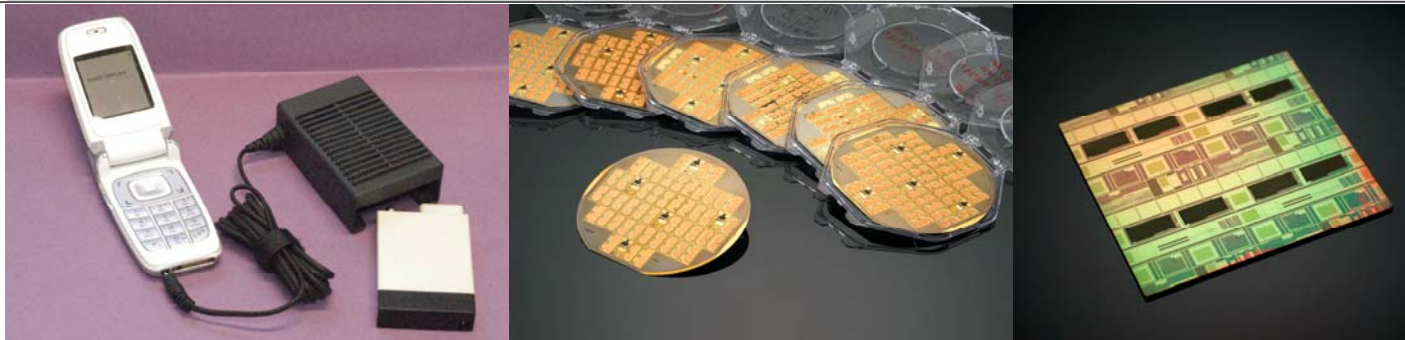


DOSSIER DE PRESSE



Les nouvelles sources d'énergie miniatures pour applications nomades

21 mai 2008

CONTACT PRESSE : CEA / Service Information-Média

Delphine Nicolas Tél. : 01 64 50 14 88 - delphine.nicolas@cea.fr

CEA Saclay / Siège
Direction de la Communication
Service Information-Média
91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél. : (33) 01 64 50 20 11
Fax : (33) 01 64 50 28 92
www.cea.fr/presse

Sommaire :

Les nouvelles sources d'énergie miniatures pour applications nomades

- 3 Introduction**
 - 3 Une compétition mondiale, des opportunités pour l'Europe
 - 3 Un laboratoire commun avec STMicroelectronics

- 5 Accumulateurs, piles et batteries : état des lieux**

- 7 Les micropiles à combustible : une nouvelle génération de microgénérateurs électrochimiques**
 - 7 Une nouvelle génération de microgénérateurs électrochimiques
 - 9 Deux filières à l'étude
 - 14 Des partenariats industriels d'envergure

- 15 Les batteries : des performances en constante amélioration**
 - 15 Nouvelles voies dans les batteries au lithium
 - 17 Deux solutions innovantes pour les matériaux d'électrode
 - 19 Mini-batteries : des développements prometteurs dans le domaine médical
 - 20 Des micro-batteries pour alimenter les capteurs autonomes

- 21 La thermoélectricité : récupérer l'énergie thermique là où elle est disponible**
 - 21 Le principe
 - 22 Les ruptures technologiques nécessaires
 - 23 Des acteurs mondiaux comme dans tous les domaines aujourd'hui
 - 23 Les nanomatériaux : une voie prometteuse pour l'innovation

- 26 Annexes**
- 27 CEA-Liten, la recherche sur les nouvelles technologies de l'énergie**
 - 27 Les marchés visés
 - 27 Une excellence scientifique reconnue à l'international
 - 28 Des moyens et des plates-formes technologiques
 - 28 Partenariats industriels : une tendance forte qui se confirme

- 29 ST Microelectronics, fabricant mondial de semiconducteurs**

Didier Marsacq, directeur du CEA-Liten
Frédéric Gaillard, chef du laboratoire
« Composants hybrides » au CEA-Liten
Sebastien Martinet, chef du laboratoire
« Composants pour l'énergie » au CEA-Liten
Igor Bimbaud, responsable de la Business Unit
« Nouvelles Energies » à ST Microelectronics

Introduction

L'essor de la téléphonie mobile et, plus globalement, de l'électronique nomade, s'accompagne d'un besoin accru de sources d'énergies miniaturisées (batteries, piles, etc...). De même, à court et moyen terme, l'émergence de nouveaux produits miniaturisés et interactifs dans les domaines civils et militaires (capteurs autonomes pour le développement de « *vêtements intelligents* », systèmes médicaux autonomes, GPS, capteurs embarqués...) devrait accentuer encore ce phénomène, en ouvrant de nouveaux marchés.

De grandes opportunités de développement sont donc offertes aux systèmes de production, de stockage ou de récupération d'énergie. Ils devront répondre aux défis techniques soulevés par les objets nomades de prochaine génération nécessitant de nouvelles fonctionnalités : libérer l'utilisateur de contraintes de charge et offrir une plus grande durée d'utilisation, garantir l'inviolabilité des informations, « *récolter* » l'énergie disponible dans l'environnement local et constituer ainsi une source d'énergie isolée et autonome, permettre l'implantation dans le corps humain et, pour de longues durées, de dispositifs biocompatibles, etc.

Pour relever ces défis, le recours aux sources d'énergie miniatures, systèmes de récupération, de stockage et de conversion de l'énergie, est indispensable. La plupart du temps, leur élaboration est basée sur des procédés proches de ceux employés en microélectronique.

Mais il reste encore un certain nombre de ruptures technologiques dont il faut s'affranchir. Ces dernières impliquent le recours à de nouveaux matériaux et procédés permettant d'améliorer les performances. Enfin, l'optimisation du rendement énergétique complet nécessite souvent d'hybrider plusieurs sources d'énergie différentes (système de récupération associé à un système de stockage de l'énergie).

Une compétition mondiale, des opportunités pour l'Europe

Cette course à l'innovation fait intervenir plusieurs organismes de recherche et industriels de par le monde. De nombreux industriels (Samsung, Toshiba, Sony, Motorola, Siemens,) sont en tête de la course, et un grand nombre de start-ups ont été créées aux États-Unis.

En France, depuis plus de cinq ans, fort de ses compétences dans le domaine de l'énergie et des nanotechnologies, le CEA-Liten associé à des partenaires industriels a su, dans beaucoup de domaines, anticiper les besoins émergents (piles à combustible miniatures, micro- et mini-accumulateurs, micro-dispositifs de récupération d'énergie...), et fonder ses développements sur une capacité permanente d'innovation et de rupture.

Un laboratoire commun avec STMicroelectronics

Pour relever ces défis technologiques et industriels, le CEA-Liten et STMicroelectronics, ont mis en place en 2007 un laboratoire commun. Son objectif : mener des recherches visant les micro piles à combustible spécialement conçues pour les téléphones cellulaires pouvant être rechargées

à tout moment, les micro-batteries à couches minces destinées aux applications telles que les « *étiquettes intelligentes* » appelées à remplacer les actuels codes-barres, ainsi que les étiquettes d'identification en fréquences radio (RFID). Ces micro-batteries à faible épaisseur ouvriront par ailleurs de nouvelles opportunités dans des domaines tels que les implants médicaux où il est difficile, voire impossible de remplacer ou de recharger des batteries classiques.

D'autres technologies prometteuses destinées à la récupération et à la conversion de l'énergie sont étudiées, parmi lesquelles les techniques de thermoélectricité et de conversions mécaniques qui permettent notamment de convertir un mouvement physique en puissance électrique, toujours dans l'optique des applications de faible puissance.

