



HAL
open science

Systemes de récupération d'énergie pour l'alimentation de capteurs autonomes pour l'aéronautique

Paul Durand-Estèbe

► **To cite this version:**

Paul Durand-Estèbe. Systemes de récupération d'énergie pour l'alimentation de capteurs autonomes pour l'aéronautique. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2016. Français. NNT : 2016ISAT0033 . tel-01481939v2

HAL Id: tel-01481939

<https://laas.hal.science/tel-01481939v2>

Submitted on 26 Sep 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse)

Présentée et soutenue par :

Paul Durand-Estèbe

le 11 mai 2016

Titre :

Systèmes de récupération d'énergie pour l'alimentation de capteurs autonomes pour l'aéronautique

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED GEET : Composants et Systèmes de gestion de l'Énergie

Unité de recherche :

LAAS - CNRS - Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (UPR 8001)

Directeur/trice(s) de Thèse :

BAFLEUR Marise

Directrice de Recherche LAAS-CNRS

BOITIER Vincent

MdC Univ. Paul Sabatier Toulouse III - LAAS-CNRS

DILHAC Jean-Marie

Pr. INSA Toulouse - LAAS-CNRS

Jury :

BASROUR Skandar

Pr. Univ. Joseph Fourier, Grenoble - TIMA

(Rapporteur)

DEJAN Vasic

MdC Univ. Cergy-Pontoise - SATIE, ENS Cachan

(Rapporteur)

ROY Langis

Pr. Carleton University, Ottawa

(Examinateur)

FEAU Julien

AIRBUS

(Invité)

JUGE Sylvain

ALTRAN

(Invité)

TABLE DES MATIERES

Introduction Générale.....	5
La promesse des réseaux de capteurs sans fil.....	5
La récupération d'énergie, l'alimentation de l'électronique de demain	6
L'aéronautique : un secteur d'innovation	7
1. Etat de l'art de l'alimentation des capteurs sans fil	11
1.1. Réseau de capteurs sans fil.....	11
1.1.1. Historique	12
1.1.2. Utilisation actuelle	13
1.1.3. Autonomie énergétique	15
1.2. Stockage de l'énergie	16
1.2.1. Stockage électrochimique.....	17
1.2.2. Stockage électrostatique	20
1.3. Récupération d'énergie	22
1.3.1. Cinétique.....	23
1.3.2. Photovoltaïque	27
1.3.3. Radiofréquence et Rectenna	28
1.3.4. Thermique.....	29
1.4. Architecture d'un circuit de récupération d'énergie	32
1.4.1. Etage d'entrée.....	32
1.4.1.3. Convertisseur DC/DC	34
1.1.1. Stockage.....	36
1.4.2. Etage de sortie.....	37
1.4.3. Composants de protection.....	38
1.5. Problématique aéronautique et cas réels	38
1.5.1. Conclusion sur la récupération d'énergie comme alimentation d'un réseau de capteur sans fil.....	38
1.5.2. Application à l'aéronautique	38
1.5.3. Etude de la récupération d'énergie dans l'aéronautique à travers deux cas concrets.....	40
2. Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol.....	42
2.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	42
2.1.1. Effet photovoltaïque et jonction PN.....	42
2.1.2. Comportement d'un panneau photovoltaïque	44
2.1.3. Performances d'un panneau solaire	46
2.1.4. Différentes Technologies Photovoltaïques.....	48
2.1.4.1. 1 ^{ère} génération : modules massifs en silicium	49

2.1.4.2.	2 ^{ème} génération : couches minces	50
2.1.5.	Utilisation du photovoltaïque pour l'alimentation de capteurs sans fil	54
2.2.	Récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol.....	55
2.2.1.	Présentation du projet et du cahier des charges	55
2.2.2.	Choix des panneaux Photovoltaïques	56
2.2.3.	Choix des supercondensateurs	59
2.2.4.	Conception du circuit de récupération	64
2.2.5.	Essais finaux	78
2.2.6.	Améliorations du système de récupération photovoltaïque	84
2.3.	Conclusion	93
3.	Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique.....	96
3.1.	Physique de la thermoélectricité et modèles d'un module thermoélectrique	96
3.1.1.	Effet Thermoélectrique	96
3.1.2.	Modélisation d'un module thermogénérateur.....	100
3.1.2.1.	Modèle simple	100
3.1.2.2.	Limites du modèle simplifié	101
3.1.3.	Conclusion sur la modélisation par générateur de Thévenin.....	103
3.2.	Convertisseurs thermoélectriques	104
3.2.1.	Technologies des modules thermogénérateurs	104
3.2.2.	Dissipateurs thermiques.....	107
3.2.3.	Convertisseurs DC/DC pour thermogénérateurs.....	108
3.3.	Cas d'application : le système HMEC pour l'alimentation de capteurs de SHM dans le projet Coralie..	111
3.3.1.	Présentation du contexte de l'étude	111
3.3.2.	Conception de l'ensemble mécanique du TEG.	117
3.3.3.	Conception du circuit électronique de gestion du TEG	128
3.4.	Intégration au sol du système SHM	149
3.5.	Installation dans le mât réacteur	151
3.6.	Conclusion	152
	Conclusion générale	155
	Liste de publications	157
	Bibliographie	158

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

LA PROMESSE DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN, *Wireless Sensor Networks*), qui permettent de mettre en place des systèmes de mesure automatiques à grande échelle, se sont fortement développés lors de la dernière décennie, grâce au développement des technologies MEMS qui ont facilité leur fabrication et leur intégration. Chaque nœud est petit, peu cher à fabriquer et présente une puissance de calcul et de traitement suffisante pour permettre de détecter, mesurer et récupérer des informations de son environnement, pour enfin transmettre ces données à travers le réseau et finalement atteindre l'utilisateur final, homme ou machine.

Depuis les premières idées de réseaux de capteurs sans fil, l'engouement pour ces dispositifs ne tarit pas, et l'avenir est aujourd'hui représenté par le concept de Smart Dust [1], c'est-à-dire de capteurs de taille millimétrique comparables à de la poussière et visant un déploiement à large échelle. Cette technologie, qui reste encore grandement à développer, est très prometteuse : l'entreprise en conseil et en recherche Gartner l'a fait entrer en 2013 dans sa « Hype Curve »[2], sa courbe de développements des technologies futures les plus porteuses. La courbe mise à jour pour en 2015 est visible Figure 1.

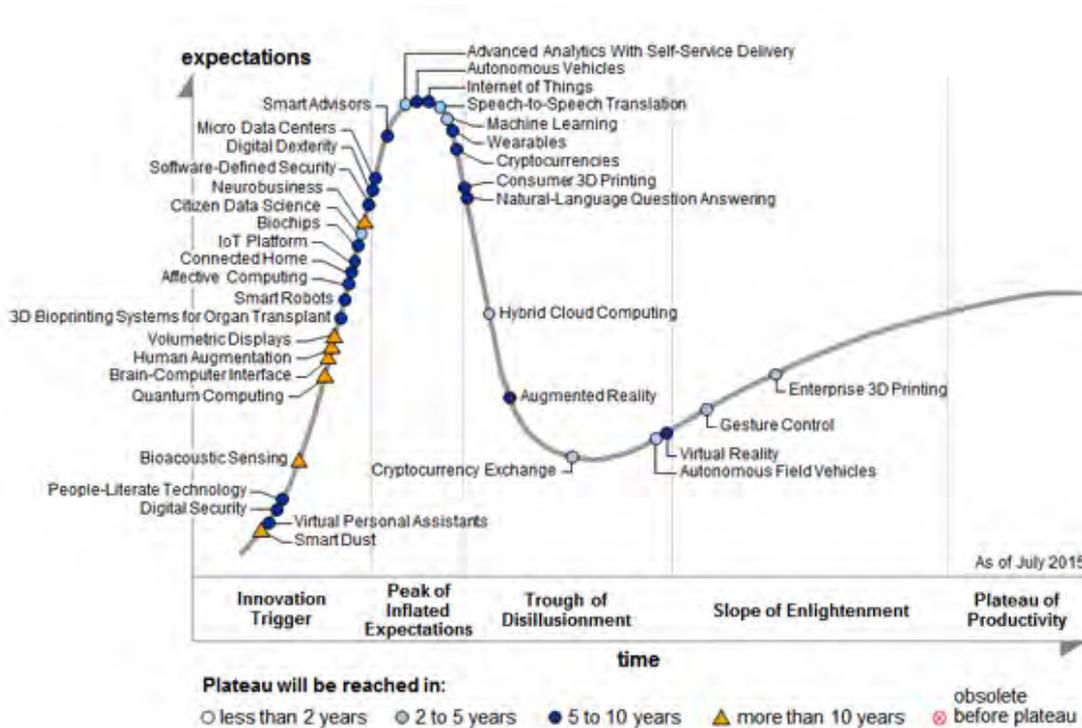


Figure 1. Courbes de développement des technologies prometteuses de la société de conseil et de recherche Gartner en 2015 [1].

Mais sans parler des futurs « Smart Dust », les réseaux de capteurs sans fil sont aujourd'hui performants et abordables et promettent d'offrir une solution de mesure et de surveillance de n'importe quel environnement, continuant ainsi la tendance actuelle qui cherche à collecter un maximum de données afin d'optimiser les machines et les appareils que nous utilisons : par exemple dans le domaine automobile où une voiture embarque aujourd'hui

60 à 100 capteurs (pour l'instant câblés) [3] qui servent tant au confort passager qu'à l'optimisation du fonctionnement du moteur.

La qualité « sans fil » d'un WSN est l'aspect de cette technologie qui permettrait de continuer l'intégration d'un plus grand nombre de capteurs dans nos environnements, mais est également le verrou technologique le plus limitant : une absence de connexion filaire implique forcément une autonomie énergétique, ce qui est d'autant plus problématique qu'une communication sans fil provoque une surconsommation d'énergie.

Plusieurs axes de recherche tentent d'apporter une solution à ce problème : améliorer les technologies de fabrication et les protocoles de communication radio pour diminuer la consommation des nœuds, développer les réservoirs d'énergie comme les batteries ou les piles à combustible pour augmenter leurs performances ou capturer l'énergie ambiante présente dans l'environnement du capteur afin de l'alimenter.

LA RECUPERATION D'ENERGIE, L'ALIMENTATION DE L'ELECTRONIQUE DE DEMAIN

La récupération d'énergie consiste à transformer l'énergie ambiante présente dans l'environnement du capteur en électricité dans le but de lui fournir l'énergie nécessaire à son fonctionnement. Les formes d'énergie les plus couramment utilisées sont la lumière, les vibrations (et le mouvement de manière générale) et les différences de température. Ces sources se caractérisent bien souvent par une densité d'énergie assez faible et une disponibilité intermittente au cours du temps (selon la durée du jour, du fonctionnement d'un moteur, etc.).

Les transducteurs qui servent à convertir ces énergies reposent en général sur des technologies relativement anciennes (les principes ont été découverts il y a plusieurs dizaines, voire plus d'une centaine d'années), mais avec les progrès des MEMS et des technologies de fabrication de la microélectronique, les dispositifs actuels ont vu leur rendement grandement s'améliorer. De plus, grâce à ces mêmes technologies, la consommation des capteurs et de l'électronique en général est en baisse continue, et il est désormais possible de fabriquer des systèmes entièrement autonomes en énergie, s'alimentant seulement avec l'énergie présente dans leur environnement.

Néanmoins, si alimenter un système par capture d'énergie est techniquement faisable, ce n'est pas forcément la solution optimale pour une application donnée. Si des câbles peuvent être installés sans contrainte supplémentaire, cette solution sera souvent plus avantageuse. De même, les performances des stockages électrochimiques (piles ou piles à combustible) ne cessent de s'améliorer et l'utilisation d'une pile seule peut fournir une autonomie suffisante pour alimenter un capteur pendant la durée de vie voulue, sans nécessiter de conception supplémentaire liée à l'utilisation d'un récupérateur d'énergie.

Si aujourd'hui, dans la majorité des applications, la capture d'énergie n'atteint pas encore les performances suffisantes pour remplacer les stockages électrochimiques, les deux méthodes d'alimentation peuvent être utilisées ensemble : cette complémentarité permet d'augmenter l'autonomie du système par rapport à la simple utilisation d'une pile et pallie le problème de l'intermittence de la source d'énergie.

Enfin, dans certains environnements où l'utilisation d'un stockage électrochimique est impossible pour des raisons de sécurité ou de conditions inadéquates, la récupération d'énergie est le seul moyen d'alimentation des systèmes sans fil : c'est certainement dans ces applications de niche qu'est le plus utile le concept de capture d'énergie pour l'alimentation de systèmes autonomes.

La Figure 2 résume ces différents choix possibles d'alimentation et propose un diagramme simple pour aider au choix lors de la conception d'un système sans fil, selon les contraintes qu'impose l'application.

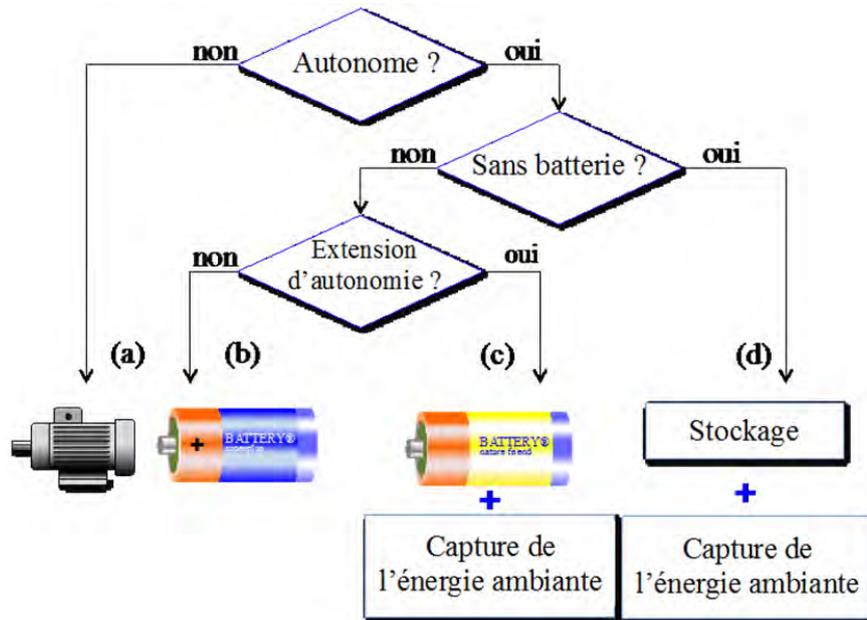


Figure 2. Les différents choix pour l'alimentation d'un noeud autonome (a) solution filaire (b) stockage électrochimique (c) stockage électrochimique et extension d'autonomie (d) récupération d'énergie ambiante seul.

La récupération d'énergie trouve donc aujourd'hui sa place soit comme extension d'autonomie, soit comme source d'alimentation principale, pour l'instant réservée à des applications de niche. C'est sur ce deuxième type d'application que nous avons travaillé et dont nous présentons les travaux dans ce manuscrit.

Le futur de cette technologie est néanmoins très prometteur et elle pourra s'intégrer dans un grand nombre d'applications : dans les objets autonomes à basse consommation comme les réseaux de capteurs sans fil ou au sein de systèmes plus gourmands, pour contribuer à une partie de l'alimentation des systèmes électroniques (des brevets sont aujourd'hui déposés pour intégrer des cellules solaires au sein des écrans de smartphones [4]). Le cabinet Gartner a classé la récupération d'énergie comme une technologie très prometteuse en cours de développement [5]. Nous allons maintenant nous intéresser au potentiel de cette technologie dans le cadre d'une application pour l'alimentation de capteurs sans fil dans l'aéronautique.

L'AERONAUTIQUE : UN SECTEUR D'INNOVATION

Depuis l'invention des appareils volants plus lourds que l'air, c'est-à-dire des premiers avions au début du XX^{ème} siècle, les innovations dans ce domaine ont été continues, concernant par exemple les moyens de propulsion (moteur à piston, turbopropulseurs, réacteurs et statoréacteurs), les matériaux utilisés (toile et bois, alliages métalliques, matériaux composites, etc.) ou les commandes de vol (transmission électrique, automatisation et informatisation du pilotage, etc.).

Aujourd'hui, le secteur de l'aviation civil fait face à plusieurs défis qui l'obligeront à continuer ces innovations techniques :

- La concurrence est féroce entre les acteurs du secteur, que ce soit entre les deux avionneurs majeurs, Boeing et Airbus, ou avec le développement de la fabrication d'appareils par les pays émergents (Chine avec Comac, Brésil avec Embraer, etc.).
- Les réglementations sont de plus en plus exigeantes, notamment en termes de protection de l'environnement (consommation de carburant, bruit).

Introduction Générale

Ces contraintes forcent le secteur à l'innovation en matière de réduction des coûts de développement, de maintenance, de réduction de la consommation de carburant et d'amélioration du confort des passagers.

Les réseaux de capteurs feront sans doute partie de la réponse technologique qui sera apportée à ces défis en trouvant une multitude d'usages : améliorer le confort de la cabine ou la connexion d'équipements électroniques personnels, aider à la décision au profit des pilotes, à l'identification du fret et de tous les équipements amovibles (ex : gilets de sauvetage) et de la charge utile (cargo et ravitaillement), par exemple grâce à des étiquettes RFID améliorées.

Ces réseaux de capteurs pourront également trouver un usage pour le suivi de vieillissement de la structure de l'aéronef (SHM, *Structural Health Monitoring*). En effet, un avion évolue dans un environnement sévère aussi bien en externe (variations de températures et de pression, humidité, vibrations, poussières, chocs aviaires, etc.) qu'en interne (températures en zones moteur et freins, haut niveau de bruit autour des moteurs, efforts mécaniques très importants sur la structure, etc.). Les opérations d'inspection et de maintenance sont alors essentielles et sont organisées périodiquement, en garantissant une importante marge de sécurité pour planifier le remplacement de pièces qui fatigueraient. Un réseau de capteurs installé dans l'appareil permettrait de décider de ces changements uniquement lorsque cela serait nécessaire, économisant ainsi du temps (en particulier pour les zones difficiles d'accès) et pourrait permettre une certaine réduction des marges de sécurité pour alléger les pièces, ou effectuer un remplacement moins souvent, puisque l'état de ses composants serait connu en temps réel. Enfin, plus ponctuellement, des réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés lors des phases de tests et de caractérisation de l'appareil pour faciliter le déploiement de l'instrumentation.

Ces réseaux de capteurs doivent obligatoirement être sans fil afin de simplifier leur installation, leur maintenance, et de limiter au maximum la masse qu'un tel système ajouterait à l'appareil, les câbles dans l'aviation civile atteignant des masses telles que ceux utilisés dans l'A380 d'Airbus sont réalisés partiellement en aluminium et non en cuivre (voir une comparaison des longueurs de câbles Figure 3). De plus, les appareils actuels utilisent de plus en plus de matériaux composites qui, contrairement aux métaux, ne peuvent pas être percés pour ménager un passage de câble.

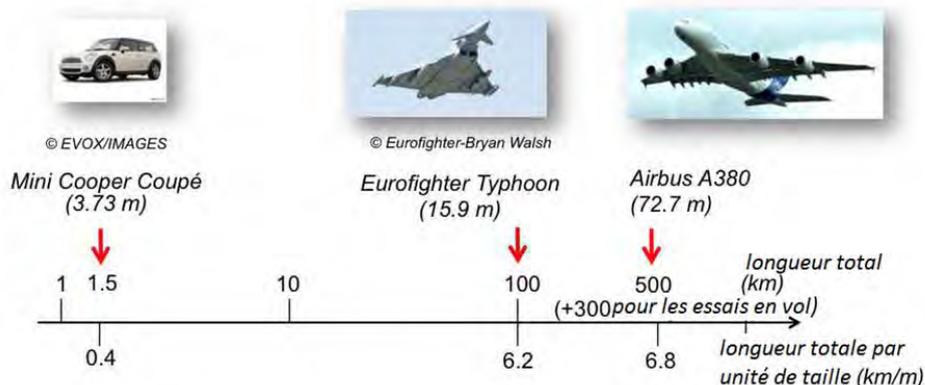


Figure 3. Comparaison de la longueur totale de câble dans une voiture Mini Cooper Coupé, un avion de chasse Eurofighter Typhoon et un avion civil Airbus A380.

Les conditions extrêmes, principalement de température, qui règnent aux endroits où il est pertinent de placer des capteurs, rendent bien souvent impossible l'utilisation de batteries électrochimiques, laissant la récupération d'énergie comme seule solution possible pour l'alimentation d'un WSN pour ce cas d'utilisation.

Introduction Générale

En collaboration avec Airbus, nous avons mené deux études de conception d'alimentations par récupération d'énergie pour des capteurs autonomes, la première dans le cadre d'une instrumentation d'essai sur un A321, la seconde dans le cadre du développement d'un système de SHM dans le mât réacteur d'un A380. Ces deux projets ont été menés en partenariat avec AIRBUS GROUP, d'une part en collaboration avec une équipe des essais en vol par le biais d'un contrat direct et d'autre part, dans le cadre du projet Investissements d'Avenir CORALIE, respectivement.

Dans ce mémoire, nous présentons d'abord un état de l'art sur les différentes technologies de récupération et de stockage de l'énergie dans le cadre de l'alimentation d'un réseau de capteur sans fil afin de pouvoir choisir les solutions optimales pour les études que nous avons menées.

Nous présentons ensuite notre conception d'une alimentation photovoltaïque de capteurs de pression autonomes situés sur l'extrados d'une aile. Dans la dernière partie nous exposons nos travaux sur la conception d'une alimentation thermoélectrique pour un système de SHM situé dans la zone moteur. Nous concluons finalement en identifiant quelques voies pour la poursuite de nos travaux, d'abord dans le domaine global des réseaux de capteurs sans fil et sans batterie, et ensuite plus précisément dans le contexte d'applications aéronautiques.

I. ETAT DE L'ART DE L'ALIMENTATION DES CAPTEURS SANS FIL

I. ETAT DE L'ART DE L'ALIMENTATION DES CAPTEURS SANS FIL

Le concept de capteur sans fil et de réseau de capteurs sans fil est très à la mode grâce à la promesse d'applications et d'améliorations dans tous les domaines de notre monde moderne, que ce soit dans les milieux industriels pour l'amélioration des chaînes de production ou la surveillance de grands espaces par exemple, ou pour les produits de grande consommation à travers les capteurs intégrés dans les voitures ou les objets de *quantified self* (« mesure de soi », mesure de ses paramètres biologiques pour un traitement informatisé).

Ces capteurs sont par définition autonomes et la question de l'alimentation en énergie est régulièrement oubliée dans la présentation de cette technologie, alors que c'est un frein majeur à leur déploiement massif. En effet, un appareil mesurant l'activité d'un volcan dont il faudrait changer la pile tous les jours n'a que peu d'intérêt par rapport à une inspection humaine. Un capteur servant à détecter des faiblesses éventuelles dans la structure d'un pont ou d'un avion n'a d'intérêt que s'il permet une réduction de l'intervention humaine.

Dans ce chapitre, nous présentons donc un état de l'art des différents moyens d'alimentation de capteurs sans fil autonomes en insistant sur les systèmes de récupération d'énergie. Nous présentons d'abord un rapide historique des capteurs et réseaux de capteurs sans fil, de la naissance des premiers concepts de capteurs autonomes des années 1960 à nos jours, afin d'appréhender les besoins de ces systèmes.

Ensuite, nous passons en revue les sources d'énergie utilisables pour l'alimentation énergétique, par stockage électrochimique ou grâce à des récupérateurs d'énergie en détaillant le fonctionnement de ces méthodes pour comprendre leurs intérêts et leurs limites. Enfin, nous expliquons le fonctionnement d'un circuit de récupération d'énergie en montrant les concepts mis en œuvre, de l'interface avec le transducteur à l'étage d'alimentation de la charge en passant par la gestion du stockage d'énergie.

Nous terminons en recadrant l'utilisation des capteurs sans fil autonomes à l'aéronautique et à l'intérêt de la récupération d'énergie dans ce domaine pour introduire les travaux que nous avons réalisés sur deux prototypes fonctionnels de récupérateurs destinés à être installés sur avion.

I.1. RESEAU DE CAPTEURS SANS FIL

Un réseau de capteurs associe des systèmes (appelés capteurs, bien qu'intégrant bien plus de fonctions que la simple mesure) constituant les nœuds de ce réseau. Chaque nœud doit être capable de transmettre une information, élaborée à partir de son ou de ses capteurs, vers un point de collecte. Un nœud d'un réseau de capteurs possède au moins :

- un capteur
- un module de traitement du signal, analogique (traitement de la sortie du capteur, conversion analogique numérique, etc.) et numérique (filtrage, mémorisation, horloge, modulation, etc.)
- un dispositif de communication
- une source d'énergie

Si pendant longtemps, l'acheminement de l'information et l'alimentation électrique étaient réalisés par un système de câblage coûteux et encombrant, le développement de l'électronique et des télécommunications a rendu les capteurs actuels petits (un seul circuit intégré peut incorporer les fonctions de mesure, traitement de l'information et communication), peu chers et peu consommateurs d'énergie. Ces évolutions permettent de fabriquer des capteurs autonomes en énergie (grâce à une réserve finie ou rechargeable) communiquant sans fil par onde radio. La transmission au point de collecte peut être directe, ou par sauts : chaque nœud pouvant jouer le rôle de relais ou de routeur.

Un grand nombre de topologies et de stratégies de routage entre ces nœuds ont été développées pour répondre à différents besoins [6], nous montrons quelques exemples Figure 4. En effet, les algorithmes de routage déterminent la vitesse de transmission de l'information, la robustesse du réseau en cas de nœud défaillant et donc sa résilience aux perturbations, la consommation énergétique des nœuds, etc.

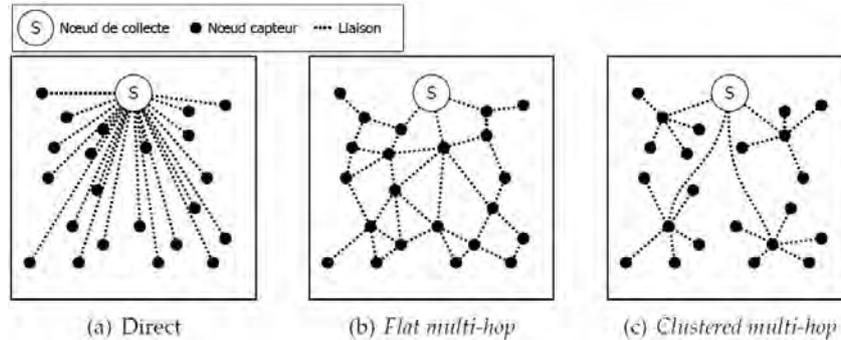


Figure 4. Différentes topologies de réseaux de capteurs sans fil [7], [8].

1.1.1. HISTORIQUE

Les premières réalisations de capteurs sans fils remontent à la guerre froide. Pour surveiller les sous-marins ennemis, les Etats-Unis ont utilisé des bouées flottantes équipées de microphones transmettant en direct le son enregistré par radio qui était ensuite traité par un opérateur [9]. Pendant la guerre du Vietnam, des capteurs sismiques sans fils transmettaient un signal de présence quand ils détectaient des mouvements de véhicules ou de personnes grâce au mouvement du sol [10], [11] (Figure 5). Ce deuxième exemple intègre déjà toutes les fonctions d'un capteur sans fil : autonomie énergétique, mesure, traitement et communication.

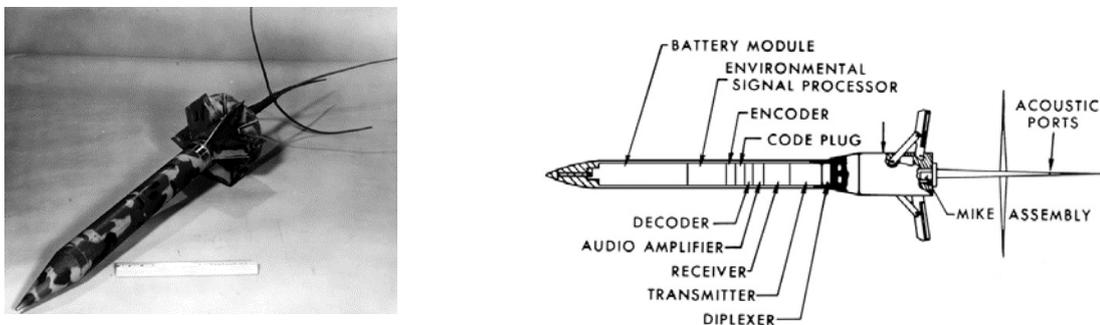


Figure 5. Photo et schéma de principe d'un capteur sismique utilisé pendant la guerre du Vietnam [9], [10].

Les recherches sur le concept de réseau de capteurs sans fil (où les nœuds communiquent entre eux) sont apparus dans les années 1980 quand la DARPA, une agence de recherche militaire des Etats-Unis, lance un projet sur les réseaux de capteurs distribués (Distributed Sensor Network, DSN). Ces premières tentatives de réseaux sont peu performantes, et comme les capteurs sont gros (au mieux la taille d'une boîte à chaussures), filaires ou d'autonomie réduite, le nombre d'applications concrètes reste limité [12].

A partir de la fin des années 1990, l'avancée des technologies permet d'envisager la fabrication sur une seule puce de petits capteurs intégrant les différentes fonctions de mesures, traitement et communication avec une consommation énergétique réduite. L'équipe du Pr. Pister de l'université de Berkeley nomme ces capteurs millimétriques « Smart Dust » [13] et réalise en 2002 un nœud d'une taille de 16mm³ qui est alimenté par une cellule photovoltaïque et qui communique via une liaison optique [14] (photo Figure 6). Il est intéressant de noter

que cette réalisation, faisant date, est alimentée par un système de récupération d'énergie ambiante (photovoltaïque).



Figure 6. Faisabilité de capteur "Smart Dust" avec la réalisation d'un nœud millimétrique[14].

Si plusieurs start-up sont créées dans les années 2000 (dont Dust Network fondée par le même Pr. Pister), les possibilités que ces minuscules capteurs offrent restent limitées. Néanmoins, l'intérêt et les recherches sur ces objets perdurent et le concept de « Smart Dust » fait son apparition en 2013 dans la « Gartner Hype Curve » [2] (courbe d'attractivité et de tendances des nouvelles découvertes technologiques).

En parallèle des prometteurs « Smart Dust », les progrès sur les nœuds de capteurs traditionnels ont mené au développement des briques technologiques jusque-là manquantes. Par exemple, concernant la communication sans fil, la norme IEEE 802.15.4 a défini un protocole de communication basse consommation pour les courtes distances (dizaine de mètres) et est implémentée par des solutions commerciales largement utilisées comme WirelessHART, ZigBee ou Bluetooth Low Energy [15]. Un module intégrant cette technologie ne coûte aujourd'hui que quelques euros. De manière générale, la réduction de la taille des batteries et la baisse de consommation de l'électronique durant les années 2000 sont des améliorations contribuant fortement au développement des réseaux de capteurs sans fil.

Nous présentons Figure 7 l'évolution des capteurs sans fil au cours des 30 dernières années, et cette amélioration continue fait dire à la société de veille technologique IDTechEx, dans son rapport « Wireless Sensor Networks (WSN) 2014-2024: Forecasts, Technologies, Players », que le marché atteindra 1,8 milliards de dollars en 2024.

	Première Génération (années 1980-1990)	Seconde Génération (années 2000)	Troisième Génération (Fin 2000-2010)
Taille	Valise ou plus gros	Livre de poche	Très petit, mm ³
Poids	Kilo	Centaine de grammes	Gramme
Architecture du nœud	Mesure, traitement et communication séparés	Intégrés sur une carte	Intégrés sur une puce
Protocoles	Propriétaires	Propriétaires	Standardisés
Topologie réseau	Point à Point, étoile	Client/serveur, pair à pair	Pair à pair
Alimentation	Câblé ou batterie	Petites batteries	Batteries intégrées ou récupération d'énergie
Durée de vie	Heures ou jours	Jours ou semaines	Mois ou années

Figure 7. Evolution des réseaux de capteurs sans fil [10]

1.1.2. UTILISATION ACTUELLE

Si les Smart Dust ne sont pas encore devenus réalité, les réseaux de capteurs de taille plus importante sont, quant à eux, déjà utilisés. Dans ces systèmes, un nœud est composé d'une carte électronique comportant un microcontrôleur pour le traitement des données, d'une interface de communication sans fil, d'un ou plusieurs capteurs et d'une source d'énergie, l'architecture classique est détaillée Figure 8.

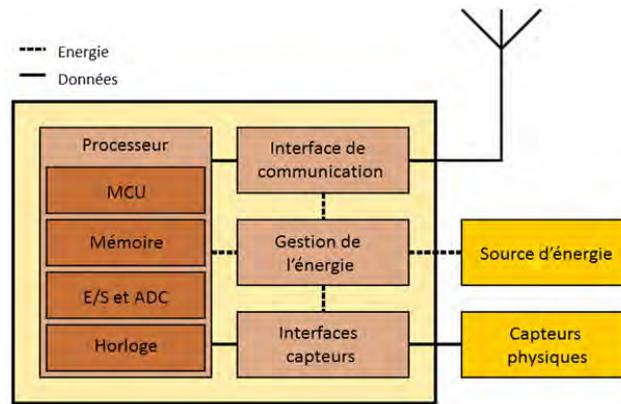


Figure 8. Architecture typique d'un nœud de capteur sans fil [7].

L'idée des réseaux de capteurs sans fil est née dans le domaine militaire et ils y trouvent aujourd'hui une variété d'applications [16]. On peut citer, comme exemples concrets, la détection de présence avec des capteurs acoustiques/sismiques, sorte de nouvelle génération des capteurs employés pendant la guerre du Vietnam [17], les champs de mines auto-reconfigurables [18], ou la détection d'un tireur isolé ennemi par capteurs portés par les soldats d'un même groupe [19].

Les applications civiles à large échelle se sont aussi beaucoup développées : génie civil, domotique, géologie, agriculture, transport, etc. Nous citons ici quelques exemples à titre d'illustration comme la surveillance de l'activité du volcan Reventador dans le nord de l'Equateur grâce à des capteurs sismiques [20], la surveillance de l'état de la structure de ponts [21]–[23] (voir Figure 9) ou de bâtiments [24], l'irrigation automatique [25], [26]...



Figure 9. Un des 51 accéléromètres placés sur le Golden Gate Bridge à San Francisco pour surveiller les contraintes sur la structure du pont [22], [27].

Des produits commerciaux sont disponibles à la vente et se présentent comme des boîtiers pouvant intégrer un certain type de capteurs ou laisser libre choix du capteur à connecter. Ils sont en général programmables soit via des boutons sur le boîtier ou via une interface pour charger un programme écrit à l'avance par l'utilisateur (Figure 10 (b)).

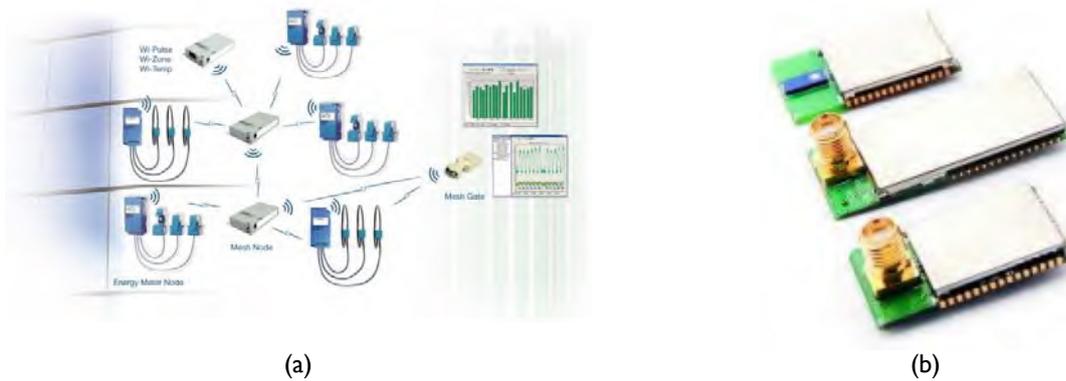


Figure 10. Exemples de nœuds de réseau de capteurs sans fil commerciaux. (a) Système de capteur sans fil mesurant l'énergie circulant dans un câble électrique, par Millennial Net [28]. (b) Capteur sans fil JN5148 intégrant un microcontrôleur programmable, fabriqué par NXP [29].

1.1.3. AUTONOMIE ENERGETIQUE

Au cours des deux dernières décennies, les composants électroniques nécessaires à un réseau de capteurs (microcontrôleurs, mémoires, modules de communication, etc.) se sont fortement améliorés en termes de puissance et d'intégration. Avec la technologie actuelle, fabriquer des capteurs communiquant sans fil de taille centimétrique est facile.

Cependant, un système sans fil implique forcément une autonomie énergétique (si un fil d'alimentation est déployé, autant également utiliser une communication filaire) et les batteries, qui sont la source d'alimentation traditionnellement employée, n'ont pas vu leur performance augmenter à la mesure des progrès des autres composants d'un nœud de capteur. Ce problème d'alimentation est sans doute le plus important facteur limitant le déploiement massif des réseaux de capteurs sans fil [30].

Une partie de la solution réside dans la diminution de la consommation électrique. La phase la plus consommatrice étant la communication, plusieurs techniques sont utilisées pour réduire les dépenses d'énergie :

- Les topologies de réseau sont optimisées, la consommation variant si le nœud à atteindre est loin ou proche, si les opérations de routage sont complexes ou simples, etc.
- Les puces utilisées pour la communication sont conçues pour réduire l'énergie dépensée par bit transmis (mesuré en joules par bit). Par exemple, Liu et al. [31] ont rapporté en 2012 avoir conçu une puce ne consommant que $2,7nJ/b$ en utilisant les protocoles Zigbee ou Bluetooth Low Energy, ce qui équivaut à 75% de moins que les puces commerciales.
- De nouveaux protocoles sont développés pour réduire cette consommation, notamment en communiquant via de très courtes impulsions à des fréquences élevées (plusieurs dizaines de GHz) [32], [33].

Plus généralement, les capteurs sont la majeure partie du temps en veille, un état qui consomme très peu (par exemple, le module JN5148 présenté Figure 10 ne consomme que $2,6\mu A$ sous $3,3V$ en mode veille) et il s'active seulement pour effectuer une mesure ou une transmission de données.

Néanmoins, même si le système est peu gourmand en énergie, il nécessite toutefois une alimentation. Celle-ci peut être réalisée par deux moyens :

1. En utilisant une réserve d'énergie finie : typiquement une pile électrochimique.
2. En utilisant l'énergie présente dans l'environnement du système pour l'alimenter.

La première solution est la plus courante, son coût de conception et de fabrication est faible, mais lorsque la réserve est épuisée, il faut une intervention humaine pour la remplacer ce qui renchérit sensiblement la maintenance du réseau de capteurs, surtout si lesdits capteurs sont placés dans des endroits peu accessibles (p. ex. dans le cas de la surveillance de structure).

La deuxième solution permet par contre d'obtenir une durée de vie du nœud de capteur virtuellement infinie. Elle nécessite en général d'utiliser un stockage d'énergie rechargeable (type accumulateur ou supercondensateurs) et on peut distinguer trois cas de figure différents :

1. Le récupérateur peut toujours fournir une puissance supérieure à la consommation de la charge et il n'y a pas besoin de stockage. Ce cas est plus ou moins à ignorer car il suppose de fait un récupérateur surdimensionné, incompatible avec la recherche de miniaturisation en général poursuivie.
2. La consommation de la charge est ponctuellement supérieure à la puissance fournie par le récupérateur (typiquement lors d'une communication) et il est nécessaire d'avoir un stockage pouvant fournir ces appels de courant.
3. La consommation de la charge peut être supérieure à la production sur de longues périodes de temps, notamment si la production devient nulle (par exemple, du photovoltaïque solaire la nuit). Il est alors nécessaire d'avoir un stockage pour assurer l'autonomie.

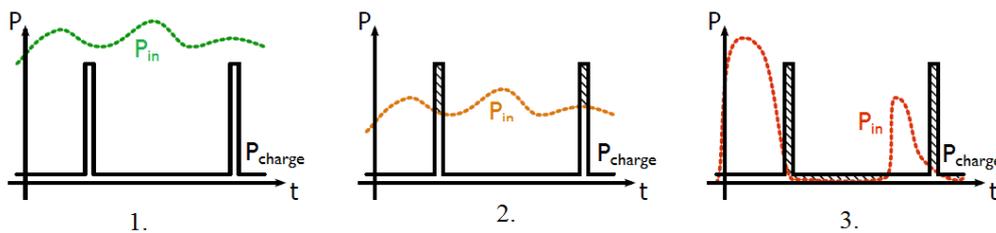


Figure 11. Trois types de besoins en stockage d'énergie avec P_{in} la puissance récupérée et P_{charge} la puissance consommée par la charge [7].

1.2. STOCKAGE DE L'ENERGIE

Le stockage d'énergie est donc un point clé d'un réseau de capteurs sans fil, qu'il soit alimenté par des piles ou qu'il nécessite un stockage tampon pour de la récupération d'énergie. Il paraît évident qu'un capteur sans fil nécessite une réserve d'énergie légère et de faible volume. Ainsi, afin de comparer les performances de ces différentes sources, on utilise principalement deux grandeurs :

- La densité d'énergie, massique ou volumique, (Wh/kg ou Wh/L) qui permet de mesurer la quantité d'énergie stockée pour une même masse ou un même volume, et donc d'apprécier l'autonomie fournie par un moyen de stockage en fonction du volume occupé ou du surplus de masse ajouté.
- La densité de puissance (W/kg ou W/L) qui permet de mesurer la puissance pic que peut fournir un stockage en fonction de sa masse ou de son volume.

Comme nous le verrons en détail dans cette partie, les stockages électrochimiques, piles ou accumulateurs rechargeables, ainsi que les supercondensateurs, sont des candidats tout désignés. Cependant, grâce au développement des MEMS, des techniques autrefois imposantes se miniaturisent comme les micromoteurs Stirling [34] ou à vapeur [35] qui atteignent des tailles millimétriques et pourraient être utilisés à terme comme source d'énergie pour des systèmes électroniques embarqués.

Nous présentons dans cette partie le principe de fonctionnement des réserves d'énergie électriques de petite taille, c'est-à-dire les stockages électrochimiques et électrostatiques.

1.2.1. STOCKAGE ELECTROCHIMIQUE

Un générateur électrochimique est un dispositif permettant de générer un courant électrique à partir d'une réaction chimique. Si la réaction est réversible, on parle d'accumulateur, de batterie rechargeable ou de batterie secondaire ; dans le cas contraire, il sera question de pile (pile classique ou pile à combustible) ou de batterie primaire.

1.2.1.1. PILES ET ACCUMULATEUR

Un accumulateur ou une pile classique fonctionnent grâce à une réaction d'oxydoréduction. Ils font intervenir un matériau réducteur qui cède facilement un électron et un matériau oxydant qui capte facilement un électron. Ces deux matériaux sont maintenus séparés par un pont salin, une membrane permettant un échange ionique. Lorsque l'on relie le réducteur à l'oxydant par un conducteur électrique, un courant apparaît de l'un à l'autre.

Avec certains couples rédox, cette réaction est réversible en forçant le passage d'un courant électrique de l'oxydant vers le réducteur et on recharge alors l'accumulateur. Cependant, lors de la charge et de la décharge, les matériaux se dégradent et les performances de l'accumulateur diminuent, le nombre de cycles est donc limité.

Les performances d'une pile ou d'un accumulateur (tension à leurs bornes, densité d'énergie et de puissance, tenue en température) dépendent des matériaux utilisés et le choix de la technologie pour une application donnée est un compromis entre le prix, les performances et l'encombrement/la masse (voir Figure 12 et Figure 13).

	Plomb-Acide (Lead-Acid)	Nickel Cadmium (NiCd)	Nickel-Hydrure métallique (NiMH)	Lithium-Ion (Li-ion)
Densité d'énergie (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	110-160
Nombre de cycles	200-300	1500	300-500	500-1000
Autodécharge/Mois	5%	20%	30%	10%
Tension nominale	2V	1,25V	1,25V	3,6V
Température opérationnelle	-20°C/60°C	-40°C/60°C	-20°C/60°C	0°C/60°C

Figure 12. Comparaison des caractéristiques de différentes technologies de batteries [36].

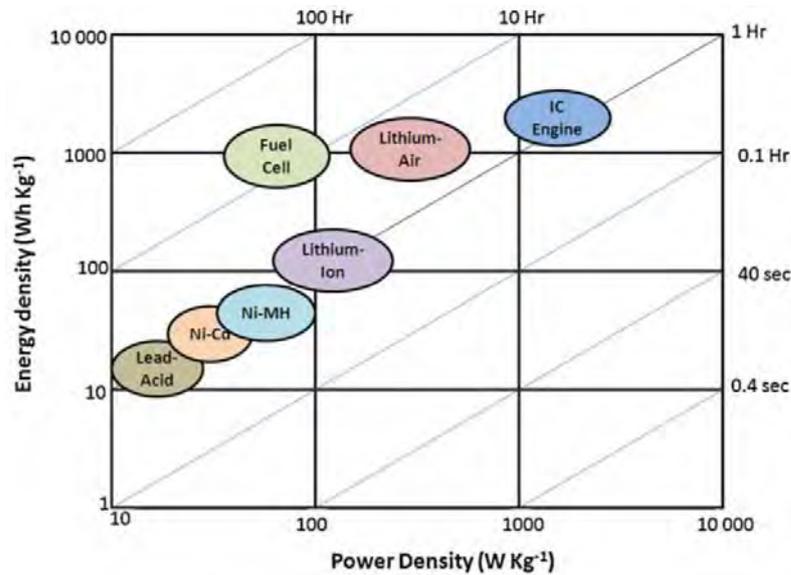


Figure 13. Comparaison de différentes technologies de batteries avec les performances d'un moteur à combustion interne (IC Engine) comme référence [37].

Les batteries et les accumulateurs ont un coût de fabrication faible et le développement récent des batteries lithium, notamment les Li-ion, a permis d'améliorer la rapidité de leur charge et leur densité d'énergie (jusqu'à 250 Wh/kg pour des Li-ion [38]). Les recherches actuelles se concentrent sur le développement de nouveaux couples de matériaux (Figure 14), comme le Lithium/air (jusqu'à 5200 Wh/kg [38]) et sur la miniaturisation des cellules permettant de fabriquer des batteries fines, souples [39] ou sur substrat Silicium [40] afin d'être intégrées au cœur des puces qu'elles doivent alimenter.

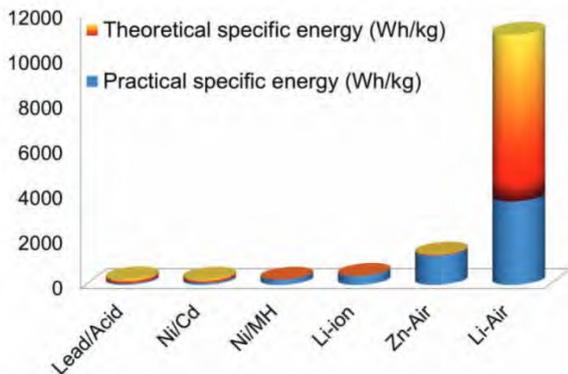


Figure 14. Performances de nouveaux couples de matériaux pour des batteries électrochimiques [38]



Figure 15. Exemple de batteries BlueSpark, souples et fines de moins de 500 µm d'épaisseur [39]

Néanmoins, ces dispositifs ne sont pas bien adaptés à une utilisation dans des conditions extrêmes. Comme leur fonctionnement repose sur une réaction chimique, il est donc sensible à la température : leurs performances se dégradent à basse température et ils peuvent être dangereux aux températures élevées. Cependant, les batteries haut de gamme peuvent avoir des plages d'utilisation de -40°C/+150°C pour des applications spatiales ou pétrolières/minières grâce à une encapsulation particulière qui diminue leur densité d'énergie [41].

Enfin, nous pouvons relever que leur densité d'énergie très élevée induit un risque en terme de sécurité (explosion, inflammabilité si l'enveloppe est endommagée), ce qui paradoxalement, réduit leur potentiel d'utilisation dans l'aéronautique [42]. Pour comparaison, l'énergie spécifique de combustion du TNT est de 1 277Wh/kg.

1.2.1.2. PILE A COMBUSTIBLE

La pile à combustible fonctionne également grâce à une réaction d'oxydoréduction. Dans une pile classique, les réactifs sont embarqués dans le dispositif et les produits de la réaction restent dans l'enceinte de la pile. Quand les réactifs sont entièrement consommés, il faut changer toute la pile. Dans une pile à combustible, de nouveaux réactifs peuvent être facilement amenés et le produit de réaction est évacué hors de l'enceinte (Figure 16).

Les réactifs employés pour une pile à combustible ont longtemps été le couple dihydrogène/dioxygène, par exemple dans les véhicules spatiaux (ce qui permettait également de chauffer et de produire de l'eau, la réaction étant exothermique) ou pour des prototypes dans l'automobile. Les piles à combustibles actuelles utilisent une grande variété de matériaux comme l'acide formique, le méthanol, l'éthanol, le glycérol, etc. [43][44] dans des installations de grande puissance (supérieure à 1kW).

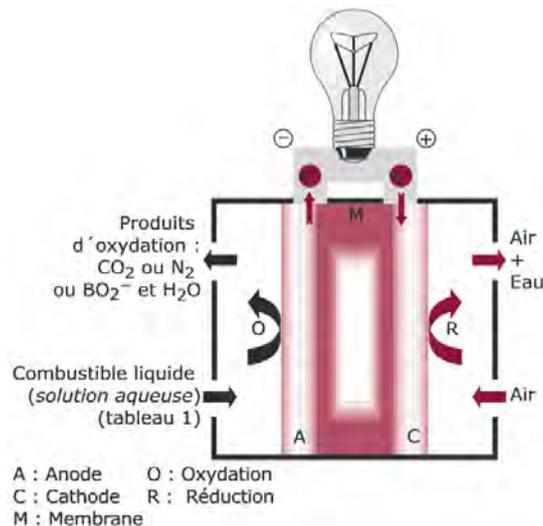


Figure 16. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible liquide [45]

Le développement d'autres combustibles que l'hydrogène a permis la miniaturisation des piles à combustible et des entreprises commerciales conçoivent désormais des prototypes visant à remplacer les batteries utilisées jusqu'à présent dans l'électronique de grande consommation [46], avec des dimensions de l'ordre de la dizaine de centimètres et une puissance de l'ordre de la dizaine de watts [47]. En septembre 2015, l'entreprise anglaise Intelligent Energy a proposé un prototype de pile à combustible pouvant remplacer la batterie d'un iPhone [48], [49].

Encore plus loin dans la miniaturisation, des micro-piles à combustible sont encore à l'état de recherche avec des dispositifs microfluidiques sur substrat silicium ou polymère ayant des dimensions de l'ordre du millimètre [50][51]. Par exemple, en 2008, Kjeang et Al. annonçait une puce de 12mm de long pouvant produire 16mW [52] (Figure 17).

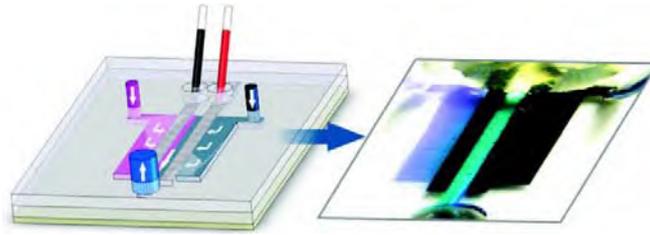


Figure 17. Schéma et photo d'une micro-pile à combustible fonctionnant au Vanadium (V^{2+}/VO_2^+) [52].

Enfin, un dernier type de pile à combustible prometteur est la pile à combustible microbienne ou pile à bactéries. Ce sont ici des micro-organismes qui oxydent un substrat organique et génèrent ainsi un courant électrique. Ce type de pile à combustible est réputé plus écologique car pouvant recycler des eaux usées ou des déchets organiques [53].

Ces technologies ont l'avantage d'avoir une autonomie ajustable facilement en fonction de la quantité de combustible fourni et d'utiliser des réactifs ayant une très forte densité d'énergie (méthanol : 6100Wh/kg, glycérol : 5000 Wh/kg [54] et Figure 13). Recharger le stockage peut être très rapide, mais nécessite l'intervention d'un opérateur pour les piles à combustible classiques. On peut néanmoins envisager un captage automatique de combustible dans l'environnement d'une pile à combustible microbienne.

1.2.2. STOCKAGE ELECTROSTATIQUE

Les supercondensateurs (tout comme les condensateurs classiques), sont des dispositifs de stockage électrostatique où aucune réaction chimique n'intervient, ce qui élimine ou réduit certains problèmes liés aux stockages électrochimiques notamment les limites en température et l'usure au cours des cycles de charge/décharge.

Un condensateur est composé de deux électrodes de surface S séparées par un matériau diélectrique de permittivité ϵ et d'épaisseur e . Lorsqu'il est soumis à un champ électrique, des charges électriques de signes opposés viennent se stocker sur les deux électrodes du condensateur. La capacité C à stocker des charges et l'énergie E stockée sous une tension V sont définies par les équations suivantes :

$$C = \epsilon \times \frac{S}{e}$$

$$E = \frac{1}{2} \times C \times V^2$$

On peut noter que la tension aux bornes du condensateur est très dépendante de la quantité d'énergie stockée.

La première caractéristique de fabrication d'un supercondensateur est l'augmentation la surface S des électrodes afin d'augmenter la capacité du dispositif (voir Figure 18). Pour cela, on utilise des matériaux présentant des pores de petite taille (mésopores et micropores) pour augmenter les interactions entre les électrodes et les ions de l'électrolyte. Ces matériaux sont variés : carbone (sous forme de charbon actif ou récemment de graphène) , oxydes métalliques, polymères conducteurs, etc [55]. Plus récemment, des travaux sont en cours afin de nanostructurer la surface des électrodes pour atteindre des surfaces de contacts encore plus élevées [56]. Le choix des matériaux et de l'électrolyte définit la tenue en tension du dispositif qui est typiquement de l'ordre de 2 à 3V.

La deuxième caractéristique est la création de deux couches d'inversion dans l'électrolyte, une au droit de chaque électrode (voir figure 18), réduisant la distance entre charge (le terme e de l'équation ci-dessus) à une

valeur bien plus faible que la distance inter-électrodes. La rançon de cette caractéristique est une tension de claquage faible (de l'ordre de 2,5 V en général).

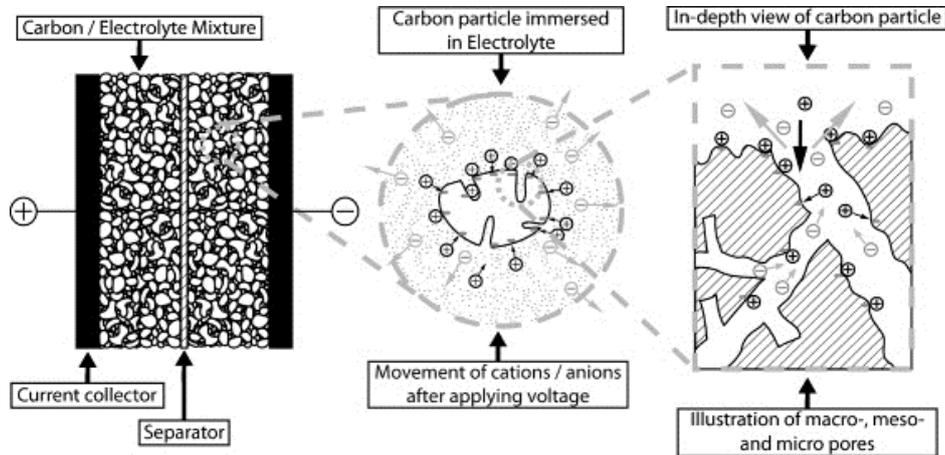


Figure 18. Illustration de la nature poreuse de l'électrode utilisée dans les supercondensateurs [57].

On modélise couramment un supercondensateur avec une résistance en série (ESR, Equivalent Serial Resistance), et une résistance de fuite en parallèle qui modélise le phénomène de courant de fuite et d'autodécharge.

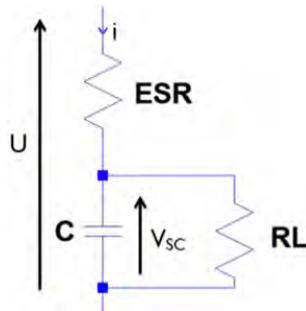


Figure 19. Modélisation simple d'un supercondensateur avec la résistance équivalente série (ESR) et la résistance de fuite (RL).

L'effet de la résistance série est facilement observable : quand on veut mesurer la tension V_{sc} aux bornes d'un supercondensateur traversé par un courant i , il faut garder à l'esprit que la tension mesurée U est :

$$U = V_{sc} + i \times ESR$$

Si nous nous permettons de relever cet effet élémentaire, c'est parce que cette variation de tension peut être un problème lorsque l'on désire réguler la charge d'un supercondensateur ou simplement s'il est sujet à des appels de courant brusques. Nous verrons en détail une telle situation dans le chapitre 2 (Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol) où le stockage réalisé grâce à des supercondensateurs subit des variations de plusieurs centaines de millivolts avec des courants de charge de l'ordre de l'ampère.

La résistance de fuite, quant à elle, provoque une autodécharge importante du supercondensateur pouvant faire perdre, en 24h, la majorité de l'énergie stockée. Cette autodécharge fait intervenir en général plusieurs

constantes de temps et dépend du profil de charge qui a été appliqué [57], [58]. Elle est donc difficile à modéliser et limite l'utilisation des supercondensateurs comme moyen de stockage d'énergie à long terme (sur plusieurs jours).

La modélisation présentée Figure 19 suffit pour de nombreux cas d'utilisation, mais un supercondensateur ne peut pas toujours être assimilé à un seul circuit RC. Les modèles plus complexes multiplient les branches RC en parallèle pour rendre compte des différentes constante de temps [59] (nous reproduisons Figure 20 un modèle à trois branches [60]).

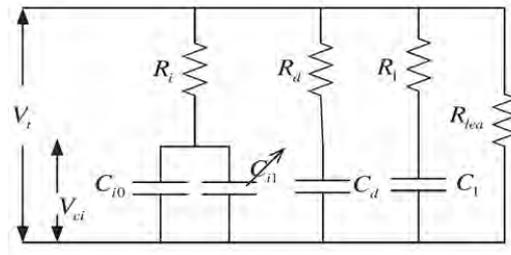


Figure 20. Modélisation d'un supercondensateur par trois branches RC en parallèle. La capacité C_{i1} est proportionnelle à la tension à ses bornes, selon $C_{i1} = k.V_{Ci}$ [60].

La densité d'énergie d'un supercondensateur reste très inférieure à celle d'un stockage électrochimique. Cependant, sa densité de puissance est bien supérieure grâce à sa faible ESR. Pour cette raison, les supercondensateurs sont utilisés en complément des batteries, par exemple pour récupérer l'énergie des véhicules électriques lors du freinage là où un accumulateur ne pourrait pas absorber une aussi grande puissance [61]–[63], ou pour les systèmes « Start & Stop » [64].

Comme le principe de stockage n'est pas chimique mais électrostatique, il n'y a pas d'usure des composants lors des cycles de charge/décharge et leur durée de vie est ainsi virtuellement infinie (dans sa documentation, le fabricant Maxwell annonce 500 000 cycles de charges/décharges). Ils peuvent éventuellement fonctionner sur une plus large gamme de températures que les batteries (surtout pour les températures négatives). Même si pour la plupart des applications, les supercondensateurs en tant que stockage d'énergie ne sont pas compétitifs face à des accumulateurs électrochimiques, ils peuvent être utilisés dans des niches présentant des températures négatives extrêmes incompatibles avec une batterie classique, par exemple dans l'aéronautique ou lorsque les critères de sécurité sont élevés : ils peuvent être considérés plus sûrs en particulier puisque leur densité d'énergie est bien inférieure à celle de batteries.

1.3. RECUPERATION D'ENERGIE

Si aujourd'hui, beaucoup de systèmes autonomes sans fil sont alimentés par une pile électrochimique, un besoin de plus grande autonomie, ou des contraintes environnementales peuvent interdire l'utilisation de cette source d'alimentation.

Réussir à récupérer l'énergie présente dans l'environnement du système répond à ces défis : cela pourra procurer une autonomie totale si la quantité d'énergie captée est suffisante pour assurer l'intégralité de la consommation, ou pourra au moins prolonger la durée de vie de la pile.

Les sources d'énergie potentielles sont nombreuses et plus ou moins énergétiques. Nous présentons Figure 21 les valeurs de densités d'énergie des sources couramment présentes dans l'environnement.

	Densité de puissance ($\mu\text{W}/\text{cm}^3$) sur un an	Densité de puissance ($\mu\text{W}/\text{cm}^3$) sur dix ans
Solaire (extérieur)		10000 – Plein soleil
Solaire (intérieur)		10
Vibrations/Mouvement (humain)		4
Vibrations/Mouvement (industrie)		100
Bruit acoustique		0,003 à 75dB, 0,96 à 100dB
Gradient de température		15 – gradient de 10°C
RF (GSM)		0.1

Pile (lithium, non rechargeable)	45	3,5
Accumulateur (lithium, rechargeable)	7	0
Hydrocarbure		333
Pile à combustible (méthanol)		280

Figure 21. Comparaison de la densité de puissance pouvant être récupérée sur différentes sources d'énergie [65], [66].

Dans cette partie, nous passons en revue les différentes formes d'énergie utilisables et nous présentons une partie de la diversité des moyens de récupération d'énergie.

1.3.1. CINETIQUE

La récupération de l'énergie cinétique consiste à générer un courant électrique à partir d'une action mécanique : un mouvement, une vibration ou une déformation. Cette source d'énergie est présente dans beaucoup d'applications, des environnements industriels aux transports en passant par le corps humain (voir les exemples de sources de vibrations possibles (Figure 22)). Trois principales technologies de transducteurs sont utilisées pour récupérer cette forme d'énergie : des dispositifs piézoélectriques, électrostatiques ou électromagnétiques.

Source de vibration	Accélération (m/s^2)	Pic de fréquence (Hz)
Bloc moteur d'une voiture	12	200
Base d'une machine-outil 3 axes	10	70
Boîtier d'un robot mixeur	6,4	121
Sèche-linge	3.5	121
Personne frappant ses talons	3	1
Tableau de bord d'une voiture	3	13
Porte lors de la fermeture	3	125
Petit four à micro-ondes	2,5	121
Aération de climatiseur de bureau	0,2-1,5	60
Vitre à côté d'une voie passante	0,7	100
Lecteur CD sur un ordinateur portable	0,6	75
Sol d'un bureau très actif	0,2	100

Figure 22. Fréquence et amplitude de sources potentielles de vibration pour des systèmes commerciaux [67], [68].

1.3.1.1. PIEZOELECTRICITE

Les matériaux piézoélectriques ont la propriété de générer une tension à leurs bornes lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique. L'idée est donc de fabriquer un dispositif qui subit une déformation lors d'un mouvement, le plus courant étant le « cantilever », une poutre en porte-à-faux sur lequel est placé un matériau piézoélectrique.

La forme de ce dispositif induit un comportement résonant qui rend la conversion d'énergie (néanmoins très anisotrope) efficace pour une fréquence donnée mais médiocre dès qu'on s'en éloigne. Comme ces dispositifs sont en général de petite taille, leur fréquence de résonance est élevée, de l'ordre de 1kHz à 10kHz. Différentes formes de récupérateurs piézoélectriques ont été étudiées pour élargir et abaisser la bande de fréquence d'utilisation ([69]–[72]).

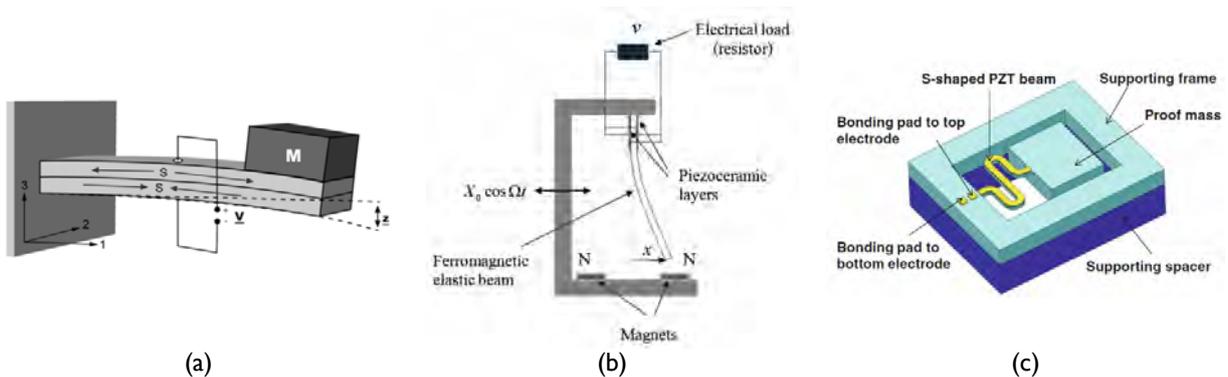


Figure 23. Différentes formes de récupérateurs piézoélectriques cantilevers. (a) Cantilever simple [69], (b) Cantilever avec aimants pour élargir la bande fréquence [70], (c) Cantilever en forme de S pour abaisser la fréquence de résonance [71].

Afin de contourner les montages reposant sur l'oscillation d'un montage mécanique, les Macro Fiber Composite (MFC) sont le résultat de l'intégration de fibres piézoélectriques dans une matrice en polymère. L'idée est de générer un courant lors de la déformation de la surface sur laquelle est fixé le récupérateur MFC. Cette technologie est intéressante pour récupérer des vibrations de grande amplitude et de basse fréquence. Pozzi et al. [73] rapportent avoir conçu un système pour l'aéronautique et avoir récupéré 12mW avec une excitation de 10Hz et une surface de 33cm² (330 μ W/cm²).



Figure 24. (a) Principe d'un dispositif MFC, des fibres de matériaux piézoélectriques PZT sont disposées entre des fibres d'époxy (en blanc) [74]. (b) Photo d'un dispositif en MFC [74].

D'autres systèmes non résonants ont été imaginés pour se passer des montages de type cantilever, notamment pour des applications sur l'homme, comme une cavité où une masse vient frapper une surface piézoélectrique ou l'intégration d'une surface piézoélectrique dans une chaussure [75].

1.3.1.2. ELECTROSTATIQUE

1.3.1.2.1. A CAPACITE VARIABLE

Les convertisseurs électrostatiques sont des systèmes à capacité variable composés de deux surfaces séparées par du vide, de l'air ou n'importe quel matériau diélectrique ([76]). Si une des deux surfaces est polarisée électriquement, un mouvement entre ces deux surfaces provoque une variation de la capacité et donc une variation des charges électriques par un courant. Ces systèmes peuvent être séparés en deux catégories :

- Ceux basés sur l'utilisation d'un électret (un électret est un matériau diélectrique présentant une polarisation électrique quasi-permanente) (voir Figure 25).
- Ceux sans électret reposant sur l'utilisation d'un circuit actif qui vient polariser une des surfaces du dispositif, en effectuant des cycles soit à charge constante, soit à tension constante.

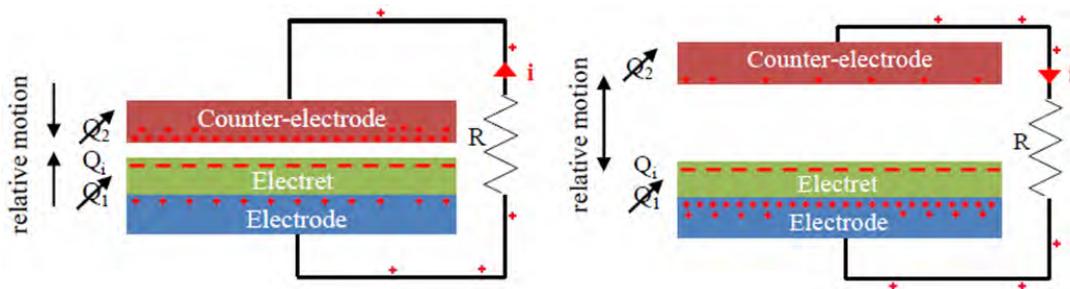


Figure 25. Principe de fonctionnement d'un convertisseur électrostatique à électret [76].

Ces récupérateurs électrostatiques à capacité variable sont facilement réalisables en MEMS car leur densité d'énergie augmente en diminuant l'espace entre les deux armatures du condensateur, facilitant leur miniaturisation. Ils présentent une importante tension de sortie (>100V) mais également une importante résistance interne, limitant la puissance produite [75]. Les structures sans électret nécessitent un circuit de polarisation, augmentant la complexité et diminuant l'efficacité globale du dispositif. Les électrets, quant à eux, peuvent se dépolariiser au cours du temps. Cependant, les électrets couramment utilisés comme le Téflon ou le SiO₂ conservent 90% de leur polarisation pendant plus de 2 à 3 ans [76].

