



HAL
open science

Contribution à l'amélioration des chaînes de conversion photovoltaïques par l'introduction d'architectures distribuées

Bruno Estibals

► **To cite this version:**

Bruno Estibals. Contribution à l'amélioration des chaînes de conversion photovoltaïques par l'introduction d'architectures distribuées. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010. tel-00546390

HAL Id: tel-00546390

<https://theses.hal.science/tel-00546390v1>

Submitted on 14 Dec 2010

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.

HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES

Préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS

En vue de l'Obtention du diplôme de l'Université Paul Sabatier de Toulouse

Contribution à l'amélioration des chaînes de conversion photovoltaïques par l'introduction d'architectures distribuées

Présentée le 4 Novembre 2010

Par

Bruno ESTIBALS

Docteur en Electronique de l'Université Paul Sabatier

Maître de Conférences à l'Université Paul Sabatier

JURY

Francesc GUINJOAN GISPERT

Rapporteur

Didier MAYER

Rapporteur

Christian SCHAEFFER

Rapporteur

Pascal COUFFIN

Père ROCCA I CABARROCAS

Pierre BIDAN

Président

Corinne ALONSO

Directrice Scientifique

« Le plus difficile, ce n'est pas de sortir de Polytechnique, c'est de sortir de l'ordinaire. »

Ch. dG.

Remerciements

Je ne sais pas si c'est la même chose pour tout le monde, mais pour moi, qu'il est difficile d'écrire cette partie tant la crainte de ne pas être suffisamment exhaustif me tétanise... Car ce travail est une illustration parmi tant d'autres des activités d'un groupe soudé autour d'une thématique.

Avant toute chose, je voudrais remercier vivement Messieurs Jean-Claude Laprie, Malik Ghallab, et Raja Chatila, Directeurs successifs du LAAS pour m'avoir accueilli dans ce laboratoire.

Je tiens également à remercier pour son accueil et son soutien Madame Marise Bafleur, responsable du groupe Intégration des Systèmes de Gestion de l'Energie, dans lequel j'ai démarré mes activités de recherche en tant que Maître de Conférences. J'adresse des remerciements particuliers à Augustin Martinez, Jean-Louis Sanchez et Luis Martinez Salamero, pour leurs conseils toujours avisés et leurs disponibilités, souvent bien tôt le matin...

Mes remerciements vont également aux rapporteurs de ces travaux, Messieurs Francesc Guinjoan, Didier Mayer et Christian Schaeffer qui, en dépit d'emplois du temps surchargés ont sans hésiter accepté ce travail d'évaluation. Je leur suis infiniment reconnaissante de l'intérêt qu'ils ont porté à mes activités et les remarques constructives qu'ils ont formulé.

Je tiens également à remercier Monsieur Pierre Bidan, Professeur à l'Université Paul Sabatier, d'avoir accepté de participer au jury et d'en avoir assuré la présidence, et Messieurs Pascal Couffin et Pere Rocca i Cabarrocas, d'avoir accepté également d'être membre de ce jury.

Mes remerciements particuliers vont à Corinne Alonso, ma directrice de recherche, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, qui depuis le début, m'a guidé, encouragé et soutenu, me permettant aujourd'hui de présenter cette habilitation. Merci Corinne également, pour ta sympathie durant toutes ces années.

Bien entendu je n'oublie pas mes collègues du groupe ISGE qui m'ont encouragé : Marie Breil, Magali Brunet, Frédéric Morancho, Vincent Boitier, Jean-Pierre Laur... Merci pour votre confiance, vos conseils précieux et pour la sympathie que vous m'avez témoigné depuis mes débuts parmi vous.

Il me serait difficile de ne pas associer à ces remerciements mes collègues du Département de Génie Electrique et d'Informatique Industrielle de l'IUT de Toulouse. En particulier, merci à Messieurs Alexandre Nketsa et Boutaieb Dahhou, qui m'ont permis de démarrer dans l'enseignement supérieur et la recherche ainsi qu' Abdelhakim Bourennane, Bruno Gorla, François Olivié, Gilles Roux, David Dubuc, Gaëlle Lavigne, Damien Delauzun, Guy Latapie et... Sylvie Roux.

Je voudrais également exprimer toute ma gratitude à tout le personnel des services administratifs et techniques du LAAS qui m'ont permis d'effectuer ces recherches dans des conditions idéales et particulièrement à Nicole Higounet, Michelle Plana, Claude Laforre et Christian Berty pour leur disponibilité, leur gentillesse et leur efficacité.

Comme je l'ai déjà dit, ce mémoire est une des illustrations du formidable travail accompli par une équipe soudée. Je pense d'abord à Lionel Séguier, notre grand maître de la technique, toujours disponible dans les cas d'urgence, et Pierre Aloïsi, notre sage parmi les sages. Viennent ensuite l'ensemble des doctorants avec qui nous vieillissons ensemble, Cédric Cabal, Stéphane Petibon, Alain Salles, Philippe Artillan, Adan Simon-Muela et les plus jeunes, Alona Berasategi, Marcos Orellana, Youssef El Basri et Carlos Carrejo. Quel parcours effectué ensemble depuis nos débuts ! Et une pensée à la jeune équipe technique constituée par Olivier Gantet et Cyril Lahore. Merci à vous tous pour votre amitié sans faille, votre confiance et votre compréhension quand je ne suis pas aussi disponible que je le souhaiterais...

J'adresse une pensée particulière à mes accointances informaticiennes et automaticiennes, mes fidèles amis Pascal Berthou, Patrick Danès, Yann Labit et Nicolas Rivière.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mes parents, à toute ma famille pour leur soutien constant et leur patience... Je vous dois en grande partie l'accomplissement de ce travail par l'espoir et la confiance que vous avez toujours su me donner. J'espère que vous trouverez toutes et tous par ces mots un modeste geste de reconnaissance et de remerciement.

Table des matières

Introduction générale	1
Vers une optimisation des chaînes de conversion de l'énergie ?	3
1. Panorama de la production d'énergie électrique	3
1.1 Positionnement mondial du problème de l'énergie	3
1.2 Positionnement européen	5
1.3 Politique énergétique de la France	7
1.3.1 <i>L'offre énergétique de la France</i>	7
1.3.2 <i>Principes de la politique énergétique</i>	8
1.3.3 <i>La promotion des économies d'énergie et des énergies renouvelables</i>	9
2. L'énergie solaire photovoltaïque	10
2.1 Généralités sur le photovoltaïque	11
2.2 Applications actuelles	11
2.2.1 <i>Applications autonomes : sites isolés</i>	11
2.2.2 <i>Applications raccordées au réseau</i>	12
2.3 Enjeux et perspectives	13
2.3.1 <i>Marché</i>	13
2.3.2 <i>Acteurs</i>	14
2.4 Le photovoltaïque comparé aux autres énergies	15
3. L'intégration du photovoltaïque au bâtiment	15
3.1 Positionnement du problème	15
3.2 Axes de recherche communément admis	17
3.3 Moyens d'action et réponses techniques envisagées	17
3.3.1 <i>L'intégration des systèmes au réseau électrique</i>	17
3.3.2 <i>L'intégration à l'habitat</i>	18
3.3.3 <i>L'architecture globale du système dans son environnement</i>	18
3.4 Structuration d'une chaîne classique de conversion	19
4. Discrétisation des chaînes de conversion	20
4.1 Structuration d'une chaîne classique de conversion	20
4.1.1 <i>Connexion directe d'un générateur photovoltaïque à une charge</i>	20
4.1.2 <i>Connexion générateur photovoltaïque-charge via un étage d'adaptation...</i>	22

4.1.3 Intérêts de la discrétisation	25
4.2 Les micro-convertisseurs comme étages d'adaptation	26
Discrétisation des chaînes de conversion	28
1. Discrétisation des chaînes de conversion	28
1.1 Contexte	28
1.2 Exemple d'illustration	30
1.2.1 Tests en éclairage homogène	30
1.2.2 Tests en éclairage inhomogène	32
2. Discrétisation au plus près des cellules : le projet ATOS	34
2.1 Le projet de Recherche ATOS.	34
2.2 Du panneau photovoltaïque vers la cellule	36
2.3 Travaux réalisés dans ce cadre	41
2.3.1 Réalisation et validations expérimentales d'un micro-convertisseur Buck	42
2.3.2 Réalisation et validations expérimentales d'un micro-convertisseur Boost	43
2.3.3 Synthèse des validations expérimentales	45
3. Conclusion	46
Vers une intégration des chaînes de conversion	48
1. Positionnement du problème	48
1.1 Introduction	48
1.2 Analyse de l'existant	49
1.3 Place des inductances dans les convertisseurs	50
1.4 Problèmes envisagés	50
2. Modélisation des éléments inductifs	51
2.1 Positionnement du problème	51
2.1.1 Approche analytique	51
2.1.2 Approche numérique	52
2.1.3 Contribution au sujet	53
2.2 Développement d'un outil d'aide à la simulation	53
2.2.1 L'interface graphique	54
2.2.2 Validité des résultats obtenus	56
3. Réalisation et caractérisation d'éléments inductifs	58
3.1 Processus technologique employé	58
3.2 Prototypes obtenus	60
3.3 Caractérisation des composants	60
3.3.1 Mesures à basse fréquence	61
3.3.2 Mesures à haute fréquence	62
3.3.3 Comparaison des résultats	62
4. Conclusion	64

Programme de recherche	65
1. Positionnement du programme de recherche	65
1.1 Contexte général	65
1.2 Quelle évolution pour le photovoltaïque dans le contexte des smart-grids ?	67
2. Axes de recherche envisagés	68
2.1 Nouvelles architectures de panneaux photovoltaïques	68
2.2 Stratégies de gestion avancées : vers une intégration ultime panneau – convertisseur	69
2.3 Stratégies optimisées de Gestion des batteries et couplage au réseau	69
3. Le projet ADREAM comme démonstrateur	70
3.1 Généralités	70
3.2 Volet « Energie »	71
3.3 La création d’une plateforme « Energie » dans ADREAM	72
3.4 Synthèse	73
Références	74
Liste des travaux et publications	77

Introduction générale

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable permettant de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à des modules solaires photovoltaïques, comprenant plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elles. Les impacts locaux du solaire sont très réduits : pas de bruit, pas de rejets et, sur le plan visuel, une relative discrétion voire, pour certaines structures intégrées au bâtiment une réelle élégance.

L'électrification par l'énergie solaire photovoltaïque est une solution alternative pour un habitat en site isolé, éloigné du réseau électrique. Elle permet de couvrir les besoins domestiques d'une résidence principale en utilisant des appareils standards (*petit électroménager, téléviseur, chaîne haute-fidélité, micro-informatique, etc...*) et des équipements spécifiques économes en énergie (*éclairage et froid*). Le photovoltaïque raccordé au réseau représente une filière émergente pour la production décentralisée d'électricité. Toute personne disposant d'un habitat résidentiel, d'un bâtiment communal ou d'un autre lieu d'implantation susceptible de recevoir un champ de modules photovoltaïques, peut devenir un producteur d'énergie renouvelable en injectant toute ou partie de l'électricité localement produite dans le réseau de distribution public. Chaque pays s'approprie ce potentiel énergétique en fonction des politiques incitatives liées au prix de rachat de l'électricité. En 2010, pour la France, EDF achète systématiquement l'énergie ainsi produite à des tarifs préférentiels, définis dans le cadre réglementaire fixé par les pouvoirs publics. Cependant, à ce jour, le développement massif du solaire photovoltaïque, en tant que moyen de production d'électricité raccordé au réseau, reste pénalisé par son coût de production encore très élevé. C'est dans ce contexte que se situent les travaux de recherche présentés dans cette habilitation à diriger des recherches.

Dans le premier chapitre, pour mieux comprendre la nécessité d'efforts en recherche à accomplir dans le domaine du photovoltaïque, nous montrons le positionnement de l'énergie photovoltaïque dans le panorama de la production d'électricité en précisant les différents constituants d'une chaîne de conversion photovoltaïque.

Depuis 1996, les recherches se sont orientées sur l'Optimisation, la Gestion et le Traitement de l'Energie, et plus particulièrement sur l'optimisation de chaînes modulaires de conversion d'énergie photovoltaïque, en complémentarité avec la communauté scientifique française, majoritairement orientée vers la synthèse de matériaux et le développement de nouveaux types de cellules. L'objectif

est de concevoir, réaliser et caractériser des systèmes en liaison avec un aspect intégration technologique fort.

Actuellement, différentes architectures de gestion photovoltaïque sont proposées sur le marché et permettent de valoriser plus ou moins bien la production énergétique d'origine photovoltaïque. Nous nous consacrerons dans le deuxième chapitre aux architectures de conversion DC-DC discrétisées, permettant d'apporter une solution technologique novatrices en termes d'amélioration du rendement de la chaîne de conversion, avec une volonté forte d'intégration de l'ensemble. Après avoir rappelé le concept et la validité du concept de discrétisation, nous nous focaliserons sur l'étude d'un micro-convertisseur pour une cellule photovoltaïque Tandem. On notera que ces premières recherches nous ont permis de visualiser dans sa globalité les problèmes liés à la gestion de l'énergie photovoltaïque et d'en tirer des conclusions en termes d'intégrabilité du système de conversion au plus près de la production.

Dans une dernière partie, nous proposons diverses perspectives de recherches inhérentes à la thématique du photovoltaïque que nous comptons mener dans le futur en collaboration avec la communauté photovoltaïque, afin de continuer à augmenter les performances de ce type de source. Bien que la fourniture d'énergie décentralisée comporte de nombreux avantages, la transition vers un « smart grid » représente plusieurs défis. Un des enjeux majeurs des réseaux d'électricité de demain consiste en l'assimilation de la production d'électricité intermittente. Le développement des énergies renouvelables, sources de production d'électricité décentralisées, est souvent freiné par une inadéquation de ces moyens de production avec le fonctionnement du réseau actuel. Ainsi, partant du constat que la production intermittente d'énergie est en effet difficile à intégrer au réseau et ne correspond pas aux périodes de consommation de pointe, nous envisagerons différentes solutions pour intégrer la production d'électricité d'origine renouvelable, notamment par l'introduction de moyens de stockage. Pour valider notre approche qui se veut globale sur la problématique de l'énergie, nous évoquerons la constitution du démonstrateur ADREAM en cours de construction au LAAS-CNRS, conçu dès le départ comme un outil de validation grandeur réelle.

Vers une Optimisation des Chaînes de Conversion de l'Énergie ?

Disponible en abondance, non émettrice de gaz à effet de serre, l'énergie solaire constitue à l'évidence l'une des réponses les plus adaptées aux besoins de demain et d'après-demain. Le solaire photovoltaïque, en particulier, affiche quelques atouts décisifs. Son potentiel est équitablement réparti puisque accessible, à des degrés divers, de quasiment tout point de la planète. Permettant de produire au plus près du consommateur, il contribue à la sécurisation de l'approvisionnement en électricité et convient autant aux milieux urbains qu'aux zones rurales et aux sites isolés. Les multiples possibilités d'implantation nouvelles en font une solution flexible, économe en espace, en même temps qu'un gisement de création d'activités et d'emplois.

Après avoir rappelé les principes de base de la conversion d'énergie photovoltaïque, nous effectuerons une synthèse sur les études de son impact actuel sur la production d'énergie au niveau international, national et régional avant de la considérer sous l'angle « électrique », plus proche des thématiques développées au LAAS-CNRS.

1. Panorama de la Production d'énergie électrique.

1.1 Positionnement mondial du problème de l'énergie.

Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la consommation mondiale d'énergie va augmenter de 50% entre 2004 et 2030, pour accompagner la croissance démographique et économique [I-1].

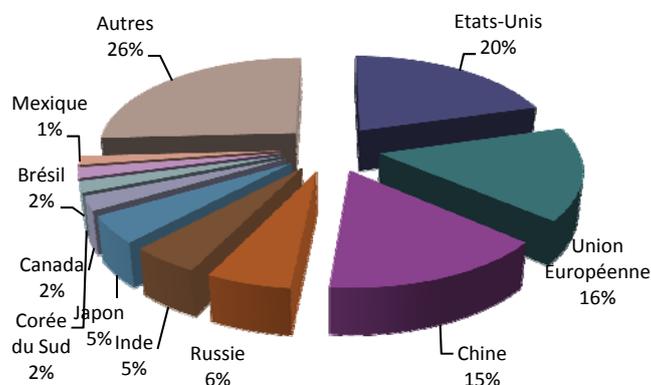


Figure I-1. Consommation d'énergie en 2005.

Les électriciens sont très concernés car la consommation d'électricité devrait croître deux fois plus vite que la consommation moyenne globale d'énergie (+ 100%).

Outre la nécessité de remplacer les anciennes centrales dans les pays industrialisés, il va falloir un effort d'équipement électrique considérable pour arriver à satisfaire l'ensemble de ces nouveaux besoins. En Europe par exemple, entre 2005 et 2030, selon la Commission européenne, il faudra construire l'équivalent de 600 à 700GW, correspondant pour moitié à la couverture des besoins supplémentaires et pour moitié au remplacement d'anciennes installations.

Or, aujourd'hui, les énergies fossiles couvrent 65% de la production d'électricité et plus de 80% de la consommation mondiale d'énergie. Cette situation n'est pas tenable, car les réserves d'énergies fossiles ne sont pas infinies et, de plus, elles sont la cause principale des émissions de gaz à effet de serre (GES) comme le dioxyde de carbone (CO₂), qui s'accumulent dans l'atmosphère et entraînent le réchauffement de la planète. Selon le GIEC (*Groupe Intergouvernemental des Experts du Climat créé à l'initiative du G7 en 1988*), la température moyenne terrestre devrait augmenter de 1,8 à 4°C au cours du siècle, avec comme conséquences annoncées une hausse du niveau des océans et des phénomènes climatiques extrêmes [I-2].

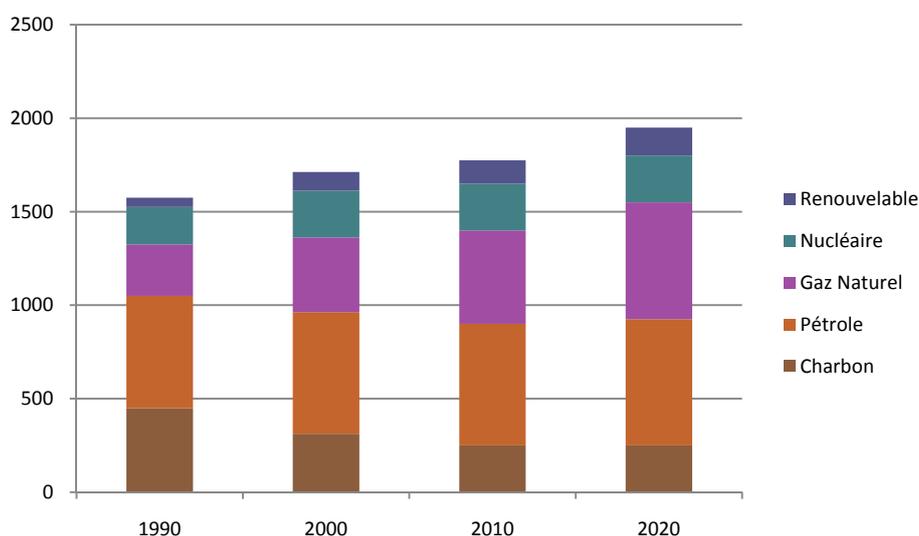


Figure I-2. Consommation énergétique totale : projection jusqu'en 2020 [I-3].

Ainsi, la croissance de la consommation énergétique entraîne une évolution préoccupante pour la sécurité des approvisionnements. La production de pétrole devrait décliner à partir de 2030 et celle de gaz à partir de 2050. Le quintuplement du prix du baril de pétrole (*sur lequel est aligné celui du gaz*), passé de 20 à 100\$ en cinq ans, traduit les tensions sur l'offre. Le prix du charbon a, lui aussi, fortement augmenté en 2007.

Priorité du Sommet de la terre de Copenhague, l'accès à l'énergie, notamment à l'électricité, est indispensable au développement collectif et individuel. Il conditionne l'économie ainsi que la santé, l'alphabétisation, l'éducation et la vie sociale. Dans les pays en développement, 2 milliards de personnes ne disposent pas d'une énergie suffisante et 1,6 milliard n'ont pas accès à l'électricité. Dans

les sociétés industrialisées, la partie la plus pauvre de la population n'a pas un accès suffisant à l'énergie : 15 % de la population européenne selon les critères de l'OCDE.

1.2 Positionnement européen.

L'Union Européenne fait partie des trois régions du monde grandes consommatrices d'énergie. En 2005, la consommation d'énergie – tous types confondus – représentait 1 816 millions TEP. Si les États-Unis représentent encore plus de 20% de la consommation mondiale, l'UE suit de près, avec environ 16%. En comparaison, La Chine, dont la croissance économique fortement « énergivore » avoisine les 10% annuels, a probablement dépassé l'UE en 2008 et les États-Unis en 2010.

Globalement, la consommation d'énergie va de pair avec le niveau de développement. La croissance de la consommation d'énergie se poursuit actuellement dans l'UE, quoiqu'à un rythme moindre. Mais la Commission européenne ne prévoit pas toutefois d'inversion de tendance prochaine : en 2020, l'Union se rapprocherait des 2 000 millions de TEP consommés [I-4].

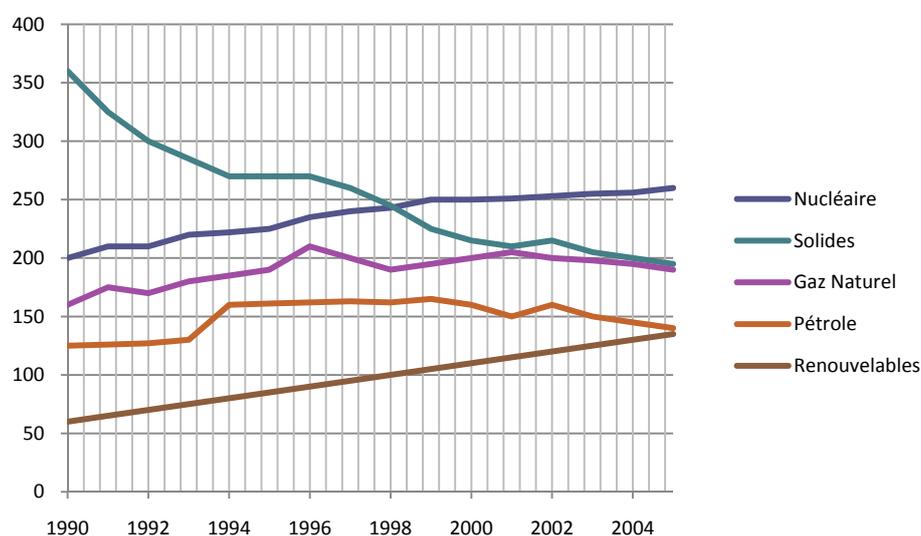


Figure I-3. Production d'énergie dans l'Union Européenne [I-5].

La consommation énergétique de l'Union présente quelques particularités, dans sa structure actuelle, comme dans les projections pour 2020 : la part du charbon décline autour de 17%, le pétrole représente encore largement plus du tiers de la consommation, et le gaz naturel, le quart. Les hydrocarbures totalisent donc plus de 61% de la consommation en 2007. Cette dépendance ne devrait pas significativement baisser d'ici à 2020. L'énergie nucléaire compte pour plus de 14% du bilan final, ce qui est beaucoup par rapport à d'autres régions du monde. Les énergies renouvelables – hydroélectricité, biomasse, éolien, solaire notamment – approchent seulement les 7%.

Les différences de consommation entre les États européens rendent compte d'abord de la puissance de leur économie. Des particularités apparaissent cependant en fonction des types d'énergie. L'utilisation du charbon est nettement plus marquée en Allemagne et en Pologne qu'en Europe de l'Ouest. La France consomme relativement moins de charbon ou de gaz, notamment parce que sa production

nucléaire fournit l'essentiel de l'énergie secondaire² sous forme d'électricité. Elle arrive en tête de la consommation sous forme renouvelable en raison de la puissance hydroélectrique installée.

Le bilan de la consommation énergétique de l'Union Européenne fait donc apparaître une très forte consommation d'énergie, en même temps qu'une dépendance toujours forte aux hydrocarbures.

La production d'énergie sur le territoire de l'Union est loin de satisfaire cette demande considérable. Pour 2005, l'Union à 27 ne produit que moins de 900 millions de TEP : elle dépend donc à 50 % de l'extérieur pour son approvisionnement en énergie. L'ensemble régional qu'est l'UE est loin d'être autosuffisant sur le plan énergétique. Pire, cette dépendance ne pourra globalement qu'augmenter à terme : la quantité d'énergie produite par l'UE était encore de 940 millions de TEP en 1995, mais de 890 dix ans plus tard. On estime que, d'ici à 2030, la dépendance vis-à-vis de l'énergie importée atteindra 70%.

Le bilan par type d'énergie montre que la production de pétrole a chuté de près d'un quart et celle de charbon de presque 40% ! L'énergie nucléaire, en revanche, a vu sa production augmenter de 15% et celles des énergies renouvelables de 40%, bien que partant de beaucoup plus bas.

La dépendance énergétique varie en fonction des types d'énergie (82% pour le pétrole, 58% pour le gaz) et d'un pays à l'autre. Ainsi, dans l'Union, seul le Danemark tire son épingle du jeu, avec une indépendance énergétique de 150%. Le Royaume-Uni, malgré les gisements de Mer du Nord, était encore indépendant en 2000, mais est devenu dépendant en 2005, avec un taux de dépendance passé de -17% à 14%. Dans ce paysage, seule la Norvège est très fortement excédentaire, mais rappelons qu'elle n'appartient pas à l'UE.

L'Union Européenne travaille à un développement aussi rapide que possible des énergies renouvelables : énergie éolienne, solaire, hydroélectricité, biomasse, géothermie, bio-carburants... Toutes les pistes sont explorées, dans le double objectif de réduire la production de gaz à effet de serre et la dépendance énergétique. En 2007, le Conseil européen a pris l'engagement, d'ici à 2020, de porter la part des énergies renouvelables à 20% de la consommation finale d'énergie, de réduire de 20% les émissions de CO₂ et d'améliorer l'efficacité énergétique de 20% également (*connue comme Règle des 3 20*). Toutefois, le développement des énergies complémentaires – y compris charbon propre, solaire et nucléaire – ne contribuera significativement au « mix » énergétique que sur le long terme.

Des disparités apparaissent entre pays européens, en termes d'avancement dans l'utilisation des énergies renouvelables. La production d'électricité au moyen d'énergies renouvelables représente 14% de la consommation électrique totale de l'Union en 2005. Comme souvent, les pays scandinaves sont très bien placés. La Norvège, non-membre de l'Union, exporte même de l'électricité renouvelable.

Pour chacune des énergies renouvelables, quelques traits spécifiques apparaissent, révélateurs de la situation géographique et économique des États. La carte de la biomasse montre ainsi clairement l'importance de la forêt boréale pour la Finlande. L'énergie éolienne est fortement implantée au Danemark, avec ses champs d'éoliennes déployées en mer, alors que l'Europe orientale est très en retard. En matière d'hydroélectricité, les pays de montagnes (*Suisse, Autriche, Norvège, Roumanie, Croatie*) sont les mieux placés.

Quant au solaire, son apport est réduit ; si les pays de l'est et du nord de l'Europe sont peu équipés, et ceux du sud davantage, c'est paradoxalement l'Allemagne qui a jusqu'à présent le plus développé

cette filière, notamment par l'introduction d'une politique incitative liées aux « 100 000 toits PV », proposant des tarifs de rachat de l'électricité intéressants.

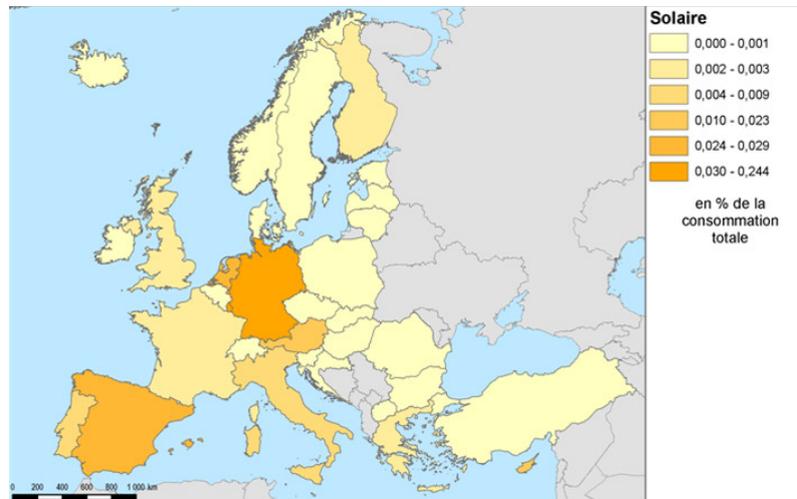


Figure I-4. L'électricité à partir du solaire (Données 2005) [I-5].

1.3 Politique énergétique de la France.

La France est le 7^{ème} plus gros consommateur d'énergie au monde avec 275 Mtep en 2004 derrière l'Allemagne et le Japon. Avec 4,4 tep consommés par habitant, elle se situe à la 18^{ème} place des pays de l'OCDE.

Jusqu'à ces toutes dernières années, la croissance économique de la France, une démographie dynamique, le développement des transports routiers de voyageurs et de marchandises, celui des usages domestiques de l'électricité et les besoins des industries grosses consommatrices d'énergie (*sidérurgie, chimie, papeteries, cimenteries, etc...*) ont contribué à une progression soutenue de la consommation d'énergie. Néanmoins, cette tendance n'est pas acceptable pour des raisons économiques et environnementales (*facture énergétique, sécurité d'approvisionnement, changement climatique*), de sorte que les divers gouvernements se sont employés et s'emploient à prendre des mesures correctrices.

1.3.1 L'Offre d'énergie en France.

La France est pauvre en ressources énergétiques contrairement à plusieurs pays européens bénéficiant de matières premières (*charbon en Allemagne et en Espagne, pétrole, gaz et charbon au Royaume-Uni, gaz au Pays-Bas, hydraulique en Suisse, etc...*).

Depuis la fin des années 1970 et le choix de l'énergie nucléaire comme source principale de production, la production nationale de charbon est passée de plus de 40 millions de tonnes par an à moins de 3 millions de tonnes en 2003, l'extraction s'arrêtant même en avril 2004 avec la fermeture du dernier puits à Creutzwald, en Lorraine.

Le gisement de gaz naturel à Lacq a fourni jusqu'à la fin des années 70 entre 6 et 7 millions de tep de gaz par an, contribuant ainsi jusqu'à 15% de la production nationale d'énergie primaire, mais ce pourcentage est descendu actuellement à 2%.

La production pétrolière n'a guère dépassé 3 millions de Tep par an, en fonction de l'intérêt que les opérateurs ressentaient à investir dans l'exploration-production sur le territoire national, pour s'établir désormais à moins de 1,5 millions de tonnes par an, soit légèrement plus que 1% de la consommation primaire.

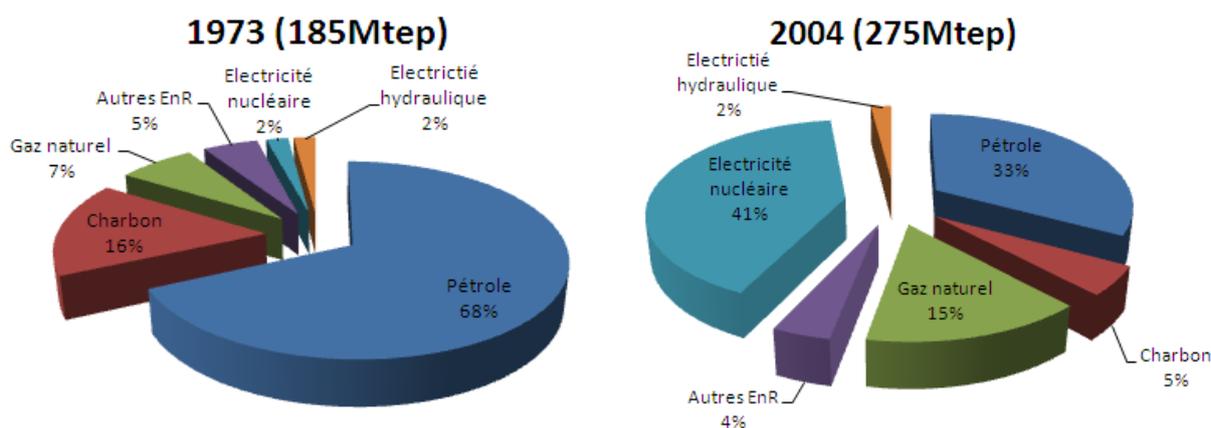


Figure I-5. Le mix-énergétique français en 1973 et 2004.

Afin d'assurer la sécurité de ses approvisionnements en énergie, la politique énergétique française a privilégié le développement d'une offre nationale d'énergie : l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables. Ainsi, dans les années 1950, un programme de construction de grands barrages a été mis en place et un programme nucléaire comprenant aujourd'hui 58 réacteurs, a été lancé dans les années 70.

