y a donc bien une amplitude de 220 V mais le signal ne varie pas dans le bon intervalle, à savoir $[0 \text{ V}, 220 \text{ V}]$ permettant de faire tourner un moteur 220 / 380.

b. Solution envisageable pour rectifier le problème rencontré en simulation

Pour obtenir une variation du signal en sortie du transformateur entre $[0 \text{ V}, 220 \text{ V}]$ au lieu de $[-100 \text{ V}, 120 \text{ V}]$ il faudrait ajouter une valeur moyenne au signal obtenu, $V_{\text{MOY}} = 100 \text{ V}$. De cette manière le signal oscillera autour de cette valeur moyenne et non autour de 0 V.

Nous avons pensé à utiliser un Amplificateur Opérationnel pour rajouter un offset de 100 V ajouté au montage après le transformateur. Si cette solution est viable en théorie, lors de la simulation les résultats ne sont pas corrects : le signal est complètement déformé.

CONCLUSION

Finalement, au cours de cette étude de cas du Solar Impulse, nous avons pu, grâce au logiciel LTSpice simuler entièrement la chaîne d'alimentation des moteurs, depuis les panneaux photovoltaïques jusqu'aux moteurs. Afin de pouvoir réaliser cette étude, nous nous sommes plus particulièrement intéressés au vol de jour, et plus précisément, la partie du vol de jour avec ensoleillement normal, pendant laquelle les moteurs sont actifs. Ainsi, par cette étude, nous avons pu voir qu'avec des panneaux solaires tels que ceux installés sur le Solar Impulse, il était possible par le biais d'un hacheur parallèle de type BOOST d'obtenir une tension continue de 24V à partir d'une source de courant assimilable à une tension de 12V, en série avec une bobine de 100mH. Par la suite, grâce à l'onduleur, nous avons transformé cette tension continue à 24 V en une tension alternative d'amplitude 24V. Enfin, avec le transformateur, nous avons pu passer d'une tension alternative d'amplitude 24V à une tension alternative d'amplitude 220V, ce qui nous permet d'alimenter les moteurs modélisés comme des moteurs monophasé 220V.

Ainsi, par l'étude de la chaîne simplifiée, nous avons pu mettre en évidence les modules nécessaires pour passer des panneaux solaires du Solar Impulse jusqu'à ses moteurs. Tout cela nous permet donc d'attester de la faisabilité du projet Solar Impulse par beau temps, et de jour, bien que nous n'ayons pas pris en compte tous les paramètres nécessaires à l'étude d'un vol complet de l'appareil, nous avons pu voir les différentes technologies mises au service de l'aéronautique écologique du futur.