Ces nouvelles technologies, dont plusieurs bénéficient de l'expertise de STMicroelectronics dans le domaine de la fabrication en utilisant des couches de matériaux extrêmement fines, devraient assurer de nombreux avantages en termes de coûts, de taille et de poids tout en permettant de créer des solutions plus respectueuses de l'environnement.

Accumulateurs, piles et batteries : état des lieux

Les accumulateurs et les piles sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie. Ceux-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en watt/heure (Wh), l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques. Ces réactions sont activées au sein d'une cellule élémentaire entre deux électrodes baignant dans un électrolyte lorsqu'une charge, un moteur électrique par exemple, est branchée à ses bornes. L'accumulateur est basé sur un système électrochimique réversible. Il est rechargeable par opposition à une pile qui ne l'est pas. Le terme batterie est alors utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires (en général rechargeables).

Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par trois grandeurs. Sa densité d'énergie massique (ou volumique), en wattheure par kilogramme, Wh/kg (ou en wattheure par litre, Wh/l), correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) d'accumulateur. Sa densité de puissance massique, en watt par kilogramme (W/kg), représente la puissance (énergie électrique fournie par unité de temps) que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur. Sa cyclabilité, exprimée en nombre de cycles, caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer un niveau d'énergie supérieur à 80 % de son énergie nominale, cette valeur étant la valeur la plus souvent demandée pour les applications portables.

Jusqu'à la fin des années 80, les deux principales technologies répandues sur le marché étaient les accumulateurs au plomb (pour le démarrage des véhicules, l'alimentation de secours de centraux téléphoniques...) et les accumulateurs nickel-cadmium (outillage portable, jouets, éclairage de secours...). La technologie au plomb, connue sous le nom de batterie au plomb, est également qualifiée de système au plomb-acide. Les réactions chimiques mises en jeu impliquent l'oxyde de plomb constituant l'électrode positive et le plomb de l'électrode négative, toutes deux plongées dans une solution d'acide sulfurique qui constitue l'électrolyte. Ces réactions tendent à convertir le plomb et l'oxyde de plomb en sulfate de plomb, avec formation d'eau. Pour recharger la batterie, ces réactions doivent être inversées par la circulation d'un courant électrique imposé. Les inconvénients relevés sur la technologie au plomb (poids, fragilité, utilisation d'un liquide corrosif) ont conduit au développement d'accumulateurs alcalins, de plus grande capacité (quantité d'électricité restituée à la décharge) mais développant une force électromotrice moindre (différence de potentiel aux bornes du système en circuit ouvert). Leurs électrodes sont soit à base de nickel et de cadmium, soit à base d'oxyde de nickel et de zinc, soit à base d'oxyde d'argent couplé à du zinc, du cadmium ou du fer. Toutes ces technologies utilisent une solution de potasse comme électrolyte. Les technologies au plomb, comme les accumulateurs alcalins, se caractérisent par une grande fiabilité, mais leurs densité d'énergie massique restent relativement faibles (30 Wh/kg pour le plomb, 50 Wh/kg pour le nickel-cadmium).

Au début des années 90, avec la croissance du marché des équipements portables, deux filières technologiques nouvelles ont émergé : les accumulateurs nickel-métal hydrure et les accumulateurs au lithium. La première filière, mettant en jeu une électrode positive à base de nickel et une électrode négative – constituée d'un alliage absorbant l'hydrogène – plongeant dans une solution de potasse concentrée, a permis d'atteindre une densité d'énergie massique de 70 à 80 Wh/kg. La seconde filière avait déjà fait l'objet

de travaux vers la fin des années 70, dans la perspective de trouver des couples électrochimiques présentant de meilleures performances que les accumulateurs au plomb ou au nickel-cadmium employés jusque-là. Les premiers modèles ont ainsi été conçus avec une électrode négative à base de lithium métallique (filière lithium-métal). Cependant, cette technologie s'est heurtée à des problèmes liés à une mauvaise reconstitution de l'électrode négative de lithium au cours des charges successives. C'est pourquoi, vers le début des années 80, des recherches ont été entreprises sur un nouveau type d'électrode négative à base de carbone utilisé comme composé d'insertion du lithium. La filière lithium-ion était née. Les industriels japonais se sont rapidement imposés en tant que leaders dans le domaine. Déjà fabricants d'équipements portables, ils ont considéré la source d'énergie comme faisant partie des composants stratégiques de ces équipements. C'est ainsi que Sony, qui n'était pas à l'origine fabricant d'accumulateurs, a décidé de mobiliser au cours des années 80 des ressources considérables afin de faire progresser la technologie et de la rendre industrialisable. En février 1992, Sony annonçait, à la surprise générale, le lancement immédiat de la fabrication industrielle d'accumulateurs lithium-ion. Ces premiers accumulateurs offraient des performances limitées (90 Wh/kg). Depuis, celles-ci se sont notablement améliorées (de 160 à plus de 180 Wh/kg en 2004), grâce, d'une part, aux progrès technologiques réalisés (diminution de la part inutile dans le poids et le volume des accumulateurs) et, d'autre part, à l'optimisation des performances des matériaux. Des densités d'énergie massiques de plus de 500 Wh/kg sont escomptées dans les années à venir.

Les micropiles à combustible : une nouvelle génération de microgénérateurs électrochimiques

Le principe de la micropile à combustible (micropac) ne repose pas sur la simple réduction de taille d'une pile à combustible classique, mais sur une véritable rupture technologique basée sur l'emploi des procédés de type couches minces¹. Depuis 2001, le CEA-Liten développe une filière micropile à combustible pour alimenter en énergie les appareils nomades et communicants. L'exploitation simultanée des compétences en électrochimie et en microtechnologie a permis de mettre au point cette technologie à partir de plaquettes de silicium sur lesquelles sont élaborées des « puces » de pile à combustible. Le dispositif de stockage d'énergie est une cartouche jetable capable d'émettre de l'hydrogène gazeux en fonction de la demande.

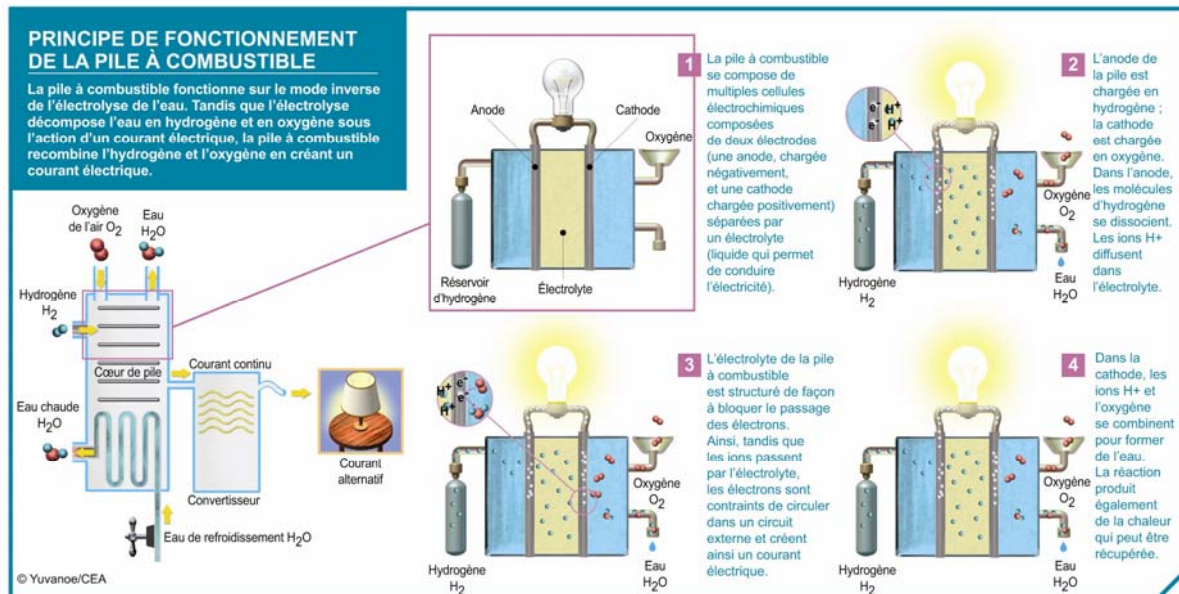
Ces micropiles, d'une puissance allant de quelques milliwatts à 10 watts, associées à une cartouche de combustible peuvent fonctionner deux à trois fois plus longtemps qu'une batterie au lithium. En effet, la densité d'énergie massique accessible est voisine aujourd'hui d'une batterie lithium ion et sera dans un futur proche de 500 Wh/kg contre 200Wh/kg. Dans le cas de terminaux sans fil, des systèmes hybrides micropac/batteries au lithium sont nécessaires, la batterie lithium assurant les pics de puissance et la micropac, l'autonomie.