1.3.2 Principes de la politique énergétique [I-6].

Dans un contexte énergétique en profonde mutation tout au long de ces trente dernières années (*progrès techniques importants, fluctuation des prix des énergies, réorganisation des marchés de l'énergie, émergence des questions environnementales*), la France a mis en place une politique énergétique autour de quatre grandes préoccupations, reprises par la loi de programme du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique :

1. **Contribuer à l'indépendance énergétique nationale et garantir la sécurité d'approvisionnement. La France dispose de réserves énergétiques très limitées.** Dans ce contexte, la satisfaction des besoins énergétiques de la France présente un risque qu'il convient de maîtriser. Sur le plan macroéconomique, il s'agit de limiter l'exposition de l'économie française aux fluctuations des prix de l'énergie notamment en développant les productions nationales. Sur le plan de l'approvisionnement physique, il convient de s'assurer de l'existence de capacités suffisantes pour faire face aux risques de pénurie tant dans le domaine électrique (*niveau et disponibilité du parc de production, qualité du*

transport et niveau des interconnexions), du gaz (gestion des stockages) que du pétrole (gestion des stocks de sécurité).

2. **Assurer un prix compétitif de l'énergie.** Le prix, la qualité et la disponibilité de l'énergie sont des facteurs déterminants de l'attractivité de la France et donc du développement de l'emploi, notamment dans des secteurs fortement consommateurs d'énergie. La politique énergétique française est ainsi définie pour garantir aux entreprises un prix de l'énergie compétitif notamment pour celles qui se trouvent confrontées à une forte concurrence internationale.
3. **Préserver la santé humaine et l'environnement, en particulier en luttant contre l'aggravation de l'effet de serre.** La production et la consommation d'énergies peuvent avoir des impacts majeurs sur l'environnement, au premier rang desquels les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi de polluants contribuant à la dégradation de la qualité de l'air ou de déchets radioactifs. Il convient donc de mettre la politique de l'énergie au service de la lutte contre les risques de changement climatique et de veiller à ce que les risques du secteur nucléaire soient correctement gérés.
4. **Garantir la cohésion sociale et territoriale en assurant l'accès de tous à l'énergie. L'énergie fait partie des biens de première nécessité.** Il importe donc que la politique énergétique permette à chacun et notamment aux plus démunis d'accéder à une source d'énergie de qualité et à un prix compétitif.

Afin d'atteindre ces objectifs, quatre principaux axes d'actions ont été identifiés dans la loi de programme précitée :

- **Maîtriser la demande d'énergie**, grâce à de nombreuses mesures et programmes mobilisateurs, notamment un dispositif de certificats d'économie d'énergie, des normes et réglementations, ainsi qu'une fiscalité incitative,
- **Diversifier les sources d'approvisionnement énergétique**, en accroissant l'usage des énergies renouvelables, en maintenant l'option nucléaire ouverte et, de façon générale, en développant un appareil de production d'énergie performant,
- **Développer la recherche dans le domaine de l'énergie**, parce qu'il s'agit d'un impératif pour relever les défis du long terme, par exemple pour les bioénergies, la voiture propre, les bâtiments à basse consommation, le solaire, la captation et le stockage souterrain du CO₂, le nucléaire de 4^{ème} génération, les réseaux électriques intelligents,
- **Assurer des moyens de transport et de stockage de l'énergie** adaptés aux besoins, notamment pour garantir la qualité de la fourniture d'électricité, conforter la sécurité des réseaux électrique et gazier et, de façon générale, améliorer la sécurité d'approvisionnement de la France.

1.3.3 La promotion des économies d'énergie et des énergies renouvelables.

Le crédit d'impôt en faveur des économies d'énergie et des énergies renouvelables a été créé dès le 1^{er} janvier 2005 puis renforcé dès 2006 (*crédit existant toujours à la rédaction de ce manuscrit*). Le taux du crédit d'impôt a été majoré pour passer :

- de 40 % à 50 % pour les équipements de production d'énergie utilisant une source d'énergie renouvelable et certaines pompes à chaleur ;
- de 25 % à 40 % pour les chaudières à condensation et les matériaux d'isolation thermique sous certaines conditions.

Cette procédure a connu un grand succès puisque le marché du solaire pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire a connu une progression spectaculaire (*le seuil de 150 000 m² de capteurs solaires posés en 2006 a été franchi*) [I-6].

Un nouveau dispositif de certificats d'économies d'énergie a été mis en place en 2006. Son principe repose sur une obligation de réalisation d'économies d'énergie imposée par les Pouvoirs publics sur une période donnée aux vendeurs d'énergie (*électricité, gaz, chaleur, froid et fioul domestique*). Un objectif d'économie de 54 TWh a été fixé pour la période allant du 1^{er} juillet 2006 au 30 juin 2009.

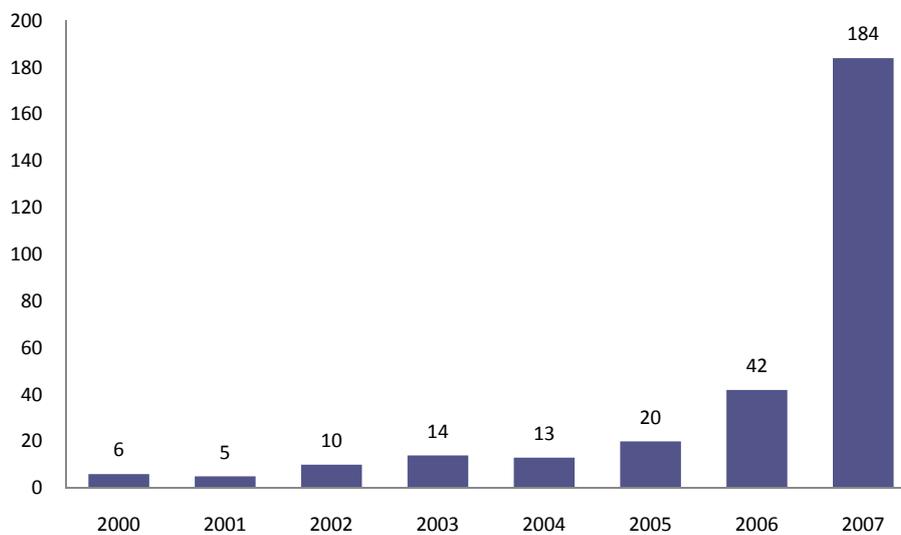


Figure I-6. Nombre d'installations photovoltaïques en Midi-Pyrénées [I-7].

Pour les énergies renouvelables, plusieurs programmes complémentaires de soutien ont été mis en place comme des systèmes d'obligation d'achat de l'électricité produite par les centrales de moins de 12 MW, par EDF et les autres distributeurs d'électricité. Ces mesures ont donné un nouvel essor à des filières intéressantes, telles que l'électricité produite par l'énergie photovoltaïque.

2. L'énergie solaire photovoltaïque.

L'électricité peut être produite à partir d'énergies primaires variées. Les choix de ces sources d'énergie sont cruciaux dans la lutte contre le changement climatique alors que les deux tiers de la production mondiale d'électricité sont issus des énergies fossiles, première cause des émissions de gaz à effet de serre. Pour autant, ces ressources ne sont pas interchangeables, elles ont chacune leur spécificité, leur impact et leur utilité.

2.1 Généralités sur le photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure : c'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (*énergie électrique décentralisée*) ou en électricité injectée dans le réseau. Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux-mêmes composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles. Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles ils se trouvent, à travers l'irradiation auxquels ils sont soumis.

L'énergie solaire offre de multiples avantages :

- La production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre,
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville, et aussi bien dans le Sud de la France que dans le Nord,
- L'électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur. De plus un système photovoltaïque est un moyen de produire de l'électricité renouvelable facilement accessible au particulier.

Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables car relativement simples du point de vue technologique à mettre en œuvre : aucune pièce mécanique n'est en mouvement, les matériaux employés (*verre, aluminium*) résistent aux pires conditions climatiques (*notamment à la grêle*), les onduleurs de fortes puissances sont robustes. La durée de vie d'un capteur photovoltaïque est ainsi de plusieurs dizaines d'années, d'ailleurs souvent garantie en productible au-delà de 25 ans.

L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite afin de suivre l'évolution des besoins ou des moyens financiers de son propriétaire.

2.2 Applications actuelles.

Marquée par une grande variété permise par les caractéristiques intrinsèques de la technologie des cellules photovoltaïques, la longue liste des applications du photovoltaïque peut être divisée en deux grandes catégories : Les **applications autonomes**, c'est-à-dire non-raccordées à un réseau électrique (*apparues les premières*) et les **applications raccordées au réseau** public de distribution d'électricité.

2.2.1 Applications autonomes : sites isolés.

De plus en plus d'applications terrestres (ie. on exclue ainsi les **satellites artificiels** pour lesquels le photovoltaïque constitue la seule source d'énergie qui réponde à toutes les contraintes ainsi que les **appareils portables**, aujourd'hui *calculatrices et montres*, demain *téléphones et micro-ordinateurs*) ne sont pas ou ne

peuvent pas être reliées au réseau public de distribution car il est techniquement trop complexe d'étendre le réseau jusqu'à elles (*en zone montagneuse par exemple*) ou parce que le coût d'une telle opération n'est pas justifié par rapport à d'autres solutions existantes. Ces sites sont appelés « sites isolés ». Pour autant, **il est souvent indispensable d'avoir accès à l'électricité afin d'assurer quelques services de base** tels que l'éclairage, la production de froid, ou encore l'alimentation d'un poste de radio. Ces sites peuvent alors être alimentés en électricité par l'énergie solaire photovoltaïque.



a.



b.

Figure I-7. Exemple d'applications autonomes :

a. Application professionnelle – b. Electrification rurale des sites isolés.

De ce fait, les applications autonomes *terrestres* sont séparées en deux domaines distincts :

- les **applications « professionnelles »**, relais de télécommunications, balises maritimes ou aéroportuaires, signalisation routière, bornes de secours autoroutières, horodateurs de stationnement, etc.)
- **l'électrification rurale des sites isolés**, habitat dispersé, refuges, dispensaires et écoles dans les pays en voie de développement, ...

2.2.2 Applications raccordées au réseau.

La plupart des bâtiments en France métropolitaine sont raccordés au réseau public de distribution : l'électricité est disponible en permanence à un niveau de puissance choisi par le consommateur.

L'installation d'un système photovoltaïque dans ce cas ne répond donc pas à un impératif d'électrification, mais au projet personnel du propriétaire du site qui désire améliorer son bilan énergétique. Ce dernier permet d'étudier tous les postes de consommation et de production d'énergie d'un lieu, bâtiment, famille, organisme... Le bilan sert souvent à optimiser et réduire la consommation afin de faire des économies d'énergie de son bâtiment en produisant une électricité renouvelable. Le bâtiment, autrefois enveloppe passive, devient actif et producteur d'énergie. Ainsi, en période d'ensoleillement, une partie de l'électricité consommée pourra provenir du système photovoltaïque.



Figure I-8. Exemple d'application raccordée réseau : l'usine TENESOL de Toulouse.

2.3 Enjeux et perspectives.

2.3.1 Marché.

Le potentiel de la production d'électricité photovoltaïque est quasi illimité. Un calcul théorique montre que la couverture de 0,6 % du territoire national, soit un carré de 56 km de côté constitué de 30 millions de panneaux de 100m², suffirait à assurer la consommation totale d'électricité du pays (1000 heures d'ensoleillement en moyenne). En extrapolant, un carré de 200km en plein désert du Ténéré (3800 heures d'ensoleillement par an) suffirait à satisfaire les besoins en énergie électrique de notre terre.

Si ce scénario est purement théorique, le scénario retenu par l'Union Européenne est de 1000 TWh dans le monde en 2030 en photovoltaïque. Si la France contribue au photovoltaïque au prorata de sa contribution à la production d'électricité dans le monde, soit environ 2 à 3% de la production mondiale, il faudrait donc, à partir des moyennes de performances techniques constatées aujourd'hui et attendues dans un futur proche, installer une surface de panneaux solaires de 100 km², pour un coût de 50 à 100 milliards d'Euros.

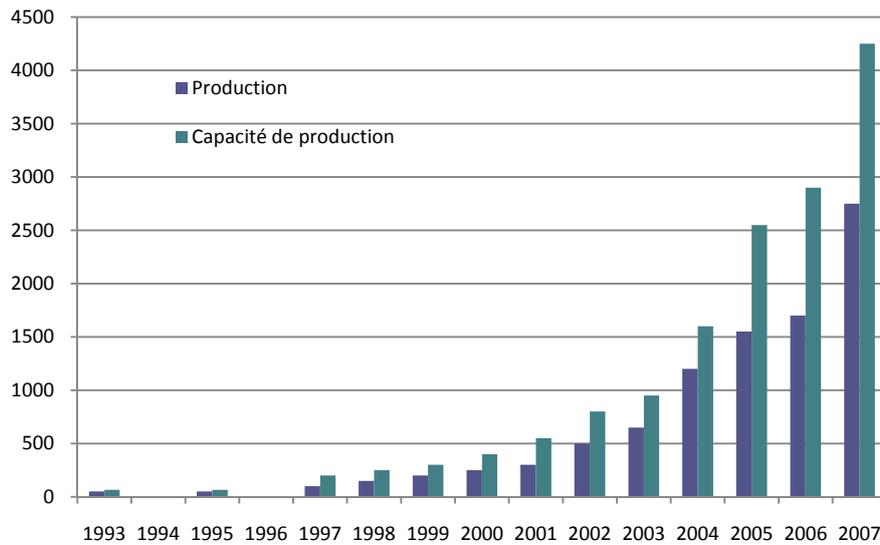


Figure I-9. Evolution de la production mondiale de modules photovoltaïques comparée à la capacité de production théorique [I-8].

La croissance du marché photovoltaïque mondial a été de plus de 115% en 2006. Ainsi, si en France, le solaire reste une industrie encore relativement marginale, le marché est en train d'émerger.

En France, le photovoltaïque sera compétitif par rapport à l'électricité vers 2020. En effet le " sweet-spot " où son prix rejoint celui de l'électricité nucléaire sera atteint vers 2015-2020. Le marché du photovoltaïque est une opportunité inespérée pour l'industrie française, car :

- il y a une nécessité énergétique,
- le marché du photovoltaïque sera cent fois plus important vers 2030 (*300 GWp et un CA annuel de 450 milliards d'euros*),
- le marché représente un gros gisement d'emplois non délocalisables pour la plupart (*installateurs, par exemple*),
- les acteurs français sont certes encore peu nombreux mais présents et en ordre de marche.

Cependant, l'impact de cette filière sur l'économie, en termes de compétitivité par rapport à l'électricité, ne sera visible qu'à l'horizon de 2020 [I-9].

2.3.2 Acteurs.

Il existe une cinquantaine d'entreprises évoluant sur ce marché, dont les plus connues sont : Photowatt (*fournissant 50% des modules photovoltaïques*), Tenesol, Apex BP Solar, Apollon Solar, Emix, Axun, Axis Energie, Lafarge, Total, etc.

Le Livre Blanc de l'Union Européenne a recommandé d'atteindre 500 000 toits solaires en Europe en 2010, un volume d'activité qui représenterait près de 60 000 emplois. La filière photovoltaïque représente aujourd'hui en Europe près de 15 000 emplois et un chiffre d'affaires de l'ordre du milliard d'Euros. L'objectif du Livre blanc de 3 000MWc installés en 2010 est quant à lui d'ores et déjà dépassé :

les 3 400MWc ont été atteints au mois d'avril 2008. L'Allemagne est le premier pays européen en termes de MW installés avec 1150 MWc comptabilisés à la fin de 2006.

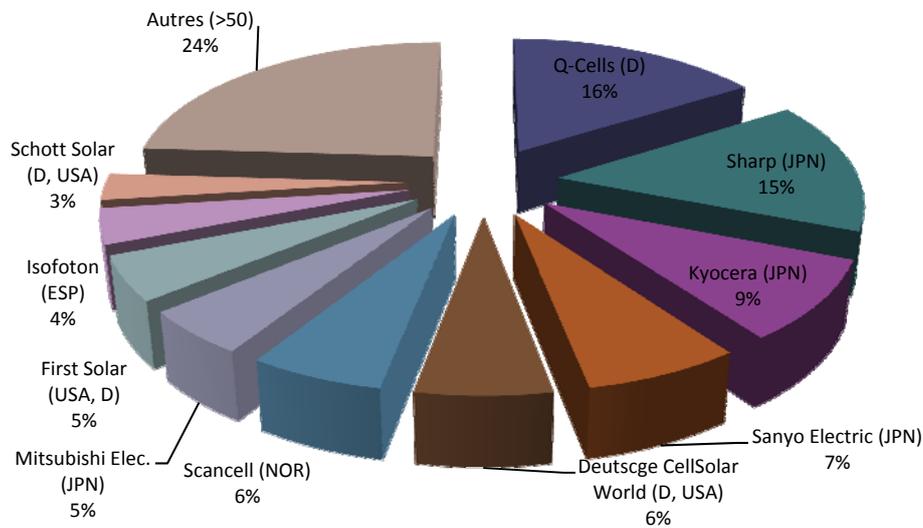


Figure I-10. Parts de marché en 2007 des constructeurs de cellules photovoltaïques.

Les prévisions les plus prudentes prévoient de l'ordre de 2 500 nouveaux emplois en France dans cette filière en 2010 contre 1 800 aujourd'hui. Cependant, il y a de fortes chances pour que ce chiffre soit multiplié par 4 ou 5 si certains projets industriels voient le jour.

2.4 Le photovoltaïque comparé aux autres énergies.

L'électricité peut être produite à partir d'énergies primaires variées. Les choix de ces sources d'énergie sont cruciaux dans la lutte contre le changement climatique alors que les deux tiers de la production mondiale d'électricité sont issus des énergies fossiles, première cause des émissions de gaz à effet de serre. Pour autant, ces ressources ne sont pas interchangeables, elles ont chacune sa spécificité, son impact et son utilité. En outre, la palette des choix doit faire une large part à l'efficacité énergétique, premier vecteur de baisse des émissions de CO₂. La figure I-7 présente une comparaison des énergies primaires existantes.

3. L'intégration du photovoltaïque au bâtiment.

3.1 Positionnement du problème.

Le système photovoltaïque est l'interface entre l'utilisateur et la ressource. Il "met en forme" l'énergie captée par les modules photovoltaïques selon les types d'applications. Dans le cas des systèmes intégrés au bâtiment, en plus d'une association de modules, un onduleur permet de convertir le courant continu en courant alternatif pour une utilisation sur le réseau électrique. L'utilisateur peut alors consommer l'énergie qu'il produit, indifféremment, pour des applications spécifiques comme l'alimentation d'une climatisation, ou la réinjecter dans le réseau électrique si, par exemple, les conditions de rachat par l'exploitant du réseau lui sont favorables.

SOURCE D'ENERGIE	Puissance unitaire des unités de production	Part de la Production mondiale en 2005	Usage dans le système électrique	Atouts	Contraintes
ENERGIES FOSSILES : 66,5% de la production mondiale d'électricité					
CHARBON	250 à 800MW	40,20%	Base Semi-Base	- Le plus abondant - Bien réparti géographiquement - Stockable - Facile à exploiter - Puissance - Flexible	- Pondéreux - Risques liés à l'exploitation minière - Polluant (SO ₂ , Nox, Etc...) - Prix fluctuants
PETROLE (Fioul lourd)	40 à 800MW	6,60%	Semi-Base Pointe Extrême pointe	- Facile à exploiter et à transporter - Démarrage rapide - Puissance - Flexible et réactif	- Epuisable dans le demi-siècle - Polluant - Risque de pollution - Répartition géographique - Versatilité des prix
GAZ	40 à 800MW	19,70%	Base Semi-Base Pointe sur base courte	- Facile à exploiter - Peu polluant - Puissance - Flexible et réactif	- Transport en réseau - Prévention du risque explosif - Répartition géographique - Versatilité des prix
☞ Toute Tep fossile utilisée est définitivement enlevée aux générations futures					
ENERGIE NUCLEAIRE : 15,0% de la production mondiale d'électricité					
FISSION NUCLEAIRE (Uranium)	900 à 1400MW	15,00%	Base Semi-Base	- Production de masse - Réserves d'uranium importantes - Faible part du coût combustible - Faible occupation des sols	- Gestion des déchets - Besoin d'un bon niveau de développement technologique et sociétal du pays - Contrôle du niveau de sureté - Acceptabilité
☞ Principale énergie substituable aux énergies fossiles sous condition d'acceptabilité					
ENERGIES RENOUVELABLES : 18,5% de la production mondiale d'électricité (2,44% hors hydraulique)					
HYDRAULIQUE	250 à 800MW	16,60%	Base Semi-Base	- Faible taux de CO ₂ - Démarrage très rapide - Faible coût d'exploitation - Puissance	- Contrainte géographique - soumis aux aléas climatiques - impact sur l'écosystème - Acceptabilité
EOLIEN	0,2 à 5MW	0,60%	Fonction du vent!	- Faible taux de CO ₂ - Puissance	- Contrainte géographique - Production intermittente - Acceptabilité
SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE	100MW	0,03%	Décentralisé	- Faible taux de CO ₂ - Intégrable à l'habitat	- Coût des cellules - Diurne uniquement (ou batteries) - Espace occupé par les centrales au sol - Puissance très faible
BIOMASSE	Jusqu'à 500MW	1%	Base Semi-Base	- Renouvelable si replantation - Abondante - Substitution aux ressources fossiles - Solution déchets - Puissance	- Emission si l'on ne replante pas pour compenser - Arbitrage agriculture pour énergie/nourriture - Polluant localement
GEOOTHERMIE		0,3	Base	- Non polluant	- Contrainte géographique - Difficultés techniques
☞ Energies non émettrices de GES, substituables sous condition de disponibilité, d'acceptabilité de maturité technique et économique					

Figure I-7. Comparaison des énergies primaires existantes.

Derrière la simplicité apparente du dispositif, l'optimisation du critère *performance/intégration* est aujourd'hui privilégiée. Elle garantit en toute sécurité, à la fois à l'utilisateur et à l'exploitant du réseau, une production d'électricité solaire annuelle, et donc un retour sur investissement, tout en favorisant les solutions d'intégration qui permettent de substituer les panneaux photovoltaïques à d'autres éléments du bâtiment (*tuiles, parapets, éléments décoratifs de façades...*), diminuant ainsi le coût global du système installé. Des architectures et des intégrations qui préservent les orientations du générateur photovoltaïque en face sud seront ainsi privilégiées.

3.2 Axes de recherche communément admis.

Les axes de recherche et de développement portant sur les systèmes intégrés au bâtiment visent principalement la baisse des prix de revient et l'élargissement des services rendus. Cette diminution des prix s'obtient en jouant sur le couple *coûts/performances* des composants constituant le système mais aussi sur des facteurs plus globaux d'architecture de ces systèmes, de gestion des flux d'énergie et de procédés d'intégration.

Dans l'ordre d'importance des coûts d'investissement initiaux d'un système photovoltaïque intégré à l'habitat, en toiture par exemple, c'est-à-dire à la place des tuiles, le générateur photovoltaïque représente en moyenne 60%, l'onduleur 10 à 15%, les autres composants électroniques de sécurité et de suivi 10%, l'intégration représentant en moyenne 20% du coût global et pouvant atteindre 50% pour les cas les plus difficiles. La substitution des tuiles par des modules photovoltaïques permet de réduire de 10 à 30% le coût global.

La recherche sur les modules photovoltaïques a des retombées directes sur les coûts des systèmes connectés au réseau tant en termes d'augmentation des performances et du rendement de conversion des cellules (*plus de puissance pour un prix constant*), qu'en termes de diminution des prix de production en travaillant sur les procédés de fabrication (*module photovoltaïque moins cher à puissance équivalente*). Il est raisonnable aujourd'hui d'estimer qu'il existe une marge de gain permettant de réduire de 30% le coût d'un système complet.

Sur les autres composants, il s'agit de minimiser les pertes de conversion. Les onduleurs dits *solaires* sont bien plus performants que les onduleurs standards. Leur rendement dépasse 95% pour une consommation à vide de quelques pourcents de leur puissance nominale, alors que le rendement des onduleurs pour alimentation sans interruption dépasse à peine 80% pour une consommation à vide supérieure d'un ordre de grandeur. Le prix est en conséquence.

3.3 Moyens d'action et réponses techniques envisagées.

Dans le cas des systèmes complets, les principaux leviers technologiques qui guident les actions de recherche sont essentiellement de trois ordres :

3.3.1. L'intégration des systèmes au réseau électrique.

Le premier levier correspond à l'intégration des systèmes au réseau électrique. À court et moyen terme, c'est l'un des moyens d'action les plus efficaces. Les recherches consistent à développer des dispositifs électroniques de conversion assurant une qualité de connexion au réseau irréprochable, permettant au système de se déconnecter automatiquement en cas de défaillance, afin de ne pas

maintenir en tension la branche du réseau auquel il est raccordé. Elles visent aussi à utiliser au mieux les flux d'énergie de tous les composants, en tentant de faire produire les modules photovoltaïques au plus près de leur puissance maximale, de concevoir des onduleurs ayant des rendements élevés sur des plages de rayonnement élargies. Vue du côté de l'exploitant du réseau électrique, la généralisation massive de ce type de générateurs sur le réseau électrique constitue une crainte vis-à-vis de la gestion de la qualité du réseau (*délestage, tension et fréquence*). Ceci n'est pas spécifique à l'électricité solaire mais revêt une importance particulière avec l'avènement de sources d'énergie décentralisées de nature différente (*éolien, hydraulique, solaire, microturbines, groupes électrogènes, etc...*) et de petite taille (*de quelques kW à quelques MW*). Des projets européens, visant à développer de nouveaux concepts de réseaux de distribution électrique, ont démarré dès l'année 2000. Ces nouveaux concepts seraient un peu à l'image de ce qu'est l'Internet pour le secteur des télécommunications : tout le monde pourrait se connecter n'importe où et n'importe quand. Cela passe non seulement par une meilleure connaissance de la fiabilité du système et la mise en place de dispositifs de communication, de surveillance et d'aide à l'utilisateur, mais aussi par une certaine standardisation des composants et une approche d'assurance qualité et de normalisation de plus en plus présente.

3.3.2. L'intégration à l'habitat.

Le deuxième levier concerne l'intégration à l'habitat. À moyen terme, cette solution semble la plus prometteuse. Il s'agit, par exemple, de réduire les phases d'installation grâce à des dispositifs permettant à l'industrie du bâtiment de s'approprier le générateur photovoltaïque comme un composant à part entière d'une habitation, tant pour le neuf que pour la rénovation. Une étude de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) montre que le potentiel d'intégration sur toiture des systèmes photovoltaïques (*où la surface totale des toits serait équipée d'un générateur photovoltaïque respectant le compromis performance/architecture*) est de l'ordre de 30 à 40 % pour les différents pays européens, préfigurant ce que pourrait être un urbanisme solaire à l'échelle d'une ville ou d'une zone d'aménagement complète.

3.3.3. L'architecture globale du système dans son environnement.

Le troisième levier s'exerce sur l'architecture globale du système dans son environnement. C'est certainement le point le plus innovant, qui donnera le jour à des produits dont l'architecture sera éloignée de celle des premiers systèmes. Les recherches consistent à combiner les différentes solutions apportées par les systèmes photovoltaïques (*toitures mais aussi brise soleil, vérandas ayant des impacts sur le confort thermique et l'ambiance lumineuse du bâtiment dans son ensemble*). La mise en œuvre de méthodes de gestion globales au bâtiment, tant au niveau de son enveloppe externe que de son confort interne, et de méthodes "prédictives", c'est-à-dire visant à prévoir l'état futur des ressources ou du système, constitue aujourd'hui un axe important des études menées dans le monde. Des produits de plus en plus diversifiés sont en cours de développement pour permettre une intégration plus simple et modulaire dans les bâtiments : tuiles, ardoises ou couvertures "solaires", fenêtres de toit ou de façade semi-transparentes, et même des composants multifonctionnels assurant simultanément une ou plusieurs des fonctions telles que rigidité mécanique du bâtiment, isolation, protection solaire, climatisation, communication, captation de l'énergie thermique et production d'électricité photovoltaïque.

Aujourd'hui, l'optimum technico-économique d'un système mixte thermique-photovoltaïque, c'est-à-dire capable de produire à la fois de la chaleur et de l'électricité, est constitué de la mise en place d'un dispositif solaire thermique à côté d'un dispositif photovoltaïque. Un tel système occupe donc plus de place.

3.4 Structuration d'une chaîne classique de conversion.

L'architecture distribuée est une vision utilisée depuis de nombreuses années dans le domaine informatique ; pour cette application, on assiste depuis longtemps déjà à une opposition entre deux types d'architectures : celle dite centralisée et celle dite distribuée. Les deux types d'architecture ont chacune des propriétés propres intéressantes qui les destinent à des applications différentes :

- L'architecture centralisée possède un noyau central fort autour duquel tous les périphériques sont regroupés (ou centralisés). Ce noyau central exécute la plupart des actions. Le principal avantage de cette architecture est sa facilité d'administration.
- L'architecture distribuée, elle, possède un noyau central faible associé à une plus grande autonomie des périphériques. Cette architecture a l'avantage de permettre une plus grande souplesse d'utilisation et des modes de fonctionnement parallèles qui peuvent être complexes.

En simplifiant, nous pouvons opposer l'architecture centralisée avec un maximum de fonctions assurées par un noyau central à l'architecture distribuée ayant plusieurs noyaux dédiés à des fonctions spécifiques se répartissant le plus possible dans l'espace et le temps. Le coût de l'une ou l'autre architecture varie suivant le domaine. En règle générale, si les périphériques ne sont pas utilisés à plein temps (*par exemple, une imprimante*), l'architecture centralisée est plus économique (*on suppose alors que tous les périphériques ne sont jamais utilisés tous en même temps*). Dans d'autres cas (*carte vidéo, réseau de PC*), c'est l'architecture distribuée qui est la plus économique (*un gros ordinateur coûte plus cher que 10 petits ordinateurs 10 fois moins puissants*).

Une analogie peut être envisagée entre la gestion de l'architecture distribuée en informatique et celle appliquée à la gestion de l'énergie photovoltaïque [I-10, I-12]. Pour cela, il suffit de constater que la défaillance d'une seule cellule d'un module photovoltaïque entraîne, dans le cas d'une gestion centralisée effectuée à l'aide d'un seul convertisseur statique (*onduleur*), une forte diminution de production d'énergie correspondant à une grande partie du générateur photovoltaïque (*GPV*), voire la totalité dans des cas d'ombrages partiels.

Ce point de faiblesse bien que bien connu dans le passé, n'est toujours pas vraiment résolu principalement pour des questions de coûts prohibitifs des solutions à mettre en œuvre par rapport au gain énergétique potentiel attendu. Pourtant, l'idée de rendre indépendants des groupes de cellules les uns par rapport aux autres se précise d'année en année au fur et à mesure des prises de consciences faites sur des sources PV existantes et les limites de productions réelles que cela impacte sur toute la durée de vie de ces générateurs [I-18]. En parallèle, l'industrie de la micro-électronique et les évolutions permanentes des organes de gestion (*microprocesseurs, microcontrôleurs, FPGAs, ...*) permet de plus en plus la réalisation d'étages d'adaptation fiables, à haut rendement, avec des durées de vie prolongées et des coûts relativement bas.

Les constructeurs envisagent ainsi de multiplier le nombre de diodes-bypass afin d'isoler un groupe de cellules de plus en plus petit. Ainsi, en cas de défaillance, cela permet de limiter les pertes de production PV en isolant le minimum de cellules et uniquement celles qui sont autour du défaut. Cela localise le plus possible le problème tout en limitant les pertes énergétiques.

En poussant la réflexion à l'extrême pour un GPV donné et dans l'idéal pour une production PV optimale, l'utilisation d'une architecture distribuée associée à un gestionnaire d'énergie adéquat, générerait non seulement la présence de défaillances réparties avec un impact plus réduit sur l'ensemble du système, mais également une production maximisée de l'énergie PV avec une gestion au plus près, indépendante pour chaque groupement et, globalement, un transfert de puissance optimal avec un minimum de pertes. Ainsi, des étages d'adaptation de faible puissance devraient être répartis au plus près sur chaque groupe de cellules et permettre d'optimiser la production d'énergie avec un transfert de puissance le plus transparent possible.

Pour cela, la division du générateur PV en petits groupes indépendants, possédant chacun un étage d'adaptation avec son propre gestionnaire d'énergie, permet d'optimiser sa puissance délivrée en fonction de ses caractéristiques propres (*différences de caractéristiques, vieillissement des cellules, effets d'ombrage et des salissures*). Même si certaines cellules comportent des défauts qui peuvent changer leurs caractéristiques électriques au cours du temps, l'étage d'adaptation pourra ainsi exploiter au maximum l'énergie disponible du groupe de cellules traité. Du point de vue du GPV, c'est le cas idéal. La mise en œuvre d'une telle stratégie nécessite une architecture complexe ayant un grand nombre de composants électroniques aptes à transférer plusieurs niveaux de puissance sans trop de pertes. Cependant, le surcoût d'une telle architecture a jusque-là arrêté tous les projets de développement dans ce sens.