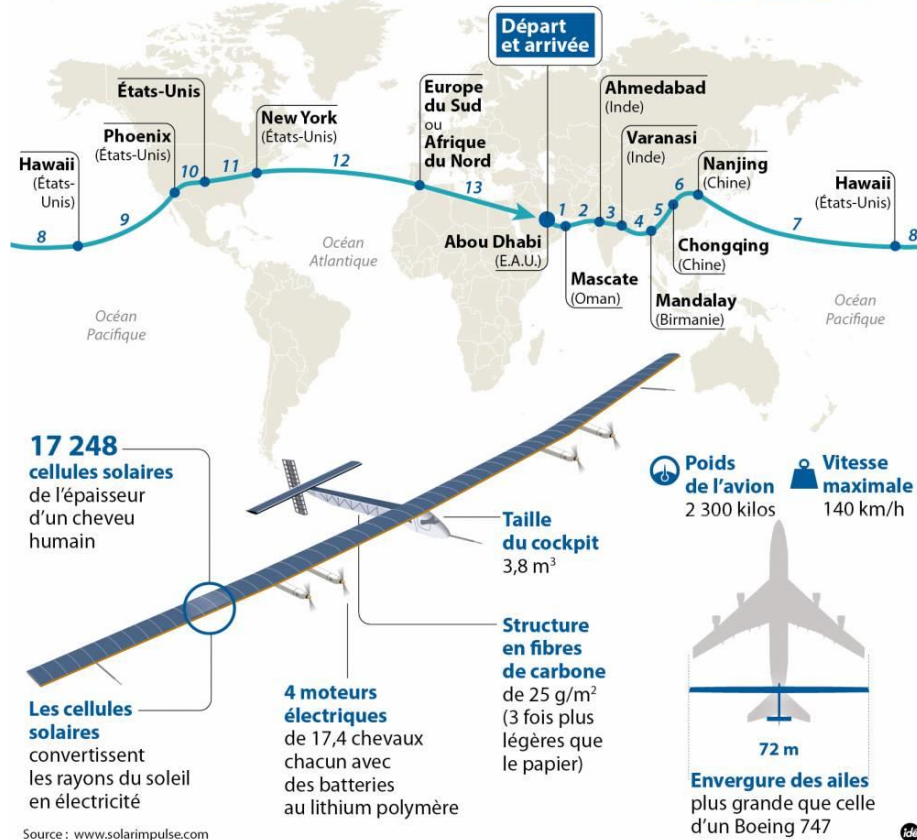
ANNEXES

1. Annexe A.1

Le tour du monde de Solar Impulse 2

Départ fin février ou début mars 2015

35 000 km en 25 jours
de vol et 13 étapes



Parcours du Solar Impulse II

2. Annexe C.2

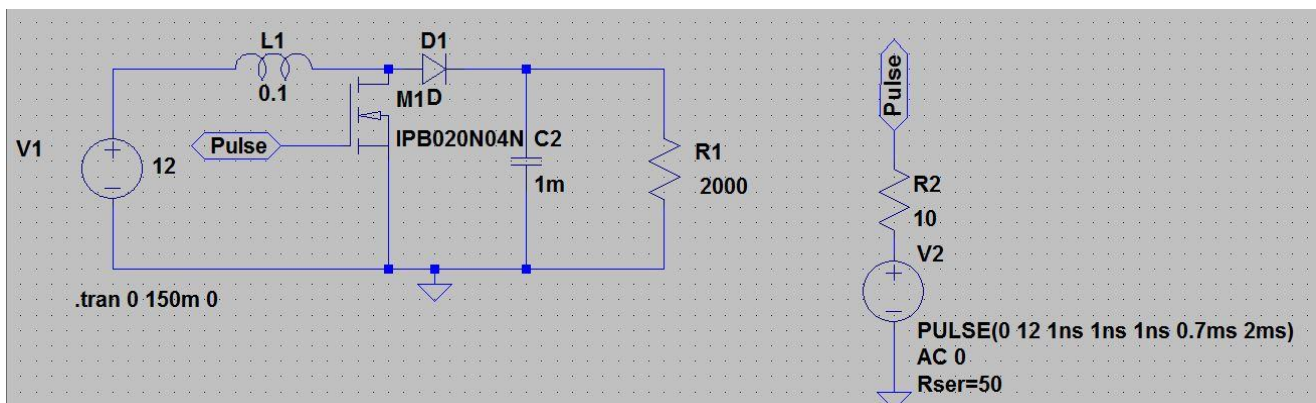


Schéma de simulation du hacheur (étape 1)

3. Annexe C.3

Independent Voltage Source - V2

Functions

- ☐ (none)
- ☒ PULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Period Ncycles)
- ☐ SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi Ncycles)
- ☐ EXP(V1 V2 Td1 Tau1 Td2 Tau2)
- ☐ SFFM(Voff Vamp Fcar MDI Fsig)
- ☐ PWL(t1 v1 t2 v2...)
- ☐ PWL FILE: Browse

Vinitial[V]:

Von[V]:

Tdelay[s]:

Trise[s]:

Tfall[s]:

Ton[s]:

Tperiod[s]:

Ncycles:

Additional PwL Points

Make this information visible on schematic: ☒

DC Value

DC value:

Make this information visible on schematic: ☒

Small signal AC analysis(AC)

AC Amplitude:

AC Phase:

Make this information visible on schematic: ☒

Parasitic Properties

Series Resistance[Ω]:

Parallel Capacitance[F]:

Make this information visible on schematic: ☒

Cancel OK

Paramètres du pulse

4. Annexe C.4



Résultat de la simulation du hacheur

5. Annexe C.5

Figures illustrant le fonctionnement du MOSFET NPN

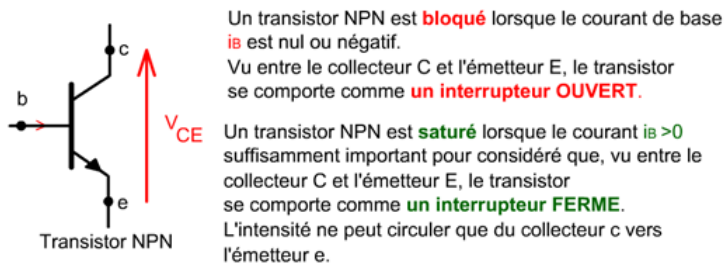
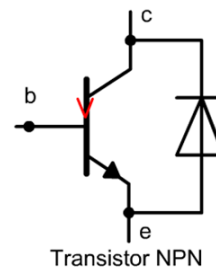
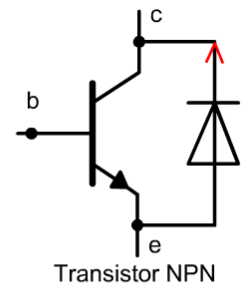


Figure 1



Lorsque l'intensité I est positive, l'intensité circule à travers le transistor du collecteur vers l'émetteur.

Figure 2



Lorsque l'intensité I est négative, l'intensité circule à travers la diode.