Le principe de récupération électrostatique a donné lieu à de nombreuses formes différentes de dispositifs, et nous présentons ici une approche originale exploratoire qui utilise une goutte d'un fluide conducteur comme contre-électrode mobile [77], [78].

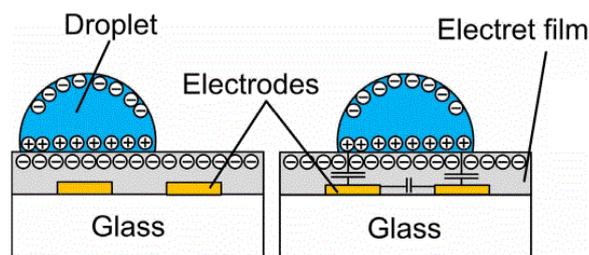


Figure 26. Une goutte ou une bille conductrice peut être utilisée comme contre-électrode [78].

Il n'existe pas encore d'application commerciale pour ce type de récupérateur électrostatique mais de nombreux prototypes ont été réalisés [79]–[81].

1.3.1.2.2. TRIBOELECTRIQUE

Une autre approche de récupération électrostatique utilise la triboélectricité comme principe. La triboélectricité décrit le phénomène survenant quand deux matériaux de nature différente entrent en contact : une

partie des électrons de la surface de contact est transférée d'un matériau à l'autre pour égaliser leur potentiel électrochimique. La triboélectricité fait souvent référence à un mouvement de friction puisque ce n'est qu'une succession de mise en contact/séparation. Le principe d'un récupérateur triboélectrique fonctionnant par mouvements latéraux est présenté Figure 27.

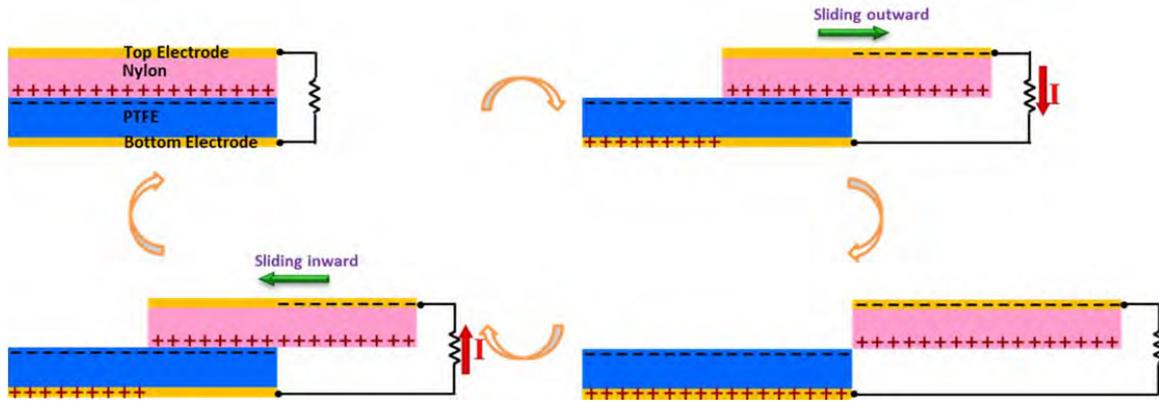


Figure 27. Principe de la triboélectricité avec génération d'un courant électrique entre les deux électrodes lors d'un déplacement [82].

Les dispositifs triboélectriques couramment présentés utilisent deux couches de polymères comme du Téflon (PTFE), du nylon, du katpon, etc. ce qui les rend bon marché et facilement miniaturisables en utilisant de fines feuilles de polymères. Des nanogénérateurs où l'épaisseur est de l'ordre de la centaine de micromètres [83], [84] sont fabriqués en laboratoire et peuvent être utilisés sur des grandes surfaces [85] comme dans la semelle de chaussures [86], [87]. Des récupérateurs triboélectriques à base de papier sont également utilisés dans des jouets [88].

1.3.1.3. ELECTROMAGNETIQUE

La troisième technique de récupération de l'énergie cinétique repose sur l'utilisation de l'induction électromagnétique, et se base sur le mouvement relatif d'un aimant et d'une bobine. La quantité d'énergie récupérée dépend de la force du champ magnétique, de la vitesse de déplacement et de la bobine choisie [75].

La mise en œuvre de cette technologie repose souvent sur des montages cantilevers, et plus généralement sur des montages type masse-ressort afin d'augmenter l'amplitude des mouvements. On retrouve alors les mêmes problèmes de largeur de bande que dans les montages piézoélectriques présentés précédemment.

De plus, comme cette technique nécessite l'utilisation d'une bobine, il est difficile de miniaturiser les dispositifs sans dégrader fortement leurs performances, cantonnant souvent ces applications à des objets encombrants.

Des produits commerciaux existent cependant et visent des applications industrielles et ferroviaires où l'encombrement et le poids ne sont pas des critères contraignants [89], [90].



Power output

Description	5V Model
Maximum	5.5 mA (27.5mW)
Minimum @ 0.050g RMS, nominal frequency	0.840 mA (4.2mW)
Minimum @ 0.050g RMS, 2Hz bandwidth	0.600 mA (3mW)
Minimum @ 0.025g RMS, nominal frequency	0.240mA (1.2mW)

Figure 28. Photo d'un module de récupération électromagnétique de vibration de Perpetuum Ltd et valeurs de puissance récupérée annoncées par le constructeur. Le module pèse 1 kg et mesure 7cm*6,5cm. La fréquence nominale du récupérateur est réglable par l'utilisateur [89].

1.3.2. PHOTOVOLTAÏQUE

L'effet photovoltaïque permet de convertir un rayonnement lumineux en énergie électrique. Cette technologie peut être utilisée en extérieur, où on considère que le rayonnement solaire peut atteindre 1000W/m² dans les meilleures conditions, comme en intérieur où l'éclairage artificiel (de l'ordre de la dizaine de W/m²) peut suffire à alimenter de petits systèmes électroniques.

De nombreuses technologies de cellules photovoltaïques ont été inventées offrant des propriétés différentes en termes de rendement de conversion, de coût de fabrication, de durée de vie, d'épaisseur du module, etc. Ces technologies sont couramment classées en trois générations correspondant à l'ordre chronologique dans lesquelles elles ont été développées :

- **1^{ère} génération** : jonction PN en silicium cristallin. On distingue les modules réalisés à partir d'une plaque de monocristal de silicium (c-Si) et ceux en polysilicium (p-Si) qui ont un rendement et un coût de fabrication inférieurs aux premiers.
- **2^{ème} génération** : les cellules en couche mince d'épaisseur inférieure au millimètre. Les matériaux utilisés sont des alliages de cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS, CIS), silicium amorphe (a-Si) ou cristallin, tellurure de cadmium (CdTe).
- **3^{ème} génération** : ce sont les technologies les plus récentes et on trouve les cellules multijonctions, les polymères photosensibles, les cellules de Grätzel (DSSC, Dye-Sensitized Solar Cell), les « quantum dot solar cell », ou les structures pérovskites.

Nous présentons Figure 29 un tableau comparatif de l'évolution du rendement des différentes technologies photovoltaïques.

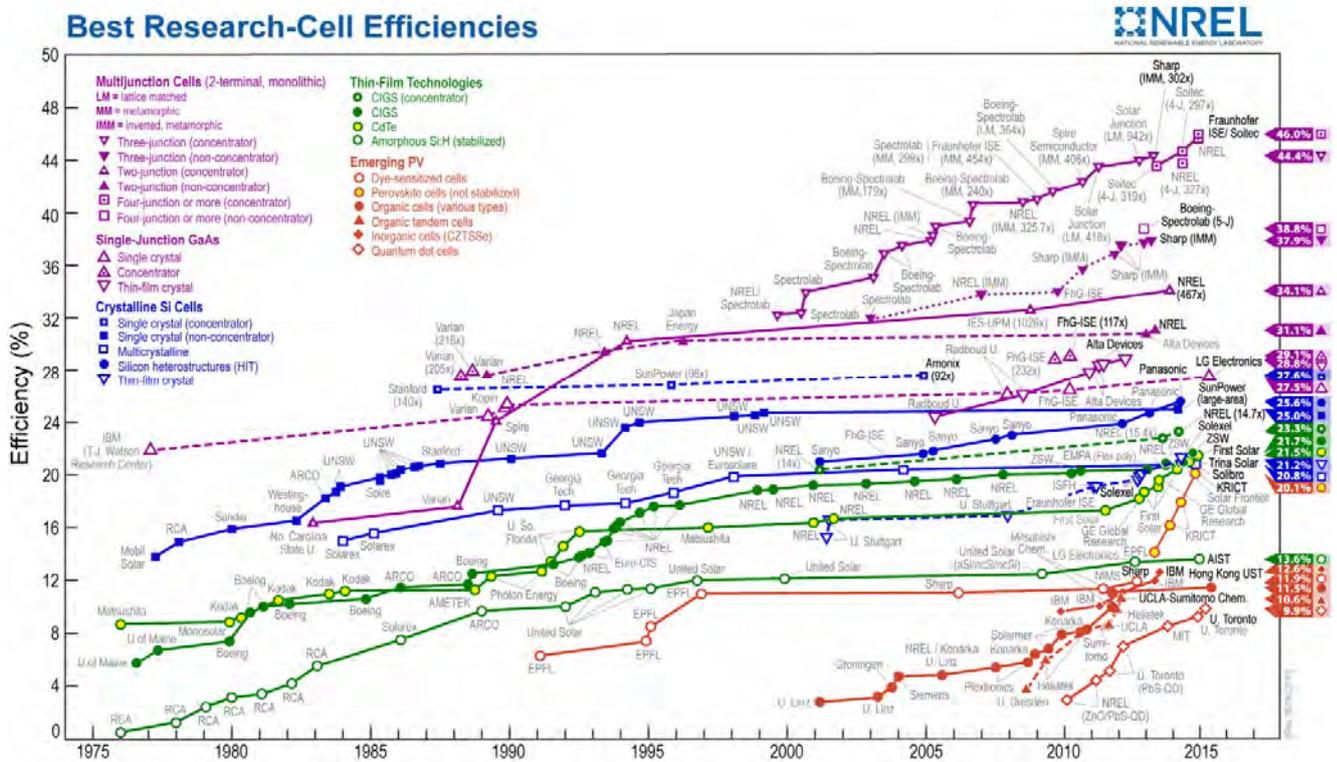


Figure 29. Rendement maximum atteint en laboratoire sous conditions de test standard de différentes technologies de cellules solaires [91].

La technologie la plus performante aujourd'hui pour la conversion de l'énergie solaire est la cellule multi-jonction composée de la superposition de 4 jonctions PN de matériaux différents qui atteint un rendement de conversion de 46%. Cette technologie onéreuse est employée dans le domaine spatial pour son importante densité d'énergie et son très bon rendement à forte irradiance.

Cependant, il n'y a pas que le seul rendement à regarder dans le choix d'une technologie photovoltaïque : le coût de fabrication, l'épaisseur du module, l'utilisation de ressources rares, la finesse et la souplesse du module, la variation du rendement en fonction de la source lumineuse (solaire, intérieur, etc.) sont autant de caractéristiques qui peuvent être déterminantes dans le choix de la technologie. Nous reviendrons plus en détail sur la technologie photovoltaïque et les paramètres conditionnant le choix du type de cellule dans le chapitre 2 : Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol.

1.3.3. RADIOFREQUENCE ET RECTENNA

Dans notre environnement moderne, une grande quantité d'objets émet un champ électromagnétique en permanence (réseau électrique, téléphones sans fils, modem Wi-Fi, etc.) qui peut être récupéré par des dispositifs appelées rectennas (contraction anglaise de « rectifier » et « antenna »).

Conçues au début comme moyen de transmission de puissance [92] (une source émet un champ électromagnétique qui est récupéré par une rectenna), la diminution de la consommation des systèmes électroniques et la multiplication des sources électromagnétiques fait envisager leur utilisation en récupération d'énergie. Les recherches actuelles se focalisent surtout sur le rendement du système (optimisation de l'antenne et performance des diodes de redressement) et atteignent des valeurs pouvant dépasser les 80% pour une fréquence donnée, ici 2,4GHz (fréquence Wi-Fi, téléphonie mobile, etc.) [93].

Néanmoins, l'intensité des champs considérés est très faible, au maximum de l'ordre du $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (voir Figure 30), et permet difficilement aujourd'hui d'envisager une application concrète.

SUMMARY OF LONDON RF SURVEY MEASUREMENTS

Band	Frequencies (MHz)	Average S_{BA} (nW/cm ²)	Maximum S_{BA} (nW/cm ²)
DTV (during switch over)	470-610	0.89	460
GSM900 (MTx)	880-915	0.45	39
GSM900 (BTx)	925-960	36	1,930
GSM1800 (MTx)	1710-1785	0.5	20
GSM1800 (BTx)	1805-1880	84	6,390
3G (MTx)	1920-1980	0.46	66
3G (BTx)	2110-2170	12	240
WiFi	2400-2500	0.18	6

Figure 30. Densité de puissance électromagnétique à la sortie d'une station de métro londonienne sur les gammes de fréquence de télévision numérique, téléphonie mobile et Wi-Fi [94].

1.3.4. THERMIQUE

Dans notre environnement humain, les pertes d'énergie des machines ou des procédés que nous utilisons sont très souvent sous forme de perte de chaleur et génèrent donc des flux thermiques (refroidissement d'un moteur, gaz d'échappement, évacuation de la chaleur résiduelle d'une centrale électrique, etc.). Récupérer cette énergie perdue peut-être un moyen d'augmenter le rendement du procédé ou simplement une opportunité pour faire fonctionner un système autonome.

Nous présentons ici trois techniques de récupération de l'énergie thermique : la pyroélectricité, la thermoélectricité, et la fabrication de micromachines thermiques.

1.3.4.1. PYROELECTRICITE

Les matériaux pyroélectriques constituent une sous-famille des matériaux piézoélectriques qui présentent une variation de leur polarisation électrique lorsqu'ils sont soumis à une variation temporelle de température [95]. La puissance qu'ils génèrent est proportionnelle à la rapidité de variation de la température, ce qui limite en pratique les possibilités d'utilisation de ces dispositifs, les environnements présentant des variations rapides de température étant rares.

Ils restent néanmoins étudiés grâce à certaines propriétés prometteuses : ils peuvent être fabriqués à des échelles micrométriques [96], permettant d'améliorer la vitesse de variation de leur température. Etant également piézoélectriques, ils peuvent être utilisés dans des récupérateurs hybrides tirant profit des deux effets, comme des patchs étirables pyro-piézoélectriques rapportés dans [97] (voir Figure 31).

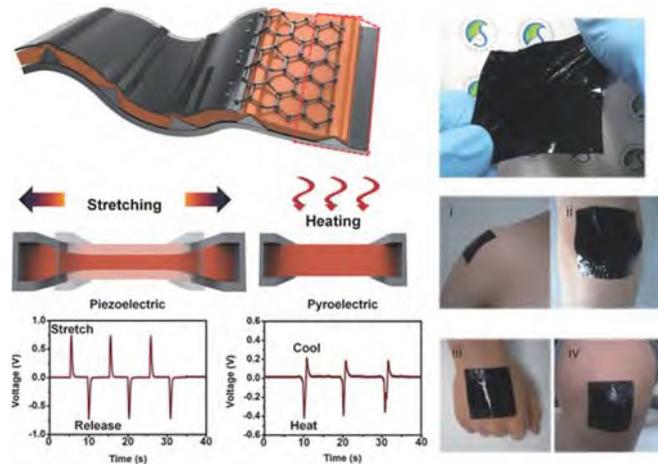


Figure 31. Récupérateur combinant l'effet piézoélectrique et pyroélectrique [97].

1.3.4.2. THERMOELECTRICITE

Le moyen le plus répandu de récupération de l'énergie thermique est l'utilisation de l'effet Seebeck qui permet de convertir un flux de chaleur en énergie électrique. Cet effet thermoélectrique permet de produire une tension V à partir d'un gradient thermique ΔT appliqué aux jonctions de deux matériaux de nature différente. Il est caractérisé par un coefficient Seebeck α_{ab} propre au couple de matériaux utilisé, selon l'équation :

$$V = \alpha_{ab} \times \Delta T$$

La tension générée est faible et les générateurs utilisant cet effet, appelés thermogénérateurs (TEG), sont constitués d'un ensemble de « plots » de semi-conducteurs dopés P et N connectés en série. Les jonctions entre ces plots sont placées du côté chaud et du côté froid du gradient, comme sur la Figure 32 représentant la structure de base constituée d'une jonction.

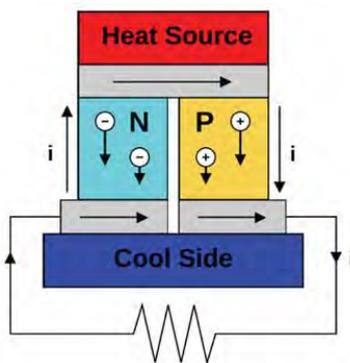


Figure 32. Structure de base d'un thermogénérateur. Une des deux jonctions entre les deux types de semiconducteurs est placée du côté chaud, l'autre du côté froid [98].

L'utilisation de semiconducteurs permet d'optimiser la puissance électrique générée pour un gradient thermique donné. L'utilisation de métaux est par exemple privilégiée pour la réalisation de thermocouples qui cherchent à maximiser la tension générée.

La génération d'énergie électrique grâce aux thermogénérateurs est une technologie ancienne mais un regain d'intérêt est apparu ces dernières années pour différentes raisons : des applications pourraient voir, par ce

moyen, une amélioration du rendement énergétique global du système en convertissant la chaleur considérée perdue, comme celles des gaz d'échappement d'une voiture [99], [100], ou des évacuations de chaleur dans des processus industriels [101], [102].

Aujourd'hui, des thermogénérateurs à couche mince mesurant quelques mm² ou cm² sont commercialement disponibles [103], [104] et permettent leur intégration dans des systèmes miniaturisés. Les recherches actuelles portent sur des thermogénérateurs sur substrat souple pour pousser cette intégration sur un maximum de support comme les textiles.

Un générateur thermoélectrique peut générer quelques milliwatts pour les générateurs à couche mince exposés à un gradient de quelques degrés [104] jusqu'à plusieurs dizaines de watts pour des dispositifs massifs soumis à des gradients de plus de 200°C [105].

Concernant le domaine aéronautique, les gradients présents naturellement à bord d'un aéronef peuvent être utilisés, comme dans le travail que nous présentons au chapitre 3 (Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique). Des montages utilisant un matériau à changement de phase ont été conçus pour réaliser un « stockage » thermique en utilisant la chaleur latente (en général de fusion) et ainsi maintenir un gradient thermique aux bornes du TEG pendant une longue durée en tirant profit de la différence de température entre celle au sol et celle à l'altitude de vol de l'avion [106], [107].

Nous revenons en détail sur la physique de la thermoélectricité et l'utilisation de l'effet Seebeck comme principe de récupération d'énergie dans le chapitre 3.

1.3.4.3. MICROMACHINES THERMIQUES

Une troisième manière de récupérer l'énergie thermique présente sous forme de gradient est la réalisation d'une micromachine thermique. Une machine thermique est un mécanisme qui fait subir à un fluide, des transformations cycliques où le fluide échange de l'énergie sous forme de chaleur avec une source froide et une source chaude et produit un travail mécanique.

Le premier exemple que nous présentons est constitué d'une partie mobile pyroélectrique contenant une cavité d'air du côté de la source de chaleur (voir Figure 33). En position de repos, la partie mobile pyroélectrique est au contact de la source chaude ; lorsque l'air situé dans cette cavité se réchauffe, il se dilate et déplace la partie mobile pour l'amener au contact de la source froide. L'air refroidit alors ramenant le système en position de départ. Dans ce déplacement, le matériau pyroélectrique a changé deux fois de température, générant un courant électrique [108].

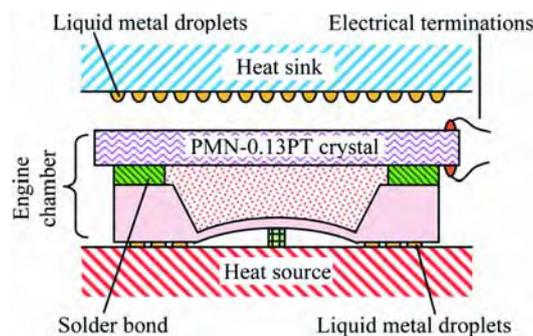


Figure 33. Micromachine thermique pyroélectrique [108].

Le deuxième exemple n'est pas à proprement parler une machine thermique, puisque ne faisant pas intervenir de fluide, mais reste très similaire dans son fonctionnement. Ce système est composé d'un bilame, une

lame composée de deux métaux différents, contenu dans une cavité. La lame et les deux métaux sont conçus et choisis pour se déformer en chauffant et en refroidissant, créant ainsi une oscillation entre une source chaude et une source froide. Deux moyens ont été envisagés pour récupérer cette énergie : en utilisant un électret placé sur le côté froid de la cavité, le bilame oscillant servant alors de contre-électrode (Figure 34), ou en déposant un matériau piézoélectrique sur le côté chaud et froid, la lame oscillante venant frapper ce matériau qui génère alors un courant sous le choc.

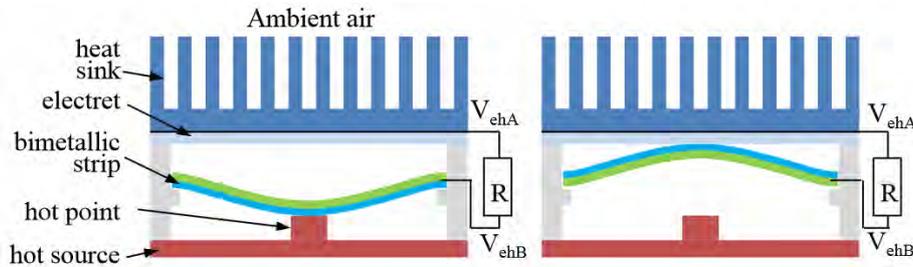


Figure 34. Schéma du récupérateur thermique basé sur l'oscillation d'une lame bimétallique. Sur ce schéma, la génération s'effectue grâce à un électret. [109].

1.4. ARCHITECTURE D'UN CIRCUIT DE RECUPERATION D'ENERGIE

Nous venons de passer en revue les différentes sources d'énergie qui peuvent exister dans l'environnement d'un système de capteur et nous avons détaillé plusieurs technologies permettant d'exploiter ces formes d'énergie. Néanmoins, les récupérateurs présentés sont loin de se comporter comme des générateurs parfaits, ou même convenables pour l'alimentation directe d'une charge :

- La tension générée peut être alternative.
- L'impédance de sortie des récupérateurs peut être très élevée (jusqu'au mégohm) et variable.
- Les sources d'énergie sont souvent intermittentes.
- La tension de sortie peut être faible et variable.

Il est donc nécessaire d'utiliser un circuit électronique comme interface entre le transducteur et la charge à alimenter. Ce circuit va conditionner l'énergie récupérée pour transformer ces sources imparfaites en alimentation utilisable en apportant une solution aux 4 problèmes listés. Il est souvent découpé en trois étages : un étage d'entrée, un étage de stockage, et un étage de sortie, même si, comme nous le verrons, il n'est pas forcément nécessaire d'utiliser cette architecture classique.

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à ces trois blocs en expliquant leurs fonctions et en détaillant les conditions qui les rendent nécessaires ou non.

1.4.1. ETAGE D'ENTREE

L'étage d'entrée est la partie du circuit qui fait l'interface entre le transducteur et le reste du système.

1.4.1.1. REDRESSEUR ET CONVERSION AC/DC

Plusieurs récupérateurs génèrent une tension alternative comme les récupérateurs d'énergie cinétique, les rectennas ou les thermogénérateurs lorsque le gradient de température à leurs bornes s'inverse. Il est alors nécessaire de redresser cette tension et nous présentons les différentes méthodes.

La plus connue est le pont de diodes, ou pont de Graëtz, suivi d'un ou plusieurs condensateurs de lissage (voir Figure 35). Ce circuit a l'avantage d'être passif et d'être simple à mettre en œuvre mais présente

l'inconvénient d'induire des pertes dues à la chute de tension provoquée par les diodes. La tension de sortie V_{DC} du redresseur est égale à :

$$V_{DC} = |V_{AC}| - 2V_T$$

Où V_{AC} est la tension de la source et V_T et la tension de seuil des diodes utilisées. Les diodes Schottky sont conseillées pour ce genre d'application pour leur rapidité de commutation et leur faible tension de seuil V_T , avec des valeurs de l'ordre de 250mV pour des composants sur étagère. Ce type de circuit est donc difficilement compatible avec les sources générant une tension faible où une perte de 500mV n'est pas acceptable.

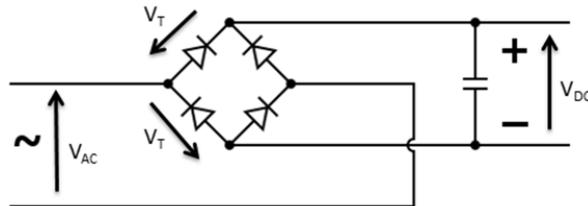


Figure 35. Redressement avec un pont de diode.

Un autre circuit largement employé comme redresseur est le doubleur de tension qui permet, comme son nom l'indique, de fournir une tension continue deux fois plus élevée en sortie qu'en entrée. En cascadant plusieurs doubleurs, on peut multiplier la tension d'un facteur supérieur à deux.

Cependant, il utilise également des diodes (voir Figure 36) comme composant principal ce qui pose le même problème que le pont de diodes lorsque la tension d'entrée est très basse.

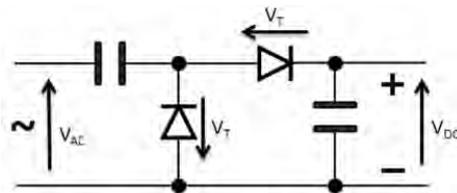


Figure 36. Redressement avec un doubleur de tension de type montage de Greinacher [110].

Pour résoudre le problème de la perte provoquée par le seuil des diodes dans les circuits de redressement, on peut les remplacer par des transistors. Ce montage (Figure 37) se comporte comme une diode avec un très faible seuil et évite la chute de tension et donc la perte d'énergie associée. Il nécessite cependant une alimentation extérieure et ne convient pas pour un simple système devant démarrer de manière autonome avec une réserve d'énergie vide. Il peut par contre être adapté pour un système de récupération multisource : Vanhecke et al. [111] ont conçu un système démarrant grâce à des récupérateurs piézoélectriques qui alimentent les diodes actives de redressement d'un récupérateur thermoélectrique. Ils rapportent une consommation de l'ensemble du circuit de récupération de moins de 300nA.

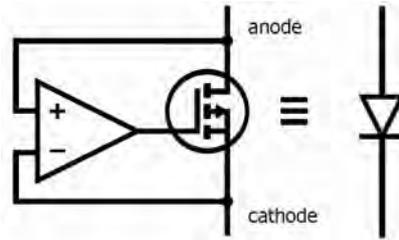


Figure 37. Diode active pour du redressement à faible seuil

Enfin, nous voulons présenter une solution astucieuse à ce problème de redressement pour les transducteurs mécaniques oscillants tels que les cantilevers piézoélectriques, qui ne repose pas sur l'utilisation d'un circuit électronique. En utilisant deux cantilevers oscillants en opposition de phase et tirant profit du fait que le courant généré s'inverse lorsque le mouvement du cantilever s'inverse, des montages utilisent des interrupteurs mécaniques commandés par le déplacement du cantilever pour réaliser un pont en H sans diode ou composant actifs [112].

1.4.1.2. BESOINS DE L'ADAPTATION D'IMPEDANCE

La puissance générée par un récupérateur d'énergie est bien souvent faible au regard de la consommation d'énergie d'un capteur à alimenter et il est alors impératif de maximiser l'énergie transférée de la source à la charge ou à l'élément de stockage. Pour cela, il faut se placer dans le cas de l'adaptation d'impédance, c'est-à-dire lorsqu'il y a égalité entre l'impédance interne du transducteur et l'impédance d'entrée du premier étage. Quand cette condition est satisfaite, on se situe au point de puissance maximum (*Maximum Power Point*, MPP).

L'impédance du transducteur peut varier dans le temps en fonction de paramètres extérieurs, en cas de variation de la température du transducteur (notamment pour la thermogénération et la conversion photovoltaïque) ou de variation de l'irradiance pour les cellules photovoltaïques. Il faut alors que le circuit réalisant l'adaptation d'impédance fasse varier son impédance d'entrée pour suivre le point de puissance maximum, on parle alors de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).

De nombreuses méthodes de MPPT existent et les paramètres importants à prendre en compte pour le choix de l'algorithme sont :

- Le nombre de paramètres à mesurer : tension de circuit ouvert (V_{OC}) ou courant et tension afin de calculer la puissance générée. La mesure de courant se fait souvent grâce à une résistance de faible valeur engendrant des pertes et la mesure de tension de circuit ouvert nécessite de déconnecter le circuit du transducteur, interrompant la récupération pendant ce moment.
- La puissance de calcul demandée : certains algorithmes peuvent être réalisés par des circuits analogiques (par exemple fraction de V_{OC} [113]) réputés peu consommateurs en énergie, d'autres nécessitent un calculateur (par exemple MPPT par réseau de neurones [114]).
- La précision voulue et la rapidité de suivi du MPP.

Le choix de l'algorithme de MPPT est donc le résultat d'un compromis entre ces paramètres qui peut se résumer à une évaluation de l'énergie gagnée par un algorithme efficace par rapport à la surconsommation engendrée par sa mise en œuvre et par la complexité et donc la probabilité de panne potentielle ajoutée.

1.4.1.3. CONVERTISSEUR DC/DC

Un convertisseur DC/DC à découpage constitue l'étage d'entrée classique d'un circuit de récupération d'énergie pour deux raisons :

- Il adapte la tension fournie par le transducteur, en l'élevant ou en l'abaissant, à la tension de l'élément de stockage ou de la charge à alimenter.
- L'impédance d'entrée des convertisseurs DC/DC à découpage varie en fonction de leur fréquence et du rapport cyclique de commande appliqué, permettant de réaliser une adaptation d'impédance.

Le principe de fonctionnement d'un convertisseur DC/DC à découpage repose sur la commutation du courant circulant entre une inductance et un condensateur (voir Figure 38). Selon la disposition de ces éléments, le convertisseur peut-être abaisseur de tension (buck), éleveur (boost) ou les deux (buck-boost, flyback en remplaçant la simple inductance par un transformateur). Un condensateur est placé sur l'entrée du convertisseur afin de garantir que le transducteur soit vu comme une source de tension même s'il se comporte comme une source de courant.

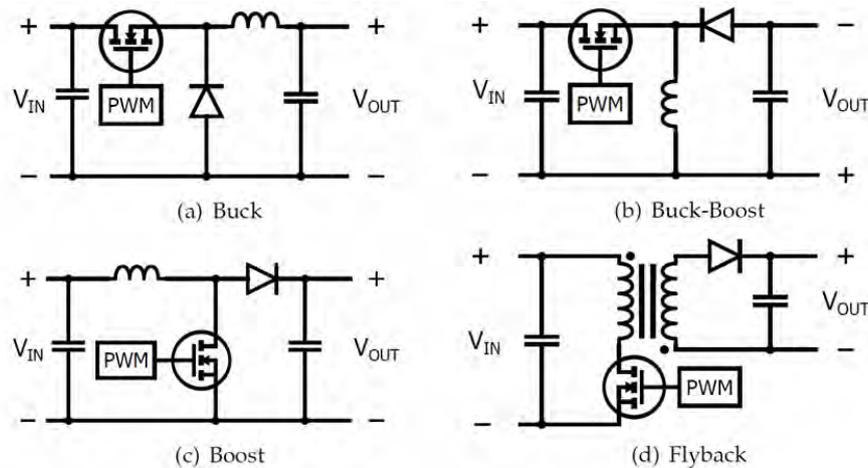


Figure 38. Les 4 topologies de convertisseurs DC/DC à découpage utilisées en récupération d'énergie.

L'impédance d'entrée d'un convertisseur dépend de la fréquence et du rapport cyclique de commutation du transistor, commandé par un signal PWM (modulation de largeur d'impulsion). On peut donc réaliser une adaptation d'impédance en faisant varier un de ces deux paramètres et dans les faits, c'est le rapport cyclique qui est le plus simple à modifier. En mettant ensuite en place une boucle de rétroaction, le système ajuste son impédance d'entrée à la valeur désirée.

Le facteur de mérite d'un convertisseur DC/DC est son rendement de conversion, calculé comme le ratio entre l'énergie fournie à la charge connectée à sa sortie sur l'énergie fournie par le transducteur sur son entrée. Les convertisseurs à découpage ont un bon rendement de conversion par rapport aux autres techniques de conversion DC/DC et on veillera à choisir les composants de manière à limiter les pertes au maximum (faible résistance en régime continu de l'inductance, utilisation d'un transistor ayant une faible résistance drain-source à l'état passant, utilisation d'une diode Schottky pour limiter les pertes de la tension de seuil).

Cependant, ce bon rendement de conversion est à nuancer dans les applications très basses puissances par l'énergie que les composants actifs consomment. Le circuit de commande minimal nécessaire pour réaliser un tel convertisseur se compose d'au moins un oscillateur et une logique simple qu'il faut polariser. Dans le cas d'une MPPT, il est souvent nécessaire d'utiliser un microcontrôleur qui devra être programmé de manière à limiter au maximum sa consommation.

Une alternative au convertisseur à découpage, pour les très basses puissances, est la pompe de charge. Son principe de fonctionnement repose sur la connexion de condensateurs ayant des tensions différentes et entraîne

donc une perte d'énergie inévitable, mais le circuit peut cependant obtenir un rendement meilleur pour de très faible puissance [115] (Kim et al. [116] annonce un rendement de 86% à 35µW en intégrant une MPPT et en utilisant une pompe de charge par intermittence).

Un convertisseur à découpage a besoin d'être polarisé pour fonctionner et a donc besoin d'un circuit auxiliaire de démarrage lorsque les réserves d'énergie sont vides. Ce circuit vient en général charger un condensateur qui alimentera ensuite le convertisseur principal, le temps de son démarrage. Une fois celui-ci opérationnel, le circuit auxiliaire sera éteint.

Pour les transducteurs générant une tension suffisamment élevée, un régulateur LDO suffit ([117]). Pour une application basée sur des générateurs piézoélectriques ou à électrets, Boisseau et al. proposent de n'utiliser qu'un pont de diode chargeant un condensateur jusqu'à atteindre l'énergie suffisante permettant au convertisseur principal de prendre le relai [118]. S'il est nécessaire d'augmenter la tension fournie par le transducteur, les pompes de charge sont les circuits souvent utilisés selon le principe visible Figure 39 ([119], [120]).

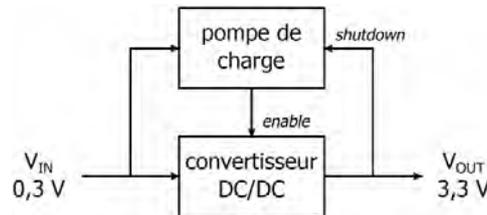


Figure 39. Pompe de charge servant de circuit de démarrage à un convertisseur à découpage d'après [120]. La pompe de se charge cesse de fonctionner une fois que le convertisseur principal a démarré.

Il existe plusieurs circuits intégrés commerciaux réalisant cette fonction d'étape d'entrée. Ces circuits sont des régulateurs à découpage intégrant un circuit de démarrage et proposent plusieurs fonctionnalités : les plus simples sont des circuits boost ou flyback avec une tension d'entrée fixe à régler au point de puissance maximum, les plus complexes intègrent des algorithmes de MPPT, une gestion de charge de batteries Li-Ion, un régulateur auxiliaire, etc. Nous comparons dans le tableau suivant 5 circuits intégrés fabriqués par Texas Instrument, Linear Technology, Maxim Integrated et ST Microelectronics :

	Tension de démarrage (mV)	Tension minimum de fonctionnement (mV)	MPPT	Chargeur de batterie
TI BQ25504	330	80	Oui	Oui
LTC3105	250	225	MPP Fixe	Non
LTC3108	20	20	Non	Non
MAX17710	750	750	Oui	Oui
ST SPI040	300	300	Oui	Non

I.I.I. STOCKAGE

Les systèmes de récupération d'énergie ont la plupart du temps besoin d'un stockage et nous avons déjà abordé les conditions déterminant ce besoin. Ce stockage peut être réalisé soit avec des supercondensateurs, soit avec des accumulateurs électrochimiques et nous résumons dans le tableau suivant les caractéristiques de chaque technologie qui doivent guider ce choix :

	Supercondensateur	Accumulateur
Autonomie	Forte autodécharge	Très bonne
Encombrement	Important	Faible

(densité d'énergie)	(faible densité)	(forte densité)
Susceptibilité environnementale	Peu sensible Ne présente pas de danger	Performances sensibles à la température Dangereux aux températures très élevées
Durée de vie	Virtuellement infinie	100-1000 cycles
Complexité de mise en œuvre	Nécessite un régulateur de sortie	Li-ion : Nécessite un contrôleur de charge et un régulateur
		NiMH : Nécessite des contrôles précis de fin de charge

La contrainte principale étant bien souvent l'autonomie que doit posséder le système et son poids ou volume, il est logique que les accumulateurs soient le plus utilisés, notamment les Li-ion. Néanmoins, dans certains environnements, les supercondensateurs peuvent être plus performants, voire les seuls à pouvoir fonctionner.

1.4.2. ETAGE DE SORTIE

On attend d'une alimentation qu'elle maintienne une tension constante à sa sortie quel que soit le courant demandé et l'état de charge du stockage. Or, les stockages d'énergie voient leur tension varier en fonction de leur état de charge, selon des proportions plus ou moins importantes en fonction de leur technologie (voir la comparaison entre les batteries Li-ion et NiMH Figure 40. La tension aux bornes d'un supercondensateur est, elle, complètement dépendante de son état de charge). Il est donc nécessaire d'utiliser un régulateur de tension entre l'élément de stockage et la charge à alimenter.

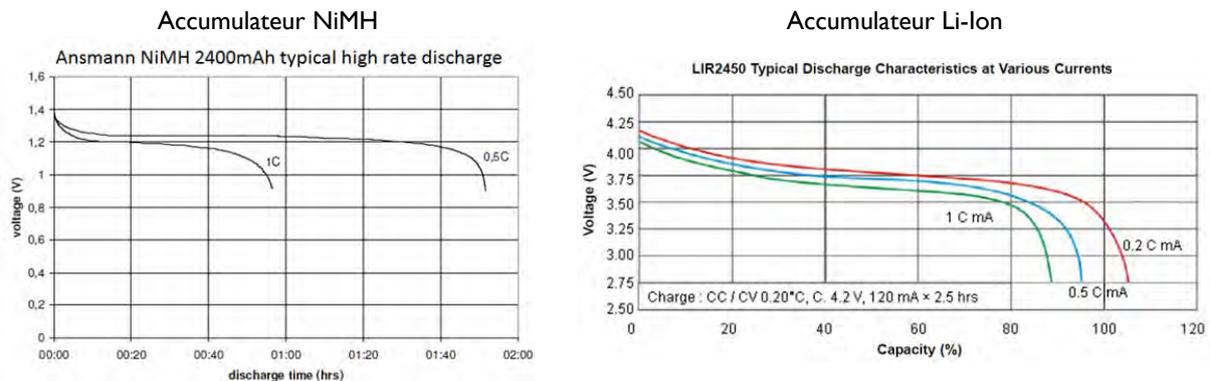


Figure 40. Variation de la tension aux bornes d'un accumulateur Li-ion et d'un accumulateur Nickel au cours d'une décharge d'après leur documentation [121], [122].

Si la régulation de tension est nécessaire et afin de limiter les pertes provoquées par cette régulation, le choix d'un convertisseur DC/DC à découpage est préférable, qu'il soit élévateur ou élévateur-abaisseur en fonction de la tension maximale du stockage.

Lors de l'utilisation d'un supercondensateur comme moyen de stockage de l'énergie, la tension à ses bornes est nulle quand celui-ci est déchargé et va augmenter plus ou moins lentement en fonction de la puissance de charge. Le régulateur de sortie qui est connecté à ce stockage peut subir un mauvais démarrage et ne pas fonctionner (c'est-à-dire qu'aucune tension régulée n'apparaîtra à sa sortie tout en consommant une puissance importante et anormale) quand la tension à son entrée augmente lentement à partir d'une valeur inférieure à sa tension minimale de démarrage. Ce problème peut être résolu en mettant en place un circuit d'« Under Voltage Lock Out » (UVLO) [123], c'est-à-dire d'un système d'activation du régulateur lorsque la tension dans le stockage est suffisante.

1.4.3. COMPOSANTS DE PROTECTION

Pour réaliser un système de récupération d'énergie robuste ayant une durée de vie de plusieurs années, il peut être nécessaire de devoir ajouter des protections contre des événements indésirables. Comme souvent, l'ajout de ces éléments engendre des pertes supplémentaires mais inévitables. Nous présentons ici, à titre d'exemple, quatre protections (trois en entrée, une en sortie) que nous avons eu à mettre en œuvre dans nos systèmes :

- Une protection contre les inversions de polarité accidentelle lors de l'installation du système, constituée d'une diode en inverse sur l'entrée. L'utilisation d'une diode Schottky est ici préférable pour sa rapidité.
- Une protection contre les impulsions électromagnétiques conduites si le système est susceptible d'être installé dans un environnement y étant sensible. Pour limiter les pertes engendrées par cette protection, elle peut se composer d'une simple inductance de mode commun et d'un condensateur de forte valeur agissant comme filtre passe bas.
- Une protection contre les surintensités si le transducteur peut générer un courant important qui dépasse les caractéristiques maximums du convertisseur DC/DC et de l'étage d'entrée en général. Cette protection peut être réalisée à l'aide d'un fusible réarmable à coefficient de température positif (si la rapidité d'ouverture d'un tel composant est suffisante pour l'application), par un circuit intégré dédié, ou par une mesure active du courant et une protection logicielle du calculateur, si existant.
- Une protection contre les courts-circuits de la charge à alimenter, réalisable de la même manière que la protection contre les surintensités d'entrée.

1.5. PROBLEMATIQUE AERONAUTIQUE ET CAS REELS

1.5.1. CONCLUSION SUR LA RECUPERATION D'ENERGIE COMME ALIMENTATION D'UN RESEAU DE CAPTEUR SANS FIL

Pour que les systèmes de récupération d'énergie soient une alternative crédible aux piles électrochimiques comme source d'alimentation, il faut que ces récupérateurs garantissent la même fiabilité. C'est pour cette raison que les développements actuels s'orientent souvent vers une solution utilisant les deux moyens d'alimentation où le récupérateur fournit prioritairement l'énergie à la charge et la pile assure les « creux » de production. Cette méthode permet de garantir une alimentation énergétique en continu et de proposer une durée de vie plus élevée que lors de l'utilisation d'une pile seule.

Néanmoins, un des freins actuels à l'utilisation de la récupération d'énergie comme source d'alimentation repose sur le fait qu'il existe peu de solutions « sur étagère » disponibles. Etant données les faibles quantités d'énergie mises en jeu dans ces systèmes, chaque application est un cas particulier qui nécessite une optimisation en fonction de la situation considérée et limite de fait l'emploi de solutions génériques, augmentant ainsi les coûts de conception.

De plus, dans les années à venir, le développement de composants électroniques plus sobres en énergie et de piles très performantes (piles à combustible, piles classiques Li-Air, Zn-Air) risque d'augmenter significativement la durée de vie des capteurs sans fil sans avoir à capter l'énergie environnante.

Ceci étant dit, la récupération d'énergie reste la seule solution d'alimentation des systèmes autonomes devant être installés dans des conditions incompatibles avec l'utilisation de piles électrochimiques. L'aéronautique constitue une telle niche et nous présentons dans le paragraphe suivant les enjeux d'une application dans ce domaine.

1.5.2. APPLICATION A L'AERONAUTIQUE

Aujourd'hui, l'aéronautique est confrontée à de nombreux défis pour son développement à long terme, au premier rang desquels se situent la préservation de l'environnement et le renchérissement des coûts d'exploitation dû à l'augmentation du coût du carburant. Pour répondre à ces problématiques, des développements sont en cours

Etat de l'art de l'alimentation des capteurs sans fil

comme l'utilisation de nouveaux matériaux de construction pour l'allègement des aéronefs, ou le concept d'avion plus électrique (*More Electrical Aircraft - MEA*).

L'avion plus électrique (MEA) est un concept dans lequel les réseaux de puissance traditionnels présents dans un aéronef (mécanique, pneumatique, hydraulique et électrique) seraient progressivement remplacés par un réseau de puissance principalement électrique (hors propulsion, ce cadre-là relevant de l'avion dit *électrique*). Les objectifs poursuivis concernent la réduction de poids, ainsi que celle des coûts de fabrication et de maintenance.

Les réseaux de capteurs trouveront un usage dans le suivi du vieillissement de la structure de l'aéronef et de ses composants. En effet, un avion évolue dans un environnement difficile (variations de températures et de pression, humidité, vibrations, poussières, chocs aviaires...) auxquelles s'ajoutent pour certains composants des contraintes spécifiques (température en zones moteur et freins, charge acoustique en zone moteur, contraintes mécaniques, liquides corrosifs...). Les opérations d'inspection et de maintenance sont donc essentielles. Elles sont classiquement organisées périodiquement, anticipant sur les défaillances ou les pertes d'efficacité prévisibles. Le suivi de vieillissement (*Health Monitoring*) par réseaux de capteurs installés à demeure permettrait par contre de ne décider d'opérations de maintenance que lorsque nécessaires, économisant ainsi du temps (en particulier pour les zones difficiles d'accès), du poids (par diminution des marges mécaniques) et donc du carburant.

Ces questions de suivi du vieillissement de la structure d'un avion par réseau de capteur intéressent notamment l'armée des Etats-Unis dans le but d'optimiser les coûts de maintenance de ses appareils ([124], [125]). Une des technologies envisagée pour réaliser ces mesures d'intégrité de structure dans des jets militaires ou dans des appareils civils repose sur l'émission d'ondes acoustiques qui se propageront différemment si des fissures ou des déformations des pièces existent ou non ([126], [127]).

Toutefois, le déploiement de nouveaux réseaux de capteurs filaires se heurte à la complexité des réseaux électriques déjà présents dans les avions commerciaux. La Figure 41, qui reprend les données de la Figure 3 donne quelques valeurs approximatives de longueurs de câblage pour un avion de ligne, un avion de combat, et une automobile moderne.



Figure 41. Echelle du haut : longueurs totales des câbles électriques dans une automobile moderne, un avion de combat et un avion de ligne. Echelle du bas, longueurs totales ramenées à la longueur de l'objet considéré (respectivement 3m80, 16m et 73 m).

Dans le cas de l'A380 où cette valeur nous est approximativement connue, il n'est pas inutile de mentionner que la longueur supplémentaire des câbles déployés lors des essais en vol effectués par le constructeur est de 300 km, à rajouter aux 500 km déjà présents. Dans le cadre des essais en vol, ces réseaux supplémentaires sont particulièrement difficiles à déployer dans un avion qui n'a pas été conçu pour cela.

Le contexte aéronautique est donc le lieu d'un paradoxe : le besoin de nouveaux réseaux de capteurs est élevé, et s'oppose à la contrainte de ne pas trop surcharger un câblage déjà complexe. Le recours à des réseaux de capteurs sans fil est donc naturel, avec l'obligation de l'autonomie énergétique.

L'environnement difficile que représente l'aéronautique est une opportunité pour un système de récupération d'énergie pour les sources d'énergie qu'il constitue : vibrations, variations de températures spatiales et temporelles, bruit, etc. De plus, les conditions extrêmes, notamment la température pouvant rendre impossible

Etat de l'art de l'alimentation des capteurs sans fil

l'utilisation de piles électrochimiques, font de la récupération d'énergie un des seuls moyens pour atteindre l'autonomie énergétique d'un réseau de capteur.

Cependant, pour pouvoir prétendre à une installation sur avion, un tel système doit se plier aux règles de sécurité drastiques de l'aéronautique, ce qui réduit son potentiel (masse du récupérateur, rendement, etc.).

1.5.3. ÉTUDE DE LA RECUPERATION D'ENERGIE DANS L'AERONAUTIQUE A TRAVERS DEUX CAS CONCRETS

Nous présentons dans ce mémoire deux systèmes de récupération d'énergie conçus pour l'alimentation de capteurs sans fil installés sur avion.

Le développement de ces deux systèmes a été conduit dans l'objectif d'une installation et d'un essai en condition réelle et intègre donc toutes les contraintes qu'impose ce type d'application. Si les exemples d'alimentation par récupération d'énergie et les idées d'installation sur avion sont courants, les réalisations concrètes sont plus rares et nous voulons présenter ici les enseignements que la conception complète de ces deux prototypes, de l'étude à l'essai final, nous a apportés.

Le premier système que nous présentons est une alimentation photovoltaïque installée sur l'aile d'un A321. Le projet a été réalisé avec une équipe chargée d'essais en vol dont le but était d'obtenir une alimentation amovible pour faire fonctionner une ceinture de capteurs communiquant ensuite sans fil vers l'appareil. L'intérêt d'un tel système est de se passer d'un câblage coûteux, long et difficile à installer pour obtenir une solution rapidement déployable pour faire fonctionner un capteur situé sur l'extrados d'une aile d'avion.

Le deuxième système est une alimentation thermoélectrique située dans le mât réacteur d'un A380, proche des moteurs, pour alimenter un système de surveillance de la structure (*Structural Health Monitoring*). Cette zone très exigeante pour les structures mécaniques de l'avion est un excellent candidat au déploiement d'un système de SHM et un lieu propice à une alimentation par récupération d'énergie.

2. PREMIER CAS D'ETUDE : RECUPERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE POUR UNE INSTRUMENTATION D'ESSAIS EN VOL

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

2. PREMIER CAS D'ETUDE : RECUPERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE POUR UNE INSTRUMENTATION D'ESSAIS EN VOL

Des différentes sources d'énergie exploitables que nous avons présentées dans le chapitre précédent, l'énergie solaire possède une des plus fortes densités d'énergie, et ce, même par temps couvert. C'est donc naturellement que beaucoup de systèmes autonomes, et donc de capteurs sans fil, utilisent cette source.

Mais si ce choix d'alimentation peut être idéal pour un système installé au sol, ce n'est pas forcément la ressource idéale pour l'aéronautique : il faut que le vol se déroule de jour et que la charge à alimenter soit située à l'extérieur et sur le dessus de l'appareil pour éviter un câblage qui annulerait tout l'intérêt de la démarche.

Néanmoins, disposer une alimentation photovoltaïque en dessous de l'appareil pourrait également être envisagé dans le cas d'une application très basse consommation qui utiliserait le rayonnement diffusé par l'atmosphère et le rayonnement renvoyé par la couche nuageuse ou par le sol. De plus, il est à noter que la majorité des essais en vol dans l'aéronautique se déroulent durant la journée pour des raisons de sécurité.

Dans ce chapitre, nous présentons notre travail sur l'alimentation de capteurs installés sur l'extrados de l'aile d'un A321 pour des vols d'essais qui se sont déroulés de jour.

Nous commençons cette partie par une présentation rapide de la physique de l'effet photovoltaïque et des différentes technologies de cellules existantes pour nous permettre de choisir et d'anticiper le comportement du panneau qui sera utilisé.

Nous présenterons ensuite en détail les choix de conception de notre récupérateur en montrant les essais qui ont conduit aux choix technologiques des panneaux photovoltaïques et des supercondensateurs de stockage. Nous expliquons également l'architecture du circuit électronique et l'algorithme déterminant le fonctionnement de ce dernier.

Enfin, nous présentons les résultats des essais qui ont été menés sur l'avion lors d'un vol de plusieurs heures pendant lequel le système a alimenté les capteurs qui y étaient connectés.

2.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Une cellule photovoltaïque convertit le rayonnement lumineux incident en électricité. La lumière étant quasiment omniprésente dans notre environnement humain, ce principe est utilisé depuis plus de 50 ans pour alimenter une très grande diversité de systèmes autonomes, des calculatrices solaires aux satellites.

Dans cette première partie, nous présentons le fonctionnement de base de l'effet photoélectrique dans une jonction PN d'un semiconducteur, ce qui représente le fonctionnement d'une grande partie des cellules photovoltaïques. Nous nous intéressons ensuite au comportement d'un panneau photovoltaïque dans son ensemble et plus particulièrement aux effets de la variation des paramètres physiques comme la température et l'irradiance (l'intensité du rayonnement incident). Enfin, nous finissons cette partie en présentant les différentes technologies de panneaux solaires.

2.1.1. EFFET PHOTOVOLTAÏQUE ET JONCTION PN

L'effet photovoltaïque décrit l'apparition d'une tension ou d'un courant électrique dans un matériau soumis à un rayonnement lumineux. Les technologies photovoltaïques reposent toutes sur l'absorption d'un photon menant à l'excitation d'un électron qui passe alors dans la bande de conduction du matériau, créant ainsi une différence de potentiel. Nous décrivons plus en détail le mécanisme en jeu dans une jonction PN de semiconducteur, qui est notamment le fonctionnement des cellules en silicium.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est éclairé avec un rayonnement approprié (l'énergie des photons doit être supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau), les photons sont absorbés et provoquent la transition énergétique d'électrons de la bande de valence à la bande de conduction, créant ainsi des paires électron-trou. Si on illumine une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de déplétion sont immédiatement séparées par le champ électrique très fort qui y règne, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction, et s'il est connecté à une charge électrique, un courant s'établit [128], [129].

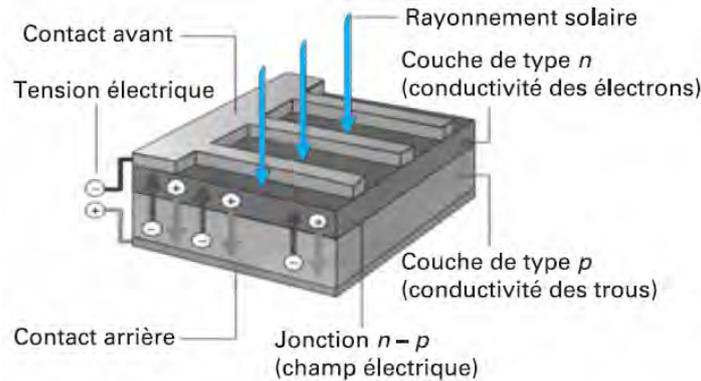


Figure 42. Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque [129].

Les principales pertes énergétiques dans une cellule sont dues aux photons trop ou pas assez énergétiques (voir le schéma Figure 43 qui illustre ces pertes pour une jonction PN en silicium) :

- Les photons infrarouges, dont l'énergie est inférieure à celle de la bande interdite, traversent la cellule sans être absorbés.
- Les photons très énergétiques, comme les ultraviolets, ne génèrent qu'une seule paire électron-trou en cédant une quantité d'énergie égale à l'énergie de la bande interdite, et l'excédent est transformé en chaleur.

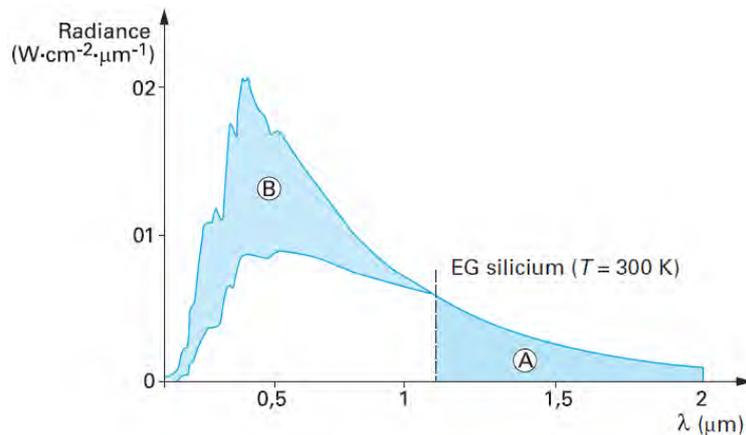


Figure 43. Diagramme des pertes de conversion provoquées par les photons trop ou pas assez énergétiques dans une jonction PN silicium à 300 Kelvin. En blanc : énergie incidente convertie en paires électron-trou. En bleu, A : pertes des photons pas assez énergétiques non absorbés, B : pertes de l'excédent d'énergie des photons trop énergétiques [129].

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

Les autres pertes viennent de phénomènes physiques à l'intérieur de la cellule (recombinaison des électrons générés avant qu'ils ne migrent vers les contacts), de pertes électriques classiques (résistance des matériaux et des contacts), du reflet d'une partie du rayonnement incident par le matériau photovoltaïque (des traitements de surface antireflets sont utilisés pour diminuer ces pertes), etc.

2.1.2. COMPORTEMENT D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

2.1.2.1. MODELISATION D'UNE CELLULE

Une cellule solaire est donc une jonction PN, c'est-à-dire une diode. La caractéristique d'une telle jonction lorsqu'elle est éclairée est présentée Figure 44 en convention récepteur. Dans le quadrant IV, le système fonctionne en générateur dont le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement et dont la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe [130].

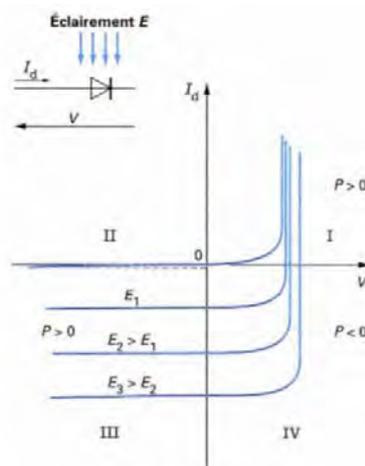


Figure 44. Caractéristique électrique d'une jonction PN éclairée par un rayonnement E. La courbe passant par zéro représente la caractéristique avec un éclairement nul [130].

Le modèle électrique d'une cellule photovoltaïque est présenté Figure 45 où I_{CC} est le courant de court-circuit de la cellule. Ce modèle fait apparaître les résistances parasites R_s et R_{SH} qui sont souvent ignorées ($R_s = 0$ et $R_{SH} = \infty$).

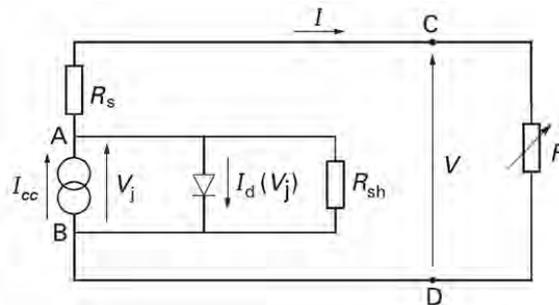


Figure 45. Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque.

2.1.2.2. CARACTERISTIQUE D'UN PANNEAU SOLAIRE

Les cellules photovoltaïques sont ensuite connectées en série pour former une branche de tension plus élevée (la tension de circuit ouvert typique d'une cellule en silicium est de $V_{OC} = 0,6V$) et ces branches sont ensuite

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

connectées en parallèle. Lorsque les cellules ainsi associées sont identiques, soumises au même éclairage et à la même température, le panneau photovoltaïque se comporte dans son ensemble comme une seule cellule. Sa tension de circuit ouvert est égale à la tension de circuit ouvert d'une branche et son courant de court-circuit est la somme des courants de court-circuit de chaque branche.

La caractéristique électrique typique d'un module photovoltaïque est visible Figure 46, et est de la même forme que la caractéristique d'une diode, mais lue en convention générateur. Le point remarquable de cette caractéristique est le point de puissance maximale (MPP, *Maximum Power Point*) : c'est à ce point de fonctionnement qu'un système de gestion d'un module photovoltaïque cherchera à se positionner pour utiliser de manière optimale cette source d'énergie. Pour la technologie silicium, la tension V_{MP} du MPP est typiquement de l'ordre de $0,8 V_{OC}$.

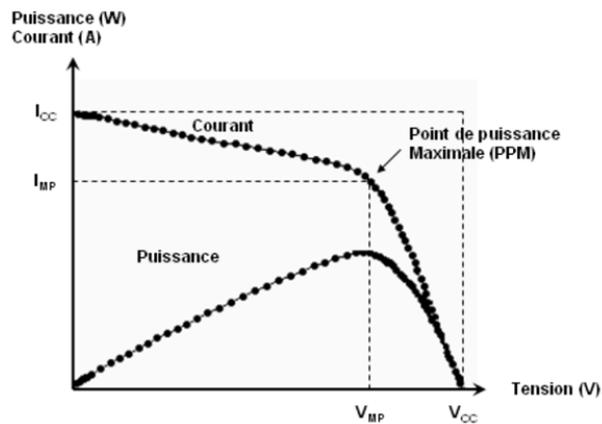


Figure 46. Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'un panneau solaire. I_{CC} est le courant de court-circuit, V_{CO} la tension de circuit ouvert et I_{MP} et V_{MP} respectivement le courant et la tension au point de puissance maximum [131].

Le paramètre essentiel de mesure de la performance d'une technologie photovoltaïque est le rendement de conversion. Le rendement de conversion est défini comme le rapport entre la puissance électrique produite au point de puissance maximum sur la puissance lumineuse reçue par le module.

Comme nous le verrons un peu plus en détail, le rendement de conversion d'un panneau solaire varie en fonction de plusieurs paramètres : température, intensité de l'éclairage (appelée irradiance et mesurée en W/m^2), spectre du rayonnement, etc. Afin de pouvoir comparer entre elles les différentes technologies, des conditions standards de test (STC, *Standard Tests Conditions*) ont été définies :

- Le spectre du rayonnement incident est le spectre du soleil reçu sur Terre (voir Figure 47).
- L'irradiance reçue est de $1000 W/m^2$.
- La température du panneau est de $25^\circ C$.
- Le rayonnement solaire étant modifié par l'épaisseur de la couche atmosphérique qu'il traverse (par absorption et diffusion), les STC considèrent un rayonnement traversant une densité atmosphérique AM 1,5 (*Air Mass*) (voir Figure 47 et Figure 48). Cette valeur correspond globalement aux conditions d'un module placé aux latitudes tempérées (Europe, Etats-Unis, Chine). La densité atmosphérique au niveau de l'équateur pendant un équinoxe serait AM1 et dans l'espace AM0 (pas d'atmosphère à traverser).

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

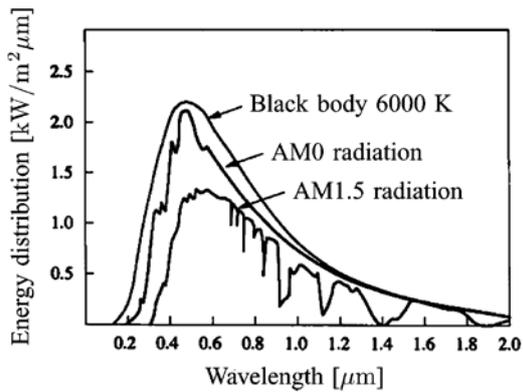


Figure 47. Distribution spectrale du rayonnement d'un corps noir, du rayonnement du soleil dans l'espace (AM0) et du rayonnement du soleil reçu sur terre (AM1,5) [132].

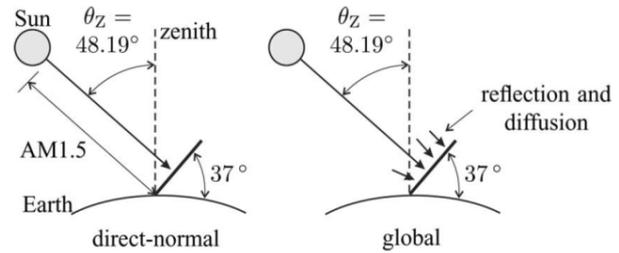


Figure 48. Illustration du rayonnement (direct et diffusé) reçu par un panneau orienté à 37° de manière à ce que le rayonnement direct soit perpendiculaire à la surface du panneau (conditions correspondantes à AM1,5) [132].

2.1.3. PERFORMANCES D'UN PANNEAU SOLAIRE

La caractéristique d'un panneau photovoltaïque varie en fonction des conditions physiques auxquelles il est soumis. Nous expliquons dans cette partie l'effet de la variation de l'irradiance, de la température et de l'ombrage d'une partie du module photovoltaïque sur les performances d'un tel module.

2.1.3.1. EFFET DE L'IRRADIANCE

L'irradiance est la puissance lumineuse reçue par le panneau, par unité de surface. On considère que sous les latitudes tempérées, l'irradiance maximale est de 1000W/m², ce qui correspond aux conditions idéales autour du solstice d'été. L'irradiance varie grandement en fonction des conditions météorologiques, lors d'un temps nuageux en hiver, elle peut chuter jusqu'à 30W/m².

La caractéristique typique d'une cellule photovoltaïque en fonction de l'irradiance est donnée Figure 49.

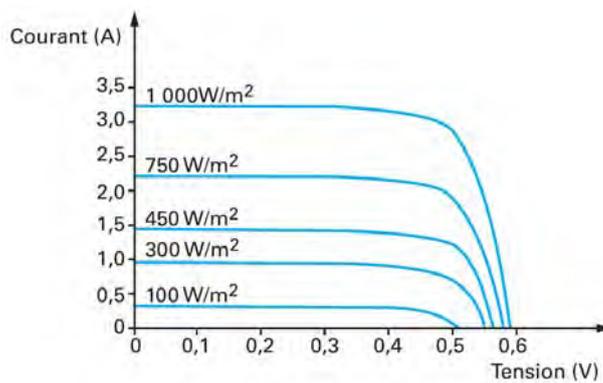


Figure 49. Evolution de la caractéristique d'une cellule solaire en fonction de l'irradiance [129].

La tension générée par la cellule varie peu, alors que le courant, et donc la puissance générée, diminuent avec l'irradiance. Il est logique que la puissance produite diminue lorsque l'irradiance baisse puisque c'est la puissance reçue par le module qui diminue. Mais le rendement de conversion de la cellule est également lié à l'irradiance et pour plusieurs technologies de cellules photovoltaïques, ce rendement est d'autant plus faible que la luminosité est basse (pour les cellules en Silicium cristallin notamment, voir Figure 50).

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

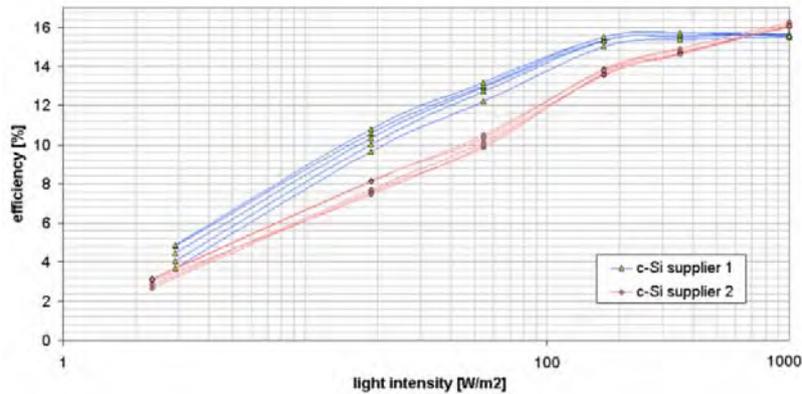


Figure 50. Evolution du rendement de conversion de cellules en silicium cristallin venant de deux fournisseurs différents en fonction de l'irradiance [133].

En revanche, pour d'autres technologies comme le silicium amorphe, le rendement de conversion varie peu ou pas avec l'irradiance (voir Figure 51). Cela peut être important pour le choix d'un panneau solaire devant être utilisé à faible luminosité : une technologie ayant un faible rendement, mais indépendant de l'irradiance, peut devenir un meilleur choix à faible luminosité.

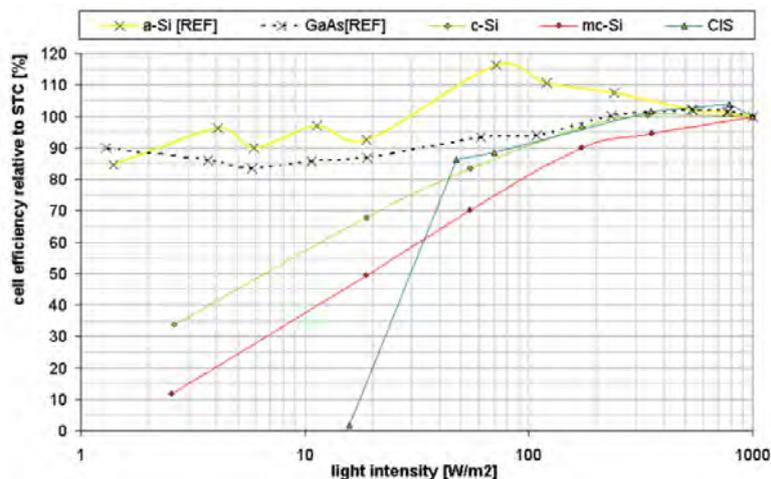


Figure 51. Le rendement de conversion des cellules photovoltaïques évolue différemment en fonction de la technologie de la cellule [133].