Les travaux engagés par le laboratoire ont pour objectif d'évaluer les bénéfices potentiels, en termes de gain énergétique, à distribuer les étages de gestion. Nous présentons pour cela notre approche concernant le développement des étages d'adaptation faible puissance pour la mise en œuvre d'une gestion de l'énergie générale distribuée. Une grande partie de ces études a été conduite systématiquement à l'optimisation des différents organes de l'étage d'adaptation afin de finalement développer des prototypes performants nous permettant de réaliser des validations expérimentales.

4. Discrétisation des chaînes de conversion

4.1 Structuration d'une chaîne classique de conversion.

4.1.1 Connexion directe d'un générateur photovoltaïque à une charge.

La connexion directe d'un panneau solaire photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et finalement le plus répandu, dans la mesure où la charge accepte bien la connexion directe au générateur de puissance continue qu'est le panneau solaire.

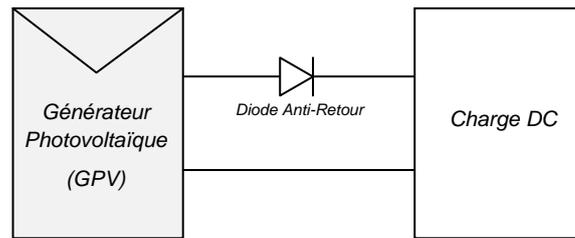


Figure I-8. Connexion directe d'un générateur photovoltaïque à une charge.

En effet, le générateur photovoltaïque est une source d'énergie continue qui ne peut être connectée à une charge alternative que via un étage d'adaptation de type onduleur. L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En effet, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique $I(V)$ du générateur photovoltaïque et celle de la charge (Figure I-9) : la puissance transmise directement à une batterie ou une charge résistive de type lampe ou bien même un moteur n'est pas toujours effectuée à la puissance maximale P_{MAX} que peut fournir le panneau solaire, autrement appelé Point de Puissance Maximal (PPM).

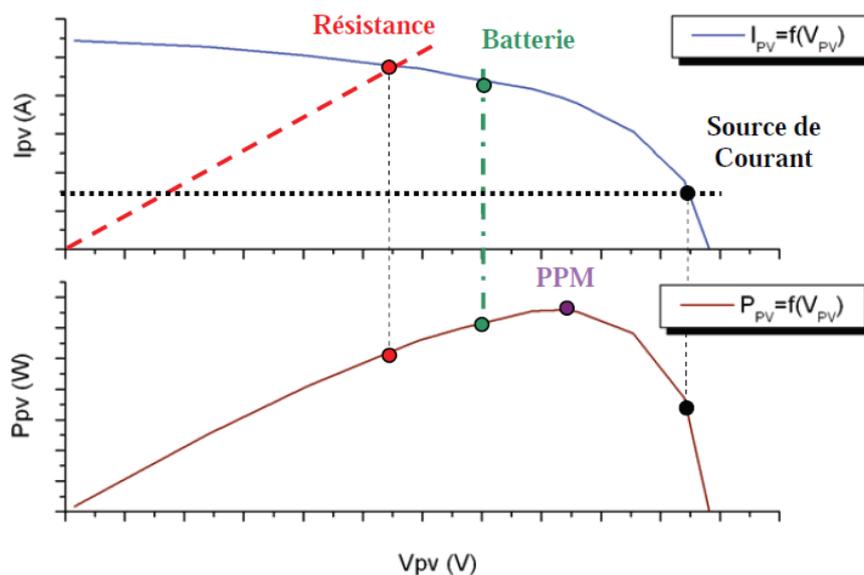


Figure I-9. Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque en connexion directe Générateur Photovoltaïque-Charge.

La solution la plus utilisée actuellement est de créer généralement un générateur photovoltaïque par association de cellules pour obtenir une puissance nominale donnée proche de celle nécessaire pour l'utilisation. Cette solution est valable pour les charges continues de type *batterie*, recueillant le courant photovoltaïque sous des tensions proches de la tension optimale V_{opt} du panneau solaire.

Une autre application directe est le pompage d'eau « au fil du soleil ». Dans ce cas, on garantit statistiquement la coïncidence du point de puissance maximale PPM du générateur avec les besoins optimaux de la charge. Toutefois, les pertes de ce genre d'association peuvent aller de 5% à 30% selon les gisements solaires et l'état des charges.

Pour augmenter la production d'un générateur photovoltaïque, on trouve de plus en plus d'étages d'adaptation entre le panneau et la charge, dans le but d'optimiser le transfert de puissance. Ces étages présentent certes l'inconvénient d'un surcoût par rapport à la connexion directe qui ne nécessite qu'une simple diode. Mais leur utilisation est motivée par de nombreuses études montrant une réduction du prix du kWh produit par ce type de générateur photovoltaïque. Ceci passe par une augmentation du rendement, et pourrait s'effectuer par une augmentation de l'énergie transmise du générateur photovoltaïque à la charge par l'intermédiaire de gestionnaires appropriés.

Aujourd'hui, on peut trouver deux types d'étages d'adaptation électroniques distincts commercialisés. Le premier type permet de connecter le générateur photovoltaïque à une charge continue telle qu'une batterie. Il fait appel à des convertisseurs DC-DC plus communément connus sous l'appellation d'hacheurs ou de régulateurs. Ce type d'architecture est la plupart du temps utilisé pour un fonctionnement en site isolé (*hors réseau, off-grid en anglais*). Cela permet de couvrir les besoins énergétiques d'une résidence ne disposant pas d'une connexion au réseau électrique public ou de satisfaire les critères d'augmentation d'autonomie dans les applications portables, les transports et le spatial.

On notera que, dans certaines configurations, l'utilisation d'étages de connexion est obligatoire car les caractéristiques de la charge ne sont pas compatibles avec la forme d'électricité produite par un générateur photovoltaïque. C'est le cas de toutes les charges ayant besoin de tensions alternatives, où l'on fait appel à un second type d'architecture permettant d'effectuer une conversion continu-alternatif (DC-AC). Ainsi, cette dernière permet d'injecter tout ou partie de l'énergie photovoltaïque produite dans un réseau de distribution.

4.1.2 Connexion générateur photovoltaïque-charge via un étage d'adaptation continu-continu.

Les panneaux solaires de première génération sont généralement dimensionnés pour que leurs PPM correspondent à la tension nominale de batterie de 12 ou 24 Volts. Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit à effectuer le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques. L'utilisation d'un étage d'adaptation afin d'optimiser la production d'énergie à tout moment est ainsi de plus en plus préconisée.

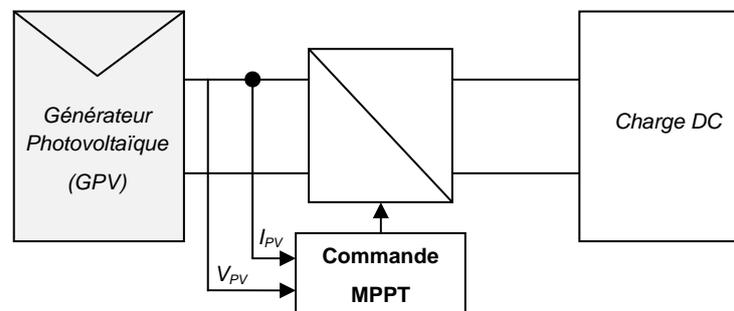


Figure I-10. Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT sur une charge continue [I-12].

Diverses architectures ont ainsi été mises au point pour améliorer la production d'un GPV, en particulier au LAAS-CNRS, à travers plusieurs thèses ; nous rappellerons par la suite divers principes de fonctionnement des étages d'adaptation ainsi que des éléments électroniques qui les composent.

- *Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC.*

La Figure I-10 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation continu-continu (DC-DC) entre le générateur photovoltaïque et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé **système autonome**. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stock d'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension (*ballast,...*). Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

De nombreuses recherches sur les commandes MPPT ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche de PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque [I-13, I-14]. Les commandes MPPT développées au LAAS, par exemple, sont toutes basées sur une commande extrême (*de type Perturb & Observe, P&O*) et utilisent le rapport cyclique du convertisseur de puissance (CS) pour appliquer une action de contrôle adéquate sur l'étage et pour suivre l'évolution au cours du temps du PPM [I-15, I-17]. Un grand nombre de ces commandes ont l'avantage d'être précises et d'avoir une grande rapidité de réaction mais souffrent encore d'un manque d'optimisation de leur algorithme parfois trop complexe et consommant alors trop d'énergie.

- *Travaux antérieurs effectués au LAAS-CNRS.*

Les travaux réalisés par Angel Cid-Pastor, dans le cadre de sa thèse sur la conception et la réalisation de modules photovoltaïques électroniques à l'échelle de 100Wc ont montré le bénéfice à utiliser un étage d'adaptation électronique par rapport à une utilisation d'une simple connexion directe par diode anti-retour [I-11]. Un exemple de résultats de ses travaux est consigné en Figure I-11 et représente la superposition des rendements MPPT des deux types de connexion.

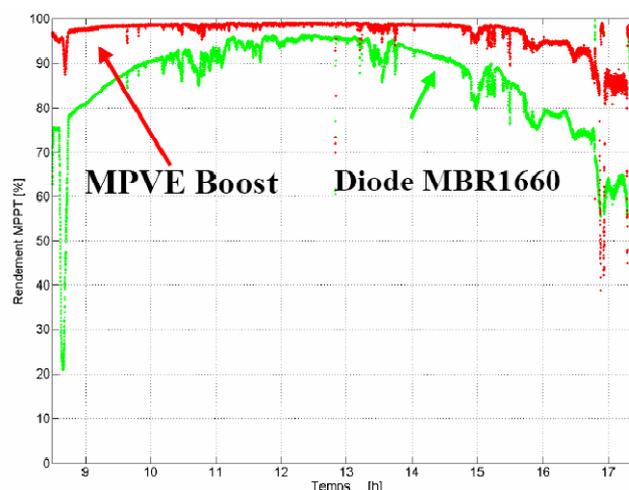


Figure I-11. Comparaison du rendement MPPT pour une connexion directe (*Diode*) et à l'aide d'un étage d'adaptation de type Boost avec MPPT (*MPVE*) [I-11].

On constate ainsi que le rendement MPPT η_{MPPT} de l'étage d'adaptation avec fonction MPPT est toujours supérieur à celui de la diode. De plus, le η_{MPPT} de l'étage est indépendant du niveau tension de la batterie, contrairement au cas d'une connexion directe.

Bien que ces étages d'adaptation dimensionnés à l'échelle d'un panneau constitués de 18 à 40 cellules en série représentent aujourd'hui un progrès important en termes de gain énergétique (de 5% à 10%), des problèmes d'optimisation persistent à l'échelle de la cellule. Ainsi, un des problèmes présentés par ce système est qu'en cas d'ombrage total ou partiel d'une partie du GPV, une grande partie des cellules connectées à l'étage d'adaptation ne peut plus produire de puissance. Ainsi, si l'ombrage concerne une seule cellule, la diode by-pass en antiparallèle condamne la production de l'ensemble des cellules autour du défaut, soit de 12 à 18 cellules. De plus, lorsque le GPV possède plusieurs diodes-bypass, et en cas de fonctionnement d'au moins l'une d'entre elles, la commande MPPT de l'étage d'adaptation est incapable d'identifier le point de puissance maximal optimal de ce système (problème de présence de plusieurs PPM partiels).

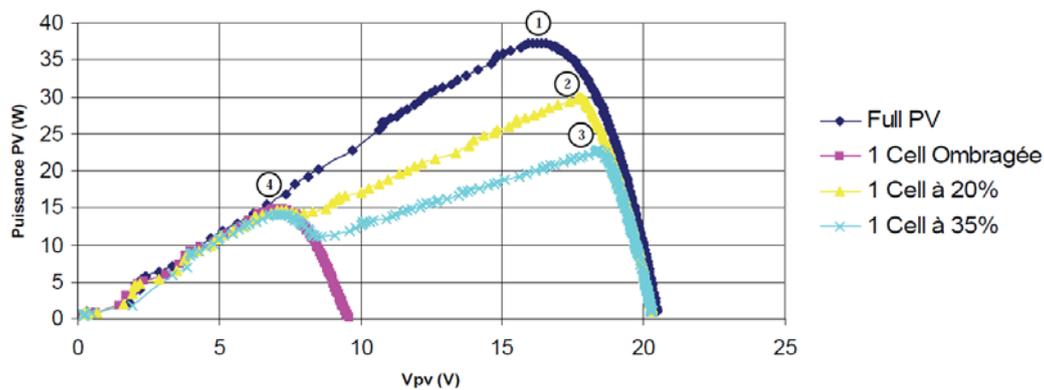


Figure I-12. Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau photovoltaïque et effets d'occultation d'une des cellules qui composent le module photovoltaïque.

La caractéristique consignée en Figure I-12 montre l'impact de l'ombrage sur une seule cellule photovoltaïque, parmi les 36 qui composent le module PV, sur la production de puissance du GPV.

Prenons le cas d'un fonctionnement normal ; on retrouve bien la caractéristique $P(V)$ classique d'un générateur photovoltaïque (*Full PV*), avec un PPM au point 1. Mais lorsqu'une cellule du module est totalement ombragée, la diode by-pass isole la partie défectueuse du panneau et on ne peut récupérer au mieux que la moitié de la puissance de fonctionnement normal (*PPM en point 4*).

Un nouveau problème survient lorsqu'une ou plusieurs cellules sont moins bien éclairées que les autres. On trouve alors deux PPM distincts sur la caractéristique $P(V)$ du GPV (*point 4 et point 2 ou 3 pour des éclairagements respectifs de 20 et 35% inférieurs dans une partie du système par exemple*). Cette distorsion de la courbe de puissance perturbe alors l'ensemble des systèmes de recherche du PPM ne pouvant pas garantir que le GPV fonctionne à son optimum. Au mieux, le système va s'accrocher à un des PPM sans savoir si c'est le plus productif. Ceci peut aussi entraîner des instabilités sur les recherches de point de puissance maximal.

Par ailleurs, pour les méthodes de contrôle MPPT basées sur l'estimation du PPM par mesure de la tension en circuit ouvert V_{OC} ou du courant de court-circuit I_{CC} , ces algorithmes basés sur les relations de proportion respectives entre I_{CC} et I_{opt} , ou bien V_{OC} et V_{opt} lorsque l'éclairement du GPV est homogène, deviennent erronés dès lors que les caractéristiques électriques du GPV rentrent dans un mode dégradé. Pour le cas de la MPPT extrême du LAAS, qui fonctionne sur le calcul de la dérivée de la courbe de puissance, une dérivée égale à zéro devrait normalement prouver que nous sommes bien sur le PPM de fonctionnement. Dans le mode dégradé d'éclairement inhomogène, l'étage d'adaptation trouvera bien un PPM mais rien ne prouve que ce soit celui qui produit le maximum de puissance. Ainsi, le système peut croire que le point 4 est le PPM, alors que les cas optimaux sont les 2 ou 3. L'étage d'adaptation ne remplit donc pas tout à fait son rôle de maximisation de transfert de puissance lorsque le GPV se retrouve en mode dégradé d'ombrage partiel.

En résumé, les perturbations extérieures liées à un éclairement inhomogène et les défauts dans le matériau des cellules liées au vieillissement peuvent modifier les caractéristiques électriques des modules photovoltaïques. Ces modifications intempestives et inévitables perturbent donc les recherches des PPM sur des chaînes de cellules comprenant plusieurs diodes by-pass. Le contrôle MPPT peut même engendrer des erreurs sur le PPM le plus productif et donc représenter une perte de puissance de près de 50% voir plus en cas de défaut d'éclairement inhomogène (*point de fonctionnement 4 par rapport au point 2*).

Conscient des problèmes de fonctionnement non optimaux en mode dégradé des étages d'adaptation à l'échelle d'un module commercial ou d'une chaîne de modules, le LAAS a décidé d'effectuer des recherches sur de nouveaux étages d'adaptation mieux adaptés à la problématique d'ombrage et d'éclairement inhomogènes. Pour cela, nous avons cherché à savoir si les architectures devaient être encore plus discrétisées et à quelle échelle de puissance.

4.1.3 Intérêts de la discrétisation.

La gestion globale d'un panneau solaire est importante à considérer afin d'optimiser sa production énergétique tout au long de sa vie. Une solution envisageable consiste à diviser le panneau en plusieurs parties et en distribuant ensuite la gestion de son énergie sur plusieurs systèmes relativement indépendants les uns des autres. Bien sûr, on peut toujours considérer que le risque de voir survenir des problèmes de gestion est minimisé dès lors que les panneaux solaires sont installés en fixe sur un toit bien exposé sans obstacles d'ombrage aux alentours.

En réalité, cette démarche limite considérablement les sites de gisement potentiels, surtout en zone urbaine où les toitures sont rapprochées et la présence d'obstacles comme des cheminées, des poteaux électriques ou autres est très probable.

Aujourd'hui, la discrétisation de la gestion énergétique des panneaux photovoltaïques s'impose comme une évidence si on fait appel à des cellules de caractéristiques différentes ou placées sur des supports à diverses inclinaisons (*pentés des toitures + façades*). Une division fine de la gestion de l'ensemble photovoltaïque semble donc une solution viable permettant d'accroître encore la production d'énergie électrique.

Dans le cas de l'habitat, le toit est soumis à des ombrages divers comme les cheminées, les antennes et les toitures voisines (*en ville par exemple*), aux intempéries et aux salissures pour ce qui est des

conditions météorologiques et souvent faute de choix, d’une orientation du GPV non optimale pour des GPV ayant été installés après la construction du bâtiment.

Quoi qu’il en soit, l’énergie photovoltaïque reste difficile à appréhender compte tenu de son comportement aléatoire et non linéaire. L’utilisation d’un étage d’adaptation électronique augmente évidemment le coût à l’achat de l’ensemble mais permet de transférer à la charge le maximum d’énergie disponible. Les progrès réalisés en électronique de puissance, surtout dans les rendements de conversion, permettent de rendre transparent l’étage d’adaptation vis-à-vis de la chaîne de conversion photovoltaïque. L’évolution des architectures de conversion et de gestion énergétique devrait permettre bientôt d’aller vers des structures de gestion plus fines optimisant au mieux la production d’un panneau solaire tout au long de sa vie.

4.2 Les micro-convertisseurs comme étages d’adaptation.

La discrétisation de la gestion de puissance pour les applications photovoltaïques semble une solution avantageuse dans un but d’optimisation et d’augmentation de la production électrique solaire. Le LAAS-CNRS travaille dans cet axe depuis plusieurs années et a déjà prouvé le gain que peut apporter une architecture distribuée en opposition à une architecture centralisée.

Dans ces études, un étage d’adaptation optimisé comprenant sa propre commande MPPT est associé à chaque module commercial. Ces divers convertisseurs assurent également les fonctions élémentaires de sécurité (*diodes by-pass et diodes anti-retour*). Ils constituent un étage fortement distribué de conversion de puissance entre le générateur PV (GPV) et la charge (*batterie, autre DC/DC, moteur DC ou onduleur*).

Ce type d’architecture a été validé en montrant des gains énergétiques de 5 à 30% selon les applications et a fait l’objet de travaux de valorisation avec EDF dans le cadre des thèses d’Angel Cid-Pastor puis de Cédric Cabal, qui ont été confirmés dans l’ANR Microscope. Ces DC/DC sont aujourd’hui réalisés en tant que prototypes préindustriels et sont en cours de test à grande échelle sur plusieurs sites européens.

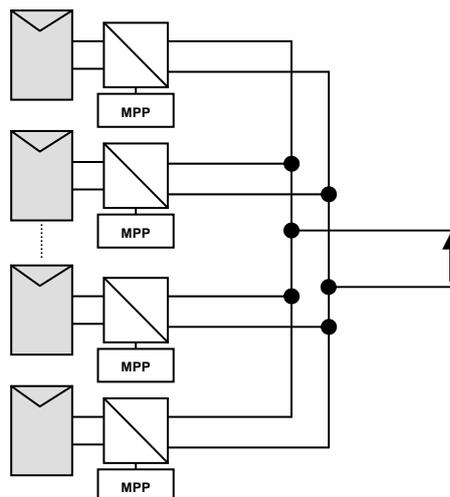


Figure I-13. Nouvelle architecture distribuée dédiée aux applications photovoltaïques proposée par le LAAS.

Aujourd'hui, on peut légitimement se poser la question « jusqu'à quel point doit-on discrétiser ce système de gestion ? » Qu'y gagne-t-on en terme énergétique ? Combien cela coûte-t-il ? Nous avons souhaité repousser les limites au plus petit nombre de cellules possible pour savoir si le gain apporté en terme énergétique restait valable à ces échelles de faibles puissances. Ainsi, nous souhaitons optimiser l'énergie photovoltaïque au maximum de ses capacités. Mais de nombreux verrous technologiques sont à résoudre avant d'arriver à une discrétisation aussi fine de la chaîne de conversion électrique, sans compter les surcoûts économiques, qui augmentent d'autant avec le nombre d'étages de conversion croissant. Maintenant, la question à se poser devient jusqu'à quel point peut-on discrétiser le système de gestion et quel nombre d'étages d'adaptation ?

Nous avons cherché les réponses dans les limites technologiques de développement des micro-convertisseurs devant avoir des rendements relativement élevés. De nos jours, si on considère le critère rendement η_{conv} des convertisseurs de puissance, des rendements de conversion supérieurs à 95%, avec un record mondial de 99% obtenus par le Franhofer de Fribourg, sont aisément obtenus sans trop de difficulté lorsque la puissance à transférer est supérieure à 50W. Ceci permet de considérer cet étage comme transparent et de négliger son influence vis à vis du reste de la chaîne de conversion. Mais, dès que l'on descend sous des puissances de 10 W, on se heurte à deux difficultés :

- arriver à conserver des rendements aussi élevés ;
- la taille et l'encombrement importants de tous ces étages compte tenu de la multiplication de ces derniers, sans compter le prix.

Nous avons toutefois pensé à faire appel à des étages de conversion de puissance électrique intégrés au plus près de la source photovoltaïque, afin de minimiser au maximum les diverses connexions génératrices de pertes et l'encombrement de l'étage. Ceci fait appel aux techniques les plus avancées en termes d'intégration de puissance non existantes à ce jour dans le domaine du PV. Le domaine applicatif qui s'avère le plus proche est celui des systèmes embarqués faisant appel à des CS traitant des puissances inférieures à 2W qui s'est fortement développé ces dernières années avec l'essor des téléphones portables et plus généralement, toutes les nouvelles fonctionnalités liées au nouveau mode de vie nomade. Dans ces applications, les convertisseurs électriques intégrés et semi-intégrés existent déjà à des tailles intéressantes (*quelques mm²*) ainsi que des coûts relativement bas liés à de grandes quantités de production. Cela nous conforte sur la possibilité d'une intégration de l'étage d'adaptation avec un faible encombrement et un fort rendement compatible avec notre projet de rapprochement des étages de conversion aux cellules PV.

Si l'on considère toujours l'électronique portable, son évolution est d'intégrer de plus en plus de fonctions autant en sécurité qu'en intelligence. Ceci implique des puissances volumiques et massiques de plus en plus importantes. En parallèle, les progrès effectués ces dernières années dans le domaine de la conversion de puissance introduisent des fonctions de plus en plus compactes, voire intégrées permettant aujourd'hui d'envisager des alimentations de faibles puissances en version totalement intégrée. Ces avancées et cette expérience acquise depuis de nombreuses années dans le domaine de l'électronique embarqué, nous permettent d'envisager une discrétisation de la gestion de puissance très fine (*de l'ordre de 0.5 à 2Watts*). C'est donc sur ces bases que nous avons développé notre système de gestion photovoltaïque et que se situent nos principaux travaux de recherche développés au sein du LAAS.

Discrétisation des chaînes de conversion

Actuellement, différentes architectures de gestion photovoltaïque sont proposées sur le marché et permettent de valoriser plus ou moins bien la production énergétique d'origine photovoltaïque. Nous abordons dans cette partie les architectures de conversion DC-DC discrétisées, permettant d'apporter des solutions technologiques novatrices en termes d'amélioration de l'ensemble des rendements de la chaîne de conversion, avec une volonté forte d'intégration de l'ensemble, afin d'en abaisser les coûts tout en améliorant le vieillissement de l'ensemble. Après avoir rappelé le concept et la validité du concept de discrétisation, nous nous focaliserons sur l'étude d'un convertisseur pour une cellule Tandem, en mettant en valeur un exemple d'architecture discrétisée à grande échelle sur des nouveaux générateurs PV. Nous donnerons quelques pistes à explorer pour améliorer ces micro-convertisseurs dédiés ainsi que les conclusions auxquelles nous arrivons à ce jour en termes d'intégrabilité, en particulier de l'élément inductif.

1. Discrétisation des chaînes de conversion

1.1 Contexte.

Historiquement, la discrétisation des chaînes de conversion a été envisagée dans le but d'apporter des améliorations par rapport aux structures développées classiquement [II-1]. En effet, dans les premières installations de fortes puissances, le convertisseur statique était dimensionné à la taille de la puissance du générateur photovoltaïque (*centralized technology*). Outre les problèmes de pertes de production de l'énergie photovoltaïque, lorsqu'il advenait une défaillance dans la partie de conversion, la totalité de l'énergie produite était alors perdue. Partant de ces différents constats, et en s'inspirant de la tendance générale de discrétisation des chaînes de conversion que l'on peut noter au fur et à mesure de l'évolution des produits industriels, il paraît désormais communément admis de partitionner les installations de fortes puissances PV en plusieurs sous-champs constitués d'ensembles de modules PV, délivrant leurs puissances à des convertisseurs DC/DC eux-mêmes connectés à des onduleurs de plus faible puissance (*multi-string technology*). Ainsi, si l'un des sous-champs présente une défaillance, les pertes de production n'affectent alors qu'une petite partie de la chaîne.

Cette modification d'architecture a apporté, par la discrétisation de chaque string PV, une amélioration de la robustesse et de la fiabilité et a surtout permis d'augmenter les rendements des étages de conversion. On peut également constater une amélioration constante ces dernières années des performances des commandes MPPT qui, par ailleurs, ne se focalisent que sur une petite partie de la chaîne de cellules PV. [II-2].

Dans ce contexte, les architectures PV développées au sein du LAAS-CNRS, se placent dans un niveau de discrétisation plus poussé à l'échelle d'un module, voir un demi-module commercial (*Figure 1*). Notre objectif est d'exploiter individuellement des générateurs photovoltaïques de très faible puissance afin d'extraire en permanence le maximum de puissance qu'ils peuvent délivrer, quelque soient les conditions météorologiques et les éventuels ombrages. Comparée à la technique « string technology » qui exploite n modules PV connectés en séries, dont la valeur du courant est fixée par la cellule fournissant le moins de courant, les architectures distribuées à l'échelle de quelques cellules extraient au mieux toute l'énergie PV potentielle.

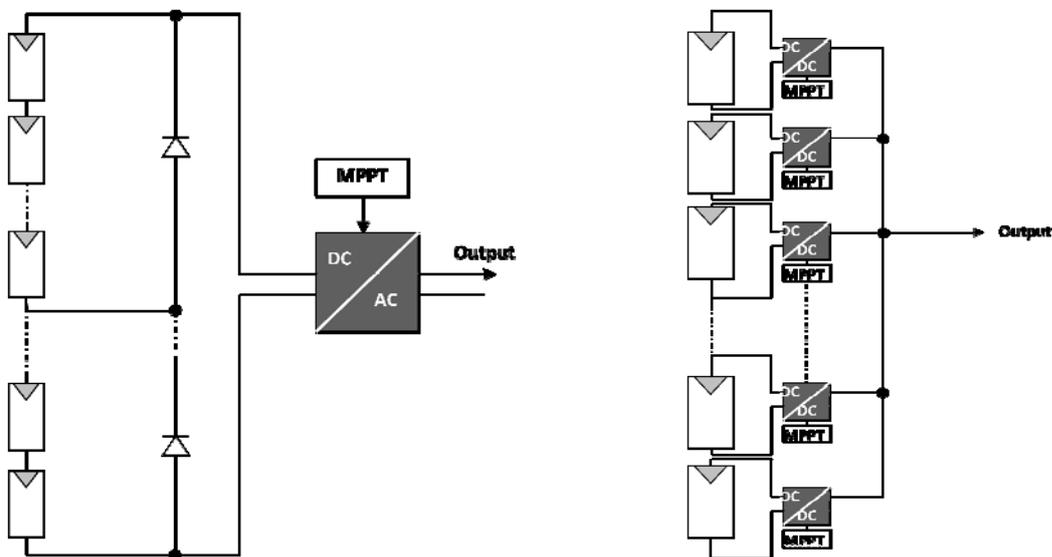


Figure II-1. Principe de la discrétisation des chaînes de conversion photovoltaïques.

Pour cela, nous avons poursuivi le développement de briques élémentaires de conversion qui sont constituées de chaînes élémentaires de conversion de très haut rendement, comprenant leur propres lois de commande et les sécurités électriques (*diodes anti-retour et by-pass*) [I-11]. Ces briques fonctionnent de façon autonome et peuvent ainsi soit fonctionner seules comme étages d'adaptation pour des charges DC de faibles puissances, soit en association à d'autres chaînes élémentaires pour augmenter l'énergie PV produite et, au besoin, la transférer à des étages de conversion continus ou alternatifs de plus forte puissance, assurant la mise en forme nécessaire pour chaque application. On notera que ce type d'architecture peut ainsi répondre à un besoin de puissance spécifique allant de quelques watts à des kW, selon la taille de l'installation. L'extrapolation à des puissances plus grandes fait partie des perspectives futures.

1.2 Exemple d'illustration.

Pour évaluer les performances énergétiques des architectures PV discrétisées et analyser le comportement en présence d'ombrages, le LAAS a acquis un savoir-faire en matière de métrologie de pointe. Ainsi dès 2000, un banc d'acquisition performant a été élaboré au sein du laboratoire afin de pouvoir comparer diverses chaînes de conversion en conditions réelles de fonctionnement [I-19]

Un exemple d'essai significatif mené au sein du LAAS, a eu lieu durant la thèse de Cédric Cabal. Des comparaisons de chaînes élaborées au sein de l'équipe ont été effectuées à l'échelle d'un panneau avec un chargeur commercial de batterie [I-12]. Ce chargeur, référencé Solar Boost 6024H et commercialisé par la compagnie Blue Sky Energy, a été choisi par rapport à ses caractéristiques électriques compatibles avec notre installation PV et adaptées à notre banc de mesures actuellement orienté vers des faibles puissances [II-3]. Ce chargeur, d'une puissance de 1600W, permet de charger des batteries de 12 ou 24V à partir d'une tension nominale PV comprise entre 36 et 48V, correspondant à l'association de plusieurs modules PV en série. Ces gammes de tension permettent d'affirmer que l'étage de conversion utilisé est de nature abaisseuse.

Pour évaluer avec précision le comportement de ces deux architectures photovoltaïques, nous avons procédé à plusieurs séries de mesures. La première campagne de tests comparatifs a été réalisée en présence d'un ensoleillement homogène, dans le but d'analyser les performances des deux commandes MPPT. Par opposition, la seconde série de mesures s'est focalisée sur la problématique de la présence d'un rayonnement non-homogène (*ombrage locaux*) sur les GPV.

1.2.1 Tests en éclairage homogène.

Les tests comparatifs menés avaient pour objectif d'évaluer précisément le gain en termes d'énergie produite par un ensemble de générateurs photovoltaïques exploités individuellement (*constituant ainsi une architecture distribuée*), par rapport à une architecture basée sur la connexion d'un string PV de tension élevée. La figure II-2 présente le protocole de test utilisé pour effectuer ces comparaisons.

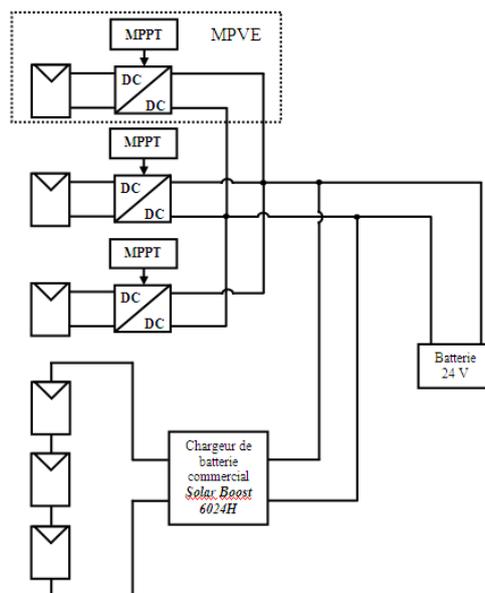


Figure II-2. Principe de la discrétisation des chaînes de conversion photovoltaïques.

On notera que, durant ce test, le chargeur de batterie commercial est connecté à trois modules associés en série correspondant à une puissance crête de 255W, pour une tension V_{oc} de 66V. Celui-ci est confronté à trois modules conçus et réalisés par le LAAS, dans le cadre de contrats CIFRE avec EDF et appelés MPVE, fonctionnant à une fréquence de découpage de 320kHz. Chaque MPVE est relié à un module PV de 85W, représentant ainsi lors de ce test une puissance PV équivalente à l'entrée des deux architectures. Les deux structures sont connectées à une batterie de 24V et une charge électronique branchée en parallèle, afin de limiter la tension de cette dernière et surtout d'éviter que le module Solar Boost rentre en mode de gestion de la batterie, limitant alors le transfert de puissance à la charge et faussant ainsi la comparaison.