Une nouvelle génération de microgénérateurs électrochimiques

Le développement des équipements électroniques portables pose de manière cruciale le problème de la fourniture d'énergie. L'évolution prévisible des fonctionnalités et des usages des appareils électroniques portables ainsi que l'introduction de composants électroniques nouveaux augmentent considérablement les besoins en termes de puissance consommée et d'autonomie. De nombreuses recherches s'orientent à la fois vers l'optimisation des composants et la mise au point de sources d'énergie miniatures alternatives aux accumulateurs Li-ion actuels, dont les progrès sont par ailleurs constants. Dans ce contexte, la pile à combustible miniature apparaît comme une solution attractive, car elle constitue une réelle rupture technologique qui pourrait profiter à l'Europe et notamment à l'industrie de la micro-électronique jusque là absente des sources d'énergie électrochimiques.

¹ Une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposée sur un autre matériau, appelé « substrat ». Le but de la couche mince est de donner des propriétés particulières à la surface de la pièce tout en bénéficiant des propriétés massives du substrat.

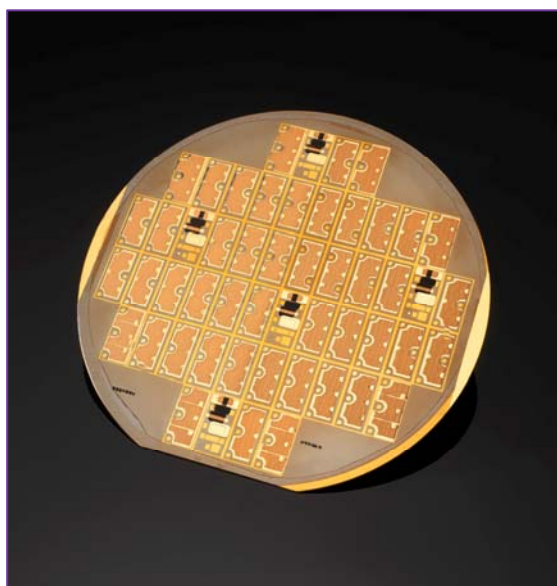
Comment fonctionne une pile à combustible ?



La pile à combustible repose sur un principe fort ancien, puisque c'est en 1839 que Sir William Grove construisit la première cellule électrochimique fonctionnant avec de l'hydrogène comme carburant, mettant ainsi en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du combustible. La pile à combustible ayant la particularité d'utiliser deux gaz – l'hydrogène H₂ et l'oxygène O₂ – comme couple électrochimique, les réactions d'oxydo-réduction (à l'origine de l'échange des électrons qui produit le courant électrique) qui s'opèrent dans la pile sont particulièrement simples. La réaction se produit au sein d'une structure (la cellule électro-chimique élémentaire) essentiellement composée de deux électrodes (l'anode² et la cathode³) séparées par un électrolyte, matériau permettant le passage des ions (atomes chargés positivement ou négativement). Les électrodes mettent en jeu des catalyseurs (qui accélèrent les réactions) pour activer d'un côté, la réaction d'oxydation (perte d'électrons) de l'hydrogène, et de l'autre côté, la réaction de réduction (gain d'électrons) de l'oxygène. Dans le cas d'une pile à électrolyte acide (ou pile à membrane échangeuse de protons), l'hydrogène de l'anode est dissocié en protons (ou ions hydrogène H⁺) et en électrons, suivant la réaction d'oxydation : $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$. À la cathode, l'oxygène, les électrons et les protons se recombinaient pour former de l'eau : $2 H^+ + \frac{1}{2} O_2 + 2 e^- \rightarrow H_2O$. La tension thermodynamique d'une telle cellule électrochimique est de 1,23 volt (V). Toutefois, en pratique, la pile présente une différence de potentiel de l'ordre de 0,6 V pour des densités de courant de 0,6 à 0,8 A/cm². Le rendement d'une telle cellule est donc d'environ 50 %, l'énergie dissipée l'étant sous forme de chaleur.

² L'anode correspond au pôle négatif de la pile où a lieu la réaction d'oxydation menant à la production d'électrons à l'origine du courant électrique.

³ La cathode est une électrode siège d'une réduction (consommation d'électrons). Elle correspond à la borne positive (+) dans une pile électrique.



Micropiles « gravées » sur plaquette de silicium
© Artechnique/CEA

Deux filières à l'étude

Une pile à combustible est un générateur électrique qui, en présence de différents combustibles (hydrogène, alcool, ...) et d'oxygène, réalise la transformation directe de l'énergie chimique en énergie électrique. Actuellement, deux filières sont principalement étudiées dans le monde pour les applications portables de faible énergie : les piles PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) et DMFC (Direct Methanol Fuel Cell).

Technologies	Réactions mises en jeu	Caractéristiques micropac		Caractéristiques combustible	
		Densité d'énergie	Surface pile pour 1W	combustible	Volume pour 15W.h
DMFC (Methanol)	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{e}^- + 6\text{H}^+$	20mW/cm ²	50 cm ²	Eau + méthanol	60 cm ³ + 15 cm ³
PEMFC (hydrogène)	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	200mW/cm ²	5 cm ²	NaBH ₄ + H ₂ O	7 cm ³ + 7cm ³

Comparaison des combustibles : méthanol et hydrogène à partir de Borohydrures

Ces deux types de pile à combustible diffèrent essentiellement par le combustible employé à l'anode, qui est de l'hydrogène pour les PEMFC et du méthanol liquide pour les DMFC. La problématique des piles à combustible miniatures s'articule autour de deux choix technologiques : la nature du combustible utilisé à l'anode et l'architecture de la pile à combustible.

Le choix du combustible pour l'anode

Ce choix est fondamental. En effet, l'énergie stockée dans une masse donnée de méthanol liquide pur est nettement plus élevée que pour l'hydrogène. Toutefois, la conversion de cette énergie chimique en énergie électrique (efficacité de la pile à combustible) est beaucoup plus aisée dans le cas de l'hydrogène gazeux. La faible efficacité des piles de type méthanol est due d'une part à des problèmes de catalyse⁴ au sein de la pile à combustible, qui ne pourront être surmontés qu'après de nombreuses années de recherches et d'autre part à l'utilisation du méthanol dilué dans les piles. Donc Il faut également noter la nécessité de développer un système susceptible de recycler l'eau formée à la cathode pour éviter d'embarquer de l'eau dans la cartouche, ce qui rendrait caduque cette technologie. Le problème des piles à hydrogène réside plutôt dans le stockage et la production de l'hydrogène à la demande pour des dispositifs miniatures.