2.1.3.2. EFFET DE L'OMBRAJE PARTIEL

Comme nous l'avons vu, une diminution de l'irradiance provoque une baisse du courant maximal d'une cellule. Un panneau solaire étant constitué de plusieurs branches de cellules photovoltaïques connectées en série, une diminution de l'irradiance sur une seule cellule pénalisera le courant de toute la branche, faisant drastiquement baisser le rendement du panneau considéré.

Ce point est un problème important pour les grandes installations photovoltaïques où de la poussière ou des déchets, comme des feuilles mortes, peuvent réduire la puissance générée. La solution la plus courante est de placer une diode de « bypass » parallèle aux cellules, ce qui permet de garder un courant maximal constant dans la zone ombragée. Dans le cas d'une installation aéronautique, la question n'est pas prioritaire.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

2.1.3.3. EFFET DE LA TEMPERATURE

Le rendement d'une cellule photovoltaïque dépend de sa température, et ce rendement est plus faible aux températures élevées qu'aux températures basses. La relation entre température et rendement est souvent considérée comme étant linéaire selon l'équation suivante [134] :

$$\eta = \eta_{T_{ref}}(1 - \beta_{ref}(T - T_{ref}))$$

Avec η le rendement de la cellule photovoltaïque, $\eta_{T_{ref}}$ le rendement à la température de référence T_{ref} , T la température et β_{ref} le coefficient de température de la cellule photovoltaïque. Ce dernier coefficient dépend principalement du matériau et est fourni par le constructeur.

En s'intéressant à la caractéristique typique d'une cellule photovoltaïque à différentes températures, on note que c'est la tension de circuit ouvert, et donc la tension du point de puissance maximum, qui est affectée, le courant de court-circuit variant peu (Figure 52).

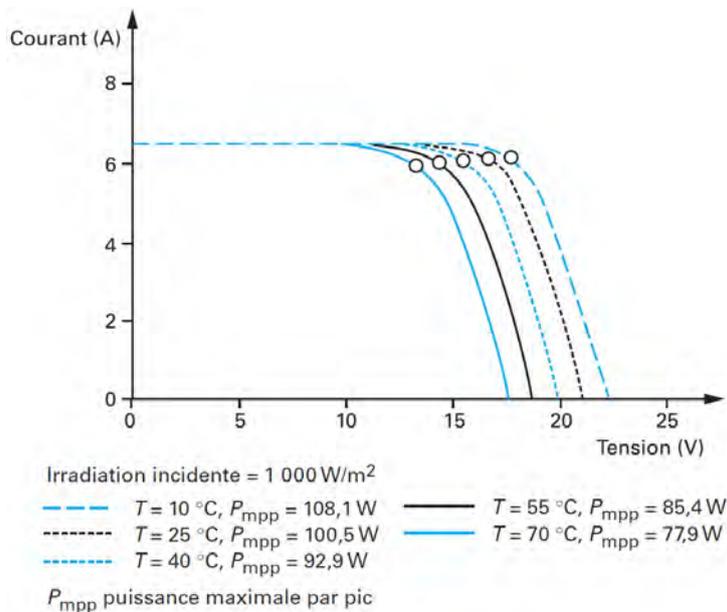


Figure 52. Evolution de la caractéristique d'une cellule photovoltaïque en fonction de la température [129].

Cet effet est problématique pour de nombreuses applications solaires : puisque l'installation est exposée au soleil et que le rendement de conversion de la puissance reçue n'est pas de 100%, une bonne partie de cette puissance est transformée en chaleur, ce qui va élever la température du module et réduire son rendement.

En revanche, pour une application aéronautique, la température à l'altitude de croisière d'un avion étant aux alentours de -50°C, le rendement du panneau solaire n'en sera qu'augmenté.

2.1.4. DIFFERENTES TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES

Depuis les premiers modules photovoltaïques en silicium fabriqués dans les années 50 [135], beaucoup de technologies différentes ont vu le jour pour convertir directement le rayonnement lumineux en électricité. La technologie photovoltaïque étant envisagée depuis longtemps comme source d'énergie potentielle à grande échelle,

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

le principal axe de développement des modules a été de chercher le meilleur rapport entre l'énergie produite et le coût de l'installation (coût de fabrication et coût de maintenance).

Cet axe d'amélioration n'est pas forcément compatible avec la qualité principale qui est recherchée en récupération d'énergie : la meilleure densité d'énergie, c'est-à-dire pour le photovoltaïque, le meilleur rendement de conversion pour une irradiance donnée. Dans cette partie, nous présentons brièvement les différentes technologies existantes ainsi que quelques technologies prometteuses aujourd'hui en développement.

2.1.4.1. 1^{ERE} GENERATION : MODULES MASSIFS EN SILICIUM

La première génération de cellules photovoltaïques est faite d'une structure cristalline de silicium. Bien qu'étant la plus ancienne, cette technologie n'est pas obsolète et a fait l'objet d'une amélioration continue de ses capacités et de son rendement depuis ses débuts. On distingue deux structures : les structures monocristallines (c-Si) et les structures polycristallines (p-Si).

Les cellules monocristallines sont fabriquées, comme leur nom l'indique, à partir d'un lingot de Silicium monocristallin. Cette technologie atteint un rendement maximum de 25% [91] en condition standard de test. La méthode de fabrication de cette technologie est similaire à celles utilisées dans l'industrie microélectronique et a donc beaucoup profité des progrès de cette dernière.

Les cellules en silicium polycristallin sont fabriquées à partir d'un lingot de silicium composé de plusieurs cristaux orientés selon différentes directions. La fabrication de tels lingots coûte moins cher que la fabrication de lingots monocristallins, et le but de cette technologie est de baisser le coût de fabrication d'un panneau photovoltaïque. Le rendement d'une cellule p-Si est néanmoins plus faible que celui d'une cellule c-Si, les valeurs couramment annoncées étant autour de 15%, bien que le record de cette technologie est de 20,8% [91].

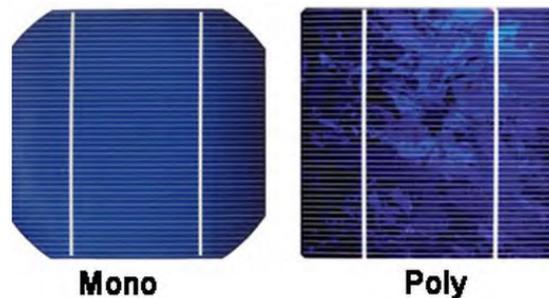


Figure 53. Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin à gauche et polycristallin à droite [136].

Dans une cellule en silicium classique, des contacts métalliques sont positionnés du côté de la surface éclairée de la cellule. Ces contacts masquent donc une partie du rayonnement incident, réduisant la surface exposée. Une amélioration qui a permis de faire gagner 15 à 20% de rendement a été de percer des trous au laser à travers la cellule afin de réaliser des contacts traversant et de placer les contacts métalliques sur la face arrière, éliminant ainsi l'obstruction. Cette technique s'appelle « emitter wrap-through cell ».

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

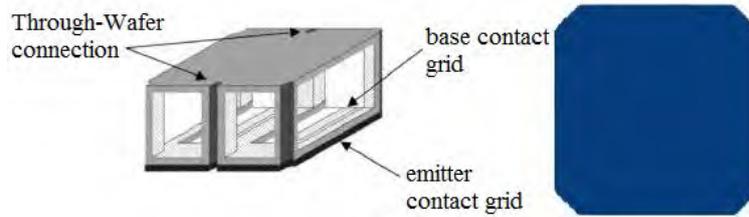


Figure 54. A gauche, schéma des contacts sur la face arrière grâce à des trous percés au laser à travers la cellule photovoltaïque [135], à droite, photo d'une cellule c-Si à contacts face arrière [137] où plus aucun contact n'apparaît.

2.1.4.2. 2^{EME} GENERATION : COUCHES MINCES

Contrairement aux cellules massives de première génération où le matériau photovoltaïque est pris en sandwich entre deux plaques de verre, la deuxième génération regroupe les cellules fabriquées par dépôt de couches minces sur du verre ou de l'acier inoxydable. Cette technologie vise à fabriquer des modules à faibles coûts (en utilisant moins de matériaux) et potentiellement flexibles lors d'un dépôt sur une fine feuille d'acier. Cette méthode de fabrication réduit également le poids et l'épaisseur du module.

2.1.4.2.1. SILICIUM AMORPHE

Les cellules en silicium amorphe (a-Si) sont une des premières technologies en couche mince à avoir été développée. Le rendement d'une cellule en silicium amorphe simple est de 12% après fabrication, mais chute rapidement après un premier temps d'exposition au soleil, pour se stabiliser finalement autour de 4-8%. Pour augmenter ce rendement, les cellules sont composées de plusieurs jonctions de a-Si empilées, ou sont combinées avec une couche mince de silicium polycristallin. Le rendement record d'une cellule en silicium amorphe est de 13,6% [91].

Les cellules en silicium amorphe sont déjà très utilisées dans des calculatrices solaires ou pour des modules souples servant de chargeurs d'appareils électroniques portatifs.



Figure 55. Module PowerFilm® en a-Si pour recharger des appareils électroniques portatifs [138].

2.1.4.2.2. SILICIUM MONOCRISTALLIN EN COUCHE MINCE

Le silicium monocristallin peut aussi se présenter en couche mince. Les rendements atteints par cette méthode sont inférieurs aux modules massifs et le coût de fabrication est élevé. Cette technique permet par contre d'atteindre des rendements importants pour des modules qui peuvent être relativement souples, comme le

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

panneau SolbianFlex que nous avons utilisé dans l'étude présentée dans ce chapitre [139], et les recherches actuelles annoncent des modules réellement flexibles avec des rendements supérieurs à 15% [140], [141].

2.1.4.2.3. ARSENIURE DE GALLIUM EN COUCHE MINCE

Les panneaux photovoltaïques en arséniure de gallium existent depuis les années 1970, et leur énergie de bande interdite permet d'obtenir une absorption plus efficace des photons de haute énergie. Récemment, des outils ont été développés pour produire en masse ce type de technologie en couche mince et ainsi fabriquer des cellules souples [142].

La société canadienne AltaDevices fabrique cette technologie photovoltaïque et détient le record de rendement avec une valeur de 28,8% [91] et un rapport poids/puissance annoncé de 1 watt par gramme. Le coût de ces cellules est néanmoins extrêmement élevé (par exemple un panneau de 25Wc, 0.12m² à 2800€) et leur utilisation est réservée à des applications de niche où le poids et l'encombrement sont les facteurs déterminants.

2.1.4.2.4. TECHNOLOGIE CADMIUM

Les cellules utilisant du cadmium (CdTe ou CdS/CdTe) sont peu chères et faciles à fabriquer, tout en présentant un bon rendement. En créant des cellules à jonctions multiples, First Solar a atteint un rendement record de 21,5% [91]. Le déploiement à grande échelle de cette technologie est néanmoins compromis par la toxicité du cadmium pour l'homme et l'environnement et plusieurs législations existent pour limiter l'usage de ce métal (notamment la directive européenne RoHS [143]). Une autre limite à l'utilisation de cette technologie est la relative rareté du tellure, rendant la production de masse à faible coût incertaine à long terme.

2.1.4.2.5. CIS/CIGS

Ces cellules photovoltaïques sont composées de cuivre, d'indium et de sélénium avec parfois du gallium (ce qui augmente l'énergie de la bande interdite), et se comporte comme plusieurs hétérojonctions (jonction entre deux semiconducteurs de bande interdite différente), ce qui leur permet d'avoir un large spectre d'absorption de la lumière. Plusieurs techniques de dépôt existent pour fabriquer ces modules : en impression, en pulvérisation cathodique ou par dépôt électrolytique, sur du verre ou de l'acier inoxydable, ce dernier support permettant de réaliser des modules flexibles.

Cette technologie présente un bon rendement de conversion avec un record pour une cellule en CIGS de 21,7% [91]. Le défi pour son développement est d'arriver à réduire les coûts de fabrication pour la rendre compétitive face aux modules en silicium. A moyen et long terme, l'approvisionnement en indium posera problème, l'indium étant rare et l'oxyde d'indium-étain est déjà largement utilisé aujourd'hui dans la production d'écrans plats.

Les modules en CIS ou CIGS sont facilement disponibles pour des grandes installations ou dans des applications portatives comme des chargeurs d'appareils électroniques (voir Figure 56).

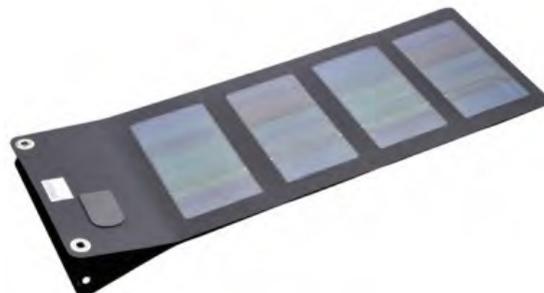


Figure 56. Panneau solaire Sunlinq™ en CIGS de Global Solar® pour recharger un appareil électronique [144].

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

2.1.4.3. 3^{EME} GENERATION : TECHNOLOGIES EMERGENTES

La 3^{eme} génération de cellules photovoltaïques regroupe les nouvelles technologies qui essaient d'améliorer drastiquement le rendement de conversion ou de proposer une fabrication à très faible coût. Beaucoup sont encore à l'état de recherche de laboratoire mais certaines technologies, comme les multijonctions, occupent déjà des secteurs de niches grâce à leur rendement de conversion très élevé.

2.1.4.3.1. CELLULES MULTIJONCTIONS

Les cellules multijonctions visent à augmenter le rendement de conversion en empilant plusieurs couples de matériaux différents absorbant chacun une partie du rayonnement solaire. L'empilement se fait avec la jonction de plus haute énergie en haut de la cellule qui va absorber les photons les plus énergétiques et laisse passer les longueurs d'onde plus faibles.

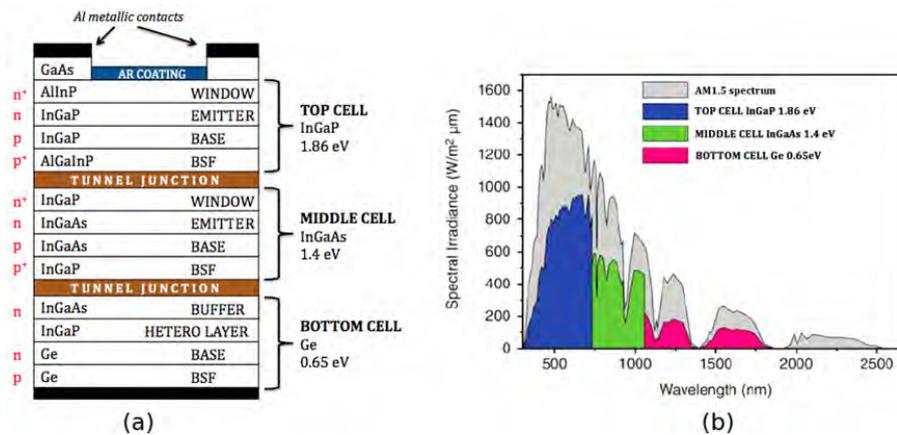


Figure 57. (a) Illustration de la structure d'une cellule triple jonction : trois cellules sont empilées l'une sur l'autre. (b) Spectre absorbé par la cellule par rapport au spectre solaire aux conditions standards de test (1,5 AM) [145].

On peut comparer ce diagramme à celui d'une jonction silicium standard Figure 43.

Ce type de cellule détient les records de rendement de conversion photovoltaïque avec une valeur de 38,8% pour des cellules à quadruple jonction en condition standard de test [91]. Elles sont néanmoins très chères à produire et sont donc utilisées dans des situations tirant profit au maximum de leur capacité : sur Terre, elles sont employées avec des concentrateurs de lumière pour rentabiliser une faible surface de cellule. Cette concentration augmente l'irradiance incidente, ce qui améliore encore leur rendement de conversion. Elles détiennent ainsi le record absolu de conversion photovoltaïque avec un rendement de 46% [91]. Malgré ces performances exceptionnelles, leur utilisation comme générateur électrique de grande puissance reste onéreux car elles ont besoin d'un système de suivi du soleil pour être en permanence orientées correctement.

Ce sont aussi ces cellules qui sont utilisés dans le spatial pour bénéficier d'un meilleur rapport puissance/encombrement et puissance/masse, qui sont les paramètres critiques dans ce secteur. Leur rendement dans l'espace est également meilleur que sur Terre puisque le rayonnement incident ne traverse pas la couche atmosphérique (AM0).

2.1.4.3.2. CELLULES DE GRÄTZEL

Les cellules de Grätzel (DSSC, *Dye-sensitized photovoltaic cell*) essaient de reproduire la conversion de la lumière qui se déroule dans les plantes par photosynthèse. Un colorant photosensible génère une paire électron-trou quand il est frappé par un photon. Ce colorant est placé dans un électrolyte liquide qui conduit les charges vers les électrodes de la cellule.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

Ces cellules bénéficient d'un engouement assez fort depuis que le principe a été découvert dans les années 1990, et présentent plusieurs avantages :

- elles promettent un coût faible de fabrication à grande échelle,
- elles sont transparentes et colorées, et peuvent ainsi être utilisés sur la façade d'un immeuble vitré (voir Figure 58)
- elles peuvent être souples si elles sont encapsulées dans un contenant souple (typiquement un polymère).



Figure 58. Bâtiment de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne couvert de panneaux en cellules de Grätzel.
Photo : ©Fernando Guerra [146].

Le rendement de ce type de cellule photovoltaïque varie en fonction du colorant et de l'électrolyte utilisés, le rendement maximal atteint étant de 11,9% [91].

Cependant, les matériaux permettant les meilleurs rendements rencontrent souvent des problèmes de stabilité aux UV et aux fortes températures, et le solvant utilisé comme électrolyte, souvent organique, peut se révéler inapproprié pour une encapsulation avec un polymère, ou être dangereux pour l'environnement en cas de fuite. Les cellules utilisées aujourd'hui ont donc plutôt un rendement de conversion compris entre 5 et 10%.

2.1.4.3.3. CELLULES PEROVSKITE

Les cellules pérovskites reposent sur le même principe que les cellules de Grätzel mais font intervenir un électrolyte solide et le matériau qui absorbe la lumière a une structure cristalline particulière appelée structure pérovskite [147].

Les premières cellules pérovskites ont été fabriquées en 2009 avec un rendement de 3,8%. En 2015, le record de cette technologie a atteint 20,1% [91] ce qui en fait la technologie émergente évoluant le plus rapidement.

Cette technologie est annoncée comme bon marché à fabriquer par rapport au silicium mais présente pour l'instant d'importants problèmes de stabilité dans le temps et de résistance à l'eau. L'entreprise Oxford Photovoltaics annonce néanmoins une première commercialisation de cette technologie en 2017 [148].

2.1.4.3.4. CELLULES ORGANIQUES

Le développement de polymère photovoltaïque promet la production de panneaux solaires compétitifs : le matériau est peu cher et abondant, et la fabrication ne nécessite pas d'étapes difficiles ou coûteuses (pas de forte température ou de vide poussé).

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

Les rendements de cette technologie ont progressé très rapidement ces dernières années et le record a atteint 11,5% [91]. Cependant, les cellules organiques présentent également des problèmes de stabilité dans le temps, notamment lors de l'exposition aux UV, et ont aujourd'hui une durée de vie de quelques années [149]. Néanmoins, avec une encapsulation appropriée, il est réaliste de penser que cette espérance de vie atteigne les 20 ans dans les années à venir [150].

2.1.5. UTILISATION DU PHOTOVOLTAÏQUE POUR L'ALIMENTATION DE CAPTEURS SANS FIL

L'énergie photovoltaïque est un très bon candidat comme source d'alimentation de capteurs sans fil, car elle est présente dans de nombreux endroits (que la source soit naturelle ou artificielle, en extérieur ou en intérieur) et offre une densité d'énergie souvent bien plus importante que n'importe quelle autre source (voir Figure 21).

Mais l'intensité des sources lumineuses est très variable : l'irradiance reçue du soleil sur Terre a un maximum considéré à 1000W/m^2 en plein été sous nos latitudes, mais chute à 30W/m^2 par temps couvert en hiver ; à l'intérieur d'un bâtiment, elle est de l'ordre de 1W/m^2 . L'éclairage artificiel, en plus d'être de faible intensité, a également un spectre différent de la lumière solaire et présente des raies d'émission à certaines longueurs d'ondes pour les lampes à décharges (tube « néon » ou lampe fluocompacte). De plus, l'énergie lumineuse est bien souvent absente la nuit, hors éclairage public ou autre source artificielle.

Cette grande variabilité des sources lumineuses déterminera le choix de la technologie photovoltaïque : à très faible luminosité, pour une utilisation en intérieur par exemple, certaines technologies ont un rendement qui devient quasiment nul (voir Figure 51). L'utilisation d'un élément de stockage est également bien souvent indispensable (pour faire face à la nuit ou à une luminosité temporairement trop faible).

Malgré ces inconvénients, les systèmes autonomes alimentés par l'énergie photovoltaïque existent depuis longtemps. Les satellites sont pour la plupart alimentés par cette technologie (le premier de la sorte, Vanguard I, a été lancé en 1958 [135]), et les exemples de systèmes terrestres ne manquent pas, des calculatrices aux parcmètres ou aux lampadaires solaires. C'est donc tout naturellement que les réseaux de capteurs sans fil utilisent également cette technologie : en 2011, Sudevalayam et Kulkarni ont recensé une dizaine de projets capteurs sans fil solaires [151]. Wang et al. [152] ont fabriqué un nœud de capteur sans fil photovoltaïque, sans batterie et consommant moins de 1mW en moyenne, pour une application d'intérieur.

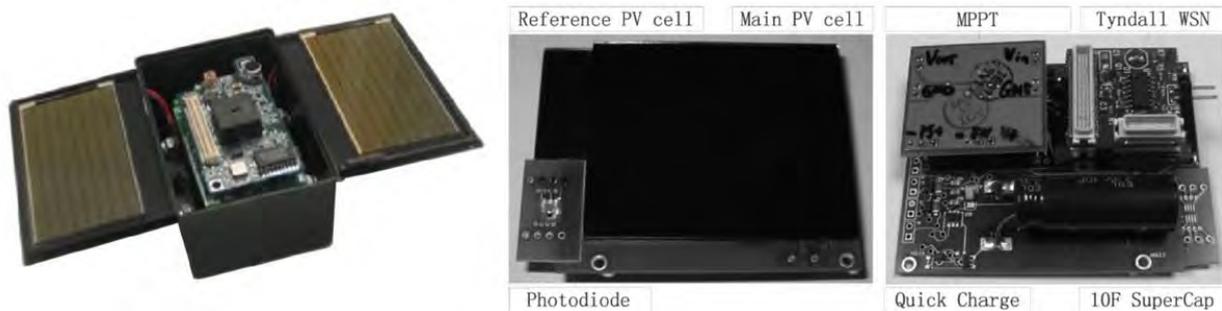


Figure 59. Exemple de récupérateur photovoltaïque pour l'alimentation de capteurs sans fil. A gauche, le système Heliomote pour une utilisation en extérieur [153], à droite, le système développé par Wang et al. pour une utilisation en intérieur [152].

Les applications aéronautiques sont plus rares mais nous pouvons citer l'étude complète, réalisée par D. Meekhun [131], d'une alimentation solaire de capteurs de pression lors d'essais en vol. L'architecture de base du système que nous présentons dans ce chapitre a été reprise de ce travail. L'exemple récent le plus marquant d'utilisation du photovoltaïque en aéronautique ne vient pas d'une application d'alimentation de capteur sans fil mais

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

de la génération de forte puissance dans le projet Solar Impulse, où l'aéronef entier est propulsé grâce à des panneaux photovoltaïques [154].

Enfin, les études sur les drones utilisant l'énergie solaire comme source d'alimentation ont des problématiques proches de celles que nous abordons, notamment des gammes d'énergie qui peuvent être similaires à celles rencontrées lors de l'alimentation d'un nombre important de capteurs. A ce propos, nous pouvons citer les thèses de Murat Bronz sur la conception d'un drone de grande endurance [155] ou d'André Noth sur la conception de drone solaire à vol perpétuel [156].

2.2. RECUPERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE POUR UNE INSTRUMENTATION D'ESSAIS EN VOL

2.2.1. PRESENTATION DU PROJET ET DU CAHIER DES CHARGES

L'alimentation que nous avons développée a pour but d'alimenter une matrice de capteurs de pression qui est fixée sur l'extrados de l'aile d'un A321 (voir Figure 60) et est destinée à la réalisation d'une cartographie de la pression aérodynamique. Classiquement, ce type de capteurs est relié par un câble qui chemine à l'intérieur de l'aile pour rejoindre la cabine et transporte ainsi à la fois les données des capteurs vers un concentrateur et la puissance électrique nécessaire à leur fonctionnement. L'installation d'un tel câble est longue et difficile, implique la traversée de plusieurs cloisons et nécessite d'enlever des rivets pour ménager un passage au câble vers l'extérieur, rendant compliquée la mise en place d'un système d'instrumentation à cet endroit. L'équipe avec laquelle nous avons travaillé (Flight and Integration Test Centre, EVICS – Sensors, Airbus Operation) fait partie du département d'essai en vol d'Airbus et a voulu se passer de ce lien physique en installant une communication sans fil et une alimentation électrique par récupération d'énergie photovoltaïque.

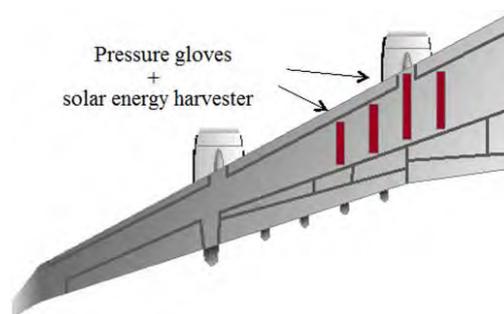


Figure 60. Illustration de l'emplacement d'installation de bandes de capteurs de pression et de l'alimentation photovoltaïque.

Pour pouvoir être installé à cet endroit, le système doit respecter les conditions suivantes :

- Il doit résister à une gamme de températures allant de -50°C (température à l'altitude de croisière de l'avion, à 10000m) à $+80^{\circ}\text{C}$ (température devant refléter un cas extrême lorsque l'appareil reste au sol en plein soleil).
- Il doit résister à une pression réduite de 220mbar, correspondant également à la pression à l'altitude de croisière.
- Pour éviter au maximum de perturber l'aérodynamique de l'aile, et ce d'autant plus que les capteurs à alimenter sont des capteurs de pression, le panneau photovoltaïque doit être le plus fin possible, de l'ordre du millimètre d'épaisseur, et souple afin de suivre le profil de l'aile. Il doit également être le plus petit possible.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

- La carte électronique doit mesurer 80mm x 75mm x 8mm pour pouvoir s'insérer dans un carénage déjà existant. La carte peut être plus épaisse que le panneau photovoltaïque car elle sera fixée du côté du bord de fuite de l'aile, c'est-à-dire hors de la zone de mesure de pression.

Concernant les spécifications électriques, il est requis que le système :

- Puisse délivrer une puissance de 2 watts en permanence, par tous temps (ensoleillé ou nuageux).
- Délivre une tension de sortie de 48V.
- Ait la meilleure autonomie possible pour pouvoir alimenter la charge lorsque les panneaux solaires sont à l'ombre, par exemple lors d'un virage opposé au soleil en début ou en fin de journée.

De ce cahier des charges, plusieurs contraintes fortes apparaissent :

1. Comme le système doit fournir 2 watts, même par temps nuageux, les panneaux photovoltaïques doivent avoir un bon rendement à faible luminosité afin de limiter la surface nécessaire. Cependant, les constructeurs de panneaux photovoltaïques n'annoncent les performances de leur produit que dans les conditions standard de tests. Nous avons donc testé les différentes technologies disponibles de panneaux photovoltaïques en couche mince pour choisir la plus appropriée.
2. Le système doit utiliser un stockage d'énergie pour assurer l'autonomie et répondre aux pics de puissance que peut demander la charge électrique. Ce stockage a été réalisé grâce à des supercondensateurs pour pouvoir fonctionner à -50°C, mais aucun constructeur ne certifie le fonctionnement de ses produits sur la gamme de températures exigée. Nous avons donc testé en température et en pression des supercondensateurs afin de sélectionner les produits résistants à ces conditions extrêmes.
3. Le circuit électronique doit être conçu pour avoir le meilleur rendement possible afin de transférer un maximum d'énergie à la charge à alimenter lorsque l'irradiance est la plus faible. Il doit également posséder des protections contre les surintensités et gérer la charge des supercondensateurs.

Les spécifications du projet ont beaucoup évolué au cours de son déroulement et des différents circuits développés, notamment concernant les contraintes d'épaisseur maximale (passée de 3mm à 8mm), de tension de sortie (de 5V à 48V) ou encore de puissance de sortie exigée (quelques dizaines de milliwatts à 3 watts, puis 2 watts). Ces changements dans le cahier des charges ont également dû être appliqués avec un délai trop court pour pouvoir mener de nouveau une véritable étude menant au choix le plus optimal.

A posteriori, certains choix peuvent donc être perfectionnés et seront discutés dans ce document pour expliquer les raisons de la conception originelle. Le système développé est néanmoins fonctionnel et répond à la problématique posée, les améliorations possibles ne portant que sur des optimisations du système.

2.2.2. CHOIX DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

2.2.2.1. TECHNOLOGIES RETENUES

Un panneau photovoltaïque installé sur l'aile d'un avion doit être souple pour s'adapter au profil de l'aile, et fin pour ne pas perturber l'écoulement du flux d'air. Les panneaux que nous avons retenus pour les tests sont donc des panneaux photovoltaïques à couche mince : silicium amorphe, CIGS et silicium cristallin.

Nous avons sélectionné 5 panneaux commercialement disponibles au moment des essais (voir Figure 61) :

- 2 en silicium amorphe (Flexcell et PowerFilm)
- 1 en CIGS (Global Solar)
- 1 en silicium cristallin (Enecom)
- 1 en silicium cristallin à contact face arrière (SolbianFlex, technologie SunPower)

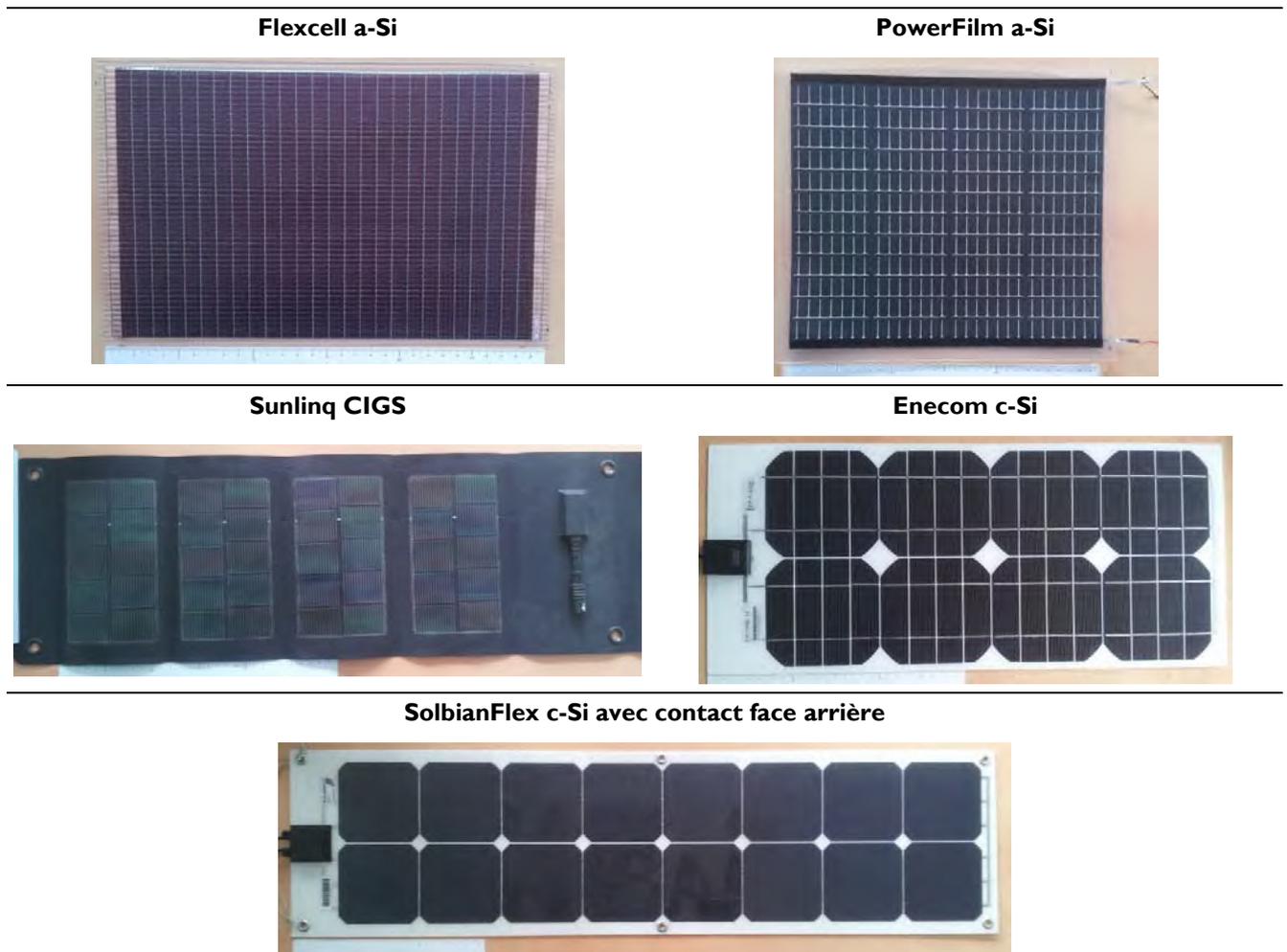


Figure 61. Photos des panneaux photovoltaïques testés. Pour échelle, la règle placée en bas de chaque photo mesure 30cm.

Notre système doit fournir en permanence une puissance de 3 watts à la charge à alimenter, et ce, même par temps couvert. Nous cherchons donc le panneau ayant le meilleur rendement à faible luminosité afin de diminuer la surface occupée, qui est un paramètre critique pour notre application.

Les performances annoncées par les constructeurs étant celles mesurées dans les conditions standards de test, nous ne pouvons donc pas nous baser sur ces informations pour faire notre choix puisque le rendement varie avec l'irradiance. Nous avons mesuré le rendement par temps couvert sur chacun des panneaux présentés pour choisir le plus adapté à notre système.

2.2.2.2. TESTS DES PANNEAUX

Le banc de mesure que nous avons mis en place pour mesurer le rendement des panneaux photovoltaïques est présenté Figure 62. Le principe est de mesurer la caractéristique en faisant varier une charge résistive (un potentiomètre ou un rhéostat selon la puissance que peut délivrer le module) connectée au panneau et d'enregistrer le courant et la tension générés à l'aide d'un module d'acquisition National Instruments USB-Ni6009 et d'un ordinateur. L'irradiance reçue par le panneau est mesurée grâce à un pyranomètre, et est également enregistrée par le module d'acquisition.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

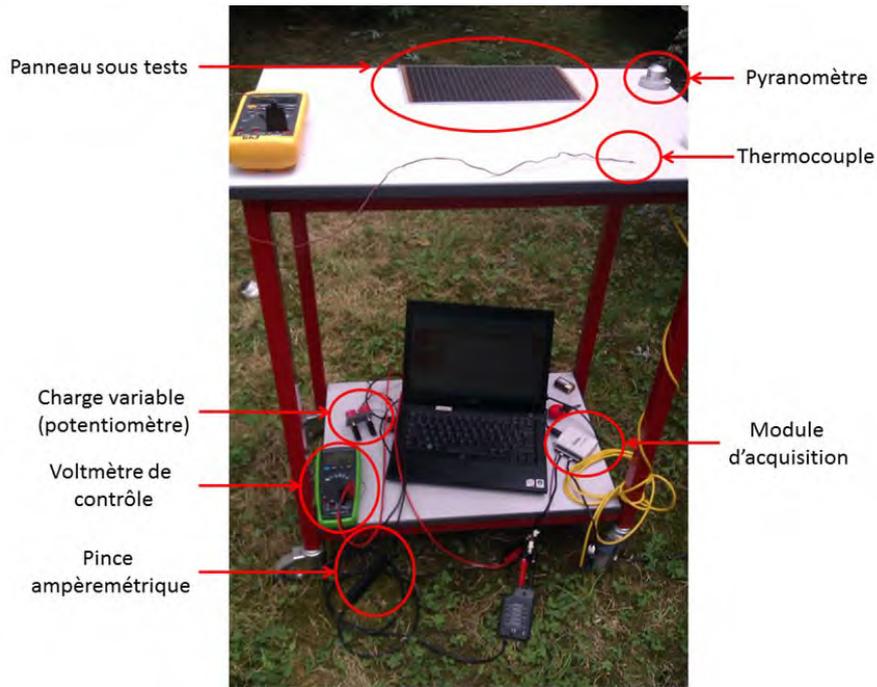


Figure 62. Banc de mesure du rendement à faible luminosité.

La caractéristique ainsi obtenue (exemple Figure 63) permet d'obtenir la puissance maximale du panneau à l'irradiance donnée. A partir de cette puissance maximale, de l'irradiance et de la surface du panneau testé, on peut facilement calculer le rendement.

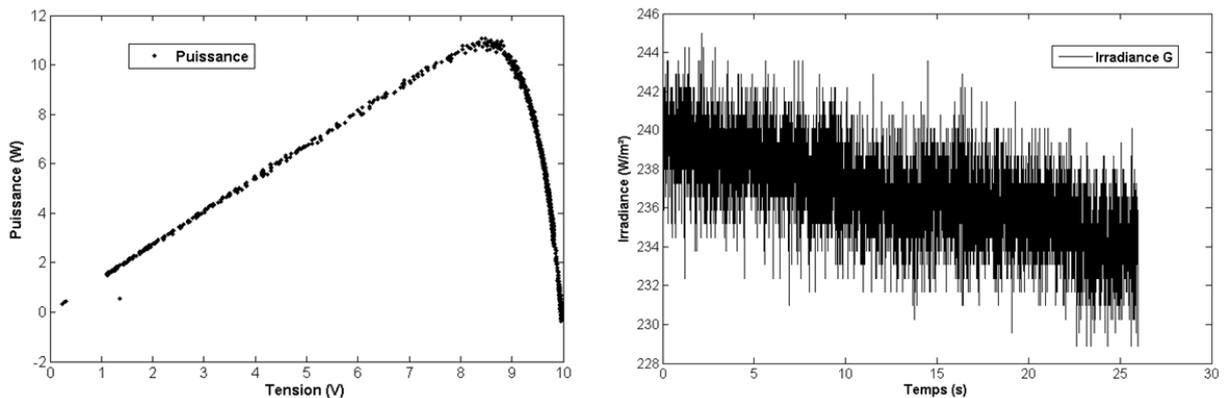


Figure 63. Caractéristique mesurée du panneau solaire Solbian Flex par temps nuageux, sous une irradiance moyenne de 237 W/m^2 .

Lors des tests par temps nuageux, l'irradiance a varié légèrement au cours des différentes mesures. Malgré cette variation, la performance d'un des panneaux est clairement apparue supérieure aux autres (voir Figure 64). Une mesure supplémentaire par un temps très couvert (à la limite de la pluie) a été réalisée pour confirmer les meilleures performances de ce module.

Flexcell	η	826 W/m^2	220 W/m^2
		4,1%	3,1%
PowerFilm		834 W/m^2	268 W/m^2

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

Sunliq	η	3,2 %	1,6 %	
		818 W/m²	303 W/m²	
Enecom	η	4 %	4 %	
		863 W/m²	166 W/m²	
Solbian Flex	η	12%	9,71 %	
		822 W/m²	237 W/m²	57 W/m²
	η	17,8%	18,2 %	14,2%

Figure 64. Résultats des mesures de rendement par plein soleil et par temps couvert des panneaux sélectionnés.

Le panneau ayant la meilleure performance par temps couvert est donc le module de SolbianFlex. Ses dimensions et les caractéristiques annoncées par le constructeur sont visibles Figure 65. Sa taille est suffisante pour n'avoir besoin d'utiliser qu'un seul panneau pour générer la puissance nécessaire à l'alimentation de la charge.

DATASHEET	
PHYSICAL CHARACTERISTICS	
Lenght	1110 mm
Height	285 mm
Thickness	1,5 mm
Weight	0,79 kg
ELECTRICAL CHARACTERISTICS	
Vmp (max power voltage)	9,20 V
Imp (Max power current)	5,51 A
Wp (peak power at stc)	50,70 W
Voc (Open circuit voltage)	10,88 V
Isc (short circuit current)	5,85 I
Efficiency (module)	17,14%
Max bending	25%



Figure 65. Caractéristiques fournies par le constructeur du panneau flexible SolbianFlex SP 50L.

2.2.3. CHOIX DES SUPERCONDENSATEURS

2.2.3.1. SUPERCONDENSATEURS RETENUS

Comme la carte électronique ne doit pas dépasser une épaisseur de 8mm, les supercondensateurs doivent être le plus fin possible, éliminant les composants cylindriques au profit des prismatiques. Le rôle de ces supercondensateurs est de fournir un maximum d'autonomie, nous voulons donc privilégier l'énergie totale pouvant être stockée (dépendant de la capacité et de la tension maximale) sur les autres paramètres (résistance série notamment).

Cap-xx	Cellergy	AVX - BestCap	Maxwell
			



Figure 66. Photos des supercondensateurs retenus

Notre système doit pouvoir être fonctionnel sur une fourchette de températures allant de -50°C à $+85^{\circ}\text{C}$. Comme le montre la Figure 67, aucun supercondensateur n'est annoncé comme pouvant fonctionner sur cette gamme. Nous avons donc testé ces composants pour savoir si certains pouvaient convenir à notre application.

Nous faisons également apparaître sur la Figure 67 la densité d'énergie maximale des supercondensateurs calculés selon la formule suivante :

$$\text{Densité} = \frac{\frac{1}{2} \times C \times V^2}{\text{Volume}}$$

Constructeur	Package	Modèle	ESR (mOhm)	Capacité (mF)	Tension (V)	Densité d'énergie max (J/mm ³)	Température (°C)	Épaisseur
MuRata	Rigide	DME2D2R7F704M2BTA0	30	700	2,7	5,17	-30/+70	1,3
Cellergy	Rigide	CLG04P050L28	150	50	4,2	0,35	-40/+85	2,6
Cellergy	Rigide	CLG03P060L28	130	60	3,5	0,31	-40/+85	2,4
AVX	Rigide	BZ015A104ZLB	80	100	5,5	1,38	-20/+70	2,3
Maxwell	Rigide	PC10 HT	180	10000	2,2	7,22	-40/+85	4,8
TaiyoYuden	Souple	PAS2126FR2R5504	55	500	2,5	3,18	-30/+70	0,9
Cap-XX	Souple	HA109	110	160	2,75	1,53	-40/+85	1,1
Cap-XX	Souple	HS108	26	1800	2,75	8,12	-40/+85	1,7

Figure 67. Caractéristiques des supercondensateurs retenus pour les tests en température.

2.2.3.2. TESTS EN TEMPERATURE DES SUPERCONDENSATEURS

2.2.3.2.1. PROTOCOLE DE TEST

Ces mesures en température se sont déroulées selon le protocole suivant :

1. A température ambiante (25°C), le condensateur est chargé puis déchargé à courant constant et la tension à ses bornes est enregistrée. Cette première mesure a pour but d'obtenir une caractéristique de référence.
2. Le condensateur est ensuite porté à la température voulue grâce à une enceinte climatique ThermoStream de Temptronic Corporation en attendant un temps suffisant pour que le composant soit à une température homogène.
3. Un cycle de charge/décharge est effectué pour mesurer l'éventuel changement de caractéristique du composant.
4. Le condensateur est ramené à température ambiante.
5. Un nouveau cycle de charge/décharge est effectué pour vérifier si une dégradation est survenue lors de son passage à la température donnée.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

Ce protocole a été appliqué aux températures suivantes : 0°C, -20°C, -40°C, -50°C, +40°C, +60°C, +80°C, +100°C. Un exemple de courbe obtenue lors du cycle de charge/décharge est visible

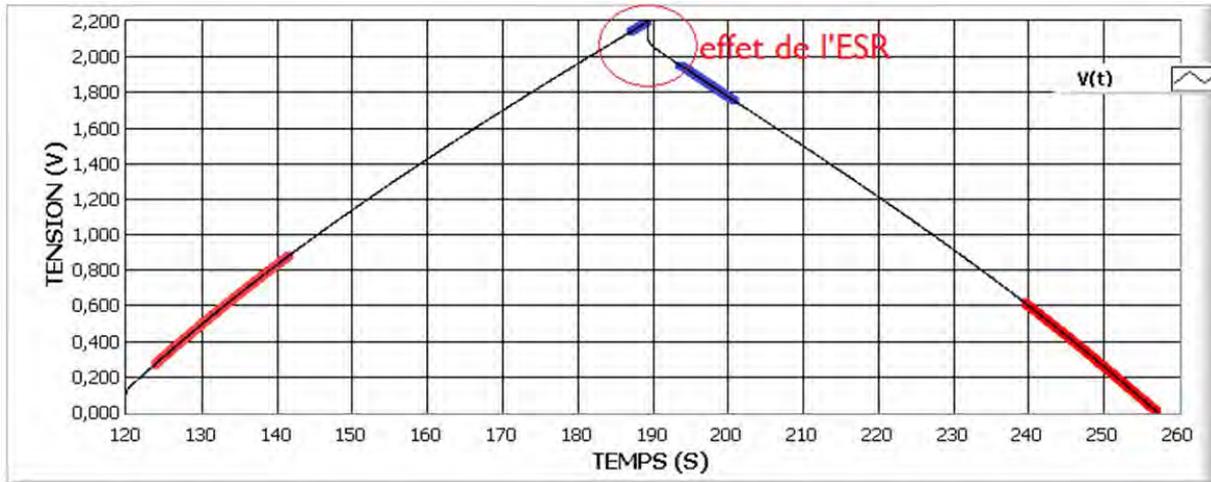


Figure 68. Enregistrement de la tension aux bornes d'un supercondensateur PCI0HT lors du cycle de charge/décharge à un courant constant de 300mA et à une température de 25°C.

A partir de la courbe de charge/décharge, la valeur de capacité du condensateur et sa résistance équivalente série sont mesurés selon les principes suivants :

- La capacité C est mesurée avec le début et la fin de la courbe (zones rouges) selon la formule :

$$C = \frac{I}{dV/dT}$$

Avec I le courant de charge et de décharge et dV/dT la variation de la tension sur l'intervalle de temps considéré.

- La résistance équivalente série (ESR) est calculée en prolongeant la courbe sur la fin de charge et le début de décharge (zones bleues), afin de mesurer plus précisément la chute de tension ΔV lorsque le courant I s'inverse et amorce la décharge du supercondensateur :

$$ESR = \frac{\Delta V}{2 \times I}$$

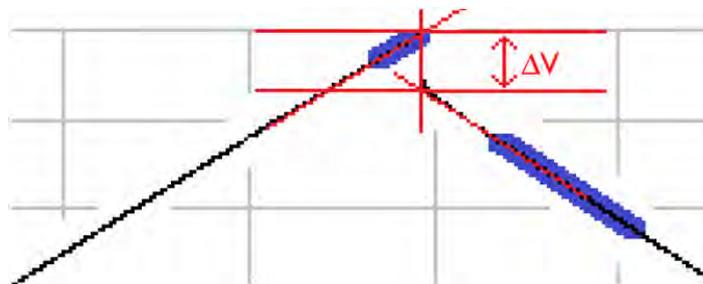


Figure 69. Méthode de mesure de la résistance équivalente série. La chute de tension provoquée par l'ESR correspond à la moitié de la distance entre les deux courbes rouges au moment de l'inversion du courant.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

2.2.3.2.2. RESULTATS

Certains supercondensateurs, comme le PCI0 HT, résistent très bien à la température et l'évolution de leur tension lors du cycle n'est pas modifiée. En revanche, d'autres supercondensateurs voient leur comportement largement altéré par la température, comme les supercondensateurs Cap-XX (voir Figure 70).

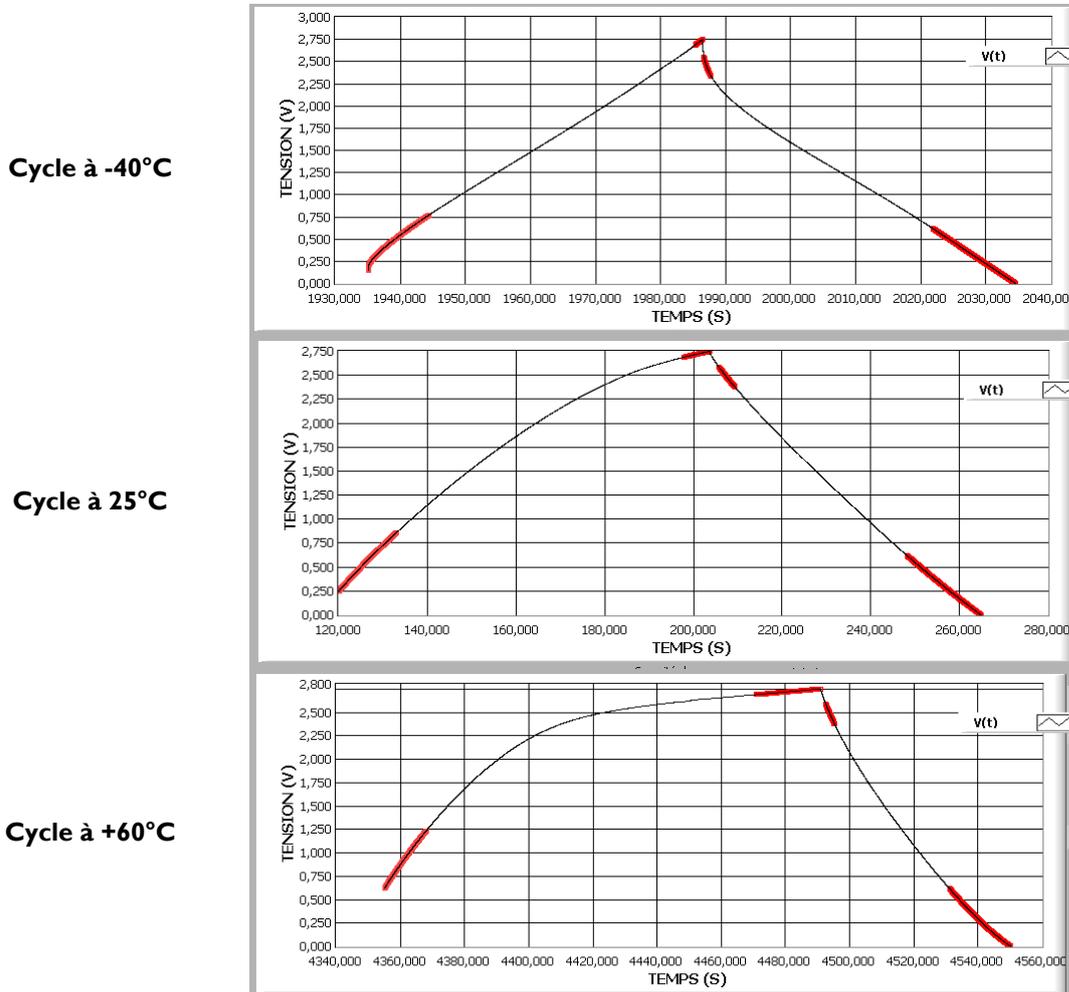


Figure 70. Cycles de charge/décharge d'un supercondensateur Cap-XX HA-109 avec un courant de 10mA, à différentes températures.

On remarque également que l'ESR augmente à basse température sur tous les supercondensateurs (nous montrons un exemple Figure 71 de l'évolution de l'ESR du PCI0 HT). Comme le profil de charge peut être extrêmement déformé pour certains composants, il nous est plus difficile de conclure sur l'évolution générale de la valeur de capacité des supercondensateurs avec notre méthode de calcul.

Enfin, seuls les supercondensateurs Cap-XX ont subi une dégradation à long terme suite au passage aux températures chaudes, cette dégradation étant notable par un gonflement du composant. Concernant les autres supercondensateurs, aucune modification n'a été visible une fois revenus à 25°C, que ce soit visuellement ou par leur comportement électrique.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

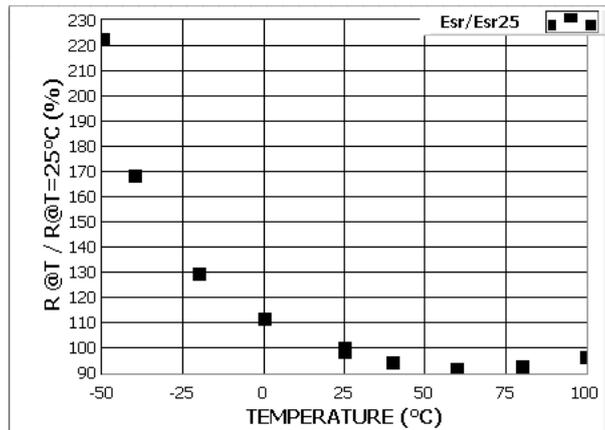


Figure 71. Evolution de l'ESR en fonction de la température pour un supercondensateur PC10HT. Les valeurs sont données en valeur normalisée par rapport à la mesure à 25°C notée Esr25.

Suite à ces premières mesures, nous avons retenus 3 supercondensateurs comme pouvant convenir à notre application, c'est-à-dire supportant les températures extrêmes et ayant une densité d'énergie suffisante. Ces 3 supercondensateurs sont ceux des fabricants MuRata, Maxwell PC10 HT et Taiyo Yuden et seront testés dans une enceinte à basse pression et basse température pour vérifier leur comportement dans cette situation. La référence HA109 de Cap-XX a également été conservée comme solution de secours pour sa bonne densité d'énergie, dans le cas où ce serait la seule qui supporterait ces basses pressions.

MESURES A BASSE PRESSION

Maintenant qu'une première sélection a été effectuée, nous avons testé les supercondensateurs restant dans une chambre basse pression (220mbar) et basse température (-50°C) pour étudier leur comportement dans une situation aussi proche que possible des conditions réelles de vol.

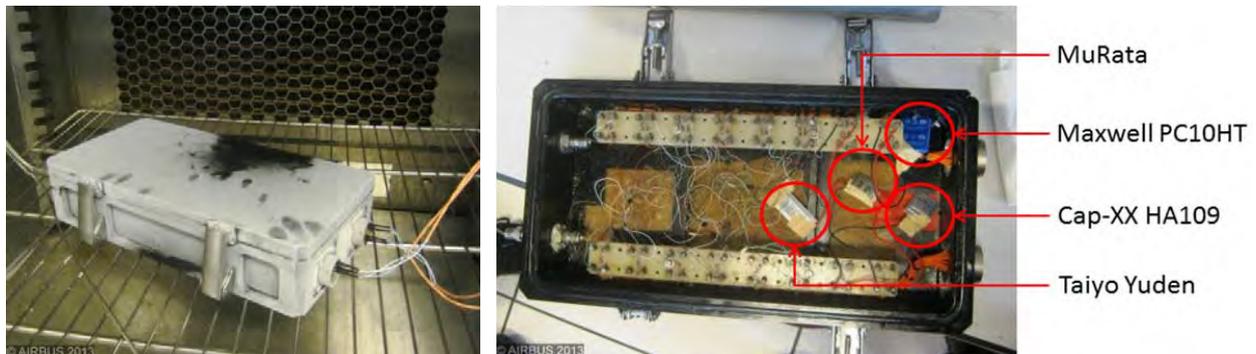


Figure 72. A gauche : caisson basse pression retournant à température ambiante après les essais à -50°C et 220mBar. A droite : intérieur du caisson avec les 4 supercondensateurs testés.

Pendant ces tests, les supercondensateurs subissent une charge et une décharge à courant constant. A la différence des précédents essais, chaque phase de charge et de décharge est espacée par une temporisation de 10 minutes afin d'observer si la basse pression a un effet sur la capacité du supercondensateur à conserver l'énergie stockée (exemple de courbe visible Figure 73). Aucun des composants testés n'a montré de comportement différent entre les essais à pression ambiante et à basse pression.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

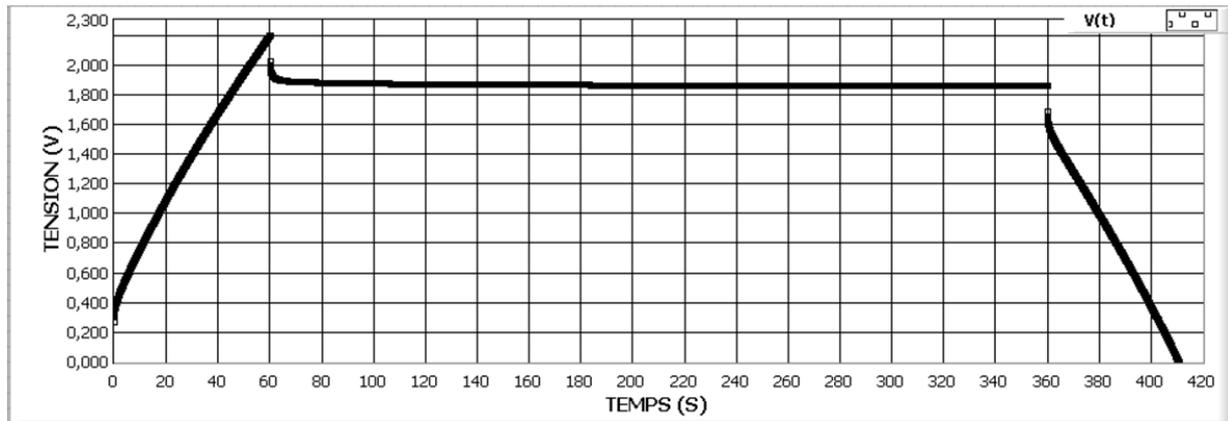


Figure 73. Tension aux bornes du supercondensateur Maxwell PC10 pendant la charge et la décharge à courant constant de 300mA dans l'enceinte à basse pression (220mBar) et à basse température (-50°C).

Suite à ces tests, nous avons choisi le supercondensateur Maxwell PC10 HT pour :

- sa densité d'énergie supérieure aux autres composants
- sa tenue à la température et à la basse pression.

2.2.4. CONCEPTION DU CIRCUIT DE RECUPERATION

Maintenant que le choix du panneau photovoltaïque et des supercondensateurs de stockage est arrêté, nous pouvons concevoir le circuit de récupération dont la conception dépend des caractéristiques des éléments précédents. Les points du cahier des charges qui vont affecter la conception du circuit électronique sont les suivants :

1. Le système doit fournir une puissance de 3W par tout temps, même couvert.
2. Le système doit pouvoir loger dans un emplacement de 75mm*80mm*8mm.
3. Le système doit avoir l'autonomie la plus importante possible.

Le premier point impose au circuit électronique de récupération d'avoir un bon rendement de conversion global, c'est-à-dire de transférer l'énergie récupérée par le panneau photovoltaïque à la charge avec le moins de pertes possible. En effet, quand l'irradiance sera faible par temps couvert, la puissance produite par le panneau sera à peine suffisante pour satisfaire la consommation de la charge. Plus le système sera efficace, plus il pourra fonctionner à basse luminosité.

Pour la même raison, nous utilisons un panneau photovoltaïque de grande taille, panneau qui se retrouve surdimensionné en plein soleil. Le système doit donc intégrer une mesure de courant associée à un système de protection qui limitera le courant issu du panneau afin de ne pas endommager le circuit électronique.

Le deuxième point impose un choix de composants fins. Cette contrainte d'épaisseur est déterminante pour deux types de composants : les supercondensateurs que nous avons déjà étudiés, et les inductances qui seront nécessaires dans les divers régulateurs. De ce choix d'inductance découlera ensuite le choix d'autres paramètres, comme la fréquence de découpage du régulateur.

Enfin, le troisième point incite à utiliser un nombre élevé de supercondensateurs afin d'augmenter l'autonomie du système. Cependant, cela s'oppose à la deuxième condition puisque le volume autorisé est restreint. L'autonomie sera finalement déterminée par le nombre de supercondensateurs qui peuvent loger dans le carénage et non par une autonomie a priori.

2.2.4.1. ARCHITECTURE DU CIRCUIT ELECTRONIQUE

2.2.4.1.1. PRESENTATION

L'architecture du circuit de récupération d'énergie est classique et visible

Figure 74 :

- Les composants qui assurent la gestion du système (contrôle de l'adaptation d'impédance, contrôle de charge, activation de la sortie et protections) sont alimentés par un régulateur linéaire directement connecté au panneau solaire.
- Un convertisseur Buck est placé en entrée du système afin de contrôler le transfert d'énergie du panneau au stockage et à la charge en fonction du mode de fonctionnement voulu.
- Le stockage d'énergie est constitué de supercondensateurs.
- L'étage de sortie est assuré par un régulateur boost 5V. Comme il a été spécifié très tardivement dans le projet que la tension de sortie devait finalement être de 48V, un simple convertisseur boost 5V → 48V a été rajouté. Ce choix et ses conséquences sont discutés plus loin.

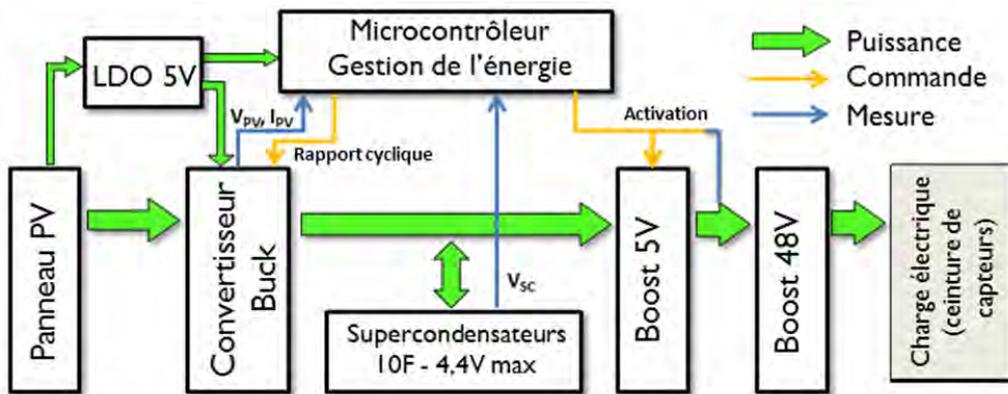


Figure 74. Architecture du circuit de récupération d'énergie.

2.2.4.1.2. CONVERTISSEUR BUCK D'ADAPTATION D'IMPEDANCE

Comme nous l'avons expliqué dans la partie 1.4, nous avons besoin d'un circuit d'adaptation d'impédance pour optimiser le transfert d'énergie du panneau au stockage et à la charge. Cette adaptation d'impédance est réalisée par un convertisseur DC/DC abaisseur (convertisseur Buck) synchrone en mode de conduction continue, dont le schéma électronique est visible Figure 75.

Le convertisseur mis en œuvre a une architecture standard et est typique de l'état de l'art ([157], [158]). En plus des calculs classiques de dimensionnement d'un tel convertisseur (courant maximum, ondulations, etc. que nous ne détaillerons pas ici), deux contraintes ont eu un impact important sur le choix des composants :

- Ce circuit est l'adaptation d'un circuit fonctionnel déjà existant opérant à une fréquence de 100kHz. Cette fréquence de hachage a été conservée puisque très bien adaptée aux premiers circuits conçus.
- L'épaisseur maximale du circuit lors des premières conceptions (3 millimètres) a été déterminante dans le choix de l'inductance : la bobine utilisée est le composant disponible ayant un courant de saturation suffisant (1,2 A) et une inductance la plus élevée possible tout en étant d'une épaisseur inférieure à 3mm.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

Nous soulignons que ces choix ont été faits lors de la première conception avec une limite d'épaisseur de 3mm car cette contrainte a été relâchée dans la suite du projet. Ce changement de spécification permet de choisir une inductance plus épaisse, de plus forte valeur et de plus fort courant de saturation, autorisant une fréquence de hachage plus faible et modifiant le reste de la conception du convertisseur. Ces premiers choix ont néanmoins été conservés car ils ont abouti à une conception robuste et performante. Le temps très court accordé pour effectuer les changements après les modifications du cahier des charges a été jugé insuffisant pour pouvoir optimiser le circuit tout en assurant une bonne fiabilité de fonctionnement.

Les autres composants ont été sélectionnés en fonction de ces premiers choix (notamment de courant maximum) et des mêmes contraintes. Une limitation logicielle du courant est ensuite implémentée logiciellement pour éviter tout dépassement. Sur la Figure 75, nous avons souligné les composants principaux :

- Le rôle de l'interrupteur est assuré par un MOSFET N (Q1). Ce transistor doit avoir une résistance en conduction ($R_{ds_{ON}}$) la plus faible possible pour limiter les pertes.
- Comme nous concevons un convertisseur Buck synchrone, la diode de roue libre est remplacée par un MOSFET N (Q2). Ce transistor doit également avoir un $R_{ds_{ON}}$ le plus faible possible, et avoir un courant maximum en conduction élevé.
- L'inductance L2 a une valeur de 33 μ H.
- Une diode Schottky antiretour (D1) est placée en sortie du Buck. Dans notre application, il se peut que l'entrée soit temporairement très faible, ou nulle (ombrage temporaire, lors d'un virage de l'avion par exemple). Dans cette situation et sans D1, la tension aux bornes du stockage deviendrait supérieure à la tension en entrée, et les supercondensateurs se videraient à travers la diode de substrat de Q1.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

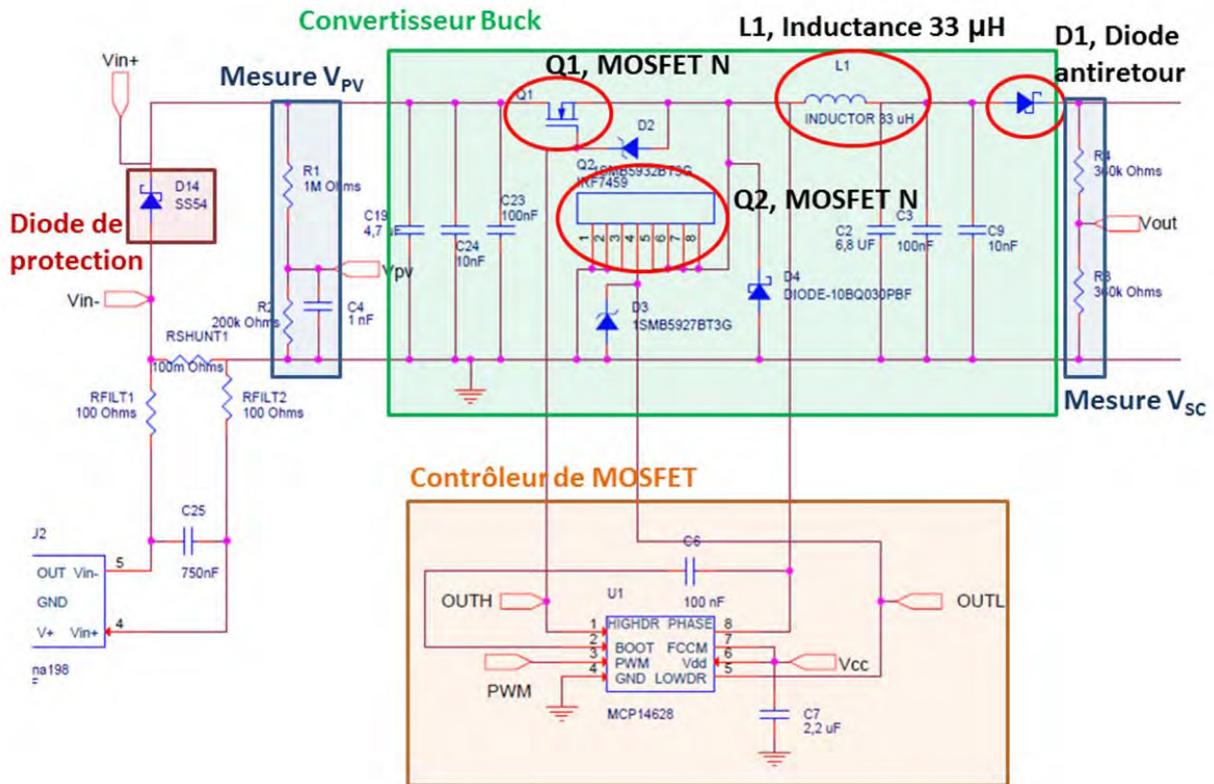


Figure 75. Schéma électrique du convertisseur Buck d'entrée du système qui assure l'adaptation d'impédance des panneaux photovoltaïques.