	Energie maximale disponible (Wh)	Energie produite (Wh)	Rendement MPPT (%)	Energie transmise (Wh)	Rendement convertisseur (%)	Rendement chaîne de conversion (%)
Architecture discrétisée LAAS	1137,4	1124,8	98,9	1001,9	89,1	88,1
Chargeur commercial	1137,4	940,4	82,6	866,3	92,1	76,1

Tableau II-1. Bilan Energétique du chargeur commercial et de l'architecture discrétisée du LAAS-CNRS sous un ensoleillement homogène.

Le tableau II-1 montre les évaluations des différents bilans énergétiques présents au sein des deux architectures. Ce tableau récapitulatif permet d'évaluer les performances des deux modes de recherche du PPM sur une journée. Nous pouvons ainsi remarquer un surplus d'énergie extraite au niveau de la source photovoltaïque obtenue par la structure discrétisée de 185Wh par rapport au chargeur commercial. Ce résultat est dû à l'aptitude de la commande MPPT extrême développée par le LAAS à fonctionner sur une large plage de puissance avec un rendement élevé, permettant ainsi d'obtenir un rendement supérieur de 16 % par rapport au convertisseur du commerce.

Au niveau du transfert de l'énergie PV à la batterie, nous pouvons voir que le chargeur du commerce est le système qui affiche le meilleur taux de conversion avec un rendement de 92.1%, comparé au 89.1% de la structure discrétisée. Ceci peut s'expliquer par les puissances nominales des deux architectures qui sont très différentes. En effet, le Solar Boost est dimensionné pour une puissance nominale de 1600W, tandis que la puissance nominale de chaque module MPVE est de 100W soit, pour l'architecture discrétisée testée, à un convertisseur d'une puissance nominale de 300W. Durant ce test, le chargeur de batterie a fonctionné en moyenne à 6% de sa puissance nominale, alors que les convertisseurs MPVE ont fonctionné à 45% de leur puissance nominale ; ainsi, la comparaison en termes de rendement de conversion n'est pas significative car les convertisseurs n'opèrent pas à des pourcentages de puissance nominale identiques. Pour une analyse plus approfondie de ces deux architectures ainsi que d'autres architectures en cours de développement, un site expérimental plus important en puissance est nécessaire. Il permettrait de faire fonctionner l'architecture commerciale dans les conditions préconisées par le constructeur. C'est notamment dans ce but qu'a été envisagée la

plateforme photovoltaïque dans ADREAM, qui sera développée ultérieurement dans nos perspectives.

1.2.2 Tests en éclairage inhomogène.

Pour compléter notre analyse au niveau des architectures, nous avons effectué des essais sous ensoleillement non-homogène, en étudiant des ombrages partiels localisés effectués avec un objet opaque placé sur une cellule entière d'un panneau BP 585 comme indiqué sur la figure II-3. Le but de cet essai est de mettre en évidence les problèmes de production de puissance photovoltaïque en présence d'ombrage. Lors de ce test, nous avons ainsi pu constater, à l'apparition d'ombrages sur divers GPV, la mise en conduction d'une ou plusieurs diodes de protections. Nous avons ainsi effectué diverses mesures pour montrer les pertes de production électrique que cela entraîne durant le laps de temps que le défaut existe.

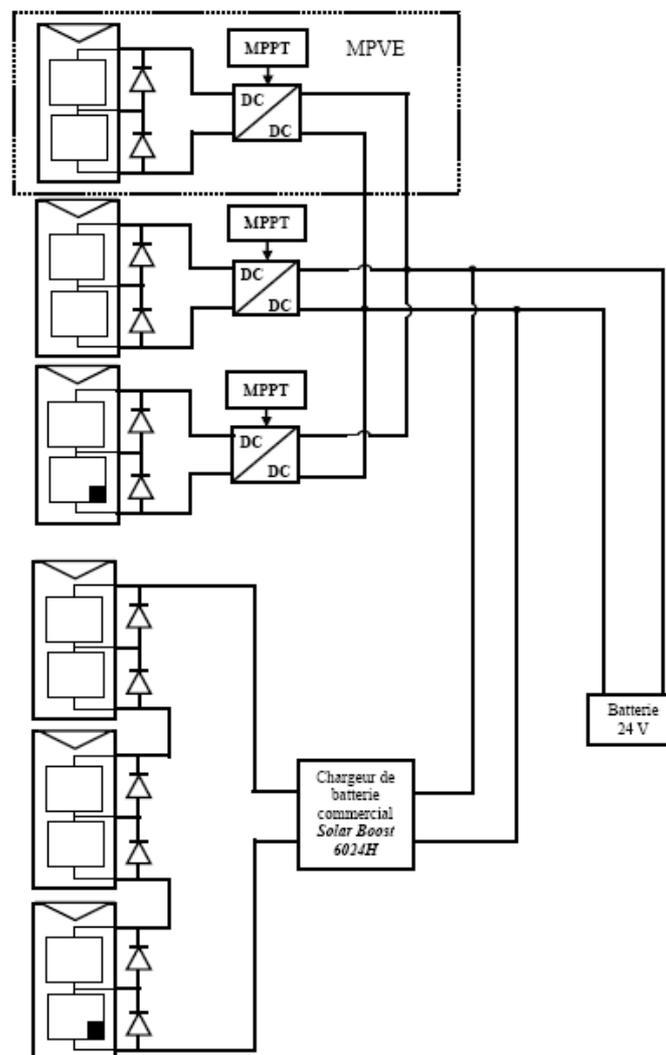


Figure II-3. Schéma de connexion utilisé pour effectuer des études d'ombrage sur le chargeur de batterie commercial.

La figure II-4 permet d'analyser le comportement du module commercial lorsqu'il est soumis à ce phénomène d'ombrage. Au début du test, le chargeur du commerce, de par la présence d'un courant PV supérieur à 2.5A, fonctionne en mode de recherche du point de puissance maximal (PPM), avec une tension à ses bornes avoisinant les 42V. L'apparition de l'ombrage sur une cellule implique la perte d'un sous-réseau de 18 cellules et se manifeste, d'une part, par une chute de tension d'une dizaine de volts à l'entrée de l'étage de conversion et, d'autre part, par une perte de production PV. Nous pouvons remarquer que, durant cette phase, la commande MPPT continue à traquer le PPM. Nous provoquons volontairement plusieurs ombrages partiels sur le GPV, activant de nouvelles diodes de protection activées par la baisse sous formes de paliers de la production de la puissance PV. Le chargeur commercial passe alors en mode de connexion directe lorsque sa tension d'entrée devient proche de celle de la batterie. La chute de production de puissance est alors amplifiée par la chute du courant PV produit liée à un fonctionnement éloigné du PPM.

Nous pouvons remarquer un arrêt total de la production PV induite par la perte de deux modules PV impliquant une tension d'entrée inférieure à la tension de batterie. Dans ce cas-là, la structure de conversion (*Buck*) de ce chargeur ne peut plus fonctionner. On notera quand même que, lorsque les ombrages disparaissent, les différents modes de fonctionnement du chargeur commercial reprennent, permettant à nouveau de produire de la puissance PV.

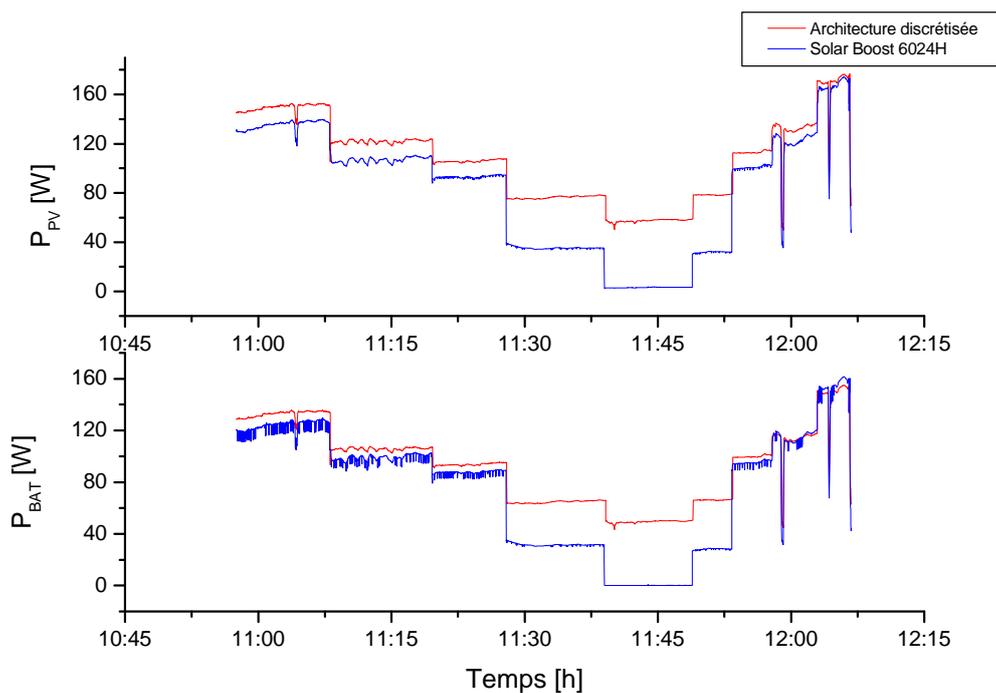


Figure II-4. Comparaison des puissances PV extraites et renvoyées à la batterie entre le chargeur commercial et l'architecture discrétisée du LAAS-CNRS, en présence d'ombrages partiels.

Toujours sur la figure II-4, nous montrons les résultats obtenus en effectuant des essais similaires sur l'architecture distribuée. Dans les mêmes conditions, la puissance extraite par chaque module MPVE ainsi que la puissance totale produite par l'architecture discrétisée ont été mesurées. Pour cette architecture, lorsqu'un sous-réseau de cellules est désactivé, en d'autres termes lorsque le module MPVE ne fonctionne plus qu'avec un demi-module PV, la commande MPPT va continuer à optimiser

la production du GPV en recherchant le point de puissance maximum. Lorsque deux panneaux solaires ont respectivement un problème d'ombrage, aucune énergie en provenance de ces modules ne peut être transférée à la charge. Cependant, il reste un panneau qui fonctionne à sa pleine puissance, produisant un tiers de la puissance nominale. Par comparaison, pour ce même défaut, le chargeur de batterie commercial ne fonctionne plus après la perte de deux panneaux PV, inhibant toute production.

L'architecture discrétisée montre bien qu'elle optimise la production de puissance d'un GPV sur toute la durée du test, se traduisant alors par un meilleur transfert d'énergie à la batterie, comme nous pouvons le voir sur la figure II-4, où la superposition des puissances PV extraites de chaque architecture en présence du phénomène d'ombrage est effectuée. Le bilan énergétique de ce test est rapporté sur le tableau II-2, où nous pouvons voir que l'exploitation individuelle des PV a permis d'obtenir un gain au niveau du rendement global de la chaîne de conversion photovoltaïque de l'ordre de 15%.

	Energie maximale disponible (Wh)	Energie produite (Wh)	Rendement MPPT (%)	Energie transmise (Wh)	Rendement convertisseur (%)	Rendement chaîne de conversion (%)
Architecture discrétisée LAAS	129.5	128.6	99.3	112.2	87.2	86.6
Chargeur commercial	129.5	101	78	92.7	91.8	71.6

Tableau II-2. Bilan Énergétique du chargeur commercial et de l'architecture discrétisée du LAAS-CNRS sous un ensoleillement non-homogène.

Par ce simple exemple de comparaison, nous montrons toute la difficulté d'évaluation des performances des chaînes de conversion PV en condition réelle de fonctionnement. Nous voyons également que toutes les pertes sont importantes et se traduisent directement en termes de pertes de productibles autant sur la source PV, son adaptation au PPM que le rendement de conversion des convertisseurs. Reste alors à savoir quelle chaîne utiliser sous quelle condition et à quel coût.

2. Discrétisation au plus près des cellules : le projet ATOS.

2.1 Le projet de Recherche ATOS.

Le projet Association Tandem Optimisé pour le Solaire est un projet qui a été labellisé en 2005 et financé sur trois ans par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Ce projet regroupe différents laboratoires tels que le LPICM qui est le coordinateur, le LGEP et le LAAS ainsi que plusieurs partenaires industriels comme TOTAL, SOLEMS et St GOBAIN afin d'associer leurs compétences.

Ce projet a pour but de développer une nouvelle filière de cellules photovoltaïques en couches minces de silicium, à partir de solutions de type tandem innovantes autant sur les matériaux que les associations de cellules allant jusqu'à la conception d'électrodes intermédiaires afin de dissocier les différents types de matériaux. Les constituants de ces cellules tandem novatrices sont des cellules avant de type PIN en silicium polymorphe hydrogéné (*pm-Si:H*) et des cellules arrière en silicium microcristallin hydrogéné (*μ c-Si:H*) [II-4, II-5, II-6]. Les recherches sur les couches minces de silicium menées en France ont permis de mettre en évidence une forme nouvelle de silicium baptisée silicium polymorphe (*pm-Si:H*). Il possède des propriétés électroniques améliorées par rapport au a-Si:H et est moins sensible au phénomène de dégradation sous lumière. Ce matériau contient également plus d'hydrogène que le a-Si:H et possède un gap plus grand (1.8 à 1.9eV au lieu de 1.7eV). Ces éléments font du *pm-Si:H* un meilleur candidat pour la cellule avant d'une structure tandem que le traditionnel a-Si:H. Le silicium microcristallin hydrogéné (*μ c-Si:H*) possède un gap nettement plus petit que celui du *pm-Si:H*, entre 1.1 et 1.5eV selon la fraction cristalline du matériau. Il s'agit donc d'un matériau adapté pour la réalisation de la cellule arrière dans une association de type tandem avec une cellule en *pm-Si:H* car complémentaire par rapport à sa sensibilité aux longueurs d'onde des photons avec la couche avant. Ainsi cette association couvre théoriquement mieux le spectre solaire que des cellules à base de silicium mono ou multi-cristallin.

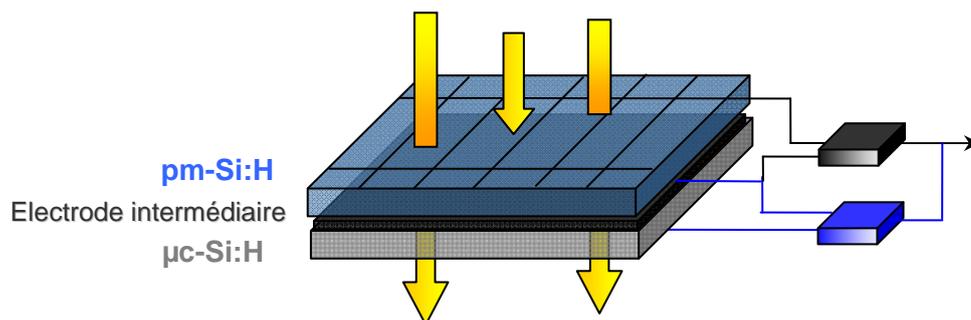


Figure II-5. Exemple de structure de cellules PV Tandem avec électrode intermédiaire pour gérer indépendamment chaque type de cellule.

Deux types de structures ont été étudiés. D'une part une structure, dite à 4 électrodes, pour laquelle les cellules polymorphe et microcristalline sont séparées électriquement et physiquement, soit par préparation indépendante suivie d'assemblage au moyen d'une couche d'élastomère de silicone, soit par dépôts successifs avec mise en place d'une couche de résine silicone d'isolation électrique mais totalement transparente. Dans le projet ATOS, nous avons développé l'approche de modules indépendants. Les structures à quatre électrodes peuvent être fabriquées par post assemblage des cellules ou modules polymorphe et microcristallin fabriqués séparément.

Outre la structure à quatre électrodes à partir de deux modules assemblés, on peut envisager d'autres solutions pour des modules tandem monolithiques à trois ou quatre fils. Par exemple, une structure, dite à 3 électrodes peut être formée en déposant successivement les deux cellules et en les couplant électriquement par une couche intermédiaire de matériau de type TCO, agissant à la fois comme contact électrique et comme réflecteur pour la cellule polymorphe. Il est aussi possible de réaliser une

structure monolithique à quatre électrodes en intercalant une couche diélectrique à base de résine entre deux couches de TCO.

Dans tous les cas de figure, comme les caractéristiques intrinsèques des deux types de matériaux répondent différemment aux longueurs d'onde du spectre solaire, chaque type d'association de cellules ne présentera pas la même caractéristique $I(V)$ et donc pas le même point de puissance optimal.

Une partie significative du projet a donc été consacrée aux aspects "Système" sur l'élaboration des commandes et de la gestion optimisées. Le LAAS a été en charge de cette tâche compte tenu de l'expérience acquise sur les étages d'adaptation et les MPPT. Nous avons travaillé sur ce principe de gestion permettant de rendre indépendant chaque cellule de l'ensemble tandem, le but étant d'explorer de nouvelles architectures, d'en montrer les verrous et de développer un démonstrateur permettant de prouver les bénéfices à individualiser cette gestion. L'objectif final est d'atteindre un rendement photovoltaïque global supérieur à 12% à partir de cette filière silicium entièrement "couches minces" et "basse température".

2.2 Du panneau photovoltaïque vers la cellule.

Comme nous l'avons dit dans le chapitre précédent, les travaux de recherche effectués dans le projet ATOS portent sur deux grandes innovations :

- Le développement de nouveaux matériaux photovoltaïques performants pour les applications tandem,
- La mise en place d'un isolant intermédiaire entre les cellules permettant de les rendre indépendantes afin de permettre une gestion dissociée du productible PV par type de matériau.

C'est dans ce dernier axe de recherche que le laboratoire LAAS a plus particulièrement travaillé, en particulier dans le cadre de la thèse de Stéphane Petibon [II-7]. Les travaux du laboratoire se sont orientés sur l'étude des différentes associations possibles de cellules afin de trouver l'architecture valorisant au mieux la production électrique de l'ensemble tandem. Dans ce cadre de recherche, l'entreprise SOLEMS, partenaire du projet ATOS, nous a fourni deux types de panneaux en silicium amorphe dont les caractéristiques électriques sont définies dans le

Tableau II-3.

Référence Solems	Sous un éclairement de 200W/m ²	Sous un éclairement de 1000W/m ²
14/150/300TD	39mA – 6.6V	195mA – 7.5V
28/300/100TD	12mA – 13.8V	62mA – 15V

Tableau II-3. Caractéristiques électriques des modules Solems

Ces deux panneaux nous permettent de simuler les futurs modules susceptibles d'être produits dans le projet ATOS, quels que soient le choix de connexion inter-électrode réalisé au final. On peut ainsi

observer en figure II-6 les caractéristiques électriques expérimentales des deux modules réalisés sur le site expérimental du LAAS-CNRS de Toulouse.

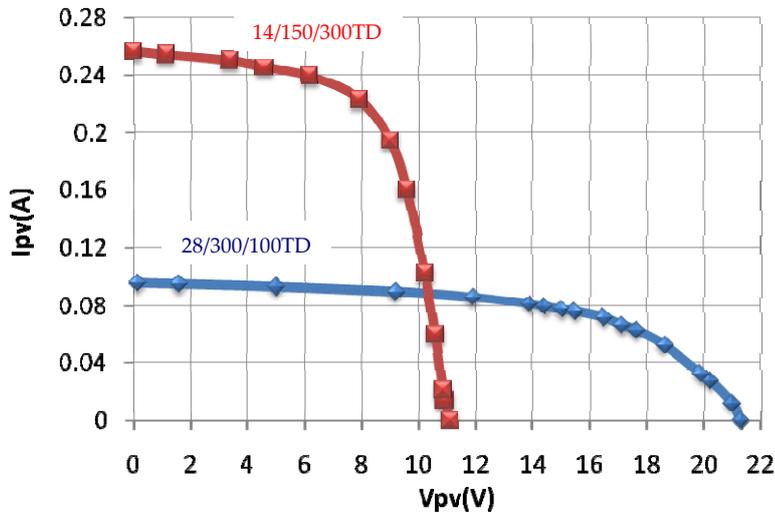


Figure II-6. Caractéristiques I(V) des générateurs PV Solems (Toulouse, sous 1000W/m^2 , 26°C , inclinaison de 35°).

Le module référencé 14/150/300TD, qui produit au mieux une puissance crête de 1.6W_c sous ensoleillement réel, nous permet de simuler le module en face avant et le second module face arrière peut être représenté par le module 28/300/100TD disposant d'une puissance crête maximale de 1.1W_c .

Des modèles électriques simples des deux différents panneaux fournis par Solems ont donc été développés grâce au logiciel de simulation électrique PSIM. Nous avons ainsi étudié, par simulation, l'associabilité de ces deux panneaux photovoltaïques dans différentes configurations possibles, bien avant que le module optimal de cellules tandem existe en réalité. Ce travail est à souligner car il est un des premiers montrant l'intérêt de travaux conjoints entre des recherches très amont sur des matériaux performants, des recherches d'agencements de cellules optimaux et des associations électriques au plus près de la production électrique.

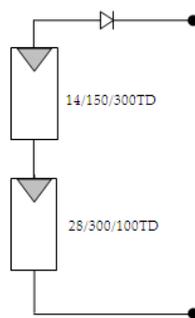


Figure II-7. Circuit de mise en série des modules PV avec diode anti-retour simulant un module PV à base d'une association de cellules tandem en couche minces sans électrodes intermédiaires.

La Figure II-7 représente une première association possible des GPs, à savoir une architecture série correspondant à une association classique de cellules en couche mince de type tandem sans électrode intermédiaire. Les deux couches ainsi associées sont interdépendantes à la fois sur leur performances

électriques qu’optiques. L’optimisation technologique de fabrication n’est dans ce cas-là pas l’optimum de productible par rapport au potentiel de chacune des cellules élémentaires PV. La courbe de puissance résultant de cette association est illustrée en Figure .

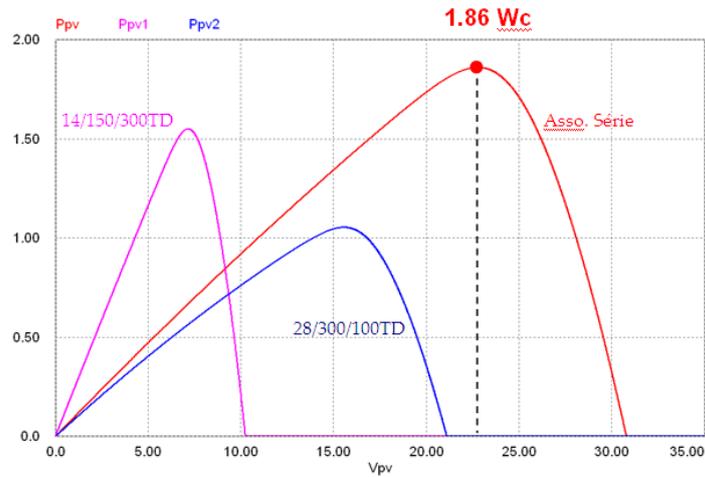


Figure II-8. Caractéristiques électriques simulées des deux GPV mise en série. Puissance PV fonction de sa tension.

La tension de circuit ouvert de l’ensemble correspond à l’addition des V_{∞} des 2 GPVs et le courant fourni est fixé par la cellule la plus faible. Ainsi le PPM se trouve à 1.86 Watts pour une configuration optimale de cette association.

La deuxième architecture que nous avons étudiée, est représentée en figure II-9. Elle résulte d’une simple discrétisation des deux types de cellules couches minces devant être isolées électriquement par 2 électrodes intermédiaires et une couche isolante. Une des associations possibles est alors une association électrique parallèle alors que les panneaux seraient superposés et donc couplés lumineusement pour capter au mieux le spectre solaire. Des diodes anti-retour sont nécessaires afin d’éviter que le GPV le plus fort ne débite son courant dans le GPV le plus faible.

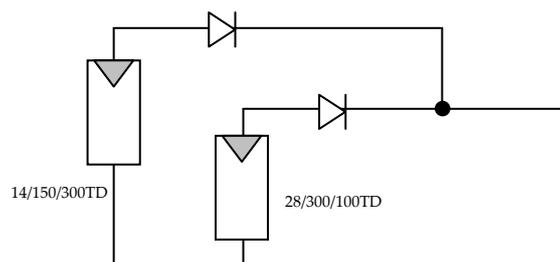


Figure II-9. Proposition d’association en parallèle des cellules PV avec diodes anti-retour en supposant les problèmes d’isolation par électrodes intermédiaires résolus.

La figure II-10 représente les courbes de puissance en fonction de la tension aux bornes des panneaux photovoltaïques.

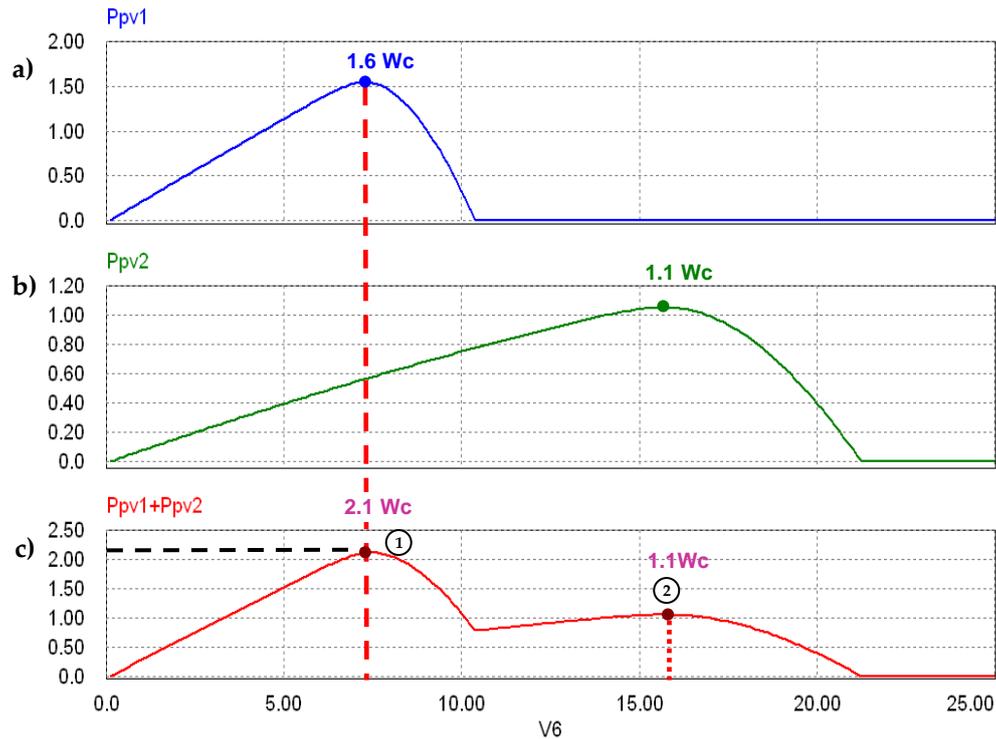


Figure II-10. Caractéristiques électriques $P(V)$ simulées des deux GPV associés en parallèle. Puissance PV fonction de sa tension.

Les Figure II-10-a et Figure II-10-b représentent réciproquement les courbes de puissance des panneaux 14/150/300TD et 28/300/100TD de chez Solems. La Figure II-10-c correspond à la courbe de puissance du générateur photovoltaïque constitué par la mise en parallèle des 2 panneaux solaires. On remarque un pic de puissance de $2.1 W_c$ aux alentours de 7 V.

A l'aide d'un étage d'adaptation adéquat inséré entre le générateur et la charge, nous allons créer une chaîne de conversion photovoltaïque pouvant extraire au maximum $2.1 W_c$. Toutefois, étant donnée la forme de la courbe $P(V)$, il ne sera pas aisé d'effectuer une recherche de PPM efficace dans ces conditions.

La dernière architecture envisagée, afin d'optimiser la puissance à transférer, est d'utiliser un étage d'adaptation DC/DC avec commande MPPT par type de cellules couche minces. Cette architecture de gestion est proche d'un type d'architecture discrétisée telle que le LAAS a pris l'habitude de concevoir pour des puissances plus élevées à l'échelle d'un module de première génération. En fait, si chaque champ de cellules couche mince donné possède son propre étage d'adaptation, permettant ainsi d'exploiter la puissance disponible aux bornes du PV, nous pouvons espérer se rapprocher au plus près du maximum théorique de l'ensemble des deux. La source de production ainsi conçue et équipée d'un système électronique adéquat peut alors produire le maximum de puissance que le matériau PV peut offrir. Le schéma de la figure II-11 présente donc le principe de gestion de puissance proposé par le LAAS dans l'ANR ATOS pour gérer la production de l'énergie PV provenant des nouvelles cellules couche mince de type tandem avec électrodes intermédiaires.

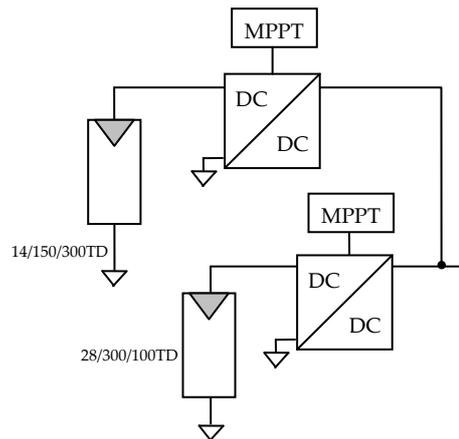


Figure II-11. Circuit de connexion des cellules couche mince tandem conçues dans l'ANR ATOS à l'aide d'étages d'adaptation. Proposition de mise en parallèle sur une charge donnée.

Les simulations électriques présentent en Figure II-12 nous montrent le bénéfice à discrétiser la gestion de la puissance à partir de chaque panneau photovoltaïque tel que proposé en Figure . Les courbes des Figure II-12-a et II-12-b représentent réciproquement les courbes de puissance en sortie des panneaux 14/150/300TD et 28/300/100TD chacun muni d'un étage d'adaptation. Chaque convertisseur DC-DC avec sa propre commande MPPT permet au système d'osciller autour du PPM de chaque GPV constitué d'un seul type de matériau. La puissance produite par l'ensemble correspond donc à l'addition des puissances des deux générateurs (Figure II-12-c). Au final, on voit qu'on récupère en moyenne 2.68 Watts contre les 2.1 Watts du système précédent avec gestion globale.

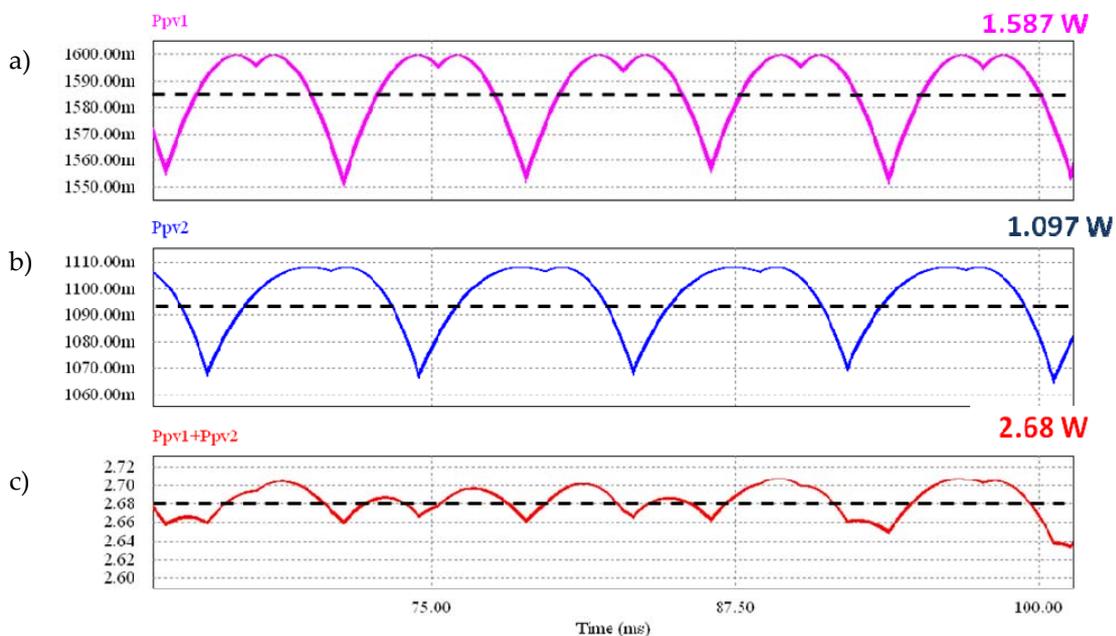


Figure II-12. Évolution des puissances des deux GPV disposant chacun d'un étage d'adaptation, en fonction du temps.