Dans le domaine des sources d'énergie miniatures, la plupart des équipes de recherche dans le monde ont décidé de développer la filière DMFC, principalement en raison de l'énergie théoriquement disponible au sein d'une cartouche de méthanol pur. Depuis 2005, pour des raisons technologiques, ces équipes se tournent vers la filière hydrogène ce qui valide à posteriori le choix initial du CEA-Liten.

L'hydrogène utilisé dans les micropiles du CEA-Liten est généré à la demande à partir de l'hydrolyse de borohydure dans une cartouche compacte.



Cartouches génératrices d'hydrogène à la demande
© Artechnique / CEA

⁴La catalyse est l'action d'un catalyseur sur une transformation chimique. Un catalyseur a un rôle unique d'accélération, d'accélération d'une réaction chimique aussi bien dans le sens direct qu'en sens inverse.

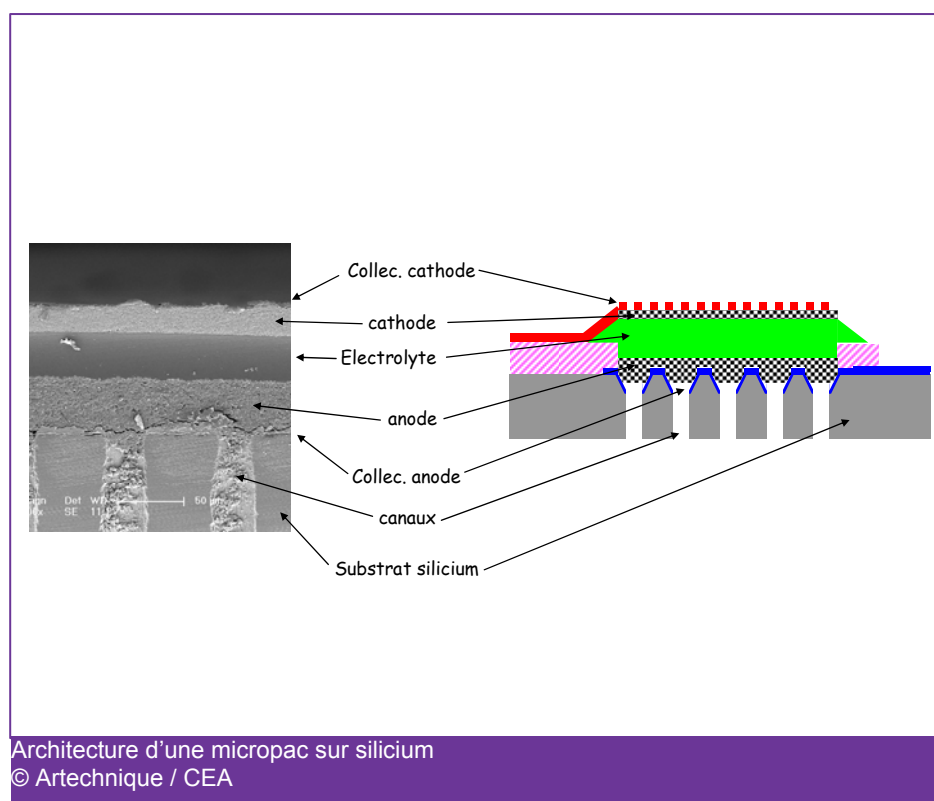
L'architecture de la pile

Outre le choix du combustible, l'architecture de la pile à combustible est un paramètre clé dans le succès et l'émergence de cette technologie.

Le CEA-Liten a opté pour une structure de type couches minces obtenue par des techniques dérivées de la microélectronique.

Il ne s'agit pas simplement d'une réduction d'échelle d'une pile à combustible classique mais plutôt d'une véritable rupture technologique basée sur la mise en œuvre de différents procédés appliqués aux micro et nanotechnologies (sérigraphie⁵, jet d'encre⁶, lithographie⁷). Cette voie permet une miniaturisation poussée inaccessible par une simple réduction d'échelle d'une architecture standard.

Cette technologie, protégée par une vingtaine de brevets, repose sur l'emploi d'un substrat⁸ de silicium sur lequel des piles à combustible, véritables microgénérateurs électriques, sont élaborées. Elle est cohérente avec les outils industriels existants et les objectifs de coût fixés actuellement par la technologie concurrente, les accumulateurs Li-ion, qui demeurent la référence dans le domaine de l'énergie nomade.



⁵ La sérigraphie est une technique d'impression qui utilise des écrans à la manière d'un pochoir interposés entre l'encre et le support. Les supports utilisés peuvent être variés.

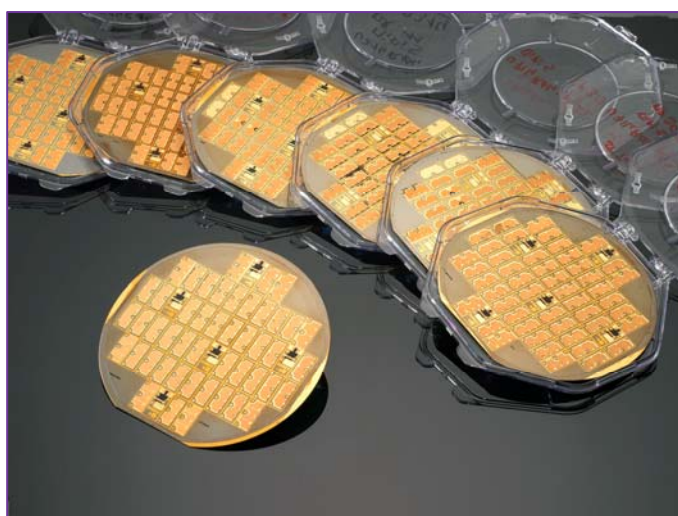
⁶ le jet d'encre est une technique de déposition de micro gouttes par projection de liquide habituellement utilisée en imprimerie. En microélectronique, cette technique est employée pour déposer des quantités précises de produit sur des espaces très localisés.

⁷ La lithographie en microélectronique permet de localiser des ouvertures dans de la résine par insolation à travers un masque et développement dans des bains appropriés

⁸ Un substrat est un support de silicium utilisé en galette ultrafine (ou wafer), sur laquelle sont gravés habituellement les composants de microélectronique.

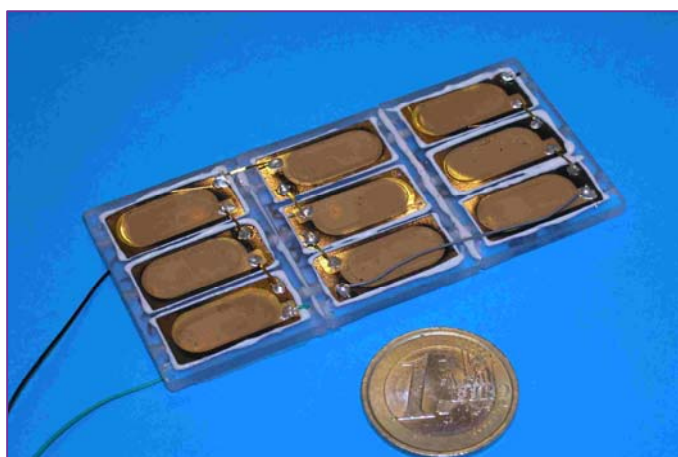
Après une série de tests électrochimiques, les différentes “puces de pile à combustible” fabriquées en grand nombre sur le disque de silicium sont séparées, triées et connectées pour former un véritable générateur électrique fonctionnant avec de l’hydrogène et l’oxygène de l’air. Cette technologie est maintenant bien maîtrisée par les équipes du CEA-Liten. Les performances de la pile alimentée en hydrogène sont voisines des 400 mW/cm^2 avec, le plus souvent, une stabilisation autour de 150 mW/cm^2 sur plusieurs centaines d’heures.