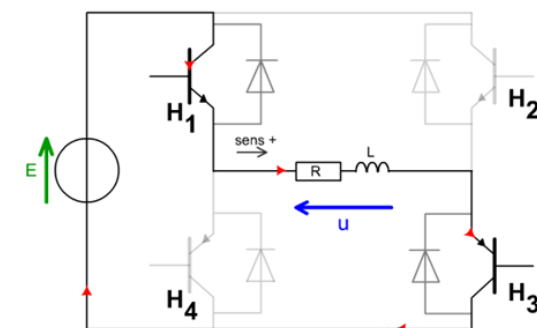
Figure 3

6. Annexe C.6

Figures illustrant la tension sinusoïdale en sortie de l'onduleur

Figure 1

Figure 2



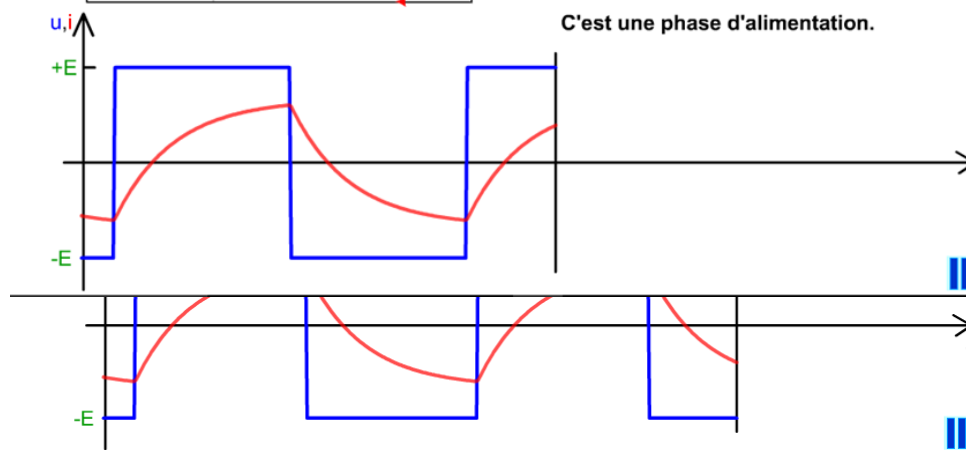
La tension aux bornes de la charge est $u=E$.
Interrupteurs fermés: H1 et H3.

L'intensité circule à travers les éléments T1 et T3.

Pour la charge, la puissance $p=u.i$;

$u>0; i>0 \Rightarrow p>0$; la charge absorbe de la puissance électrique.

C'est une phase d'alimentation.



7. Annexe C.7

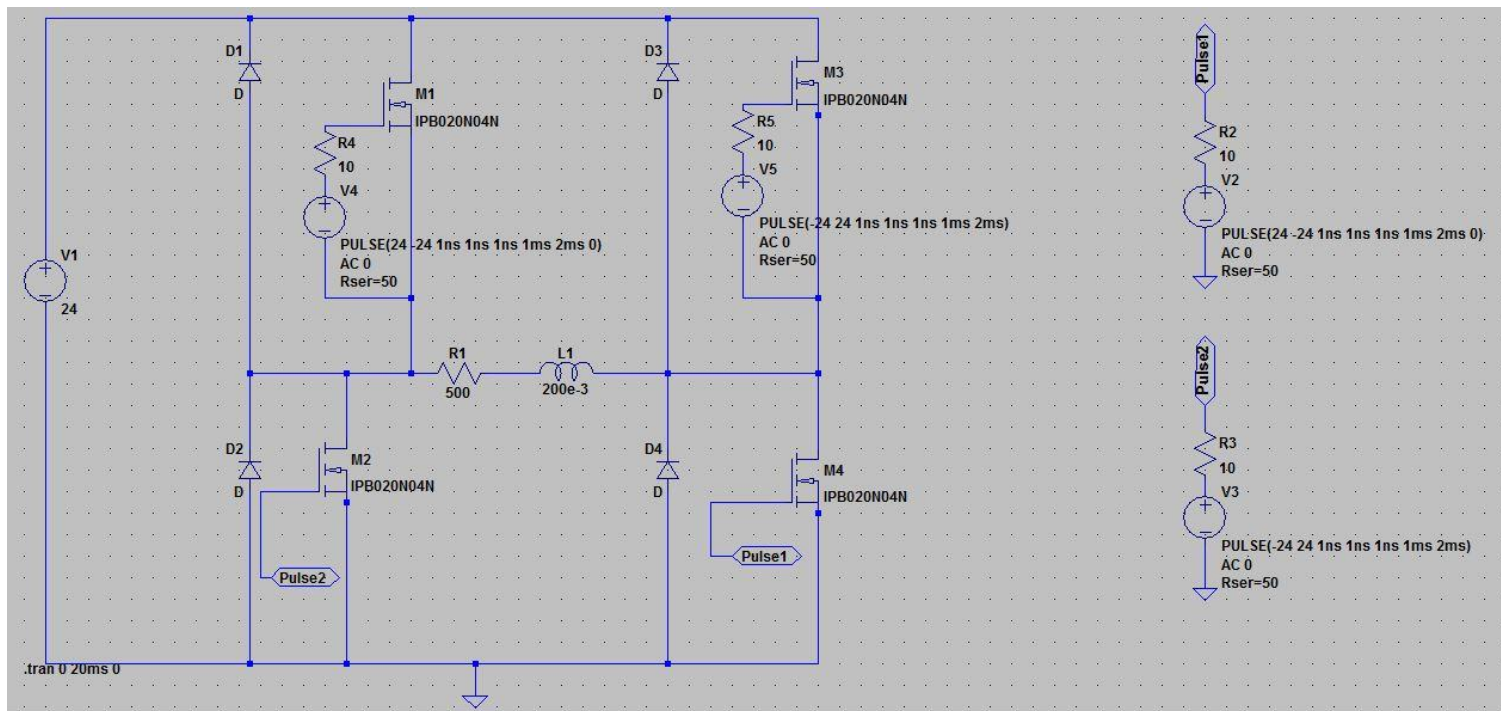
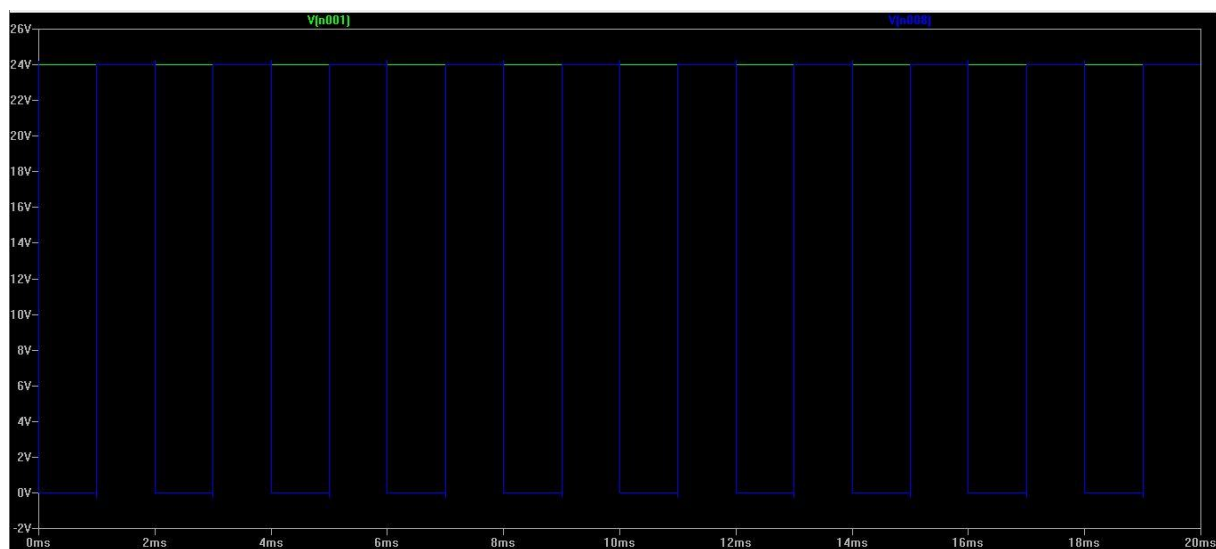


