



HAL
open science

Convertisseur à faible consommation pour la récupération d'énergie ambiante combinant deux sources pour application aéronautique

Claude Vanhecke, Laurent Assouère, Marise Baffleur, Jean-Marie Dilhac,
Carole Rossi

► To cite this version:

Claude Vanhecke, Laurent Assouère, Marise Baffleur, Jean-Marie Dilhac, Carole Rossi. Convertisseur à faible consommation pour la récupération d'énergie ambiante combinant deux sources pour application aéronautique. 8ème journées d'étude Faible Tension Faible Consommation (FTFC 2009), Jun 2009, NEUCHATEL, Suisse. pp.80. hal-00382788

HAL Id: hal-00382788

<https://hal.science/hal-00382788>

Submitted on 11 May 2009

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.

CONVERTISSEUR A FAIBLE CONSOMMATION POUR LA RECUPERATION D'ENERGIE AMBIANTE COMBINANT DEUX SOURCES POUR APPLICATION AERONAUTIQUE

C.VANHECKE¹, L. ASSOUIERE^{2,3}, M.BAFLEUR^{2,3}, J-M.DILHAC^{2,3}, C. ROSSI^{2,3}

¹Thalès Alenia Space, Toulouse, France

²CNRS ; LAAS ; 7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse, France

³Université de Toulouse ; UPS, INSA, INP, ISAE ; LAAS ; F-31077 Toulouse, France

Résumé

Cet article décrit l'architecture et la conception du circuit de conditionnement d'énergie d'un microgénérateur multi-source pour une application aéronautique de maintenance préventive, ou AHM (Aircraft Health Monitoring). L'originalité du microgénérateur est qu'il récupère l'énergie de l'environnement, ici les gradients thermiques et les vibrations de structure, et que son stockage se fait non pas sur une batterie mais sur des supercondensateurs. L'architecture choisie permet une autopolarisation du circuit, même en cas de décharge complète des supercondensateurs, et permet de fournir en sortie du régulateur une puissance moyenne de l'ordre du milliwatt pendant 1 heure.

Mots clés : *microgénérateur multi-source, thermogénérateur, transducteur piézoélectrique, récupération d'énergie, supercondensateur.*

I. Introduction

Le suivi en ligne du vieillissement d'un aéronef par un réseau de capteurs sans fil, attaché à sa structure mécanique, est considéré aujourd'hui comme un outil puissant pour faire décroître les coûts de maintenance, augmenter la sécurité des vols, diminuer le surdimensionnement de la structure, et ainsi réduire le poids et la consommation de carburant.

Les nœuds du réseau seront implantés, pour beaucoup d'entre eux, dans des zones non pressurisées et non chauffées de l'aéronef, difficilement accessibles pour des opérations de maintenance. Pour ne pas alourdir l'aéronef et simplifier le déploiement, ce réseau sera sans fil, tant pour la transmission de l'information que de l'énergie. L'utilisation de batteries étant difficile (du fait de considérations portant sur leur durée de vie, impactée par l'occurrence de hautes températures, et par leurs faibles rendement et fiabilité à très basse température), il est nécessaire de recourir à des techniques de récupération de

l'énergie ambiante qui sera stockée dans des supercondensateurs.

Une première voie envisagée ici est la récupération de l'énergie thermique. En effet, pendant les différentes phases du vol, des gradients thermiques apparaissent, du fait de la forte variation (dans la majorité des cas) de la température extérieure avec l'altitude. Ces gradients peuvent être convertis en énergie électrique en utilisant l'effet Seebeck. Toutefois, durant des vols de longue durée, une fois en croisière, l'ensemble du nœud sera en équilibre thermique avec son environnement : la récupération d'énergie considérée est donc transitoire. De plus, cette récupération d'énergie ne commence que lors de la montée en altitude. Nous avons donc choisi deux approches complémentaires pour contourner ces difficultés.