L’équipe s’est fixée comme objectif d’atteindre, sous quatre ans environ, 1 W/cm^2 ; cela signifie qu’il suffira de quelques cm^2 de silicium pour alimenter un téléphone portable d’une puissance de 3 à 5W.



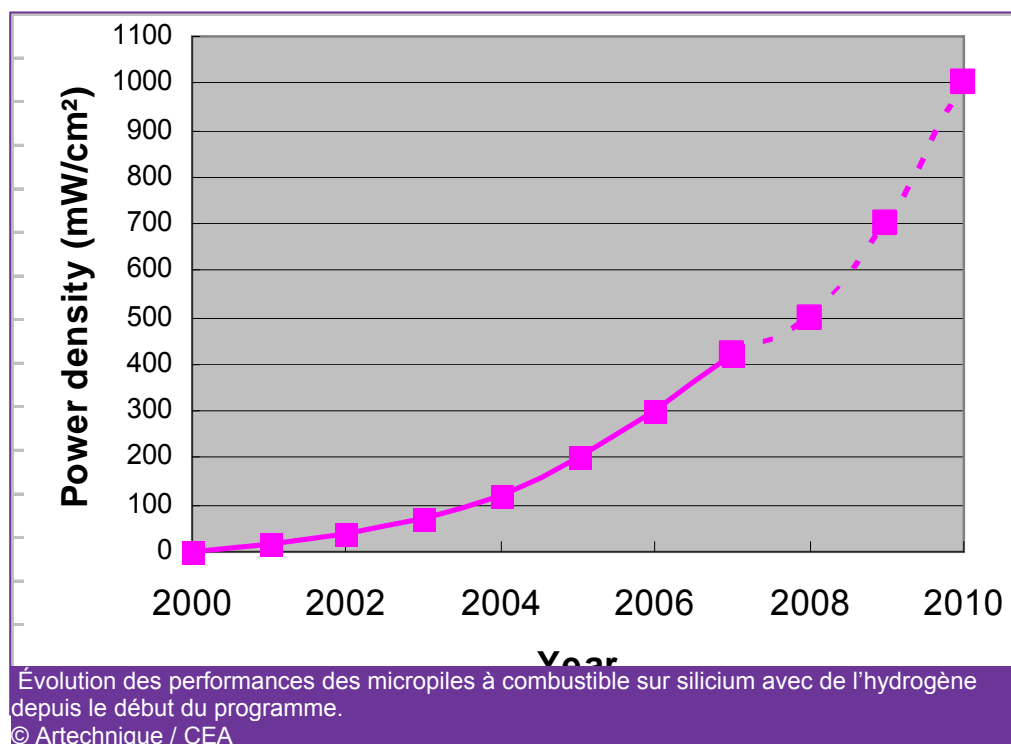
Après une série de tests électrochimiques, les micropiles à combustible sont découpées, triées et intégrées en boîtier pour former des microgénérateurs électriques.

© Artechnique / CEA



Micropiles sur galettes de silicium

© Artechnique / CEA



Parallèlement aux travaux sur le cœur de pile, des progrès récents concernant le dispositif de stockage et la production de l'hydrogène à partir d'hydrure chimique ont été obtenus dans les laboratoires du CEA-Liten. Une cartouche jetable d'une densité d'énergie massique et volumique proche de 500 Wh/kg est en cours de réalisation. Les technologies "*cartouche jetable*" et "*cœur de pile sur silicium*" sont en cours d'assemblage sous la forme de démonstrateurs technologiques.

C'est ainsi que le CEA-Liten et ses partenaires ont mis au point en 2005 une micropile à combustible qui produit, sans alimentation électrique, de l'énergie à la demande pour alimenter des dispositifs électroniques nomades.

Elle comprend d'une part, la partie convertisseur électrochimique qui transforme l'hydrogène et l'oxygène en électricité et d'autre part, un réservoir extérieur de combustibles, de la taille d'un gros briquet jetable. Il est composé d'un solide et d'un liquide, qui, mélangés au goutte à goutte, produisent de l'hydrogène à la demande. Ce dernier est ensuite transformé en électricité dans le cœur en silicium et peut recharger cinq fois la batterie d'un téléphone portable.

La nouveauté est que l'on peut obtenir l'énergie nécessaire à la demande par un contrôle de la réaction chimique. La performance de ce système pile à combustible atteint une puissance voisine de 500Wh/l. Elle devrait permettre d'avoir une grande autonomie (5 fois celle d'une batterie classique). Sans branchement au réseau électrique, fonctionnant à température et pression atmosphérique ambiantes, cette micropile est promise à un bel avenir.

Vingt chercheurs ont travaillé sur le projet, et une vingtaine de brevets ont été déposés. La micropile, qui pourrait être vendue à partir de 2010, aura une autonomie cinq fois supérieure aux batteries actuelles et ne polluera pas. Ses applications concernent l'alimentation des téléphones ou ordinateurs portables. Cette micropile a fait l'objet d'un travail d'industrialisation pour une future commercialisation par la société STMicroElectronics.



Téléphone chargé par une micropile
© Artechnique / CEA

Des partenariats industriels d'envergure

Dans le cadre de la création du laboratoire commun avec STMicroelectronics, l'équipe de chercheurs travaille sur différents projets, notamment la filière des micropiles à combustible.

Ainsi, la filière de fabrication par jet d'encre (technologie qui permet de diviser par 10 le coût de fabrication) est en cours de transfert vers le site STMicroelectronics de Tours. Il s'agit d'élaborer la totalité du cœur de pile à combustible en voie liquide afin d'éviter les procédés sous vide plus onéreux.

Ce transfert est l'occasion également de porter la taille des substrats employés au format 6 pouces (150 mm) utilisé par l'industriel alors que celui du laboratoire est de 4 pouces (100 mm). De même, la densité de puissance du cœur de pile à combustible passe de 300 à 400 mW/cm² à température ambiante, soit environ 15 W pour un seul substrat d'une cinquantaine de puces à combustible.

STMicroelectronics disposera avec cette filière en cours d'industrialisation d'une forte avance sur ses concurrents, dont beaucoup fabriquent des piles assemblées en stacks pour leurs démonstrateurs. La technologie transférée permet de construire des assemblages de micropiles de plus de 2 W, soit la puissance requise pour la charge d'un téléphone portable.

En parallèle, le CEA-Liten continue sa collaboration avec un partenaire industriel pour la mise au point de la cartouche d'hydrogène jetable. L'objectif est de réaliser une cartouche de densité d'énergie voisine de 500 Wh/kg avec une micropile à combustible de 800mW/cm².

Enfin Nokia a confirmé lors du salon Semicon West 2006 son intérêt pour la micropile à combustible du CEA-Liten, et présenté sa stratégie de collaboration, dans laquelle le CEA serait fournisseur de technologie amont.

Les batteries : des performances en constante amélioration

Face au développement des produits électroniques de grande consommation commercialisés avec des sources autonomes d'énergie comme les caméras, les téléphones, les ordinateurs portables..., la production d'éléments d'accumulateurs (qui stockent l'énergie dans la batterie) est de l'ordre de 5 milliards d'unités par an dans le monde. Le marché n'est maintenant plus dominé par les batteries nickel-cadmium, mais par les batteries lithium-ion qui connaissent des débouchés de plus en plus prometteurs.

Nouvelles voies dans les batteries au lithium

Dans la foulée du développement considérable des accumulateurs au lithium qui a accompagné celui des appareils portables, les chercheurs du CEA-Liten développent avec leurs partenaires industriels et universitaires des technologies originales à bas coût et travaillent sur de nouvelles familles d'électrolytes⁹ pour les batteries.