Autour du convertisseur Buck, nous utilisons également :

- Des condensateurs de lissage en amont et en aval du convertisseur.
- Un contrôleur de MOSFET (MCP14628) pour assurer la commutation synchrone de Q1 et Q2 à partir du signal PWM généré par le microcontrôleur.
- Une diode de protection en entrée pour protéger le système contre une éventuelle inversion de polarité lors d'un mauvais branchement du panneau photovoltaïque.
- Deux ponts de résistances permettent au microcontrôleur de réaliser les mesures de la tension d'entrée V_{pv} et de la tension de sortie V_{sc} , c'est-à-dire de la tension du panneau photovoltaïque et de la tension des supercondensateurs de stockage.

2.2.4.1.3. MESURE DU COURANT

La mesure de courant du circuit est utilisée pour servir de protection contre les surintensités qui pourraient endommager le circuit électronique. Le schéma du circuit fournissant cette fonction est montré Figure 76.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

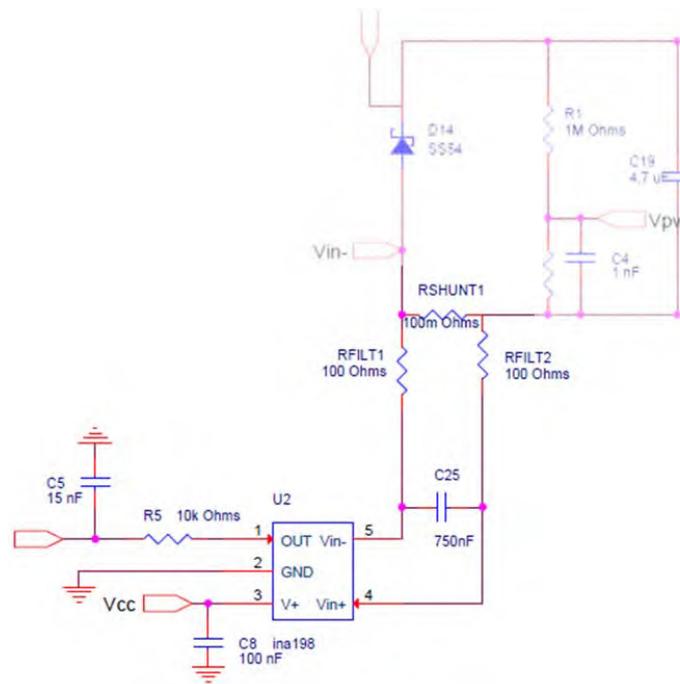


Figure 76. Vue détaillée de la fonction mesure de courant.

La mesure de courant est réalisée grâce à un amplificateur INA198 qui mesure la tension générée par un courant traversant une résistance de shunt de 100mOhms. Des filtres passe bas sont disposés en entrée et en sortie du composant afin de rejeter le bruit généré par les différents convertisseurs à découpage, et principalement le bruit du Buck d'entrée. Bien que ralentissant le temps de réaction de la mesure, la constante de temps introduite par ces filtres est jugée suffisamment faible (constante de temps de 942 μ s pour les deux filtres) pour ne pas mettre en danger le système.

2.2.4.1.4. PARTIE COMMANDE

La fonction du microcontrôleur, un PIC18LF1220 8bits, est de commander l'ensemble du système :

- Il calcule l'algorithme de suivi de point de puissance maximum (MPPT, *Maximum Power Point Tracking*) par fraction de V_{OC} en mesurant la tension aux bornes du panneau solaire.
- Il génère le signal de contrôle PWM du Buck pour réaliser les différents modes de fonctionnement du circuit (MPPT, déconnexion du panneau afin de mesurer la tension de circuit ouvert, limitation du courant, protection).
- Il assure la protection contre les surintensités.
- Il contrôle la charge des supercondensateurs.
- Il active les régulateurs de sortie quand l'énergie stockée est suffisante.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

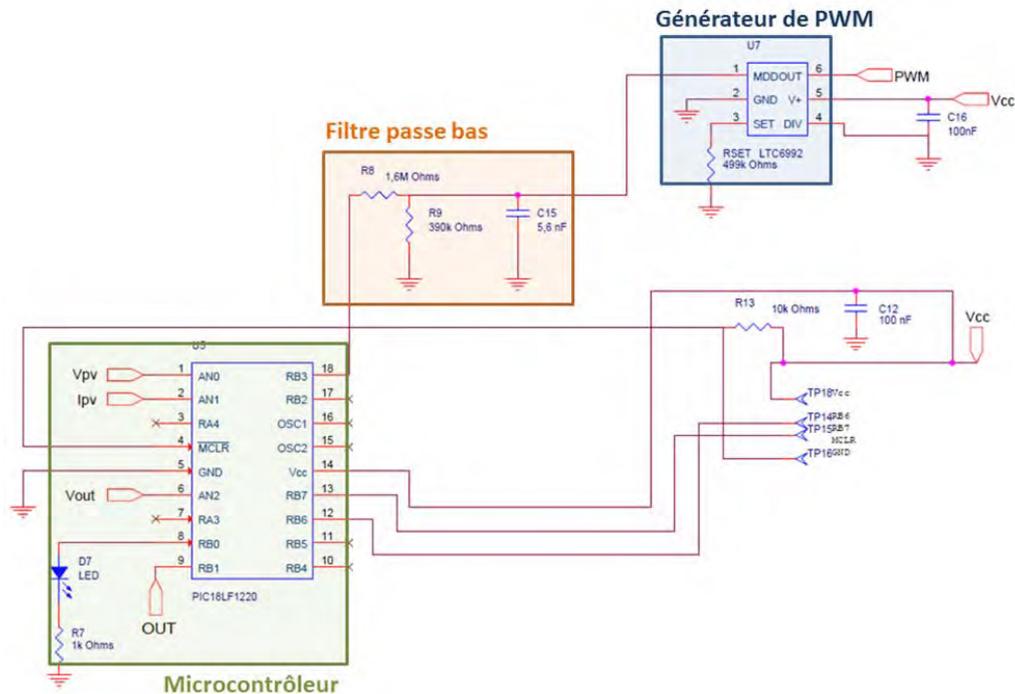


Figure 77. Vue détaillée du circuit de commande.

CHOIX DE LA FREQUENCE DU SIGNAL PWM

Pour générer un signal PWM, un registre est incrémenté à une fréquence donnée, puis comparé à une valeur de seuil. Lorsque la valeur du registre est inférieure à la valeur du seuil, la sortie vaut 0, sinon elle vaut 1. La valeur maximale que peut prendre ce registre, donc la résolution maximale du signal PWM généré, est déterminée par la fréquence du signal PWM et par la fréquence de l'horloge interne selon la formule :

$$\text{Résolution max PWM} = \frac{F_{OSC}}{F_{PWM}}$$

où la résolution est donnée en nombre de valeurs de rapport cyclique possibles.

Une meilleure résolution du signal PWM signifie une meilleure finesse de la valeur du rapport cyclique, et donc du point de fonctionnement de notre adaptation d'impédance. Plus la résolution est grande, plus notre système peut se placer précisément au point de puissance maximale, et donc, récupérer de manière optimale l'énergie du panneau photovoltaïque.

La fréquence de notre PWM étant fixée à 100kHz par la valeur de l'inductance, il faut donc avoir une fréquence de fonctionnement du microcontrôleur assez élevée (une horloge à 20MHz autorise 200 valeurs). Or, une fréquence élevée de l'horloge interne du microcontrôleur entraîne une surconsommation de celui-ci. De plus, pour atteindre des fréquences élevées (>8MHz), il faut utiliser un oscillateur externe qui entraîne également une surconsommation (voir Figure 78).

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

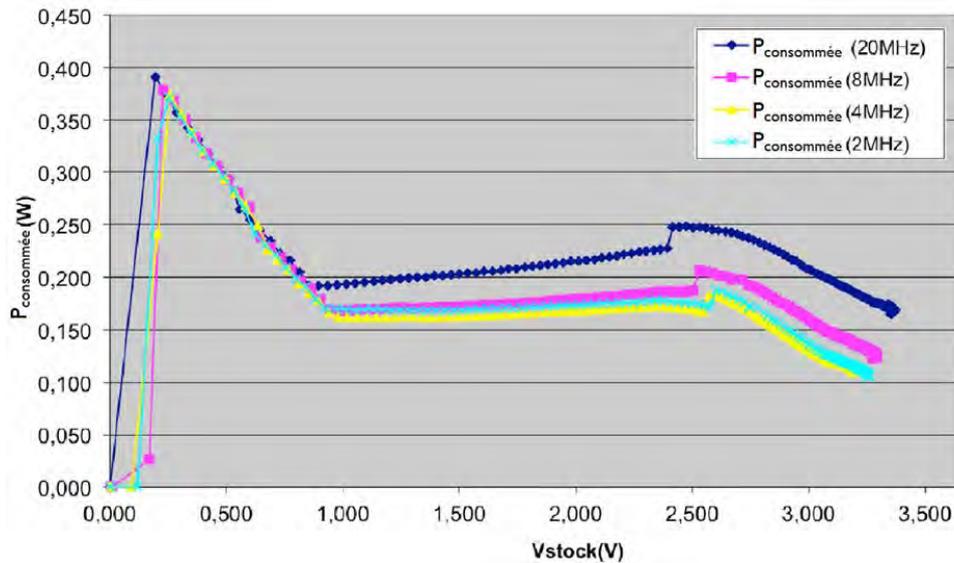


Figure 78. Consommation du circuit sans étage de sortie lors de la charge des supercondensateurs d'une valeur de 10F à rapport cyclique constant. La mesure à 20MHz utilise un oscillateur externe, les autres non. Ces mesures n'ont pas été réalisées sur la version définitive du circuit, la consommation en absolu n'est pas la consommation du circuit définitif.

Pour résumer, nous avons besoin d'avoir :

- Un signal PWM d'une fréquence de 100kHz
- Une fréquence d'horloge d'une valeur maximale de 8MHz pour limiter la consommation du microcontrôleur.

Ces paramètres nous autoriseraient une résolution du PWM de 80 valeurs ce que nous jugeons insuffisant. En revanche, si nous voulons une bonne finesse de réglage, nous n'avons pas besoin d'un temps de réaction exceptionnel.

Nous avons donc utilisé un composant qui génère un PWM à 100kHz, le LTC6992 (voir Figure 77). Ce composant module le rapport cyclique en fonction d'un niveau de tension continue qui lui est appliqué en entrée. Afin de générer cette tension continue, nous utilisons un PWM à 10kHz produit par le microcontrôleur, filtré par un filtre passe bas. Nous avons désormais une résolution de 800 points sur le contrôle du rapport cyclique ainsi qu'une consommation du microcontrôleur réduite (la surconsommation engendrée par l'utilisation LT6992 est annoncée à 0,5mW par la documentation, surconsommation bien inférieure au gain espéré).

Cette optimisation de la consommation du microcontrôleur était particulièrement pertinente et a été réalisée quand la puissance attendue de la charge à alimenter était de 50mW. Cette conception devient moins intéressante à mesure que la consommation de la partie commande est faible par rapport à la consommation de la charge.

2.2.4.1.5. REGULATEUR LINEAIRE D'ALIMENTATION DE LA COMMANDE

Les composants de commande que nous utilisons nécessitent d'être alimenté en 5V. Pour cela, nous utilisons un régulateur linéaire TPS71550 connecté directement au panneau photovoltaïque. Puisque les composants de commande ne sont pas alimentés via les supercondensateurs, le circuit peut démarrer quand le

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

stockage est vide. Il suffit que la tension aux bornes du panneau soit d'au moins 6V (tension atteinte à partir d'environ 10 W/m²) pour que le signal d'alimentation Vcc atteigne 5V.

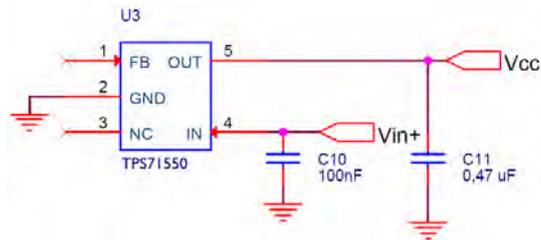


Figure 79. Vue détaillée du schéma du régulateur linéaire qui alimente les composants de commande.

Les pertes provoquées par ce régulateur sont assez faibles : le courant demandé par les composants de commande est faible (quelques dizaines de mA) et la tension du point de puissance maximale du panneau est de 7,8V (Figure 90), pour une tension de sortie du LDO de 5V. Les pertes engendrées par ce composant peuvent être estimées à moins de 100mW.

Afin d'améliorer la performance du système, il est néanmoins envisageable de remplacer ce régulateur linéaire par un régulateur à découpage Buck ou Buck-Boost.

2.2.4.1.6. STOCKAGE PAR SUPERCONDENSATEURS

Le stockage d'énergie est réalisé par les supercondensateurs Maxwell PCI0 HT, testés précédemment. Les supercondensateurs sont utilisés connectés 2 à 2 en série. Nous n'avons, pour une question de place, que la possibilité d'en utiliser 4.

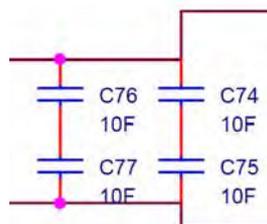


Figure 80. Vue détaillée du schéma des supercondensateurs de stockage.

La capacité totale de ces supercondensateurs est donc de 10 farads sous une tension maximale de 4,4V. Les mesures ultérieures montreront que ce stockage permet une autonomie de 20 secondes lors de l'alimentation d'une charge de 2W.

2.2.4.1.7. REGULATEUR DE SORTIE

La régulation de sortie à 48V pour la charge se fait en deux étapes : tension supercondensateurs → 5V, puis 5V → 48V. Cette manière de faire n'est pas optimale, et deux meilleures solutions seraient :

- D'utiliser un seul régulateur, mais le gain doit être d'au moins 25 si on veut que le système fonctionne quand la tension du stockage est de 2V.
- D'utiliser deux régulateurs en cascade, avec gain équilibré entre les deux étages.

La solution que nous utilisons est due à un manque de temps : initialement à 5V, nous n'avons eu que très peu de temps pour modifier la sortie et l'adapter pour produire 48V du fait du calendrier des essais en vol.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

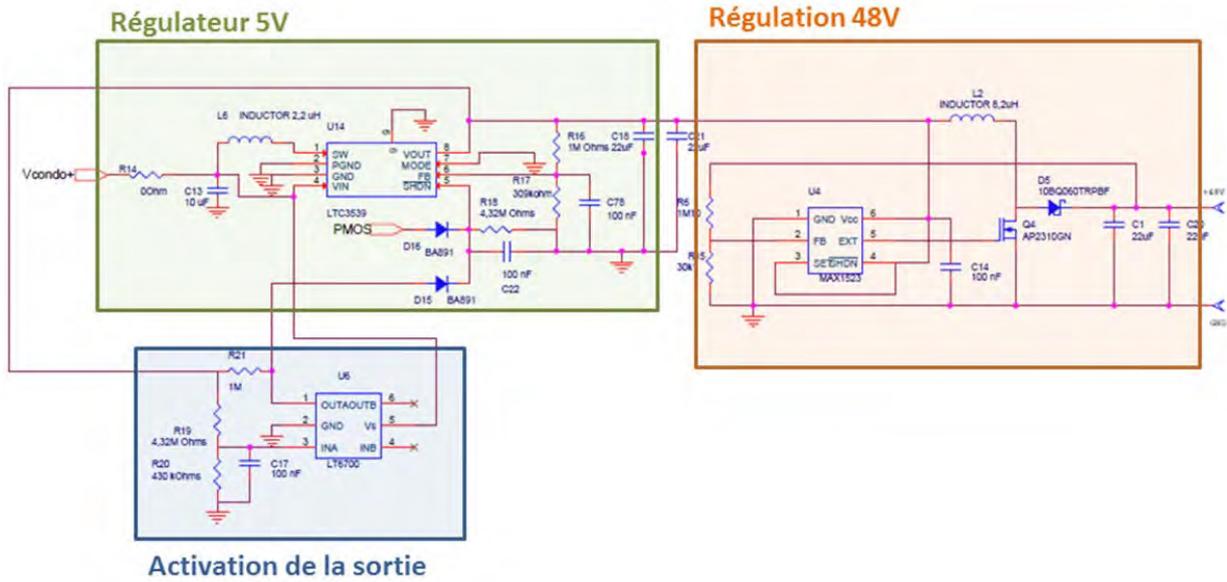


Figure 81. Vue détaillée du schéma de l'étage de sortie.

La conversion de la tension des supercondensateurs à 5V est réalisée par le circuit intégré LTC3539. Ce composant a été choisi pour son bon rendement (voir l'extrait de la documentation du composant Figure 82).

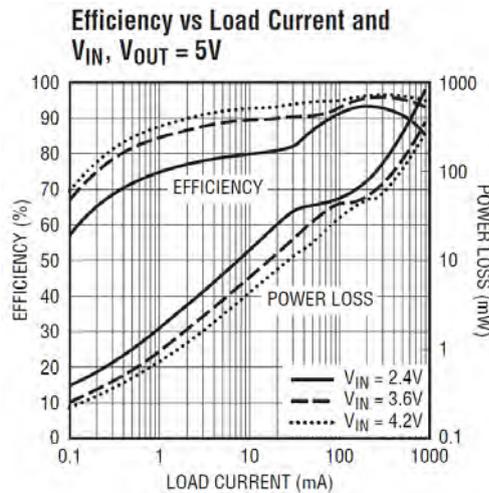


Figure 82. Rendement du LT3539 en fonction du courant de sortie, pour une tension de sortie de 5V

Ce circuit est activable via une entrée \overline{SHDN} et nous l'utilisons par deux moyens :

- Un comparateur LT6700 vient mettre cette entrée à un potentiel haut et active ainsi le régulateur quand celui-ci est initialement éteint. Cette méthode est utile pour avoir un démarrage « propre et net » du régulateur et éviter les problèmes de « blocage en sous tension » (Under Voltage Lock Out, [123]). Pour activer l'étage de sortie, nous attendons d'avoir pleinement chargé l'élément de stockage afin de bénéficier du meilleur rendement du composant.
- Un rebouclage de la sortie du régulateur sur l'entrée \overline{SHDN} , via les diodes D15 et D16 qui réalisent une fonction de OU logique, et maintient le circuit en fonctionnement tant que le régulateur arrive à maintenir

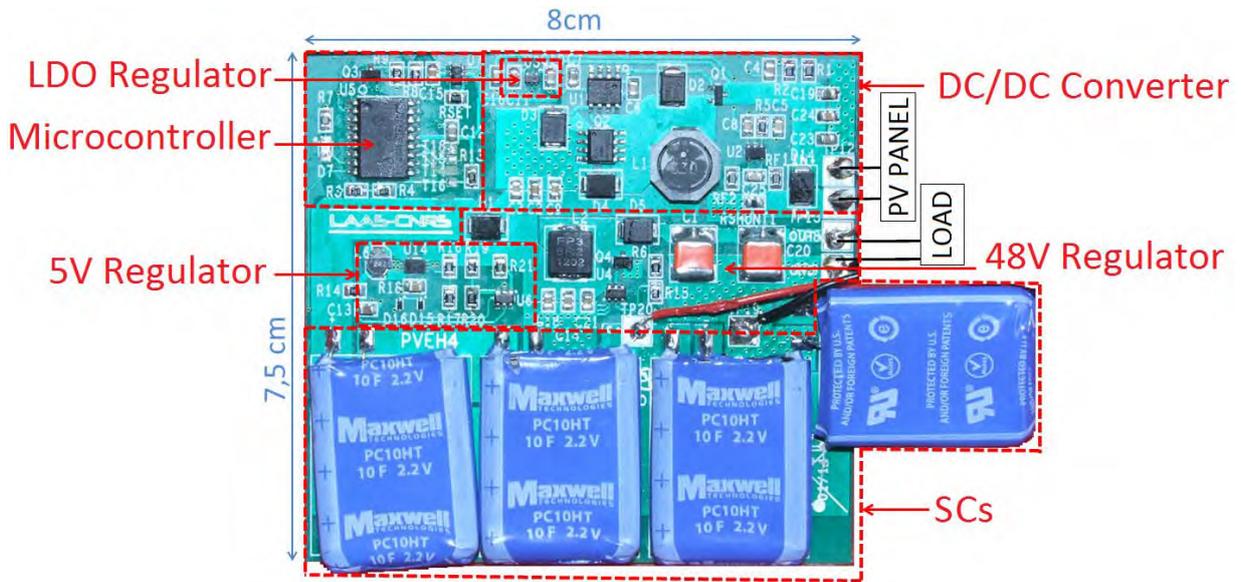
Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

une tension de 5V sur sa sortie. Cette méthode permet de faire fonctionner l'étage de sortie même si l'alimentation de la logique de contrôle est absente (microcontrôleur éteint), c'est-à-dire si le panneau photovoltaïque est ombragé temporairement.

La conversion de 5V vers 48V est réalisée avec un MAX1523. Les deux condensateurs de sortie de 22 μ F sont des condensateurs tantale pour pouvoir supporter la tension de 48V tout en gardant un volume faible.

2.2.4.1.8. CARTE FINALE

La carte a été réalisée sur un PCB de 700 μ m d'épaisseur pour limiter son épaisseur totale et permettre une certaine souplesse pour sa fixation par collage sur la surface non plane de l'aile de l'appareil, elle est visible Figure 83.



Cette carte sera insérée dans un carénage pour son installation sur l'aile de l'avion, le montage est visible Figure 84.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

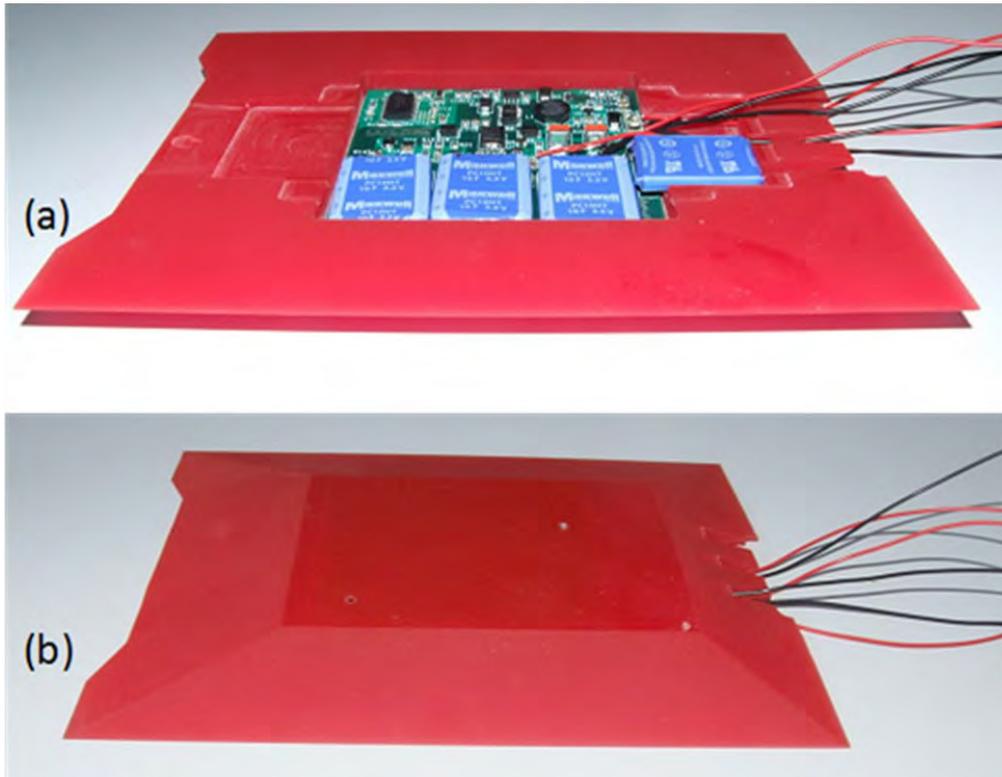


Figure 84. Circuit de récupération dans son carénage.

2.2.4.2. ALGORITHME DE CONTROLE

Le microcontrôleur exécute le programme de gestion du convertisseur Buck pour réaliser les différentes tâches :

- Mesurer les différents paramètres : tension de circuit ouvert du panneau, tension du panneau en fonctionnement, tension des supercondensateurs, courant.
- Ajuster le rapport cyclique du convertisseur Buck selon l'usage voulu : recherche du point de puissance maximum (MPP), limiter le courant d'entrée, déconnecter le panneau pour mesurer sa tension de circuit ouvert.
- Activer la sortie quand les condensateurs sont suffisamment chargés ($V_{SC}=4,3V$).

Le système peut être dans 3 états différents :

- En **Recherche du point de puissance maximum** (mode RMPP).
- En **Limitation de courant** (LC).
- Inactif, en **Stop de charge** (SC).

L'état de démarrage est l'état **Recherche du point de puissance maximum** (mode RMPP) : toutes les 10 secondes, la tension de circuit ouvert (V_{OC}) est mesurée. Le MPP est calculé comme valant 81% de V_{OC} , cette valeur ayant été mesurée pour la plus faible irradiance, à température ambiante. Le rapport cyclique de contrôle du Buck est alors ajusté pour se placer à cette tension de puissance maximum (V_{MP}). L'algorithme de MPPT par fraction de V_{OC} a été préféré à d'autres méthodes pour sa robustesse (ne cherchant pas réellement le MPP, il ne peut pas planter ou trouver un maximum local) et sa simplicité d'implémentation. De plus, nous avons besoin qu'il soit efficace pour un seul cas d'utilisation : à basse altitude et par temps couvert, c'est-à-dire à faible luminosité et à

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

température ambiante. Dans les autres conditions, la puissance fournie par le panneau est trop importante pour fonctionner au MPP.

Si l'irradiance est trop importante, le courant devient en effet trop important pour rester au MPP. On passe alors dans l'état **Limitation de courant** (LC). Cet état est activé lorsqu'en étant en mode RMPP, le courant atteint sa valeur maximale. Le rapport cyclique est alors ajusté pour que le courant reste toujours légèrement en dessous du niveau maximum.

L'état de **Limitation de courant** est également activé pour finir de charger les supercondensateurs. Au courant maximum, la tension générée par l'ESR des supercondensateurs est importante. L'objectif est donc de diminuer progressivement le courant jusqu'à atteindre soit la pleine charge des supercondensateurs, soit l'équilibre entre la puissance de charge et la puissance consommée par les capteurs connectés au système.

L'état **Stop charge** (SC) est activé lorsque les supercondensateurs ont atteint leur tension maximale ($V_{SC}=4,4V$). Le système déconnecte alors les panneaux en mettant le rapport cyclique à 0.

Le programme est divisé en deux parties :

- Une boucle principale qui modifie le rapport cyclique et active l'étage de sortie.
- Une fonction d'interruption qui est appelée toutes les 13 ms, qui effectue les mesures de tension (V_{SC} , V_{PV} et V_{OC} toutes les 10 secondes) et de courant (I_{PV}) et active les protections (courant fort, fin de charge des supercondensateurs).

L'algorithme de fonctionnement du système est d'abord décrit exhaustivement ici, puis présenté sous forme de 2 logigrammes synthétiques Figure 85 et Figure 86.

2.2.4.2.1. DESCRIPTION TEXTUELLE DE L'ALGORITHME

Le programme démarre en mode « **Recherche MPP** » (Recherche du point de puissance maximum).

Chaque 13 ms, une interruption est déclenchée. Durant cette interruption :

- **V_{PV} , I_{PV} et V_{SC} sont mesurées**

Si le programme est en mode « Recherche MPP » (Recherche du point de puissance maximum)

- Si $I_{PV} > I_{MAX}$:
 - le rapport cyclique D est mémorisé dans D_{MAX}
 - D passe à 0
 - le programme passe en mode « **Limitation de courant** »
- Si $V_{SC} > 4,35V$: le programme passe en mode « **Limitation de courant** » : il va diminuer progressivement le courant maximum pour finir de charger les supercondensateurs

Si le programme est en mode « Limitation de courant » (D ne peut qu'être incrémenté dans ce mode) :

- Si $I_{PV} > I_{MAX}$:
 - Si $D \ll D_{MAX}$ (on est loin de l'ancienne valeur de D, donc forte variation de luminosité et de courant) :
 - le rapport cyclique D est mémorisé dans D_{MAX}
 - le rapport cyclique D passe à 0 par sécurité
 - Si $D < D_{MAX}$ (et l'écart entre D et D_{MAX} est faible) ou $D > D_{MAX}$:
 - $D_{MAX} = D$: on mémorise le nouveau D où le franchissement du courant max est intervenu.
- Si $V_{SC} > 4,35V$:
 - Si $I_{MAX} > I_{MAXMIN}$: La valeur du courant maximum I_{MAX} va diminuer progressivement pour finir de

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

charger les supercondensateurs à plus faible courant (pas de problème d'ESR), si sa valeur n'est pas déjà la valeur minimum possible

- Si $I_{MAX} = I_{MAXMIN}$: On passe en mode « **Stop charge** » et D va passer à 0 dans la boucle principale puisqu'on ne peut plus diminuer le courant maximum I_{MAX} .
- Si $V_{SC} < 4,35V$: La valeur du courant maximum augmente progressivement pour revenir au fonctionnement normal et charger rapidement les supercondensateurs.

Toutes les 10 secondes :

- Le rapport cyclique actuel est mémorisé, puis mis à 0 (circuit ouvert).
- La tension de circuit ouvert du panneau est mesurée.
- L'ancien rapport cyclique est de nouveau appliqué.
- La tension de puissance maximale est calculée : $V_{MP} = 81\% V_{OC}$
- Si $V_{MP} < 5V$, $V_{MP} = 5V$ (pour que la tension soit toujours suffisante pour alimenter la logique de contrôle).

Boucle principale, en continu (boucle while(1)) :

Si le programme est en mode « Recherche MPP » (Recherche du point de puissance maximum)

- On attend une interruption pour que V_{PV} soit mesuré
- Si $V_{PV} > V_{MP}$: D est incrémenté
- Si $V_{PV} < V_{MP}$: D est décrémenté

Si le programme est en mode « Limitation de courant » :

- On attend une interruption pour que V_{PV} soit mesuré
- Si $V_{PV} > V_{MP}$: D est incrémenté
- Si $V_{PV} < V_{MP}$: On passe en mode « **Recherche MPP** »

Si le programme est en mode « Stop charge » :

- Si $V_{SC} < 4,1$: On passe en mode « **Recherche MPP** »
- Si $V_{SC} > 4,1$: D=0

Si $V_{SC} > 4,3V$:

- On active le régulateur de sortie

Si $V_{SC} < 4V$:

- Le signal d'activation passe à 0, les régulateurs de sortie restant activés (OU logique).

2.2.4.2.2. DESCRIPTION DE L'ALGORITHME SOUS FORME DE LOGIGRAMMES

ROUTINE D'INTERRUPTION

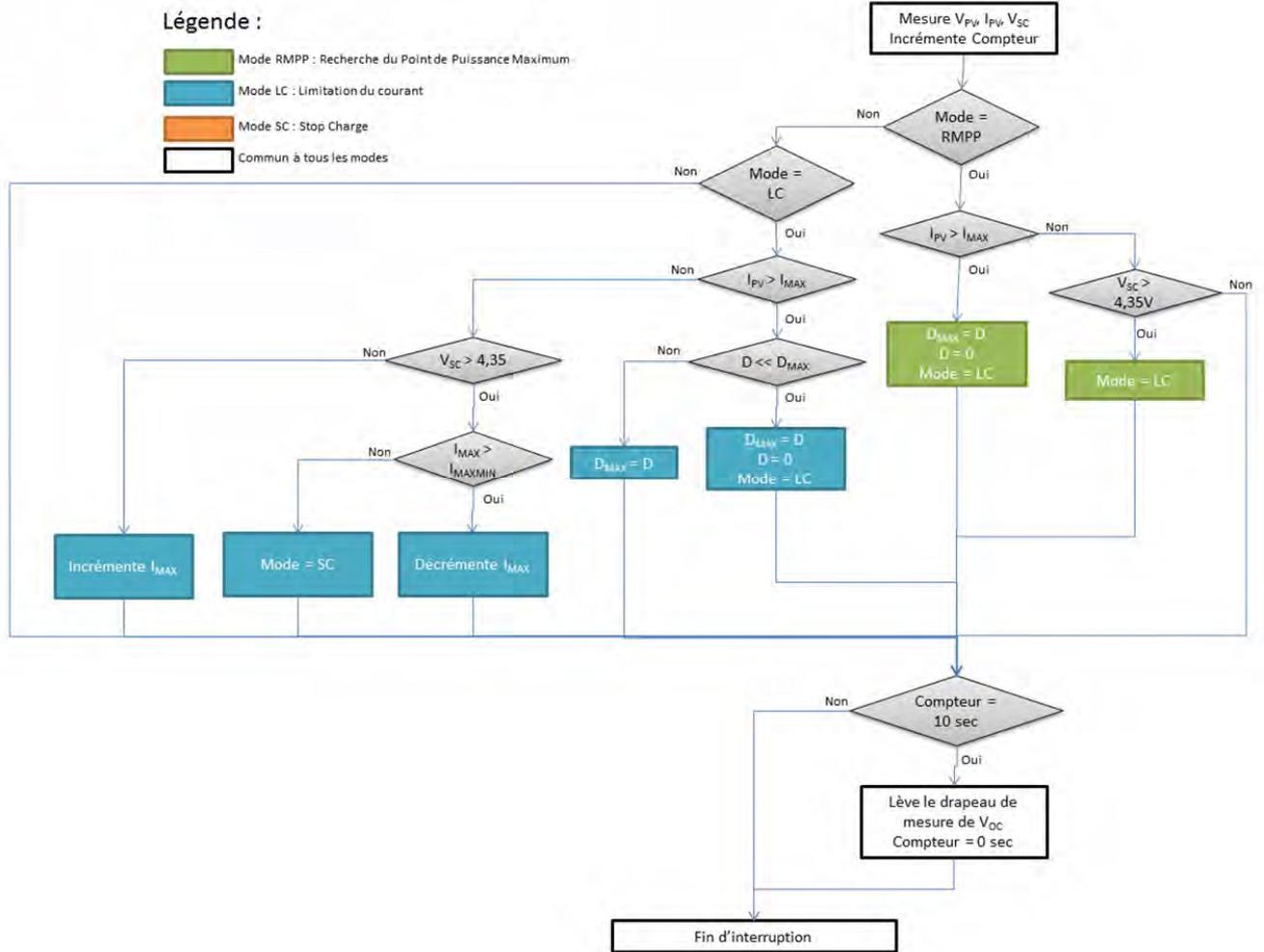


Figure 86. Logigramme décrivant le fonctionnement de la boucle d'interruption du programme exécuté sur le microcontrôleur.

2.2.5. ESSAIS FINAUX

Afin de valider le bon fonctionnement de la carte et de mesurer l'irradiance minimale requise pour fournir la puissance demandée, nous avons effectué des essais sur le toit de notre laboratoire.

Le système a ensuite été installé sur un A321, pour effectuer un vol d'essai et valider en situation réelle, le fonctionnement du système et la validité de la récupération d'énergie pour cette application.

2.2.5.1. ESSAIS AU SOL

Le dispositif expérimental est montré sur la Figure 87.

Au moment de ces essais, la puissance consommée par la charge à alimenter nous a été communiquée de manière plus précise et s'est révélée être au maximum de 2W (avec une consommation moyenne légèrement inférieure). La tension de sortie de notre système étant de 46,8V, nous avons connecté une charge résistive de 1007Ω, ce qui correspond à une consommation de 2,18W.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

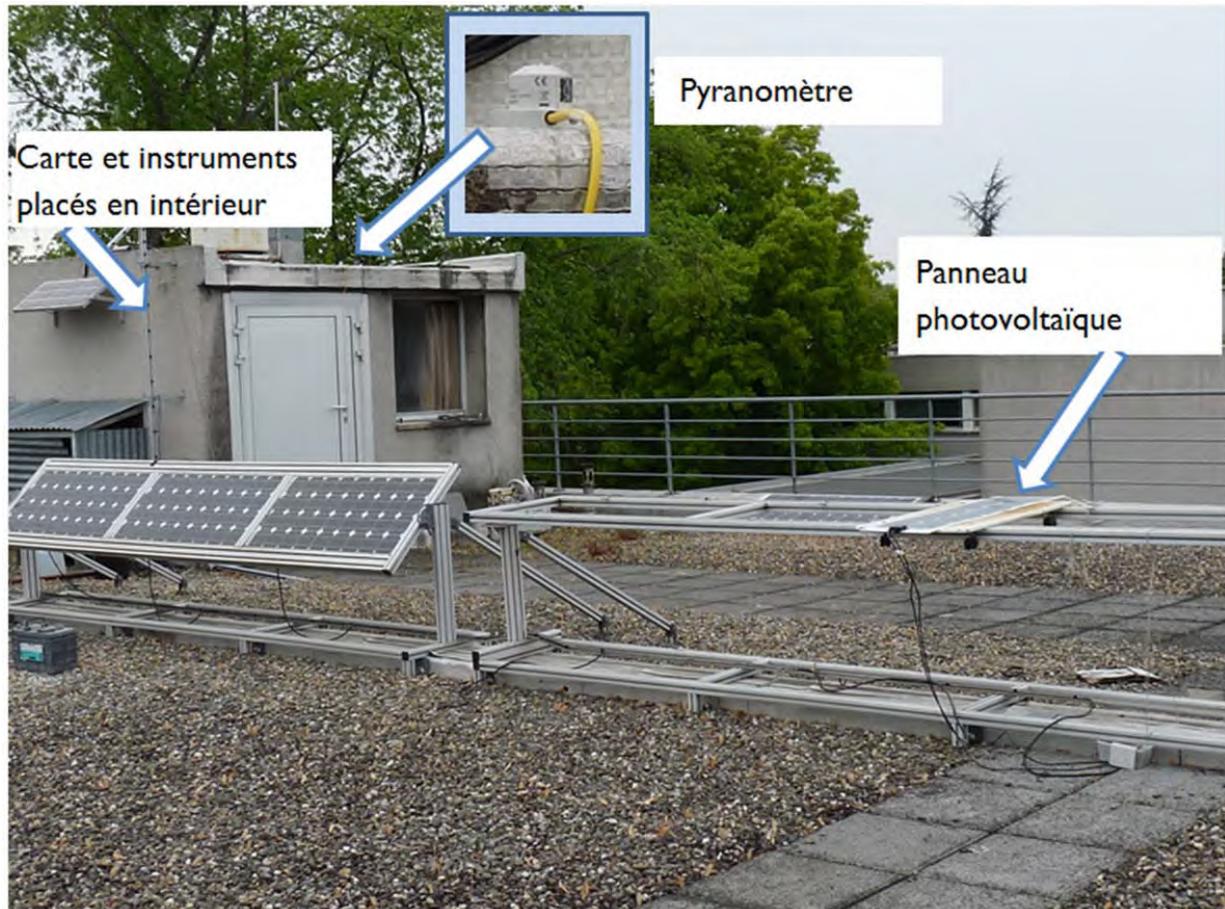


Figure 87. Installation sur le toit du laboratoire pour effectuer les essais de validation du récupérateur.

Trois cas de fonctionnement peuvent être distingués :

- L'irradiance est trop faible le système ne peut pas fonctionner en continu : les supercondensateurs se chargent, la sortie s'active, les supercondensateurs se vident pour alimenter la charge, la sortie se désactive.
- L'irradiance est suffisante pour que le récupérateur fonctionne au point de puissance maximum et alimente la charge
- L'irradiance est trop forte et le récupérateur fonctionne en limitation de courant.

Nous présentons d'abord en Figure 88 le cas enregistré peu de temps après le lever de soleil où l'irradiance est trop faible pour alimenter la charge en continu.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

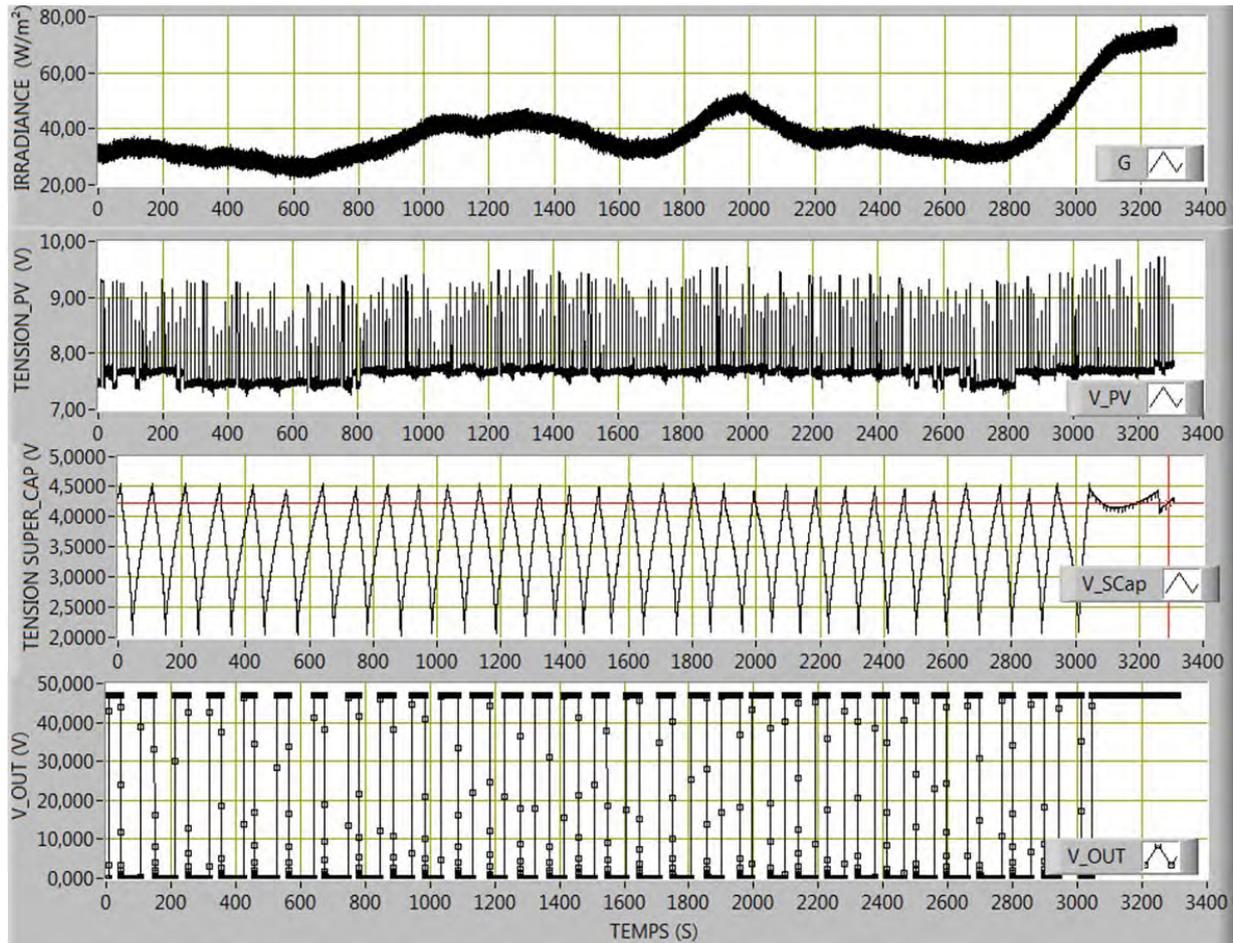


Figure 88. Enregistrement des paramètres du système peu de temps après le lever de soleil. De haut en bas, les courbes présentent l'évolution au cours du temps de l'irradiance (W/m^2), la tension aux bornes du panneau photovoltaïque (V), la tension aux bornes des supercondensateurs (V) et la tension de sortie du système (V). Le « bruit » présent sur la tension du panneau solaire et la mesure de V_{OC} , visible sont expliqués Figure 90.

Dans cette situation, la tension aux bornes des supercondensateurs s'élève jusqu'à 4,4V et le système active alors l'étage de sortie. La puissance récupérée n'étant pas suffisante, les supercondensateurs se déchargent jusqu'à ce que le premier régulateur ne puisse plus assurer une tension de 5V sur sa sortie, éteignant l'étage de sortie.

Ce schéma recommence ainsi jusqu'à ce que l'irradiance soit suffisante pour fournir la puissance nécessaire à la charge, visible à la fin de cet enregistrement (à environ 3100 secondes) quand la tension des supercondensateurs remonte. L'irradiance minimale correspond donc à $70W/m^2$ lorsque le stockage est chargé.

Sur la Figure 89, nous pouvons observer les deux autres modes de fonctionnement : le mode MPPT et le mode de régulation de courant.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

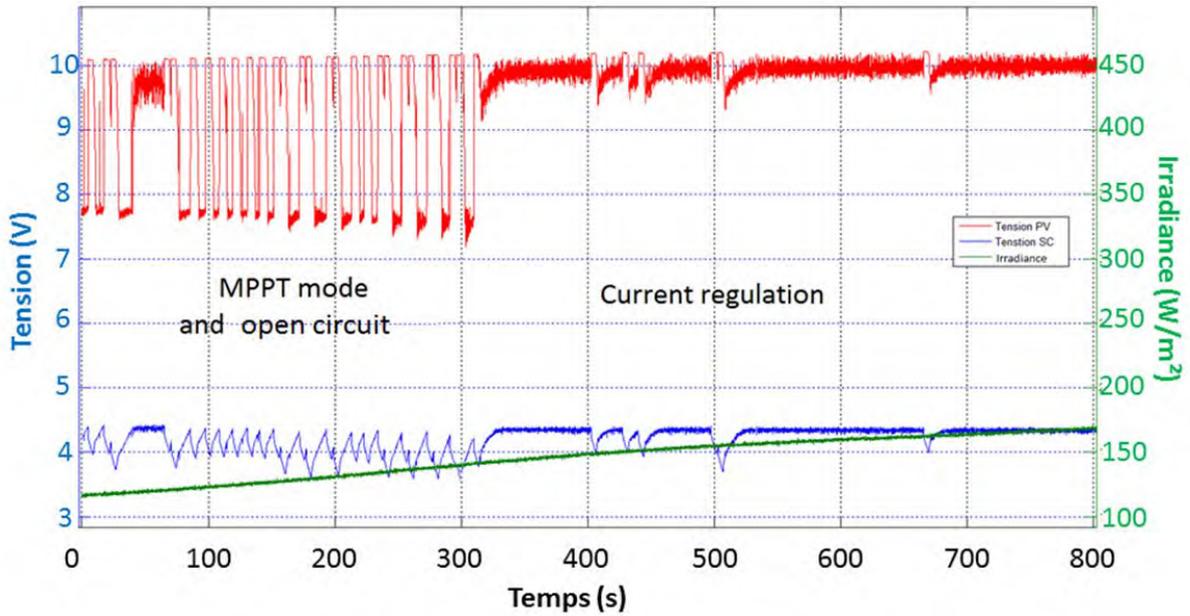


Figure 89. Enregistrement des paramètres du système lorsqu'il alimente la charge. En rouge : la tension aux bornes du panneau. En bleu : la tension aux bornes des supercondensateurs. En vert : l'irradiance.

En mode MPPT (avant 300 secondes sur la Figure 89 et Figure 90), le système mesure la tension de circuit ouvert toutes les 10 secondes (pics courts), puis vient se placer au MPP. Quand les supercondensateurs sont pleinement chargés, la charge s'arrête et le panneau photovoltaïque est déconnecté de son entrée (la tension passe à 10V pendant quelques secondes). La tension du stockage chute alors à son seuil bas et la charge reprend.

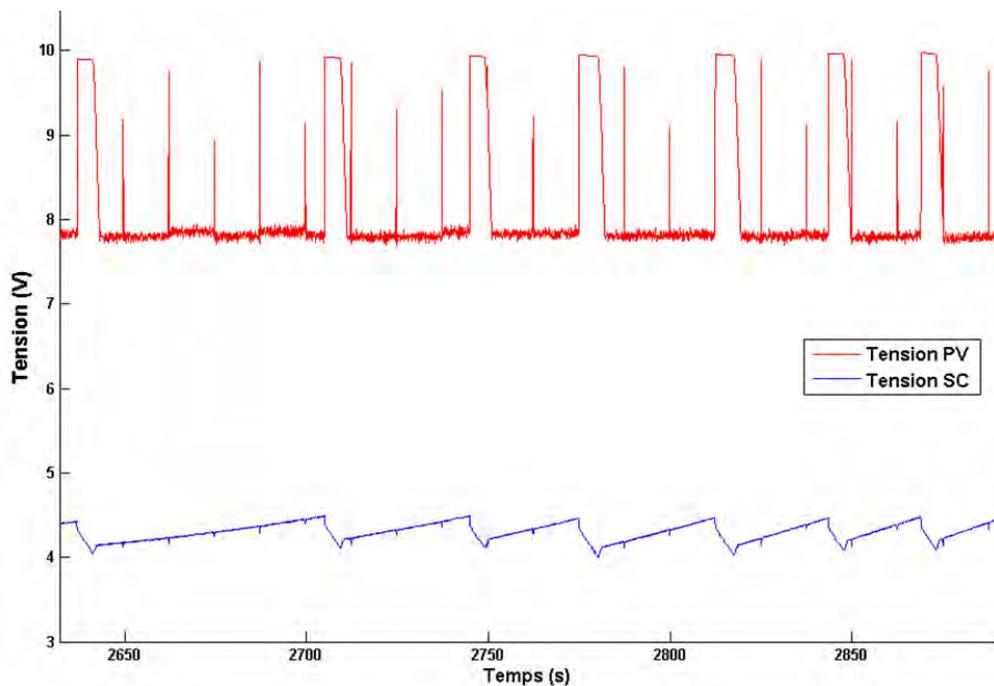


Figure 90. Enregistrement de la tension aux bornes du panneau PV et aux bornes du stockage en fonctionnement MPPT et circuit ouvert.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

Quand l'irradiance atteint les 145 W/m², à environ 310 secondes sur la Figure 89, le courant est trop important pour un fonctionnement au MPP et le système limite son courant d'entrée en se plaçant à une tension de fonctionnement proche de la tension de circuit ouvert.

MESURES DE RENDEMENT

Le rendement de l'étage de sortie a été mesuré en alimentant la charge de 2,18W seulement à partir des supercondensateurs chargés, c'est-à-dire avec les panneaux photovoltaïques déconnectés. Le premier régulateur de sortie (LTC3539) a un rendement de conversion supérieur lorsque la tension appliquée à son entrée est proche de la tension de sortie à atteindre.

Cette mesure est visible Figure 91, et le rendement est de 74% lorsque les supercondensateurs sont chargés à 4,2V mais chute à un minimum de 52% quand la valeur de cette tension n'est que de 2,2V.

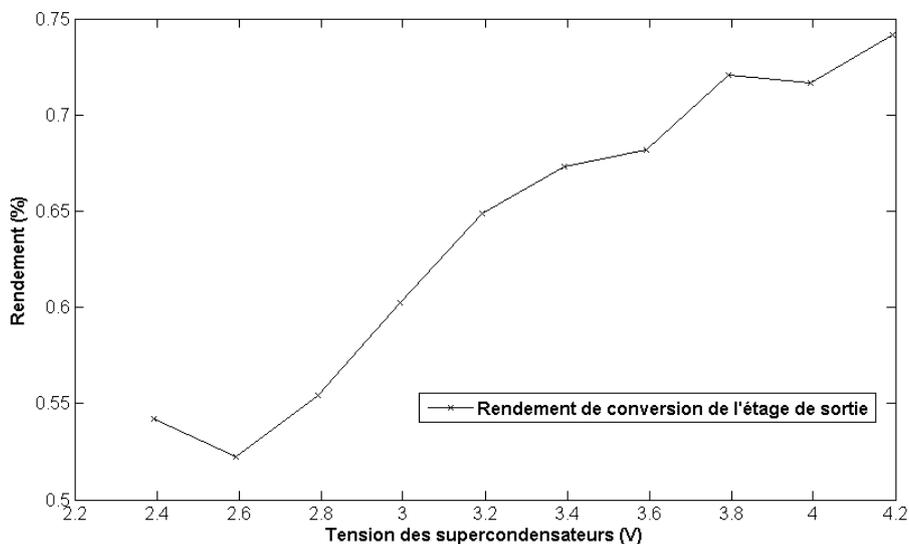


Figure 91. Rendement de conversion de l'étage de sortie lors de l'alimentation d'une charge résistive de 2,18W.

RENDEMENT DE L'ENSEMBLE DU CIRCUIT

Le rendement de conversion de la carte entière n'a pas pu être mesuré car on ne pouvait pas matériellement mesurer la puissance d'entrée à cause d'un nombre d'entrées insuffisant sur notre carte d'acquisition. On peut néanmoins le calculer à partir du point de fonctionnement à une irradiance de 70W/m², puisque l'on sait que c'est à cette valeur que le système fournit une puissance en sortie de 2,18W, en étant au point de puissance maximum.

Nous avons mesuré le rendement du panneau à une irradiance de 57W/m², qui est de 14,2%. En considérant que le rendement du panneau est le même lorsqu'il est éclairé par une puissance 70W/m² et en connaissant sa surface, nous pouvons calculer la puissance générée.

$$\begin{aligned} P_{\text{générée}} &= \text{Irradiance} \times \text{Surface} \times \text{Rendement} \\ &= 70 \times 0,325 \times 0,142 \\ &= 3,23 \text{ Watts} \end{aligned}$$

Notre carte a donc un rendement global, du panneau à la charge, de $\eta = 2,18/3,23 = 67,5\%$

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

Lors de nos mesures, les supercondensateurs sont chargés, donc le rendement de l'étage de sortie est de 74%. Cela nous permet de calculer que le rendement de notre récupérateur d'énergie, sans l'étage de sortie, est de : $\eta = 0,675/0,74 = 91,2\%$ pour une puissance d'entrée de 3,23 watts.

2.2.5.2. ESSAIS EN VOL

Après sa validation par les essais au sol, le récupérateur a été installé sur un appareil pour des essais en vol qui se sont déroulés le matin du 27 juin 2014, de 6h00 à 9h40 du matin, le lever de soleil étant à 5h59 ce jour-là (photo visible Figure 92).

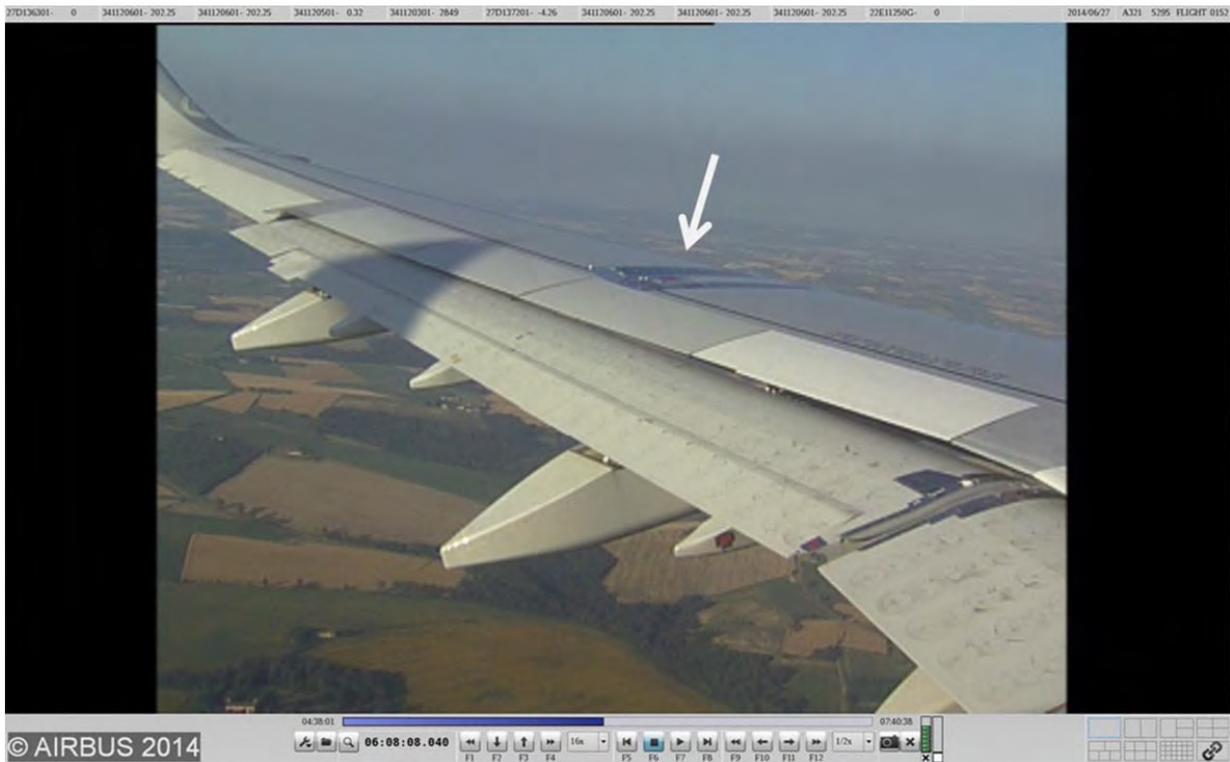


Figure 92. Photo de l'aile de l'A321 sur laquelle sont installés le récupérateur et la ceinture de capteurs, vue prise à 7h08 GMT +1.

Le vol commençant au lever du soleil, le début de l'enregistrement du capteur (visible

Figure 93 et Figure 94) est parsemé d'interruptions correspondant aux moments où il n'est plus alimenté. Ces défauts d'alimentation apparaissent lors des virages de l'appareil du côté opposé au soleil (visibles sur la vidéo du vol).

Une fois le jour suffisamment avancé, après 7h10, la lumière diffuse est suffisante pour apporter l'énergie nécessaire à l'alimentation, même durant les virages.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

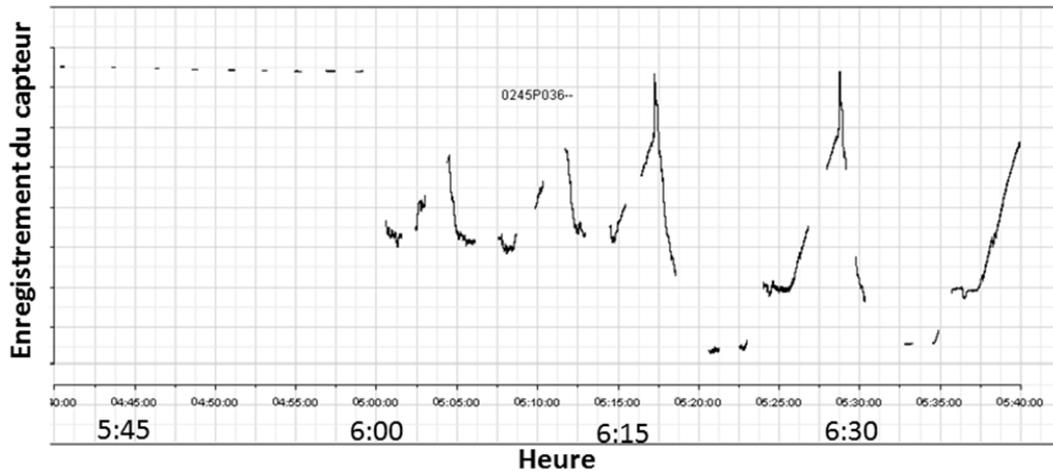


Figure 93. Données enregistrées entre 5h40 et 6h40 du matin, mesurées par le capteur alimenté par le système de récupération d'énergie. De multiples interruptions dans l'enregistrement dénotent un défaut d'alimentation.

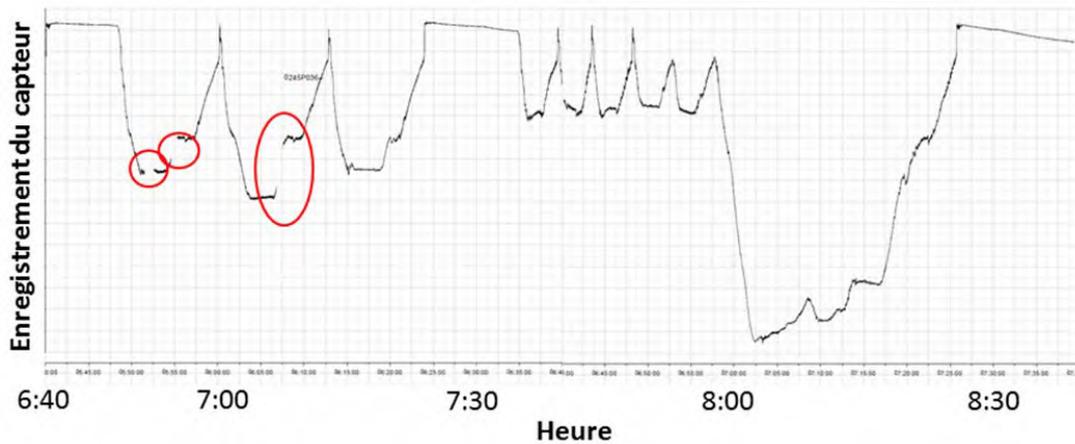


Figure 94. Données enregistrées entre 6h40 et 8h40 du matin, mesurées par le capteur alimenté par le système de récupération d'énergie. Trois interruptions dans l'enregistrement dénotent un défaut d'alimentation. Après 7h10, les capteurs sont alimentés en continu.

2.2.6. AMELIORATIONS DU SYSTEME DE RECUPERATION PHOTOVOLTAÏQUE

Ce projet a abouti à un prototype fonctionnel d'un récupérateur photovoltaïque pouvant être installé sur l'aile d'un avion. Néanmoins, pour apporter une meilleure solution à ce cas d'utilisation, deux axes d'améliorations sont à explorer :

- Réduire la surface du panneau photovoltaïque pour réaliser un système moins encombrant : cela peut être réalisé en améliorant le rendement de la carte utilisée, ou en améliorant le rendement du panneau photovoltaïque utilisé pour produire la même puissance avec une surface inférieure.
- Améliorer le fonctionnement à basse luminosité : cela peut également être réalisé en améliorant le rendement de la carte ou en utilisant un panneau photovoltaïque plus performant (pour une même surface, une plus grande puissance sera produite).

Les coupures d'alimentation sont dues à une autonomie insuffisante du système lors des virages, ce point peut également être amélioré en augmentant l'autonomie dont dispose le système.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

Nous présentons ici les pistes d'amélioration possibles d'un tel système : l'amélioration du rendement de conversion de la carte, une technologie de panneaux photovoltaïques souples ayant un rendement supérieur à celui employé dans cette étude et un moyen d'améliorer l'utilisation des supercondensateurs.

2.2.6.1. AMELIORATIONS DE LA CARTE DE CONVERSION

Tout au long de la réalisation de ce projet, les spécifications du système ont subi des changements et la carte finale présente ainsi des faiblesses dues à des choix de conception non optimaux pour le cas d'utilisation final. Nous discutons ici des changements qui pourraient être apportés au circuit afin d'augmenter son rendement de conversion global :

- Le critère ayant déterminé le choix de l'inductance du convertisseur Buck d'entrée a été son épaisseur, et les autres choix de conception ont découlé de ce paramètre. Relâcher cette contrainte permettrait de choisir une inductance différente et permettrait de modifier la fréquence de commutation du Buck ce qui pourrait conduire à une baisse des pertes du système (fonctionnement du microcontrôleur à plus basse fréquence, diminution des pertes de commutation grâce à une plus basse fréquence, etc.).
- Comme nous l'avons déjà écrit, l'étage de sortie doit être repensé pour améliorer son rendement de conversion. Garder deux régulateurs en cascade mais avec des gains équivalents permettrait déjà d'avoir un rendement supérieur. Une étude pourrait également être menée sur l'utilisation d'un seul régulateur, type régulateur quadratique.
- L'alimentation de la logique de contrôle par un régulateur linéaire pourrait être remplacée par l'utilisation d'un convertisseur abaisseur Buck au rendement supérieur.

2.2.6.2. MEILLEUR RENDEMENT DU PANNEAU

La seule technologie photovoltaïque souple ayant un meilleur rendement que les cellules en silicium monocristallin en couche mince est la technologie utilisant l'arséniure de gallium. Nous avons pu réaliser des essais sur des modules de la société AltaDevices, visibles Figure 95.

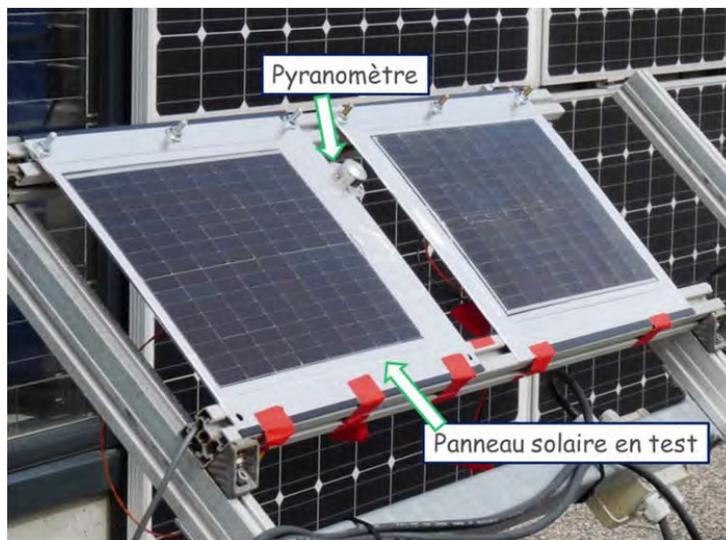


Figure 95. Panneau photovoltaïques souples en GaAs, disposés pour des tests à faible irradiance.

Des tests à faible luminosité de ces cellules ont été effectués dans notre laboratoire (voir Figure 96) et ont montré des résultats supérieurs au panneau SolbianFlex avec rendement attendu autour de 15-20%.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

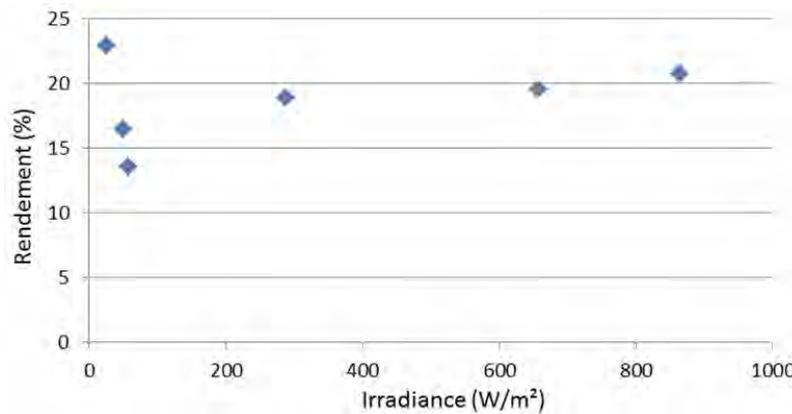


Figure 96. Rendement des panneaux photovoltaïques AltaDevices en fonction de l'irradiance, mesurée en extérieur (températures comprises entre 10 et 20°C). La technologie GaAs en couche mince est moins sensible à la température que le c-Si [159].

Cette technologie permettrait donc, en partie, d'améliorer notre système soit en réduisant la surface occupée, soit en améliorant la puissance produite par faible irradiance grâce à son rendement de conversion supérieur aux panneaux que nous avons utilisés (14,2% à 57W/m²). Cette amélioration se ferait néanmoins au prix d'une augmentation sensible du coût du dispositif.

2.2.6.3. AUGMENTATION DE L'AUTONOMIE

2.2.6.3.1. AUGMENTATION DU NOMBRE DE SUPERCONDENSATEURS

L'augmentation de l'autonomie de notre système pourrait simplement être réalisée en augmentant le nombre de supercondensateurs, mais nous avons vu que ce paramètre est déterminé par le volume et la surface disponibles. Pour une première version du projet, nous avons réalisé une carte comprenant 36 supercondensateurs pour une capacité totale de 90F (visible Figure 97) ce qui apporterait une autonomie de 180 secondes, et pourrait être suffisant pour assurer l'alimentation lors d'un virage de l'appareil. Néanmoins, pour des raisons évidentes, cet assemblage ne peut pas convenir pour l'application ciblée (il avait été réalisé sur demande d'Airbus pour une application éventuelle).