Tout d'abord, il est prévu d'installer dans le nœud un petit réservoir d'eau, de façon à bénéficier de ses caractéristiques thermodynamiques exceptionnelles en termes de chaleur spécifique et d'enthalpie (chaleur latente) de fusion/recristallisation. Cette première idée permet ainsi de maximiser l'énergie récupérable. Cette énergie thermique est alors convertie en énergie électrique par l'intermédiaire d'un thermogénérateur soumis au gradient thermique existant entre le réservoir d'eau et l'environnement du nœud.

Il est ensuite également prévu de récupérer de l'énergie à partir des vibrations mécaniques de la structure de l'aéronef : un composant MEMS (Micro Electro Mechanical System) utilisant une masse sismique posée sur des bras piézoélectriques délivrera un signal électrique alternatif de quelques dizaines de hertz en fonction du régime des moteurs. La puissance électrique est ici plus faible (quelques μW) mais disponible dès la mise en route et tout au long du vol. Elle vient donc en complément de l'énergie thermique, permettant à la fois la récupération permanente d'énergie, même pendant les phases de vol où le système est isotherme, et l'activation précoce des circuits électroniques, même en cas de décharge complète des supercapacités de stockage.

Le travail présenté dans ce papier concerne l'architecture du circuit de conversion, adapté au traitement de l'énergie récupérée par ces deux sources, thermique et vibratoire, ainsi que son optimisation pour en augmenter le rendement. Les points originaux de cette architecture concernent :

- l'auto-polarisation du circuit,
- la combinaison de deux sources d'énergie : d'une part, une source *thermique*, la plus énergétique (dont l'énergie est stockée dans des supercondensateurs), et une source *vibrations* utilisée pour accélérer la mise en route du nœud en absence de toute énergie stockée dans les supercondensateurs, en permettant une polarisation presque immédiate des circuits de traitement de la source *thermique*,
- une faible consommation pour ne pas détériorer le rendement de l'ensemble.

Le papier est organisé en 5 parties, la première étant l'introduction. Dans la deuxième partie, les deux dispositifs de récupération de l'énergie ainsi que leur mise en œuvre sont décrits. Dans la troisième partie, nous décrivons la stratégie d'optimisation du stockage de l'énergie. Dans la quatrième partie, la conception du circuit de gestion de l'énergie et ses performances sont détaillées. Enfin dans la dernière partie, nous donnons quelques conclusions et les perspectives de ce travail.

II. Implémentation du microgénérateur multi-source

Pour tester la faisabilité du principe de gestion de l'énergie à partir d'une source double (thermique transitoire et vibrations de structure), nous avons utilisé les résultats que nous avons obtenus lors des simulations et tests expérimentaux de deux sources réalisées dans notre laboratoire. La première [1] utilise un thermogénérateur commercial *Micropelt GmbH* (MPG-D602 type) de 4,25 mm x 3,36 mm et de 500 μm d'épaisseur. Il comporte 450 thermocouples formés de matériaux dopés N et P.

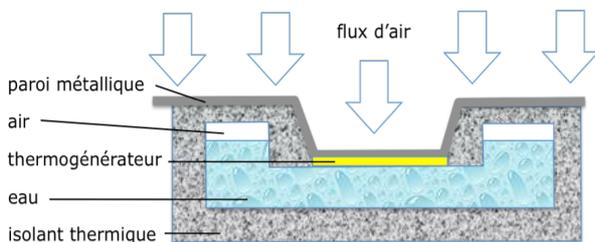


Figure 1 : Agencement de principe du dispositif expérimental de test du thermogénérateur – le flux d'air est régulé en température pour simuler les changements d'altitude de l'avion – la poche d'air interne est destinée à absorber la variation de volume de l'eau lors du changement de phase.

La maquette dans laquelle il a été placé simule les conditions de vol et comporte un réservoir de 10 g d'eau. Sur la figure 1 est représenté le schéma de principe de cette maquette.

Sur la figure 2 sont portés trois relevés expérimentaux obtenus avec le dispositif précédemment décrit, pour un vol d'un peu plus d'une heure. La première courbe (●) est celle du flux d'air (imposée par programmation dans notre enceinte climatique). La température ambiante choisie, a été de 25°C au décollage et de 15°C à l'atterrissage. La température de l'air lors de la croisière est imposée à environ -55°C ce qui correspond à la température définie par l'atmosphère normalisée de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) [2] à l'altitude de croisière d'un avion court-courrier.