Schéma de simulation de l'onduleur (étage 2)

8. Annexe C.8



Tension aux bornes de la charge

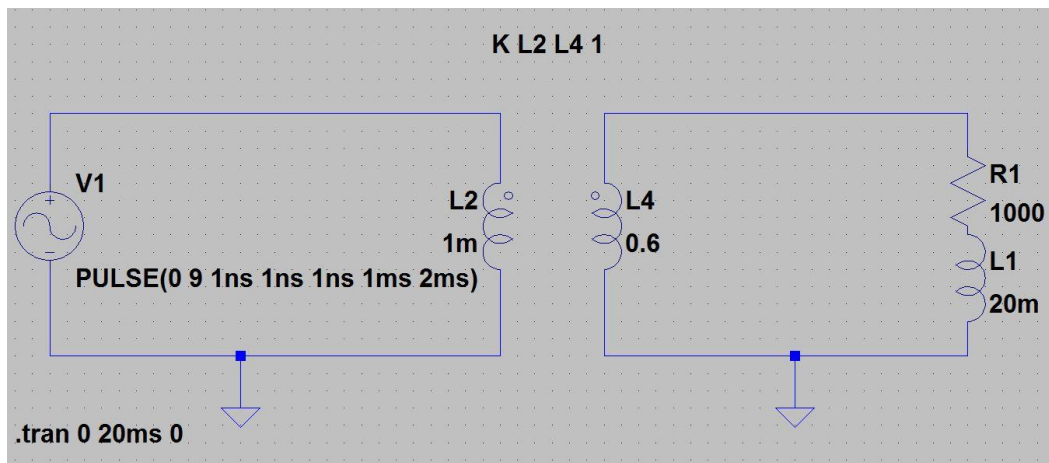
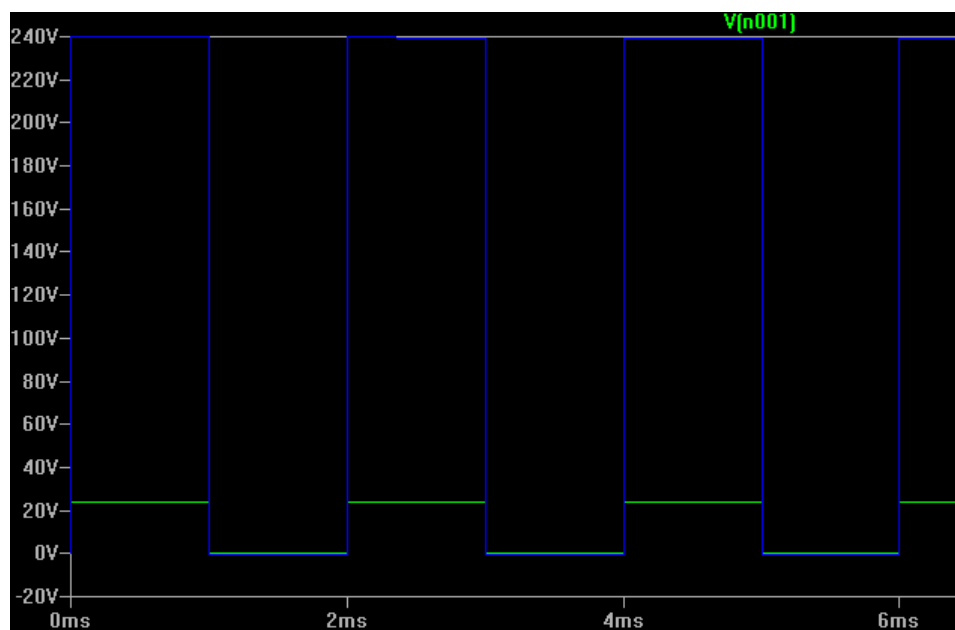
9. Annexe C.9