Entre 1990 et 1995, principalement sous l'impulsion des constructeurs japonais d'équipements portables (caméscopes, ordinateurs, téléphonie mobile naissante...), deux nouvelles filières de stockage de l'électricité ont émergé, en rupture par rapport aux technologies traditionnelles. Le développement des accumulateurs nickel-métal hydrure dans un premier temps, puis celui des accumulateurs au lithium ont complètement bouleversé la donne initiale, et pris de surprise la plupart des constructeurs traditionnels.

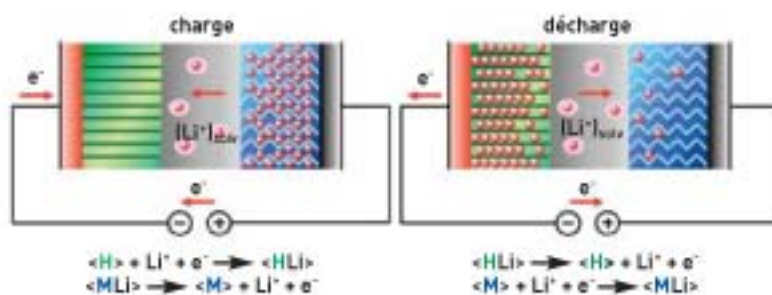


Démonstrateur fabriqué au laboratoire illustrant, au moyen d'une borne avec lecteur de tension, les possibilités offertes par l'énergie embarquée à l'intérieur de la carte.

© Artechnique/ CEA

⁹ Milieu liquide ou solide permettant la conduction ionique (un ion est un atome chargé positivement ou négativement qui a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons)

Principe de fonctionnement d'un accumulateur au lithium



En cours d'utilisation, donc lors de la décharge de l'accumulateur, le lithium relâché par l'électrode négative (matériau d'intercalation hôte symbolisé par $\langle H \rangle$) sous forme ionique Li^+ migre à travers l'électrolyte conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive (composé d'insertion du lithium de type oxyde métallique $\langle MLi \rangle$). Le passage de chaque ion Li^+ dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un électron dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique. La densité d'énergie massique (rapportée à la masse) libérée par ces réactions est à la fois proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux électrodes et à la quantité de lithium qui se sera intercalée dans le matériau d'insertion. Elle est également inversement proportionnelle à la masse totale du système. Le lithium est le matériau le plus léger et le plus réducteur (qui cède des électrons) : les systèmes électrochimiques qui l'emploient peuvent atteindre des tensions de 4V, contre 1,5 V pour les autres systèmes. Il permet ainsi aux batteries au lithium d'offrir les plus importantes densités d'énergie massique et volumique (typiquement plus de 160 Wh/kg et 400 Wh/l), supérieures en moyenne de plus de 50 % à celles des batteries conventionnelles.

Un marché dominé par les asiatiques

L'évolution de ces technologies, et essentiellement de la seconde, a de surcroît bénéficié vers le milieu des années 90 de l'expansion soudaine et considérable du marché de la téléphonie mobile (+ 1 % par mois en 2000, 70 % de taux de pénétration en Europe en 2003 contre quelques % en 1996, pour la téléphonie mobile notamment ce taux approche les 100% actuellement). C'est ainsi que le marché des accumulateurs au lithium a dépassé 7 milliards d'euros en 2007 et que les constructeurs japonais (Sony, Sanyo, Matsushita) et coréens (LG, Samsung) se partagent la part du lion (70 %) d'un marché désormais dominé à plus de 95 % par les industriels asiatiques (Japon, Corée et Chine). Au détriment des européens mais également des américains, pratiquement absents du marché principal que représente l'alimentation en énergie des équipements portables. Les fabricants chinois de batteries (ATL, BAK, BYD, GoldPeak etc.) visent actuellement les premières places mondiales.

Deux solutions innovantes pour les matériaux d'électrode

Les accumulateurs lithium-ion actuels, dont le matériau d'électrode positive est de l'oxyde de cobalt, sont, de loin, ceux qui présentent les meilleures performances en termes de densité d'énergie massique et volumique, respectivement 160 à 200 Wh/kg et près de 500 Wh/l.

Cependant, les cahiers des charges en matière de stockage de l'énergie dans une optique de développement durable impliquent un coût très faible pour la batterie, au maximum 100 à 200 €/kWh, valeurs qui restent encore inférieures aux prix actuels des systèmes Li-ion : au minimum 250 €/kWh dans le cas d'accumulateurs chinois.

	Pb (plomb)	Ni-Cd (nickel-cadmium)	Ni-MH (nickel métal hydrure)	Li-ion
densité d'énergie massique (Wh/kg)	30	30-50	70-80	160-200
temps de charge (minutes)	300-600	180-300	180-300	90-120

Densités d'énergie massique et temps de charge comparés des principales familles d'accumulateurs
© Artechnique / CEA

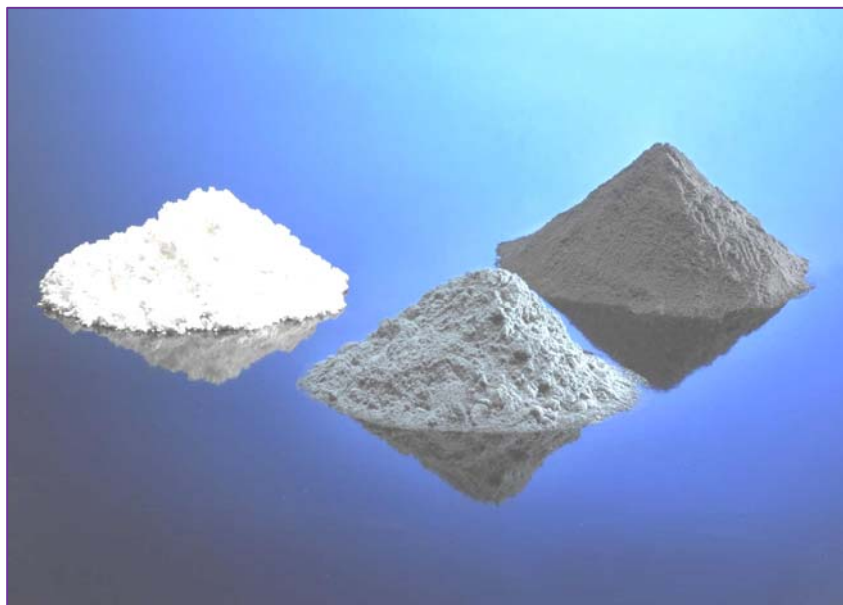
Le CEA-Liten a déposé plusieurs brevets concernant le développement de nouveaux matériaux bas coûts tels que le phosphate de fer et l'oxyde de titane. Il peut ainsi proposer de nouvelles générations d'accumulateurs lithium-ion bas coût à forte sécurité intrinsèque, l'une à forte densité d'énergie et l'autre à forte puissance. Il faut également noter que les choix effectués par le CEA-Liten visent à économiser les matières premières en développant des concepts basés sur l'usage de nanomatériaux.

Le phosphate de fer : un matériau plus sûr et moins cher

Le coût matière d'un accumulateur Li-ion (environ 80 % du coût de la batterie) est affecté à 25 % par le coût de l'oxyde de cobalt (LiCoO_2 , matériau à l'électrode positive de l'accumulateur) et à 25 % par les organes de sécurité rendus notamment nécessaires par la forte réactivité à haute température de ce composé. Grâce à l'utilisation du phosphate de fer, c'est une réduction divisant par 2 le coût du kWh, qui peut être réalisée dans les nouvelles générations d'accumulateurs, en raison d'une part, de son coût objectif (1/3 de celui du cobalt), et d'autre part de la suppression des organes de sécurité du fait de sa grande stabilité chimique et électrochimique.