La deuxième courbe (■) est celle de l'eau. On observe d'abord le refroidissement de l'eau à l'état liquide, puis le palier correspondant à la phase de cristallisation (extraction de l'enthalpie libre de fusion), puis à nouveau un refroidissement à l'état solide. Lors de la phase de descente en altitude (augmentation de la température de l'air), la température de la glace augmente elle aussi à nouveau. L'expérience n'a toutefois pas été poursuivie suffisamment longtemps après l'atterrissage pour observer le retour à l'état liquide.

On observe qu'il existe toujours un écart entre les températures de l'eau et de l'air. Ce gradient thermique est appliqué en partie au thermogénérateur qui, en retour, fournit une tension dont l'évolution est également portée (trait plein) sur la figure 2. On observe que cette tension, de l'ordre de quelques volts, est proportionnelle au gradient et change bien sûr de polarité lorsque le gradient thermique change de sens.

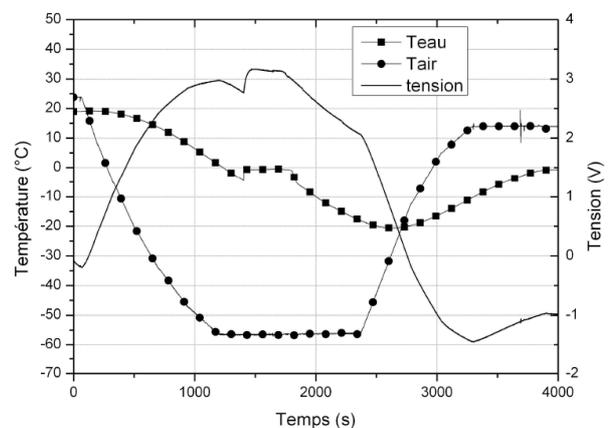


Figure 2 : Evolutions temporelles de la température de l'air, de la température de l'eau et de la tension de sortie du thermogénérateur lors d'un vol simulé d'environ une heure.

La seconde source d'énergie [3] est basée sur un composant MEMS à un degré de liberté fabriqué au laboratoire et comportant quatre bras composites PZT/silicium électriquement connectés en série, mécaniquement liés par une masse sismique de 8 g en tungstène. La réalisation du générateur piézoélectrique est en cours. La figure 3 donne une vue du composant après report de la masse sismique. Les étapes suivantes concernent la libération des poutres par voie humide (KOH), la connexion électrique et l'assemblage. Un premier prototype fonctionnel pourra être testé dans les mois à venir. Pour l'instant, nous disposons seulement des performances simulées : pour une excitation harmonique de 0,1g à 50Hz, on obtient un maximum de puissance générée de 60 μ Wrms sous 4Vrms environ.

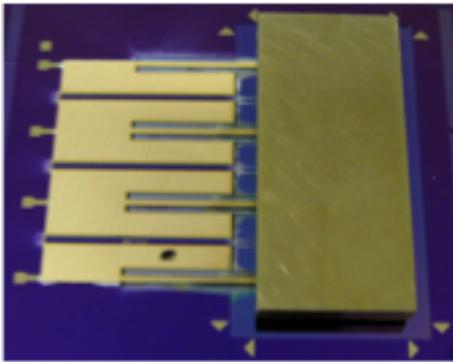


Figure 3 : Photographie du transducteur piézoélectrique après report de la masse sismique en tungstène.

III. Optimisation de la stratégie de stockage

Comme indiqué précédemment, nous avons choisi de stocker l'énergie récupérée par le thermogénérateur dans des supercondensateurs. Par rapport aux condensateurs électrolytiques traditionnels, les supercondensateurs présentent des performances très supérieures en termes de densité de puissance, de résistance série et d'autodécharge [4]. Par rapport aux batteries électrochimiques, un supercondensateur possède en outre une durée de charge qui n'est limitée que par la constante de temps (RC) du circuit. Le nombre de cycles de charge et décharge avant dégradation des performances est par ailleurs de plusieurs ordres de grandeur supérieur à celui des batteries. Il reste toutefois à déterminer la valeur optimum des supercondensateurs à utiliser pour notre application.