Si nous effectuons un bilan des différentes architectures étudiées ici, on s'aperçoit que la gestion distribuée de la puissance présente le meilleur gain de puissance potentiel. En effet, pour une association classique de cellule tandem en série, la puissance maximale disponible théorique s'élève à seulement $1.86W_c$. Pour une architecture discrétisée sans étage d'adaptation, on peut espérer produire $2.1W_c$. Et, finalement, avec une gestion entièrement distribuée de la puissance associée à des étages optimaux de gestion, on arrive à une puissance crête disponible de $2.7W_c$ ce qui correspond à une puissance moyenne récupérée d'environ $2.68W$ en prenant en compte le rendement MPPT des étages d'adaptation.

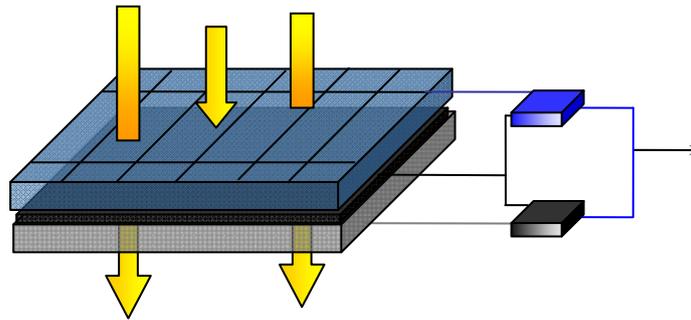


Figure II-13. Cellules Tandem avec un étage d'adaptation par niveau de cellule.

Les simulations développées lors de ces travaux préliminaires ont montré que la discrétisation de la gestion de puissance dans le cas des cellules tandem permet d'exploiter au maximum la puissance produite par les deux modules, Figure II-13. Cependant, un point reste encore à éclaircir sur les pertes engendrées par ces étages d'adaptation eux-mêmes, étant données les puissances mises en jeu. En effet, le gain de puissance apporté par cette nouvelle architecture de gestion ne doit pas être perdu dans les structures de conversion. Une étude de ces paramètres cruciaux reste donc nécessaire avant de prouver réellement le bénéfice d'une architecture de gestion distribuée par rapport aux autres.

2.3 Travaux réalisés dans ce cadre.

Afin d'évaluer les bénéfices d'utiliser des micro-convertisseurs dans des applications de faibles puissances photovoltaïques, nous nous sommes servis de différents prototypes d'étages d'adaptations réalisés avec des composants discrets du commerce. Cette étude bien que partielle nous a permis de localiser les différentes sources de pertes et d'estimer la faisabilité du système de gestion en fonction de différentes architectures. La figure II-14 illustre un des exemples de microconvertisseurs réalisés dans cette approche.

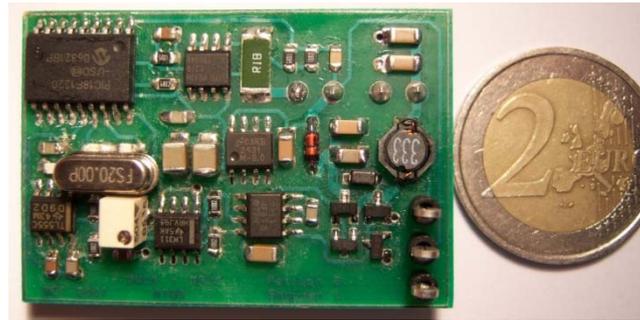


Figure II-14. Étage d'adaptation de type Buck pouvant transférer 2 W_c d'un GPV et piloté par la commande MPPT Semi-Numérique version 2.

2.3.1 Réalisation et validations expérimentales d'un micro-convertisseur Buck.

La structure sélectionnée pour réaliser le convertisseur abaisseur de tension est un Buck synchrone, dans le but de réduire les pertes de l'étage d'adaptation de puissance par rapport à une architecture classique avec diode de roue libre.

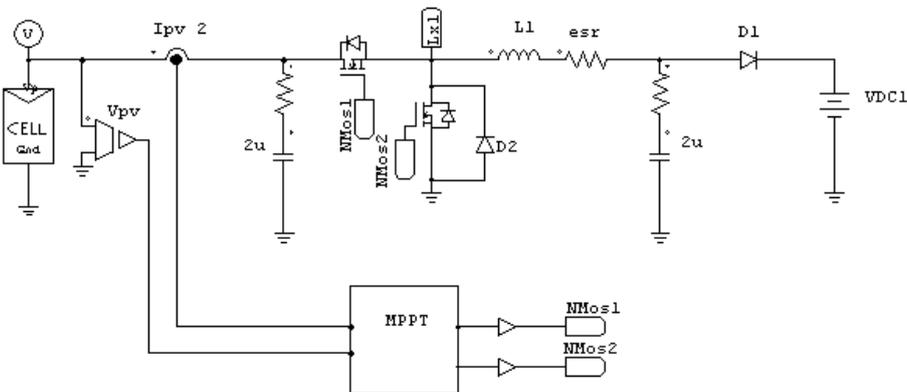


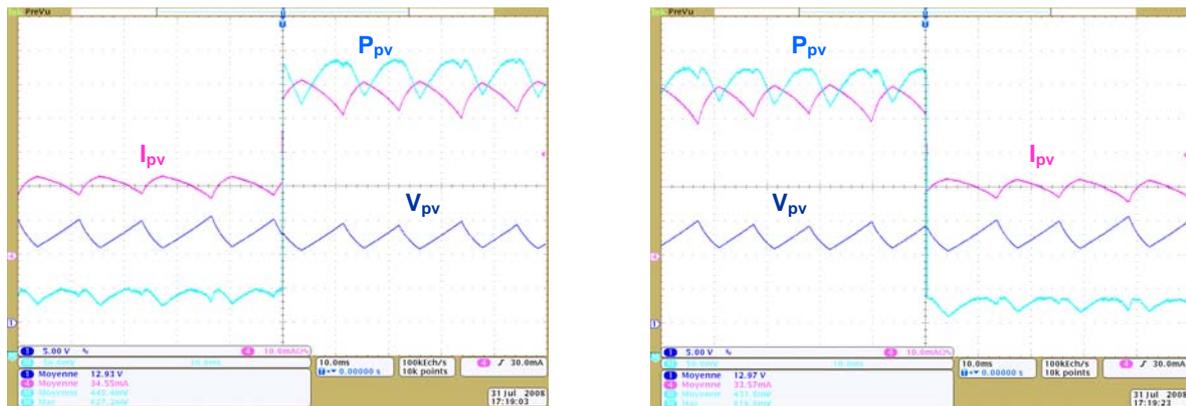
Figure II-15. Étage d'adaptation de type Buck synchrone avec fonction MPPT pour un GPV relié à une batterie ($V_{bat} < V_{opt PV}$).

Une diode Schottky, D2 sur le schéma de la Figure II-15, est souvent préconisée en parallèle avec le MOSFET NMos2 pour conduire le courant inducteur pendant la période de temps mort imposée aux deux interrupteurs NMos1 et NMos2 pour qu'ils ne conduisent pas en même temps et éviter des court circuits. Avec cette diode D2, la diode body de NMos2 ne conduira jamais, augmentant encore le rendement du convertisseur.

Sur le schéma de l'étage d'adaptation, on peut remarquer que la diode D1 a changé de place, elle se retrouve maintenant en sortie du convertisseur. Ce changement est dû aux problèmes engendrés par l'utilisation d'une structure de conversion synchrone avec une batterie comme charge de sortie. En effet, lorsque le convertisseur est inactif, l'interrupteur NMos 2 est à l'état fermé par défaut, créant ainsi un court-circuit avec la batterie et impliquant donc une destruction du convertisseur. La diode D1 disposée en sortie du convertisseur, permet donc d'éviter ce dysfonctionnement, tout en assurant la fonction anti-retour du courant de la charge vers le GPV. Cependant, les pertes engendrées par ce changement seront plus importantes, car le courant en sortie du convertisseur Buck est plus important

qu'en entrée. Néanmoins, nous avons quand même choisi de continuer dans cette optique d'architecture synchrone car elle se trouve être la structure la plus performante actuellement du point de vue développement industriel.

La Figure II-16 illustre la réponse de l'étage d'adaptation Buck, disposant d'une commande MPPT semi-numérique, lors d'une variation brusque d'ensoleillement. Ce régime transitoire doit être étudié pour les applications PV car il se produit de nombreuses fois dans la journée. Ces perturbations peuvent intervenir à tout moment lors de passages nuageux, d'effets d'ombrage ou même lors d'éclipses pour les applications spatiales.



a) Détail des effets d'une éclaircie

b) Détail des effets d'un ombrage

Figure II-16. Réponse d'un GPV à a-Si avec étage buck avec commande MPPT V3.

Dans le relevé expérimental de la Figure II-16-a, le courant d'entrée du convertisseur augmente brutalement alors que la tension reste inchangée, correspondant à un ombrage qui disparaît. Le nouveau point de puissance est alors atteint très rapidement par le système de recherche MPPT conformément aux études théoriques. On peut remarquer que les signaux changent légèrement d'allure étant données les différences de puissances mises en jeu lors des variations. Ainsi, on peut remarquer qu'à faible puissance, la caractéristique $P(V_{PV})$ a tendance à « s'aplatir », impliquant une déformation d'autant du courant PV et donc de la puissance extraite pour une même variation de rapport cyclique. Un fonctionnement similaire de l'étage d'adaptation est observable lors d'un ombrage tel que montré en Figure II-16-b. Ayant testé l'ensemble avec un module à base de silicium amorphe, on peut constater la faible variation de V_{PV} pour une forte variation de I_{PV} caractéristique de ce type de panneau.

2.3.2 Réalisation et validations expérimentales d'un micro-convertisseur Boost.

La structure Boost reste beaucoup plus simple à réaliser que l'architecture Buck synchrone, du fait qu'elle ne requiert qu'un interrupteur de puissance commandé. Les composants actifs ont été choisis en fonction de leurs faibles pertes en conduction et commutation comme précédemment pour une puissance nominale de 1W, une tension de sortie de 12V et une tension d'entrée de 6V. Le transistor

MOSFET TNO200K est utilisé pour l'interrupteur commandé et la diode MBR0520 pour sa faible tension de seuil (0,38V) en tant que diode de roue libre.

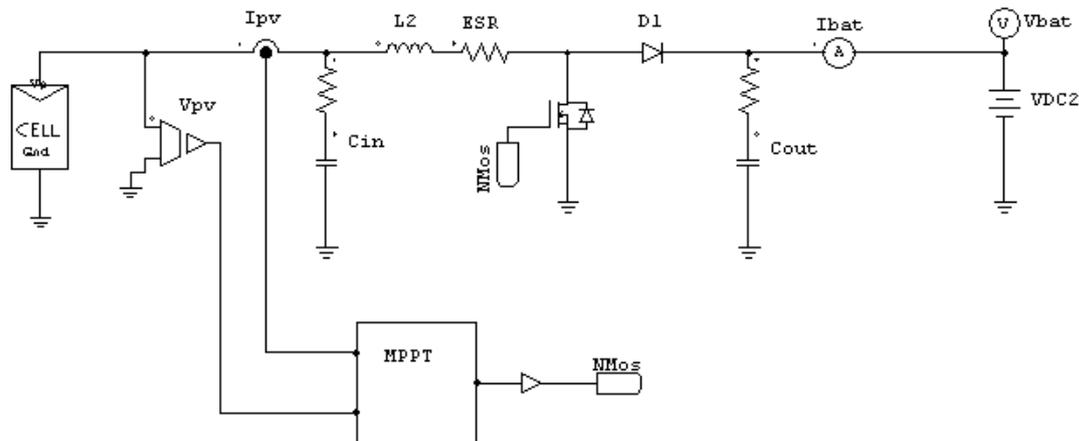


Figure II-17. Étage d'adaptation de type Boost avec fonction MPPT pour un GPV relié à une batterie ($V_{bat} < V_{opt PV}$).

La figure II-18 montre les résultats expérimentaux des rendements du convertisseur Boost. Le convertisseur affiche des valeurs de rendement de conversion remarquables avec près de 90% pour seulement 400mW de puissance et plus de 96% pour 1W.

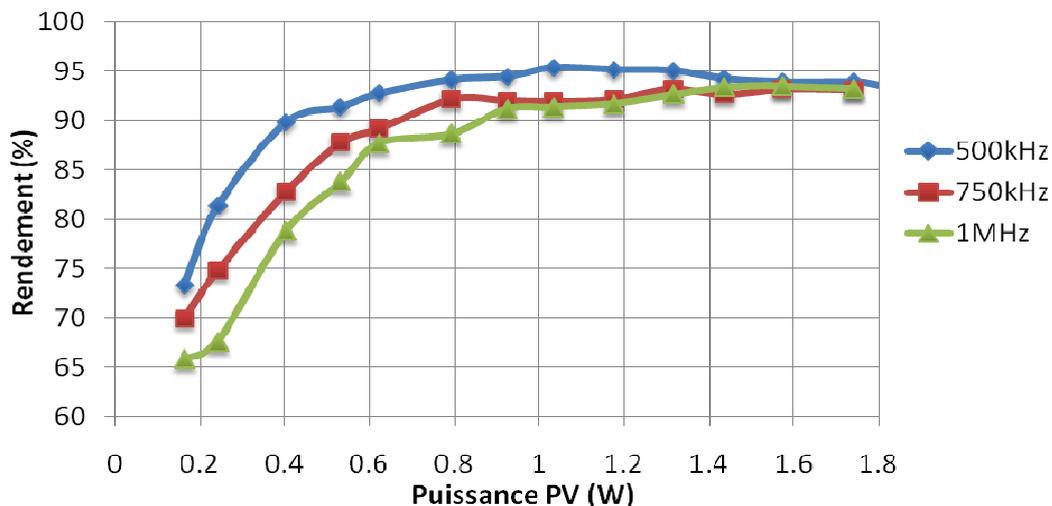


Figure II-18. Rendement η_{conv} du convertisseur Boost en fonction de la puissance d'entrée. Pour $V_{in}=6V$ et $V_{out}=12V$.

Un relevé expérimental est consigné en Figure II-19. Dans cet essai, le comportement en régime établi des grandeurs électriques d'entrée du convertisseur Boost avec MPPT est analysé en fonction du temps. Nous pouvons constater que l'algorithme de la commande MPPT extrême impose une variation de rapport cyclique entre deux valeurs proches engendrant des formes d'onde triangulaires et oscillatoires pour les grandeurs électriques d'entrée du convertisseur DC/DC.

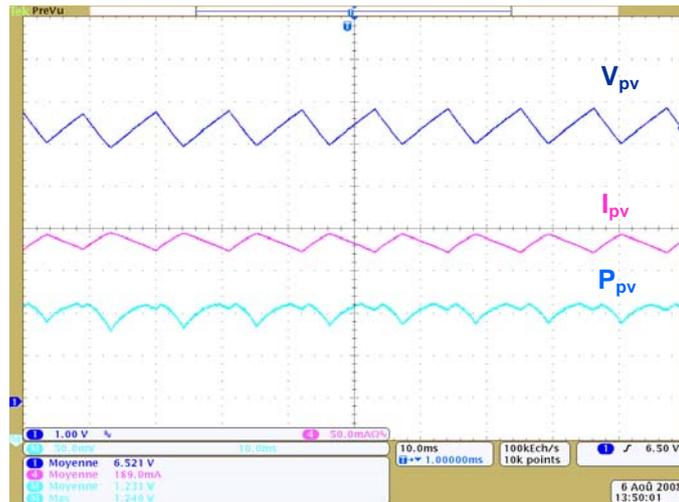
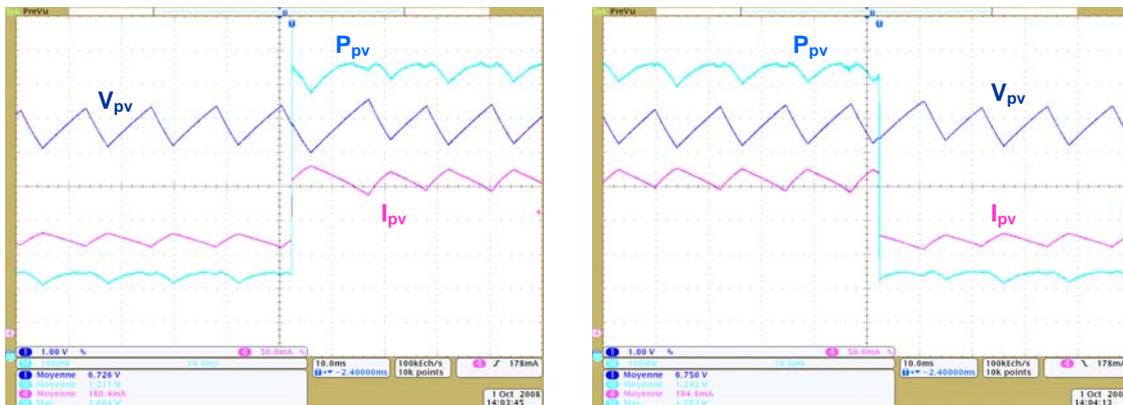


Figure II-19. Relevé expérimental en régime établi d'un Boost avec fonction MPPT semi-numérique connecté à une batterie 12V.

La Figure II-20 montre le comportement des grandeurs électriques du système vis-à-vis de changements brutaux d'ensoleillement. La Figure II-20-a illustre la réponse du système après augmentation brutale du courant de la source PV alors que la tension reste inchangée. Le nouveau PPM est alors atteint instantanément. De même, le système va répondre aussi rapidement vis-à-vis d'une diminution brutale du courant du GPV.



a) Détail des effets d'une éclaircie

b) Détail des effets d'un ombrage

Figure II-20. Réponse d'un système GPV muni d'un étage d'adaptation Boost avec commande MPPT.

2.3.3 Synthèse des validations expérimentales.

Dans cette partie, nous avons développé des prototypes de micro-convertisseurs de faibles puissances dédiés aux applications photovoltaïques. Bien sûr notre but n'est pas de concurrencer les

convertisseurs intégrés du marché mais de concevoir des premiers prototypes assez performants afin de démontrer les bénéfices à discrétiser la gestion de puissance des systèmes photovoltaïques.

Dans ce but, deux structures de conversion ont donc été développées. La première est une architecture abaisseuse de tension de type Buck synchrone choisie afin d'améliorer le rendement de conversion de l'ensemble. En Figure II--a on peut voir un bilan des puissances de l'étage d'adaptation Buck pour une puissance PV de 1W.

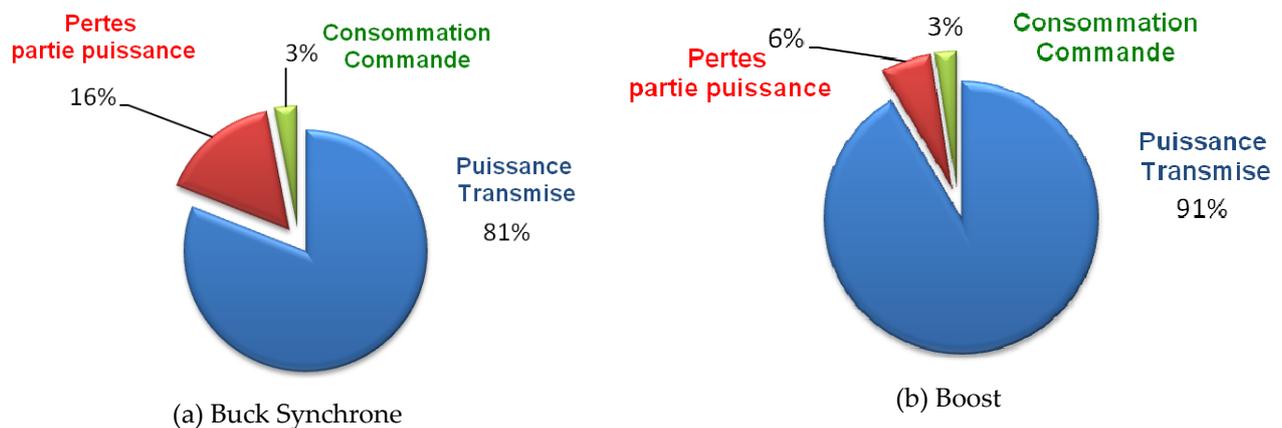


Figure II-21. Diagrammes de bilan des puissances des étages d'adaptation développés par le LAAS-CNRS.

On s'aperçoit que seulement 81% de la puissance d'entrée est transmise à la charge, les pertes dans la partie puissance s'élevant à 16%. Pour cette architecture complexe de convertisseur Buck, nous arrivons à un verrou technologique sur le développement de prototype discret performant pour ces niveaux de puissances.

A contrario, pour l'architecture élévatrice de tension Boost, on obtient des rendements de conversion tout à fait honorables avec près de 91% pour une puissance d'entrée de 1W, Figure II--b. On peut finalement remarquer que pour les deux architectures, la puissance consommée par la partie commande a été considérablement réduite et ne représente plus que 3% des pertes. Les deux architectures ont été testées en fonctionnement réel, autant en régime établi que transitoire, prouvant ainsi leur parfaite adaptation aux applications de faibles puissances photovoltaïques.

3. Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales architectures de gestion existantes dédiées à l'énergie photovoltaïque dans un contexte d'optimisation de puissance et de réduction du prix du kWh photovoltaïque produit. L'énergie solaire présente aujourd'hui des coûts élevés, mais les progrès sont rapides et la recherche active. Si les coûts actuels représentent encore plus de trois fois le coût du kWh fourni au client résidentiel en France, il a déjà diminué d'un facteur supérieur à 2 en 10 ans.

Dans ce contexte, nous avons montré l'utilité d'insérer un étage d'adaptation avec une fonction MPPT entre le GPV et la charge afin d'optimiser en permanence la puissance produite. Nous avons aussi vu

que l'effet d'ombrage sur quelques cellules qui composent un panneau solaire implique des pertes disproportionnées de puissance, supérieures à 50% pouvant même parfois rendre le panneau inactif. L'impact de l'ombre sur un panneau solaire a donc une influence très importante sur l'énergie produite par rapport à la superficie de l'ombre. Ces problèmes caractéristiques, liés à l'énergie photovoltaïque, nous font envisager de nouvelles architectures de gestion autant pour les étages d'adaptations DC-DC que pour les DC-AC. Il s'avère que la discrétisation de la gestion de cette énergie semble une solution prometteuse dans la course à l'optimisation. Cependant, le rendement de cette chaîne de conversion photovoltaïque est pour le moment un verrou technologique de même que le prix de l'ensemble de la chaîne. La multiplication des étages d'adaptation permettra bien entendu de réaliser une maximisation de la puissance disponible mais il ne faudra pas que cela se fasse au détriment du rendement de conversion de l'ensemble. Des recherches plus approfondies ainsi que des développements technologiques semblent nécessaires afin d'optimiser et de montrer les bénéfices à développer une architecture distribuée complexe de convertisseurs disposant de commande MPPT. Nous présentons quelques solutions dans ce sens dans le reste du document.

Vers une intégration des étages de conversion

1. Positionnement du problème.

1.1 Introduction.

Dans le chapitre précédent, nous avons envisagé de nouvelles architectures de gestion discrétisées, autant pour les étages d'adaptation continus-continus que pour les étages continus-alternatifs. Il s'avère que la discrétisation de la gestion de cette énergie semble une solution prometteuse dans la course à l'optimisation. Cependant, le rendement de cette chaîne de conversion photovoltaïque est pour le moment un verrou technologique de même que le prix de l'ensemble de la chaîne. La multiplication des étages d'adaptation permettra bien entendu de réaliser une maximisation de la puissance disponible mais il ne faudrait pas que cela se fasse au détriment du rendement de conversion de l'ensemble et de la fiabilité.

La question que l'on peut se poser aujourd'hui est *jusqu'à quel point doit-on discrétiser ce système de gestion ?* Nous avons souhaité repousser les limites au plus petit nombre de cellules possible pour savoir si le gain apporté en terme énergétique restait valable à ces échelles de faibles puissances. Ainsi, nous souhaitons optimiser l'énergie photovoltaïque au maximum de ses capacités. Mais de nombreux verrous technologiques sont à lever avant d'arriver à une discrétisation aussi fine de la chaîne de conversion électrique, notamment d'un point de vue de l'intégration des composants passifs (*condensateurs et inductances*) [III-1, III-2].

De nos jours, si l'on considère le critère du rendement pour qualifier les convertisseurs de puissance, des rendements de conversion supérieurs à 95% sont aisément obtenus sans trop de difficulté lorsque la puissance à transférer est supérieure à 50W. Ceci permet de considérer cet étage comme transparent et de négliger son influence vis à vis du reste de la chaîne de conversion. Mais, dès lors que l'on descend sous des puissances de 10W, on se heurte à deux difficultés : la première est d'arriver à conserver des rendements aussi élevés et la deuxième, liée à la taille, est l'encombrement important de tous ces étages compte tenu de la multiplication de ces derniers, sans compter le prix [III-4].

Dans l'optique de nos recherches, nous avons pensé faire appel à des étages de conversion intégrés au plus près de la source photovoltaïque, afin de minimiser au maximum les diverses connexions, génératrices de pertes et l'encombrement de l'étage. Cette démarche repose sur les techniques les plus avancées en termes d'intégration de puissance, non existantes à ce jour dans le domaine du photovoltaïque. Le domaine applicatif qui s'avère le plus proche est celui des systèmes embarqués, faisant appel à des systèmes de conversion traitant des puissances inférieures à 2W, qui s'est fortement développé ces dernières années avec l'essor des téléphones portables et, plus généralement, toutes les nouvelles fonctionnalités liées au mode de vie nomade. Dans ces applications, les convertisseurs électriques intégrés et semi-intégrés existent déjà à des tailles intéressantes (*quelques mm²*), à des coûts relativement bas, liés à de grandes quantités de production. Ceci nous conforte sur la possibilité d'une intégration de l'étage d'adaptation avec un faible encombrement et un fort rendement compatible avec notre projet de rapprochement des étages de conversion aux cellules PV.

1.2 Analyse de l'existant.

L'évolution actuelle de l'électronique portable consiste à intégrer de plus en plus de fonctions autant en sécurité qu'en intelligence, ce qui implique des puissances volumiques et massiques de plus en plus importantes. En parallèle, les progrès effectués ces dernières années dans le domaine de la conversion de puissance introduisent des fonctions de plus en plus compactes, voire intégrées, permettant aujourd'hui d'envisager des alimentations de faibles puissances en version totalement intégrée [III-3, III-4]. Ces avancées et cette expérience acquise depuis de nombreuses années dans le domaine de l'électronique embarqué nous permettent d'envisager une discrétisation de la gestion de puissance très fine (*de l'ordre de 0.5 à 2Watts*), à l'échelle de la cellule. Le Tableau III-1 présente un récapitulatif des convertisseurs continu-continu actuellement commercialisés pour des applications embarquées.

Type	Composant	Puissance	Rendement	Encombrement
Abaisseur de tension	NCP1508	600mW	91%	9mm²
	TPS62400	700mW	90%	9mm²
	LT3021 (LDO)	600mW	50%	14.7mm²
Élévateur de tension	LTC3459	600mW	89%	7mm²
	FAN4875	1W	92%	18mm²

Tableau III-1. Convertisseurs DC-DC du commerce.

On notera que les rendements actuels des convertisseurs sont de l'ordre de 90% pour des puissances allant de 0.5 à 1W, pour un encombrement réduit. Ces rendements et puissances sont donnés hors éléments passifs (*inductifs et capacitifs*). Aujourd'hui, la question des différents freins à la miniaturisation de ces deux composants reste en plus ouverte.

1.3 Place des inductances dans les convertisseurs.

Une alimentation à découpage est utilisée pour remplir des fonctions diverses, comme l'élévation ou l'abaissement de tension, ou encore une isolation galvanique. Plusieurs structures plus ou moins complexes existent, selon les exigences du problème. Le point commun de tous ces étages de puissance réside dans le fait qu'il est composé, d'une part, de dispositifs à semi-conducteurs pour les interrupteurs et, d'autre part, de composants passifs, à savoir les inductances les transformateurs et les condensateurs.

Les composants actifs à semi-conducteurs comme les diodes, les transistors bipolaires ou encore les MOSFET sont utilisés comme interrupteurs de puissance. Les pertes sont donc faibles et dues aux temps de conduction et à l'élévation ou la baisse des tensions et des courants au cours de la commutation. La fréquence de commutation dépend principalement de l'application; elle est actuellement de l'ordre de 1 à 5MHz, maximum atteint dans les applications actuelles, sauf dans des cas très spécifiques, impliquant de plus faibles puissances.

Les composants passifs fournissent de nombreuses fonctions dans les convertisseurs de puissance, comme le filtrage ou l'isolation. Leur rôle peut être assimilé à des réservoirs d'énergie à l'échelle haute fréquence, afin de minimiser les discontinuités dans le transfert d'énergie devant être lissé pour être livré à la charge. Ainsi au cours de chaque période de commutation et lorsque le régime permanent est atteint, chaque dispositif passif a un comportement précis de stockage et libération de l'énergie.

D'un point de vue technique, on distingue deux grands modes de réalisation des inductances :

- **Sans matériau magnétique** : méthode considérée comme avantageuse quand une linéarité parfaite entre l'excitation magnétique et la densité de flux magnétique est nécessaire (*pas d'effet de saturation*), ou lorsque des valeurs d'inductance relativement faibles suffisent [III-5, III-6].
- **Avec matériau magnétique** : leur utilisation permet d'obtenir de grandes valeurs d'inductances dans un espace limité, en utilisant par exemple des matériaux à haute perméabilité relative (*2000 ou plus*) [III-7, III-8].

On notera qu'une solution intermédiaire à la conception de l'inductance peut être l'utilisation d'un circuit magnétique à base de matériaux à haute perméabilité relative, présentant un petit intervalle d'air qui réduit globalement la perméabilité relative et donc augmente l'excitation permise avant saturation du matériau magnétique. Une autre technique consiste enfin à utiliser des matériaux hybrides qui présentent un entrefer réparti (*matériau non homogène*).

1.4 Problèmes envisagés.

Nous avons vu que l'alimentation des systèmes embarqués et autonomes a tendance à être distribuée sur les circuits, ce qui entraîne de nombreuses étapes de conversion avec une grande efficacité. Le défi actuel consiste en la réalisation de dispositifs entièrement intégrés de conversion de puissance, fondés sur des structures de conversion comme les structures Buck ou entrelacées [III-9]. Ces structures exigent toutes l'utilisation de composants passifs, en plus de composants actifs et de circuits de commande.

L'intégration des composants passifs est aujourd'hui considérée comme un verrou technologique, du fait des grandes valeurs d'inductance et de capacité généralement employées dans les convertisseurs. Dans le cas des composants inductifs, la littérature propose plusieurs solutions technologiques. La topologie la plus prometteuse semble être celle des spirales intégrées, avec ou sans noyau magnétique, en fonction de la fréquence de commutation de la demande d'alimentation.

Aujourd'hui, l'intégration des inductances semble possible grâce notamment aux améliorations technologiques et à la conception assistée par ordinateur. En particulier, les solveurs électromagnétiques peuvent être utilisés ; les approches analytiques, cependant, sont utiles pour les concepteurs : ces dernières sont beaucoup plus rapides que les simulations par éléments finis, ce qui permet ainsi de donner rapidement un ordre de grandeur des performances du composant ou d'accomplir l'optimisation dès la conception.

Notre contribution à ce sujet a consisté, dans un premier temps, à proposer des outils de modélisation pour inductances spirales intégrées, ainsi que des améliorations technologiques pour leur réalisation et leur caractérisation. Par la suite, une méthodologie a été développée afin de simuler les composants à l'aide de solveurs à éléments finis. Après cette approche de simulation, un modèle complet semi analytique, basé sur la méthode PEEC pour inductances circulaires a été proposée. Cette formulation a ainsi permis d'obtenir rapidement et précisément un modèle pour composants inductifs (*inductances et transformateurs*).

Dans un deuxième temps, la réalisation technologique avec l'optimisation des processus a été envisagée, suivie de la caractérisation des prototypes obtenus. Cette approche expérimentale a été effectuée dans le but de valider les modèles développés.

2. Modélisation des éléments inductifs.

2.1 Positionnement du problème.

La modélisation physique de composants inductifs nécessite la résolution d'équations électromagnétiques. De nombreuses solutions analytiques ont été développées dans le passé ; mais, dans la grande majorité, le champ magnétique produit par la spirale complète (*rectangulaire, octogonale, circulaire ...*) ne peut être calculé en une seule fois. En outre, le milieu inhomogène entourant les composants apporte des difficultés dans le calcul de l'inductance [III-10].

2.1.1 Approche analytique.

Le calcul de l'inductance d'une bobine spirale planaire est généralement effectué dans un "espace libre", c'est à dire dans un milieu homogène présentant les propriétés du vide ou de l'air. Chaque conducteur composant la spirale peut être décomposé en deux types d'éléments élémentaires : segments de droite ou boucles circulaires. Ils peuvent également être modélisés en tant que conducteurs filiformes ou volumiques en fonction du calcul.

FW Grover a été le premier à donner de nombreuses formules approchées pour le calcul des inductances propres et mutuelles de conducteurs de différentes formes, en combinant méthodes cartésiennes ou géométriques, dans le plan ou dans le volume.