Schéma de simulation du transformateur (étage 3)

10. Annexe C.10

Résultat de la simulation du transformateur

11. Annexe C.11

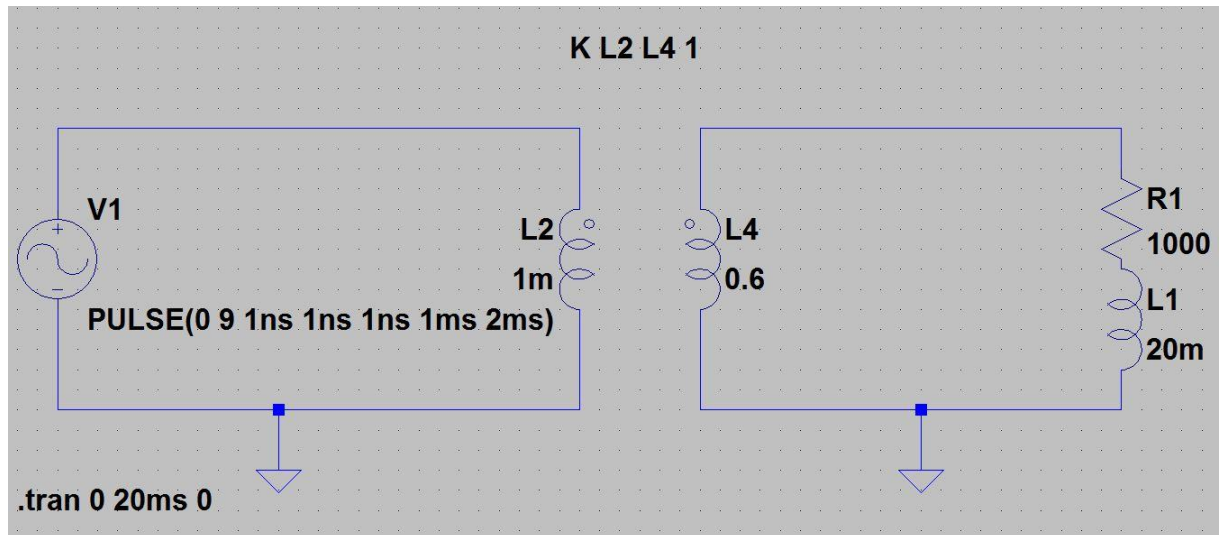
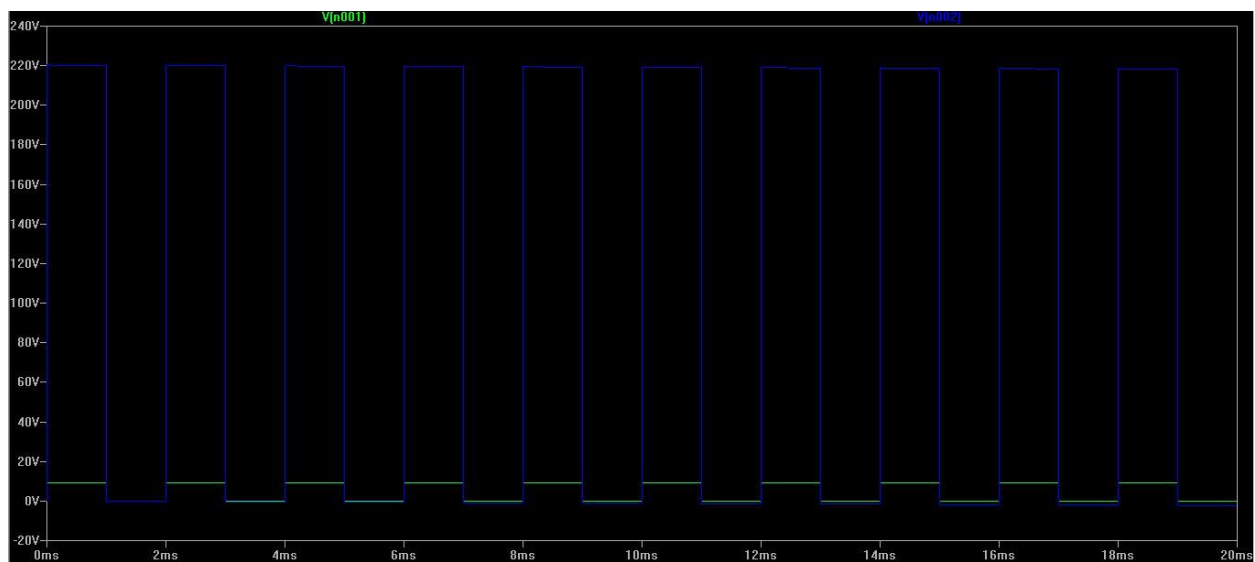