Pour préciser les conditions de stockage de l'énergie dans un supercondensateur, nous avons tout d'abord tracé le réseau de courbes de la figure 4. Elles représentent l'évolution temporelle de l'énergie stockée, en considérant un supercondensateur initialement déchargé, connecté

à l'instant $t=0$ à une source continue d'amplitude 2 V. La résistance interne de la source est de 189 Ω , résistance interne qui sera celle du thermogénérateur choisi pour l'application. Nous avons également porté sur la figure 4 l'énergie théoriquement disponible en traçant l'énergie dissipée par une charge résistive adaptée, donc de valeur 189 Ω .

On constate sur la figure 4 que plus une capacité est de faible valeur, plus la quantité d'énergie stockée augmente initialement rapidement (la puissance absorbée par le supercondensateur est initialement très grande à cause de la faible constante de temps), mais que par ailleurs la quantité maximale d'énergie stockable est faible (la puissance absorbée diminue rapidement à cause de la faible valeur de la capacité, correspondant à un supercondensateur ayant atteint son régime permanent, soit ici une tension à ses bornes de 2 V). On rappelle que l'énergie stockée dans une capacité est proportionnelle à la valeur de celle-ci et au carré de la tension de charge.

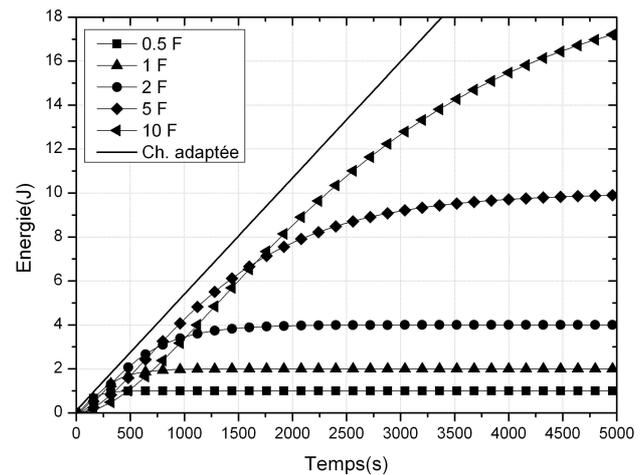


Figure 4 : Evolutions temporelles de l'énergie stockée dans divers supercondensateurs en réponse à un échelon de tension 2 V pour une source de résistance de sortie de 189 Ω . Le cas d'une charge adaptée est donné en référence.

Il apparaît donc clairement que dans le cas où la récupération d'énergie est *transitoire*, un optimum pour la valeur du supercondensateur doit exister, correspondant au meilleur compromis entre puissance absorbée élevée et saturation tardive en tension.

La figure 5 reprend le calcul de la figure 4, mais dans le cas où la source est constituée par le thermogénérateur dans les conditions de l'expérience de la figure 2. C'est donc la tension variable apparaissant sur cette figure qui constitue maintenant l'amplitude de la source de tension, qui

conserve bien sûr son impédance de sortie de 189Ω . Il apparaît que dans le cas considéré (en particulier en faisant l'hypothèse d'une charge pure des supercondensateurs), il existe effectivement une valeur optimum pour la valeur de la capacité, soit ici 10 F.

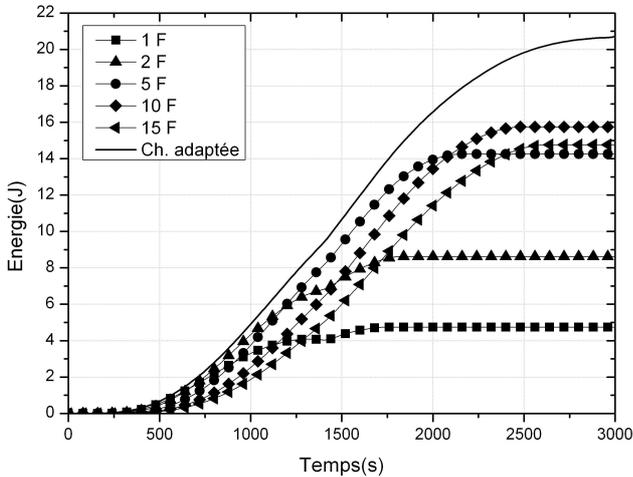


Figure 5 : Evolutions temporelles de l'énergie stockée dans divers supercondensateurs connectés au thermogénérateur soumis aux conditions expérimentales de la figure 2 (résistance de sortie = 189Ω). Le cas d'une charge adaptée est donné en référence.