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

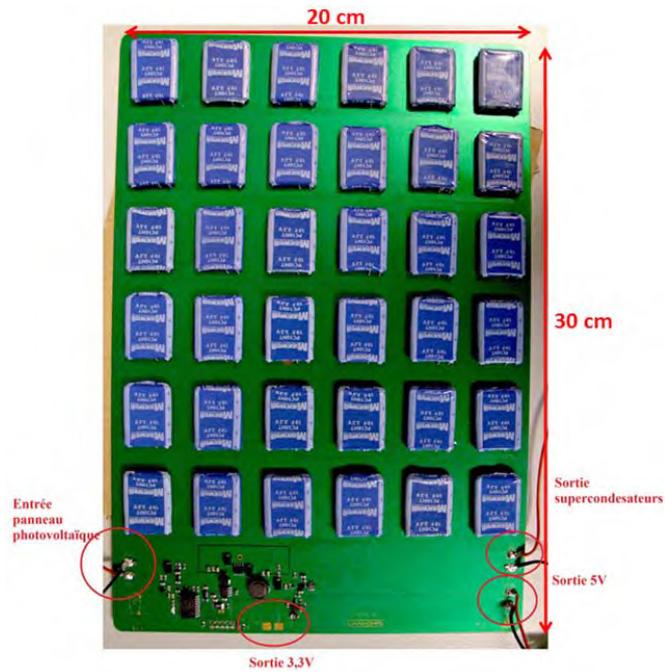


Figure 97. Prototype comprenant 36 supercondensateurs afin d'obtenir une autonomie élevée.

2.2.6.3.2. STRUCTURE ADAPTATIVE PAR SUPERCONDENSATEURS COMMUTES

Une autre manière d'obtenir une autonomie plus élevée en utilisant des supercondensateurs comme stockage d'énergie est d'optimiser leur fonctionnement grâce à une structure adaptative réalisée à l'aide de supercondensateurs commutés. Le principe de cette structure, proposée par R. Monthéard [7], est de réaliser une matrice de supercondensateurs dont l'agencement est modifié en fonction de l'état de charge global de la structure. Des interrupteurs sont utilisés pour modifier l'association des supercondensateurs, passant d'un agencement « tout parallèle », à un agencement « tout série » (ou inversement), avec des états intermédiaires.

L'étage de base de cette matrice est constitué de deux éléments de base et de trois interrupteurs selon l'agencement présenté Figure 98. Lorsque les interrupteurs k_1 et k_3 sont ouverts et k_2 est passant, les deux condensateurs sont connectés en série et leur capacité équivalente vaut $C_{eq} = \frac{C}{2}$. A l'inverse, lorsque k_2 est ouvert et k_1 et k_3 sont passants, la capacité équivalente vaut $C_{eq} = 2 \times C$.

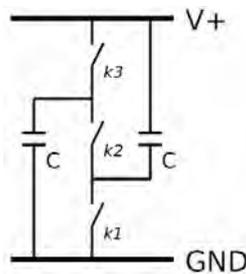


Figure 98. Etage de l'architecture adaptative.

A chaque commutation d'une structure « série » vers une structure « parallèle », la capacité équivalente est multipliée par 4 et la tension aux bornes de la structure est divisée par 2.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

Nous représenterons l'élément de base de la structure comme étant un seul supercondensateur, mais cet élément peut être composé de plusieurs supercondensateurs associés en série afin d'augmenter sa tension maximale, de manière analogue à notre récupérateur où le stockage est réalisé par deux branches de 2 supercondensateurs en série.

Cette structure de base peut être répétée avec le nombre de supercondensateurs voulu, la Figure 99 illustre le cas avec 4 éléments de base.

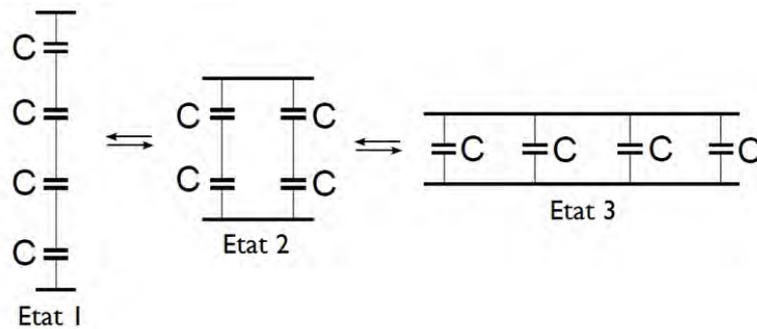


Figure 99. Principe d'une structure adaptative de supercondensateurs, ici présentée avec 4 éléments.

Cette technique apporte plusieurs avantages par rapport à un stockage à base de simples supercondensateurs :

- **Un démarrage plus rapide de la sortie.** Dans sa structure « tout série », la capacité équivalente est faible et permet ainsi d'atteindre plus rapidement une tension élevée dans le stockage, permettant de faire démarrer plus rapidement l'étage de sortie (tout en évitant le problème de démarrage en sous tension (UVLO)). Il suffit ensuite de prendre garde à commuter les supercondensateurs de manière à conserver une tension suffisante à leurs bornes. Ce principe est illustré Figure 100.

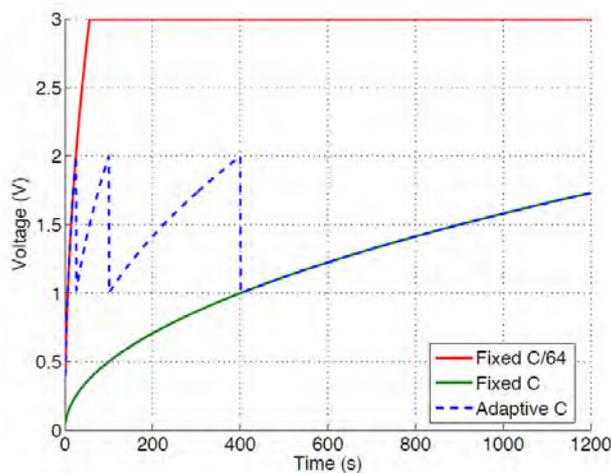


Figure 100. Evolution de la tension lors de la charge à puissance constante d'une structure adaptative de 8 éléments de capacité C/8 par rapport à la charge de condensateurs de capacité C/64 et C [7].

- **Un gain d'énergie utilisable.** Lorsqu'un stockage de supercondensateurs se décharge, par exemple en situation d'autonomie énergétique lorsque la source d'énergie du système de récupération est éteinte, il

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

arrive un moment où la tension devient insuffisante pour que la régulation de sortie fonctionne, et l'alimentation de la charge cesse alors. Dans ce cas, de l'énergie est encore stockée dans les supercondensateurs, mais elle est inutilisable à cause d'une tension trop faible.

En utilisant la structure adaptative lors d'une décharge du stockage, celle-ci basculera d'un état « tout parallèle » vers « tout série » : à chaque commutation, la tension à ses bornes se retrouvera multipliée par 2, permettant de rester plus longtemps au-dessus du seuil de non fonctionnement de l'étage de sortie, et utilisant ainsi au maximum l'énergie stockée. Le cas montré Figure 101 permet de faire fonctionner le système alimenté pendant une durée 9,8% plus élevée pour un seuil de $V_{\min}=0,9V$ et de 18,8% pour $V_{\min}=1,2V$.

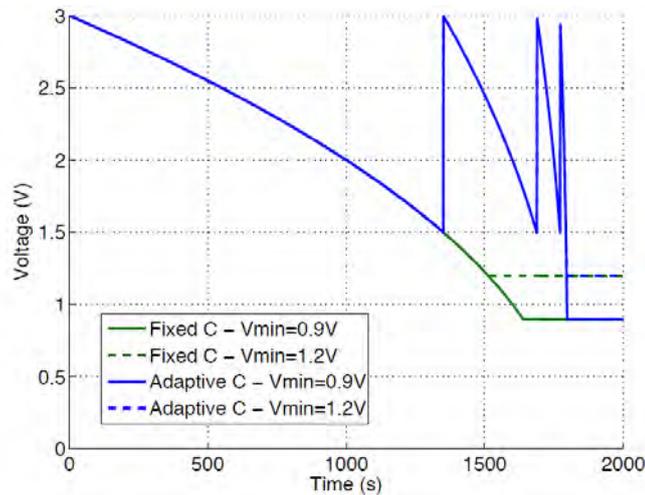


Figure 101. Evolution de la tension lors de la décharge à puissance constante d'une structure adaptative de 8 éléments de capacité C par rapport à la décharge d'un condensateur de capacité C. La tension de seuil de fonctionnement d'un éventuel étage de sortie est de 0,9V ou 1,2V [7].

- 3. Adaptation d'impédance.** Enfin, si cette structure est directement connectée à une source qui se comporte comme un générateur de Thévenin, elle réalise une certaine adaptation d'impédance (puisque son impédance d'entrée variera à chaque commutation), avec un maximum si ces commutations sont réalisées lorsque la tension aux bornes de la structure a atteint $2/3$ de la tension de la source qui y est connectée [7].

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

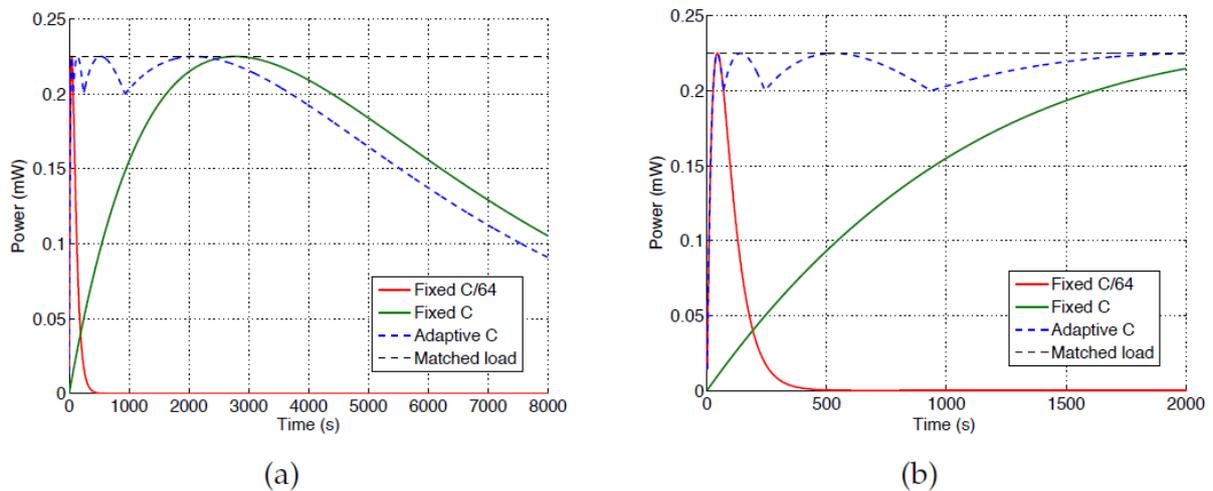


Figure 102. Evolution de la puissance reçue lors d'une charge par un générateur de Thévenin. La courbe (b) est un agrandissement du début de la courbe (a).

Les inconvénients posés par l'utilisation de cette structure sont surtout liés aux pertes supplémentaires qu'elle peut engendrer :

- Il faut une logique de contrôle qui consommera de l'énergie, et donc diminuera le gain en autonomie : mesure, logique (synchrone ou asynchrone), commande des transistors servant d'interrupteurs, commutations des transistors.
- Si les composants ne sont pas rigoureusement identiques, ils se chargeront différemment et la tension à leurs bornes sera différente. Lors de la commutation de ces éléments, des courants d'équilibrage entre les éléments de tension différente apparaissent, provoquant des pertes par effet Joule. Si ces pertes sont trop importantes, il pourrait être nécessaire d'utiliser un circuit d'équilibrage pour imposer une tension identique à chaque condensateur, compliquant la réalisation de cette structure.

Nous avons donc continué cette étude pour évaluer ces pertes sur une structure comportant 4 éléments de stockage : quelle logique basse consommation pouvait être implémentée, et quelle est l'influence de composants « réels », c'est-à-dire de composants non-identiques sur les performances de ce système.

CONSOMMATION DE LA LOGIQUE DE CONTROLE

La logique de contrôle d'une telle structure reste simple et est visible Figure 103. Elle nécessite :

- Un comparateur à hystérésis ou deux comparateurs simples et une référence de tension. Ces composants existent dans des versions qui consomment extrêmement peu d'énergie. Le comparateur utilisé dans le circuit de récupération d'énergie présenté précédemment, le LT6700 de Linear Technology, a une consommation maximale de l'ordre de $100\mu\text{W}$.
- Un circuit de contrôle. La méthode de contrôle de ce système peut être modélisée sous forme de machine à états et peut donc être synthétisée sous forme de porte logique. Pour une structure simple à 4 éléments, la logique de contrôle est facilement réalisée grâce à 4 portes logiques asynchrones (2 NAND et 2 RS) et deux détecteurs de front. Les composants permettant de réaliser une logique asynchrone (type GAL, *Gate Array Logic*) consomme une petite quantité d'énergie et seulement lors de leur commutation. Pour une structure plus complexe, la commande asynchrone n'est pas triviale et une commande en logique synchrone consommerait alors bien plus d'énergie (alimentation de l'horloge, etc.).

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

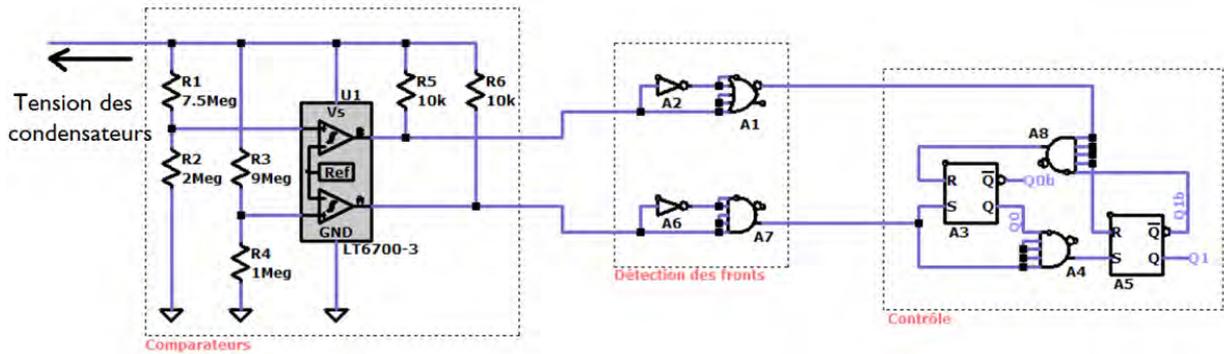


Figure 103. Partie commande d'une structure à 4 supercondensateurs commutés. Les signaux Q_0 , Q_0b , Q_1 et Q_1b contrôlent les interrupteurs.

Le circuit ne commutant pas souvent, les pertes engendrées par la commutation des interrupteurs MOSFET peuvent être négligées.

La commande de cette structure adaptative est donc simple et peu consommatrice en énergie et ne diminuera pas sensiblement les performances de ce système pour des puissances en jeu de quelques watts.

INFLUENCE DES COMPOSANTS NON IDEAUX

Interrupteurs non idéaux.

Les transistors réalisant les interrupteurs doivent avoir une résistance R_{dsON} la plus faible possible. En composant discret, les transistors actuels ont des valeurs de résistance de l'ordre de quelques dizaines de milliohms, ce qui est inférieur à l'ESR des supercondensateurs PC10 HT que nous avons utilisés dans notre récupérateur. Nous pouvons donc négliger les pertes induites par cette résistance.

Supercondensateurs non idéaux.

Lorsque l'on charge des supercondensateurs en série, chaque supercondensateur stocke la même charge électrique q , mais si ces composants ont des valeurs de capacité différente C_1 et C_2 , ils auront une tension à leurs bornes V_1 et V_2 différente.

Cette tension est égale à :

$$V_i = \frac{C_{eq}}{C_i} \times V$$

où V_i et C_i sont respectivement la tension et la capacité du supercondensateur considéré, C_{eq} la capacité équivalente de la branche de supercondensateurs en série, et V la tension aux bornes de la branche.

Lors de la commutation d'une structure série vers une structure parallèle, un courant apparaîtra pour égaliser la tension de ces deux condensateurs vers une tension de valeur :

$$V_{moy} = \frac{C_1 \times V_1 + C_2 \times V_2}{C_1 + C_2}$$

Ce courant de rééquilibrage entraînera des pertes. Ces pertes dépendent de la valeur de tension lors de la commutation et de la différence de valeur de capacités entre les composants.

Nous avons maintenant voulu savoir si ces pertes sont importantes et pouvaient invalider le principe d'une telle structure, ou non.

Nous avons réalisé des simulations de Monte-Carlo pour mesurer la sensibilité de la structure à la variation de la valeur des supercondensateurs et au placement des supercondensateurs dans la structure. Cette simulation a été réalisée en faisant commuter la structure lorsque la tension atteint 2/3 de la tension de la source,

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

ce qui est la condition de la meilleure adaptation d'impédance possible sur une source de Thévenin. Les résultats de ces simulations sont visibles Figure 104.

Dans ce tableau :

- la tolérance définit la valeur minimale et la valeur maximale que peut prendre un supercondensateur par rapport à une valeur centrale normalisée de 1 (les pertes ne dépendant pas de la valeur absolue des condensateurs employés).
- Le nombre de tirage correspond au nombre de valeurs différentes tirées au hasard dans l'intervalle de tolérance correspondant. Les simulations ont été réalisées pour toutes les combinaisons possibles avec les 80 tirages ce qui donne 80^4 structures différentes simulées par plage de tolérance.
- Les valeurs des condensateurs ayant abouti au pire cas sont montrées en valeurs normalisées par rapport à une valeur centrale de 1.
- E_{\max} est l'énergie perdue dans le pire cas ramenée à l'énergie totale stockée une fois la charge terminée.

Entrées		Sorties				
Tolérances	Tirages	C_1	C_2	C_3	C_4	E_{\max}
-10 % +30 %	80	1,2915	0,9062	0,9019	1,2952	0,34 %
-20 % +80 %	80	1,7787	0,8154	0,8046	1,7880	1,34 %
-50 % +50 %	80	1,4787	0,5154	0,5046	1,4880	2,02 %
-65 % +65 %	80	1,6223	0,3700	0,3560	1,6344	2,68 %
-75 % +75 %	80	0,4548	1,7442	0,2570	1,7320	2,82 %
-90 % +90 %	80	0,1009	1,8991	0,7262	1,8819	3,13 %

Figure 104. Résultats des simulations de Monte-Carlo de sensibilité à la variation de la capacité des supercondensateurs employés.

En prenant un cas réaliste, par exemple sur une plage de tolérance de -20%/+80% qui est la plage de tolérance des supercondensateurs AVX BestCap déjà présentés [160], la perte maximale qui peut être engendrée par les commutations dans le pire cas possible ne représentera que 1,34% de l'énergie qui sera au final stockée.

Ce pire cas est illustré Figure 105 et arrive lorsque :

- 2 éléments ont une valeur C_1 très faible et 2 éléments ont une valeur C_2 très forte.
- Les pertes se concentrent exclusivement lors de la deuxième commutation, quand l'énergie stockée est maximum

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

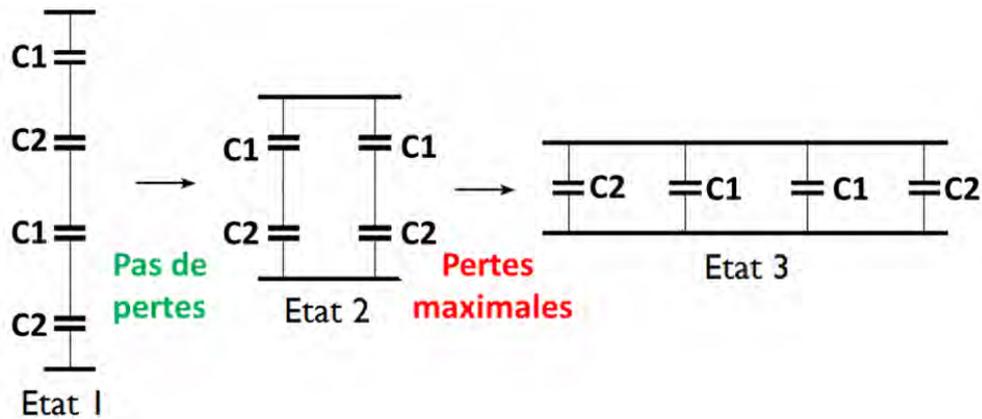


Figure 105. Pire cas amenant à la perte maximale d'énergie dans la structure adaptative composée de 4 éléments.

CONCLUSION SUR L'INTERET DE LA STRUCTURE ADAPTATIVE

Cette étude a démontré la viabilité d'une structure à condensateurs commutés même lorsque les composants utilisés ont des valeurs de capacité différentes en montrant que les pertes engendrées restent très faibles. Il n'est pas non plus nécessaire d'utiliser de circuit d'équilibrage des condensateurs et la commande peut être réalisée de manière très simple pour une structure à 4 condensateurs.

Utiliser cette technique permettrait donc d'optimiser l'utilisation de supercondensateurs comme moyen de stockage d'énergie, et pour notre cas d'application, permettrait d'augmenter l'autonomie du système sans encombrement supplémentaire important (seulement le circuit de contrôle).

2.3. CONCLUSION

L'énergie photovoltaïque est sans doute la première source d'énergie à avoir été envisagée comme alternative à une réserve d'énergie électrochimique pour l'alimentation de capteurs autonomes grâce, notamment, à sa densité d'énergie élevée et à la maturité de cette technologie. Comme beaucoup de sources utilisées pour la récupération d'énergie, la ressource lumineuse est intermittente. Néanmoins, cette intermittence est relativement prévisible avec une composante régulière (cycle jour/nuit pour la lumière solaire, et cycle similaire pour une utilisation intérieure) nuancée de composantes plus aléatoires (météo, occupation d'un bâtiment) qu'il faut compenser par l'utilisation d'un stockage approprié.

Actuellement, l'aéronautique montre un certain intérêt pour l'utilisation de technologies photovoltaïques, notamment pour assurer la propulsion dans des projets qui servent de démonstrateurs comme Solar Impulse, ou dans l'étude de drones solaires. En revanche, les appareils de plus grande taille nécessitent une énergie incomparablement plus importante que seuls les hydrocarbures peuvent pour l'instant apporter. En revanche, en ce qui concerne l'instrumentation, il n'existe pas, à notre connaissance, d'application utilisant des panneaux photovoltaïques qui soit utilisée sur des avions de série.

A travers notre réalisation, nous avons montré que l'utilisation d'une alimentation solaire est possible et fiable (pourvu qu'il y ait un minimum de soleil). Les technologies solaires couche mince sont disponibles, légères, performantes et leur coût n'est pas forcément un obstacle pour ce domaine. En revanche, le stockage est plus problématique et confinerait le photovoltaïque à une application de jour seulement. Une étude de l'irradiance sur l'intrados des ailes pourrait être menée pour estimer la ressource lumineuse disponible à cet emplacement par diffusion/réflexion du sol ou des nuages et évaluer la viabilité de l'installation d'un tel système sous l'appareil.

Premier cas d'étude : récupérateur photovoltaïque pour une instrumentation d'essais en vol

Pour concevoir un système d'alimentation photovoltaïque optimal pour cette application, et comme c'est le cas pour la conception de nombreux systèmes de capture d'énergie, l'alimentation doit être pensée en même temps que la charge utile. Optimiser un système de capture est nécessaire afin de garantir une alimentation fiable, sans coupure et maintenant le niveau de tension demandé en utilisant au mieux la source d'énergie qui est très souvent limitée (ici, la taille du panneau solaire doit être minimale).

Le système que nous avons conçu est néanmoins robuste et fiable (une fois le jour levé et par temps non pluvieux), et l'irradiance limite de 70W/m^2 permet à notre récupérateur de fonctionner par temps nuageux. L'utilisation de ce système conjointement à une batterie primaire pourrait être envisagée pour les phases de décollage/atterrissage, quand la température est suffisamment élevée pour faire fonctionner un stockage électrochimique, et permettrait de garantir l'alimentation lors des phases de vol ayant lieu sous la couche nuageuse.

3. DEUXIEME CAS D'ETUDE : RECUPERATEUR THERMOELECTRIQUE POUR LA SURVEILLANCE DE STRUCTURE AERONAUTIQUE

3. DEUXIEME CAS D'ETUDE : RECUPERATEUR THERMOELECTRIQUE POUR LA SURVEILLANCE DE STRUCTURE AERONAUTIQUE

Le deuxième cas concret d'un système de récupération d'énergie destiné à être installé à bord d'un avion sur lequel nous avons travaillé est un récupérateur thermoélectrique conçu pour alimenter un équipement de surveillance de structure (SHM). Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet Investissements d'Avenir CORALIE - *Etude de concepts systèmes et d'amélioration acoustique* - en collaboration avec AIRBUS GROUP. Cet équipement SHM est destiné à être installé dans une zone proche des moteurs de l'appareil où les conditions environnementales sont particulièrement difficiles et restreignent les choix de conception. Dans ce chapitre, nous voulons exposer le fait que bien que la récupération thermoélectrique soit une technique très bien documentée, sa mise en œuvre concrète dans un avion n'est pas triviale et se heurte à une somme de problèmes rarement abordés dans la littérature.

Nous débutons cette partie en présentant le principe physique de la thermoélectricité afin de mieux comprendre les modèles existants d'un module thermogénérateur, ce qui nous permettra de choisir un modèle pertinent pour notre application. Dans un deuxième temps, nous aborderons les différents dispositifs composant un générateur thermoélectrique complet : les technologies des modules, des dissipateurs et les spécificités des circuits électroniques de gestion de l'énergie. Enfin, la troisième partie est consacrée à nos travaux sur une alimentation thermoélectrique pour une application aéronautique en détaillant les contraintes particulières de cet environnement et les solutions que nous avons apportées pour réaliser un récupérateur viable.

3.1. PHYSIQUE DE LA THERMOELECTRICITE ET MODELES D'UN MODULE THERMOELECTRIQUE

La thermoélectricité est un phénomène thermodynamique complexe couplant un transport de chaleur avec un transport de charges électriques. Le phénomène a d'abord été décrit par des travaux menés au XIXème siècle qui permettent de comprendre le fonctionnement de cet effet et qui suffisent généralement à déduire des modèles utilisables pour l'électronicien. Cependant, la description théorique des phénomènes thermoélectriques n'a été pleinement décrite que dans le cadre de la thermodynamique linéaire hors équilibre par Lars Onsager (1931) et Herbert Callen (1947) [98]. Nous tenterons donc dans un second temps d'expliquer les phénomènes microscopiques mis en jeu dans un matériau thermoélectrique pour comprendre l'origine physique du facteur de mérite ZT qui implique le choix des matériaux actuellement utilisés.

3.1.1. EFFET THERMOELECTRIQUE

3.1.1.1. DESCRIPTION MACROSCOPIQUE

Trois scientifiques sont associés à la thermoélectricité, Thomas Johann Seebeck et Jean-Charles Peltier qui découvrirent deux facettes du même phénomène sans réussir à l'expliquer, et William Thomson (qui fut anobli en Lord Kelvin), compléta la compréhension et la théorie de trois effets indissociables qui se manifestent dans tous les dispositifs thermoélectriques.

- L'effet Seebeck (découvert en 1821, Figure 106(a)) décrit l'apparition d'une tension V entre deux jonctions de deux matériaux conducteurs différents a et b , soumis à une différence de température ΔT selon l'équation :

$$V = (\alpha_b - \alpha_a) \times \Delta T$$

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

Où $\Delta T = T_H - T_C$, est la différence de température entre T_H température de la jonction placée du côté chaud et T_C température de la jonction placée du côté froid. Le coefficient α est appelé coefficient Seebeck et dépend de la nature du matériau.

1. L'effet Peltier (découvert en 1834, Figure 106(b)) décrit l'apparition d'un flux de chaleur Φ_p d'une jonction à l'autre de deux matériaux conducteurs différents a et b, provoquée par la circulation d'un courant électrique I à travers ceux-ci, selon l'équation :

$$\Phi_p = (\Pi_a - \Pi_b) \times I$$

Où Π est le coefficient Peltier du matériau considéré.

2. L'effet Thomson (découvert en 1851, Figure 106(c)) décrit le flux de chaleur Φ_T provoqué par la circulation d'un courant électrique I dans un même matériau soumis à un gradient thermique ΔT selon l'équation :

$$\Phi_T = \beta \times I \times \Delta T$$

Où β est le coefficient Thomson et dépend de la nature du matériau utilisé.

Ces trois effets sont reliés par les deux équations suivantes, pour un matériau considéré, à une température T :

$$\Pi = \alpha \times T$$

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{\beta}{T}$$

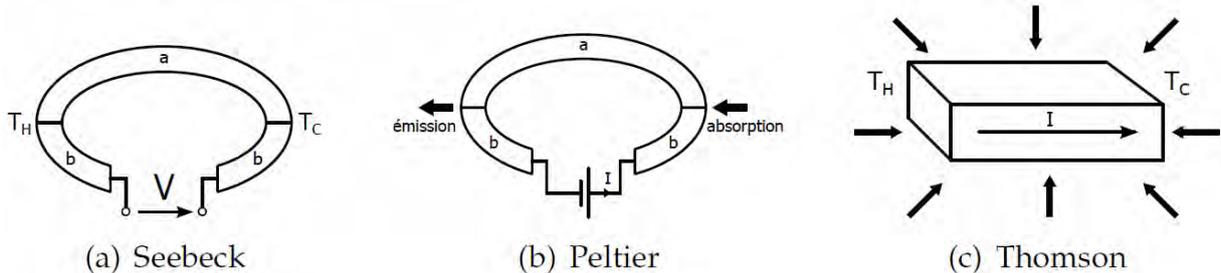


Figure 106. Illustration schématique des trois effets thermoélectriques.

3.1.1.2. COMPREHENSION AU NIVEAU MICROSCOPIQUE

On peut appréhender l'effet thermoélectrique d'un point de vue microscopique ([161]) en considérant que les porteurs de charge forment un gaz de porteurs libres. Lorsqu'un barreau d'un matériau en circuit ouvert est soumis à deux températures différentes sur chacune de ses extrémités, les porteurs de charge du côté chaud vont gagner de l'énergie par rapport aux porteurs de charge du côté froid et diffuser dans le matériau. On obtient un excès de porteurs du côté froid et un déficit du côté chaud. On aboutit ainsi à une différence de potentiel aux bornes du matériau, proportionnelle au gradient de température (plus il est élevé, plus le nombre de porteurs ayant diffusé est important) et à la caractéristique intrinsèque du matériau, le coefficient Seebeck α .

Si les porteurs de charge majoritairement présents sont négatifs, la tension qui apparaît aux bornes du barreau est contraire au sens du gradient thermique. Si les porteurs sont majoritairement positifs, la tension est dans le même sens que le gradient (Figure 107).

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

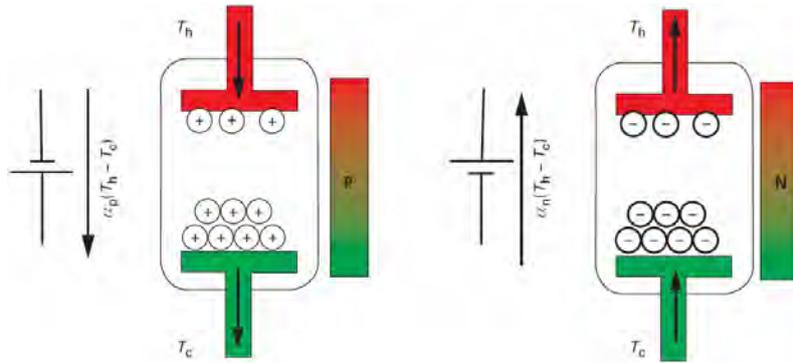


Figure 107. Illustration simplifiée de l'effet thermoélectrique au niveau microscopique en considérant un gaz d'électrons sous l'effet d'une différence de température [98].

Pour cette raison, lors de la fabrication d'un dispositif thermoélectrique, on va alterner des « plots » de semiconducteur dopés n et avec des « plots » de semiconducteur dopés p, reliés électriquement en série et thermiquement en parallèle pour que leur tension s'additionne. Le choix d'utiliser des semiconducteurs est également lié à d'autres raisons détaillées dans la partie 3.1.1.3.

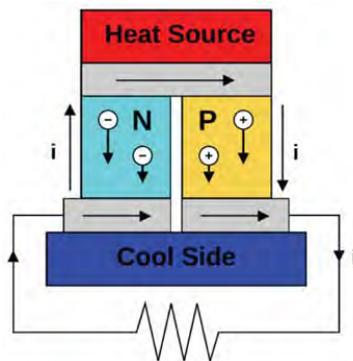


Figure 108. Illustration d'un dispositif thermogénérateur à deux plots, l'un dopé positivement, l'autre négativement, i est le courant électrique [98].

3.1.1.3. PERFORMANCE D'UN DISPOSITIF THERMOELECTRIQUE ET FACTEUR DE MERITE

Dans un solide soumis à un gradient de température, un flux de chaleur se crée grâce à deux phénomènes : par mouvement des porteurs de charge et par la vibration des atomes qui se propage de proche en proche (phonons). La conductivité thermique est donc variable, plus élevée si un courant électrique est présent qu'en son absence.

En considérant le thermogénérateur comme une machine thermodynamique, on obtient l'expression suivante [98] :

$$\frac{\lambda_E}{\lambda_J} = \frac{\alpha^2 \sigma_T}{\lambda_J} T + 1$$

Avec λ_J la conductivité thermique en circuit électrique ouvert (conductivité thermique du matériau sans courant le traversant), λ_E la conductivité thermique en court-circuit, α le coefficient Seebeck, σ_T la conductivité électrique à la température T considérée. Pour que le système soit performant, il faut que le rapport $\frac{\lambda_E}{\lambda_J}$ soit le plus

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

grand possible. En d'autres termes, la conduction de chaleur par phonons doit-être la plus faible possible (λ_j faible) puisqu'elle ne participe pas à la génération d'énergie électrique tout en faisant « perdre de l'énergie », c'est-à-dire en transférant « inutilement » de l'énergie du côté chaud au côté froid. Il faut que la conduction de chaleur dans le matériau se fasse le plus possible grâce aux mouvements des électrons (λ_e grand), c'est-à-dire au courant électrique.

On introduit donc le facteur de mérite Z défini comme :

$$Z = \frac{\alpha^2 \times \sigma_T}{\lambda_j} \times T$$

On peut également se rendre compte que Z reflète la performance d'un matériau thermoélectrique par l'expression du rendement thermoélectrique maximal (quand il y a adaptation d'impédance électrique) qui s'écrit :

$$\eta = \eta_{Carnot} \times \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_C}{T_H}}$$

Où η_{Carnot} est le rendement de Carnot, $\bar{T} = \frac{T_H + T_C}{2}$ est la température moyenne de T_C et T_H , respectivement, la température côté froid et côté chaud.

Ainsi, plus le facteur de mérite Z est élevé, plus le rendement η est élevé et s'approche du rendement maximal d'une machine thermique, le rendement de Carnot. Z s'exprime en K^{-1} et est souvent écrit $Z\bar{T}$, c'est-à-dire multiplié par la température moyenne, pour en faire un nombre adimensionnel et souligner le fait qu'il dépend fortement de la température (Figure 110).

Pour maximiser Z , il faut que le matériau soit un bon conducteur électrique (σ_T élevé) et un mauvais conducteur thermique (λ_j faible) avec un important coefficient Seebeck. Or, dans un matériau classique, ces trois propriétés sont liées comme montré Figure 109.

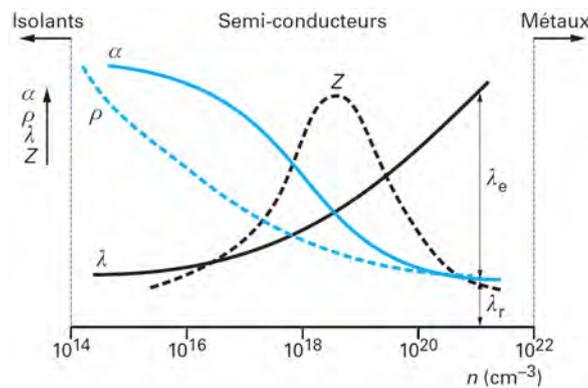


Figure 109. Evolution des paramètres Z (facteur de mérite), α (coefficient Seebeck), λ (conductivité thermique) et ρ (résistivité électrique) en fonction de la concentration des porteurs de charge [98].

Un isolant ne conduisant pas le courant électrique, il est évident qu'on ne peut pas utiliser ce type de matériau. Un métal a une conductivité thermique trop élevée et un coefficient de Seebeck trop faible. Le compromis est donc de s'orienter vers des semi-conducteurs. La Figure 110 présente les valeurs de facteur de mérite pour plusieurs matériaux.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

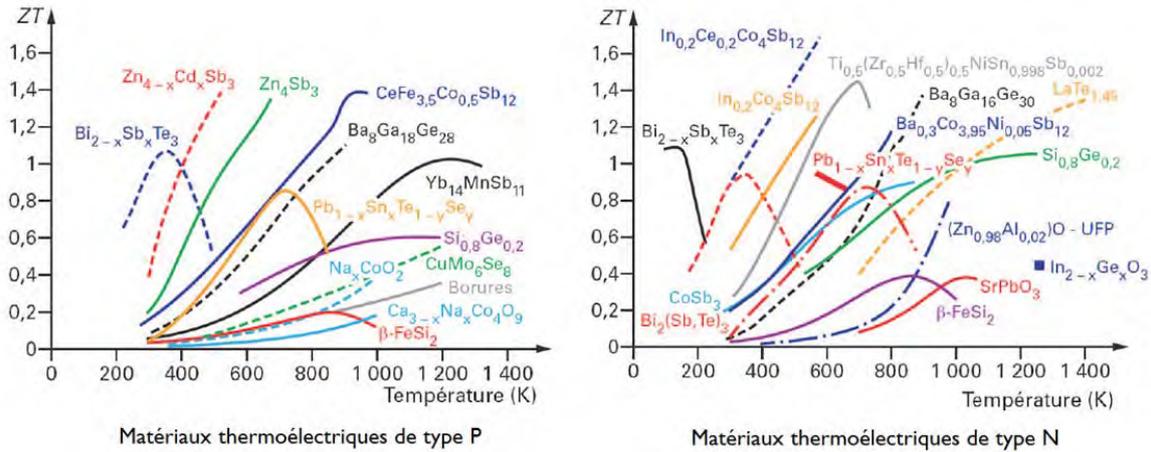


Figure 110. Courbe des valeurs de $Z\bar{T}$ pour différents matériaux semiconducteurs dopés P ou N [162]

3.1.2. MODELISATION D'UN MODULE THERMOGENERATEUR

La thermoélectricité est un phénomène complexe, non linéaire, fortement dépendant de la température et du courant traversant le matériau (puisque faisant varier la conductivité thermique) et pourtant, dans la majorité des applications, un modèle très simple de générateur de Thévenin est utilisé pour représenter le thermogénérateur (TEG). Dans cette partie, nous présentons d'abord ce modèle en expliquant ses caractéristiques, puis nous expliquons les limites de cette approche en s'appuyant sur la physique de la thermoélectricité.

3.1.2.1. MODELE SIMPLE

Modéliser un thermogénérateur par un générateur de Thévenin est exact lorsque le système a atteint un équilibre thermodynamique et que tous ses paramètres restent constants (températures et courant généré constants). Mais plus généralement, cette modélisation est vraie si l'on considère que les phénomènes électriques sont indépendants des phénomènes thermiques, notamment que la conductivité thermique ne dépend pas du courant généré et que la résistance électrique ne dépend pas de la température.

Dans ce cas, la résistance interne est constante et la tension générée ne dépend que du gradient ΔT (Figure 111).

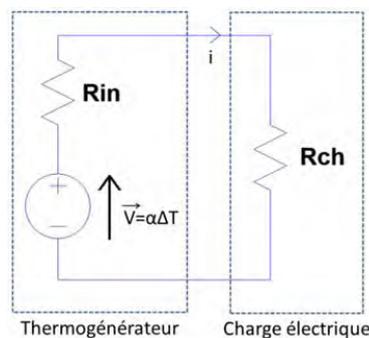


Figure 111. Modèle électrique simplifié d'un TEG

En considérant ce modèle, on peut facilement mesurer les caractéristiques $V(I)$ et $P(I)$ du module (Figure 112). On en déduit également la condition pour extraire le maximum d'énergie du dispositif qui est de réaliser une adaptation d'impédance, c'est-à-dire d'avoir une résistance de charge R_{ch} tel que $R_{ch} = R_{in}$, R_{in} étant la résistance interne du module.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

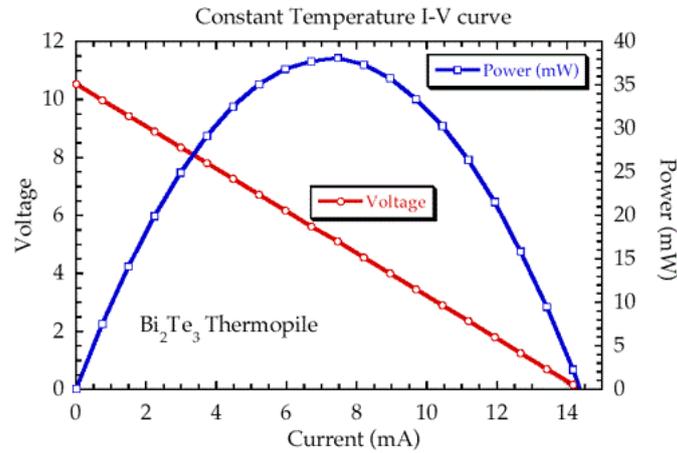


Figure 112. Caractéristique typique courant-tension et courant-puissance d'un thermogénérateur[98].

EVOLUTION DU GRADIENT DE TEMPERATURE

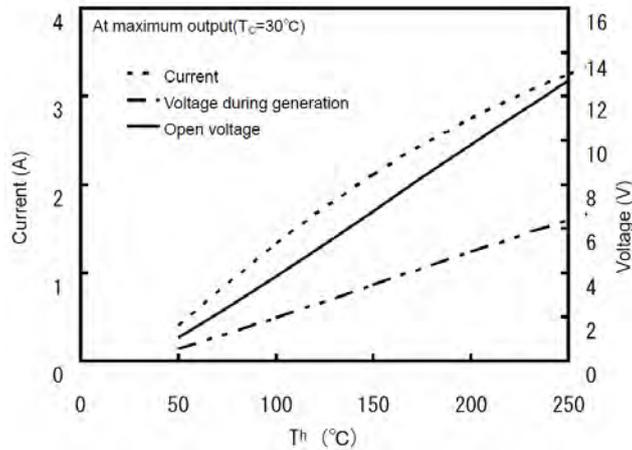


Figure 113. Evolution de la caractéristique d'un thermogénérateur en fonction du gradient thermique qui lui est appliqué. Extrait de la documentation du TEG de Komatsu utilisé partie 3.3 [105].

A partir de l'équation de l'effet Seebeck, il est évident qu'en augmentant le gradient de température aux bornes du TEG, sa tension de circuit ouvert augmente. En considérant le modèle de Thévenin et la résistance interne constante, le courant et la puissance générée par le TEG augmentent.

Dans le cas réel, la résistance interne augmente avec la température moyenne du thermogénérateur. Si une élévation du gradient thermique est provoquée par l'élévation de la température côté chaud, la température moyenne du TEG augmentera également, et on peut alors se demander quel sera le sens de l'évolution de la puissance générée.

Comme nous pouvons le voir Figure 113, la tension augmentera de manière plus importante que la résistance interne puisque l'on assiste également à une augmentation du courant et donc de la puissance générée. L'augmentation de la résistance interne est néanmoins visible par l'évolution non linéaire du courant.

3.1.2.2. LIMITES DU MODELE SIMPLIFIE

Cette approche classique de la modélisation d'un thermogénérateur repose sur certaines hypothèses qui peuvent être acceptées quand les conditions suivantes sont réunies :

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

1. on peut considérer la source et le puits de chaleur comme ayant une température constante et étant des réserves d'énergie très importantes par rapport au flux thermique traversant le thermogénérateur,
2. les résistances thermiques des interfaces avec le TEG sont considérées nulles (ou au moins négligeables par rapport à la résistance thermique du TEG),
3. la résistance électrique interne du TEG est considérée constante et indépendante des phénomènes thermiques.

Le premier point peut souvent être accepté si le dispositif de récupération d'énergie est de petite taille par rapport aux sources chaude et froide, notamment si le but est d'alimenter un petit système de capteurs. La condition n'est plus vraie si le système de récupération modifie les températures des sources de chaleur, ce qui peut se rencontrer plus facilement dans des applications de récupération d'énergie à grande échelle (gaz d'échappement automobile, etc.).

Le deuxième point peut être mesuré, ou au moins approximé. Dans le cas où le phénomène n'est pas négligeable, l'énergie maximale qui peut-être extraite dépend alors de la conductivité thermique du matériau et il est nécessaire de réaliser une adaptation d'impédance thermique en plus d'une adaptation d'impédance électrique. Dans ce cas, la condition d'extraction du maximum de puissance n'est plus simplement la condition d'adaptation d'impédance électrique, et ne peut donc plus être simplement décrite par la relation $R_{ch} = R_{in}$ [7][163].

Concernant le troisième point, en écrivant les équations d'évolution des paramètres thermiques et électriques interdépendants (la Figure 114 donne une représentation de l'interdépendance des paramètres du thermogénérateur), on ne peut pas aboutir à une solution analytique [98] et on ne peut qu'effectuer un calcul numérique itératif [164].

Pour décrire grossièrement le phénomène, considérons un module TEG subissant une variation de la résistance de charge qui y est connectée. Cet événement entraîne alors une variation du courant électrique généré par le module. Or, le courant électrique a une influence importante sur la résistance thermique du matériau. L'évolution de la résistance thermique va alors modifier la température du module et cette évolution de la température va faire varier la tension et la résistance électrique du module, ce qui va modifier le courant généré, etc.

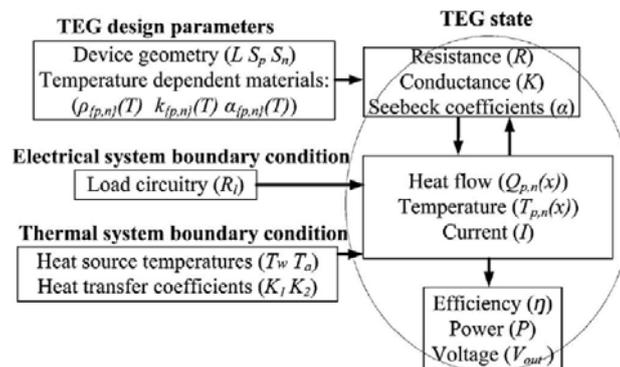


Figure 114. Illustration des paramètres modifiant le fonctionnement du thermogénérateur. On peut noter l'interdépendance de la résistance électrique et thermique, du coefficient Seebeck, du flux de chaleur, de la température et du courant [164].

Ce phénomène d'interdépendance des grandeurs en jeu est visible lors des variations rapides des paramètres du système, par exemple en faisant évoluer rapidement la résistance de charge connectée au TEG. Dans ce cas, le système met alors du temps à retrouver son équilibre thermodynamique (voir Figure 115).

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

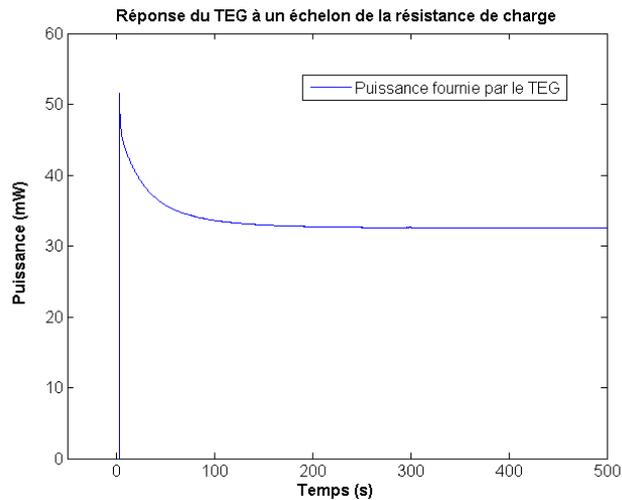


Figure 115. Réponse du thermogénérateur Komatsu, utilisé dans le reste de l'étude, à un échelon de la résistance de charge de $R_{ch}=0$ à $R_{ch}\approx R_{in}$, avec $T_C = 70^\circ\text{C}$, $T_H = 170^\circ\text{C}$. On peut considérer ici une stabilisation à partir de 250 secondes.

Ce cas de figure n'est pas courant lors de l'utilisation classique d'un thermogénérateur, mais il pourrait être rencontré par un algorithme de MPPT qui devrait mesurer la tension de circuit ouvert du thermogénérateur. Dans ce scénario, il faut déconnecter le thermogénérateur du reste du système, c'est-à-dire passer d'une résistance de charge de $R_{ch}\approx R_{in}$ à $R_{ch}=0$ [165]. On préférera alors certainement choisir un autre algorithme de MPPT.

En revanche, cela peut perturber la caractérisation d'un thermogénérateur quand on effectue un balayage de la caractéristique en faisant varier la résistance de charge : si celle-ci varie rapidement, il faut attendre que le TEG retrouve un équilibre avant de relever un point de mesure.

3.1.3. CONCLUSION SUR LA MODELISATION PAR GENERATEUR DE THEVENIN

Le modèle du générateur de Thévenin est simple, ce qui le rend pratique et facile à utiliser, mais limite son utilisation aux systèmes permettant certaines approximations déjà détaillées ou ne nécessitant pas d'être constamment au point optimal de fonctionnement.

En revanche, pour une application qui nécessite un rendement ou une puissance de sortie optimisés (qui sont deux conditions différentes de fonctionnement [163]), une modélisation plus détaillée et une prise en compte de phénomènes physiques plus complexes est indispensable.

3.2. CONVERTISSEURS THERMOELECTRIQUES

Nous allons nous intéresser maintenant à l'application technologique de la thermoélectricité pour la récupération d'énergie. Nous présenterons d'abord les différentes technologies des modules thermogénérateurs, puis nous nous intéresserons aux paramètres qui conditionnent le choix du dissipateur thermique. Enfin, nous présenterons les différentes solutions et approches pour réaliser l'électronique de gestion d'un thermogénérateur.

3.2.1. TECHNOLOGIES DES MODULES THERMOGENERATEURS

Le module thermogénérateur (TEG) est le transducteur qui va convertir une partie du flux de chaleur le traversant en énergie électrique. Il est donc composé de plusieurs éléments thermoélectriques qui sont connectés en série pour obtenir une tension suffisamment élevée quel que soit le gradient thermique et ainsi limiter les pertes lors du conditionnement (adaptation d'impédance, stockage, régulation). L'utilisation des premiers modules fabriqués, dits massifs, est ancienne et est apparue entre les deux guerres mondiales. Actuellement, les technologies de micro-fabrication permettent de fabriquer des thermogénérateurs de petites tailles par dépôts de couches minces ou couches épaisses. La recherche portant sur de futurs modules s'oriente vers l'impression de modules ou de nano-structuration de la matière afin de diminuer les coûts ou d'améliorer les performances de ces dispositifs. Cette partie présente brièvement l'état de l'art de ces différentes technologies.

3.2.1.1. MODULES TEG MASSIFS

Les modules massifs sont un assemblage de « plots » de quelques millimètres de matériau thermoélectrique, connectés en série par de fines connections métalliques et pris en sandwich entre deux plaques de céramique. C'est une technologie mature qui s'est développée durant le XX^{ème} siècle, et qui a été utilisée comme alimentation pour des radios à partir des années 30 avec des générateurs à gaz ([166]) et depuis les années 1970 est choisie comme alimentation pour des véhicules spatiaux avec des générateurs thermoélectriques à radioisotope (RTG) [167]. Les applications grand public actuelles sont plus rares et la grande majorité des modules commercialement disponibles sont réalisés grâce des alliages de tellure de bismuth (Bi_2Te_3) et peuvent supporter des températures élevées dépassant les 300°C.

Les modules ainsi constitués ont une résistance électrique faible (typiquement de quelques Ohms) mais également une résistance thermique faible. Ces caractéristiques physiques font qu'ils nécessitent un gradient de température relativement élevé et des sources chaudes et froides de forte capacité, mais ils peuvent fournir une forte puissance électrique en sortie (plusieurs dizaines de watts par module). Un module se présente sous la forme d'un carré de l'ordre de 1 à 5 cm de côté et d'une épaisseur de quelques millimètres, ce qui rend son utilisation difficile pour une application miniaturisée. En revanche, ce type de module a trouvé un regain d'intérêt dans la récupération de chaleur perdue dans l'automobile ou dans l'industrie et vise à améliorer le rendement énergétique de ces installations [64], [101].

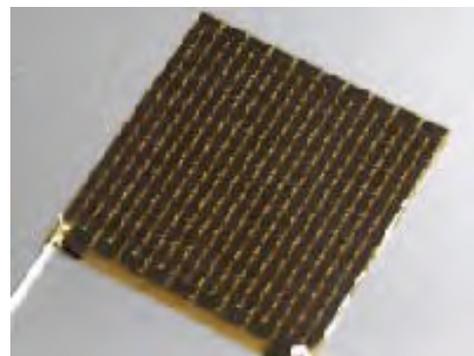
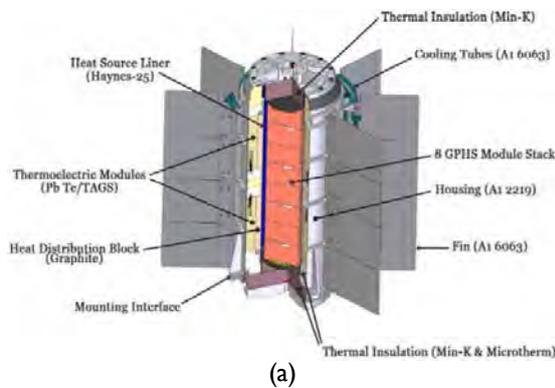


Figure 116. Exemple de thermogénérateurs. (a) RTG du rover de la mission d'exploration martienne Curiosity. Les TEG utilisés sont en PbTe/TAGS¹. Source : NASA. (b) Thermogénérateur de Komatsu où la plaque de céramique supérieure a été enlevée montrant ainsi l'alignement des plots thermoélectriques.

3.2.1.2. MODULES TEG COUCHES MINCES

Le développement des techniques de micro-fabrication a permis de réaliser des thermogénérateurs beaucoup plus petits que les modules massifs ([103], [168], [169]). Cette miniaturisation permet d'augmenter la densité de « plots » dans le thermogénérateur (d'une dizaine de paires de plots par centimètre carré à des milliers par centimètre carré [170][171]). L'avantage est une tension aux bornes du thermogénérateur bien plus élevée pour des gradients de température faibles, permettant d'exploiter des différences de température de l'ordre de quelques degrés. En revanche, la mise en série d'un grand nombre de plots augmente la résistance électrique du module (quelques centaines d'ohms [171]) et limite la puissance électrique générée (de l'ordre de la centaine de milliwatts). Ils ont également une température maximale plus faible que les modules massifs, de l'ordre de 200°C.

Pour ces raisons, ces modules sont adaptés pour être intégrés dans des systèmes compacts de faible dimension et de faible puissance électrique pouvant tirer parti d'endroits à faible gradient thermique.



Figure 117. Deux thermogénérateurs à couche mince. (a) est un thermogénérateur de la taille d'un pile bouton fabriqué par Thermo Life [172]. (b) est un thermogénérateur de Micropelt avec un dissipateur cylindrique en aluminium pour évacuer la chaleur du côté froid [104].

3.2.1.3. TECHNOLOGIES EN DEVELOPPEMENT

Un regain d'intérêt pour la génération thermoélectrique est apparu à la fin des années 1990, ce qui a mené à la recherche et au développement de nouvelles technologies de modules thermogénérateurs. Nous présentons dans la partie suivante des innovations pour l'instant au stade de recherche en laboratoire, mais prometteuses pour l'avenir de la thermogénération.

3.2.1.3.1. MODULES IMPRIMES

Comme dans d'autres domaines (par exemple dans le photovoltaïque), la fabrication par impression est explorée pour la thermogénération et permet d'obtenir des modules de formes différentes et variées pour mieux s'adapter à l'environnement d'installation. Par cette méthode, on peut fabriquer des modules à couches épaisses, des modules planaires ou des thermogénérateurs souples. De plus, la fabrication par impression a un coût très faible pour une production à grande échelle. La fabrication d'un module massif nécessite la découpe et l'assemblage des plots thermoélectriques dont la possibilité d'automatisation est limitée ([173], [174]) et le coût d'un procédé de micro-fabrication d'un thermogénérateur à couche mince reste élevé.

Les modules classiques, dits à couche épaisse, imprimés sur un substrat rigide sont très similaires dans leur fonctionnement aux modules à couche mince ou aux modules massifs. Cependant, l'épaisseur de l'élément

¹ Tellurure de plomb / solution solide de tellurures d'antimoine (Sb_2Te_3), de germanium ($GeTe$) et d'argent (Ag_2Te).

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

thermoélectrique est ici intermédiaire aux deux précédentes technologies, ce qui peut offrir une meilleure adaptation d'impédance thermique, selon le cas d'application envisagé (par exemple dans l'alimentation de dispositifs médicaux ([173]).

Les techniques d'impression permettent également d'obtenir des thermogénérateurs sur des substrats polymères souples. Cette possibilité est prometteuse pour l'intégration sur des textiles pour une récupération de la chaleur corporelle ([175], [176] voir Figure 118).

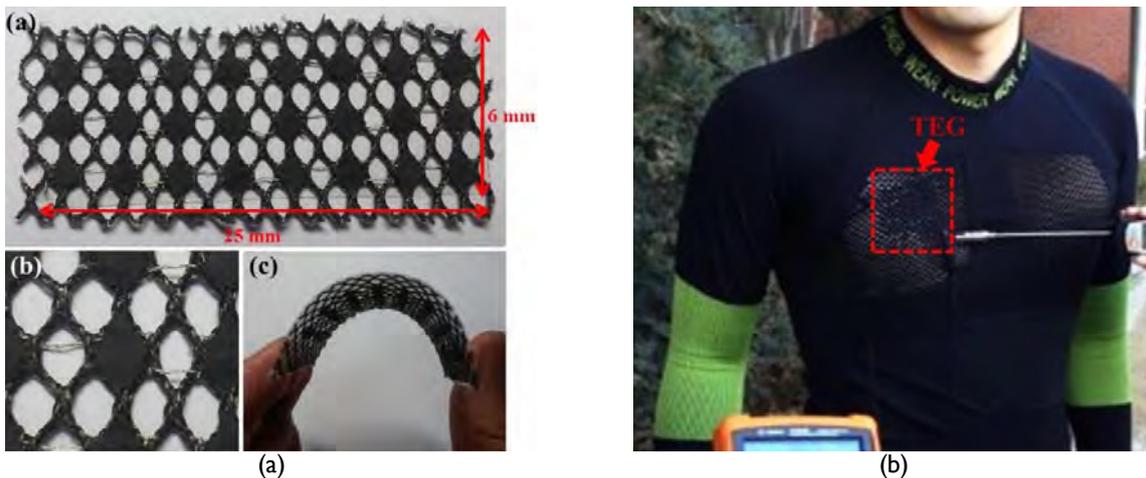


Figure 118. Exemple de thermogénérateur [176]. (a) Thermogénérateur souple. (b) Thermogénérateur intégré sur un vêtement.

Enfin, l'impression de thermogénérateur permet de fabriquer des modules très plats et d'exploiter un gradient thermique non plus vertical mais horizontal, ouvrant de nouvelles sources de chaleur exploitables grâce à de nouveaux facteurs de forme [177],[178] (voit Figure 119).

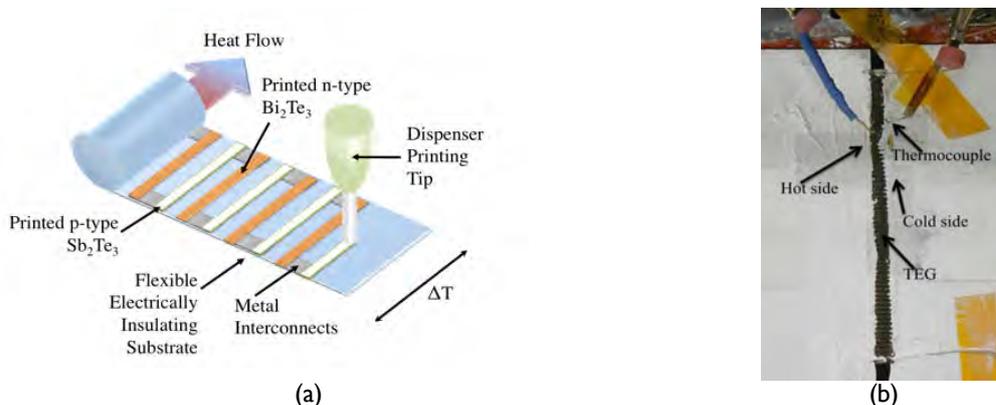


Figure 119. Illustration de thermogénérateurs planaires. (a) Schéma de principe d'un module planaire. (b) Dispositif expérimental de test d'un module planaire, la source chaude est à gauche, la source froide à droite[178].

Ce type de thermogénérateur est envisagé pour exploiter de petits gradients thermiques (quelques degrés) en réussissant à fournir une tension de l'ordre de 10mV et une puissance de quelques μW . On peut envisager leur utilisation dans des capteurs très basse consommation placés par exemple sur des textiles, ou pour de la surveillance sans fil.

3.2.1.3.2. NOUVEAUX MATERIAUX THERMOELECTRIQUES

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

Le développement des thermogénérateurs s'intéresse également à la recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques. La fabrication de polymères thermoélectriques a été envisagée durant les années 1990 ([179]) et est désormais une réalité. Ces polymères présentent deux principaux intérêts :

- Leur coût de fabrication pourrait être plus de 30 fois plus faible pour une même surface que pour un TEG classique massif ([180][181]). De plus, la fabrication d'un polymère n'implique principalement que du carbone, qui est abondant dans la nature, supprimant le problème de la rareté du matériau de fabrication.
- Un polymère est un très mauvais conducteur thermique ([182]), ce qui est une caractéristique recherchée dans les thermogénérateurs.

Leur mauvaise conductivité électrique et leur coefficient Seebeck assez faible limitent pour l'instant leur performance, le facteur de mérite le plus élevé rapporté est $ZT=0,48$ [179][183]. Cependant, leur performance a évolué très rapidement ces dernières années (passé de l'ordre de $ZT=10^{-6}$ à $ZT=0,48$ en 15 ans), cette technologie reste donc prometteuse.

Plus récemment, des recherches ont été menées sur le graphène nanostructuré. Le but est de contrôler la géométrie d'un ruban de graphène dopé ou non avec d'autres éléments (Figure 120) pour dissocier la conductivité thermique par les phonons de la conductivité électrique de ce matériau, et ainsi atteindre des ZT élevés [184]. En simulation, ce matériau permet d'atteindre des valeurs de ZT aux alentours de 1, jusqu'à $ZT=1,48$ ([185]) à température ambiante, et des valeurs jusqu'à $ZT=5$ sont annoncées à basse température ([186]). Si cette technique n'est pour l'instant qu'à l'état de simulation et d'essais de fabrication de premiers rubans, les principaux avantages devraient être un bas coût et des dispositifs extrêmement fins (la longueur se mesure en centaine d'atomes) qui pourraient être intégrés virtuellement à tous les endroits où un gradient thermique est présent.

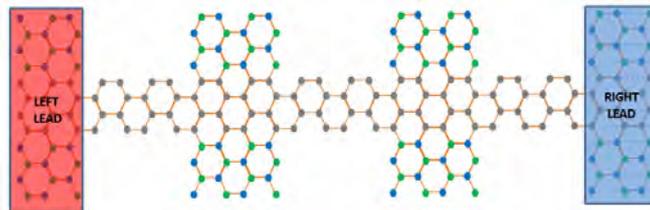


Figure 120. Schéma de la géométrie d'un ruban de graphène/nitride de bore nanostructuré.

3.2.2. DISSIPATEURS THERMIQUES

Un thermogénérateur fonctionne grâce à un flux de chaleur le traversant, provoqué par un gradient thermique appliqué sur ses deux faces. Il est très courant que la source chaude soit une surface solide et que la source froide soit l'air ambiant. Dans cette situation, on utilise un dissipateur thermique pour évacuer efficacement la chaleur du thermogénérateur vers l'air et favoriser le flux de chaleur.

Le dissipateur thermique est composé d'une plaque du côté de sa source chaude et d'ailettes du côté de l'air, afin de maximiser sa surface d'échange. Par définition, il doit être un très bon conducteur thermique, et est donc métallique. Il est caractérisé par :

- Le métal utilisé,
- Sa géométrie : la forme et le nombre d'ailettes.

Ces paramètres sont déterminés par le cas d'utilisation.

Métaux. Les deux métaux utilisés sont le cuivre et l'aluminium. La vaste majorité des dissipateurs est en aluminium à cause de son coût faible, de ses bonnes performances thermiques puisque c'est un métal ($\lambda_{Al} =$

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

237 W/m/K), et de sa légèreté, nécessaire pour certains cas d'utilisation. Néanmoins, on peut trouver des dissipateurs en cuivre pour obtenir des performances thermiques exceptionnelles ($\lambda_{Cu} = 401 \text{ W/m/K}$), à condition que le reste de l'assemblage permette d'en tirer parti (notamment une excellente conduction thermique aux contacts). Le cuivre peut aussi être employé dans les cas où l'usage d'aluminium est interdit (comme nous le verrons dans notre application).

Géométrie. Un dissipateur thermique évacue la chaleur principalement par convection, libre ou forcée. L'efficacité de la convection est déterminée par la géométrie et l'orientation du dissipateur. La géométrie des ailettes du dissipateur a un impact sur la taille de la surface d'échange et sur l'écoulement de l'air lors de la convection. Il existe une large variété d'ailettes en fonction de leur forme, leur épaisseur, leur orientation, leur hauteur, etc. (Figure 121), chaque configuration étant adaptée à un cas d'utilisation [187]. Un grand nombre d'ailettes, ou des ailettes plates de surface importante maximisent la surface d'échange mais peuvent gêner le flux dans des conditions non adaptées. Les ailettes cylindriques, plus polyvalentes, sont utilisées en convection libre ou dans des conditions de convection inconnues.



Figure 121. Dissipateurs thermiques de différentes géométries.

Rayonnement. Enfin, un dissipateur thermique évacue également une petite partie de la chaleur par rayonnement (loi du rayonnement d'un corps noir ([188], [189]) selon la loi : $M = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4$, où M est l'énergie émise (W.m^{-2}), σ la constante de Stefan-Boltzmann, ϵ l'émissivité de la surface du dissipateur et T la température du dissipateur. L'évacuation de chaleur dépend donc du type de matériau à la surface du dissipateur (l'aluminium oxydé a une émissivité comprise entre 0,2 et 0,55, le cuivre oxydé entre 0,65 et 0,88) et surtout de la température du dissipateur. Ainsi, si à température ambiante, ce phénomène peut être facilement négligé, on doit en tenir compte à haute température.

3.2.3. CONVERTISSEURS DC/DC POUR THERMOGENERATEURS

Comme nous l'avons présenté dans la partie 1.4, nous avons besoin d'un circuit électronique qui fasse l'interface entre le thermogénérateur et l'élément de stockage. Dans le cas de la thermogénération, nous en avons besoin pour deux raisons :

- La tension aux bornes d'un thermogénérateur peut-être très faible (quelques dizaines de millivolts) surtout en présence de petits gradients. On a donc besoin d'élever cette tension jusqu'à un niveau utilisable.
- Il faut réaliser une adaptation d'impédance pour maximiser la puissance récupérée. Pour rappel, la Figure 122 montre l'évolution de la puissance générée par un thermogénérateur en fonction de sa résistance interne et de la résistance de charge connectée au module.

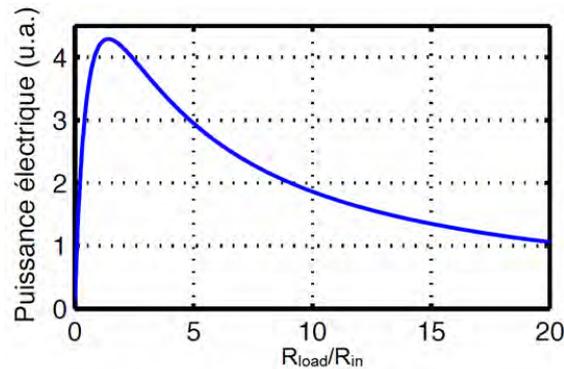


Figure 122. Puissance fournie par un thermogénérateur en fonction du rapport entre la résistance de charge R_{load} et de la résistance interne R_{in} [7].