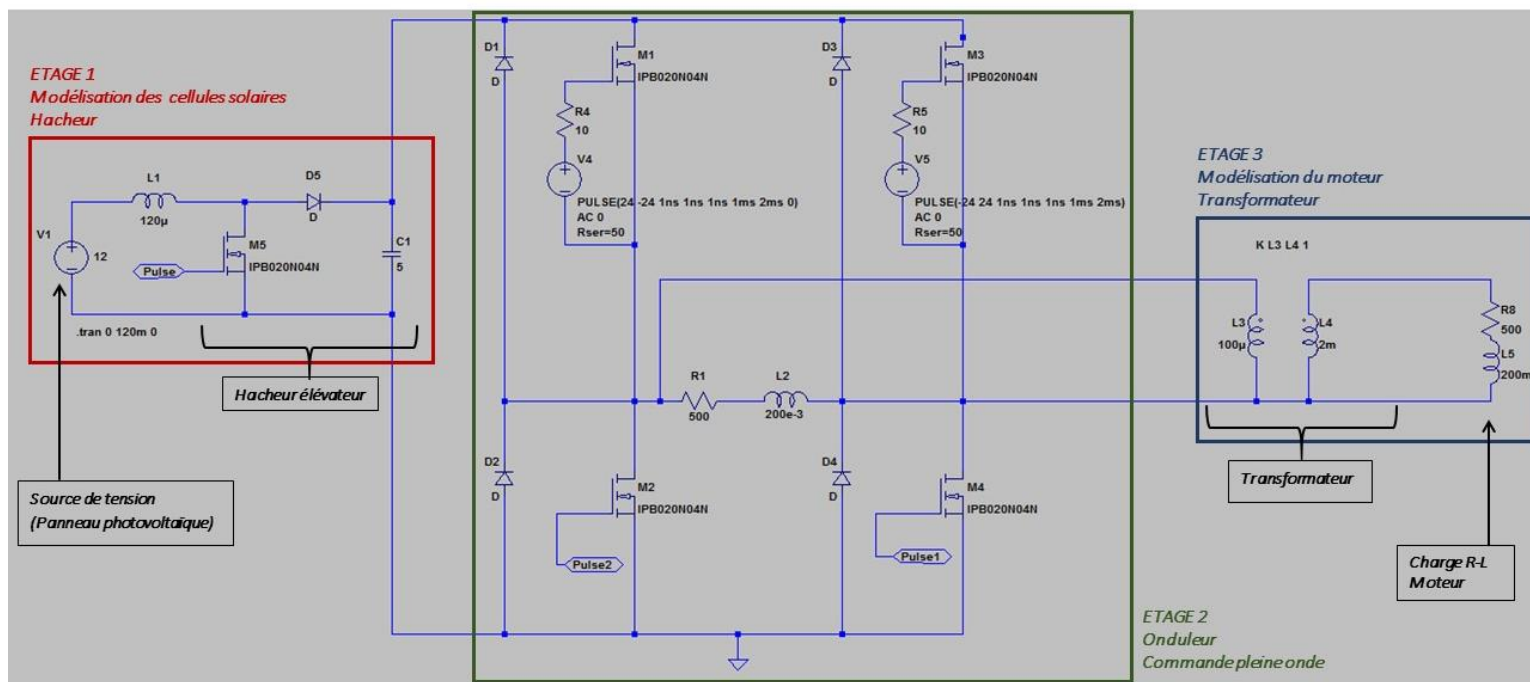
Schéma de simulation du moteur (étage 4)

12. Annexe C.12



Résultat de la simulation du moteur

13. Annexe 1.D



Montage complet de la chaîne de conversion électrique du Solar Impulse

Il a été nécessaire de redimensionner le hacheur et le transformateur lors de la simulation du schéma complet :

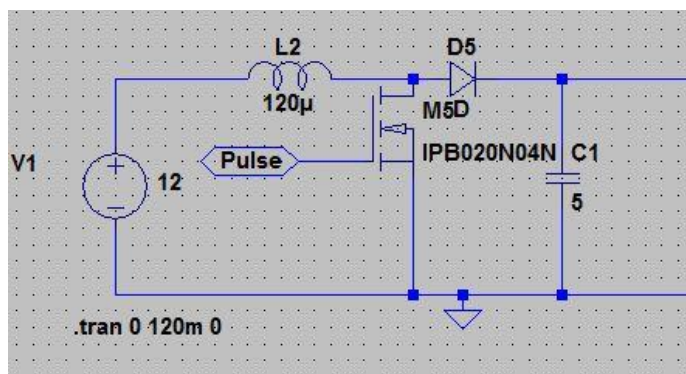


Schéma de simulation du hacheur
(étage 1 – montage complet)