Mais le principal verrou concernant cette famille de composés est la faible conductivité électronique, rendant difficile son utilisation en batterie. En optimisant sa composition et le procédé de fabrication, le CEA-Liten a réussi à stabiliser les performances du phosphate de fer à température ambiante (165 mAh/g à 23°C à comparer à la référence LiCoO_2 à 150 mAh/g).

Le CEA-Liten suit une feuille de route pour amener les accumulateurs Li-ion au-delà de 300 Wh/kg (doublement de la capacité actuelle) en exploitant des matériaux d'électrodes nanostructurés notamment à base de silicium. Les premiers prototypes seront testés au cours de l'année 2008.



Développement de nouveaux matériaux positifs et négatifs au sein du laboratoire (haute puissance et haute densité)
© Artechnique / CEA

L'oxyde de titane pour des recharges plus rapides

Le CEA-Liten, propose l'introduction d'un oxyde de titane à l'électrode négative en remplacement du graphite pour permettre des charges rapides complètes en quelques minutes. Les derniers résultats illustrent la stabilité de l'accumulateur soumis à 2000 cycles charge rapide (70 % de la capacité chargée en 3 minutes) – décharge rapide (2 minutes). Les développements d'accumulateurs de puissance s'appuient également sur une modélisation de leur fonctionnement. Dans ce cadre, le logiciel de calcul Modal a été mis au point et permet, d'ores et déjà de prédire le comportement des nouvelles générations d'accumulateurs en fonction de paramètres tels que les épaisseurs d'électrodes ou la concentration de l'électrolyte. Des prototypes de capacité comprise entre 1 et 5 Ah sont réalisés pour chaque filière technologique. Les applications visées se situent dans le médical, l'outillage portable, les cartes à puce et les applications militaires ou spatiales.

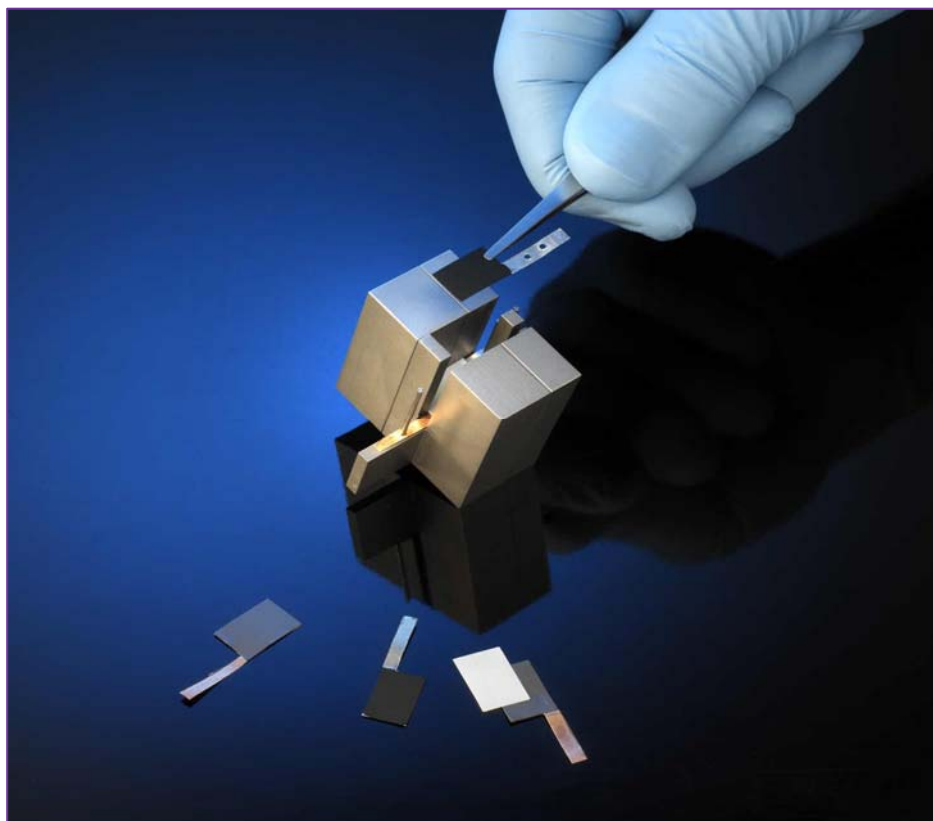
Le premier accumulateur basé sur le couple phosphate de fer / oxyde de titane tolérant une charge de 80 % de sa capacité en 6 minutes a été réalisé par le CEA-Liten, qui développe par ailleurs un nouvel électrolyte polymère favorisant les performances en puissance et permettant un gain de 30 % par rapport aux électrolytes commerciaux actuels. L'ensemble de ces développements sur la technologie Li-ion a permis le dépôt d'une dizaine de brevets en un an.

Minibatteries : des développements prometteurs dans le domaine médical

Dans le cadre de plusieurs projets associant de grands groupes industriels, le CEA-Liten est en mesure de proposer des innovations majeures, notamment dans les domaines du papier et du textile instrumentés ou des implants médicaux. Ces dernières offrent des perspectives de développement très intéressantes à court et moyen terme (multiplier par deux la densité d'énergie d'ici 7 à 10 ans, en passant à 250 Wh/kg puis près de 320 W/kg). La plus spectaculaire de ces futures applications concerne l'alimentation d'implants auditifs et de stimulateurs musculaires, dotés de batteries lithium ion miniatures. Fonctionnant à 37 °C, cette batterie répond aux spécifications de fabricants d'implants tels que Cochlear et Finetech Medical, parmi lesquelles une taille miniature (5x10x22 mm³), une capacité de 50 mAh, une durée de vie supérieure à 10 ans et une parfaite étanchéité.

Dans ce projet, le CEA-Liten a apporté tout son savoir-faire dans le domaine de l'architecture de la batterie qui aboutit à une miniaturisation. Il est parvenu à une batterie de taille 10 fois moindre (1cm³) que celle d'une batterie pour téléphone portable. Cette batterie, capable d'endurer 4000 cycles est à comparer avec les 500 cycles d'une batterie d'un téléphone portable dont la durée de vie est de deux ans.

Au-delà de ce projet, le CEA-Liten se positionne également comme un centre d'excellence pour le développement de technologies de stockage de l'énergie à façon, c'est-à-dire avec des spécifications différentes des accumulateurs produits en grandes série.



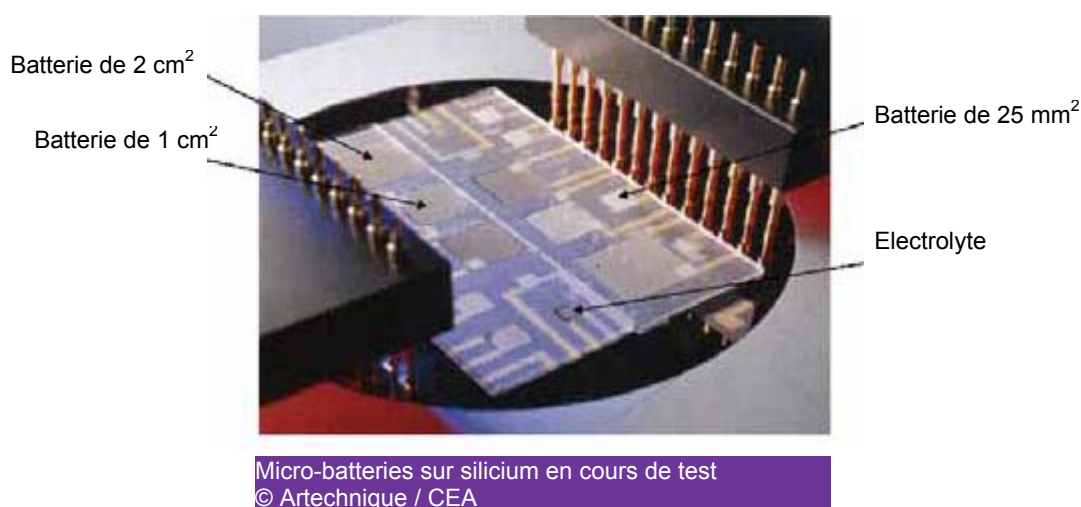
Prototype de batteries lithium ion pour applications médicales
© Artechnique / CEA

Des micro-batteries pour alimenter les capteurs autonomes

Un partenariat clé pour le développement de micro-batteries

Le CEA-Liten et STMicroelectronics ont créé un laboratoire commun pour le développement des micro-batteries. L'objectif consiste à insérer une micro-batterie dans un circuit intégré avec de faibles coûts de fabrication.