Ces deux fonctions sont en général assurées par un convertisseur DC/DC à découpage et élévateur de tension. Cependant, pour que celui-ci fonctionne, il faut d'abord charger une réserve d'énergie pour que les éléments de commutation actifs puissent fonctionner. Ainsi, si la tension peut atteindre des valeurs extrêmement faibles une fois le convertisseur en fonctionnement (jusqu'à 10mV [190][191]), son démarrage requiert une tension minimale qui est fournie par un circuit « cold start », les meilleurs circuits actuels pouvant démarrer à partir de 20mV lorsqu'il sont associés à un petit transformateur en entrée [192], et 220mV sans transformateur [190].

Une approche originale pour contourner ce problème de « cold start » a été proposée dans le cadre d'une application de thermogénération sur vêtements où le mouvement de la personne fait commuter un interrupteur mécanique pour commencer à faire fonctionner le convertisseur DC/DC sans qu'un oscillateur soit présent. Les chercheurs rapportent un démarrage à partir de 35mV [193]. Une approche similaire a été proposée au LAAS pour une application aéronautique. Elle consistait à coupler un transducteur piézoélectrique à un thermogénérateur associé à un matériau à changement de phase pour récupérer les gradients thermiques temporaires générés lors des phases de décollage et d'atterrissage d'un avion [110]. Le circuit intégré de gestion de l'énergie spécifiquement conçu permet un auto-démarrage plus rapide et de récupérer jusqu'à 32% d'énergie supplémentaires par rapport au cas où le thermogénérateur est utilisé seul. Sur ces gradients temporaires, une énergie totale de 10J peut ainsi être récupérée sur un vol typique de 1h.

Nécessité d'un système de suivi du point de puissance maximum (MPPT).

Si une adaptation d'impédance est nécessaire pour avoir un système de récupération d'énergie thermoélectrique performant, un système de MPPT avec une adaptation d'impédance variable n'est nécessaire que si les deux conditions suivantes sont réunies :

- Le gradient thermique varie au cours du temps, faisant donc varier la caractéristique du TEG
- On veut maximiser l'énergie récupérée à tout instant.

Dans le cas où l'on décide d'utiliser un système de MPPT, le choix de l'algorithme doit être réalisé avec précaution. Il est nécessaire de prendre en compte la dynamique du thermogénérateur (partie 3.1.2.2) et certaines méthodes, comme une MPPT par fraction de V_{OC} [194] peuvent mener à une diminution du temps d'utilisation du système [165]. D'autres méthodes consistant à mesurer seulement le courant [195] ou la température du module [165] ont été proposées. De manière générale, si le système fonctionne avec un gradient variant peu, il faut regarder le bénéfice qu'apporterait un système de MPPT par rapport à son coût énergétique.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

Si une MPPT n'est pas nécessaire, on peut alors réaliser une adaptation d'impédance à une tension fixe, optimisée pour une seule valeur de gradient. En choisissant d'optimiser ce point de fonctionnement pour le gradient le plus faible que l'on est amené à rencontrer, on garantit une puissance récupérée minimum. Lorsque que le gradient augmente, la tension de fonctionnement est inférieure à la tension optimale, mais la puissance récupérée est toujours supérieure à la puissance au plus bas gradient (Figure 146 et partie 3.1.2). Cette méthode est proposée par plusieurs circuits intégrés commerciaux comme le MAX17710 de Maxim [196], ou le LTC3105 de Linear Technology [197].

Un dernier point sur la spécificité de l'électronique de gestion d'un thermogénérateur est la gestion de la polarité. Dans certains cas, le gradient thermique aux bornes du thermogénérateur peut s'inverser comme dans les systèmes de récupération utilisant un PCM (Phase Change Module) où l'on exploite la chaleur latente du changement de phase d'un matériau pour créer un gradient sur une longue période de temps [106][107]. Ce n'est pas un problème pour le thermogénérateur lui-même et la tension à ses bornes s'inversera. Du côté de l'électronique il faut alors utiliser un redresseur [198], d'autres préfèrent utiliser deux convertisseurs pour éviter les pertes énergétiques associées [199].

3.3. CAS D'APPLICATION : LE SYSTEME HMEC POUR L'ALIMENTATION DE CAPTEURS DE SHM DANS LE PROJET CORALIE

Le travail que nous présentons ici a été financé par le plan « investissement d'avenir » dans le cadre du CORAC (Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile) à travers le projet Coralie. Il porte sur la faisabilité d'un système de SHM (Structural Health Monitoring, surveillance par des capteurs de l'état d'une structure) autonome en énergie, situé dans l'environnement d'un réacteur d'un A380.

Nous rapportons dans cette partie l'étude et le développement d'un récupérateur d'énergie en mettant en évidence les contraintes que cet environnement impose pour la réalisation d'un tel système tant au niveau de l'agressivité de l'environnement que des normes à respecter pour son installation.

3.3.1. PRESENTATION DU CONTEXTE DE L'ETUDE

La zone moteur d'un avion comporte des pièces critiques telles que la nacelle où est installé le moteur, le mât qui relie la nacelle à l'aile et les carénages qui assurent la protection des pièces citées (voir Figure 123). Ces pièces sont soumises à des conditions extrêmes : vibrations de la structure, vibrations acoustiques, cyclages thermiques entre phases de vol / phases au sol etc., et il est donc nécessaire de vérifier régulièrement leur état.

Le projet propose d'installer un système de SHM composé de capteurs dans la nacelle et dans le carénage arrière du mât (APF, *Aft Pylon Fairing*) afin de mesurer en continu les paramètres de « santé » de ces pièces. Ces capteurs sont reliés par des fils à un concentrateur, appelé HMSS (*Health Monitoring Smart Sensor*) qui récupère les données et les transmet ensuite vers la cabine. Le concentrateur est alimenté par le système que nous avons développé, appelé HMEC (*Health Monitoring Energy Converter*) et par une alimentation de secours branchée sur le réseau avion.

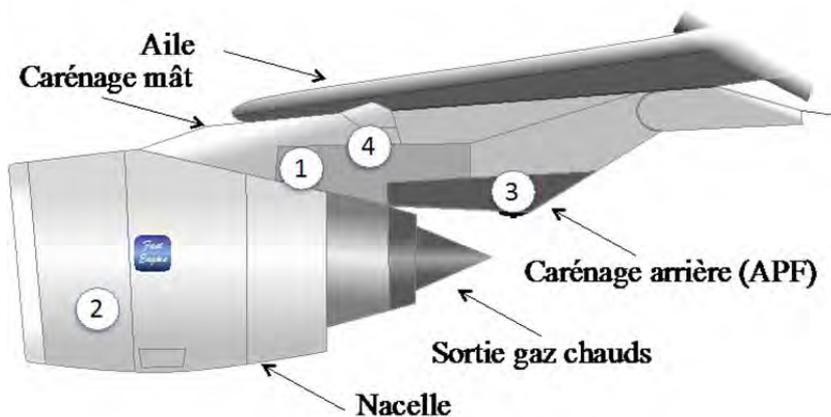


Figure 123 - Environnement immédiat du réacteur d'un avion de ligne. 1 : position du récupérateur, 2-3 : positions des capteurs, 4 : position de l'électronique de gestion de l'énergie et de gestion des capteurs.

Deux sources d'énergie sont présentes dans cette partie de l'appareil : les vibrations et les gradients thermiques. Les vibrations générées par le moteur sont de basse fréquence, inférieures à 100Hz, et sur une large bande. Malgré les efforts actuels pour réaliser des récupérateurs piézoélectriques ou magnétiques à bande large et à basse fréquence, la puissance récupérée par ceux-ci est de l'ordre de la centaine de μW ou du mW ([72],[71]).

Nous avons donc choisi d'utiliser un générateur thermoélectrique puisque les gradients thermiques sont présents dès la mise en marche des moteurs. Des capteurs étant installés à l'intérieur de l'APF, cet endroit a été considéré pour l'installation d'un thermogénérateur mais les gradients et les pics de températures peuvent être très

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

élevés (500°C) : une des fonctions d'un APF est justement de protéger les parties hautes du mât, ainsi que l'aile, des remontées d'air chaud du réacteur. Ces niveaux nous ont paru trop élevés, compliquant l'estimation des gradients par une influence non négligeable des échanges par rayonnement, et nous avons abandonné cette localisation.

Nous avons choisi d'installer le TEG plus loin des capteurs, dans la partie avant du mât (voir Figure I24, les gradients de température de cette zone sont montrés plus loin, Figure I25). Si cette zone est exposée à des conditions plus clémentes que l'intérieur de l'APF, l'environnement reste agressif et conditionne les choix de conception de tout le système de récupération d'énergie.

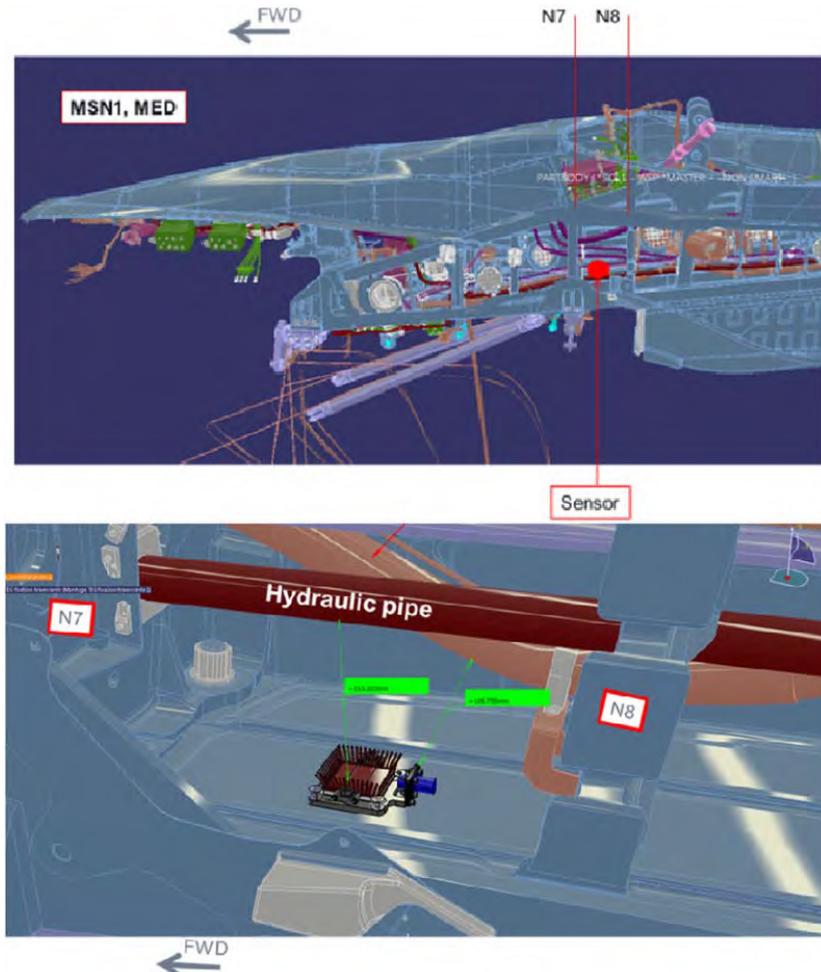


Figure I24. Vue du lieu d'implantation du récupérateur TEG dans le mât réacteur. En haut : vue générale du mât. En bas : vue rapprochée du lieu d'installation du système.

Concernant le circuit électronique de gestion du TEG, il est disposé dans une troisième zone du mât avec le concentrateur de données HMSS. A cet endroit, la température ne dépasse pas 85°C et permet l'utilisation de composants sur étagère en version durcie.

Nous pouvons noter ici que le réseau de capteurs déployé est localement câblé sur des distances de plusieurs mètres. Ceci est dû au fait que les composants de ce système ne peuvent pas être installés au même endroit : les capteurs sont, par définition, au contact des zones les plus agressives, zones incompatibles avec l'électronique de gestion des données (ici à cause de la température). Le récupérateur doit se situer dans une zone

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

présentant un flux d'énergie à exploiter (un gradient thermique dans notre application), ce qui ne correspond pas forcément au lieu d'installation du capteur ou de l'électronique. En bref, si un réseau de capteurs est installé dans un environnement sévère comme celui que nous présentons, les nœuds communiquant sans fil ne seront pas les capteurs même, mais l'ensemble d'un système câblé capteur/récupérateur/concentrateur de données.

Enfin, le système qui sera conçu et réalisé doit être au maximum en conformité avec la norme DO-160G « Environmental Conditions and test Procedures for Airborne Equipment » qui définit un ensemble d'exigences et de tests à respecter pour pouvoir être installé dans un appareil. Ces exigences vont imposer un certain nombre de choix de conception dont il faudra s'accommoder.

Nous présentons nos travaux portant sur ce cas d'étude qui ont abouti à la conception d'un système global d'alimentation thermoélectrique. Nous exposons d'abord les conditions qui règnent à l'endroit d'installation du système et les choix de conception que ces contraintes imposent. Nous détaillons ensuite la conception du récupérateur TEG puis du circuit électronique de gestion de l'énergie. Nous concluons sur les tests fonctionnels menés pour valider le système dans des conditions reproduisant au mieux celles d'un vol réel.

3.3.1.1. CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES : TEMPERATURE

L'évolution de la température de la paroi sur laquelle sera fixé le thermogénérateur, et qui sera sa source chaude, est montrée Figure 125. Les températures sont données pour deux cas de figure, un cas de référence appelé le « Standard Day », et un cas pire où la température atteint le maximum possible, appelé le « Maximum Hot Day ». Dans ce deuxième cas de figure, la température de la paroi peut atteindre 280°C.

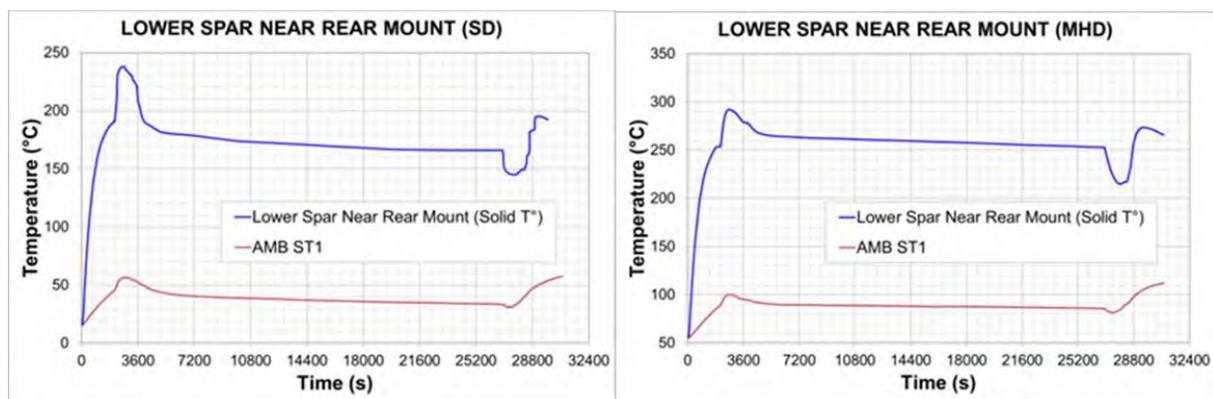


Figure 125. En bleu : évolution de la température de la paroi sur laquelle sera installée le TEG, en rouge : température de l'air ambiant à l'endroit d'installation, au cours d'un vol de 8h. A gauche : lors de conditions standards. A droite : lors des maximums de température (« Maximum Hot Day »).

Sur ces profils, on peut observer 2 pics et 1 creux de température :

- Juste avant le décollage, les moteurs chauffent, mais l'avion n'étant pas en mouvement, il n'y a pas encore de flux d'air pour refroidir la structure. Pendant la phase de décollage et de prise d'altitude, les moteurs fonctionnent à forte puissance pour faire prendre de l'altitude à l'aéronef et l'air environnant n'est pas encore très froid. Cela correspond au premier pic de température.
- En prenant de l'altitude, la température de l'air extérieur chute et refroidit le mât à une température qui sera très stable pendant tout le vol. Lors de la descente, les moteurs fonctionnent à faible puissance, l'air extérieur est froid, la température diminue.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

- Une fois au sol, l'avion est à l'arrêt ou en taxi (il roule sur le tarmac de l'aéroport). Sans flux d'air sur la structure, la chaleur des moteurs (résiduelle s'ils sont à l'arrêt, produite si l'avion est en taxi) réchauffe le mât.

Si la température de la paroi sur laquelle sera installé le thermogénérateur est connue avec une bonne précision (via des mesures fournies par Airbus), la température de l'air avec lequel il va échanger est seulement connue grâce à une simulation et comporte une importante incertitude, annoncée de l'ordre de +/- 50°C. Cette erreur a été prise en compte dans le dimensionnement du système pour s'assurer de produire assez d'énergie dans le pire cas.

3.3.1.2. CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES : VIBRATIONS, RISQUE Foudre, RISQUE INCENDIE

3.3.1.2.1. VIBRATIONS

Les zones de l'appareil autour du moteur sont soumises, pour des raisons évidentes, à de très hauts niveaux de vibrations sonores et mécaniques (vibrations transmises via la structure). Ces vibrations peuvent endommager les pièces utilisées, à plus ou moins long terme. La norme aéronautique DO-160G indique des spécifications de tests que doit subir un élément sans être endommagé avant d'être installé dans ces zones (voir les tests effectués partie 3.3.2.5).

3.3.1.2.2. RISQUE Foudre

Les essais en vol pendant lesquels le système sera installé incluent des études d'impacts de foudre sur l'appareil. Du point de vue de notre système, l'effet d'un impact de foudre est la génération d'une impulsion ElectroMagnétique (IEM) dans la zone d'installation du récupérateur et de la carte électronique. Il doit résister à cet événement et ne pas présenter de danger pour l'appareil, le risque étant la création d'arcs électriques, un phénomène extrêmement dangereux dans cette partie de l'avion où des vapeurs inflammables issues du moteur peuvent être présentes.

3.3.1.2.3. RISQUE INCENDIE

La conception doit également prendre en compte l'éventualité d'un incendie du moteur. Dans ce cas, la température peut atteindre 1100°C et le système ne doit présenter aucun risque pour la sécurité de l'appareil. La prise en compte de cet événement a notamment des conséquences sur le choix des matériaux : par exemple, avec une température de fusion de 660°C, l'utilisation d'aluminium est proscrite.

3.3.1.3. SPECIFICATIONS ET CONSOMMATION DE LA CHARGE A ALIMENTER

Le récupérateur doit alimenter le HMSS, un datalogger qui gère et enregistre des signaux issus de capteurs de surveillance de l'état de la structure de l'APF. Deux types de capteurs sont installés :

- Un capteur « coupe-fil » qui est une bande adhésive conductrice servant à détecter des microfissures dans la structure de la pièce à instrumenter. Si la pièce se fissure sous le capteur, celui-ci se coupe et la continuité électrique n'est plus assurée, permettant de détecter le problème.
- Des thermocouples pour vérifier le bon fonctionnement d'une peinture thermosensible appelée « thermocoat ». Cette peinture change de teinte irréversiblement lorsque la température dépasse un certain niveau et permet ainsi de détecter visuellement des dépassements de valeur a posteriori, sans avoir à installer de capteurs électroniques.

A la fin du vol, le HMSS enverra les données enregistrées à un concentrateur de données. Cet appareil fournira l'alimentation au HMSS lorsque le gradient de température n'est pas encore présent (avant le décollage) et

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

servira d'alimentation de secours en cas de disfonctionnement du HMEC durant le vol. Le concentrateur communiquera également les différentes phases de vol au HMSS.

Enfin, le HMSS a accès au niveau de tension aux bornes des supercondensateurs de stockage pour pouvoir évaluer l'énergie disponible et prévoir les tâches à effectuer en fonction de leur consommation. Cette information lui permet également de passer sur l'alimentation de secours en cas de niveau trop bas d'énergie dans le stockage.

L'architecture de ce système est présentée sur la Figure I26.

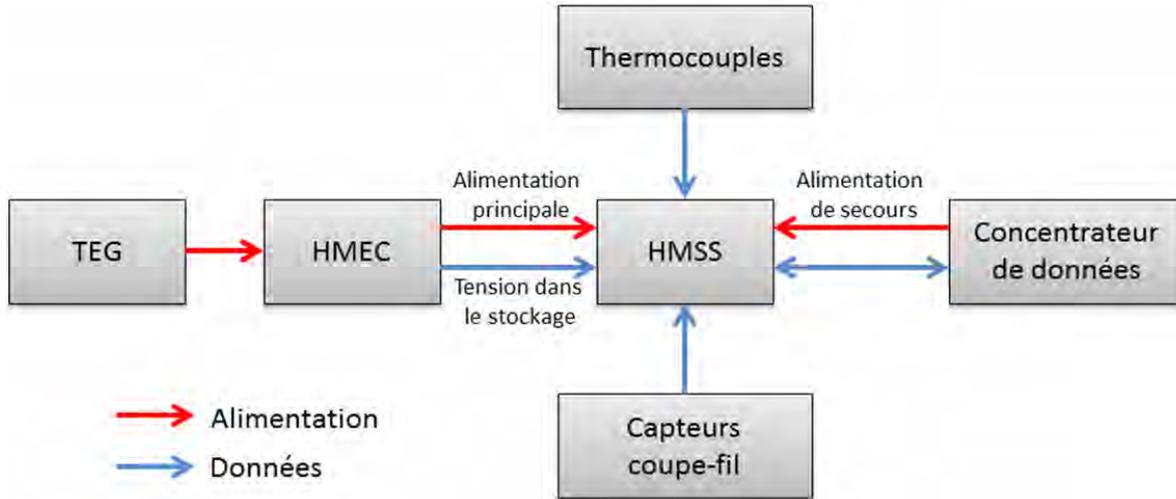


Figure I26. Architecture de fonctionnement du HMSS et des sous-systèmes associés.

Ce système de mesure est réalisé par Airbus Group Innovations qui fournit une estimation de la consommation typique des différentes tâches que le HMSS aura à effectuer.

	Séquence pour le HMSS connecté au HMEC	Temps	Consommation sous 5V
1	Initialisation du HMSS	2 s	21mA
2	Auto-test du HMSS	10 s	67mA
3	HMSS prêt et en attente (mode veille)	-	270µA
4	Synchronisation avec le concentrateur : identification du HMSS et envoi d'un message au concentrateur sur l'état du HMSS.	3 s	67mA
5	Le HMSS reçoit le signal de synchronisation du concentrateur	2 s	67mA
6	Le HMSS passe en mode veille mais peut être réveillé par la réception de données provenant du concentrateur	-	270µA
7	Quand le HMSS est alimenté par le HMEC, mesure de l'état de charge du HMEC toutes les 10 secondes.	-	3mA
8	Le concentrateur envoie l'information sur la phase de vol en cas de changement.	2 s	67mA
8.1	- En vol : mesure continue du capteur coupe-fil (spire extérieure) et détection temps réel en cas de coupure. Stockage du résultat en mémoire lors de la détection de coupure (résultat, piste coupée, datation).	-	270µA
8.2	- En vol : quelques mesures de températures	5 s	20mA
8.3	- En vol : en cas de détection de coupure, le suivi passe à la "spire extérieure suivante".		25mA
8.4	- Retour au sol : mesure du décollement du capteur coupe-fil.	20 s	25mA

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

	Stockage en mémoire (non volatile) si problème détecté.		
9	Le HMSS envoie les données mémorisées au concentrateur de données.	30 s	62mA

Tableau 1: Estimation fournie par Airbus de la consommation du HMSS en fonction de ses tâches.

Aucune information de répétition des tâches ne nous a été transmise (par exemple, les mesures de température (8.2) ou de détection de coupure (8.3) seront certainement répétées à intervalles réguliers pendant le vol).

Nous avons conçu un scénario d'une durée de 15 minutes devant refléter un pire cas de besoin en énergie. Dans cette optique, l'étape 7 a été considérée comme une consommation en continu de 3mA de la part du HMSS et non une consommation ponctuelle de 3mA durant X secondes, répétée toutes les 10 secondes. Ce scénario a été utilisé pour concevoir notre récupérateur :

- 1. Initialisation
- 2. Auto-test
- 3. Veille pendant 1 minute
- 4+5. Synchronisation
- 6. Veille pendant 2 minutes
- 7. Mesure de l'état de charge du HMEC pendant 10 minutes
- 8.4. Mesure de décollement. On prend ce type de mesure plutôt que les autres de l'étape 8 puisque c'est la plus énergivore et que l'on veut tester un pire cas.
- 9. Envoi des données.

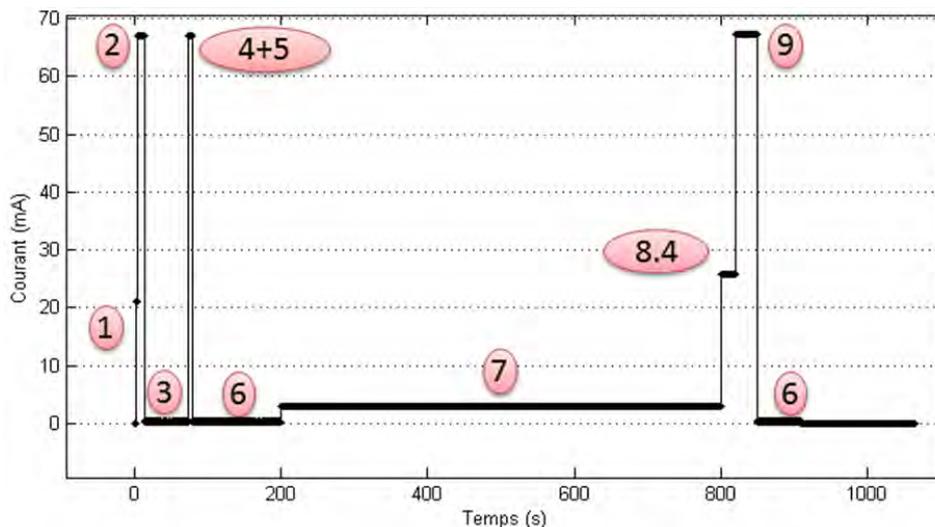


Figure 127. Profil de référence de la consommation de la charge (HMSS) à alimenter sous une tension de 5V.

L'étape 4+5 demande plus de puissance que les étapes 8.1 ou 8.2, on considère donc que si le système passe l'étape 4+5, il pourra passer les étapes 8.1 et 8.2.

Les deux données critiques de ce scénario sont donc d'avoir assez d'énergie stockée pour passer les séquences de démarrage, et de produire assez d'énergie pour assurer l'étape 7 en continu. Il faut donc que le système soit capable de produire plus de 15mW en continu.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

3.3.2. CONCEPTION DE L'ENSEMBLE MECANIQUE DU TEG.

Pour résister aux contraintes exposées dans la partie précédente, le système doit :

- Être robuste pour résister à la température et aux vibrations.
- Ne présenter aucun danger pour le reste de l'appareil lors du fonctionnement normal ou accidentel (par exemple, aucune pièce ne doit se retrouver libre notamment dans l'éventualité d'un incendie moteur).
- Être assez puissant pour alimenter le système de SHM.

Nous devons donc sélectionner un thermogénérateur résistant à 280°C et pouvant produire assez d'énergie (assez bon rendement ou taille suffisante). Nous devons également fabriquer un ensemble mécanique pour la fixation du TEG à l'appareil et la protection du TEG à l'environnement.

3.3.2.1. CHOIX DU TEG

Le premier critère de sélection du TEG est la température maximale opérationnelle. Nous avons fait une étude sur les produits commercialement disponibles en fonction de leur température maximale de fonctionnement (Figure 128).

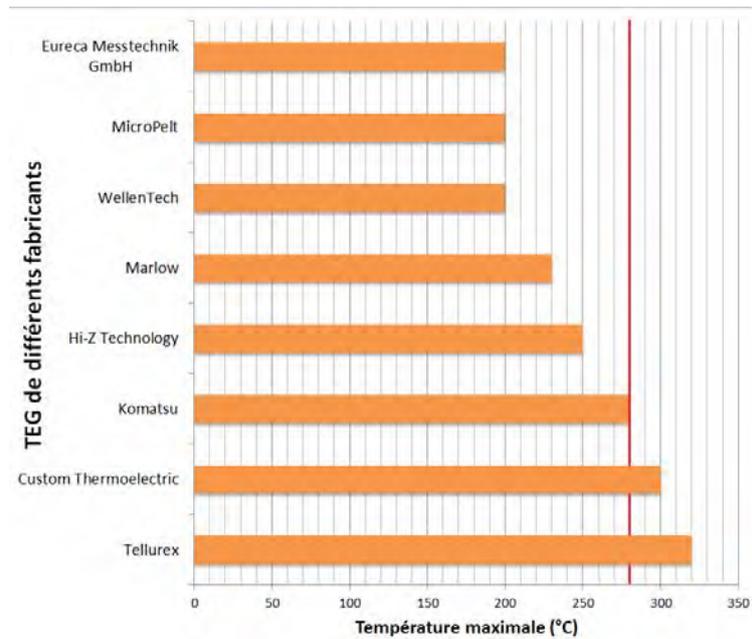


Figure 128. Comparaison des modules TEG disponibles dans le commerce en fonction de leur température maximale

Comme une grande incertitude règne sur la température de l'air ambiant (côté froid du TEG), nous avons préféré surdimensionner le TEG afin d'être certain de produire assez d'énergie, l'encombrement n'étant pas une contrainte critique. Les thermogénérateurs des trois fabricants proposant des produits correspondant à nos besoins sont équivalents en termes de performances. Nous avons choisi le thermogénérateur de Komatsu pour une facilité d'approvisionnement, notre équipe ayant déjà un contact dans cette entreprise, il est visible Figure 129.

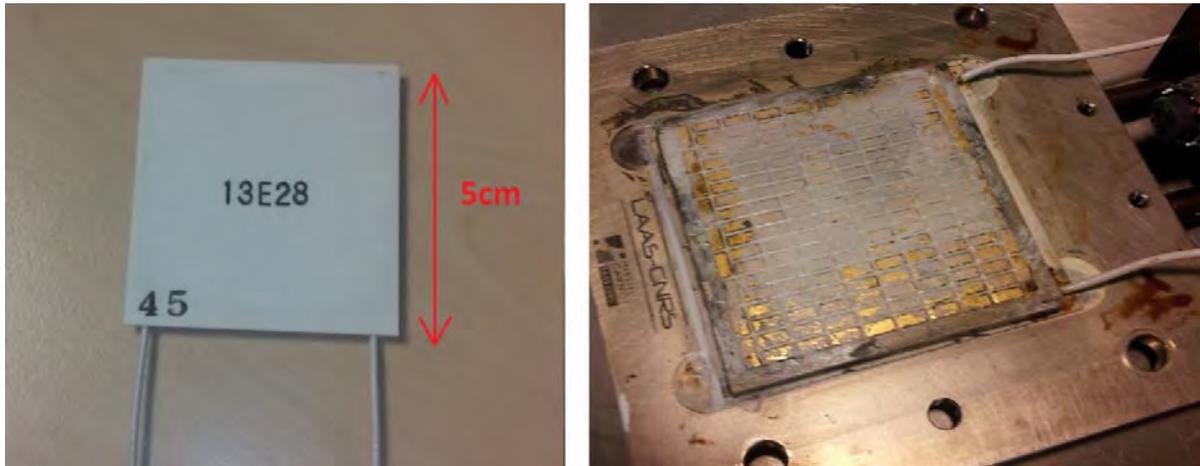


Figure 129. Thermogénérateur de Komatsu. A droite, la plaque de céramique du dessus du thermogénérateur a été enlevée pour observer les plots de semi-conducteurs constituant le TEG.

3.3.2.2. CARACTERISATION THERMIQUE DU THERMOGENERATEUR CHOISI

La conception du système, mécanique et électronique, dépend des caractéristiques du TEG choisi. Les données fournies par le fabricant étant succinctes, nous avons réalisé nos propres mesures de caractérisation. Dans un premier temps, nous avons mesuré la résistance thermique du thermogénérateur. Avec ce paramètre, nous pouvons concevoir le support mécanique en effectuant des simulations sous Comsol Multiphysics pour estimer le gradient thermique aux bornes du TEG et donc valider la conception mécanique.

Pour des raisons de faisabilité de la mesure, seule la résistance thermique en conduction et en circuit électrique ouvert a été mesurée, et non la résistance thermique équivalente lorsque le TEG est traversé par un courant. La résistance thermique du TEG a été mesurée en collaboration avec la société Neotim en utilisant le montage décrit Figure 130.

La caractérisation électrique du TEG a été mesurée quand le support mécanique était fini. Nous avons préféré mesurer les performances de l'ensemble plutôt que du TEG seul pour avoir des valeurs représentatives du cas d'utilisation.

MESURE DE LA RESISTANCE THERMIQUE DU THERMOGENERATEUR

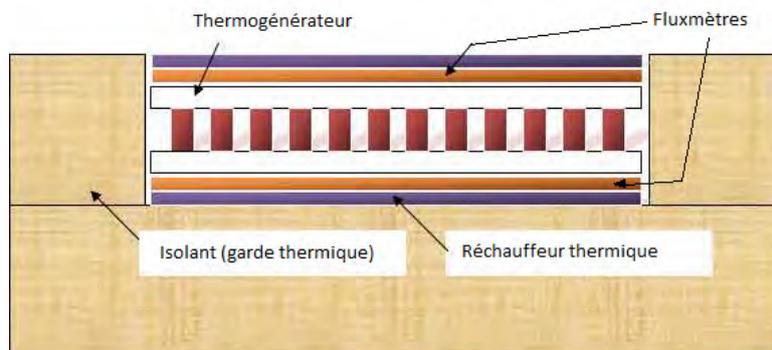


Figure 130. Banc de mesure de la résistance thermique du thermogénérateur.

Une résistance chauffante de la taille du TEG (5cm*5cm) est placée sous le thermogénérateur. Pour canaliser le flux de chaleur, on dispose de l'isolant thermique sous la résistance et autour du thermogénérateur.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

Deux fluxmètres sont placés de part et d'autre du TEG pour mesurer la conduction de chaleur et en déduire ainsi la résistance thermique. Malheureusement, la température maximale atteignable par le banc d'essai est de 100°C, les résultats au-delà de cette limite seront extrapolés pour obtenir une estimation du résultat. Les mesures sont montrées Figure 131.

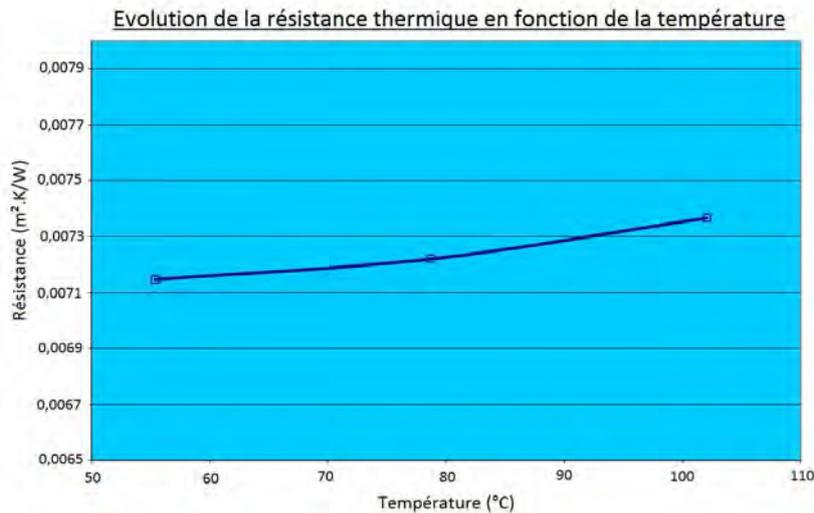


Figure 131. Résultat de la mesure effectuée par la société Neotim. La résistance thermique varie peu en fonction de la température.

Sur une gamme de températures de 50°C, la résistance thermique du TEG varie d'environ 3%. En faisant une extrapolation linéaire, pour la température la plus élevée possible dans notre cas, c'est-à-dire 280°C, la variation serait de l'ordre de 10%.

Nous considérons malgré tout la résistance thermique du TEG comme constante pour nos simulations puisque la plus grosse erreur de mesure de cette résistance vient du fait qu'elle a été réalisée seulement en circuit ouvert et non chargée électriquement. De plus, comme nous le verrons, réaliser la simulation numérique de notre système nécessitera d'effectuer d'autres approximations, notamment pour modéliser la convection au niveau du dissipateur thermique.

Nous savons donc que cette valeur est fautive mais elle reste la meilleure estimation que nous avons les moyens de mesurer et ne sera pas la plus grande source d'incertitude de notre simulation.

Maintenant que nous avons une estimation de la valeur de résistance thermique, nous allons pouvoir concevoir le montage mécanique, puis le simuler pour vérifier qu'un gradient suffisant se crée aux bornes du TEG.

3.3.2.3. CONCEPTION DE L'ASSEMBLAGE MECANIQUE DE SUPPORT

La conception du support pour le thermogénérateur répond à plusieurs besoins :

- Servir d'interface avec la paroi du mât et assurer une protection du module thermogénérateur qui est un objet fragile. Le support doit apporter une robustesse au TEG vis-à-vis de l'environnement (lors de l'installation dans le mât réacteur, contre les vibrations, chocs, etc.).
- Mettre en pression le support, le TEG et le radiateur pour assurer un contact thermique maximal entre les différents composants.
- Fiabiliser la connexion électrique avec le câble reliant le TEG à la carte électronique en procurant un support pour le connecteur avionique.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

- Maintenir une liaison équipotentielle entre les parties conductrices du montage et le reste de l'appareil.

3.3.2.3.1. CONCEPTION MECANIQUE

Le support est composé de différentes parties visibles sur la Figure 132, répondant toutes à une fonction précise :

- Une platine en acier inoxydable assure le contact avec la paroi chaude de l'APF et le côté chaud du TEG. Cette platine est fixée sur la paroi chaude par un système vis/écrou en acier inoxydable.
- Un radiateur en cuivre pur est disposé du côté froid du TEG pour l'échange de chaleur avec l'air ambiant. Le cuivre a été choisi parce que l'aluminium est interdit dans la zone d'installation du récupérateur (voir 3.3.1.2.3 Risque incendie). Il pourra aussi apporter des performances supérieures.
- Des brides en titane maintiennent ensemble et en pression le montage. Ces brides sont fixées à la platine par des vis en acier. Le titane a été choisi pour pouvoir utiliser des brides de faible diamètre et conserver une certaine souplesse dans le but d'obtenir un certain amortissement des vibrations. Pour empêcher les ponts thermiques entre la platine et le radiateur, à travers les vis, le contact est isolé thermiquement par des inserts en Duratron D7000 PI, un polymère haute température (transition vitreuse : 355°C, peut supporter 450°C pour une courte durée). Les brides sont recourbées à leurs extrémités pour que l'ensemble reste solidaire dans l'éventualité d'un feu moteur, lorsque les rondelles de polymère auront fondues (cette éventualité est discutée plus en détail dans la partie 3.3.2.3.3).
- Un fil dénudé (non représenté) relie électriquement le radiateur au support pour que l'ensemble soit toujours au même potentiel. Sans cette connexion équipotentielle, le radiateur pourrait accumuler des charges (notamment en cas d'impact de foudre) et provoquer des arcs électriques. La formation d'arc serait de plus facilitée par la forme du radiateur (effet de pointe).
- Un connecteur haute température Souriau EN2997-SE00803AN (température maximale : 260°C) permet la connexion électrique entre le récupérateur et la carte électronique. Le connecteur est fixé sur la platine par un support en Duratron pour fournir une isolation thermique et permettre au connecteur de rester à une température inférieure à 260°C, même lors du pic à 280°C.
- De la pâte thermique est appliquée aux interfaces entre la paroi de l'APF et la platine, la platine et le TEG et entre le TEG et le radiateur pour optimiser la conduction de chaleur entre ces éléments.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

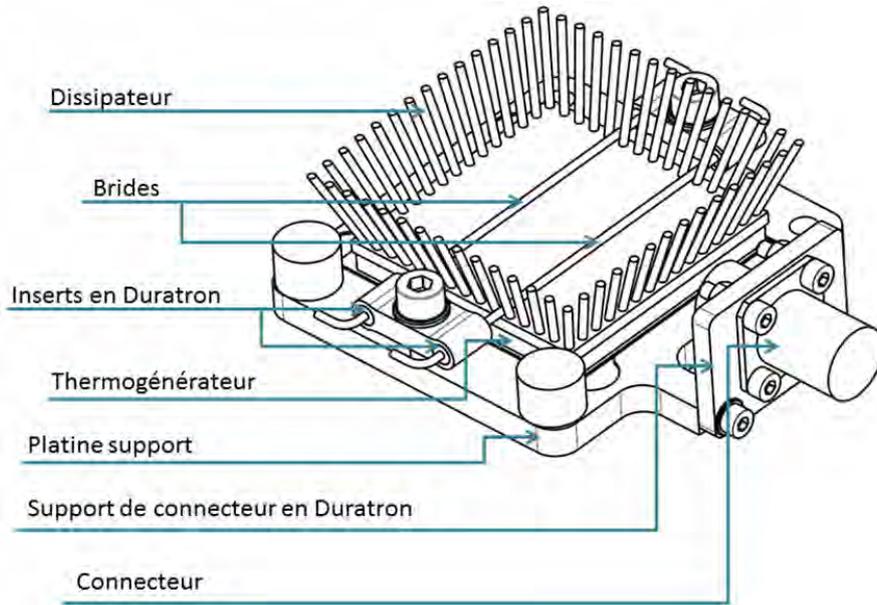


Figure I32. Schéma du récupérateur thermoélectrique. Seule une partie des ailettes du dissipateur est représentée.

Cette conception vise à avoir un récupérateur robuste et fonctionnel malgré les conditions extrêmes régnant dans le mât. Un effort a également été apporté pour garder une masse totale relativement faible afin de montrer la possibilité et l'intérêt de la récupération d'énergie dans l'aéronautique. Le montage a une masse finale de 497g.

3.3.2.3.2. MODELISATION DU SUPPORT SOUS COMSOL MULTIPHYSICS

Le montage a été simulé sous Comsol pour estimer le gradient thermique et ainsi valider la conception (Figure I23).

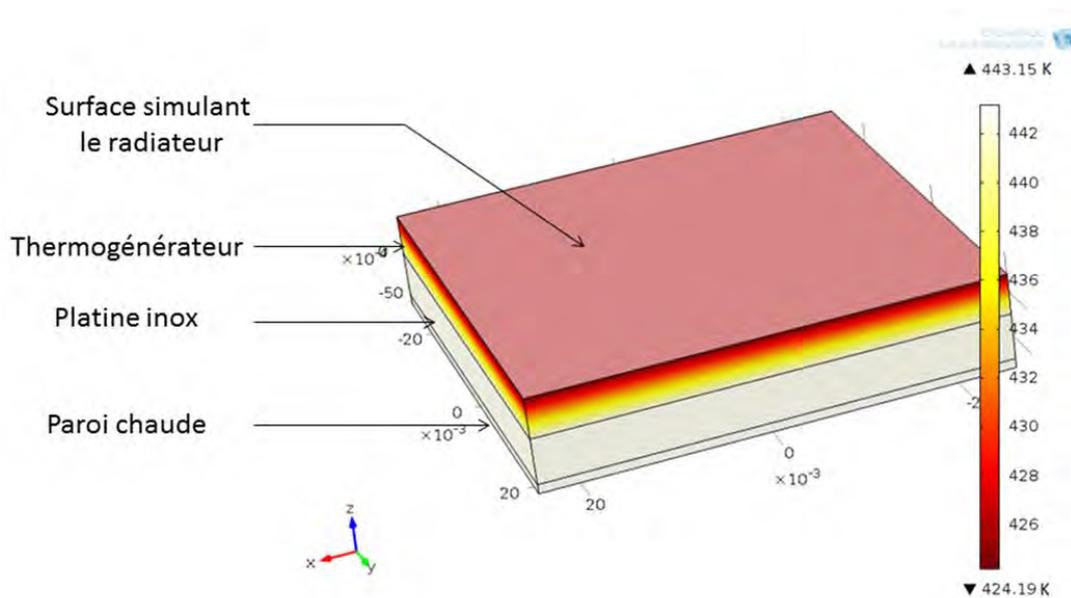


Figure I33. Résultat d'une simulation sous Comsol avec $h_{\text{conv}}=25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

La simulation recrée l'empilement des différents composants du récupérateur et simule la conduction de chaleur à travers le montage. Le radiateur est modélisé par une résistance thermique au contact du TEG, puis par de la convection libre. Cette convection est déterminée par le flux de chaleur φ évacuée par le radiateur et dépend du coefficient h_{conv} de convection à la surface S du radiateur et des températures T_{∞} de l'air et T_S du radiateur selon la loi suivante ([200]) :

$$\varphi = h_{conv} \times S \times (T_S - T_{\infty})$$

Ce coefficient h_{conv} dépend de plusieurs paramètres :

1. Géométrie et matériau du radiateur,
2. Pression de l'air environnant,
3. Convection forcée (flux d'air sur le radiateur) ou convection naturelle,
4. Vibrations modifiant la convection ou les échanges thermiques avec l'air, etc.

Les effets des paramètres listés aux points 2, 3 et 4 sont complexes à modéliser et nécessiteraient une étude poussée à eux seuls ([200]). Malgré ces incertitudes, pour obtenir un ordre de grandeur du gradient aux bornes du TEG, nous avons fait varier le coefficient de convection h_{conv} . Les valeurs couramment annoncées ([201],[202]) pour de la convection naturelle dans l'air à pression ambiante sont entre 5 et 35 W/(m².K).

Nous avons effectué notre simulation (voir Figure 134) pour des valeurs comprises entre 5 W/(m².K) (valeur conduisant à un gradient de température déjà insuffisant) et 100 W/(m².K) (un flux d'air sur le dissipateur et des vibrations provoqueraient une convection plus élevée qu'une simple convection libre).

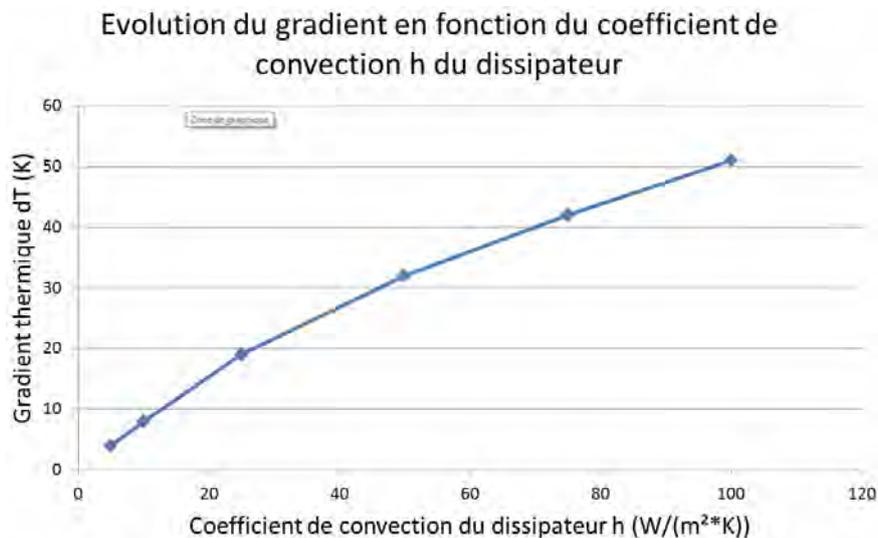


Figure 134. Résultats des simulations thermiques effectuées sous Comsol pour estimer le gradient se formant aux bornes du thermogénérateur avec une température de paroi $T_H = 170^{\circ}\text{C}$ et $T_C = 70^{\circ}\text{C}$.

D'après cette simulation, le gradient qui s'établit dans ces conditions est compris entre 4°C et 51°C. Pour rappel, on doit générer un peu plus de 15mW pour faire fonctionner le système (Figure 127). La simulation présentant énormément d'incertitudes pour évaluer l'énergie que l'on pourra récupérer (résistance thermique, coefficient de convection, etc.), elle ne nous permet pas de conclure et nous avons décidé de fabriquer le prototype pour pouvoir mesurer ses caractéristiques sur un banc d'essai.

Cependant, ce type de simulation thermique nous permettra d'anticiper le comportement du système dans l'éventualité d'un incendie moteur comme nous le verrons dans la partie suivante.

3.3.2.3.3. PRISE EN COMPTE DE L'EVENTUALITE D'UN INCENDIE MOTEUR

La conception du récupérateur doit être pensée pour que celui-ci ne présente pas de danger pour l'avion dans l'éventualité d'un incendie moteur. La norme prévoit que la paroi sur laquelle est installée la platine du module TEG puisse atteindre une température de 1100°C pendant 30 min. L'objet de la simulation est de démontrer que dans ces conditions l'assemblage ne se désolidarise pas en pièces métalliques se dispersant de manière incontrôlée dans le mât. Compte-tenu de l'architecture mécanique et des points de fusion des différents matériaux, le scénario simulé est le suivant, au fur et à mesure que la température augmente :

- 1ère étape jusqu'à environ 500°C de température moyenne au centre du montage :
 - Les soudures internes au TEG, et les polymères (Duratron) ou semi-cristaux (téflon des gaines électriques) fondent
 - A ce stade le câble "haute température" (venant du circuit électronique HMEC) fourni par Airbus se désolidarise du module, l'embase restant fixée au câble avec les fils nus qui sont sertis. Les parties métalliques du module restent solidaires, même après fusion des inserts. Le TEG lui-même reste obligatoirement en sandwich entre la platine et le dissipateur, malgré le jeu introduit par la disparition des inserts, grâce au dimensionnement mécanique de l'ensemble et au fait que les brides en titane sont courbées à leurs extrémités.
- 2e étape, au-dessus de 500°C :
 - Les plots thermoélectriques du TEG fondent (la température de solidification du tellure de bismuth est de 573°C), et ne subsistent alors que les plaques d'alumine
 - Ces plaques d'alumine restent mécaniquement prises en sandwich entre la platine et l'échangeur grâce à des butées usinées sur la platine
 - Les pièces métalliques du module restent solidaires, le radiateur en cuivre n'est alors plus isolé que par les deux plaques extérieures du TEG en céramique (Al_2O_3). Le cuivre pur fond à 1084,62°C. Par simulation, en prenant en compte le transfert de chaleur par radiation et l'isolation apportée par les fines plaques de céramique, la température du radiateur atteint au maximum 1055°C et reste sous son point de fusion pour différentes valeurs de h_{Rad} et pour différentes valeurs de température de l'air ambiant (simulé jusqu'à 500°C, aucune valeur n'a pu nous être communiquée pour ce cas de figure).

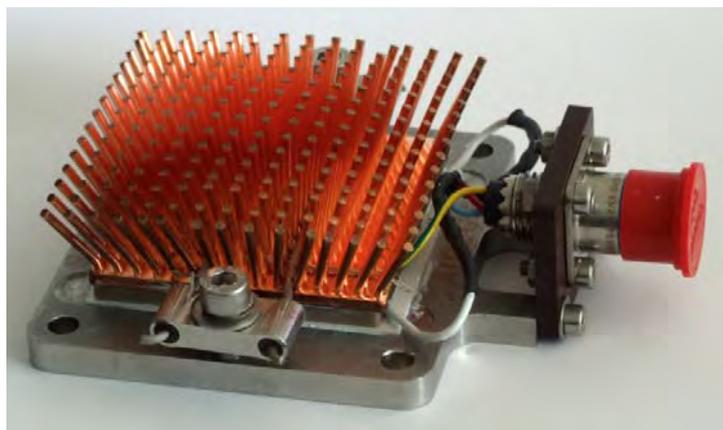


Figure 135. Assemblage finalisé du TEG

3.3.2.4. CARACTERISATION DU TEG DANS SON ASSEMBLAGE.

Maintenant que nous avons réalisé l'assemblage mécanique du TEG, nous pouvons effectuer sa caractérisation électrique pour mesurer les paramètres qui seront essentiels à la conception du circuit de gestion HMEC. Dans notre cas d'utilisation, les températures sont considérées stables, c'est-à-dire évoluant lentement par rapport à la dynamique du système. Pour modéliser le TEG, on va donc utiliser un simple modèle de générateur de Thévenin (voir Partie 3.1.2). Pour cela, on va mesurer :

- La tension de circuit ouvert V_{OC} et la tension au point de puissance maximale V_{MPP} .
- La résistance électrique équivalente interne R_{in} pour concevoir le circuit qui effectuera une adaptation d'indépendance et se placera au point de puissance maximale (MPP, Maximal Power Point).
- La puissance maximale que l'on peut récupérer dans les conditions définies.

Cette caractérisation du TEG a d'abord été faite avec la société Neotim à Albi, puis reproduite au LAAS, avec différentes versions de l'assemblage, conduisant aux mêmes résultats quelles que soient les versions utilisées.

3.3.2.4.1. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE MESURE

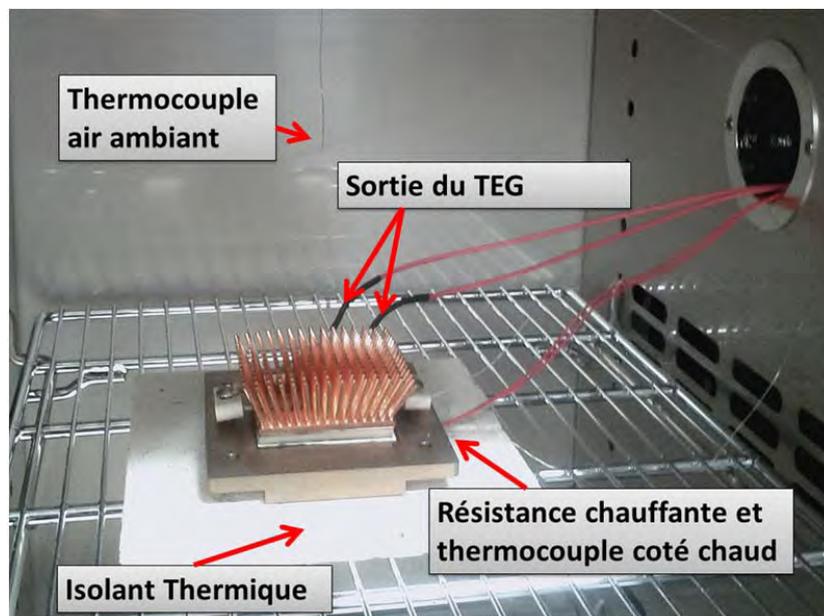


Figure I36. Système instrumenté dans l'étuve.

Une résistance chauffante de 5cm*5cm est positionnée sous le support pour le porter à la température voulue. Cet ensemble est placé dans une étuve pour contrôler la température de l'air. L'étuve impose la température sans qu'il y ait de circulation d'air forcée, garantissant une convection naturelle et non une convection forcée (simulant ainsi un pire cas).

L'ensemble est équipé de différents thermocouples type K pour la mesure des températures.

On utilise un Agilent N6705 comme charge électrique à courant constant et on mesure la tension du TEG (Figure I37). La mesure s'effectue après 250 secondes pour obtenir une mesure de la caractéristique considérée stabilisée (voir partie 3.1.2.2), la mesure de la puissance au cours du temps est présentée Figure I38.

3.3.2.4.2. RESULTAT DE LA MESURE ET CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU MONTAGE

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

La mesure de la caractéristique s'effectue dans le pire cas (plus faible gradient de la situation réelle), la température de l'air est maintenue à 70°C et la température du support à 170°C.

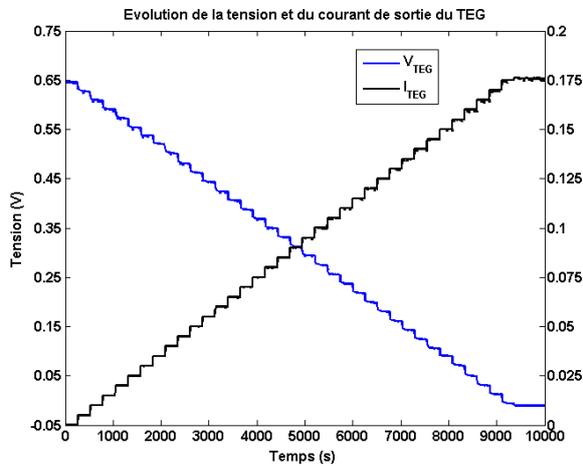


Figure 137. Chronogramme de la tension pendant le balayage en courant de la caractéristique du TEG

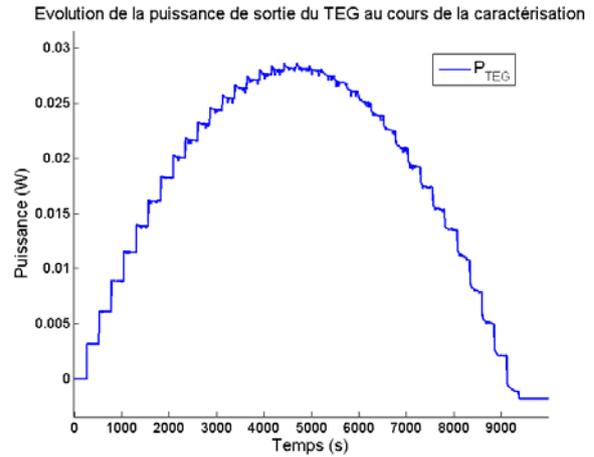


Figure 138. Chronogramme de la puissance pendant le balayage en courant de la caractéristique du TEG.

A partir de ces mesures, on peut construire la caractéristique électrique du TEG (Figure 139) et trouver son équation par une approximation au 2nd ordre, au sens des moindres carrés.

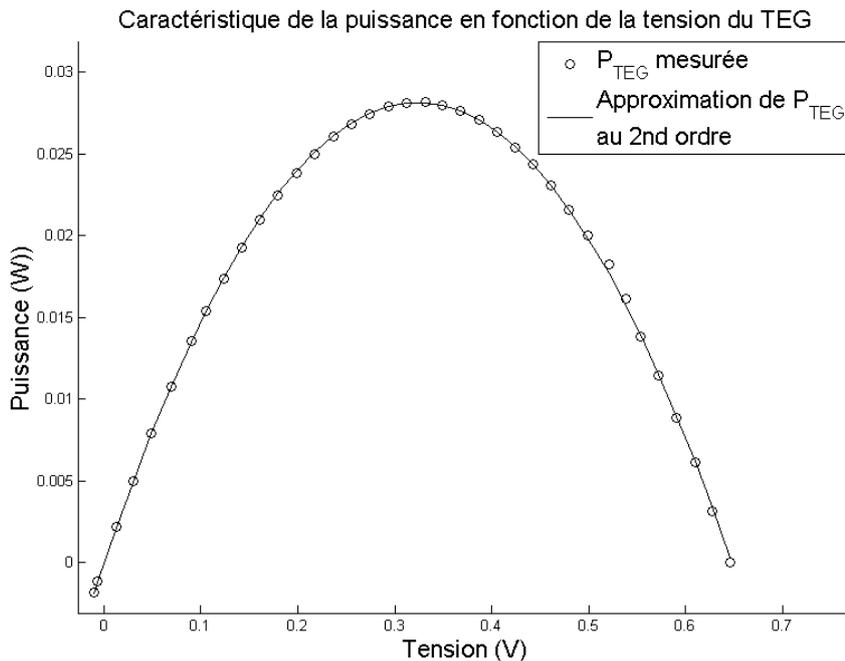


Figure 139. Caractéristique $P_{TEG}=f(V)$ du TEG en régime stabilisé

En modélisant le TEG par un générateur de Thévenin (voir Figure 140), on va retrouver l'équation de la caractéristique mesurée.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

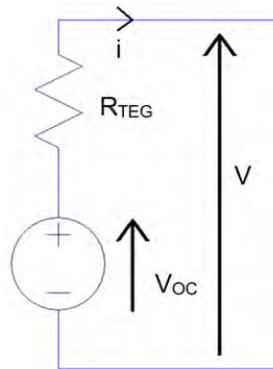


Figure 140. Modèle de Thévenin du TEG.

On peut écrire la tension V et la puissance P générée par le TEG telles que :

$$V = V_{OC} - R_{TEG} \times i$$

$$P = V \times i$$

Donc que :

$$V = V_{OC} - R_{TEG} \times \frac{P}{V}$$

$$P = - \left(\frac{V - V_{OC}}{R_{TEG}} \right) \times V$$

On obtient ainsi l'équation du second ordre suivante :

$$P = \frac{V_{OC}}{R_{TEG}} \times V - \frac{1}{R_{TEG}} \times V^2$$

L'équation de l'approximation par un 2nd ordre est : $P = -0,2695 \times V^2 + 0,1745 \times V$, par identification, on calcule une résistance équivalente interne $R_{TEG} = 3,71\Omega$ et une tension de circuit ouvert $V_{OC} = 0,65V$. La puissance maximale générée par le TEG dans ces conditions est de $P_{MPP} = 28mW$ pour une tension aux bornes du TEG de $V_{MPP} = 0,33V$.

Les résultats présentés Figure 36 ont été mesurés pour une température du support de $170^\circ C$ et une température de l'air de $70^\circ C$. Ce cas est représentatif des conditions que le récupérateur devrait rencontrer durant la majeure partie du vol (voir Figure 125), avec une température de l'air néanmoins plus élevée lors de l'essai qu'attendue dans l'APF, ce qui sous-estime la puissance disponible.

Durant les autres phases de vol, le gradient est soit plus important, soit transitoire. Le but de cette caractérisation étant de concevoir le circuit électronique, il est logique que la conception se base sur des conditions stables, et dans un pire cas.

3.3.2.5. ESSAIS EN VIBRATIONS DU MODULE THERMOGENERATEUR

Le module thermogénérateur devant être embarqué sur le mât réacteur du moteur 4 de l'A380 MSNI, il nécessite de répondre aux tests en vibrations associés à cet environnement et définis par la norme DO160-G. Ce test a été effectué du 12 au 24 novembre 2014 sur le banc vibratoire LDS V875 d'AIRBUS à Blagnac.

Le banc de test est composé d'un cube d'aluminium monté sur un pot vibrant avec une plaque d'interface pour le montage du système à tester. Trois accéléromètres ont été placés sur le module pour enregistrer les niveaux d'accélération pendant le test et un accéléromètre supplémentaire est également placé sur le banc lui-même pour contrôler le niveau d'accélération fourni par le pot vibrant (Figure 141).

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

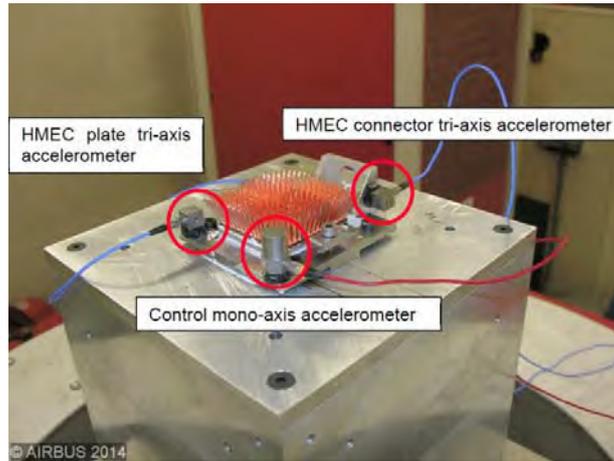


Figure 141. Vue du montage final sur le banc d'essai en vibration

Les niveaux d'excitation utilisés sont ceux préconisés par la norme DO160-G. Le premier test mis en œuvre est celui de l'excitation aléatoire appelée "courbe D" (Figure 142 a) caractérisée par un niveau global de $8,92 \text{ g}_{\text{rms}}$. La séquence est la suivante dans chacun des 3 axes de l'équipement :

- L'équipement n'étant pas en fonctionnement, application d'un scan sinusoïdal de $0,5\text{g-PK}$ de 10Hz à 2kHz à une vitesse de balayage ne dépassant pas $1,0$ octave/min et enregistrement de la réponse des accéléromètres placés sur le module TEG pour déterminer les fréquences de résonance.
- L'équipement étant en fonctionnement, application du niveau de test APSD (Figure 142 a) pendant une heure par axe pour déterminer la conformité de l'équipement à la norme avec enregistrement de la réponse de l'équipement.
- Répétition du scan sinusoïdal du a) afin de vérifier toute modification des fréquences de résonance et inspection du module.
- Test de fonctionnalité sur le module TEG en appliquant un gradient thermique à l'aide d'un pack de glace et en mesurant la tension de sortie.

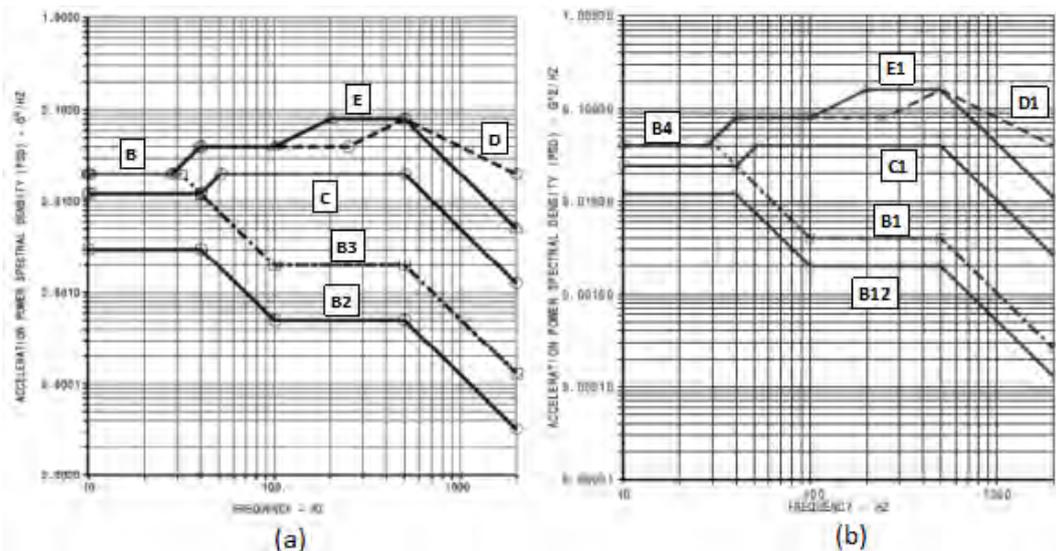


Figure 142. Courbes standard de test de vibration aléatoire issues de la DO160G. Les différentes étiquettes correspondent à différents lieux d'implantation dans l'appareil, la courbe D est celle du mât réacteur.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

De la même manière, un deuxième test d'excitation aléatoire appelé "courbe D1", caractérisé par un niveau global de 12,61 g_{rms} , a été appliqué :

- L'équipement n'étant pas en fonctionnement, application d'un scan sinusoïdal de 0,5g-PK de 10Hz à 2kHz à une vitesse de balayage ne dépassant pas 1,0 octave/min et enregistrement de la réponse des accéléromètres placés sur le module TEG pour déterminer les fréquences de résonance.
- L'équipement étant en fonctionnement, application du niveau de test APSD de la Figure 142(a) pendant au moins 10 minutes pour déterminer la conformité de l'équipement à la norme avec enregistrement de la réponse de l'équipement.
- L'équipement étant en fonctionnement (sauf défini autrement dans la spécification), application du niveau de test APSD de la Figure 142 (b) pendant trois heures pour déterminer la conformité de l'équipement à la norme avec enregistrement de la réponse de l'équipement.
- Répétition du scan sinusoïdal du a) afin de vérifier toute modification des fréquences de résonance et inspection du module.
- Test de fonctionnalité sur le module TEG en appliquant un gradient thermique à l'aide d'un pack de glace et en mesurant la tension de sortie.

Après application de ces deux tests de vibration aléatoire (courbes D et D1), le module TEG est toujours fonctionnel et ne présente aucun dommage apparent. Sa réponse mécanique est similaire avant et après test vibratoire.

A titre d'illustration, nous donnons en Figure 143 les résultats de test selon la courbe D pour l'axe Z qui montre que le module TEG a passé ce test avec succès. Sur la Figure 143 (a), on peut noter que la réponse mécanique est identique avant et après test en termes de fréquence de résonance (courbes rose et rouge : test avant, courbes verte et bleu : test après). La Figure 143 (b) illustre cette conformité au test puisque la courbe bleue "Control" est parfaitement identique à la courbe verte de référence. En conclusion, le module TEG est conforme à la norme DO160-G pour les courbes D et D1.