La question du calcul des paramètres caractéristiques des inductances intégrées a aussi été traitée par Greenhouse, qui proposa une méthode pour le calcul des inducteurs rectangulaires, basée sur l'évaluation de la contribution de chaque segment [III-10]. Plusieurs documents ont proposé des méthodes similaires, dans le but de simplifier les calculs, en négligeant la contribution de certains termes (*par exemple les segments perpendiculaires ...*). Ces formules de calcul rapides sont très utiles dans les approches d'aujourd'hui [III-6, III-11].

La décomposition de la structure en segments s'appuie sur le concept d'*inductance partielle*, c'est à dire l'inductance des segments qui, mis bout à bout, forme la spirale. Ce concept a été officiellement exposé par AE Ruehli, et est basé sur une formalisation du circuit par éléments partiels équivalents (PEEC) [III-12].

Cette méthode synthétise le principe d'« éléments de circuits localisés » et le calcul des valeurs caractéristiques à partir des équations électromagnétiques. Elle a été développée en coordonnées cartésiennes, de sorte que toute la structure des conducteurs peut être modélisée par un dipôle constitué d'une résistance équivalente, d'une inductance et d'un condensateur. Le calcul est basé sur une formulation intégrale des équations électromagnétiques, de sorte que le volume total des conducteurs est traité dans le même calcul, contrairement aux méthodes par éléments finis. L'avantage de cette méthode est la séparation du calcul électromagnétique de l'étude classique électrique de leurs interconnexions.

De nombreux travaux ont été réalisés depuis, conduisant à la prise en compte des structures non rectangulaires, non homogènes, etc... De plus, la méthode PEEC a été mise en œuvre dans plusieurs outils logiciels, permettant ainsi la conception assistée par ordinateur d'éléments inductifs :

- **FastHenry**, **FastCap** et **FastModel**, sont trois logiciels développés par le Massachusetts Institute of Technology, pour des applications d'hyperfréquences. Ces derniers calculent des modèles équivalents pour accéder au modèle de l'inductance. On notera que les effets capacitifs sont pris en compte ; de plus, un algorithme a récemment été développé, permettant de réduire les temps de calcul.
- **Asitic**, développé à l'Université de Berkeley, est plus particulièrement dédié à la conception RF d'inductance. Cet outil propose un environnement pour la conception de composants technologiques et peut générer des fichiers compatibles avec ceux utilisés dans les machines fabriquant les masques utilisés en microélectronique (*.GDS ou .Caf*). Il inclut la modélisation du substrat et des diverses couches, ainsi que des conducteurs pris dans leur volume, avec une approximation de l'effet de peau. On notera qu'il n'est pas capable de modéliser des conducteurs circulaires.

2.1.2 Approche numérique.

La méthode la plus utilisée pour simuler des composants électromagnétiques est la méthode des éléments finis (FEM), consistant en une résolution mathématique d'équations aux dérivées partielles sur une structure maillée. Appliquées à la résolution d'équations de l'électromagnétisme, les équations dérivées de Maxwell peuvent être utilisées selon le type du problème. Cette méthode offre une grande précision dans le cadre du calcul de la réponse fréquentielle d'une impédance pour des dispositifs inductifs.

Il est impossible de classer tous les solveurs électromagnétiques existants en fonction des problèmes que l'on voudrait résoudre avec une méthode aux éléments finis. Cependant, trois grandes catégories d'applications peuvent être identifiées pour lesquelles des outils logiciels sont disponibles :

- **Les simulateurs basses fréquences**, comme dans le cas des moteurs électriques, des transformateurs, et des actionneurs. En effectuant des simulations bi ou tri dimensionnelles aux éléments finis, on peut arriver à prédire les champs électriques et magnétiques, des couples, des forces et des impédances.
- **Les simulateurs de circuits électroniques**, programmes utilisés pour prédire l'intégrité du signal, la diaphonie ou des interférences électromagnétiques (*EMI*). Planar 2-D et les simulateurs de circuit 3-D disponibles auprès de vendeurs comme Ansoft (*Simplorer*).
- **Les simulateurs de circuits micro-ondes, les antennes et les systèmes radar**. Dans ce cas, les simulateurs électromagnétiques, travaillant à haute fréquence, servent à prédire les paramètres *S*, les sections radar, et les diagrammes de rayonnement. Les progrès récents dans les algorithmes de calcul ont été mis en œuvre dans plusieurs produits d'Ansoft (*HFSS*), Agilent (*Momentum*), etc...

2.1.3 Contribution au sujet.

Pour faciliter l'intégration des inductances, des progrès doivent être réalisés dans deux domaines distincts : l'amélioration d'étapes technologiques et le développement de nouveaux outils de conception assistée par ordinateur, prenant en compte les spécificités des inductances dans le domaine de l'électronique de puissance. Sur ce domaine, les approches analytiques sont celles utilisées généralement par les concepteurs, car elles permettent de donner rapidement un ordre de grandeur des performances de la bobine réalisée et d'accomplir ainsi rapidement l'optimisation dès sa conception.

Après avoir analysé de manière détaillée les pertes dans les inductances ainsi que les modèles de bobine intégrée déjà développés, notre but a été de concevoir une méthodologie de conception d'inductance intégrée (*Thèse de Philippe Artillan*). Dans cette approche «simulation», un modèle complet semi analytique basé sur la méthode *PEEC* pour inducteurs en spirale circulaire a été proposé. Cette formulation permet ainsi d'obtenir de manière rapide et précise un modèle des composants inductifs (*inductances et transformateurs*) [III-14, III-15]. Nous illustrons cette partie par le module développé sous MATLAB, permettant aujourd'hui la conception aisée de l'inductance.

2.2 Développement d'un outil d'aide à la simulation.

Dans le but d'avoir à terme une vision « système » de l'inductance intégrée dans son environnement, nous avons choisi d'implémenter l'étude théorique développée par Philippe Artillan durant sa thèse dans un environnement Matlab, en considérant de plus sa compatibilité directe avec le solveur éléments finis Comsol Multiphysics. On notera que le solveur développé peut être utilisé en mode *ligne de commande*, en utilisant un langage de script spécifique pour produire le modèle géométrique et le maillage, pour mettre les équations et variables, pour lancer la résolution du problème et, enfin, pour effectuer le post-traitement de la solution. De plus, nous avons utilisé la norme interface graphique utilisateur (*GUI*) ainsi que la boîte à outils associée pour créer l'environnement graphique, de sorte qu'aucune boîte à outil spéciale n'est nécessaire. Seule, la boîte à outils « réalité virtuelle » peut être utile pour créer des aperçus d'images 3D, mais le programme peut fonctionner sans elle.

2.2.1 L'interface graphique.

L'interface utilisateur graphique, présentée en figure III-1, correspond au projet, à savoir la simulation d'une bobine intégrée.

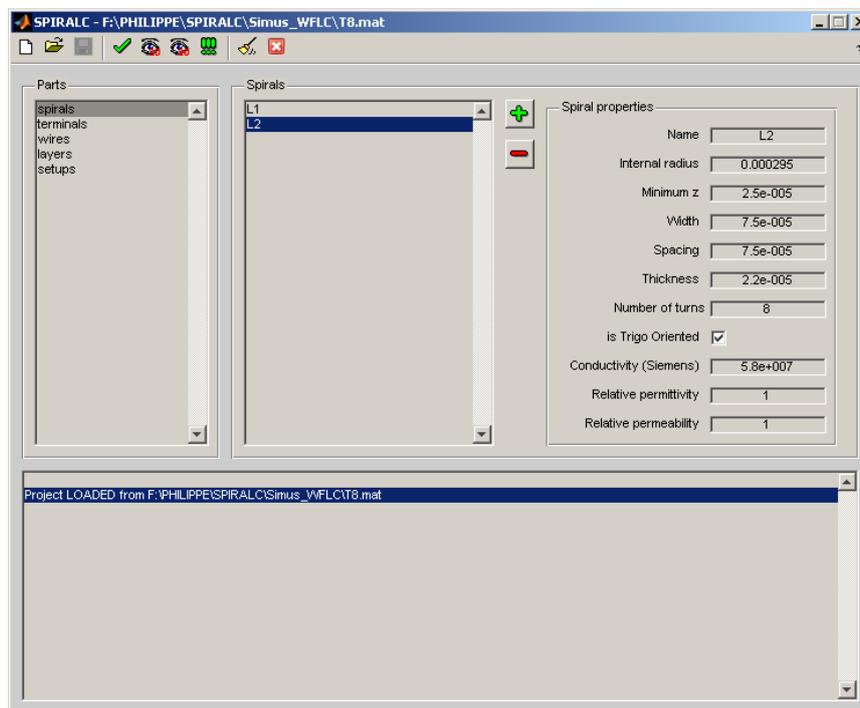


Figure III-1. Capture de la fenêtre principale de simulation.

On notera la présence de plusieurs icônes permettant, par exemple, de créer un nouveau projet, de visualiser en 2D ou en 3D la géométrie de l'inductance ou encore de lancer la simulation. Le bouton "Vérifier le projet" appelle une procédure de vérification dont le but est de regarder que les conditions minimales pour que le projet soit viable sont remplies : au moins un terminal, pas de chevauchement des conducteurs, etc...

Les connexions entre les spires, appelées fils, sont représentées par un nombre identique figurant sur les sections. Les points d'excitation, appelés terminaux, sont représentés avec des couleurs : une section rouge est un point de fort potentiel et un bleu est un point de faible potentiel ou à la masse. Enfin, les couches représentant les différents milieux entourant les conducteurs sont présentées, mais pas à l'échelle pour éviter de ne plus pouvoir discerner les conducteurs.

On notera la présence d'une vue 3D (Figure III-2) afin d'avoir une vue globale du composant. La capture d'écran présente une image réalisée avec la visionneuse Matlab, permettant un déplacement de la caméra. Ceci est particulièrement pratique pour vérifier visuellement les liens entre les tours.

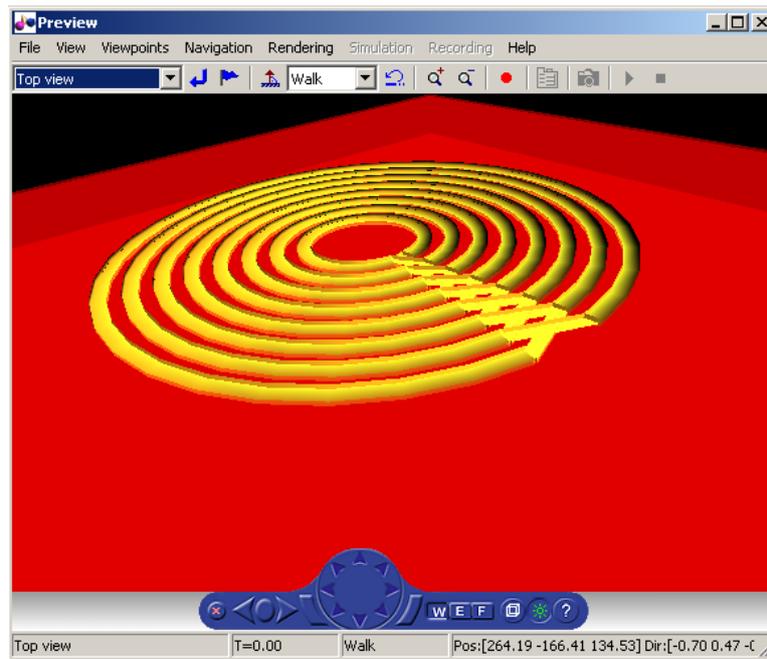


Figure III-2. Vue 3D de la bobine à simuler.

On notera que la fenêtre principale, présentée en Figure III-1, est séparée en deux sous-fenêtres, «Parts» et «Spirals». Cinq paramètres sont disponibles :

- **Spirales** : pour décrire un ensemble de conducteurs avec leurs paramètres (*nombre de tours, la largeur et l'épaisseur des conducteurs, l'orientation de la spirale, etc...*). Les fils sont générés automatiquement pour réaliser les connexions.
- **Bornes** : pour décrire les points d'excitation électrique.
- **Fils** : à terme, pour ajouter un peu de connexions entre les spirales.
- **Couches** : pour entrer dans les couches les variables du problème (*comme un substrat de silicium, une résine photosensible, le noyau magnétique, etc...*) avec leurs constantes physiques (*conductivité, permittivité relative et perméabilité relative*). Le milieu est considéré comme linéaire et isotrope.
- **Configurations** : permet de résoudre le problème avec ou sans effets de Foucault et/ ou avec (*ou sans*) effets capacitifs. La liste des points de fréquences peut être générée point par point, par un ensemble de valeurs linéaires ou une échelle logarithmique.

Lors de son lancement, le logiciel ne résout qu'une configuration à la fois. Tous les résultats sont enregistrés dans des *projets*. Lorsque la géométrie est modifiée, les résultats sont automatiquement réinitialisés. Le logiciel résout la matrice des capacités en mode DC, puis l'admittance aussi en mode DC (*arbitrairement à 1Hz*), afin d'obtenir les valeurs de la résistance DC et les matrices d'inductance. Enfin, si les courants de Foucault doivent être pris en compte, une simulation par point de fréquence est lancée, en utilisant la linéarisation de la matrice admittance.

À la fin de la simulation, les valeurs calculées et stockées permettent d'obtenir les résultats suivants :

- Les matrices des capacités et des résistances, obtenues en continu,
- La matrice d'admittance Y , de dimension $d \times d$, avec d le nombre de conducteurs,
- La matrice d'impédance X , de dimension $t \times t$, avec t le nombre de ports ou de terminaux,

- Le potentiel vecteur contenant le potentiel de chaque nœud

2.2.2 Validité des résultats obtenus.

Pour valider nos résultats, nous avons choisi de simuler une inductance et de comparer les valeurs obtenues aux résultats disponibles via des simulateurs aux éléments finis. Pour cela, nous avons pris une conductivité du cuivre σ_{Cu} de 58.10^6 S.m⁻¹ et une conductivité de l'air nulle. De cette façon, la convergence des simulations a été plus facile à obtenir, car il n'y avait pas courant de Foucault induit dans le substrat. On notera que cette approximation n'affecte pas l'objectif de ces simulations pour aider à la validation du modèle. On prendra de plus deux niveaux de conducteurs de 10 tours comme on peut le voir sur la figure III-3. Les conducteurs, en colimaçon, posséderont une largeur de 100 μ m, une épaisseur de 15 μ m, espacés de 50 μ m et 3500 μ m de rayon externe. Les deux niveaux sont espacés de 5 μ m.

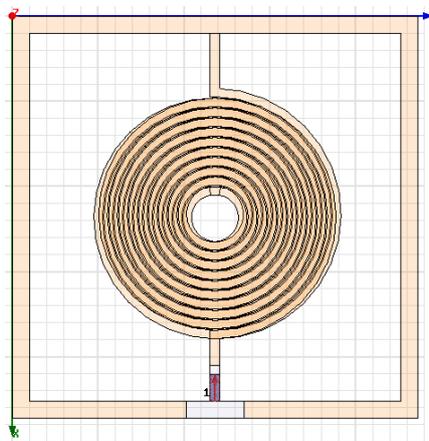


Figure III-3. Vue supérieure de la bobine à simuler.

Le modèle développé sera comparé au même composant simulé dans Maxwell 3D et dans HFSS. On notera que la fréquence de transition est autour de 10MHz ; Maxwell 3D donne des résultats après cette fréquence, même si on notera que les effets capacitifs sont très mal modélisés. Sur le même principe, HFSS est incapable de donner des résultats en dessous de cette fréquence.

L'ensemble des résultats sous forme d'impédance complexe sont présentés sur la Figure III-4. On remarquera que la faible augmentation de la phase avant la partie inductive de la courbe montre que Maxwell 3D prend en compte les effets de peau et de proximité.

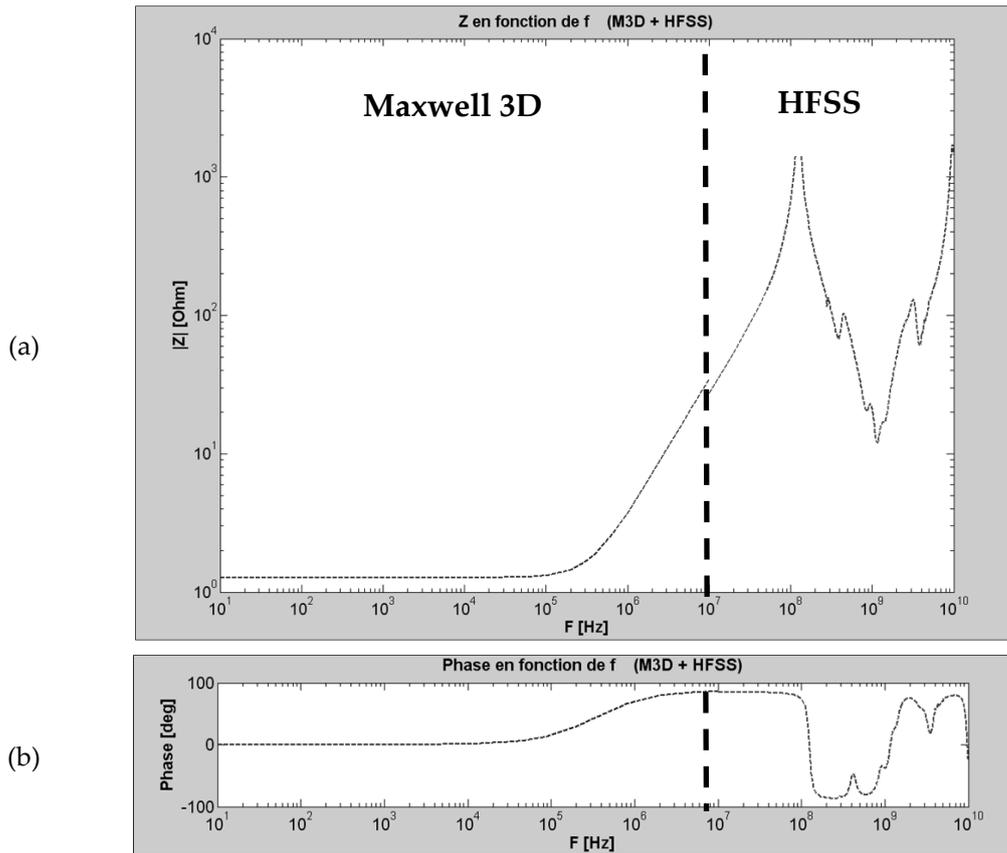


Figure III-4. Réponse fréquentielle (module et phase) de l'inductance en utilisant Maxwell 3D et HFSS.

Les simulations ont été le point de départ pour valider notre modèle analytique. On notera que la validation finale a été réalisée expérimentalement et sera développée plus tard. Ces résultats sont intéressants car ils démontrent tout de même le très bon accord entre la simulation et le modèle PEEC développé, sur une large plage de fréquence.

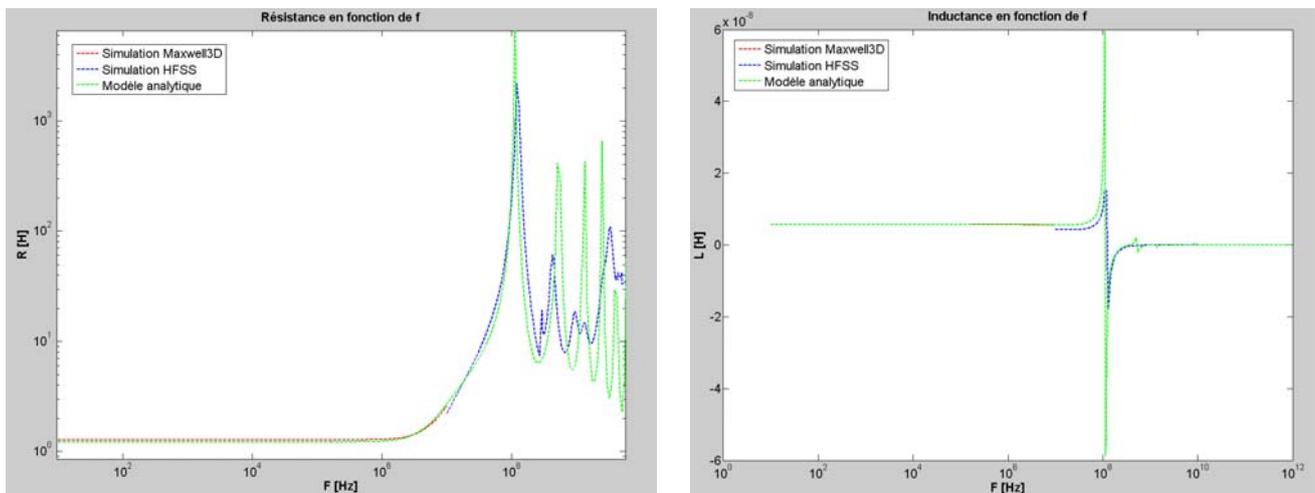


Figure III-5. Comparaison des modèles analytiques et numériques pour le calcul de la résistance série et de l'inductance.

3. Réalisation et caractérisation d'éléments inductifs.

Nous avons vu précédemment que la conception des inductances intégrées implique diverses compétences afin d'obtenir un bon compromis entre une facilité de réalisation et de bonnes performances. Dans le cas de la réalisation de bobines intégrées, un processus à un seul niveau ne serait pas intéressant dans le sens où il n'est pas possible de concevoir des bobines intégrées sans *underpath* ou *overpath*, dans le but de récupérer le contact central. Ainsi, la conception de bobines à plus de deux niveaux peut être imaginée, en se basant sur une répétition de certaines étapes.

D'un point de vue technologique, plusieurs travaux de thèse ont été engagés dans le laboratoire sur la réalisation de composants inductifs intégrés sur silicium, dans le but d'obtenir notamment la possibilité d'effectuer des électrodépositions de noyaux magnétiques ou des gravures de grandes tranchées à facteur de forme élevé [III-16, III-17, III-18].

Pour notre part, deux thèses ont été encadrées sur ce sujet (*A. Salles et Ph. Artillan*) [III-13, III-18]. Les buts poursuivis étaient de réaliser des inductances intégrées sur silicium et de valider ainsi les modèles analytiques développés. Dans le but de caractériser les objets ainsi obtenus, deux méthodes de mesures ont été confrontées : une approche *basse fréquence* avec un analyseur d'impédance et une approche *haute fréquence* avec un analyseur de réseau vectoriel. Une attention particulière a été portée sur la précision des résultats obtenus.

3.1 Processus technologique employé.

Plusieurs procédés ont été développés et sont potentiellement disponibles pour réaliser des composants inductifs. La partie suivante décrit en détail chaque étape du processus le plus abouti, permettant d'obtenir des inductances à deux niveaux de conducteur [III-13]. On notera en particulier, concernant :

- **La résine SU8** : la première étape de ce processus est consacrée à la création d'une couche isolante entre le substrat de silicium conducteur et la bobine construite. Cette dernière pourrait être réalisée par une oxydation classique de la surface de silicium par CVD, mais l'épaisseur de la couche aurait été tout à fait insuffisante. En fait, l'épaisseur maximale réalisable dans un temps acceptable dans les fours standard est d'environ 3000Å. Nous avons alors décidé de déposer une épaisseur de 5µm de résine SU8 par spin coating.
- **AZ 4562** : cette étape consiste à créer des moules dans lequel pourront croître les conducteurs. À l'heure actuelle, nous utilisons une résine photosensible type AZ4562 qui permet le dépôt de métal jusqu'à 25µm d'épaisseur. A noter que la prochaine génération de composants pourra être réalisée avec une résine BCB qui permettrait des dépôts plus épais, jusqu'à 80µm d'épaisseur.
- **Croissance électrolytique de Cuivre** : la croissance de ce métal consiste à plonger le wafer dans un bain contenant des ions cuivre Cu^{2+} , le wafer constituant l'électrode négative d'une alimentation et l'électrode positive étant immergé dans le bain. De cette façon, le cuivre est déposé alors que le courant circule à travers le bain. Cette méthode est très simple et peu coûteuse, mais il demande beaucoup de procédures d'étalonnage, comme la qualité, l'épaisseur et l'homogénéité du dépôt. En

effet, ce dernier dépend de nombreux paramètres : la concentration de cuivre, le courant, le pH, les catalyseurs, etc...

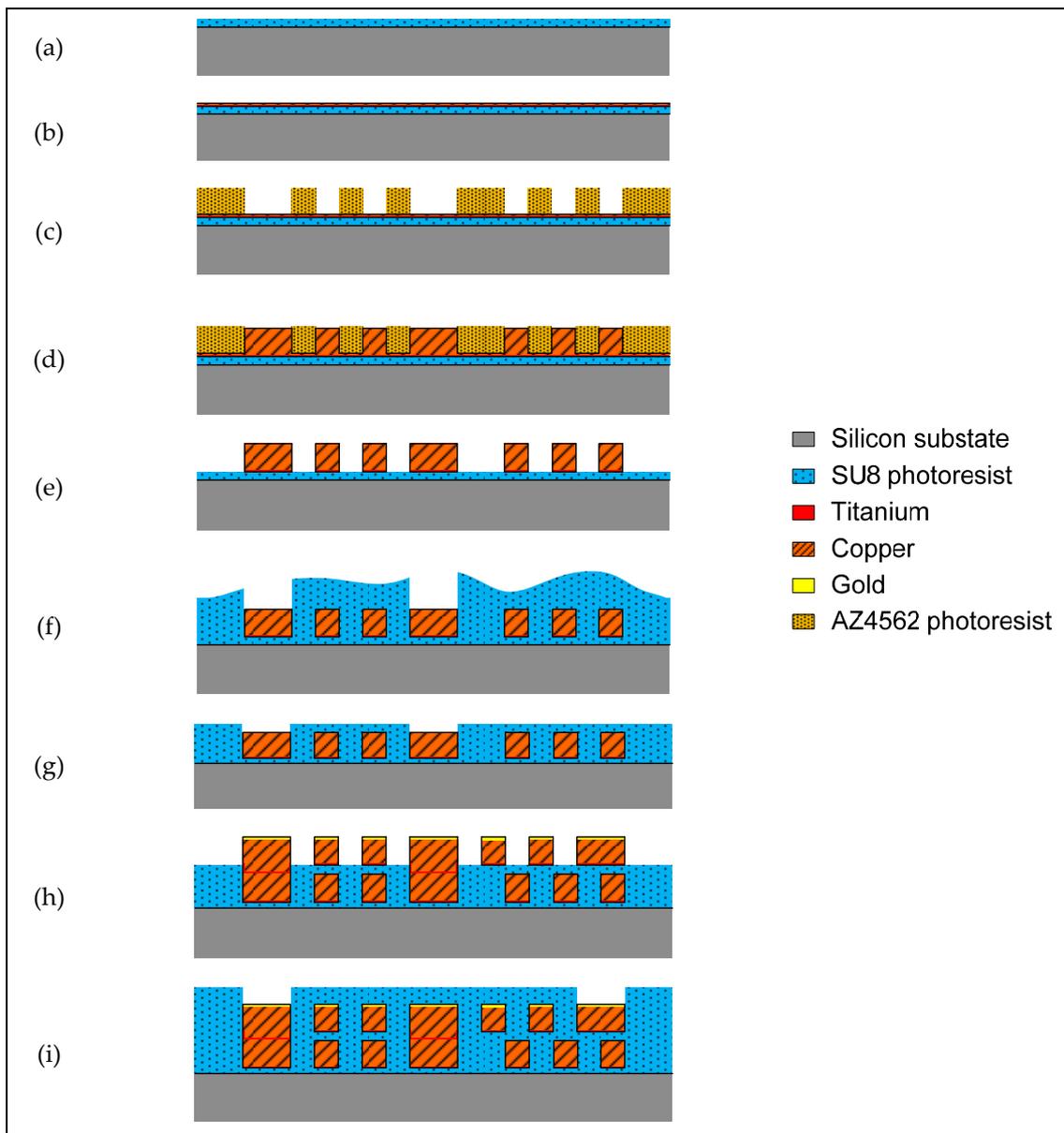


Figure III-6. Processus technologique de réalisation d'inductance à deux niveaux de conducteurs.

- **Deuxième niveau** : la fabrication du deuxième niveau est traitée de la même manière que le premier. Les efforts déployés pour obtenir une bonne qualité de planarisation ont permis d'omettre l'étape d'électrodéposition, évitant plusieurs étapes du processus. Pour avoir accès à la couche inférieure, des trous de connexion sont ouverts lors de l'étape de dépôt d'SU8.

3.2 Prototypes obtenus.

Plusieurs exemples de réalisation sont présentés en figure III-7. On notera que plusieurs formes ont été réalisées afin d'améliorer le processus de test ou de quantifier l'importance de la forme de l'inductance (*carrée, octogonale, circulaire*). On notera que la forme circulaire a été choisie parce qu'elle minimise la concentration actuelle en sommets, responsable de l'augmentation de la résistance DC, la surchauffe locale et, enfin, la limitation à faible courant. On notera que anneaux de masse ont été conçus pour permettre la mesure avec des sondes RF, selon les recommandations de Cascade Microtech [III-19].

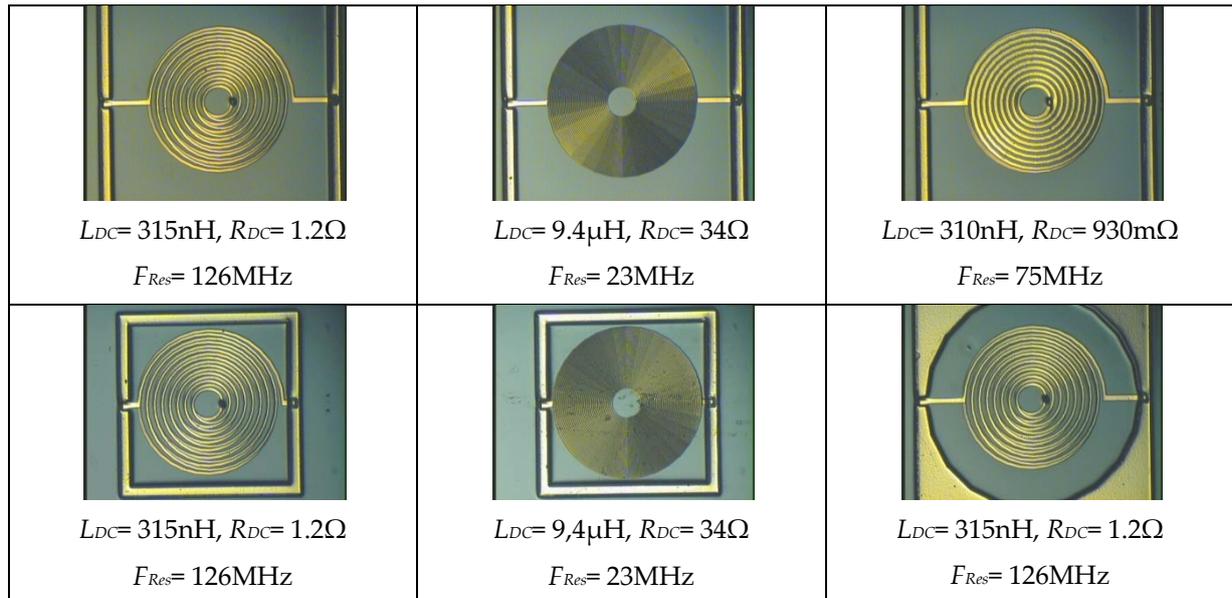


Figure III-7. Exemples de réalisation.

3.3 Caractérisation des composants.

La caractérisation de composants passifs consiste à obtenir des informations sur leur comportement par des mesures électriques. En ce qui concerne les composants discrets, un grand nombre de méthodes expérimentales de mesures ont été réalisées et rapportées dans la littérature, conduisant à la mesure des caractéristiques magnétiques ou électriques. Ces méthodes sont généralement destinées à permettre une extraction de paramètres, permettant d'obtenir ainsi un modèle simplifié du composant mesuré. Même si les travaux antérieurs portant sur des inductances discrètes sont généralement transposables aux composants passifs intégrés, leur qualification reste une question spécifique, du fait de leur structure complexe, basée sur la technologie planaire, et de leurs dimensions plus petites, souvent responsables de phénomènes parasites spécifiques. En outre, les dispositifs de mesure existants sont conçus pour des composants discrets et une nouvelle solution doit être trouvée à chaque fois pour les rendre compatibles.

Dans la partie suivante, nous proposons un bref aperçu des méthodes de mesure existantes et une comparaison de leurs performances.

3.3.1 Mesures à basse fréquence.

La caractérisation des inductances à basses fréquences peut être réalisée avec deux types de dispositifs de mesure :

- **Impédancemétrie** : ces appareils utilisent la méthode du pont de Wheatstone ou la méthode courant tension. Ils offrent au comptant (= point par point) des mesures, comme dans les solutions Agilent 4284A/4285A.
- **Analyseurs d'impédance**, qui utilisent un équilibrage automatique et une méthode de mesure type pont ou toute autre méthode capable de donner automatiquement l'impédance d'un oscillateur commandé. Ils offrent des mesures de fréquence en continu : l'utilisateur définit une gamme de fréquence et un certain nombre de points. Ces méthodes sont proposées dans des analyseurs type Agilent 4294A ou E4991A RF.