Comme on le verra plus loin, le stockage de l'énergie sera réalisé en fait dans deux supercondensateurs à cause de la structure du circuit booster destiné à gérer le changement de polarité du thermogénérateur au cours du temps. Il est alors nécessaire d'optimiser indépendamment chacune des deux valeurs.

IV. Architecture du circuit de gestion de l'énergie

L'architecture de principe retenue pour le conditionnement de l'énergie du microgénérateur double source est donnée sur la figure 6. Les caractéristiques principales de ce microgénérateur sont un fonctionnement sans batterie et une autopolarisation, grâce à une approche de récupération de l'énergie issue de l'environnement - ici des gradients thermiques et des vibrations mécaniques. Pour chaque transducteur de récupération d'énergie, un circuit redresseur différent (nous verrons plus loin pourquoi) est nécessaire car dans les deux cas la tension générée est alternativement positive et négative. Dans le cas du transducteur *thermoélectrique*, on notera qu'il n'y a en fait que deux alternances par vol, contrairement au transducteur *piézoélectrique* qui fonctionne lui en régime alternatif permanent.

Pour la gestion de ces deux sources d'énergie, contrairement à d'autres auteurs [5] qui optent pour une régulation indépendante de la tension fournie par chacune d'entre elles avant de la stocker, la stratégie adoptée ici consiste à maximiser le transfert d'énergie à partir de chaque transducteur (vibrations, thermique), de stocker cette énergie dans des supercondensateurs et ensuite de stabiliser la tension résultante à l'aide d'un seul régulateur. L'autre originalité réside dans le fait que le transducteur de vibrations mécaniques est utilisé pour autopolariser le système en absence de gradients thermiques. Le microgénérateur ne commence à stocker de l'énergie sur le supercondensateur UC que lorsque la capacité C_{bias} ($2,2\mu F$) est suffisamment chargée pour polariser le circuit de polarisation Bias. Dans le cas où les supercondensateurs sont initialement chargés, ils concourent directement à la polarisation.

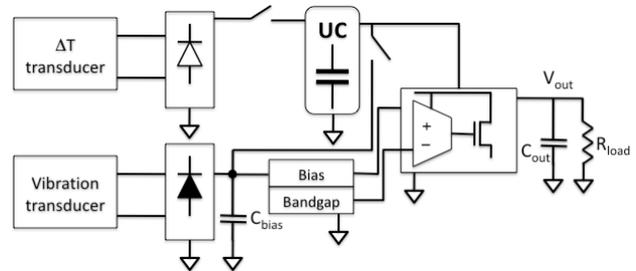


Figure 6 : Schéma bloc du circuit de conditionnement d'énergie du microgénérateur multi-source. UC est un supercondensateur.

A. Circuits redresseurs et stockage

La figure 7 représente la stratégie choisie pour redresser la tension des deux sources et pour stocker l'énergie. Sur le schéma, les deux sources sont représentées par leurs modèles électriques équivalents. Pour répondre aux contraintes de faible consommation et de rendement, les principes ci-dessous ont été privilégiés :

- les redresseurs à pont ont été évités au profit de circuits doubleurs ou élévateurs (booster) de tension, pour limiter la multiplication des diodes et donc les pertes associées aux seuils, et également pour potentiellement pouvoir stocker un maximum d'énergie, celle-ci augmentant avec le carré de la tension,
- les diodes D1, D2 et D5 du circuit à fort potentiel énergétique (Seebeck) ont été implémentées sous la forme de diodes actives pour bénéficier de très faibles tensions de seuil (ici inférieures à $100mV$) ; certaines diodes sont des diodes classiques car leur tension de seuil est moins critique, économisant ainsi les

courants de polarisation nécessaires pour les diodes actives,

- l'énergie nécessaire à la polarisation de ces diodes est fournie au plus tôt par la source d'énergie liée aux vibrations mécaniques par le biais d'un circuit doubleur de tension utilisant des transistors montés en diode D6-7.