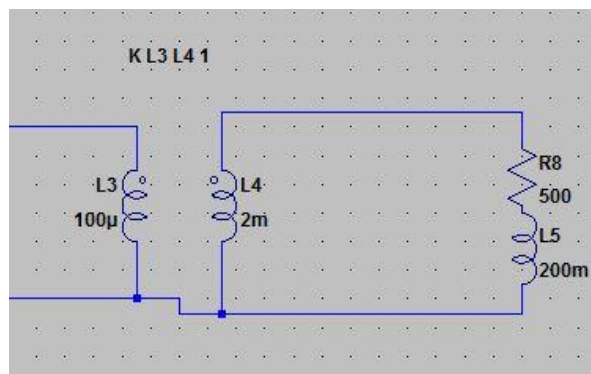
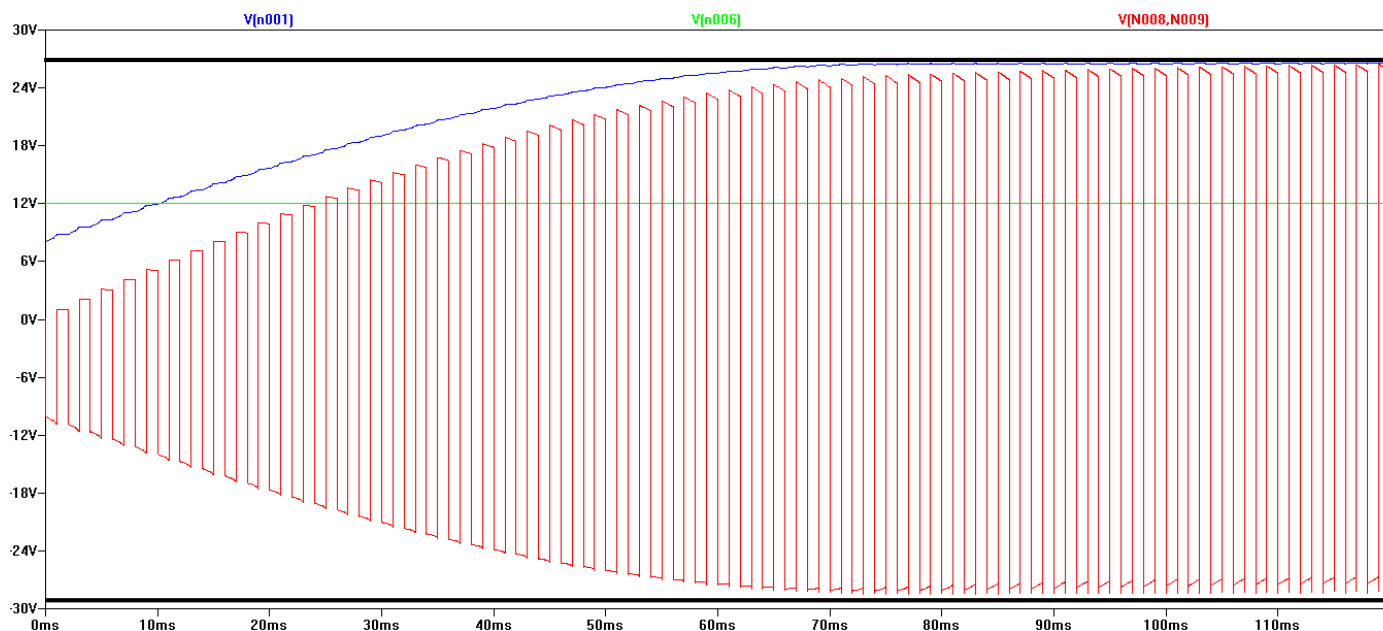


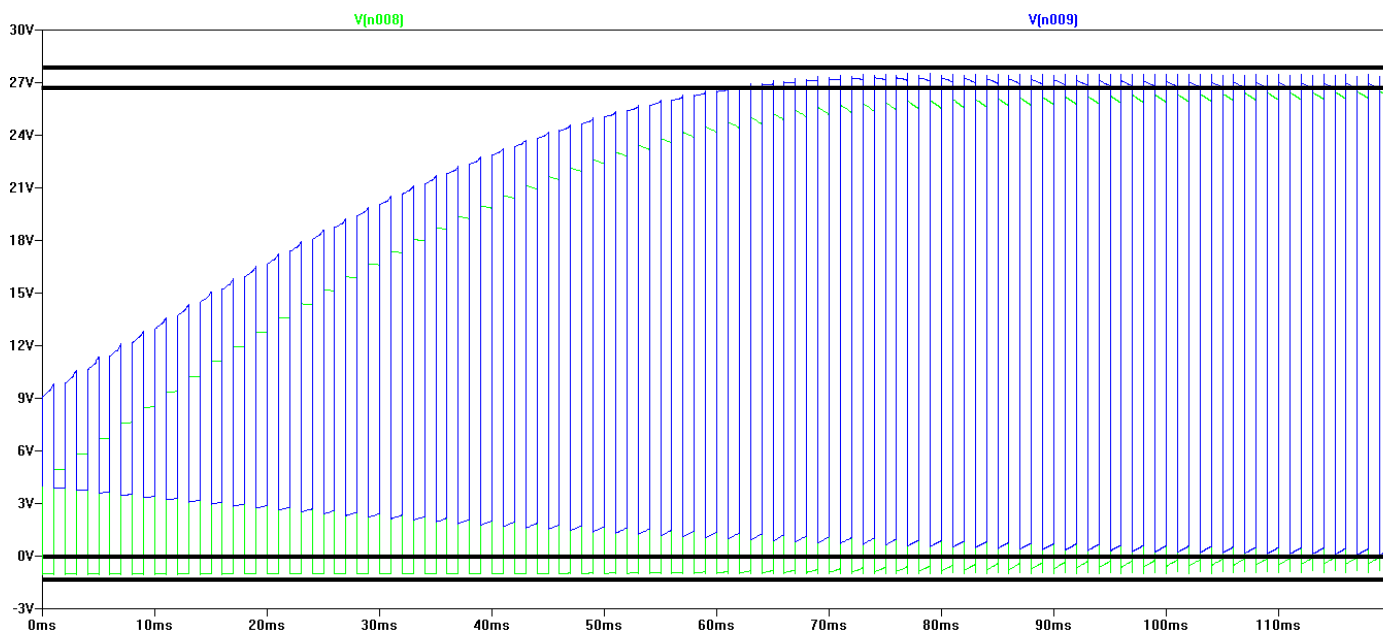
Schéma de simulation du transformateur
(étage 1 – montage complet)