Différents types de méthodes de mesure ont été étudiées et comparées [III-20]. Ce travail a conduit à l'installation d'un banc de mesure, basé sur l'utilisation d'un analyseur d'impédance Agilent type 4294A.

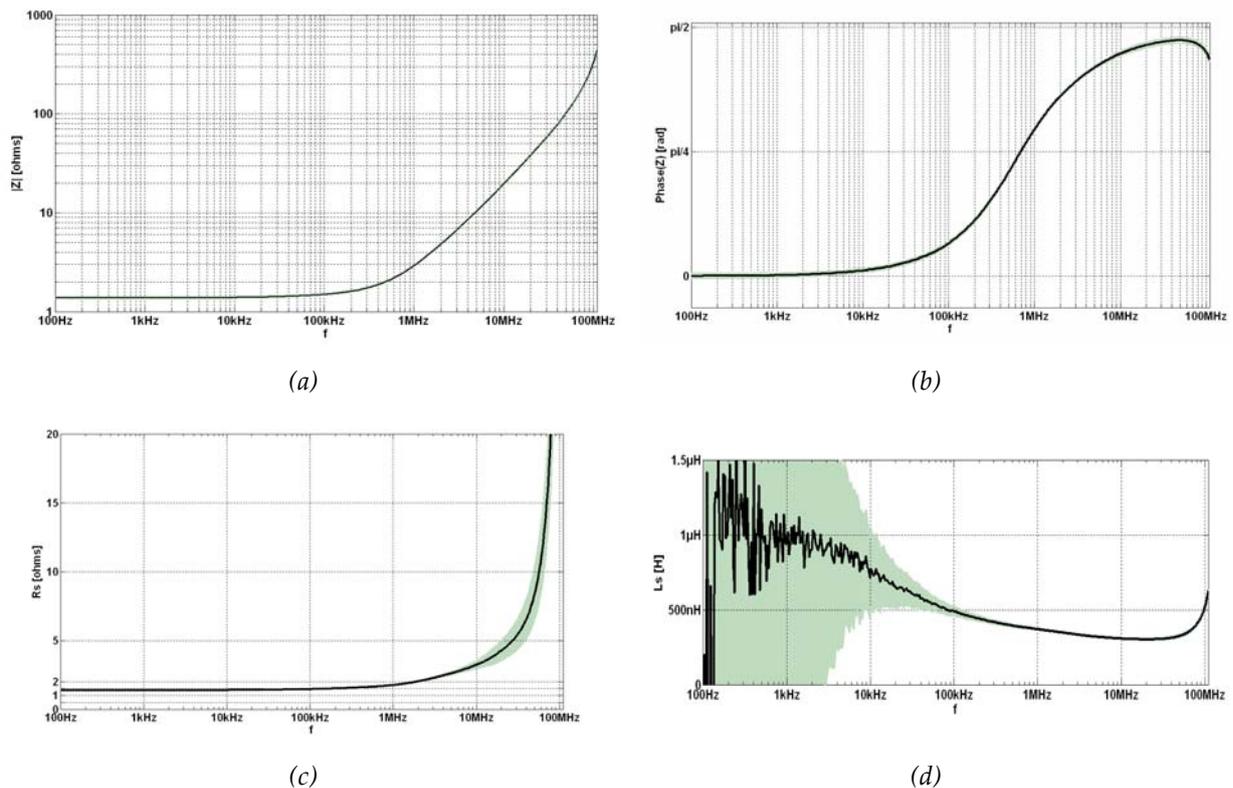


Figure III-8. Mesure des paramètres caractéristiques de l'inductance (en gris : zone d'incertitude)

La figure III-8 montre les valeurs mesurées de l'impédance d'une inductance réalisée au LAAS. Les paramètres caractéristiques extraits sont le module de l'impédance $|Z|$, la phase de (Z) , la résistance équivalente série R_s et l'inductance série équivalente L_s . On notera que le calcul de la précision a montré que, pour n'importe quelle fréquence, l'amplitude et la phase peuvent varier de moins de 2%.

Cependant, la résistance équivalente et l'inductance sont très sensibles aux erreurs de mesures dans, différents domaines de fréquence, comme par exemple les basses fréquences pour l'inductance. Ces phénomènes peuvent être expliqués par la distribution de l'incertitude en fonction de la valeur de phase : pour les fréquences où le composant est très résistif, l'inductance est très faible et donc difficile à estimer précisément et, inversement, un comportement inductif conduit à une détermination inexacte de la résistance.

3.3.2 Mesures à haute fréquence.

Pour les mesures de fréquences plus élevées, (*ie. environ 100 MHz*), la méthode précise d'auto-équilibrage du pont ne peut plus être employée. Même si les méthodes de mesure d'impédance réelle existent, par exemple la méthode RF-IV mis en œuvre par Agilent Technologies dans le E4991A RF, la méthode la plus commune utilise des Analyseurs de réseau vectoriel (VNA). Ces instruments permettent de mettre en œuvre une approche totalement différente, basée sur la définition de l'impédance donnée par la théorie des micro-ondes. Dans sa forme fondamentale d'analyse de réseau, cela implique la mesure des ondes incidentes, réfléchies et transmises.

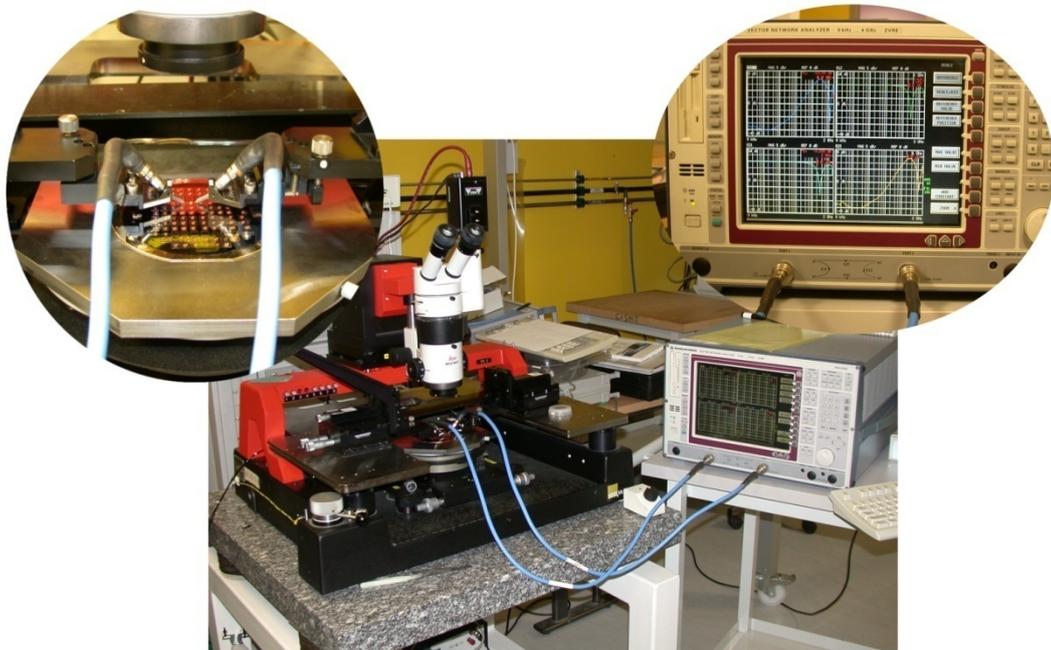


Figure III-9. Méthode de caractérisation utilisant un analyseur vectoriel.

3.3.3 Comparaison des résultats.

Une comparaison entre chaque méthode de mesure a été effectuée en utilisant une même inductance. On peut voir sur la Fig. III-10 que la fréquence de résonance série (SRF) est sous-estimée par la mesure basse fréquence, effectuée à l'aide de la station sous-pointe. Ceci est probablement dû à l'effet parasite des câbles qui introduisent un filtre LC, qui ne peut pas être compensé par les méthodes décrites ci-dessus.

Par opposition, si l'on considère l'inductance montée dans un boîtier, la fréquence de résonance série et le comportement à basse fréquence est proche de celui attendu. Ces mesures ont donc été

considérées comme correctes et utilisées pour valider le développement théorique développé dans la partie précédente.

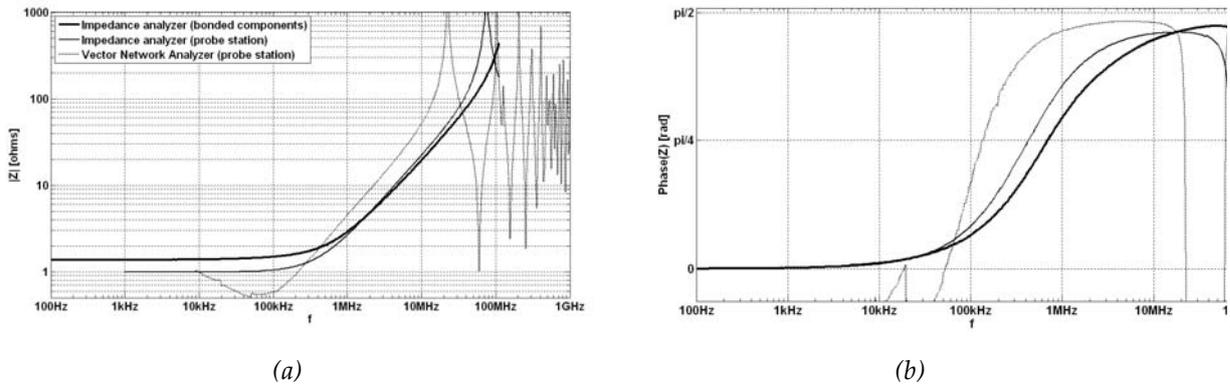


Figure III-10. Mesure des paramètres caractéristiques de l'inductance à l'aide de trois méthodes différentes.

La figure III-11 présente une comparaison des résultats pratiques avec les résultats théoriques, utilisant le modèle analytique PEEC, tenant compte ou non des effets de Foucault.

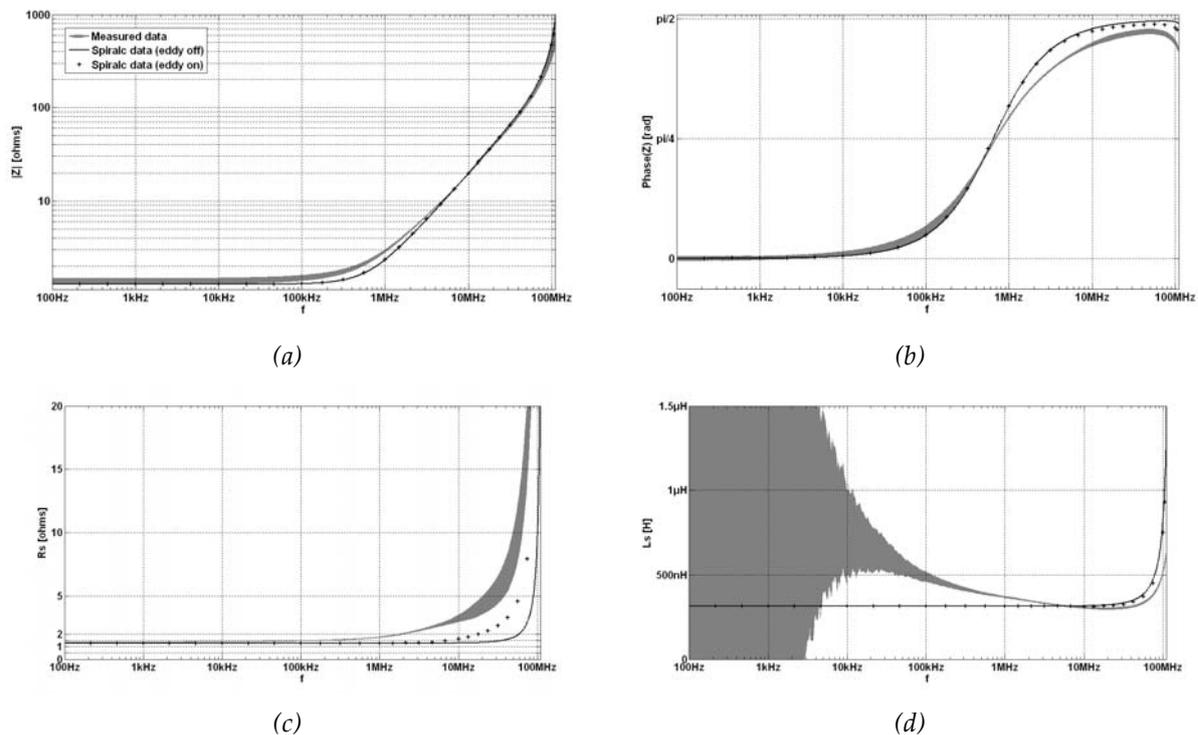


Figure III-11. Mesure des paramètres caractéristiques de l'inductance et comparaison avec les deux méthodes théoriques.

La première méthode (*eddy off*) consiste à calculer une seule matrice inductance et une seule matrice capacité. Cette méthode prend en compte tous les effets, sauf l'effet de peau. On utilise ici une méthode de calcul très rapide pour déterminer les paramètres généraux : inductance, résistance DC et

fréquence de résonance série SRF. Nous pouvons voir que cette méthode donne de bons résultats en ce qui concerne ces objectifs.

La deuxième méthode (*eddy on*) vise à modéliser les effets des courants induits. Cette dernière prend beaucoup plus de temps que la première, puisque le calcul de la matrice admittance est nécessaire à chaque point de fréquence. Quoi qu'il en soit, la comparaison de la courbe obtenue grâce à cette méthode avec la courbe de mesure montre que les paramètres généraux R_{sdc}, LS_{DC} et CRS donne une bonne concordance : plus la résistance augmente avec la fréquence, plus l'inductance équivalente diminue. Ces phénomènes sont essentiellement dus à la distribution non uniforme du courant dans les conducteurs et l'apparition de courants induits dans des couches conductrices entourant les conducteurs.

Toutefois, une partie de la courbe PEEC « modèle complet » est hors du domaine de précision de la courbe de mesure, en particulier aux points le plus élevé de fréquence (*avant la résonance*). Ceci pourrait être imputé à des erreurs de mesure, en raison d'un manque de précision dans la technique de préparation des fils de connexion et de package de composant. D'autre part, une erreur peut provenir de la modélisation qui ne tient pas compte de la géométrie exacte.

De plus, on notera que plusieurs ensembles de paramètres ont été testés pour estimer l'influence des parties spécifiques de la conception sur la réponse en fréquence, mais aucun n'a permis d'expliquer la forte diminution de l'inductance équivalente, ce qui peut aussi être considéré comme une augmentation exagérée de la résistance équivalente, ou de la même manière, comme un «retard» dans la phase sur des mesures.

4. Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons proposé une contribution pour améliorer la conception et la réalisation d'éléments inductifs.

D'un point de vue technologique, chaque étape du procédé a été développée et optimisée, grâce au soutien du service TEAM du LAAS, afin d'améliorer la filière technologique.

Plusieurs méthodes de mesure ont également été confrontées, conduisant à une bonne méthodologie pour la mesure des très basses fréquences à des fréquences supérieures à 100MHz. Au-delà de cette limite, les mesures ne semblent pas appropriées pour les inductances de puissance. Les mesures effectuées, toutefois, fournissent une validation expérimentale encourageante du modèle analytique proposé pour des inductances planaires circulaires ou en spirales.

Les améliorations dans la technologie des procédés et dans les techniques de mesure permettront la réalisation et la caractérisation de nombreux autres composants passifs tels que des inductances à noyau magnétique par voie électrolytique ou des condensateurs intégrés.

Programme de Recherche

1. Positionnement du programme de recherche.

1.1 Contexte général.

Plusieurs facteurs socio-économiques font que le photovoltaïque devient une technologie d'énergie renouvelable de choix en France : le besoin de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), la déréglementation et la restructuration des compagnies de production d'électricité, etc... En Europe et notamment en France, les réseaux de transport et de distribution de l'électricité ont été conçus de manière centralisée. De fait, notre système de production et de distribution d'électricité actuel est dicté par un principe : **maintenir au mieux un équilibre entre la demande et l'offre en effectuant un prévisionnel de la consommation le plus précis possible.**

L'intégration des énergies renouvelables aux réseaux d'électricité est le déclencheur impliquant obligatoirement une modernisation de nos installations électriques et le développement de nouveaux modes de gestion tenant compte à la fois des consommations mais aussi de la production décentralisée d'un grand nombre de nouvelles sources d'énergie dont la production est très difficile à contrôler et encore plus à prévoir. Aujourd'hui, cette problématique est regroupée au niveau mondial dans la terminologie « **smart grid** » comprenant à la fois le développement de nouvelles sources d'énergie plus contrôlées mais à faible impact sur l'environnement et les nouveaux modes de communication à distance nécessaires à la gestion globale d'un réseau. En effet, une plus grande participation de producteurs d'énergie à la fourniture de l'électricité implique des difficultés sur la gestion des pointes de consommations journalières pas forcément en adéquation avec les pointes de productible potentiel de toutes ces nouvelles sources. Cela nous incite à des changements à plusieurs niveaux de la chaîne de production. Ainsi l'industrie électrique évolue de plus en plus de pair avec l'industrie des télécommunications **vers une production plus décentralisée avec un transit d'énergie et d'information qui devient de plus en plus bidirectionnel.**

La modernisation des réseaux électriques inclut différentes composantes afin de faciliter la gestion des réseaux électriques modernes, chacune ayant un impact différent sur l'atteinte d'objectifs environnementaux, sur la fiabilité des réseaux électriques et sur le coût de l'électricité. Ainsi, le développement de **réseaux intelligents** devrait permettre un meilleur ajustement de la production et de la consommation d'électricité. En améliorant la connaissance sur la consommation électrique à

l'aide de compteurs intelligents, il serait plus facile d'éviter et/ou prévoir les pics de consommation et les pannes dues à une surcharge. Ainsi, la gestion de la consommation électrique serait gérée de manière intelligente au plus près des besoins des utilisateurs afin d'éviter des surproductions inutiles.

Bien que la fourniture d'énergie décentralisée comporte de nombreux avantages, la transition vers un « smart grid » représente plusieurs défis technologiques non encore résolus à ce jour. Ainsi un des enjeux majeurs des réseaux d'électricité de demain est l'assimilation massive de la production d'électricité intermittente. Le développement des énergies renouvelables, sources de production d'électricité par nature décentralisées, est souvent freiné par une inadéquation de ces moyens de production avec le fonctionnement du réseau actuel. L'électricité produite est alors perdue, ne pouvant être stockée à grande échelle ni sur un temps trop long. Ainsi, on peut considérer que le réseau de distribution électrique lui-même doit évoluer pour pouvoir gérer la production et la consommation en temps réel. Demain le réseau devra donc être bidirectionnel pour intégrer la production d'électricité d'origine renouvelable.

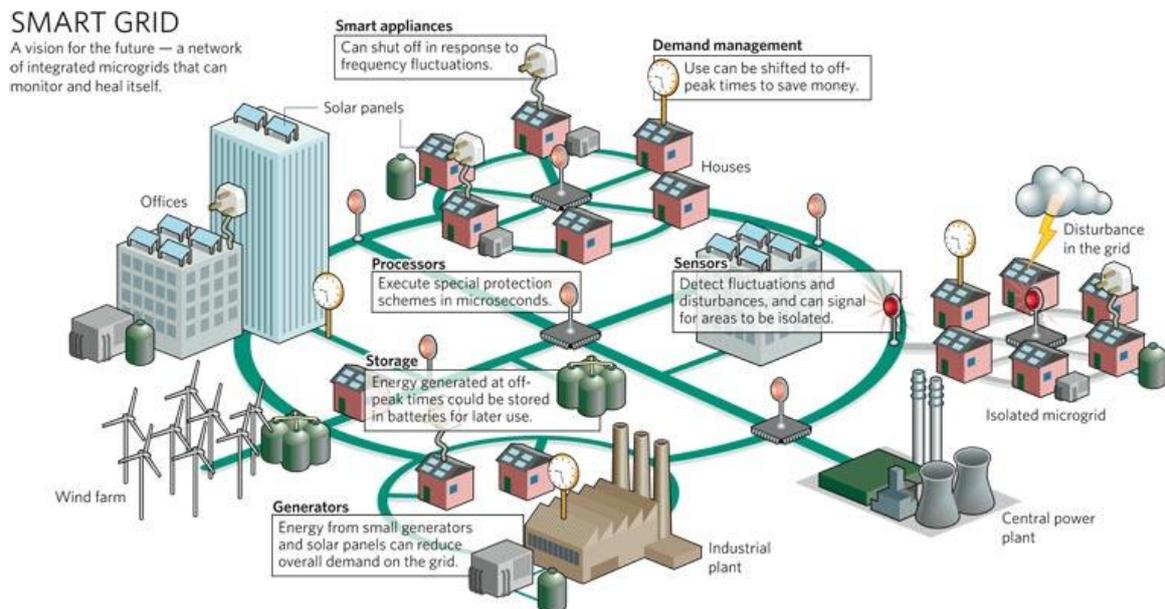


Figure IV-1. Exemple de smart grid.

Pour cela, le réseau devra nécessairement être équipé de capteurs, de centres de contrôles afin de mieux gérer ces flux. Les avantages sont évidents : installer toutes sortes d'équipements de surveillance dans les résidences personnelles, dans les établissements de petites entreprises pour que les fournisseurs et les consommateurs sachent exactement combien d'électricité est utilisée à un moment donné et pour quelle utilisation.

1.2 Quelle évolution pour le photovoltaïque dans le contexte des smart-grids ?

La percée de l'énergie photovoltaïque comme source d'énergie électrique renouvelable passe par une amélioration constante des performances des différents éléments constituant la chaîne de conversion. Dans ce cadre, le LAAS-CNRS continuera à s'intéresser à l'amélioration des caractéristiques des étages d'adaptation, insérés entre les panneaux photovoltaïques et la charge, continue (*ie. batteries pour site isolé*) ou alternative (*ie. le réseau pour connexion réseau*).

Concernant le développement d'architectures de conversion les plus compactes et performantes possibles, l'évolution actuelle consiste à intégrer de plus en plus de fonctions comme nous avons pu le montrer au chapitre II. Pour qu'elle soit efficace, elle doit s'accompagner d'un développement d'alimentations en énergie électrique dédiées et performantes, c'est-à-dire parfaitement adaptées en courant et en tension à la demande des applications, comme, par exemple, un habitat isolé ou un quartier d'habitation dans une ville. L'adaptation source-charge étant rarement possible en connexion directe, un voir plusieurs étages de conversion doivent être obligatoirement insérés entre la source énergétique et les applications à alimenter. Ainsi se pose le problème de la gestion du compromis entre le rendement de conversion de l'étage d'adaptation et la fonction réellement occupée par ce dernier à chaque instant. Ceci implique des puissances volumiques et massiques de plus en plus importantes pour toutes les fonctions inhérentes au contrôle de la conversion d'énergie.

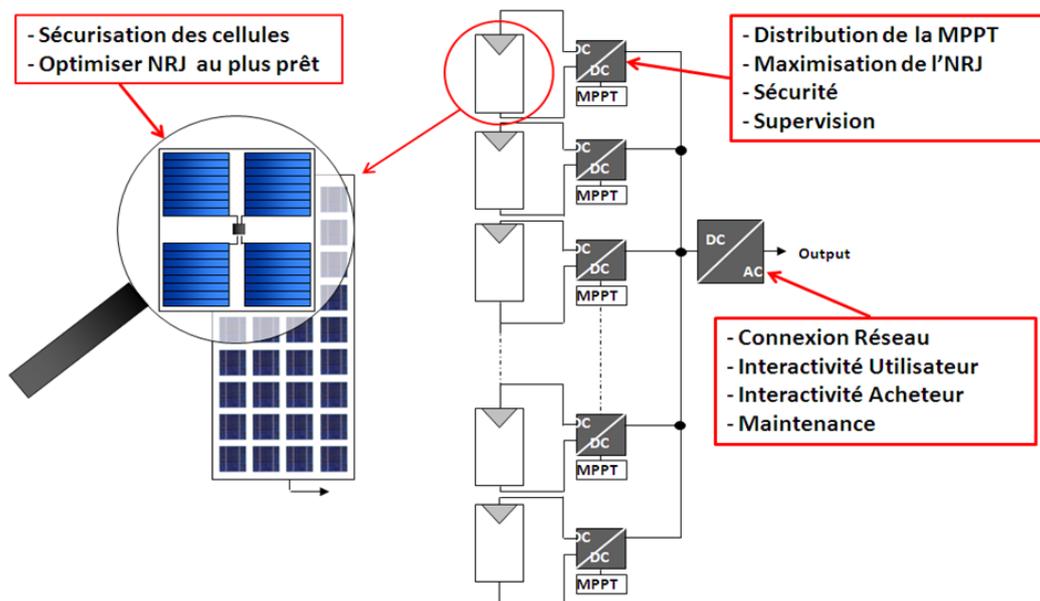


Figure IV-2. Perspectives de recherche à l'échelle du panneau ou du groupement de panneau.

En parallèle, les importants progrès effectués ces dernières années dans le domaine de la conversion d'énergie électrique ont donné naissance à des fonctions élémentaires (*conversion, régulation, protection, filtrage*) de plus en plus compactes voir intégrées. Ceci permet aujourd'hui d'envisager la possibilité de réaliser à court terme (*sous quatre ans*) des alimentations de faibles puissances en version totalement intégrées, en particulier pour celles destinées à assurer les fonctions de « point de charge » comme

dans l'exemple des alimentations distribuées. A ceci, doivent maintenant s'ajouter des fonctions de gestion de la ou des éléments de stockage probablement de types batteries. Nous pouvons illustrer nos propos d'abord dans le cas des sites isolés ou les applications nomades mais très rapidement les smart grids devront aussi s'en préoccuper. Ainsi, le projet de recherche que nous proposons s'articule sur plusieurs thèmes :

- Nouvelles architectures de panneaux photovoltaïques,
- Stratégies de gestion avancées adaptées aux nouveaux types de générateur photovoltaïque (*de la cellule au panneau*) et incluant le stockage,
- Intégration ultime Panneau + Convertisseur statique.

2. Axes de recherches envisagés.

2.1 Nouvelles architectures de panneaux photovoltaïques.

Nous proposons de concevoir et développer des fonctions avancées de gestion de l'énergie pour générateur (*ou module*) photovoltaïque, en continuation des projets en cours et en les renforçant sur les points les plus stratégiques sur le gain potentiel en rendement, baisse des coûts et allongement de la durée de vie. Ainsi, un de nos objectifs est de rendre communicante la chaîne de conversion électrique, rendue complexe par les alimentations distribuées. Ainsi, à chaque instant, l'état réel du système devra être connu à distance par un gestionnaire, tout comme les puissances instantanées produites ou consommées.

De plus, la sécurisation de l'ensemble de la chaîne de conversion du point de vue électrique devra être envisagée, en la rendant « intelligente » par l'insertion de fonctions annexes nécessaires au suivi de la vie de la chaîne de conversion. Cette partie, appelée Gestionnaire de la chaîne de conversion, est en cours de développement au laboratoire à travers la thèse d'Aloña Berasatégi, commencée en 2009 en CIFRE Total. A ces aspects d'**associabilité** et d'**architectures distribuées de convertisseurs** déjà étudiées, nous nous proposons de rajouter :

- **Des fonctions avancées de protection** : la protection du panneau sera envisagée de deux manières. La première, d'un point de vue **électrique**, consistera à protéger et diagnostiquer le fonctionnement du panneau. Le but recherché est ici de pouvoir identifier le panneau du champ de protection défaillant, en associant des protocoles de test et de diagnostic à distance. De plus, dans l'objectif d'une discrétisation la plus poussée possible des convertisseurs au plus près d'une cellule ou d'un groupement de cellules, de nouvelles stratégies de connectivité des groupes de cellules entre eux sera envisagé, afin de supprimer l'intégration des diodes By-Pass et des diodes anti-retours. D'un point de vue **sécuritaire**, nous proposerons de rajouter des fonctions dites « propriétaires » au panneau, en rendant ce dernier identifiable à distance et non fonctionnel en cas de vol.
- **Le couplage multi-sources** : dans de nombreux cas, l'utilisation du photovoltaïque comme unique source d'énergie n'est pas suffisante pour répondre aux besoins des utilisateurs, en particulier dans des périodes hivernales. Dès lors se pose la question du couplage de plusieurs sources, possédant des comportements électriques différents. Deux approches seront alors possibles ; la première consistera à identifier une ou plusieurs autres charges, et d'appréhender leur mode de fonctionnement afin de rendre la conception du convertisseur et de sa commande optimale. La deuxième consistera à utiliser un convertisseur plus ou moins générique, permettant d'effectuer un

couplage entre les différentes sources mais de manière moins optimale, puisque les caractéristiques propres de la deuxième source ne seront pas prises en compte.

- *Le couplage multi-charges* : en considérant dans un futur proche que les systèmes développés pourront être couplés soit à un réseau continu (*batteries*) soit à un réseau alternatif (*réseau EDF par exemple*), cette partie étudiera de nouvelles structures de convertisseurs permettant de répondre aux besoins énoncés précédemment ainsi que leurs modes de commande à distance.

2.2 Stratégies de gestion avancées : vers une intégration ultime panneau - convertisseur.

Une source photovoltaïque, constituée d'un nombre variable de cellules, de technologie variée, délivre une puissance électrique qui, pour être optimisée tant en production qu'en consommation, doit faire appel à un étage d'adaptation. Ainsi, traiter l'énergie électrique au plus près des cellules productrices doit apporter un gain important en rendement de la totalité de la chaîne de conversion, ainsi qu'une augmentation de la fiabilité. Si l'on pousse ce raisonnement aux limites, la question de la miniaturisation voire de l'intégration du convertisseur statique se pose. Nous nous proposons d'étudier dans les années qui viennent :

- l'optimum du nombre de cellules photovoltaïques à connecter à un convertisseur de taille variable en fonction de la technologie utilisée,
- le développement d'une nouvelle architecture optimisée de générateur (*ou module*) photovoltaïque. Le but est ici de gérer la puissance avec un rendement maximisé, au plus près de la ou d'un groupement faible de cellules, le tout combiné à une conversion adaptée en taille (*ie. le plus intégré possible*) et en puissance.
- les problèmes d'associabilité de convertisseurs en série, en parallèle ou encore en cascade,
- Des solutions de connexion des différents convertisseurs suivant le mode d'association privilégié.

2.3 Stratégies optimisées de Gestion des batteries et couplage au réseau.

De nombreuses études ont été consacrées ces dernières années à la recherche et au développement de systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique avec fonction de stockage. En effet, cette dernière permettrait de résoudre les perturbations électriques engendrées par les réinjections directes non prévisibles des installations actuelles. Jusqu'à présent, ces perturbations sont encore absorbées par le réseau électrique lui-même. Cependant, le parc photovoltaïque installé à ce jour devrait s'étendre considérablement ; dès lors, de telles perturbations sur le réseau ne seront plus tolérables. La fonction stockage pourrait donc ouvrir plus largement le marché en se libérant de la capacité de raccordement. En effet, outre l'amélioration de la qualité du courant, la fonction stockage offre d'autres utilisations ; elle permettrait notamment, lorsque la production sera suffisante pour fournir la demande, de stocker le courant excédentaire produit, évitant ainsi de surcharger le réseau. Le réseau profiterait ainsi d'une source d'énergie prévisible, disponible à tout moment pour atténuer la charge du réseau lors des pointes de consommation. Ainsi, le stockage permettra d'étaler dans le temps l'énergie photovoltaïque produite au cours de la journée de telle sorte qu'elle soit décalée dans le temps et disponible à tout moment en fonction des besoins. Cette fonction permettra donc à la fois de maximiser la consommation locale ou l'autoconsommation et d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

Les objectifs scientifiques et techniques que nous proposons maintenant consisteraient en une approche système globale, de la production PV à son optimisation énergétique, qui permettrait le

développement d'un système assurant une fonction de service et de soutien au réseau, par opposition avec les modules PV standard qui génèrent de l'électricité intermittente et non pilotable. Pour ce faire, nous proposons :

- De développer de nouvelles stratégies de gestion du module couplé au réseau pour l'ensemble des modes d'interaction envisagés (*soit un fonctionnement en lissage des pics de consommation journaliers, ou un fonctionnement en tampon lors des intermittences de production photovoltaïque, ou bien encore un fonctionnement secouru*).
- De développer des fonctions d'équilibrage permettant d'atteindre en fin de charge le même niveau de charge pour chaque élément. En effet, la technologie lithium-ion, par exemple, n'acceptant pas la surcharge, la mise en série des éléments constitutifs d'un pack est rendue obligatoire. Un élément déséquilibré en tension doit donc être rééquilibré en tension. Les modes d'équilibrages actuels procèdent, au cours du processus de charge, par des décharges successives sur les éléments présentant les niveaux de charge les plus élevés, afin de ramener leur état de charge au niveau des éléments les plus faiblement chargés. Ces opérations sont longues et diminuent le rendement de charge du pack. Nous nous proposons ainsi de développer des solutions innovantes permettant de diminuer les temps de charge et de maximiser le rendement.
- De développer une fonction de sécurité, autant pour la batterie de stockage que pour la sécurité des personnes, lors de la mise en place de l'installation ou de la maintenance par exemple. On s'intéressera de plus à la sécurisation au niveau de l'onduleur en cas d'événements extérieurs, à proximité du système tels qu'un incendie, une inondation et susceptibles de nécessiter l'intervention de personnes non habilités au niveau électrique. Ainsi, le système devra être capable de se déconnecter et de se mettre en sécurité.
- De développer un système de communication à distance permettant de pouvoir contrôler le bon fonctionnement de l'installation, ce qui permettra de déclencher des opérations de maintenance précoces.