La capacité C_{bias} est ainsi rapidement chargée dès la mise en route des moteurs et permet l'activation du circuit de polarisation (bloc bias) des diodes actives qui sont alors prêtes à jouer leur rôle dès que le thermogénérateur devient actif. En l'absence totale de vibrations, le circuit *thermique* reste toutefois capable de polariser C_{bias} grâce à D5. Par ailleurs, D3 et D4 servent à alimenter R_{load} (qui figure le reste du circuit) directement en début de charge, et aussi empêchent l'inversion de polarité sur UC1 et UC2. Les deux supercondensateurs UC1 et UC2, d'une valeur (ici non optimisée) de 1F, stockent alors l'énergie d'origine thermique : leur potentiel augmente progressivement jusqu'à permettre le fonctionnement du régulateur de tension (figurés par R_{load}) destiné à polariser les circuits de traitement du signal du nœud du réseau de capteurs.

Pour la réalisation du circuit de gestion de l'énergie, nous avons choisi une technologie CMOS 0,35 μ m haute tension (20V) sur substrat massif. La contrainte de la haute tension est imposée par le thermogénérateur et encore une fois par la nécessité de stocker un maximum d'énergie. Comme le montrent les résultats de simulation SPICE présentés à la Figure 8, grâce au couplage des deux sources, le seuil de 1V du potentiel V_{out} est atteint presque instantanément pendant le roulage de l'avion. La consommation totale du circuit a été limitée à 200 nA.

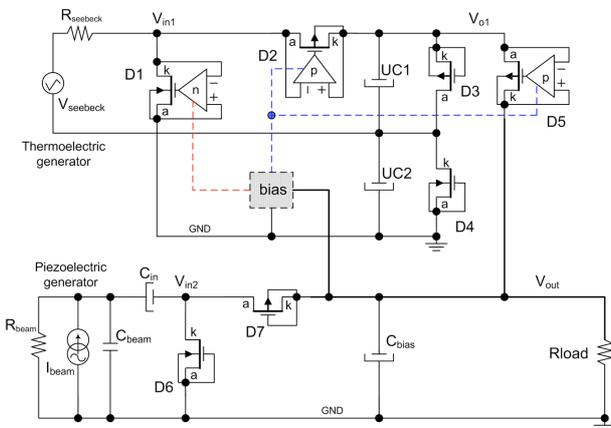


Figure 7 : Schéma électrique du circuit de conditionnement de l'énergie fournie par les 2 sources d'énergie. Le régulateur sera inséré en amont de R_{load} .

B. Régulation de la tension

Pour ce circuit, c'est le compromis rendement versus faible consommation qui dicte le choix de l'architecture la mieux appropriée. Nous avons donné la priorité à la réduction de la consommation et avons ainsi opté pour un régulateur de tension avec un interrupteur de puissance PMOS pour éviter l'utilisation d'une pompe de charge.

De la même manière, le circuit bandgap [6,7] qui fournit la tension de référence du régulateur est basé sur des transistors MOS exclusivement, en évitant absolument les résistances qui, étant donnée l'amplitude des courants présents (quelques centaines de nA) devraient présenter des valeurs supérieures au mégohm. Ce circuit est autopolarisé au démarrage de l'avion. En termes de performances, la tension de référence sera de l'ordre du volt, et le coefficient de température inférieur à 100ppm/°C.

La tension de sortie de ce régulateur de tension a été choisie de 1,2V pour être compatible avec les circuits de traitement et de stockage de données du capteur sans fil.

L'architecture du microgénérateur proposée permet ainsi de fournir une puissance moyenne de 1mW pendant un vol d'environ une heure, puissance tout à fait compatible avec celle consommée, par exemple, par un capteur d'accélération.