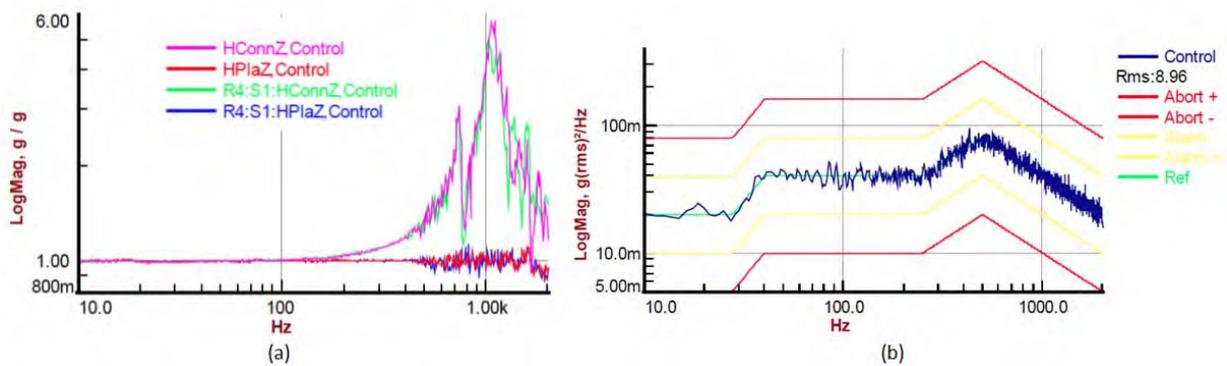


Figure 143. Résultats des tests de vibration aléatoire Courbe D selon l'axe Z : réponses fréquentielles pré et post test (a) et courbe montrant que le niveau de contrôle est conforme aux spécifications (b).

3.3.3. CONCEPTION DU CIRCUIT ELECTRONIQUE DE GESTION DU TEG

Maintenant que les caractéristiques électriques du thermogénérateur sont connues, on peut concevoir le circuit électronique HMEC (*Health Monitoring Energy Converter*) dont les fonctions sont de :

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

- Réaliser l'adaptation d'impédance électrique avec le TEG pour extraire le maximum d'énergie.
- Stocker l'énergie récupérée pour répondre aux pics de consommation de la charge qui sont supérieurs à l'énergie moyenne récupérée.
- Réguler la tension de sortie à 5V.

Etant donné le contexte de test de ce système, c'est-à-dire son installation dans le mât réacteur pour une campagne d'essais de plusieurs mois, sans possibilité de réparation ou de remplacement, nous voulons une conception qui assure une fiabilité maximale. Cette exigence a abouti aux choix suivants :

- L'utilisation de circuits intégrés commerciaux a été préférée à un système réalisé en composants discrets. Le parti pris a été de préférer la fiabilité au rendement maximum, jugeant que l'énergie disponible était suffisamment importante. Les 4 circuits intégrés sont du fabricant Linear Technology car concevant des composants performants pour des systèmes embarqués (régulateur de sortie et comparateur très basse consommation) et pour la récupération d'énergie (LTC3105).
- Un circuit de protection contre les courts-circuits de la charge a été placé en sortie pour protéger notre système d'une mauvaise manipulation lors de l'installation ou d'une défaillance de la charge à alimenter.
- Un filtre de mode commun est utilisé en entrée comme protection contre les impulsions électromagnétiques que pourrait provoquer un impact de foudre.

3.3.3.1. ARCHITECTURE DU HMEC

La Figure I44 montre le schéma du circuit en identifiant les 6 blocs fonctionnels dont il est constitué.

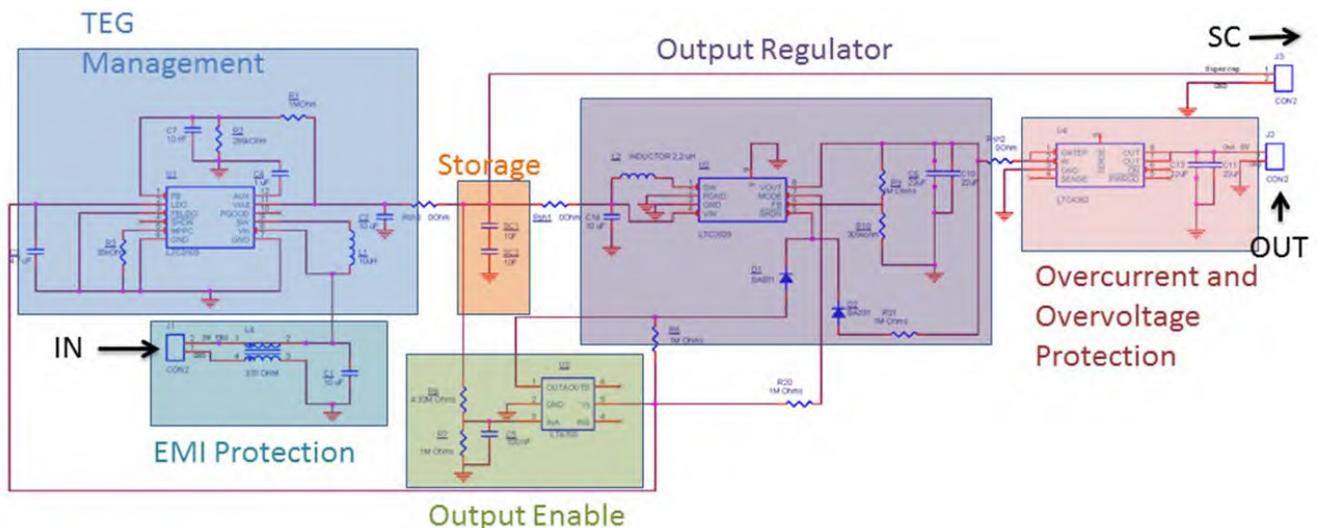


Figure I44: Présentation du HMEC avec les blocs principaux mis en évidence, entrée TEG : IN, sortie d'alimentation : OUT, mesure des supercondensateurs : SC.

LTC3105: GESTION TEG

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

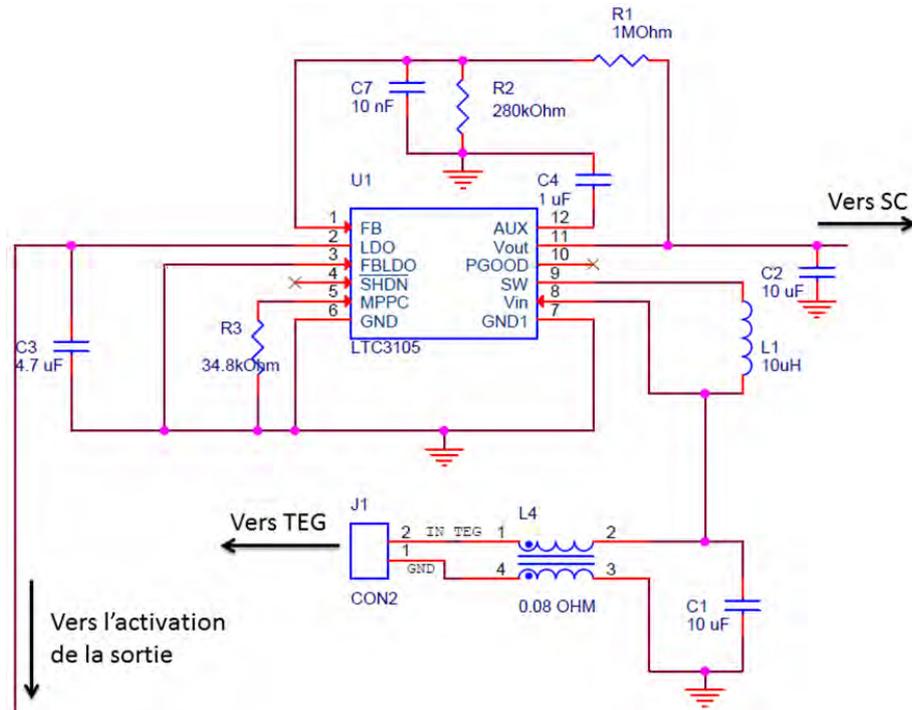


Figure I45: Vue détaillée de la partie gestion du TEG du HMEC, avec le filtre de mode commun L4 pour la protection contre les impulsions électromagnétiques.

La gestion du TEG est effectuée par un circuit intégré LTC3105 de Linear Technology. Ce composant assure les fonctions suivantes :

- L'adaptation d'impédance du TEG : l'interface du LTC3105 avec le TEG est un régulateur boost dont le rapport cyclique varie pour imposer toujours la même tension à l'entrée. Cette tension d'entrée est fixée via la résistance R3 (voir Figure I45) à une valeur constante de 0,32V qui est le point de puissance maximum du TEG dans le cas d'un gradient plus faible que la réalité (d'après les modèles fournis par Airbus, voir la caractéristique du TEG Figure I39). Ce choix assure une puissance minimale récupérée. Si le gradient augmente, le point de fonctionnement ne sera plus le point de puissance maximum, mais la puissance récupérée sera quand même supérieure au cas du gradient minimum (Figure I46).
- Un contrôle de charge des supercondensateurs placés à sa sortie. Il stoppe leur charge (son entrée passe en haute impédance) quand la tension aux bornes des supercondensateurs (SC) atteint leur valeur maximale de 4,6V.
- Il fournit une alimentation auxiliaire via un LDO qui est opérationnelle avant que la charge des SC ne débute. Ce LDO alimente la logique de contrôle de la sortie qui est détaillée ci-après.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

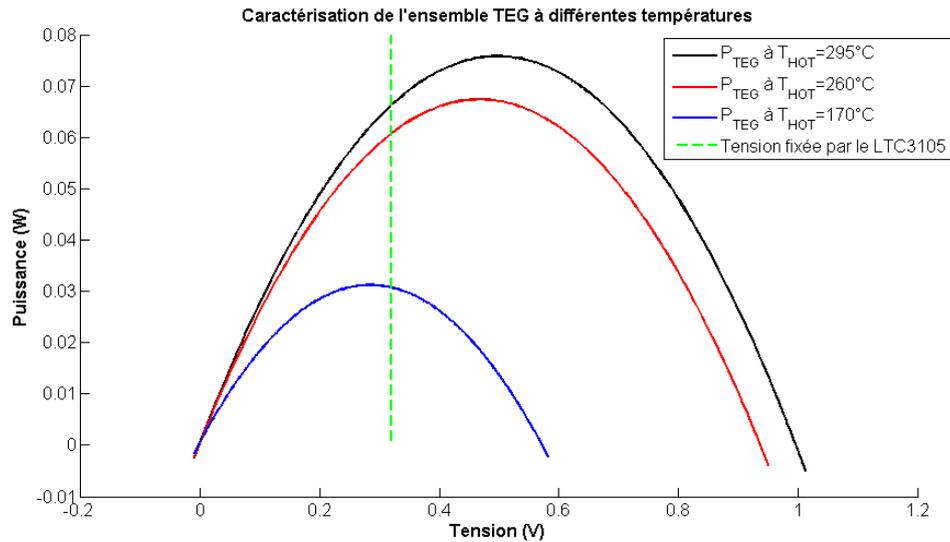


Figure I46. Caractérisation du TEG à différentes températures, le support est à T_{HOT} et l'air ambiant à $T_{COLD} = 70^{\circ}C$. Ces données ne sont pas assez précises pour être utilisées pour la conception, mais illustre correctement la variation de caractéristique du TEG quand le gradient à ses bornes varie.

STOCKAGE DE L'ENERGIE AVEC DES SUPERCONDENSATEURS MAXWELL BCAP0003



Figure I47: Vue détaillée de la partie stockage du HMEC avec une photo d'un supercondensateur Maxwell BCAP0003 utilisé.

Le stockage est réalisé avec des supercondensateurs BCAP0003 de Maxwell d'une valeur de capacité de 3,3F, une tension maximale de 2,3V et une résistance équivalente série de 290m Ω . La tension maximale de 2,3V suit la recommandation du constructeur pour une utilisation à haute température qui est de ne pas charger le composant à 2,7V (valeur pour une utilisation à température ambiante, inscrite sur le boîtier).

Les supercondensateurs utilisés ont une température de fonctionnement annoncée de -40 à $+85^{\circ}C$. Le cahier des charges demandant une fonctionnalité de $-60^{\circ}C$ à $+125^{\circ}C$ pour une courte période (30 minutes), des tests en température du circuit ont été réalisés par nos soins pour étudier leur comportement hors des plages de températures annoncées par le fabricant (voir la caractérisation en température des supercondensateurs PC10 de même technologie partie 2.2.3 et les tests fonctionnels en température du circuit dans la partie 3.3.3.3). Ces tests ont conclu que cette référence de supercondensateurs était utilisable dans notre application.

Concernant le dimensionnement du stockage, plusieurs éléments sont à prendre en compte :

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

- Le stockage sert ici à fournir les pics de consommation de la charge, et non à assurer une autonomie, puisque la production d'énergie sera continue. Le pic le plus important apparaît lors du retour au sol de l'appareil (voir Tableau 1) et consomme une énergie de 11,8 joules. Le stockage doit donc pouvoir contenir plus de 11,8 joules pour prendre en compte les pertes engendrées par l'étage de sortie.
- Plus la capacité de stockage est grande, plus le temps de démarrage du système sera long (le temps que les supercondensateurs se chargent et passent d'une tension de 0V à 2,5V, valeur d'activation de l'étage de sortie). Il ne faut donc pas surdimensionner les supercondensateurs.
- On veut avoir une tension maximale dans le stockage inférieure mais proche de la tension de sortie du régulateur boost 5V pour bénéficier d'un bon rendement de conversion. Cela nous amène à utiliser des condensateurs connectés en série pour avoir une tension maximale de 4,6V.

La solution retenue est d'utiliser deux supercondensateurs BCAP0003 en série. Lorsqu'ils sont chargés à une tension de 4,6V, ils stockent une énergie de $E = 4,6 \times 4,6 \times 1,65 \times \frac{1}{2} = 17,457 J$. La sortie se désactivera d'elle-même quand le régulateur de sortie ne parviendra plus à maintenir une tension de 5V à sa sortie à cause d'une tension d'entrée trop faible d'environ 1V pour le courant que nous considérons. Il restera alors une énergie dans les supercondensateurs de $E = 0,825 J$. Avec cette solution, nous stockons donc dans les supercondensateurs une énergie utilisable de $E = 16,1632 J$, ce qui laisse une marge confortable pour supporter les pertes des étages de sortie (marge suffisante même en considérant un rendement moyen de conversion particulièrement bas de 75%).

REGULATEUR DE SORTIE LTC3539

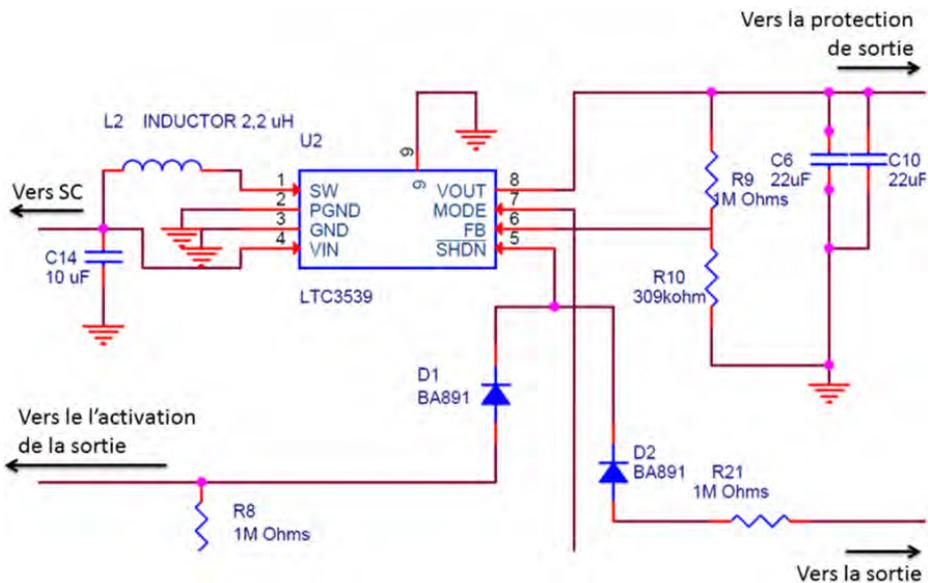


Figure 148: Vue détaillée de la partie régulation de la sortie du HMEC

La régulation de la tension de sortie est réalisée par un circuit intégré LTC3539 de Linear Technology qui est un régulateur élévateur 5V. Ce composant a été choisi pour son bon rendement (voir l'extrait de la documentation du composant Figure 149) et sa capacité à fonctionner avec une faible tension d'entrée (jusqu'à 0,88V pour des faibles courants). Ces deux caractéristiques permettent de rentabiliser au mieux l'énergie récupérée par le TEG : un bon rendement est nécessaire pour limiter les pertes entre le stockage et la charge à alimenter, une tension de fonctionnement basse permet d'utiliser au maximum l'énergie stockée dans les supercondensateurs.

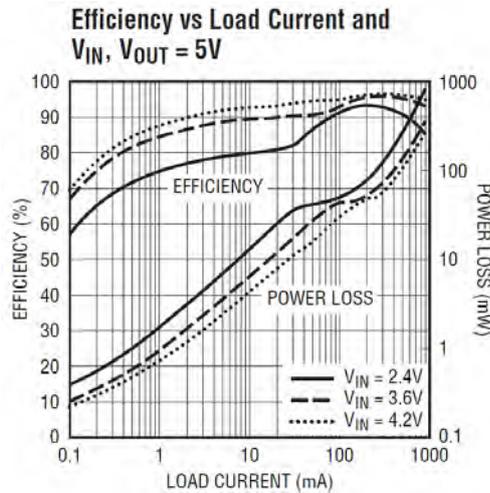


Figure 149. Rendement du LT3539 en fonction du courant de sortie, pour une tension de sortie de 5V.

Ce circuit est activable via une entrée \overline{SHDN} et nous l'utilisons par deux moyens :

- Un comparateur vient mettre cette entrée à un potentiel haut et active ainsi le régulateur quand celui-ci est initialement éteint. Cette méthode est utile pour avoir un démarrage « propre et net » du régulateur et éviter les problèmes de « blocage en sous tension » (Under Voltage Lock Out, [123]). Dans notre cas, nous attendons d'avoir assez d'énergie disponible dans le stockage pour fournir les pics de courant de la charge lors de son démarrage.
- Un rebouclage de la sortie du régulateur sur l'entrée \overline{SHDN} , via les diodes D1 et D2 qui réalisent une fonction de OU logique, maintient le circuit en fonctionnement tant que le régulateur arrive à maintenir une tension de 5V sur sa sortie. Cette méthode permet de faire fonctionner l'étage de sortie même si le comparateur de commande n'est plus alimenté. Le but est de maximiser l'autonomie de cette alimentation en utilisant le maximum d'énergie stockée dans les supercondensateurs, ce régulateur de sortie fonctionne encore quand le LTC3105 et son LDO d'alimentation ne fonctionnent plus. Le régulateur cesse de fonctionner quand la tension à son entrée est trop basse et que la sortie n'est plus maintenue à 5V.

ACTIVATION DE LA SORTIE AVEC LE LT6700

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

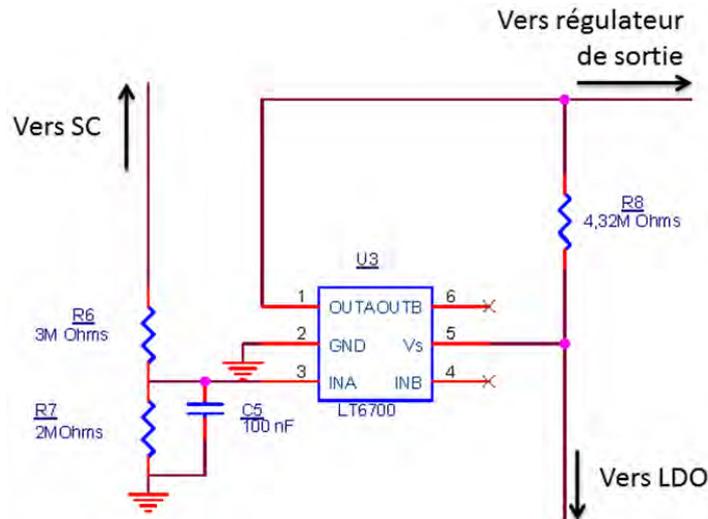


Figure 150: Vue détaillée de la partie activation de la sortie du PMC

Le LT6700 de Linear Technology est un comparateur basse puissance avec une référence de tension interne. Comme décrit dans la présentation du régulateur LTC3539, le comparateur sert à activer l'étage de sortie quand la tension des supercondensateurs atteint 2,5V. Cette valeur a été choisie de manière à avoir assez d'énergie stockée pour alimenter les phases de démarrage du HMSS.

PROTECTION CONTRE LES SURINTENSITES ET LES SURTENSIONS

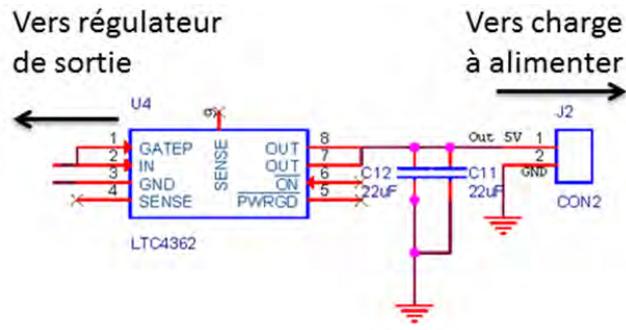


Figure 151: Vue détaillée de la partie protection contre les surtensions et les surintensités du circuit PMC.

Le LTC4362 de Linear Technology est un circuit monolithique de protection contre les surtensions et les surintensités avec un MOSFET à canal N servant d'interrupteur reliant son entrée à sa sortie. La résistance interne du transistor et du shunt de mesure de courant sont faibles (respectivement 40mΩ et 32 mΩ) pour limiter les pertes. Si le courant atteint 1,5A, ou si la tension d'entrée atteint 5,8V, le MOSFET s'ouvrira, déconnectant ainsi la sortie. Il repassera en état passant automatiquement au bout de 130ms. Cette protection sert à protéger la charge à alimenter en cas de défaut du HMEC (surtension), et protège notre HMEC d'un défaut de la charge à alimenter (court-circuit dû à une défaillance ou à un mauvais branchement).

PROTECTION EMI

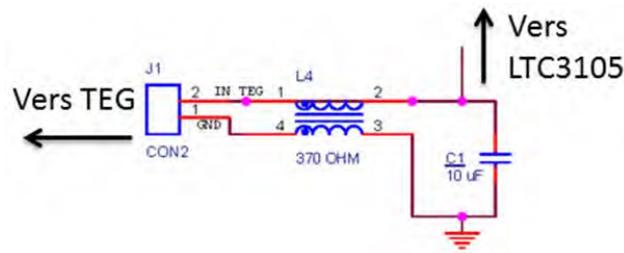


Figure 152: Vue détaillée de la protection EMI du HMEC.

Afin de protéger le circuit contre les impulsions électromagnétiques (IEM) pouvant être provoquées par d'éventuels impacts de foudre, un filtre à mode commun est placé en entrée du HMEC, juste après le TEG. Son rôle peut être résumé à un filtre passe bas, le composant présentant une impédance de 22Ω à 100MHz et de seulement $80\text{m}\Omega$ en courant continu. La fréquence de hachage du LTC3105 étant de 20kHz , le filtre ne pose pas de problème pour l'adaptation d'impédance.

Le condensateur C1, qui est avant tout nécessaire au fonctionnement du LTC3105, agit également comme un passe-bas dans la protection contre les IEM.

3.3.3.2. REALISATION DE LA CARTE ET BOITIER DE PROTECTION

Au sein de notre laboratoire, nous avons réalisé plusieurs prototypes de cette carte afin de valider sa conception. Des tests fonctionnels à différentes puissances d'entrée et de sortie ont été conduits, ainsi que des essais en température qui sont présentés dans la partie suivante.

La carte définitive, qui sera installée à bord de l'appareil, et son assemblage dans le boîtier de protection ont été réalisés par l'entreprise Microtec spécialisée dans la fabrication de cartes électroniques pour l'aéronautique et l'aérospatial. Ces étapes ont consisté en :

- Fabriquer puis vernir les cartes. Le vernis (Electrolube DCA SCC3 en aérosol) a deux fonctions :
 - o il sert de couche isolante pour protéger le circuit d'éventuels fluides extérieurs,
 - o c'est une protection contre les arcs électriques pouvant être générés par la carte suite à une défaillance (rigidité diélectrique du vernis : 90kV/mm). Pour rappel, la zone d'installation pouvant contenir des vapeurs de carburant, les étincelles ou les arcs électriques sont à éviter absolument.
- Intégrer la carte dans un boîtier en acier inoxydable (voir Figure 153). Le choix de l'acier plutôt qu'un autre métal est nécessaire pour la résistance au feu. La DO160-G exige que les fixations du boîtier restent fonctionnelles après une exposition à une température du support de 1100°C pendant 5 minutes.
- Fixer les connecteurs. Ces connecteurs sont des connecteurs aéronautiques Souriau, série 2997 pour la connexion vers le thermogénérateur et série 3649 pour la connexion vers le HMSS.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique



Figure 153. Photo du boîtier avec vue des connecteurs et de la carte électronique.

Le boîtier a une taille de 14cm x 6cm et une masse de 504g. Ces dimensions sont importantes pour une carte pourtant simple et ne sont pas compatibles avec un déploiement en nombre dans un avion. Ce problème vient :

- d'un besoin de garder un coût de fabrication raisonnable en utilisant un boîtier de série, limitant forcément le choix des caractéristiques du boîtier,
- de la taille des connecteurs aéronautiques imposés. Les connecteurs utilisés sont les mêmes que pour les équipements électroniques habituellement utilisés. Leur taille ($\approx 2,5\text{cm} \times 2,5\text{cm} \times 3\text{cm}$) apparaît donc imposante pour un système d'alimentation devant délivrer quelques centaines de milliwatts maximum en pic.

3.3.3.3. TESTS FONCTIONNELS EN TEMPERATURE DU CIRCUIT HMEC

Le circuit HMEC a été testé à différentes températures pour étudier et vérifier son comportement. Les tests du circuit ont été effectués aux températures suivantes :

- -60°C
- -40°C
- Température ambiante ($+23^{\circ}\text{C}$)
- $+85^{\circ}\text{C}$
- $+125^{\circ}\text{C}$

Ces températures sont celles spécifiées dans le cahier des charges du circuit électronique du HMEC, les températures de -60°C et de $+125^{\circ}\text{C}$ doivent être supportées pendant seulement 30 minutes.

3.3.3.3.1. PRESENTATION DU BANC DE TEST

Il nous était difficile de réaliser l'étude en température du circuit en utilisant le TEG dans une étuve comme source, de la même manière que celle mise en place lors de la caractérisation du TEG. Pour contourner ce problème matériel, nous avons simulé le TEG comme un générateur de Thévenin (modélisation en régime permanent, voir partie 3.1.2) en utilisant une alimentation stabilisée en série avec une résistance de la valeur de la résistance équivalente interne du TEG. Les paramètres du TEG varient selon les conditions de température (voir

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

Figure 146 et modélisation d'un TEG), nous prenons le cas de référence pour ces essais, c'est-à-dire les conditions du "Standard Day".

Le TEG est donc simulé par un générateur de tension de 0,65V et en série avec une résistance de 3,6Ω.

Le test est divisé en 2 parties. Premièrement, on effectue une simple charge du stockage, le but est d'étudier comment la température fait varier :

- Le temps qu'il faut pour que la tension des supercondensateurs atteigne la tension d'activation de l'étage de sortie, réglée à 2V pour ces tests.
- Le temps qu'il faut pour que les supercondensateurs soient pleinement chargés (4,6V).

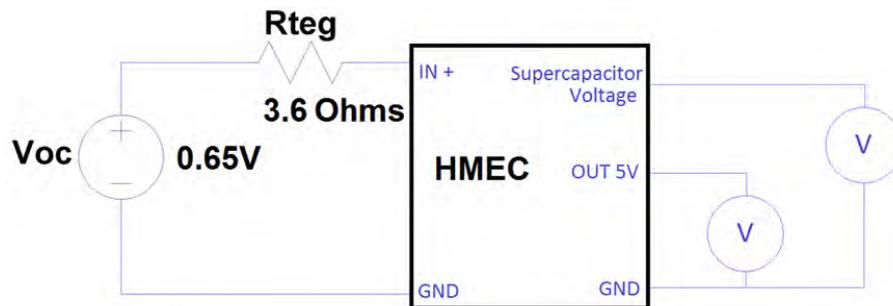


Figure 154 : HMEC avec un circuit équivalent du TEG comme source en entrée et une mesure de la tension aux bornes des supercondensateurs et du régulateur de sortie.

Dans la deuxième partie du test, on simule la charge avec un Agilent N6705 qui suit le profil décrit Figure 127 pour simuler le HMSS à alimenter.

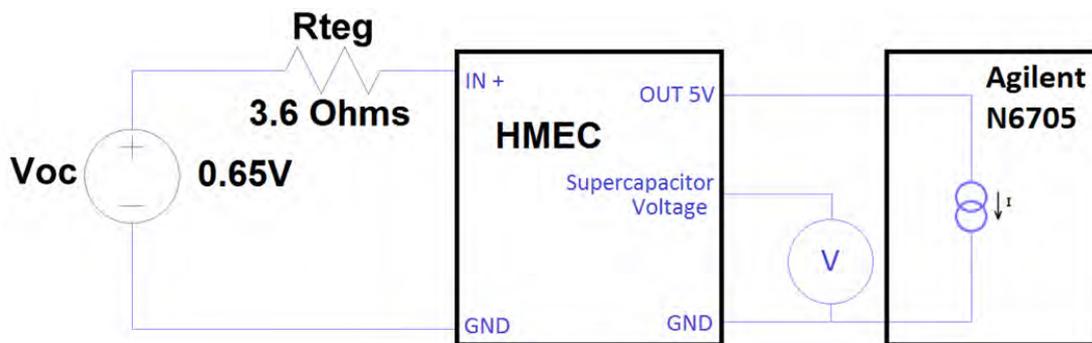


Figure 155: HMEC avec un circuit équivalent du TEG comme source d'entrée et une charge simulée.

Pour atteindre les températures voulues, on utilise une enceinte climatique ThermoStream de Temptronic Corporation.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

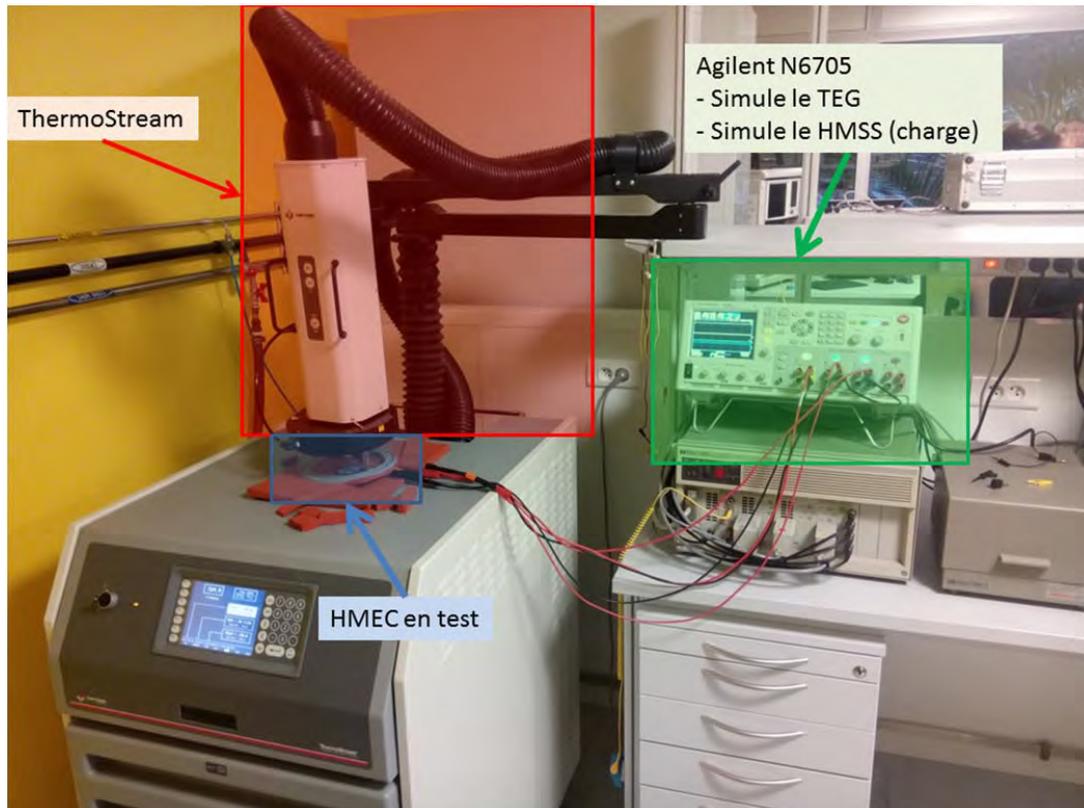


Figure 156: Photo du banc de test en température contrôlée.

Les résultats sont comparés pour les températures de -40°C à $+125^{\circ}\text{C}$. Le résultat du test à -60°C est discuté à la fin de cette partie.

3.3.3.3.2. TEST DE CHARGE SEULE

En chargeant simplement le stockage, sans connecter de système à alimenter sur la sortie, on obtient une évolution de la tension des supercondensateurs et de la sortie visible sur la Figure 157. L'intérêt de ce test est d'abord de vérifier que le système fonctionne avec un thermogénérateur simulé et ensuite, d'étudier l'influence de la température sur les performances de cette carte. Ces essais ont été conduits avec une version préliminaire du circuit où la taille du stockage utilisé est de 5F (2 supercondensateurs Maxwell PC10 en série) et la sortie s'active à 2V.

Dans les versions suivantes, l'estimation de la puissance produite a été revue à la hausse, conduisant à diminuer la capacité du stockage à 1,65F (2 supercondensateurs Maxwell BCAP0003 en série) afin de réduire le temps avant le démarrage du régulateur de sortie. Pour pouvoir continuer à assurer l'alimentation de la charge lors du pic de consommation du démarrage, la tension d'activation de la sortie a été fixée à 2,5V.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

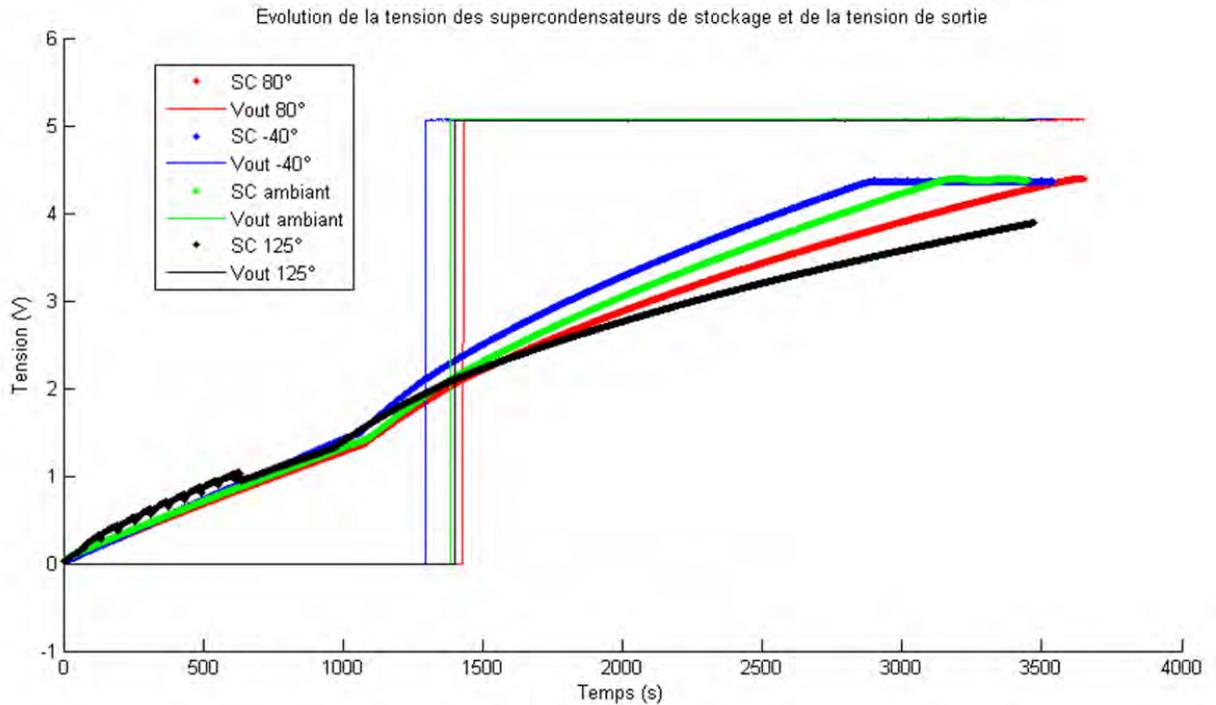


Figure 157: Charge du stockage du PMC en fonction de la température.

Le temps de charge des supercondensateurs augmente avec la température. Cela est directement lié au rendement du circuit qui se dégrade aux températures plus élevées (voir Figure 158) et donc à une puissance récupérée plus faible. Sur la Figure 158, on peut observer une augmentation importante de la puissance récupérée (la puissance électrique entrante dans les supercondensateurs) aux alentours de 1000s. Ce phénomène sera décrit partie 3.3.3.4 lors de l'étude du rendement du circuit.

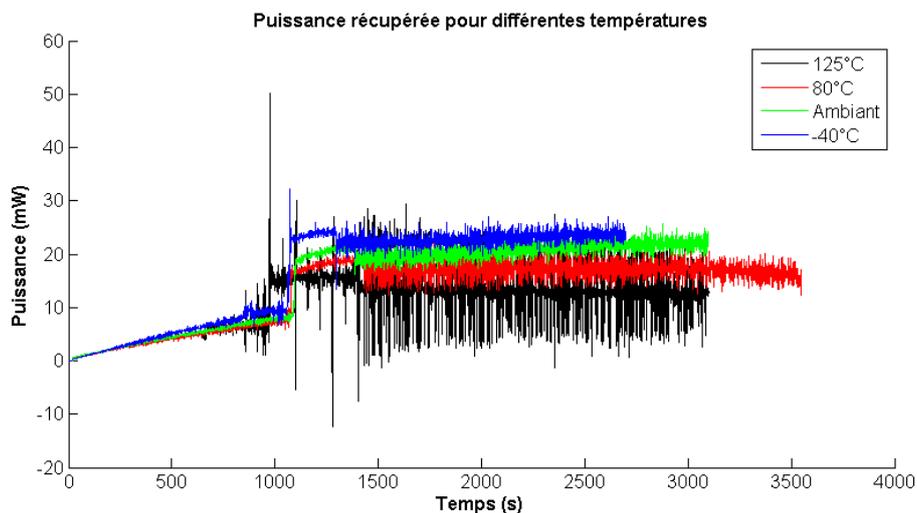


Figure 158. Puissance récupérée par le circuit à différentes températures durant la charge du stockage

3.3.3.3. TEST DE CHARGE A -60°C

Lorsque l'on porte le circuit à -60°C, celui-ci cesse de fonctionner correctement (Figure 159).

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

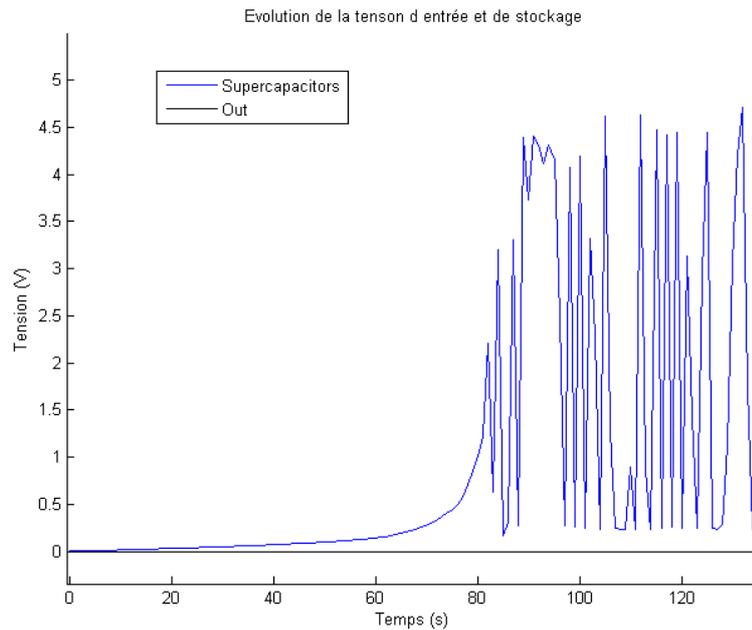


Figure 159: Tentative de charge du stockage du HMEC lorsqu'il est porté à -60°C .

L'électrolyte contenu dans les supercondensateurs est de l'acétonitrile avec du sel de tétraéthylammonium/tétrafluoroborate (TEABF₄). La température de fusion de l'acétonitrile est de -46°C . A -60°C , ce composé a déjà changé de phase, et le supercondensateur ne montre alors plus de comportement capacitif.

Sur la Figure 159, on observe une tension qui oscille : dès qu'un courant de « charge » est appliqué, la tension atteint sa valeur limite avant de retomber dès que le courant cesse, le LTC3105 reprenant alors immédiatement la « charge », etc.

Ce comportement est réversible : lorsque la température remonte et que l'électrolyte redevient liquide, le stockage fonctionne de nouveau sans altération.

3.3.3.3.4. TEST D'ALIMENTATION D'UNE CHARGE ELECTRIQUE

Dans ce test, le système alimente une charge simulée par un puits de courant jouant le profil de consommation du HMSS.

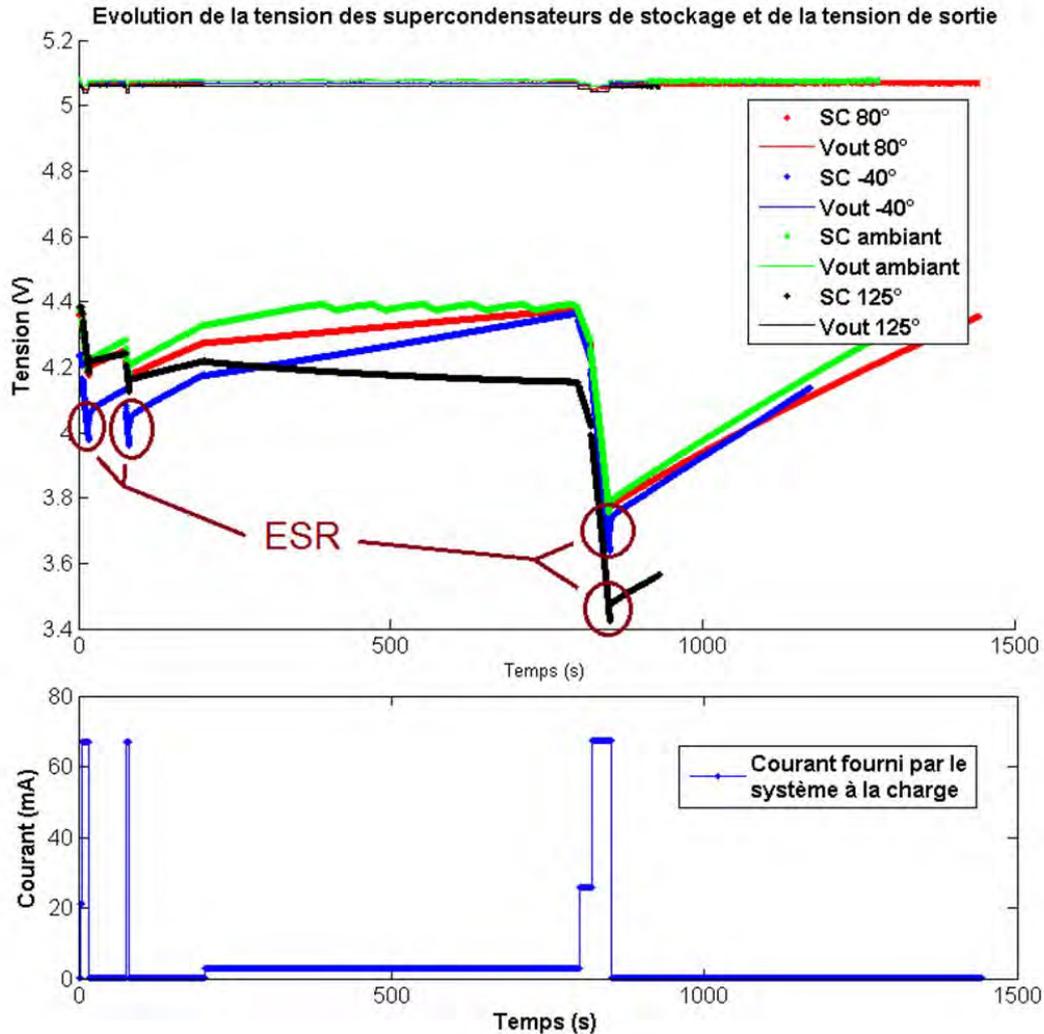


Figure 160: Evolution de la tension du stockage initialement chargé et de la tension de sortie du HMEC lorsque celui-ci alimente une charge. On peut observer des sauts de tensions du stockage lors des arrêts d'appels de courant dus à l'ESR des supercondensateurs.

Aux 4 températures étudiées, le système parvient à alimenter la charge. On peut néanmoins noter que lors de l'essai à +125°C, le système n'arrive pas à récupérer les 15mW demandés par la charge de $t=200s$ à $t=800s$. On peut également observer l'effet de l'ESR des supercondensateurs lors de chaque appel ou arrêt d'appel de courant qui provoque un saut brutal de tension de l'ordre de la centaine de millivolts (ce qui a été la méthode de mesure de l'ESR dans les essais conduits partie 2.2.3).

3.3.3.3.5. CONCLUSION DE L'EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LE CIRCUIT ELECTRONIQUE

La carte fonctionne correctement sur une plage de températures de -40°C à +125°C.

Bien que l'énergie récupérée à +125°C ne soit pas suffisante pour alimenter la charge, cette condition extrême n'est qu'hypothétique et temporaire (maximum 30 minutes selon le cahier des charges) et ne détériore pas le circuit.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

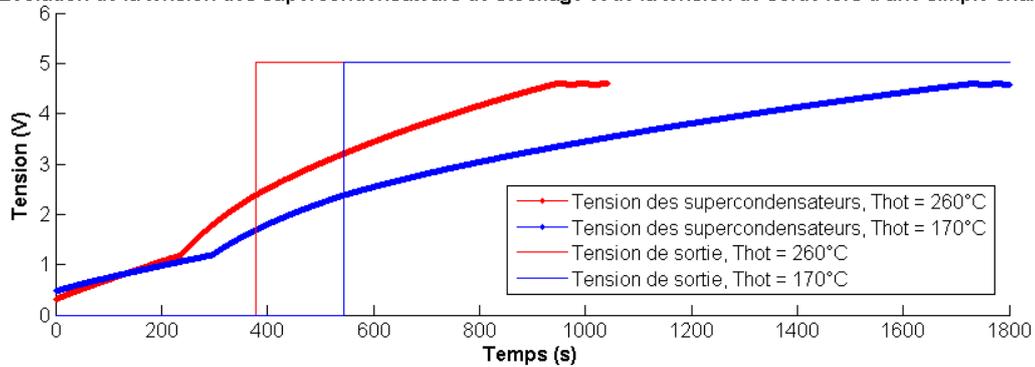
Une température inférieure à -40°C empêche le fonctionnement du stockage et rend inopérant notre circuit. Cependant, le passage par une température trop froide ne détériore pas le système et celui-ci fonctionnera de nouveau une fois revenu à une température supérieure à -40°C . Pour rendre le HMEC opérationnel à d'aussi basses températures, une solution serait d'avoir un système de chauffage des supercondensateurs pour les maintenir à une température supérieure au point de solidification de l'électrolyte, mais un tel système serait forcément énergivore, pouvant rendre inutile toute récupération d'énergie.

3.3.3.4. TEST DU CIRCUIT ALIMENTÉ PAR LE TEG EN ÉTUVE

Les derniers tests fonctionnels réalisés ont été de faire fonctionner le circuit avec le TEG en étuve comme source d'alimentation, le circuit restant à température ambiante. Ces tests ont été effectués avec les cartes définitives (d'où des seuils d'activation et des temps de démarrage différents des tests précédemment présentés).

Les essais ont été réalisés avec une température de l'air de $T_{\text{COLD}} = 70^{\circ}\text{C}$ et une température chaude du support de $T_{\text{HOT}} = 170^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{HOT}} = 260^{\circ}\text{C}$.

Evolution de la tension des supercondensateurs de stockage et de la tension de sortie lors d'une simple charge



Evolution de la tension des supercondensateurs de stockage et de la tension de sortie en alimentant un système

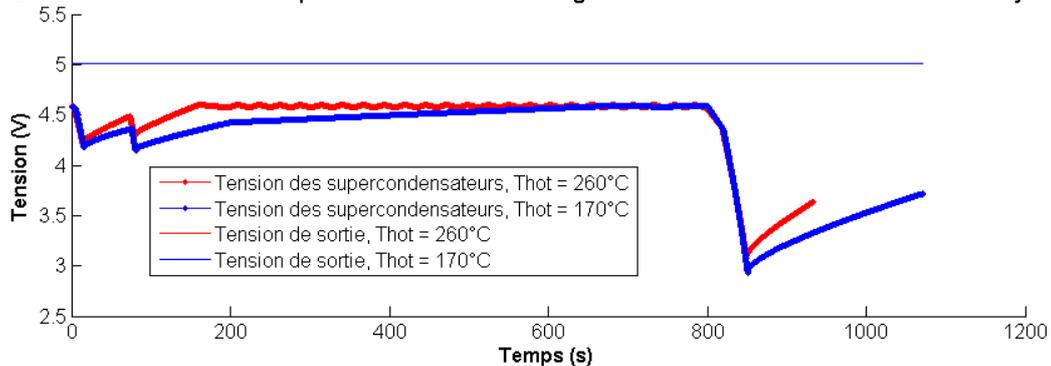


Figure 161. Evolution de la tension aux bornes des supercondensateurs (courbes du haut) et de la tension de sortie lors d'une charge (courbes du bas) avec le thermogénérateur en étuve, à différentes températures T_{hot} du support.

Le système échange avec un air à $T_{\text{COLD}} = 70^{\circ}\text{C}$.

Le comportement du système au cours de ces essais est très semblable aux résultats déjà obtenus, ce qui valide le fonctionnement de notre circuit avec un thermogénérateur réel. On peut constater, sans surprise, qu'un gradient plus élevé entraîne une récupération d'énergie plus importante. La puissance récupérée au cours de la

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

charge du stockage est visible Figure I62, elle est calculée à partir de l'évolution de la tension dans les supercondensateurs.

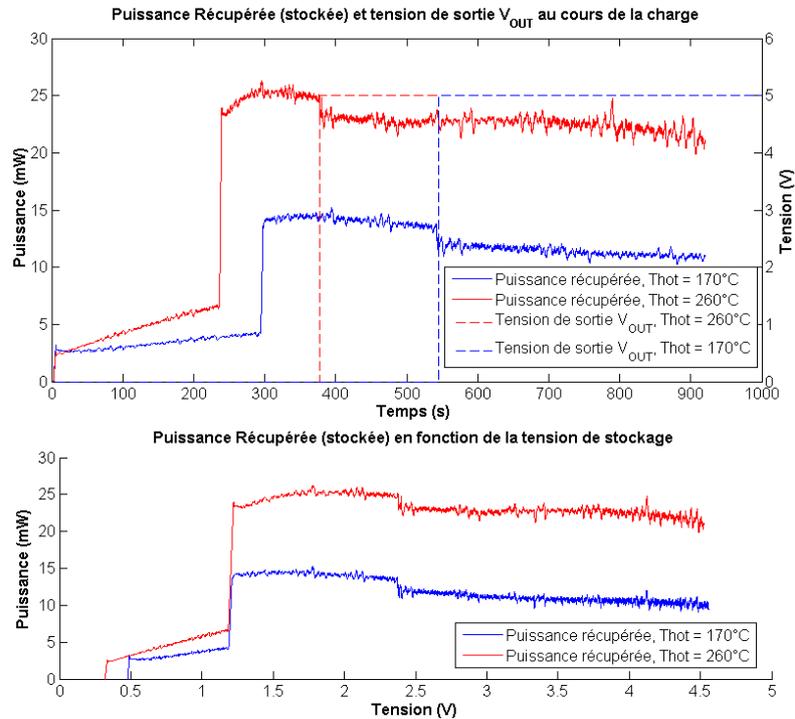


Figure I62. Evolution de la puissance récupérée au cours de la charge du stockage.

Le LTC3105 est un régulateur boost qui réalise une adaptation d'impédance avec le thermogénérateur. Pour que le composant puisse fonctionner correctement, les tensions d'entrée V_{IN} et de sortie V_{OUT} doivent respecter les conditions suivantes (selon la datasheet constructeur [197]) :

- $V_{OUT} > V_{IN}$
- $V_{OUT} > 1,2V$

Si ce n'est pas le cas, le rendement de récupération est fortement dégradé. On observe ce phénomène sur la Figure I62 où la puissance d'entrée est d'environ 5mW jusqu'à ce que la tension de stockage atteigne ce seuil de 1,2V.

On note également une baisse de la puissance récupérée pour une tension des supercondensateurs de 2,3V ou plus, tension qui est le seuil d'activation de l'étage de sortie. Cette chute de puissance correspond à la consommation de l'étage de sortie.

Lorsqu'il est exposé à un gradient de température de 170°C / 70°C, notre système ne produit pas assez d'énergie pour alimenter une charge se comportant comme le scénario que nous avons conçu (pour rappel, nous avons déterminé qu'il fallait une production continue d'au moins 15mW). Cependant, cette valeur de 15 mW est déterminée par la fréquence de mesure du niveau de charge des supercondensateurs, fixée ici à 10 secondes. Vérifier cette valeur aussi souvent n'est pas utile quand on considère la dynamique du système, cette fréquence pourrait être diminuée.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

De manière générale, les informations que nous avons eues sur la consommation du HMSS à alimenter sont très incertaines et issues de calculs sur une architecture préliminaire, il est donc difficile de conclure sur la capacité de notre système à alimenter correctement le datalogger. Néanmoins, nous avons réalisé avec succès un essai d'intégration en faisant fonctionner l'ensemble du système : TEG, HMEC et HMSS. Cet essai, présenté dans la partie 3.4, est un test fonctionnel et ne reproduit pas les conditions de températures du lieu d'installation mais utilise une plaque chauffante comme source de gradient. S'il est donc toujours difficile de conclure sur le fonctionnement final, la consommation du HMSS s'est révélée conforme, voire inférieure aux spécifications.

Nous présentons Figure 163 le rendement de récupération du système, calculé comme le ratio entre la puissance entrante dans les supercondensateurs sur la puissance en entrée du HMEC, c'est-à-dire la puissance générée par le TEG. Le rendement est montré en fonction de la tension en sortie du LTC3105. On note qu'il est légèrement meilleur à plus basse puissance (c'est-à-dire à plus bas gradient aux bornes du TEG).

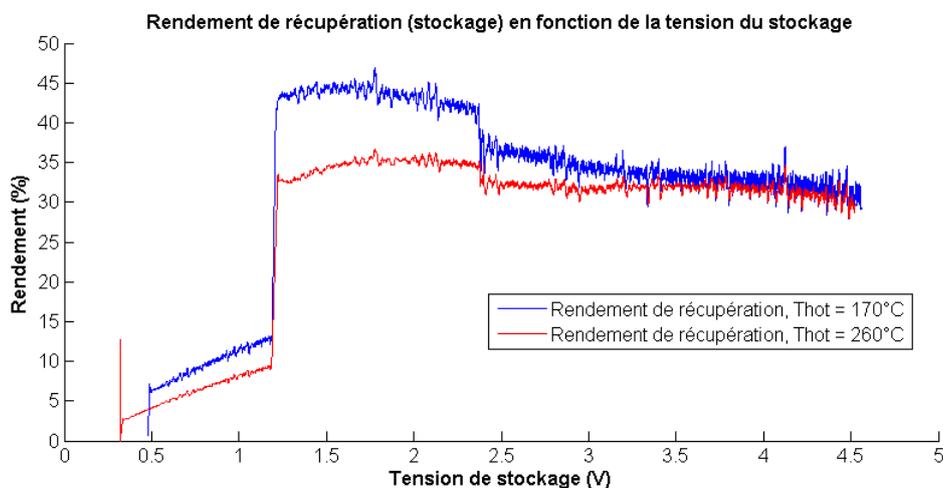


Figure 163. Rendement de récupération à différentes températures.

CONCLUSION DES TESTS FONCTIONNELS AVEC LE TEG

En effectuant ces tests, nous avons essayé de nous rapprocher le plus possible des conditions qui seront rencontrées à l'endroit d'installation du système. D'après ces essais, le TEG dans son assemblage mécanique parvient à alimenter le datalogger via la carte HMEC quand la température de la paroi est suffisamment élevée, mais ne semble pas en mesure de fournir la puissance nécessaire dans le pire cas de température et de consommation du HMSS.

Il faut cependant garder à l'esprit que les conditions qui règneront dans la zone d'installation seront certainement différentes de celles des tests réalisés, certains changements favoriseront la génération d'énergie, d'autres la diminueront :

- La température de l'air utilisée pour effectuer les essais nous a été donnée avec une importante incertitude, annoncée à +/- 50°C. En reprenant les données Figure 125, on en déduit que la température de l'air se situe entre 0 et 100°C.
- La pression de l'air ambiant avec lequel échange le radiateur du TEG sera de l'ordre de 250hPa pendant le vol (pression à 10000m d'altitude). Une aussi faible pression atmosphérique réduira les échanges thermiques au niveau du radiateur.
- Les vibrations au niveau du TEG seront importantes, ce qui pourra augmenter les échanges entre le radiateur et l'air et compenser partiellement les effets de la basse pression atmosphérique.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

3.3.3.5. TESTS DE COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE (CEM)

Pour pouvoir être installé dans l'appareil qui effectuera les essais en vol, le système ne doit pas provoquer de perturbations haute fréquence que ce soit via sa sortie, par conduction, ou via le rayonnement électromagnétique. Des niveaux limites de perturbations acceptables sont définis par la norme DO160-G, et les émissions de notre système ont donc été mesurées pour vérifier le respect de cette norme. Ces essais ont été réalisés à l'INSA de Toulouse grâce à Alexandre Boyer.

3.3.3.5.1. PRESENTATION DES MESURES

Lors des mesures, le HMEC est alimenté par le TEG posé sur une plaque chaude (non alimentée). Le HMEC alimente une charge résistive de 68 Ohms afin d'obtenir le courant maximum que pourra être amené à débiter notre système lors des pics de courant. On se place ainsi dans un pire cas où tout le système fonctionne (étage d'entrée et de sortie) au maximum de ses capacités (donc au maximum des perturbations).

Le HMEC est connecté au TEG par un câble non blindé de 4m, et la charge résistive est reliée au HMEC par un câble de 20cm pour avoir les mêmes longueurs que lors des essais en vol. Néanmoins, lors de l'installation sur avion, les câbles utilisés seront blindés et torsadés pour limiter au maximum les perturbations. Lors de ces mesures, les câbles sont torsadés mais non blindés, conformément à la norme DO160-G.

Deux types de mesures vont être effectués :

- Une mesure d'émission conduite, qui est une mesure de courant sur l'entrée et la sortie du HMEC pour détecter le bruit haute fréquence généré par notre système. Cette mesure est réalisée par une pince ampèremétrique haute fréquence placée sur le câble d'entrée (côté TEG) ou de sortie (côté charge à alimenter).
- Une mesure d'émission rayonnée, qui est une mesure du champ électromagnétique émis par notre système. Cette mesure est réalisée par une antenne placée à une distance de 1 mètre des équipements.

Les mesures ont été effectuées dans une chambre semi-anéchoïque (photo Figure 164).

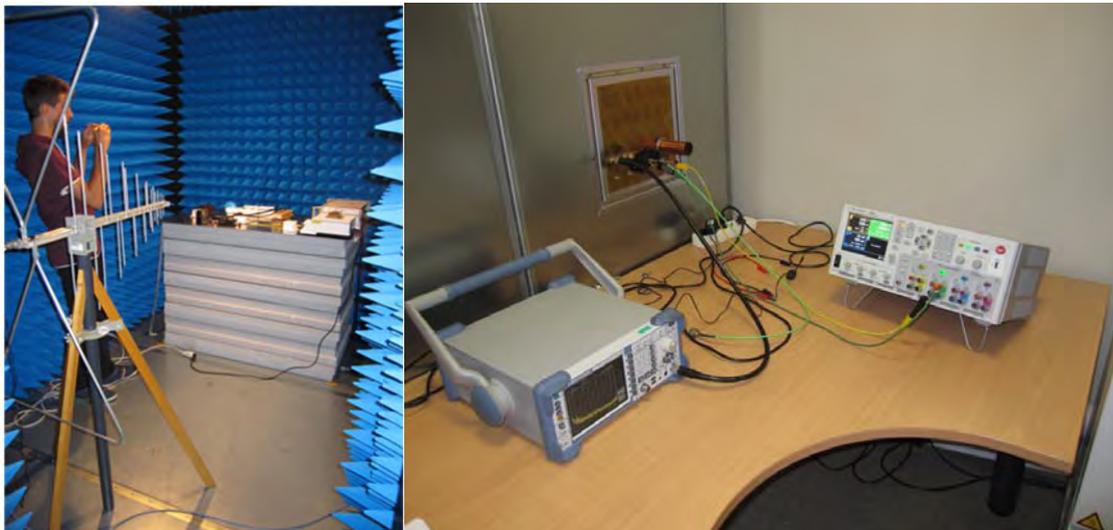


Figure 164 - Configuration de l'environnement de mesure : dans la cage (à gauche) et hors de la cage (à droite)

3.3.3.5.2. MESURES D'EMISSIONS CONDUITES SUR BOITIER HMEC

Les figures Figure 165 et Figure 166 présentent le banc de mesure d'émission conduite. Le courant circulant sur les faisceaux de câble est mesuré à l'aide d'une pince ampèremétrique (MD4070) placée soit autour du

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

faisceau d'alimentation, soit autour du faisceau de charge, entre 5 et 10 cm de l'Équipement Sous Test (EST). Les faisceaux sont positionnés à 5 cm au-dessus du plan conducteur. L'extrémité du faisceau d'alimentation est connectée à un Réseau Stabilisateur Impédance de Ligne (RSIL). La mesure est effectuée sur les fréquences de 150kHz à 150MHz.

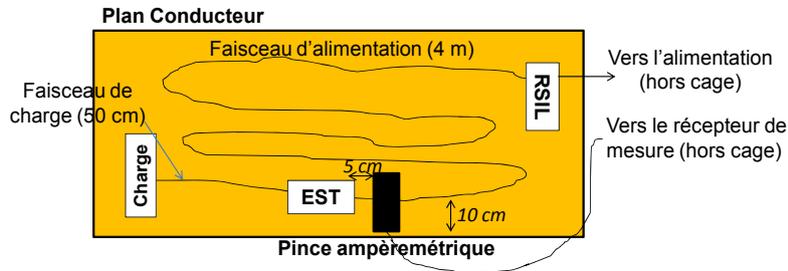


Figure I 65. Banc de mesure d'émission conduite sur le faisceau d'alimentation.

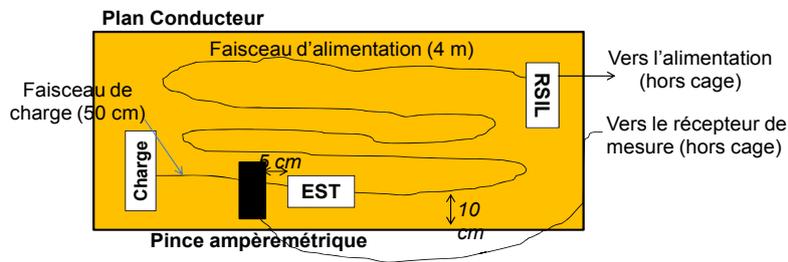


Figure I 66. Banc de mesure d'émission conduite sur le faisceau de charge.

La norme DO160-G présente deux limites d'émissions différentes : une pour le côté alimentation (« Power Lines ») plus restrictive que la deuxième, pour le côté sous-systèmes (« Bundle Lines »). Pour un équipement standard embarqué sur avion, l'alimentation provient du système avionique qu'il ne doit surtout pas perturber, d'où la limite plus restrictive. Bien que notre système ne soit pas relié directement aux systèmes de l'avion, les résultats sont donnés en comparant les deux gabarits d'émission conduite (« Power Lines » et « Bundle Lines »).

RESULTATS DES MESURES D'EMISSION CONDUITE

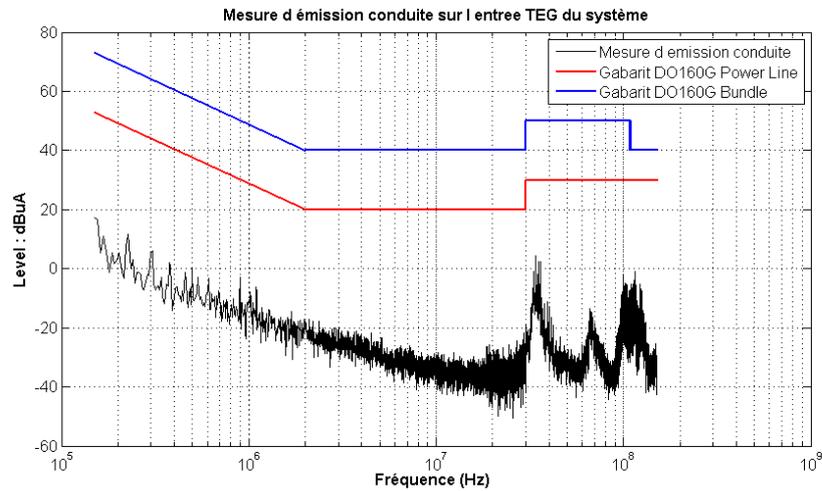


Figure 167. Résultat de la mesure d'émission du faisceau d'alimentation du HMEC.

L'entrée du HMEC est peu perturbée (Figure 167), les quelques pics visibles à partir de 30MHz sont proches du bruit de fond de la mesure. Ce résultat est prévisible : l'entrée du HMEC est composée du LTC3105 dont la fréquence de hachage pour réaliser l'adaptation d'impédance est autour de 10kHz et un condensateur de 10 μ F est positionné sur cette entrée. Les perturbations haute fréquence pouvant être générées sont donc faibles.

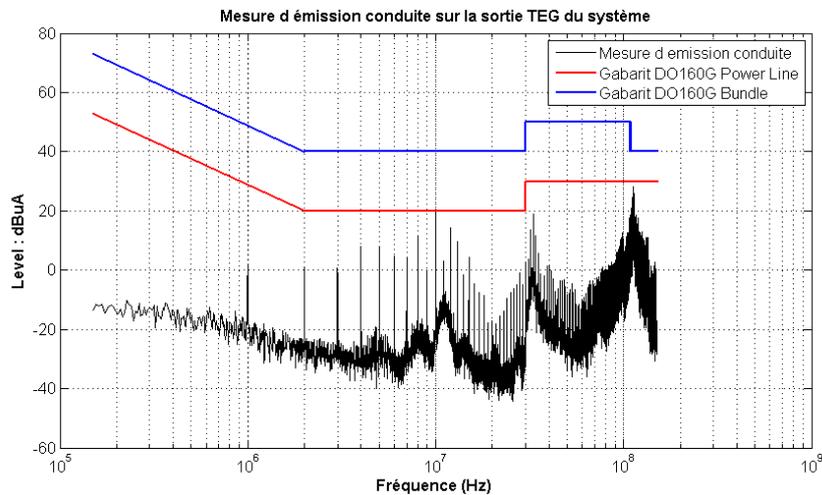


Figure 168. Résultat de la mesure d'émission du faisceau de charge du HMEC.

La sortie du HMEC présente par contre un pic à 1 MHz suivi de pics aux harmoniques. Ces perturbations sont dues au régulateur de sortie utilisé (LT3539) qui a une fréquence de découpage de 1MHz quand il fonctionne à fort courant. Le niveau des perturbations est néanmoins suffisamment bas pour respecter la limite d'émission conduite de la norme.

3.3.3.5.3. MESURES EN MODE RAYONNE SUR BOITIER HMEC

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

La Figure 169 présente le banc de mesure d'émission rayonnée. Le champ électromagnétique produit par l'équipement sous test et les différents câbles, est mesuré à l'aide d'une antenne placée à 1m de l'équipement. L'antenne (Schaffner UPA6190B) est de type Bilog et possède une polarisation rectiligne. Deux orientations d'antenne sont testées : une orientation verticale pour mesurer le champ électrique polarisé verticalement, et une orientation horizontale pour mesurer le champ électrique polarisé horizontalement.

La mesure a été effectuée entre 100 MHz et 1 GHz. Les mesures d'émission rayonnée n'ont pas été effectuées au-delà pour des raisons matérielles. De plus les mesures ont montré que le bruit produit par le système devenait négligeable au-delà de plusieurs centaines de MHz.