Pour ces divers travaux d'envergure, deux nouvelles thèses ont démarré en 2010 dans le cadre d'un contrat LAAS-Total sur 4 ans. Le soutien de deux nouveaux post-doctorants depuis un an a été nécessaire renforçant ainsi l'équipe du LAAS existante que je codirige Corinne Alonso.

3. Le projet ADREAM comme démonstrateur.

3.1 Généralités.

Le programme Adream du laboratoire LAAS-CNRS porte sur l'ensemble des aspects de conception et de développement des systèmes énergétiques et informatiques disséminés. Dans de tels systèmes, l'évolution de l'informatique est l'intégration du traitement de l'information dans les objets de notre quotidien où, après l'émergence de la mobilité, l'intelligence devient ambiante. Le développement de tels systèmes soulève de nombreux défis scientifiques et technologiques dans le domaine des Sciences et technologies de l'information et de la communication tout comme dans le domaine de la gestion de l'énergie.

Adream se propose d'anticiper cette évolution en se concentrant sur les approches systèmes avec la construction des micro-technologies ainsi que les approches logicielles nécessaires à la mise en réseau massive d'objets instrumentés et intelligents, mobiles, coopératifs et communicants par des technologies sans fil. Dotés d'autonomie sur les plans énergétique, fonctionnel et décisionnel, ces

composants et systèmes devront anticiper les risques de fautes accidentelles ou de malveillances. Interopérables, ils pourront fonctionner avec d'autres objets et systèmes informatiques et s'adapteront à un large spectre d'environnements et de tâches, par exemple pour réduire la consommation d'énergie et pour l'assistance à la personne.

3.2 Volet « Energie ».

L'avenir de l'industrie du photovoltaïque passe par une baisse des coûts de production de l'électricité, et une optimisation de la production face au besoin. Ces deux enjeux nécessitent des systèmes d'intégration intelligents, de l'échelle des panneaux solaires à celle des systèmes locaux, en passant par l'intégration dans le bâtiment et le stockage de l'électricité.

Le programme Adream propose donc de bâtir un démonstrateur, en temps réel et en conditions climatiques réelles, à travers un nouveau bâtiment de 1 700 m² optimisé en énergie. Le bâtiment va intégrer une capacité de production d'énergie essentiellement photovoltaïque, de 100 kWc, grâce à une façade photovoltaïque classique contribuant aux besoins en électricité du bâtiment. La production d'énergie sera destinée non seulement à la consommation du laboratoire mais aussi à l'étude de systèmes énergétiques, avec une combinaison de plusieurs sources d'énergie : géothermie et puits canadien, grâce à une pompe à chaleur. Enfin, le bâtiment instrumenté servira lui-même de plateforme expérimentale puisqu'un tiers de la toiture permettra d'évaluer de nouveaux types de cellules photovoltaïques et de conversion d'énergie. Le bâtiment sera instrumenté pour la gestion de l'énergie (capteurs de température, d'ensoleillement, de mesure de la vitesse du vent...). Afin de recréer des situations identiques à celles des sites isolés (chalet de haute montagne, pylône télécom, île) ou connectés au réseau EDF, l'énergie électrique pourra au choix être injectée sur le réseau électrique du laboratoire, ou bien vers des éléments de stockage tels que des batteries en plomb ou de nouvelle génération (lithium...).

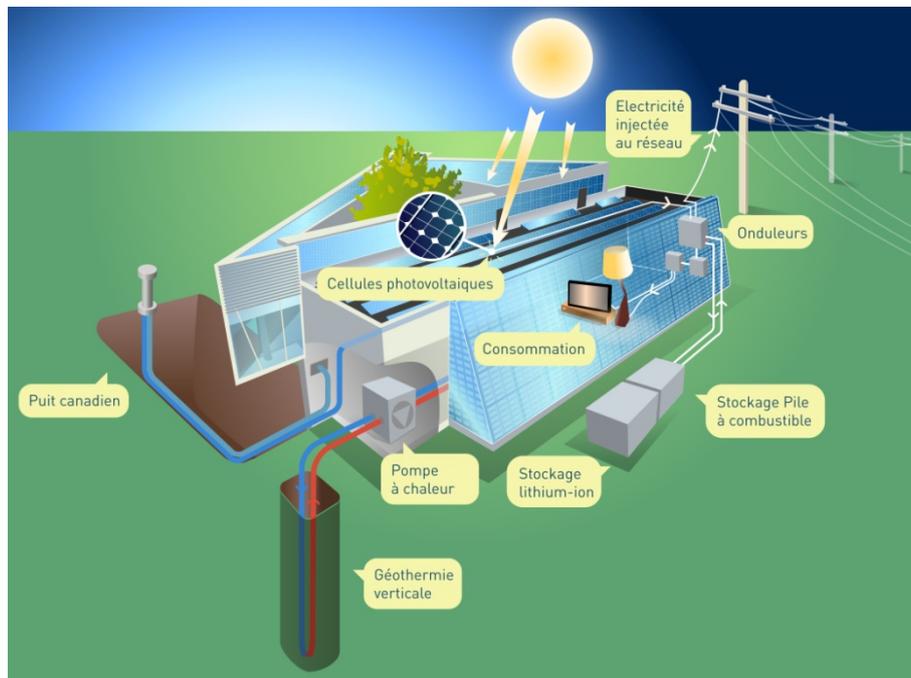


Figure IV-3. Aspect énergétique du démonstrateur ADREAM.

3.3 La création d'une plateforme «Energie» dans ADREAM.

L'énergie solaire satisfait les ambitions de la France dans la lutte contre le changement climatique et la réduction de la contrainte extérieure dès qu'elle représente une puissance installée significative. Le décollage économique de la filière exige plus. La France, dans ce secteur comme dans beaucoup d'autres, n'a pas à rougir des performances de ses chercheurs ni de l'investissement public dans leurs activités : les équipes scientifiques recueillent des résultats innovants, prometteurs, remarquables. Les problèmes actuels, freinant le développement d'une filière photovoltaïque française, résident essentiellement dans la transformation des données établies en laboratoire vers des applications intégrées à la chaîne de montage des usines, ainsi que dans la réalisation de démonstrateurs à grande échelle, validant les solutions proposées par les laboratoires. Le LAAS a ainsi créé une plateforme de caractérisation des systèmes photovoltaïques, de la cellule à l'application, basée sur les connaissances scientifiques acquises par le LAAS-CNRS sur la conversion d'énergie électrique photovoltaïque ainsi que sur son nouveau projet de bâtiment à énergie optimisée ADREAM.

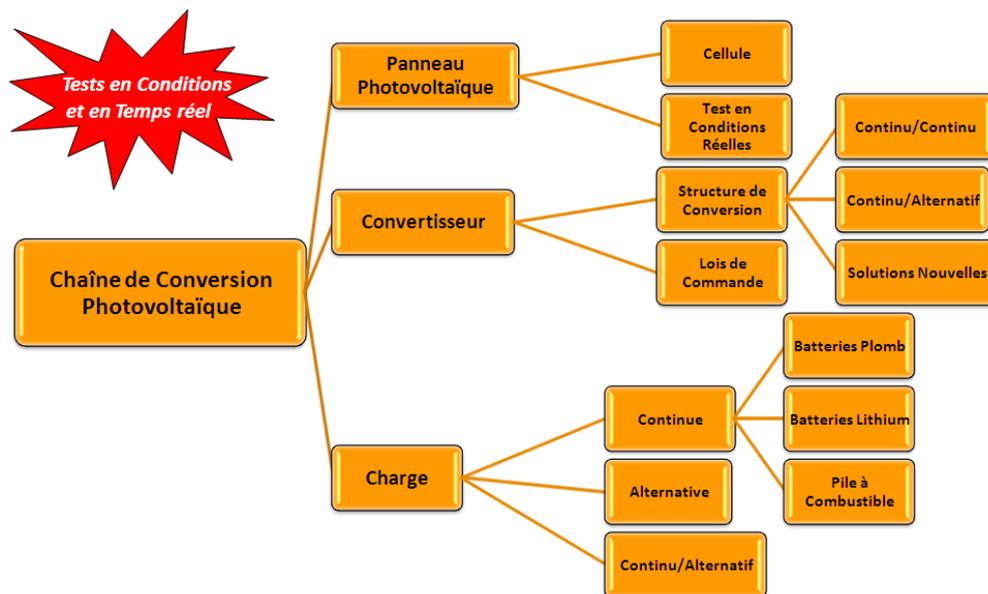


Figure IV-4. Caractérisation des chaînes de conversion photovoltaïque.

La figure IV-4 synthétise les différents composants de la chaîne de conversion photovoltaïque que nous nous proposons d'évaluer, le tout en conditions réelles de fonctionnement (*ie. ensoleillement « naturel », température extérieure, refroidissement naturel etc...*) et en temps réel :

- **Rendement des cellules/des modules photovoltaïques :** La qualité d'un module photovoltaïque peut être définie par sa capacité à restituer le maximum de la puissance lumineuse absorbée. Le but est ici de mesurer les rendements effectifs des cellules et de pouvoir les comparer à d'autres types de technologies. On notera que des critères fondamentaux comme l'irradiance, les températures des panneaux ou le refroidissement des panneaux pourront être mesurés en temps réel.
- **Rendement des systèmes de conversion :** le rendement d'un convertisseur de puissance peut être défini comme la capacité de ce dernier à restituer sur son port de sortie, le maximum de la puissance présente sur son port d'entrée. Si l'on considère l'évolution du rendement d'un étage de conversion en fonction de la puissance transmise, la zone optimale d'utilisation typique d'un CS pour une application PV est comprise généralement entre 20% et 100% de sa puissance nominale.

Ce sont des données statistiques qu'il faut affiner au besoin selon la caractéristique typique du gisement solaire utilisé.

- **Rendement des commandes de maximisation de la puissance extraite du panneau :** La qualité d'une commande peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au Point de Puissance Maximal délivrable par le panneau. Mais d'autres critères, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance sont importants pour évaluer les qualités de ce type de commande.

4. Synthèse.

Aujourd'hui, des travaux d'envergure sont à nouveau nécessaires dans le domaine de la conversion d'énergie au sens large. L'exemple illustré dans ce document sur l'énergie photovoltaïque le montre. Les travaux de recherche que j'ai pu développer tout au long de ces dernières années dans cette application ont des retombées actuelles et futures dépassant largement les énergies renouvelables. En effet, certains concepts d'architectures distribuées peuvent s'appliquer à d'autres domaines comme la problématique des systèmes embarqués.

Le cheminement des recherches montre également un fort développement vers la pluridisciplinarité et le besoin sans cesse constant de développer de nouveaux savoirs en concertation avec de nouveaux acteurs de domaines différents. L'énergie n'est ainsi plus un domaine réservé aux électrotechniciens mais un domaine ouvert vers les nouvelles technologies en particulier micro et nano, la synthèse de nouveaux matériaux. Le développement de l'électronique numérique dédiée à divers organes de commandes est également en pleine mutation impliquant de nouvelles recherches sur la consommation, le taux de calculs possible et la compacité.

Les enjeux sur la modélisation fine et les nouveaux modes de commande sont aussi très forts, impliquant la reprise forte de nouveaux axes en automatique et contrôle de systèmes. L'informatique avec tous les protocoles de communication et la sûreté des informations, le taux de pannes a aussi de nouvelles applications conjuguées aux techniques de télécommunications les plus récentes.

A travers cette habilitation à diriger les recherches, j'ai voulu montrer que le domaine de l'énergie devient obligatoirement pour le chercheur un terrain de collaborations obligatoires. A côté du développement d'une spécialité, il est également nécessaire de se tenir au courant des dernières avancées dans les autres domaines pour rester à la pointe de l'innovation.

Références

- [I-1] International Energy Agency, "Energy Technology Perspectives 2010 Scenarios & Strategies to 2050", ISBN 978-92-64-08597-8, 2010.
- [I-2] Site web : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf
- [I-3] J. Syrota, « Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 », *Rapport de la commission Énergie*, vol.12, n°1, la Documentation Française, 2008.
- [I-4] « Rapport de la Commission au Conseil et au Parlement Européen sur la mise en œuvre du programme énergétique européen pour la relance », site web : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0191:FIN:FR:PDF>
- [I-5] Observ'ER, « La production d'énergie renouvelable dans le monde : perspectives générales », Site web : <http://www.energies-renouvelables.org/observer/html/inventaire/pdf/Chapitre01FR.pdf>
- [I-6] S. Poignant, « Rapport d'information sur l'énergie photovoltaïque », *Rapport de la Commission des Affaires Economiques de l'Assemblée Nationale*, n°1846, 2009.
- [I-7] ADEME Midi-Pyrénées, « Rapport d'Activité 2008 », 2008.
- [I-8] B. Equer, « Filières photovoltaïques : état des lieux et perspectives », *Revue de l'Electricité et de l'Electronique*, n°4, pp.26-31, 2010.
- [I-9] J-L. Bal, « La stratégie française de développement du solaire photovoltaïque », *Revue de l'Electricité et de l'Electronique*, n°4, pp.32-38, 2010.
- [I-10] C. Alonso, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie », Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université Paul Sabatier, 2003.
- [I-11] A. Cid Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », *Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse*, 2006.
- [I-12] C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », thèse de l'Université Paul Sabatier, 2009.
- [I-13] C. Meza, D. Biel, J-J. Negroni, F. Guinjoan, « Considerations on the control design of DC-link based inverters in grid-connected photovoltaic systems », *IEEE International Symposium on Circuits and Systems, (ISCAS 2006)*, 2006.
- [I-14] A. Woyte, J. Nijs, R. Belmans, « Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results » ; *Solar Energy*, Vol. 74, Iss. 3, , pp. 217-233, 2003.
- [I-15] C. Cabal, A. Cid-Pastor, L. Seguier, B. Estibals, C. Alonso, "Maximum power point tracking by means of parallel connection of power semi-converters", *IEEE ISIE 2008, Cambridge (UK)*, 2008.

- [I-16] A. Simon, C-E. Carrejo Gonzalez, E. Vidal-Idiarte, B. Estibals, C. Alonso, "Analysis and design of digital predictive current-mode control techniques for high-frequency VRMs", *35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2009)*, Porto (Portugal), pp.224-229, 2009.
- [I-17] CE. Carrejo Gonzalez, P. Artillan, A. Simon, E. Vidal-Idiarte, B. Estibals, C. Alonso, "FPGA-based improvement of classical current tracking methods for high-frequency power converters", *International Conference on Industrial Technology (IEEE-ICIT 2010)*, Viña del Mar (Chili), 14-17 Mars 2010, pp.718-725, 2010.
- [I-18] M. Femia, G. Lisi., G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli, « Analysis of photovoltaic systems with distributed maximum power point tracking », *ISIE 08*, Cambridge, 2008.
- [I-19] L. Séguier, « Optimisation d'une chaine de conversion photovoltaïque à commande numérique », *mémoire d'ingénieur du Conservatoire Nationale des Arts et Métiers soutenu à Toulouse*, 2010.
- [II-1] M. Di Santo, A. Vaccaro, D. Villacci, E. Zimeo, «A distributed architecture for online power systems security analysis», *IEEE Transactions* Vol. 51, pp. 1238-1248, 2004.
- [II-2] K. Kobayashi, I. Takano, Y. Sawada, « A study on a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions », *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 4, 2003.
- [II-3] Site web : www.blueskyenergyinc.com.
- [II-4] R. Platz, N-P. Vaucher, D. Fischer, J. Meier, A. Shah, « Improved micromorph tandem cell performance through enhanced top cell currents », *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 691 – 694, 1994.
- [II-5] S. Goya, Y. Nakano, N. Yamashita, S. Morita, Y. Yonekura, « Development of amorphous silicon/microcrystalline silicon tandem solar cells », *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Vol. 2, pp.1570-1573, 2003.
- [II-6] Y-M. Soro, A. Abramov, M-E. Gueunier-Farret, E-V. Johnson, C. Longeaud, P. Roca i Cabarrocas, J-P. Kleider, « Device grade hydrogenated polymorphous silicon deposited at high rates », *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 354, Iss. 19-25, pp.2092-2095, 2008.
- [II-7] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », *thèse de l'Université Paul Sabatier*, 2009.
- [III-1] F. Roozeboom, A.L.A.M. Kemmeren, J.F.C. Verhoeven, F.C. van den Heuvel, J. Klootwijk, H. Kretschman et al., "Passive and heterogeneous integration towards a Si-based System in Package concept", *Journal of Thin Solid Films*, vol. 504, pp. 391-396, 2006.
- [III-2] D. Jovicic, B-T.Ooi, "High-Power, Resonant DC/DC Converter for Integration of Renewable Sources", *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, 2009.
- [III-3] A. Benazzi, M. Brunet, P. Dubreuil, N. Mauran, L. Bary, J.-P. Laur, J.-L. Sanchez, K. Isoird, "Performance of 3D capacitors integrated on silicon for DC-DC converter applications", *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'07)*, pp. 1-9, 2007.
- [III-4] J-L. Sanchez, A. Bourennane, M. Breil, P. Austin, M. Brunet, JP. Laur, "Evolution of the classical functional integration towards a 3D heterogeneous functional integration", *14th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, Ciechocinek (Pologne), 2007.
- [III-5] J.N. Burghartz & B. Rejaei, "On the Design of RF Spiral Inductors on Silicon", *IEEE transactions on electron devices*, vol. 50, no 3, pp. 718-729, 2003.
- [III-6] M. Liu, W. W.-M. Dai, "Modeling and Analysis of Integrated Spiral Inductors for RF System-in-Package", *Proceedings of the ASP-DAC Design Automation Conference, Asia and South Pacific*, pp. 211-216, 2000.

- [III-7] M.H.F. Lim, Z. Liang, J.D. van Wyk , “Low profile integratable inductor fabricated based on LTCC technology for microprocessor power delivery applications”, *IEEE transactions on components and packaging technologies*, vol. 30, issue 1, pp. 170-177, 2007.
- [III-8] J.-W. Park, M. G. Allen, “Ultralow-profile micromachined power inductors with highly laminated Ni/Fe cores: application to low-megahertz DC-DC converters”, ; *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 39, issue 5, part 2, pp. 3184-3186, 2003.
- [III-9] R. Giral, L. Martinez-Salamero, S. Singer, “Interleaved converters operation based on CMC”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 643-652, 1999.
- [III-10] H. Greenhouse, “Design of planar rectangular microelectronic inductors”, *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, vol. 10, pp. 101-109, 1974.
- [III-11] J. Aime, E. Clavel, J. Roudet, Ph. Baudesson, “Magnetic field computation of a common mode filter using Finite Element, PEEC methods and their coupling”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'08)*, Cambridge, United Kingdom, pp. 7-12, 2008.
- [III-12] A. E. Ruehli, “Partial Element Equivalent Circuit (PEEC) method and its application in the frequency and time domain”, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 128-133, 1996.
- [III-13] Ph. Artillan, “Design, modelization and realization of integrated inductive components for low power supplies and microsystems”, *Doctorat de l’Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse*, 2008.
- [III-14] Ph. Artillan, B. Estibals, A. Salles, J. Abboud, P. Aloïsi, C. Alonso, “A PEEC approach for circular spiral inductive components modeling”, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'07)*, pp. 301-304, 2007.
- [III-15] Ph. Artillan, B. Estibals, C. Alonso, “A new modeling approach for circular spiral inductors”, *12th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2007)*, Aalborg, pp. 1-8, 2007.
- [III-16] T. El Mastouli, JP. Laur, JL. Sanchez, M. Brunet, D. Bourrier, M. Dilhan, « Micro-inductors integrated on silicon for dc-dc converters”, *SPIE International Symposium on Micromachining and Microfabrication Process Technology*, San José (USA), 2008.
- [III-17] T. El Mastouli, JP. Laur, JL. Sanchez, M. Brunet, D. Bourrier, M. Dilhan, JF. Bobo, “CoNiFe applied in microinductors for integrated dc-dc converters”, *IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG 2008)*, Madrid (Espagne), 2008.
- [III-18] A. Salles, « Conception d’éléments passifs magnétiques pour convertisseurs de faible », *Doctorat de l’Université Paul Sabatier*, Toulouse, 2008.
- [III-19] Cascade Microtech, “Layout Rules for GHz-Probing”, Cascade Microtech application note, url: <http://www.cmicro.com/>, 1987.
- [III-20] Ph. Artillan, C. Alonso, B. Estibals, A. Salles, N. Mauran, H. Tranduc, S. Assie-Souleille, “Conception et réalisation d’un banc de caractérisation d’éléments inductifs pour la conversion de puissance”, *Rapport LAAS-CNRS 05663*, 67p., 2005.

Liste des travaux et publications

Bilan sur la période de 2005 à 2010

Brevets	4
Revue Internationale avec Comité de Lecture	3 (7 <i>Soumises</i>)
Congrès Internationaux avec Comité de Lecture, dont 4 papiers invités	22
Congrès Nationaux avec Comité de Lecture	3
Rapports de Contrats	3

Brevets

- **B. Estibals**, C. Alonso, M. Vermeersch, « Système de Gestion Electronique pour cellules photovoltaïques », *Brevet déposé en France et étendu à l'international n° 08 07 119*, 2008
- **B. Estibals**, C. Alonso, M. Vermeersch, L. Francke, « Dispositif photovoltaïque et Procédé de Fabrication », *Brevet déposé en France et étendu à l'international n° 09 02 354*, 2009
- C. Alonso, **B. Estibals**, C. Cabal, S. Petibon, A. Berasategi, M. Vermeersch, « Système de gestion électronique de cellules photovoltaïques avec seuils adaptés », *Brevet FR N° 09 58 899*, 2009
- C. Alonso, **B. Estibals**, C. Cabal, S. Petibon, A. Berasategi, M. Vermeersch, « Système de gestion électronique de cellules photovoltaïques selon la météorologie », *Brevet FR N°09 58 900*, 2009

Revue Internationale avec Comité de Lecture

- **B. Estibals**, C. Alonso, A. Salles, A. Cid-Pastor, L. Martinez-Salamero, « Design and Realisation of Integrated Inductor with Low DC-resistance value for Integrated Power Applications », *HAIT Journal and Engineering B*, Vol. 2, pp. 848-868, 2005.
- L. Martinez-Salamero, H. Valderrama-Blavi, C. Alonso, **B. Estibals**, A. Cid-Pastor, "Self-Oscillating DC-to-DC switching converters with transformers characteristics", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 41, pp. 710-716, 2005.
- A. Cid-Pastor, L. Martinez-Salamero, C. Alonso, **B. Estibals**, J. Alzieu, G. Schweitz, D. Shmilovitz, "Analysis and Design of Power gyrators in sliding-mode operation", *IEE Proceedings Electric Power Applications*, Vol. 152, pp. 821-826, 2005.

- Ph. Artillan, D. Jugieu, **B. Estibals**, Corinne Alonso, Ch. Escriba1, A-M. Gué, "Analytical modeling and analysis of integrated magnetic actuators applied to microbeads handling in microfluidic systems", *Soumis à IEEE Transactions on Computer Aided Design of Integrated Circuit and Systems*, 2009.
- R. Leyva, P. Artillan, C. Cabal, **B. Estibals**, "Dynamic Performance of MPPT Circuits using Sinusoidal Extremum Seeking Control for PV Generation", *soumis à International Journal of Electronics* le 18 May 2010.
- C.A.Ramos-Paja, C.E.Carrejo, A.Simon-Muela, **B.Estibals**, C. Alonso, "Modeling of full photovoltaic systems applied to advanced control strategies", *soumis à Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2010.
- C.E. Carrejo, A. Sim'on-Muela, C.A. Ramos, **B. Estibals**, A. Nektsa, C. Alonso, "Modeling rules for High-frequency, Digitally-Controlled Point-of-Load Power Converters", *soumis à International Journal of Electronics*, 2010.
- C.E. Carrejo, A. Simon-Muela, C.A. Ramos, E. Monmasson, **B. Estibals**, C. Alonso, "Design guidelines for high-frequency digital FPGA-based controllers applied to VRM" *soumis à IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010.
- C.E. Carrejo, C.A. Ramos, R. Giral, **B. Estibals**, C. Alonso, "Active Filtering and Advanced Signal Processing in Power Electronics ", *soumis à IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010.
- C. Olalla, C.E. Carrejo, R. Leyva, **B. Estibals**, C. Alonso, "Digital QFT robust control of current-mode converters: application to power,conditioning regulators", *soumis à International Journal of Electronics*, 2010.

Congrès Internationaux avec Comité de Lecture

- A. Salles, **B. Estibals**, D. Bourrier, C. Alonso, « Planar Inductors with Interleaved Conductors for Integrated Power Applications », *IEEE ISCAS 2005*, Kobe, Japon, 2005.
- **B. Estibals**, A. Salles, D. Bourrier, P. Destruel, I. Seguy, A. Cid-Pastor, C. Alonso, « Design and Realisation of Integrated Inductors on Glass wafer for Low Power Applications », *SAAEI'05*, Santander, Espagne, 2005.
- **B. Estibals**, J.L. Sanchez, C. Alonso, JP. Laur, A. Salles, D. Bourrier, M. Dilhan, "Micro inductors using low temperature fabrication processes for integrated DC-DC microconverters", *IEEE IAS'05*, Hong Kong, 2005.
- A. Cid-Pastor, L. Martinez-Salamero, C. Alonso, **B. Estibals**, L. Segquier, G. Schweitz, "Analysis and Design of Power R gyrators for voltage regulation", *32nd IEEE IECON'2006*, Paris (France), 2006.
- **B. Estibals**, C. Alonso, A. Salles, Ph. Artillan, "An overview of last design strategies of integrated inductors for switching power regulators", *Invited Paper, IEEE ISCAS'2006*, Ile de Kos (Grèce), 2006
- Ph. Artillan, **B. Estibals**, A. Salles, J. Abboud, C. Alonso, "A PEEC approach for circular spiral inductive components modelling", *IEEE ISCAS 2007*, Nouvelle-Orléans, 2007.
- S. Petibon, C. Alonso, **B. Estibals**, P. Aloisi, A. Cid-Pastor, L. Martinez-Salamero, « Comparative study of the optimal number of phases for interleaved voltage regulator modules", *EPE 2007*, Aalborg, Denmark, 2007.
- Ph. Artillan, **B. Estibals**, A. Salles, A. Cid-Pastor, L. Martinez-Salamero, C. Alonso, « A new modeling approach for circular spiral inductors", *EPE 2007*, Aalborg, Denmark, 2007.
- A. Simon, S. Petibon, C. Alonso, **B. Estibals**, L. Segquier, J-L. Chaptal, "Practical implementation of a high-frequency current sensing technique for VRM", *IEEE ISIE 2007*, Vigo (Espagne), pp.764-769, 2007.
- C. Cabal, C. Alonso, A. Cid-Pastor, **B. Estibals**, L. Segquier, G. Schweitz, J. Alzieu, "Adaptive digital MPPT control for photovoltaic applications", *IEEE ISIE 2007*, Vigo (Espagne), 2007.
- A. Simon, Y. El Basri, C. Lahore, L. Segquier, C. Lahore, L. Segquier, C. Alonso, V. Boitier, **B. Estibals**, J-L. Chaptal, "High-frequency digital point-of-load converter using a bits DSC", *IEEE ISIE 2008*, Cambridge (UK), 2008.

- C. Cabal, C. Alonso, A. Cid-Pastor, L. Segulier, **B. Estibals**, "Improved of photovoltaic conversion chain with interleaved method", *39th Power Electronics Specialists Conference (PESC'08)*, Rhodes (Grèce), 2008.
- C. Cabal, A. Cid-Pastor, L. Segulier, **B. Estibals**, C. Alonso, "Maximum power point tracking by means of parallel connection of power semi-converters", *IEEE ISIE 2008*, Cambridge (UK), 2008.
- S. Petibon, C. Alonso, **B. Estibals**, L. Segulier, C. Cabal, P. Rocca I Cabarrocas, E. V. Johnson, A. Abramov, "New distributed architecture for tandem solar cells based on pm-Si:H/uc-Si:H structures", *IEEE ISIE 2008*, Cambridge (UK), 2008.
- A. Simon, C. Alonso, **B. Estibals**, J-L. Chaptal, « Diseño de convertidores digitales embarcados de alta frecuencia de conmutación "Point-of-Load" », *SAAEI 2008*, Cartagene (Espagne), 2008.
- A. Simon, C-E. Carrejo Gonzalez, E. Vidal-Idiarte, **B. Estibals**, C. Alonso, "Analysis and design of digital predictive current-mode control techniques for high-frequency VRMs", *35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2009)*, Porto (Portugal), pp.224-229, 2009.
- J. Martinez Garcia Tenorio, A. Simon, **B. Estibals**, C. Alonso, "Input current characterization for interleaved multiphase voltage regulator modules", *35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2009)*, Porto (Portugal), pp. 571-576, 2009.
- JF. Reynaud, O. Gantet, P. Aloïsi, **B. Estibals**, C. Alonso, "New adaptive supervision unit to manage photovoltaic batteries", *35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2009)*, Porto (Portugal), pp. 661-666, 2009.
- A. Berasategi, C. Cabal, **B. Estibals**, C. Alonso, "European efficiency improvement in photovoltaic applications by means of parallel connection of power converters", *13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2009)*, Barcelone (Espagne), 2009.
- CE. Carrejo Gonzalez, P. Artillan, A. Simon, E. Vidal-Idiarte, **B. Estibals**, C. Alonso, "FPGA-based improvement of classical current tracking methods for high-frequency power converters", *International Conference on Industrial Technology (IEEE-ICIT 2010)*, Viña del Mar (Chili), 14-17 Mars 2010, pp.718-725, 2010.
- CA. Ramos-Paja, CE. Carrejo Gonzalez, A. Simon, E. Perez, D. Gonzalez Montoya, **B. Estibals**, C. Alonso, "Modeling of full photovoltaic systems for control purposes", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10)*, Granada (Espagne), 23-25 Mars 2010, pp.712-717, 2010.
- JF. Reynaud, O. Gantet, P. Aloïsi, **B. Estibals**, C. Alonso, "A novel distributed photovoltaic power architecture using advanced Li-ion batteries", *accepté à EPE PEMC*, 5-8 Septembre 2010, Ohrid, Rép. De Macédoine, 2010.

Congrès nationaux avec Comité de Lecture

- A. Salles, C. Alonso, **B. Estibals**, « Etat d'avancement dans le dimensionnement d'inductances planaires pour convertisseurs intégrés de faible puissance », *JNRDM'05*, Paris, 2005.
- A. Salles, **B. Estibals**, Ph. Artillan, D. Bourrier, C. Alonso, « Réalisation d'inductances parallèles pour applications de puissance intégrées », *EPF'06*, Grenoble, 2006.
- A. Cid-Pastor, L. Martinez-Salamero, C. Alonso, R. Leyva-Grasa, **B. Estibals**, G. Schweitz, « Réalisation de fonctions électroniques basées sur des girateurs de puissance », *EPF'2006*, Grenoble, 2006.

Rapports de Contrat

- S. Petibon, C. Alonso, **B. Estibals**, « Mise en place du démonstrateur DC/DC de faible puissance », Rapport LAAS N°07139, *Projet de recherche ATOS*, 2007.
- P. Aloïsi, C. Alonso, M. Bafleur, V. Boitier, F. Caignet, P. Dubreuil, **B. Estibals**, E. Imbernon, K. Isoird, H-E. Dkoth Mhfoz, N. Mauran, F. Morancho, N. Nolhier, J. Roig Guitart, B. Rousset, Ch. Salamero, J-L. Sanchez, E.

- Scheid, H. Tranduc, B. Chaudret, M. Khan, J-M. Reynes, E. Stefanov, B. Vrignon, J. Calvente, « Rapport intermédiaire du laboratoire commun LISPA », Rapport LAAS N°07273, *Laboratoire Commun LISPA*, 2007.
- P. Aloisi, C. Alonso, M. Bafleur, V. Boitier, F. Caignet, P. Dubreuil, **B. Estibals**, E. Imbernon, K. Isoird, H-E. Dkoth Mhfoz, N. Mauran, F. Morancho, N. Nolhier, J. Roig Guitart, B. Rousset, Ch. Salamero, J-L. Sanchez, E. Scheid, H. Tranduc, B. Chaudret, M. Khan, J-M. Reynes, J. Sheperd, E. Stefanov, B. Vrignon, J. Calvente, L. Martinez-Salamero, E. Vidal, Ph. Artillan, B. Bernoux, A. Gendron, N. Lacrampe, L. Saint-Macary, J-B. Sauveplane, A. Simon, « Rapport final du laboratoire commun LISPA », Rapport LAAS N°08526, *Laboratoire commun LISPA*, 2008.
-