V. Conclusion

Nous avons proposé une architecture originale pour un microgénérateur double source destiné à une application aéronautique de maintenance préventive ou AHM (Aircraft Health Monitoring). Celle-ci se dispense de batterie et récupère l'énergie à partir de l'environnement de l'aéronef en vol, notamment à partir de gradients thermiques et de vibrations. Ces deux sources d'énergie sont utilisées de manière complémentaire : la source de vibrations permet l'autopolarisation de la circuiterie de gestion de l'énergie et la source majeure d'énergie est obtenue grâce au thermogénérateur. Le circuit complet a été simulé sur une technologie CMOS 0,35 μ m. Les conditions de vol en termes de température et de vibrations sont simulées en utilisant le modèle d'atmosphère normalisée de l'OACI couplé à un profil de vol typique d'une part, et à partir de spectres de vibrations mesurées sur un avion commercial Airbus d'autre part. Nous avons ainsi démontré qu'il permettait de fournir une puissance moyenne de l'ordre du milliwatt pendant un vol court courrier d'environ une heure, puissance tout à fait compatible avec l'activité d'un capteur sans fil

pour application AHM. La prochaine étape sera la validation sur table de l'implémentation complète du microgénérateur double source.

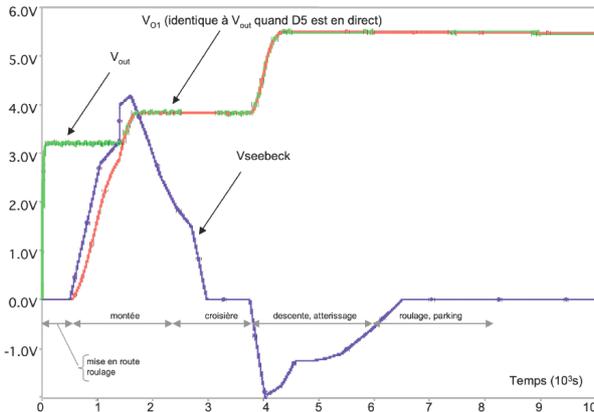


Figure 8 : Simulation SPICE du circuit redresseur et de la stratégie de stockage de la figure 7 en technologie CMOS 0,35 μ m.

Remerciements

Ces travaux ont été menés au LAAS-CNRS en collaboration avec AIRBUS-France dans le cadre du projet AUTOSSENS financé par la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace (<http://www.fnrae.org/>).

References

- [1] N.Bailly, J.M.Dilhac, C.Escriba, C.Vanhecke, N.Mauran, M.Bafleur, *Energy scavenging based on transient thermal gradients: application to structural health monitoring of aircrafts*, 8th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2008), Sendai (Japon), 9-12 Novembre 2008, pp.205-208.
- [2] Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), <http://www.icao.int/fr/>
- [3] G.A.Ardila Rodriguez, H.Durou, L.Ourak, D.Colin, C.Rossi, C.Baud, J.Y.Fourniols, *Fabrication and simulation of a PZT energy scavenging MEMS*, 8th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2008), Sendai (Japon), 9-12 Novembre 2008, pp.193-196.
- [4] F.I Simjee, P.H. Chou, *Efficient Charging of Supercapacitors for Extended Lifetime of Wireless Sensor Nodes*, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 23, N°3, May 2008.
- [5] J. Colomer, J. Brufau, P. Miribel, A. Saiz-Vela, M. Puig, J. Samitier, *Novel autonomous low power VLSI system powered by ambient mechanical vibrations and solar cells for portable applications in a 0.13 μ technology*, IEEE Power Electronics Specialists

Conference, 2007. PESC 2007, 17-21 June 2007, pp. 2786-2791.

[6] G. De Vita, G. Iannaccone, P. Andreani, *A 300 nW, 12 ppm/ $^{\circ}$ C Voltage reference in a Digital 0.35 μ m CMOS Process*, 2006 IEEE Symposium on VLSI Circuits.

[7] G. De Vita, G. Iannaccone, *A Sub-1V, 10 ppm/ $^{\circ}$ C, Nanopower Voltage Reference Generator*, IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 42, N°7, July 2007.