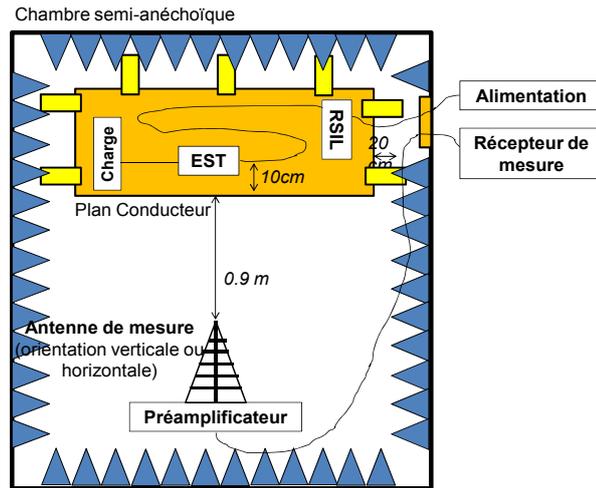


Figure 169 - Banc de mesure d'émission rayonnée

RESULTATS DES MESURES D'EMISSION RAYONNEE

Les Figure 170 et Figure 171 présentent les mesures selon les deux polarisations, horizontale et verticale.

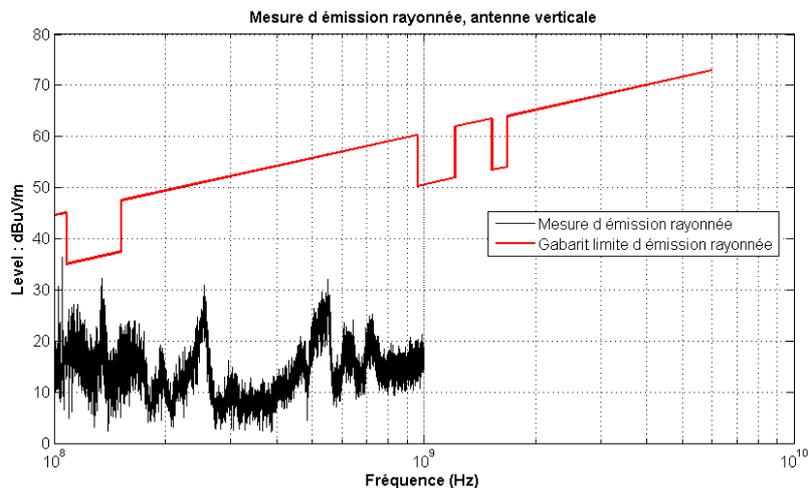


Figure 170. Résultat de la mesure d'émission du faisceau d'alimentation du HMEC avec une antenne orientée verticalement.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

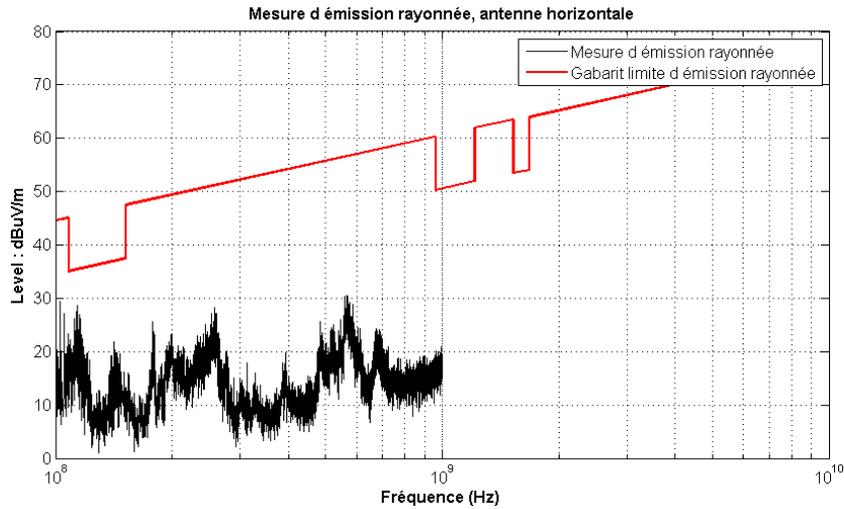


Figure 171. Résultat de la mesure d'émission du faisceau d'alimentation du HMEC avec une antenne orientée horizontalement.

En termes de perturbations rayonnées, notre système reste bien en dessous de la limite de la norme.

3.3.3.5.4. CONCLUSION DES TESTS CEM

Même si le système conçu est de faible puissance, la présence d'un régulateur à découpage amène des perturbations hautes fréquences qui sont assez proches des limites fixées par la norme aéronautique DO160-G.

Le HMEC n'a pas été pensé pour réduire les émissions conduites ou rayonnées. Néanmoins, pour un système de récupération d'énergie de plus forte puissance pour l'aéronautique, ou pour tout autre domaine où les aspects CEM doivent être pris en compte, cette contrainte doit être considérée avec sérieux et être intégrée lors de la conception du système.

3.4. INTEGRATION AU SOL DU SYSTEME SHM

Avant l'installation du système à bord de l'avion, des tests d'intégration au sol ont été menés avec le datalogger HMSS. Ces essais ont eu pour but de vérifier le bon fonctionnement des différents appareils une fois connectés ensemble, avec la même longueur de câbles les reliant que celle qui sera utilisée une fois installé dans l'avion. Les appareils sont visibles Figure 172.

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

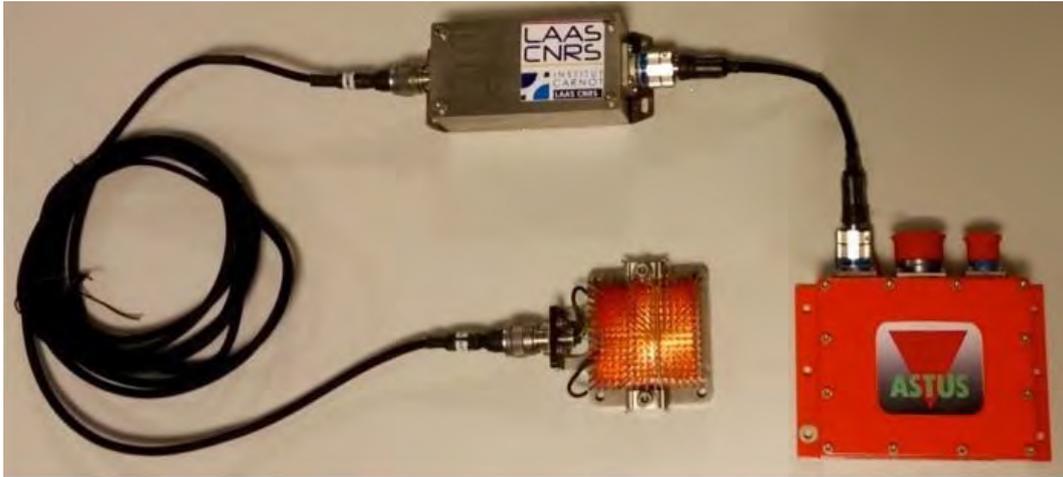


Figure 172. Photo du dispositif d'essai d'intégration. Le TEG est connecté au HMEC (libellé « LAAS ») qui alimentera le HMSS (libellé "ASTUS").

Afin de réaliser les tests souhaités, nous avons eu besoin de faire varier rapidement la température appliquée au TEG. Ce dernier n'a donc pas été placé en étuve à température contrôlée mais simplement sur une plaque chauffante, à l'air libre.

Le principal but de l'essai a été de vérifier que le HMSS pouvait basculer d'une source d'alimentation à l'autre (du HMEC au réseau avion) sans interruption de son fonctionnement, ce qui se serait traduit par un redémarrage. L'alimentation avion a été remplacée par une alimentation stabilisée, et le bon fonctionnement du HMSS a été vérifié par un envoi continu de données du datalogger à un ordinateur.

Le résultat de cet essai est visible Figure 173. Dans un premier temps, nous avons vérifié que le HMSS bascule son alimentation du réseau avion au HMEC quand l'énergie stockée y est suffisante. Nous pouvons observer que la tension aux bornes des supercondensateurs de stockage augmente et que la sortie régulée du HMEC s'active quand cette tension atteint 2,5V. Le HMSS attend que le maximum de 4,4V soit atteint avant de s'alimenter sur cette source. Une fois cette étape atteinte, nous avons retiré le TEG de la plaque chauffante.

La deuxième étape de l'essai a consisté à vérifier que l'alimentation du HMSS rebasculait du HMEC au réseau avion lorsque l'énergie stockée dans le HMEC devient trop faible. Cela s'effectue quand la tension du stockage atteint 1,5V, gardant ainsi une marge de sécurité (la tension régulée est désactivée quand la tension du stockage passe sous la barre des 1V).

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

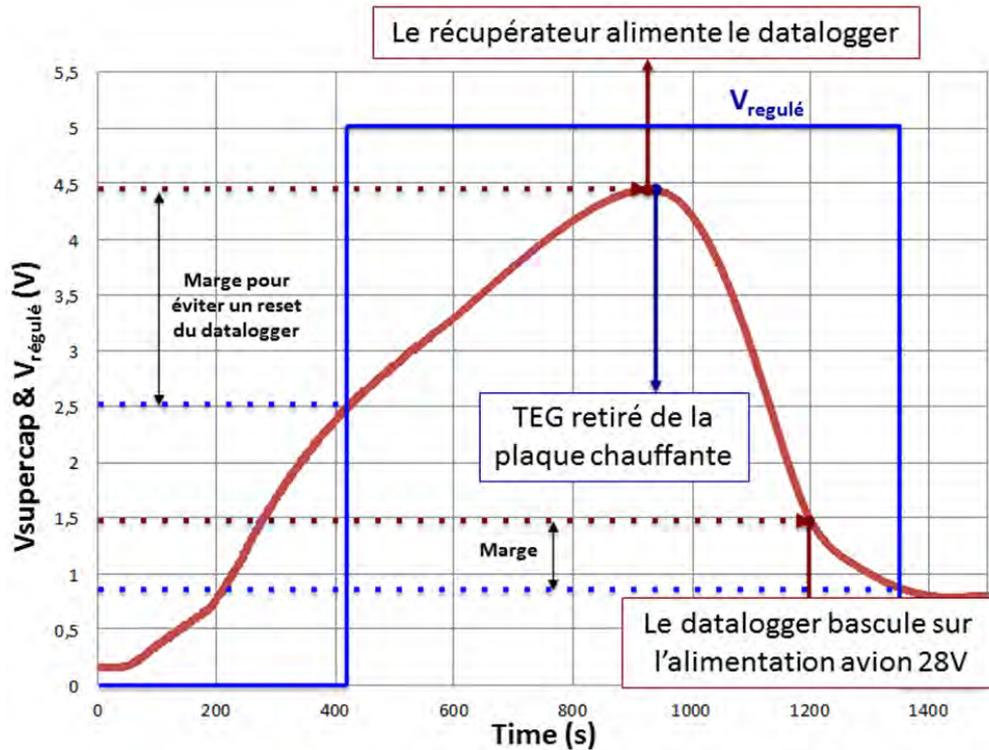


Figure 173. Résultats du test d'intégration. La courbe rouge représente la tension aux bornes des supercondensateurs de stockage. La courbe bleue est la tension en sortie du HMEC.

Ce test d'intégration a permis de valider le bon fonctionnement du système en montrant que le HMSS peut être alimenté par le HMEC, et changer de source d'alimentation lorsque cela est nécessaire, sans provoquer d'interruption de fonctionnement du système.

3.5. INSTALLATION DANS LE MAT REACTEUR

Le thermogénérateur a été installé dans le mât réacteur de l'A380 servant à réaliser les essais en vol et est visible Figure 174. A l'heure de la fin de rédaction de ce document, le système complet n'est pas entièrement mis en place dans l'appareil et nous n'avons donc pas de résultats de fonctionnement.



Figure 174. Le module thermogénérateur fixé dans le mât réacteur de l'A380 d'essai, non connecté au reste du système.

3.6. CONCLUSION

La récupération thermoélectrique n'est pas une technologie nouvelle et les exemples d'utilisation pour alimenter des capteurs autonomes ne sont pas difficiles à trouver.

Cependant, les études sur des systèmes qui ont abouti à une application concrète à bord d'un appareil sont plus difficiles à trouver. On peut imaginer qu'une des principales raisons est le manque d'opportunité d'arriver au stade du prototype installable. Néanmoins, à la lecture de telles recherches, on se rend compte que la simple étude et conception d'un système de récupération thermoélectrique, sans visée d'installation réelle, omet souvent des aspects pratiques de mise en œuvre pourtant indispensables à la conception d'un tel système.

La prise en compte des conditions très dures de la zone d'installation (vibrations, températures, installation dans l'appareil, foudre) et des contraintes de sécurités inhérentes à ce type de projet (éventualité d'incendie, respects de limites d'émission CEM, etc.) est indispensable dès le début de la conception pour s'assurer du respect des normes aéronautiques et de la fiabilité du système lors du vol. De plus, l'intégration de ces éléments mène à une dégradation des performances et à une augmentation de la masse du récupérateur qui sont pourtant des paramètres critiques si l'on veut réellement déployer des capteurs autoalimentés à bord d'un avion.

A travers notre travail, nous avons montré que la réalisation d'une alimentation thermoélectrique pour l'alimentation d'un système de capteurs de surveillance de structure est possible. L'impératif de fiabilité et l'ignorance des conditions réelles de vol a conduit à la conception d'un circuit ayant des performances globalement inférieures à l'état de l'art, et ce choix était inévitable. Néanmoins, les performances de notre récupérateur

Deuxième cas d'étude : récupérateur thermoélectrique pour la surveillance de structure aéronautique

permettent d'alimenter un système de SHM sur le long terme, pourvu qu'il soit conçu dans l'optique d'être alimenté par une telle source.

Plus généralement, l'utilisation de technologies de récupération d'énergie thermoélectrique pour l'alimentation de capteurs dans l'aéronautique a des avantages indéniables dans certains cas d'utilisation. Pour que cette technique se développe, il faut que la conception du récupérateur et du système de capteurs se fasse conjointement.

Un récupérateur comme celui que nous avons conçu est imposant et massif. Une meilleure connaissance des conditions de températures et une réduction de la consommation de la charge à alimenter (qui a été conçu pour une alimentation par le réseau avion) permettrait de réduire sa taille en l'ajustant aux besoins. Le développement d'une connectique adaptée permettrait aussi de réduire la taille des équipements. Réduire la masse et les dimensions d'un récupérateur est crucial pour l'avenir de cette technologie dans l'aéronautique.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le développement de l'électronique, et conjointement de l'informatique et de l'automatique, a permis une révolution technique et technologique qui a débuté il y a environ 50 ans. Les progrès réalisés en micro et nanoélectronique depuis les années 2000 sur les MEMS et les méthodes de production de l'électronique continuent ces évolutions techniques qui ne semblent, pour l'instant, pas près de s'arrêter. Les nouvelles possibilités qui sont apparues avec ces technologies ont mené à des innovations innombrables dans tous les domaines : électronique grand public et industrielle, appareils médicaux, nouveaux matériaux de structure ou de revêtement, etc.

Le travail que nous avons présenté se situe au cœur de ces innovations et vise à faire profiter le domaine de l'aviation des nouveaux usages permis par l'électronique actuelle. Ces travaux, financés via Airbus et le plan d'investissement d'avenir pour proposer des solutions innovantes pour l'aéronautique, ont cherché à concrétiser l'installation de réseaux de capteurs sans fil et sans batterie rendus autonomes grâce à la récupération d'énergie.

Dans ce mémoire, nous avons commencé par présenter la problématique des réseaux de capteurs sans fil autonomes. Nous avons ensuite dressé l'état de l'art des moyens d'atteindre cette autonomie énergétique, qui est le verrou technologique principal, en présentant les technologies de stockage, de récupération et de gestion de l'énergie. Nous avons conclu ce premier chapitre en détaillant les conditions difficiles que peut subir un réseau de capteurs autoalimenté dans le contexte particulier de l'aéronautique, et en soulignant les opportunités que ce milieu présente en termes de récupération d'énergie.

Les deux autres chapitres présentent chacun les deux études que nous avons menées pour concevoir une alimentation basée sur la capture de l'énergie ambiante au sein d'un avion :

1. Une alimentation photovoltaïque située sur l'extrados de l'aile d'un A321 où le système doit résister aux températures froides, à la basse pression et fournir une puissance de 2W.
2. Une alimentation thermoélectrique située dans le mât réacteur d'un A380 où le système doit résister aux températures élevées, aux vibrations, à la basse pression et fournir une puissance de quelques dizaines de milliwatts.

La première étude nous a conduits à réaliser des choix technologiques sur des critères rarement évalués dans les applications de récupération d'énergie photovoltaïque classiques :

- Nous avons cherché quelle technologie de panneaux photovoltaïques souples et fins fournit le meilleur rendement à basse luminosité, correspondant à un temps nuageux, puisque notre problématique n'est pas de maximiser la puissance récupérée, mais de garantir une puissance minimum par tous les temps.
- Nous avons mesuré et évalué la possibilité d'utilisation de supercondensateurs hors de leur plage de températures, au froid comme au chaud.

Nous avons finalement mené une réflexion sur l'amélioration du stockage de l'énergie par des supercondensateurs en poussant une étude sur une architecture qui maximise l'autonomie fournie pour un nombre limité de condensateurs.

La deuxième étude nous a amené à concevoir un récupérateur thermoélectrique extrêmement robuste qui puisse survivre et fonctionner dans le mât réacteur, une zone particulièrement difficile en termes de vibrations, bruit, température, etc. et d'une grande exigence en termes de sécurité.

Ces deux études ont abouti à des systèmes fonctionnels qui ont été installés sur des appareils pour un test en conditions réelles. Bien que reposant sur des sources d'énergie différentes et délivrant des niveaux de puissance

Conclusion générale

différents, le principe de conception des circuits est assez similaire, car devant répondre à des exigences également similaires.

Leur architecture contient chacune quatre étages de base (convertisseur d'entrée, stockage, convertisseur de sortie, logique de contrôle), et les deux circuits utilisent des supercondensateurs comme moyens de stockage de l'énergie en raison des températures extrêmes régnant à leur lieu d'installation. Cette conception classique a été choisie afin de garantir un maximum de fiabilité aux systèmes pour qu'ils puissent fonctionner dans les conditions très défavorables dans lesquelles ils sont installés. Néanmoins, l'architecture robuste utilisée a permis aux systèmes d'assurer l'alimentation demandée, l'un dans les conditions réelles et l'autre lors de tests poussés au sol les essais en vol étant imminent à la date de rédaction du document..

Ainsi, si les technologies et les concepts employés restent classiques, nous avons mené, pour chacun des systèmes, une étude pluridisciplinaire complète pour concevoir l'ensemble du récupérateur et garantir au maximum leur bon fonctionnement et leur robustesse une fois installés, puisque toute maintenance ou réparation est quasiment impossible une fois les vols d'essais commencés.

Ces deux prototypes ont donc prouvé qu'un système de réseaux de capteurs sans fil sur avion peut être alimenté via une récupération de l'énergie ambiante.

Enfin, si une installation à grande échelle de ce principe est un jour envisagée, des améliorations nécessaires devront être apportées : la conception du récupérateur doit se faire en même temps que celle de la charge à alimenter, ou au moins, des spécifications précises doivent être fournies pour pouvoir dimensionner de manière optimale le stockage en fonction des pics de consommation, de la consommation globale, prendre en compte les protections à ajouter, etc. Il est par nature très difficile de faire un système de récupération d'énergie générique et performant. Toujours dans l'optique d'un développement à grande échelle, la conception mécanique doit également faire l'objet d'une grande attention : il faut par exemple alléger au maximum la masse du système afin qu'il ne soit pas plus lourd que le câble de puissance qu'il est censé remplacer, effaçant ainsi tout gain d'utilisation d'un récupérateur d'énergie.

De manière générale, il faudra sûrement développer des normes spécifiques en termes de fixation (percer à travers une structure comme nous l'avons fait n'est pas partout faisable, par exemple dans le cas d'une structure en composite) et de connectique (le connecteur que nous utilisons est massif et est responsable d'une partie importante du poids du récupérateur, directement ou indirectement à travers les systèmes de fixations qu'il a fallu mettre en place pour l'utiliser) afin de pouvoir réaliser des récupérateurs petits, robustes, fiables et légers.

LISTE DE PUBLICATIONS

Le travail présenté dans ce document a fait l'objet de publications et de présentation dans les journaux et conférences suivants :

- P. Durand-Estèbe, V. Boitier, M. Bafleur, J. M. Dilhac, S. Berhouet, **Power supply for a wireless sensor network: Airliner flight test case study**, Journal of Energy and Power Engineering, Vol.8, N° 12, pp.2058-2064, Décembre 2014 , N° 14631.
- P. Durand-Estèbe, V. Boitier, M. Bafleur, J. M. Dilhac, **Thermoelectric harvester to power SHM sensors in aircraft pylon**, Journées Nationales sur la Récupération et le Stockage d'Energie (JNRSE'15) 2015, Orsay (France),
- P. Durand-Estèbe, V. Boitier, S. Berhouet, B. Labrouse, M. Bafleur, J. M. Dilhac, **Energy harvesting for wireless in flight testing on A321 Aircraft**, More Electric Aircraft (MEA'15) 2015, Toulouse (France)
- P. Durand-Estèbe, V. Boitier, M. Bafleur, J. M. Dilhac, S. Berhouet, **Photovoltaic power supply for an airliner wireless sensor network**, IDTechEx Energy Harvesting and Storage 2014, Berlin (Allemagne), Prix du meilleur Poster
- V. Boitier, P. Durand-Estèbe, R.Monthéard, M. Bafleur, J. M. Dilhac, **Under voltage lock-out design rules for proper start-up of energy autonomous systems powered by supercapacitors**, Journal of Physics Conference Series, vol. 476, n° 1, p. 012121, déc. 2013.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] « Gartner's 2015 Hype Cycle for Emerging Technologies Identifies the Computing Innovations That Organizations Should Monitor ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.gartner.com/newsroom/id/3114217>. [Consulté le: 15-janv-2016].
- [2] « Gartner's 2013 Hype Cycle for Emerging Technologies Maps Out Evolving Relationship Between Humans and Machines ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2575515>. [Consulté le: 07-sept-2015].
- [3] « Automotive Sensors and Electronics 2015 -- Conference and Expo ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.automotivesensors2015.com/>. [Consulté le: 15-janv-2016].
- [4] C. Neagle, « MWC 2015: Solar panels built into smartphone screen », *Network World*, 05-mars-2015. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.networkworld.com/article/2893712/opensource-subnet/solar-panels-built-into-smartphone-screen-to-solve-the-battery-life-crisis.html>. [Consulté le: 19-janv-2016].
- [5] « Hype Cycle for Emerging Energy Technologies, 2014 ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gartner.com/doc/2811929/hype-cycle-emerging-energy-technologies>. [Consulté le: 19-janv-2016].
- [6] K. Akkaya et M. Younis, « A survey on routing protocols for wireless sensor networks », *Ad Hoc Netw.*, vol. 3, n° 3, p. 325-349, mai 2005.
- [7] R. Montheard, « Récupération d'énergie aéroacoustique et thermique pour capteurs sans fil embarqués sur avion », 2014.
- [8] Q. Jiang et D. Manivannan, « Routing protocols for sensor networks », in *First IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2004. CCNC 2004*, 2004, p. 93-98.
- [9] « SOSUS The "Secret Weapon" of Undersea Surveillance ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue_25/sosus2.htm. [Consulté le: 07-sept-2015].
- [10] F. Nack, « An Overview on Wireless Sensor Networks », *Inst. Comput. Sci. ICS Freie Univ. Berl.*
- [11] « Another Myth in the Making ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.miafacts.org/sensors.htm>. [Consulté le: 02-sept-2015].
- [12] Q. Wang et I. Balasingham, « Wireless Sensor Networks - An Introduction ». [En ligne]. Disponible sur: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/12464.pdf>. [Consulté le: 02-sept-2015].
- [13] J. M. Kahn, R. H. Katz, et K. S. J. Pister, « Next Century Challenges: Mobile Networking for "Smart Dust" », in *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, New York, NY, USA, 1999, p. 271-278.
- [14] B. A. Warneke, M. D. Scott, B. S. Leibowitz, L. Zhou, C. L. Bellew, J. A. Chediak, J. M. Kahn, B. E. Boser, et K. S. J. Pister, « An autonomous 16 mm³ solar-powered node for distributed wireless sensor networks », in *Proceedings of IEEE Sensors, 2002*, 2002, vol. 2, p. 1510-1515 vol.2.
- [15] A. A. Kumar Somappa, K. Øvsthus, et L. M. Kristensen, « An Industrial Perspective on Wireless Sensor Networks #x2014; A Survey of Requirements, Protocols, and Challenges », *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 16, n° 3, p. 1391-1412, Third 2014.
- [16] M. P. Durisic, Z. Tafa, G. Dimic, et V. Milutinovic, « A survey of military applications of wireless sensor networks », in *2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, 2012, p. 196-199.
- [17] P. Naz, S. Hengy, et P. Hamery, « Soldier detection using unattended acoustic and seismic sensors », présenté à *Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR III*, 2012, vol. 8389, p. 83890T-83890T-12.
- [18] W. M. Merrill, D. McIntire, J. Elson, et W. Kaiser, « Dynamic networking and smart sensing enable next-generation landmines », *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 3, n° 4, p. 84-90, oct. 2004.
- [19] D. Lindgren, O. Wilsson, F. Gustafsson, et H. Habberstad, « Shooter localization in wireless sensor networks », in *12th International Conference on Information Fusion, 2009. FUSION '09*, 2009, p. 404-411.
- [20] G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Ruiz, O. Marcillo, J. Johnson, J. Lees, et M. Welsh, « Deploying a wireless sensor network on an active volcano », *IEEE Internet Comput.*, vol. 10, n° 2, p. 18-25, mars 2006.
- [21] X. Hu, B. Wang, et H. Ji, « A Wireless Sensor Network-Based Structural Health Monitoring System for Highway Bridges », *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 28, n° 3, p. 193-209, mars 2013.
- [22] S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fennes, S. Glaser, et M. Turon, « Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks », in *6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007*, 2007, p. 254-263.

Bibliographie

- [23] E. Setijadi, Suwadi, B. P. Slamet, A. A. Muntaqo, In'am, A. E. Nur, P. Suprobo, Faimun, et F. A. Febry, « Design of large scale structural health monitoring system for long-span bridges based on wireless sensor network », in *2013 International Joint Conference on Awareness Science and Technology and Ubi-Media Computing (iCAST-UMEDIA)*, 2013, p. 169-174.
- [24] T. Torfs, T. Sterken, S. Brebels, J. Santana, R. van den Hoven, V. Spiering, N. Bertsch, D. Trapani, et D. Zonta, « Low Power Wireless Sensor Network for Building Monitoring », *IEEE Sens. J.*, vol. 13, n° 3, p. 909-915, mars 2013.
- [25] M. Chappell, S. K. Dove, M. W. van Iersel, P. A. Thomas, et J. Ruter, « Implementation of Wireless Sensor Networks for Irrigation Control in Three Container Nurseries », *HortTechnology*, vol. 23, n° 6, p. 747-753, janv. 2013.
- [26] J. Haule et K. Michael, « Deployment of wireless sensor networks (WSN) in automated irrigation management and scheduling systems: a review », in *2014 Pan African Conference on Science, Computing and Telecommunications (PACT)*, 2014, p. 86-91.
- [27] S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fennes, S. Glaser, et M. Turon, « Structural Health Monitoring of the Golden Gate Bridge », *Structural Health Monitoring of the Golden Gate Bridge*, English. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.cs.berkeley.edu/~binetude/ggb/>. [Consulté le: 08-sept-2015].
- [28] « Millennial Net - Wireless Energy Sub-Meter Wi-LEM ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.millennialnet.com/Energy-Management/Products/Wi-LEM.aspx>. [Consulté le: 08-sept-2015].
- [29] « Jennic Wireless Microcontrollers | Products | Modules | JN5148 Modules ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.jennic.com/products/modules/>. [Consulté le: 09-sept-2015].
- [30] J. A. Paradiso et T. Starner, « Energy scavenging for mobile and wireless electronics », *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 4, n° 1, p. 18-27, janv. 2005.
- [31] Y.-H. Liu, X. Huang, M. Vidojkovic, K. Imamura, P. Harpe, G. Dolmans, et H. de Groot, « A 2.7nJ/b multi-standard 2.3/2.4GHz polar transmitter for wireless sensor networks », in *Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2012 IEEE International*, 2012, p. 448-450.
- [32] M. Kraemer, D. Dragomirescu, et R. Plana, « Design of a very low-power, low-cost 60 GHz receiver front-end implemented in 65 nm CMOS technology », *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, vol. 3, n° Special Issue 02, p. 131-138, avr. 2011.
- [33] A. Lecointre, D. Dragomirescu, et R. Plana, « Largely reconfigurable impulse radio UWB transceiver », *Electron. Lett.*, vol. 46, n° 6, p. 453-455, mars 2010.
- [34] F. Formosa et L. G. Fréchette, « Scaling laws for free piston Stirling engine design: Benefits and challenges of miniaturization », *Energy*, vol. 57, p. 796-808, août 2013.
- [35] C. Lee et L. G. Fréchette, « A Silicon Microturbopump for a Rankine-Cycle Power Generation Microsystem #x2014;Part I: Component and System Design », *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 20, n° 1, p. 312-325, févr. 2011.
- [36] « Advantages and limitations of the Different Types of Batteries - Battery University ». [En ligne]. Disponible sur: http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery. [Consulté le: 16-sept-2015].
- [37] R. Padbury et X. Zhang, « Lithium-oxygen batteries—Limiting factors that affect performance », *J. Power Sources*, vol. 196, n° 10, p. 4436-4444, mai 2011.
- [38] J.-S. Lee, S. Tai Kim, R. Cao, N.-S. Choi, M. Liu, K. T. Lee, et J. Cho, « Metal-Air Batteries with High Energy Density: Li-Air versus Zn-Air », *Adv. Energy Mater.*, vol. 1, n° 1, p. 34-50, janv. 2011.
- [39] « Thin Film Batteries | Blue Spark Technologies ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.bluesparktechnologies.com/>. [Consulté le: 16-sept-2015].
- [40] R. Hahn, K. Marquardt, M. Thunman, M. Topper, M. Wilke, M. Ferch, Q.-H. Huynh, et K.-D. Lang, « Silicon integrated micro batteries based on deep reactive ion etching and through silicon via technologies », in *Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2012 IEEE 62nd*, 2012, p. 1571-1577.
- [41] « Saft - MP / Petits VL ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.saftbatteries.com/fr/recherche-batterie/mp-petits-vl>. [Consulté le: 16-sept-2015].
- [42] J. Mouawad, « Report on Boeing 787 Dreamliner Battery Flaws Finds Lapses at Multiple Points », *The New York Times*, 01-déc-2014.
- [43] A. Kirubakaran, S. Jain, et R. K. Nema, « A review on fuel cell technologies and power electronic interface », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n° 9, p. 2430-2440, déc. 2009.
- [44] J. Xuan, M. K. H. Leung, D. Y. C. Leung, et M. Ni, « A review of biomass-derived fuel processors for fuel cell systems », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n° 6-7, p. 1301-1313, août 2009.

Bibliographie

- [45] Demirci Umit Bilge, « Piles à combustible alimentées par un combustible liquide », *Tech. Ing. Innov. En Nouv. Énerg.*, vol. base documentaire : TIB503DUO, n° ref. article : re93, sept. 2007.
- [46] A. Kundu, J. H. Jang, J. H. Gil, C. R. Jung, H. R. Lee, S.-H. Kim, B. Ku, et Y. S. Oh, « Micro-fuel cells—Current development and applications », *J. Power Sources*, vol. 170, n° 1, p. 67-78, juin 2007.
- [47] C. M. Miesse, W. S. Jung, K.-J. Jeong, J. K. Lee, J. Lee, J. Han, S. P. Yoon, S. W. Nam, T.-H. Lim, et S.-A. Hong, « Direct formic acid fuel cell portable power system for the operation of a laptop computer », *J. Power Sources*, vol. 162, n° 1, p. 532-540, nov. 2006.
- [48] « Intelligent Energy ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.intelligent-energy.com/our-divisions/consumer-electronics/overview/>. [Consulté le: 17-sept-2015].
- [49] « Bientôt un iPhone alimenté par une pile à hydrogène? - Libération ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.liberation.fr/economie/2015/09/07/bientot-un-iphone-alimente-par-une-pile-a-hydrogene_1377453. [Consulté le: 17-sept-2015].
- [50] S. Sundarrajan, S. I. Allakhverdiev, et S. Ramakrishna, « Progress and perspectives in micro direct methanol fuel cell », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, n° 10, p. 8765-8786, mai 2012.
- [51] E. Kjeang, N. Djilali, et D. Sinton, « Microfluidic fuel cells: A review », *J. Power Sources*, vol. 186, n° 2, p. 353-369, janv. 2009.
- [52] E. Kjeang, R. Michel, D. A. Harrington, N. Djilali, et D. Sinton, « A Microfluidic Fuel Cell with Flow-Through Porous Electrodes », *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 130, n° 12, p. 4000-4006, mars 2008.
- [53] H.-Y. Wang, A. Bernarda, C.-Y. Huang, D.-J. Lee, et J.-S. Chang, « Micro-sized microbial fuel cell: A mini-review », *Bioresour. Technol.*, vol. 102, n° 1, p. 235-243, janv. 2011.
- [54] M. Simões, S. Baranton, et C. Coutanceau, « Electro-oxidation of glycerol at Pd based nano-catalysts for an application in alkaline fuel cells for chemicals and energy cogeneration », *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 93, n° 3-4, p. 354-362, janv. 2010.
- [55] P. Sharma et T. S. Bhatti, « A review on electrochemical double-layer capacitors », *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, n° 12, p. 2901-2912, déc. 2010.
- [56] S. Bose, T. Kuila, A. K. Mishra, R. Rajasekar, N. H. Kim, et J. H. Lee, « Carbon-based nanostructured materials and their composites as supercapacitor electrodes », *J Mater Chem*, vol. 22, n° 3, p. 767-784, 2012.
- [57] M. Kaus, J. Kowal, et D. U. Sauer, « Modelling the effects of charge redistribution during self-discharge of supercapacitors », *Electrochimica Acta*, vol. 55, n° 25, p. 7516-7523, oct. 2010.
- [58] J. Kowal, E. Avaroglu, F. Chamekh, A. Šenfels, T. Thien, D. Wijaya, et D. U. Sauer, « Detailed analysis of the self-discharge of supercapacitors », *J. Power Sources*, vol. 196, n° 1, p. 573-579, janv. 2011.
- [59] R. A. Dougal, L. Gao, et S. Liu, « Ultracapacitor model with automatic order selection and capacity scaling for dynamic system simulation », *J. Power Sources*, vol. 126, n° 1-2, p. 250-257, févr. 2004.
- [60] L. Zubieta et R. Bonert, « Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, n° 1, p. 199-205, janv. 2000.
- [61] S. Kannappan, K. Kaliyappan, R. K. Manian, A. S. Pandian, H. Yang, Y. S. Lee, J.-H. Jang, et W. Lu, « Graphene based Supercapacitors with Improved Specific Capacitance and Fast Charging Time at High Current Density », *ArXiv13111548 Cond-Mat*, nov. 2013.
- [62] « Graphene Supercapacitors Ready for Electric Vehicle Energy Storage, Say Korean Engineers », *MIT Technology Review*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.technologyreview.com/view/521651/graphene-supercapacitors-ready-for-electric-vehicle-energy-storage-say-korean-engineers/>. [Consulté le: 02-oct-2015].
- [63] « A very different supercapacitor bus | Electric Vehicles Research ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.electricvehiclesresearch.com/articles/6974/a-very-different-supercapacitor-bus>. [Consulté le: 02-oct-2015].
- [64] « Maxwell Technologies Transportation Solutions: Automobile », *Maxwell Technologies*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.maxwell.com/solutions/transportation/auto>. [Consulté le: 02-oct-2015].
- [65] S. Roundy, P. K. Wright, et J. Rabaey, « A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes », *Comput. Commun.*, vol. 26, n° 11, p. 1131-1144, juill. 2003.
- [66] M. Raju et G. Mark, « Ultra Low Power Meets Energy Harvesting – White Paper - Texas Instrument ». Texas Instrument, 2010.
- [67] K. A. Cook-Chennault, N. Thambi, et A. M. Sastry, « Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems », *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, n° 4, p. 043001, août 2008.

Bibliographie

- [68] X. W. Han Xiao, « A review of piezoelectric vibration energy harvesting techniques », *Int. Rev. Mech. Eng.*, vol. 8, n° 3, p. 609-620, 2014.
- [69] S. Roundy et P. K. Wright, « A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics », *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, n° 5, p. 1131, 2004.
- [70] A. Erturk et D. J. Inman, « Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable Duffing oscillator with electromechanical coupling », *J. Sound Vib.*, vol. 330, n° 10, p. 2339-2353, mai 2011.
- [71] H. Liu, C. Lee, T. Kobayashi, C. J. Tay, et C. Quan, « A new S-shaped MEMS PZT cantilever for energy harvesting from low frequency vibrations below 30 Hz », *Microsyst. Technol.*, vol. 18, n° 4, p. 497-506, avr. 2012.
- [72] Z. Chen, Y. Yang, Z. Lu, et Y. Luo, « Broadband characteristics of vibration energy harvesting using one-dimensional phononic piezoelectric cantilever beams », *Phys. B Condens. Matter*, vol. 410, p. 5-12, févr. 2013.
- [73] M. Pozzi, A. Canziani, I. Durazo-Cardenas, et M. Zhu, « Experimental characterisation of macro fibre composites and monolithic piezoelectric transducers for strain energy harvesting », 2012, vol. 8348, p. 834832-834832-10.
- [74] « MFC ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.smart-material.com/MFC-product-main.html>. [Consulté le: 02-oct-2015].
- [75] S. P. Beeby, M. J. Tudor, et N. M. White, « Energy harvesting vibration sources for microsystems applications », *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, n° 12, p. R175, 2006.
- [76] S. Boisseau, G. Despesse, et B. Ahmed, « Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting », in *Small-Scale Energy Harvesting*, M. Lallart, Éd. InTech, 2012.
- [77] D. Kim, S. Yu, B.-G. Kang, et K.-S. Yun, « Liquid-based electrostatic energy harvester using rotational motion of ferrofluid droplets », in *2015 Transducers - 2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, 2015, p. 59-61.
- [78] Z. Yang, E. Halvorsen, et T. Dong, « Electrostatic Energy Harvester Employing Conductive Droplet and Thin-Film Electret », *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 23, n° 2, p. 315-323, avr. 2014.
- [79] G. Altena, D. Hohlfeld, R. Elfrink, M. H. Goedbloed, et R. van Schaijk, « Design, modeling, fabrication and characterization of an electret-based MEMS electrostatic energy harvester », in *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS), 2011 16th International*, 2011, p. 739-742.
- [80] P. Basset, D. Galayko, A. M. Paracha, F. Marty, A. Dudka, et T. Bourouina, « A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 19, n° 11, p. 115025, nov. 2009.
- [81] E. Halvorsen, E. R. Westby, S. Husa, A. Vogl, N. P. Ostbo, V. Leonov, T. Sterken, et T. Kvisteroy, « An electrostatic energy harvester with electret bias », 2009, p. 1381-1384.
- [82] « File:Lateral sliding mode of triboelectric nanogenerator.tif », *Wikipedia, the free encyclopedia*.
- [83] F.-R. Fan, Z.-Q. Tian, et Z. Lin Wang, « Flexible triboelectric generator », *Nano Energy*, vol. 1, n° 2, p. 328-334, mars 2012.
- [84] Z. L. Wang, « Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors », *ACS Nano*, vol. 7, n° 11, p. 9533-9557, nov. 2013.
- [85] G. Zhu, Z.-H. Lin, Q. Jing, P. Bai, C. Pan, Y. Yang, Y. Zhou, et Z. L. Wang, « Toward Large-Scale Energy Harvesting by a Nanoparticle-Enhanced Triboelectric Nanogenerator », *Nano Lett.*, vol. 13, n° 2, p. 847-853, févr. 2013.
- [86] T.-C. Hou, Y. Yang, H. Zhang, J. Chen, L.-J. Chen, et Z. Lin Wang, « Triboelectric nanogenerator built inside shoe insole for harvesting walking energy », *Nano Energy*, vol. 2, n° 5, p. 856-862, sept. 2013.
- [87] « GT | Georgia Institute of Technology - News Center - Harvesting Electricity: Triboelectric Generators Capture Wasted Power ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.news.gatech.edu/2013/12/07/harvesting-electricity-triboelectric-generators-capture-wasted-power>. [Consulté le: 02-oct-2015].
- [88] « Disney Research » Paper Generators: Harvesting Energy from Touching, Rubbing and Sliding ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.disneyresearch.com/project/paper-generators/>. [Consulté le: 02-oct-2015].
- [89] « Perpetuum Wireless Power Solutions ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.perpetuum.com/products/>. [Consulté le: 07-oct-2015].
- [90] « Ferro Solutions ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.ferrosi.com/>. [Consulté le: 07-oct-2015].
- [91] « NREL: Photovoltaics Research Home Page ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.nrel.gov/pv/>. [Consulté le: 07-oct-2015].

Bibliographie

- [92] E. Donchev, J. S. Pang, P. M. Gammon, A. Centeno, F. Xie, P. K. Petrov, J. D. Breeze, M. P. Ryan, D. J. Riley, et N. M. Alford, « The rectenna device: From theory to practice (a review) », *MRS Energy Sustain. - Rev. J.*, vol. 1, 2014.
- [93] H. Sun, Y.-X. Guo, M. He, et Z. Zhong, « Design of a High-Efficiency 2.45-GHz Rectenna for Low-Input-Power Energy Harvesting », *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 11, p. 929-932, 2012.
- [94] M. Pinuela, P. D. Mitcheson, et S. Lucyszyn, « Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, n° 7, p. 2715-2726, juill. 2013.
- [95] A. Cuadras, M. Gasulla, et V. Ferrari, « Thermal energy harvesting through pyroelectricity », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 158, n° 1, p. 132-139, mars 2010.
- [96] Y. Yang, W. Guo, K. C. Pradel, G. Zhu, Y. Zhou, Y. Zhang, Y. Hu, L. Lin, et Z. L. Wang, « Pyroelectric Nanogenerators for Harvesting Thermoelectric Energy », *Nano Lett.*, vol. 12, n° 6, p. 2833-2838, juin 2012.
- [97] J.-H. Lee, K. Y. Lee, M. K. Gupta, T. Y. Kim, D.-Y. Lee, J. Oh, C. Ryu, W. J. Yoo, C.-Y. Kang, S.-J. Yoon, J.-B. Yoo, et S.-W. Kim, « Highly Stretchable Piezoelectric-Pyroelectric Hybrid Nanogenerator », *Adv. Mater.*, vol. 26, n° 5, p. 765-769, févr. 2014.
- [98] GOUPIL Christophe, OUERDANE Henni, et APERTET Yann, « Thermoélectricité Thermodynamique et applications », *Tech. Ing. Nouv. Technol. Énerg. Renouvelables Stock.*, vol. base documentaire : TIB594DUO, n° ref. article : be8080, avr. 2013.
- [99] V. Rajkumar, J. DurgaManian, Hariharavarshan, et R. K. Sathindran, « Recovering energy from the exhaust heat in vehicles using thermo electric generator », in *2015 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2015, p. 1-5.
- [100] Y. Wang, C. Dai, et S. Wang, « Theoretical analysis of a thermoelectric generator using exhaust gas of vehicles as heat source », *Appl. Energy*, vol. 112, p. 1171-1180, déc. 2013.
- [101] « Industrial Power | Industrial Waste Heat Recovery | Il-VI Marlow ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.marlow.com/industries/industrial/exhaust-waste-heat-recovery.html>. [Consulté le: 13-oct-2015].
- [102] D. M. Rowe, « Thermoelectric harvesting of low temperature natural/waste heat », in *AIP Conference Proceedings*, 2012, vol. 1449, p. 485-492.
- [103] H. Bottner, « Micropelt miniaturized thermoelectric devices: small size, high cooling power densities, short response time », in *24th International Conference on Thermoelectrics, 2005. ICT 2005*, 2005, p. 1-8.
- [104] « Micropelt Thermogenerator ». [En ligne]. Disponible sur: <http://micropelt.com/thermogenerator.php>. [Consulté le: 25-août-2015].
- [105] « KELK Ltd. > Product information on thermo modules ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.kelk.co.jp/english/generation/data_1.html#data_1_1. [Consulté le: 03-nov-2015].
- [106] N. Bailly, J.-M. Dilhac, C. Escriba, C. Vanhecke, N. Mauran, et M. Bafleur, « Energy Scavenging Based On Transient Thermal Gradients: Application To Structural Health Monitoring Of Aircrafts. », présenté à 8th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2008), Sendai, Japan, 2008.
- [107] D. Samson, T. Otterpohl, M. Kluge, U. Schmid, et T. Becker, « Aircraft-Specific Thermoelectric Generator Module », *J. Electron. Mater.*, vol. 39, n° 9, p. 2092-2095, nov. 2009.
- [108] C. R. Bowen, J. Taylor, E. LeBoulbar, D. Zabeck, A. Chauhan, et R. Vaish, « Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications », *Energy Environ. Sci.*, vol. 7, n° 12, p. 3836-3856, nov. 2014.
- [109] A. Arnaud, S. Boisseau, S. Monfray, O. Puscasu, G. Despesse, J. Boughaleb, Y. Sanchez, F. Battegay, M. Fourel, S. Audran, F. Boeuf, J. Delamare, G. Delepierre, G. Pitone, et T. Skotnicki, « Piezoelectric and electrostatic bimetal-based thermal energy harvesters », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 476, n° 1, p. 012062, 2013.
- [110] « Voltage doubler », *Wikipedia, the free encyclopedia*. 09-sept-2015.
- [111] C. Vanhecke, L. Assouere, A. Wang, P. Durand-Estebe, F. Caignet, J.-M. Dilhac, et M. Bafleur, « Multisource and Battery-free Energy Harvesting Architecture for Aeronautics Applications », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. Early Access Online, 2014.
- [112] F. Maiorca, F. Giusa, C. Trigona, B. Andò, A. R. Bulsara, et S. Baglio, « Diode-less mechanical H-bridge rectifier for “zero threshold” vibration energy harvesters », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 201, p. 246-253, oct. 2013.
- [113] A. Tariq et J. Asghar, « Development of an Analog Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Panel », in *International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005*, 2005, vol. 1, p. 251-255.

Bibliographie

- [114] W.-M. Lin, C.-M. Hong, et C.-H. Chen, « Neural-Network-Based MPPT Control of a Stand-Alone Hybrid Power Generation System », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, n° 12, p. 3571-3581, déc. 2011.
- [115] I. Doms, Merken, et C. Van Hoof, « Comparison of DC-DC-converter architectures of power management circuits for thermoelectric generators », in *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, 2007, p. 1-5.
- [116] J. Kim, J. Kim, et C. Kim, « A Regulated Charge Pump With a Low-Power Integrated Optimum Power Point Tracking Algorithm for Indoor Solar Energy Harvesting », *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 58, n° 12, p. 802-806, déc. 2011.
- [117] P. Durand-Estebe, V. Boitier, M. Bafleur, J.-M. Dilhac, et S. Berhouet, « Power supply for a wireless sensor network: Airliner flight test case study », in *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), 2014 International*, 2014, p. 707-711.
- [118] S. Boisseau, P. Gasnier, M. Gallardo, et G. Despesse, « Self-starting power management circuits for piezoelectric and electret-based electrostatic mechanical energy harvesters », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 476, n° 1, p. 012080, 2013.
- [119] C. Carvalho et N. Paulino, « Start-up circuit for low-power indoor light energy harvesting applications », *Electron. Lett.*, vol. 49, n° 10, p. 669-671, mai 2013.
- [120] T. Becker, M. Kluge, J. Schalk, T. Otterpohl, et U. Hilleringmann, « Power management for thermal energy harvesting in aircrafts », in *2008 IEEE Sensors*, 2008, p. 681-684.
- [121] « ANSMANN - Rechargeable Battery, Nickel Metal Hydride, 2400 mAh, 1.2 V, AA, Raised Positive and Flat Negative ». [En ligne]. Disponible sur: <http://in.element14.com/ansmann/5030542/battery-nimh-aa-2400mah-pk2/dp/1662647>. [Consulté le: 02-févr-2016].
- [122] « Pile-bouton rechargeable Lithium 3.6 V Conrad energy LIR2450 120 mAh ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.conrad.fr/ce/fr/product/252237/Pile-bouton-rechargeable-Lithium-36-V-Conrad-energy-LIR2450-120-mAh-1-pcs>. [Consulté le: 02-févr-2016].
- [123] V. Boitier, P. D. Estèbe, R. Monthéard, M. Bafleur, et J. M. Dilhac, « Under Voltage Lock-Out Design Rules for Proper Start-Up of Energy Autonomous Systems Powered by Supercapacitors », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 476, n° 1, p. 012121, déc. 2013.
- [124] J. Madsen, E. Anagnostou, S. Engel, D. Hoitsma, J. Nardiello, et J. Papazian, « Overview of the DARPA Structural Integrity Prognosis System (SIPS) », in *51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2010.
- [125] S. Maley, J. Plets, et N. D. Phan, « US Navy Roadmap to Structural Health and Usage Monitoring – The Present and Future », in *American Helicopter Society 63 rd Annual Forum*, Virginia Beach, 2007.
- [126] R. D. Finlayson, M. Friesel, M. Carlos, P. Cole, et J. C. Lenain, « Health Monitoring of Aerospace Structures with Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonics », in *15th World Conference on NDT*, Rome, 2000.
- [127] K. J. Atherton, C. Paget, E. W. O'Brien, et Airbus UK, « Structural Health Monitoring of Metal Aircraft Structures with Modified Acoustic Emission », in *SEM X International Congress & Exposition on Experimental & Applied Mechanics*, 2004.
- [128] Christian Lerouge, « Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats-Unis », *SCIENCES PHYSIQUES ETATS-UNIS, Nanoscience, Microélectronique, Matériaux*, Etats-Unis, 2006.
- [129] SLAOUI Abdelilah, « Électricité photovoltaïque Principes », *Tech. Ing. Nouv. Technol. Énerg. Renouvelables Stock.*, vol. base documentaire : TIB594DUO, n° ref. article : be8578, janv. 2013.
- [130] L. Protin et S. Astier, « Convertisseurs photovoltaïques », *Tech. Ing. Traité Convert. Mach. Électr.*, p. 1-21, août 1997.
- [131] D. Meekhun, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique. », 2011.
- [132] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, et E. R. Filho, « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, n° 5, p. 1198-1208, mai 2009.
- [133] N. H. Reich, W. Van Sark, E. A. Alsema, S. Y. Kan, S. Silvester, A. S. H. Van der Heide, R. W. Lof, et R. E. I. Schropp, « Weak light performance and spectral response of different solar cell types », in *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2005, p. 2120-2123.
- [134] E. Skoplaki et J. A. Palyvos, « On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations », *Sol. Energy*, vol. 83, n° 5, p. 614-624, mai 2009.

Bibliographie

- [135] L. El Chaar, L. A. lamont, et N. El Zein, « Review of photovoltaic technologies », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n° 5, p. 2165-2175, juin 2011.
- [136] « Difference between monocrystalline polycrystalline and Amorphous thin film solar cell? | Solar Products Store - A division of Huntsville Solar Works. Huntsville, AL 256.701.1425 ». .
- [137] « SunPower - La meilleure technologie solaire à votre service ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.sunpower.fr/>. [Consulté le: 30-nov-2015].
- [138] « PowerFilm - lightweight, thin, flexible solar panels ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.powerfilmsolar.com/>. [Consulté le: 30-nov-2015].
- [139] « SolbianFlex, SP50 L module ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.solbian.eu/index.php?option=com_k2&view=item&id=47:sp-50-l&Itemid=301&lang=en. [Consulté le: 30-nov-2015].
- [140] J. L. Cruz-Campa, G. N. Nielson, P. J. Resnick, C. A. Sanchez, P. J. Clews, M. Okandan, T. Friedmann, et V. P. Gupta, « Ultrathin Flexible Crystalline Silicon: Microsystems-Enabled Photovoltaics », *IEEE J. Photovolt.*, vol. 1, n° 1, p. 3-8, juill. 2011.
- [141] C.-C. Lin, Y.-J. Chuang, W.-H. Sun, C. Cheng, Y.-T. Chen, Z.-L. Chen, C.-H. Chien, et F.-H. Ko, « Ultrathin single-crystalline silicon solar cells for mechanically flexible and optimal surface morphology designs », *Microelectron. Eng.*, vol. 145, p. 128-132, sept. 2015.
- [142] « Using Gallium Arsenide to produce the world's thinnest and highest efficiency solar cells Learn and understand how Alta Devices creates the world's most efficient solar cells », *Alta Devices*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.altadevices.com/technology-overview/>. [Consulté le: 09-déc-2015].
- [143] « REGLEMENTATIONS – Directive RoHS | Eco-3e ». .
- [144] « Global Solar Energy - POWER the Possibilities ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.globalsolar.com/>. [Consulté le: 30-nov-2015].
- [145] « File:StructureM]etspectre.png », *Wikipedia, the free encyclopedia*. .
- [146] « EPFL QUARTIER NORD SwissTech Convention Center Retail and Student Housing / Richter Dahl Rocha & Associés », *ArchDaily*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.archdaily.com/519434/epfl-quartier-nord-swisstech-convention-center-retail-and-student-housing-richter-dahl-rocha-and-associes/>. [Consulté le: 01-déc-2015].
- [147] N.-G. Park, « Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology », *Mater. Today*, vol. 18, n° 2, p. 65-72, mars 2015.
- [148] « Photovoltaïque: la fièvre pérovskite », *CNRS Le journal*. [En ligne]. Disponible sur: <https://lejournel.cnrs.fr/articles/photovoltaïque-la-fièvre-perovskite>. [Consulté le: 01-déc-2015].
- [149] A. Hellemans, « Can Organic Solar Cells Reach Old Age? », 17-oct-2014. [En ligne]. Disponible sur: <http://spectrum.ieee.org/energywise/green-tech/solar/can-organic-solar-cells-reach-old-age1>. [Consulté le: 01-déc-2015].
- [150] C. J. Brabec, « Organic solar cell are 20 years of lifetime realistic ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.swissphotonics.net/libraries.files/Brabec.pdf>. [Consulté le: 01-déc-2015].
- [151] S. Sudevalayam et P. Kulkarni, « Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications », *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 13, n° 3, p. 443-461, Third 2011.
- [152] W. S. Wang, T. O'Donnell, N. Wang, M. Hayes, B. O'Flynn, et C. O'Mathuna, « Design Considerations of sub-mW Indoor Light Energy Harvesting for Wireless Sensor Systems », *J Emerg Technol Comput Syst*, vol. 6, n° 2, p. 6:1-6:26, juin 2008.
- [153] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman, et M. B. Srivastava, « Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems », in *Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005, 2005*, p. 457-462.
- [154] « Solar Impulse - Around the World to Promote Clean Technologies ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.solarimpulse.com/>. [Consulté le: 01-déc-2015].
- [155] M. Bronz, « A Contribution to the Design of Long Endurance Mini Unmanned Aerial Vehicles », Theses, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace - ISAE, 2012.
- [156] A. Noth, « Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight », ETH Zurich, Zueich, 2008.
- [157] H. FOCH, R. ARCHES, Y. CHÉRON, B. ESCAUT, P. MARTY, et M. METZ, « Alimentations à découpage Convertisseurs continu-continu non isolés », n° ref. article : d3163, 1990.
- [158] A. CAILLOT, « Systèmes d'alimentation pour équipements électroniques », *Tech. Ing. Aliment. Électronique Puissance*, vol. base documentaire : TIB283DUO., n° ref. article : e3620, 1998.

Bibliographie

- [159] T. J. Silverman, M. G. Deceglie, B. Marion, S. Cowley, B. Kayes, et S. Kurtz, « Outdoor performance of a thin-film gallium-arsenide photovoltaic module », in *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013 IEEE 39th*, 2013, p. 0103-0108.
- [160] « BestCap® - BZ Series | AVX ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.avx.com/products/supercapacitors/bestcapreg-bz-series/>. [Consulté le: 09-déc-2015].
- [161] Lenoir Bertrand, Michenaud Jean-Pierre, et Dauscher Anne, « Thermoélectricité : des principes aux applications », *Tech. Ing. Propr. Électr. Electrochim.*, vol. base documentaire : TIB336DUO, n° ref. article : k730, mai 2010.
- [162] Godart Claude, « Matériaux à effets thermoélectriques », *Tech. Ing. Matér. Act. Intell.*, vol. base documentaire : TIB126DUO, n° ref. article : n1500, juin 2009.
- [163] Y. Apertet, H. Ouerdane, O. Glavatskaya, C. Goupil, et P. Lecoeur, « Optimal working conditions for thermoelectric generators with realistic thermal coupling », *EPL Europhys. Lett.*, vol. 97, n° 2, p. 28001, janv. 2012.
- [164] M. Chen, L. A. Rosendahl, T. J. Condra, et J. K. Pedersen, « Numerical Modeling of Thermoelectric Generators With Varying Material Properties in a Circuit Simulator », *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, n° 1, p. 112-124, mars 2009.
- [165] J.-D. Park, H. Lee, et M. Bond, « Uninterrupted thermoelectric energy harvesting using temperature-sensor-based maximum power point tracking system », *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, p. 233-240, oct. 2014.
- [166] « 17) ÉNERGIE THERMOÉLECTRIQUE ». [En ligne]. Disponible sur: <http://energiein.e-monsite.com/pages/p1-et-moi.html>. [Consulté le: 27-oct-2015].
- [167] « Radioisotope Power Systems: Radioisotope Thermoelectric Generator (RTG) ». [En ligne]. Disponible sur: <https://solarsystem.nasa.gov/rps/rtg.cfm>. [Consulté le: 27-oct-2015].
- [168] H. Bottner, « Thermoelectric micro devices: current state, recent developments and future aspects for technological progress and applications », in *Twenty-First International Conference on Thermoelectrics, 2002. Proceedings ICT '02*, 2002, p. 511-518.
- [169] H. Bottner, J. Nurnus, A. Gavrikov, G. Kuhner, M. Jagle, C. Kunzel, D. Eberhard, G. Plescher, A. Schubert, et K.-H. Schlereth, « New thermoelectric components using microsystem technologies », *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 13, n° 3, p. 414-420, juin 2004.
- [170] H. Bottner, J. Nurnus, A. Schubert, et F. Volkert, « New high density micro structured thermogenerators for stand alone sensor systems », in *26th International Conference on Thermoelectrics, 2007. ICT 2007*, 2007, p. 306-309.
- [171] Micropelt GmbH, « Micropelt ThermoGenerator in Package TGP-651 ». [En ligne]. Disponible sur: http://micropelt.com/downloads/datasheet_thermogenerator_package.pdf. [Consulté le: 18-août-2015].
- [172] « Thermo Life® Characteristics ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.poweredbythermolife.com/thermolife.htm>. [Consulté le: 25-août-2015].
- [173] M. Koplow, A. Chen, D. Steingart, P. K. Wright, et J. W. Evans, « Thick film thermoelectric energy harvesting systems for biomedical applications », in *5th International Summer School and Symposium on Medical Devices and Biosensors, 2008. ISSS-MDBS 2008*, 2008, p. 322-325.
- [174] C. Navone, M. Soulier, J. Testard, J. Simon, et T. Caroff, « Optimization and Fabrication of a Thick Printed Thermoelectric Device », *J. Electron. Mater.*, vol. 40, n° 5, p. 789-793, mars 2011.
- [175] M. K. Kim, M. S. Kim, S. E. Jo, H. L. Kim, S. M. Lee, et Y. J. Kim, « Wearable thermoelectric generator for human clothing applications », in *2013 Transducers Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS EUROSENSORS XXVII)*, 2013, p. 1376-1379.
- [176] M.-K. Kim, M.-S. Kim, S. Lee, C. Kim, et Y.-J. Kim, « Wearable thermoelectric generator for harvesting human body heat energy », *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, n° 10, p. 105002, oct. 2014.
- [177] S. Khan, R. S. Dahiya, et L. Lorenzelli, « Flexible thermoelectric generator based on transfer printed Si microwires », in *Solid State Device Research Conference (ESSDERC), 2014 44th European*, 2014, p. 86-89.
- [178] D. Madan, Z. Wang, P. K. Wright, et J. W. Evans, « Printed flexible thermoelectric generators for use on low levels of waste heat », *Appl. Energy*, vol. 156, p. 587-592, oct. 2015.
- [179] Y. Du, S. Z. Shen, K. Cai, et P. S. Casey, « Research progress on polymer-inorganic thermoelectric nanocomposite materials », *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, n° 6, p. 820-841, juin 2012.
- [180] Scalable Thermal Energy Engineering Laboratory, « Polymer Thermoelectrics ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.yeelab.gatech.edu/research/thermoelectrics/>. [Consulté le: 20-août-2015].

Bibliographie

- [181] R. R. Søndergaard, M. Hösel, N. Espinosa, M. Jørgensen, et F. C. Krebs, « Practical evaluation of organic polymer thermoelectrics by large-area R2R processing on flexible substrates », *Energy Sci. Eng.*, vol. 1, n° 2, p. 81-88, sept. 2013.
- [182] M. A. Kamarudin, S. R. Sahamir, R. S. Datta, B. D. Long, M. F. Mohd Sabri, S. Mohd Said, M. A. Kamarudin, S. R. Sahamir, R. S. Datta, B. D. Long, M. F. Mohd Sabri, et S. Mohd Said, « A Review on the Fabrication of Polymer-Based Thermoelectric Materials and Fabrication Methods, A Review on the Fabrication of Polymer-Based Thermoelectric Materials and Fabrication Methods », *Sci. World J. Sci. World J.*, vol. 2013, 2013, p. e713640, nov. 2013.
- [183] J. Sun, M.-L. Yeh, B. J. Jung, B. Zhang, J. Feser, A. Majumdar, et H. E. Katz, « Simultaneous Increase in Seebeck Coefficient and Conductivity in a Doped Poly(alkylthiophene) Blend with Defined Density of States », *Macromolecules*, vol. 43, n° 6, p. 2897-2903, mars 2010.
- [184] F. Mazzamuto, J. Saint-Martin, V. H. Nguyen, C. Chassat, et P. Dollfus, « Thermoelectric performance of disordered and nanostructured graphene ribbons using Green's function method », *J. Comput. Electron.*, vol. 11, n° 1, p. 67-77, févr. 2012.
- [185] V.-T. Tran, J. S. Martin, et P. Dollfus, « Enhancement of thermoelectric performance in Graphene/BN heterostructures », *ArXiv150801837 Cond-Mat*, août 2015.
- [186] P. Dollfus, V. H. Nguyen, et J. Saint-Martin, « Thermoelectric effects in graphene nanostructures », *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 27, n° 13, p. 133204, avr. 2015.
- [187] S. Lee, « Optimum design and selection of heat sinks », *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. Part A*, vol. 18, n° 4, p. 812-817, déc. 1995.
- [188] J. Stefan, « Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur », 1879.
- [189] L. Boltzmann, « Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie », *Ann. Phys.*, vol. 258, n° 6, p. 291-294, janv. 1884.
- [190] A. Shrivastava, N. E. Roberts, O. U. Khan, D. D. Wentzloff, et B. H. Calhoun, « A 10 mV-Input Boost Converter With Inductor Peak Current Control and Zero Detection for Thermoelectric and Solar Energy Harvesting With 220 mV Cold-Start and 14.5 dBm, 915 MHz RF Kick-Start », *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 50, n° 8, p. 1820-1832, août 2015.
- [191] E. J. Carlson, K. Strunz, et B. P. Otis, « A 20 mV Input Boost Converter With Efficient Digital Control for Thermoelectric Energy Harvesting », *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 45, n° 4, p. 741-750, avr. 2010.
- [192] « LTC3108 - Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager - Linear Technology ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.linear.com/product/LTC3108>. [Consulté le: 27-oct-2015].
- [193] Y. K. Ramadass et A. P. Chandrakasan, « A batteryless thermoelectric energy-harvesting interface circuit with 35mV startup voltage », 2010, p. 486-487.
- [194] A. Montecucco et A. R. Knox, « Maximum Power Point Tracking Converter Based on the Open-Circuit Voltage Method for Thermoelectric Generators », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, n° 2, p. 828-839, févr. 2015.
- [195] H. Yamada, K. Kimura, T. Hanamoto, T. Ishiyama, T. Sakaguchi, et T. Takahashi, « A novel MPPT control method of thermoelectric power generation using state space averaging method », in *2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2011, p. 895-900.
- [196] Maxim Integrated, « MAX17710 Energy-Harvesting Charger and Protector - Maxim ». .
- [197] « LTC3105 - 400mA Step-Up DC/DC Converter with Maximum Power Point Control and 250mV Start-Up - 3105fa.pdf ». .
- [198] C. Vanhecke, L. Assouère, M. Bafleur, J.-M. Dilhac, et C. Rossi, « Convertisseur à faible consommation pour la récupération d'énergie ambiante combinant deux sources pour application aéronautique », présenté à 8ème journées d'étude Faible Tension Faible Consommation (FTFC 2009), 2009, p. 80.
- [199] EnOcean, « ECT 310 Perpetuum User Manual ». .
- [200] J. PADET, « Convection thermique et massique Principes généraux », *Tech. Ing. Transf. Therm.*, vol. base documentaire : TIB214DUO., n° ref. article : be8205, 2015.
- [201] « Convective Heat Transfer ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html. [Consulté le: 27-juill-2015].
- [202] « Convective Heat Transfer Coefficients Table Chart | Engineers Edge | www.engineersedge.com ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients__13378.htm. [Consulté le: 27-juill-2015].

Titre : Systèmes de récupération d'énergie pour l'alimentation de capteurs autonomes pour l'aéronautique

Résumé : Ces travaux portent sur la récupération et le stockage d'énergie pour l'alimentation de capteurs sans fil dans un contexte aéronautique. Dans un premier temps, nous présentons la problématique particulière de l'alimentation des capteurs sans fil dans un tel domaine et dressons un état de l'art des différentes technologies de stockage et de récupération pouvant répondre à ce besoin. Dans un deuxième temps, à travers l'étude et la réalisation de deux récupérateurs, nous montrons les possibilités qu'apporte cette technologie et détaillons les contraintes de conception qu'impose le milieu afin d'obtenir une alimentation robuste et fiable. Le premier récupérateur présenté est une alimentation photovoltaïque située sur l'extrados de l'aile d'un A321 alimentant des bandes de capteurs sans fil proches. Le système fournit 2 watts, fonctionne par temps couvert et résiste aux températures fortement négatives (-50°C) et aux basses pressions (200hPa) qui sont rencontrées à l'altitude de croisière de cet appareil. Le deuxième récupérateur est une alimentation thermoélectrique placée dans le mât réacteur d'un A380 pour alimenter un système de capteurs dédié à la surveillance de l'état de structure. Le système résiste aux températures élevées (300°C) et aux importantes vibrations de la zone d'installation et produit l'énergie nécessaire à l'alimentation du système de capteurs. Les choix et les étapes de conception ayant menés aux deux systèmes sont détaillés, tant au niveau de l'assemblage mécanique que des circuits électroniques.

Mots-clés : récupération d'énergie, thermoélectricité, photovoltaïque, gestion de l'énergie, systèmes autonomes sans batterie

Title: Energy harvesting systems to supply autonomous sensors in aeronautics

Abstract: This work deals with energy harvesting and storage to power aircraft embedded wireless sensors. First, we discuss the issue of powering wireless sensors in an aircraft and we present a state of the art of the various energy harvesting and storage technologies that could be used. Then, through the design and construction of two harvesters, we show the possibilities offered by this technology and we explain the design constraints imposed by the application to get a reliable and robust power supply. The first harvester is a photovoltaic power supply located on the upper surface of an A321's wing supplying a wireless sensors belt nearby. The systems provides 2 watts to the load, works with cloudy weather and is highly resistant to negative temperature (-50°C) and low pressure (200hPa) that are met at aircraft cruising altitude. The second harvester is a thermoelectric power supply located in an A380 pylon supplying a structural health monitoring system. The harvester is highly resistant to high temperature (300°C) and severe vibrations of the installation area and manages to generate the required energy to supply the structural health monitoring sensors. Mechanical and electronic design steps and choices that led to both harvesters are detailed and discussed.

Keywords: Energy harvesting, thermoelectricity, photovoltaic, power management, battery-less autonomous systems