14. Annexe 2.D



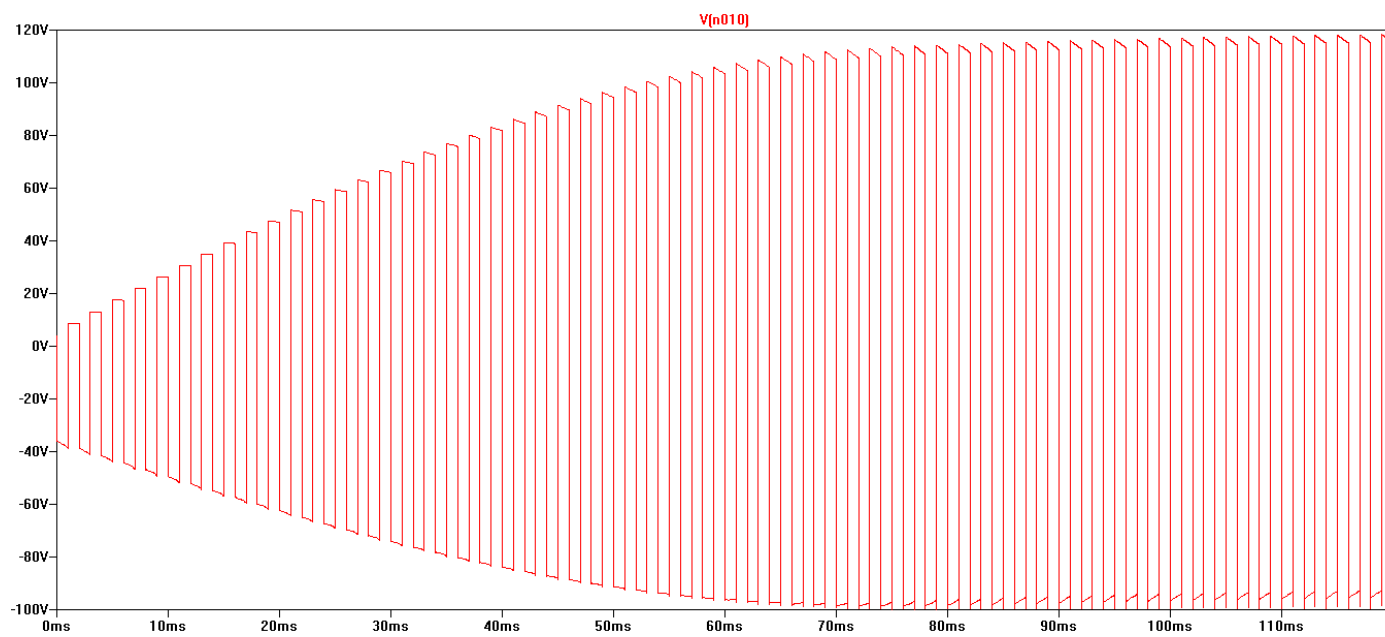
Signaux observés à la sortie entre le hacheur et l'onduleur dans le schéma complet

15. Annexe 3.D



Signaux observés à l'entrée du transformateur

16. Annexe 4.D



Signal observé en sortie du transformateur

SOURCES

Cahier des charges :

- http://bertrandpiccard.com/images/exploration/avion_solaire/3_8_big.jpg
- <http://www.laureus.ch/fr/ambassadeurs/bertrand-piccard/>
- <http://bertrandpiccard.com/exploration-avion-solaire>
- <http://fr.solarship.com/>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Solar_Impulse
- http://www.francetvinfo.fr/sciences/solar-impulse/solar-impulse-un-record-technologique-et-humain_983499.html
- http://www.francetvinfo.fr/sciences/solar-impulse/solar-impulse-2-bloque-a-hawai-jusqu-en-avril-2016_999541.html
- <https://tpeenergiessolaires2012.wordpress.com/par-air/>
- http://www.ordiecole.com/solarimpulse_hb-sia.pdf
- http://www.lepoint.fr/sciences-nature/l-incroyable-tour-du-monde-de-solar-impulse-2-20-01-2015-1898047_1924.php
- <http://www.ecosources.info/actualites/403-l-avion-solaire-solar-impulse-2-reussit-son-premier-vol>

Hacheur :

- Cours de CEE de M. Christian MARTIN
- <http://www.chimix.com/an15/concours15/gene4.html>

Onduleur :

- Cours de CEE de M. Christian MARTIN
- Site internet Fisik Free de M. Yannick MOREL : <http://fisik.free.fr/ressources/onduleur.swf>

Transformateur :

- https://e-campus.cpe.fr/file.php/3152/cours_CEE_2016/2_Pres_CEE_CPE_transformateur.pdf

Moteur :

- Cours de CEE de M. Christian MARTIN
- « Modélisation du moteur à courant continu », Lycée Gustave Eiffel de Dijon (document internet)