Les premières réalisations de micros batteries sur *wafer silicium*¹⁰ ont atteint les performances attendues de 100 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$ sous 2 à 2,5V. Les développements actuels consistent à fiabiliser la fabrication semi-industrielle avec un taux de rebut (nombre de puces inutilisables) le plus faible possible et d'augmenter les performances d'un facteur 2 à 3.



Cette micro-batterie, de très faible épaisseur (de l'ordre de 10 μm), entièrement solide, a été obtenue en déposant chacune des couches nécessaires à son fonctionnement par des procédés de dépôt physique en vapeur, une technique largement utilisée en microélectronique.

Il est également envisageable de coupler cette micro-batterie avec des systèmes de récupération d'énergie. En stockant l'énergie, la micro-batterie permettra la réalisation de systèmes complets autonomes et de longue durée. Enfin, les micros-batteries en série devraient régler les problèmes liés à l'introduction d'interrupteurs nécessitant des hautes tensions.

Dans le cadre du laboratoire commun avec STMicroelectronics, l'équipe de chercheurs travaille sur des prototypes de micro-batteries à couches minces destinées aux applications telles que les « *étiquettes intelligentes* ».

¹⁰ *wafer silicium* : tranche très fine de silicium, sur laquelle sont gravés collectivement des circuits électroniques, puis qui est découpée, afin d'obtenir des circuits intégrés (processeurs, microsystèmes ou capteurs, en particulier des systèmes photovoltaïques).

La thermoélectricité : récupérer l'énergie thermique là où elle est disponible

La thermoélectricité, dont les effets ont été découverts dans la première moitié du XIX^{ème} siècle fait désormais l'objet de nombreux travaux. Il s'agit, ni plus ni moins, que de créer de l'électricité à partir d'une source de chaleur disponible aux dimensions des objets suivant les applications visées : comme par exemple des capteurs placés sur des tissus dont la source de chaleur provient du corps humain ou des applications automobiles via les sources de chaleur disponibles (échangeurs, pot d'échappement,...). Demain, par exemple, la chaleur du corps humain pourrait être utilisée pour fournir l'énergie électrique nécessaire pour alimenter des capteurs contenus dans des vêtements élaborés avec des matériaux thermoélectriques. Au CEA-Liten, cette technologie est à l'étude depuis 2003 pour des applications autour de l'alimentation en énergie des objets électroniques nomades. Par ce concept, il est possible soit de produire de l'énergie électrique par récupération d'énergie thermique (effet Seebeck) ou de refroidir des composants (effet Peltier) en exploitant une source d'énergie électrique. Cette technologie permet de récupérer de l'énergie dans l'environnement et donc d'augmenter l'autonomie.

Par ailleurs, ces composants peuvent être également associés à des micro systèmes de stockage : les micro-batteries pour récupérer de l'énergie et la stocker pour être employée au meilleur moment.

Toutes ces technologies sont basées sur l'usage de nanomatériaux (nanocomposants, nanotubes de carbone, nanofils, nanoparticules) pour des applications dans les sources d'énergie miniatures.

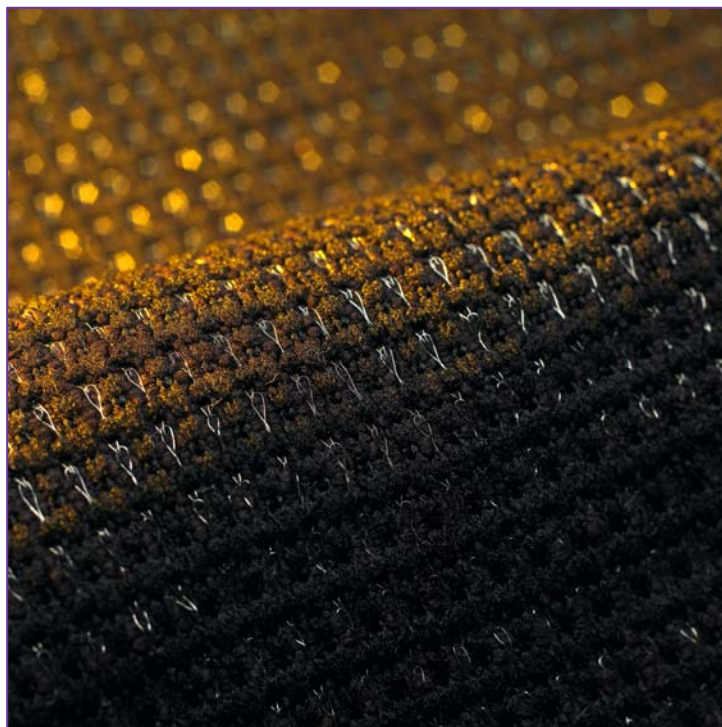
Le principe

Soumis à un gradient thermique¹¹, certains matériaux dits « *thermoélectriques* » produisent une force électromotrice¹². C'est l'effet Seebeck, du nom du physicien allemand, Thomas Johann Seebeck, qui l'a découvert en 1821. Inversement, parcourus par un courant électrique, les mêmes matériaux développent un gradient thermique : une face se refroidit alors légèrement, pendant que l'autre se réchauffe. Appelé « *effet Peltier* » (du nom de son découvreur, le physicien Jean Peltier), ce phénomène physique peut être exploité pour élaborer des micros systèmes de refroidissement.

Si ces effets thermoélectriques permettant d'envisager des applications extrêmement prometteuses, la complexité de leur mise en œuvre a conduit les industriels à ignorer cette technologie durant de nombreuses décennies. Ce n'est que tout récemment qu'ont été relancées les recherches autour de la thermoélectricité, notamment avec l'introduction de nouveaux matériaux, en particulier en exploitant le potentiel des nanomatériaux.

¹¹ Variation de température de l'air

¹² Lorsque le flux du champ magnétique qui traverse un circuit conducteur varie au cours du temps, il apparaît dans ce circuit une tension. La tension ainsi créée est orientée de façon à générer des courants s'opposant à la variation du flux. On dit donc qu'elle s'oppose à la variation du flux. Cette tension est appelée force électromotrice.



Tissu thermoélectrique
© Artechnique / CEA

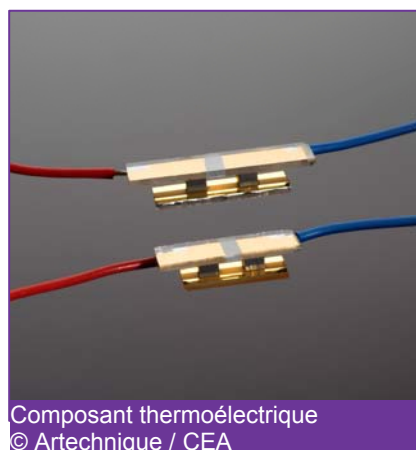
Les ruptures technologiques nécessaires

Les perspectives d'applications que permet d'envisager la thermoélectricité impliquent pour les chercheurs de franchir une première étape consistant à développer de nouveaux matériaux présentant des performances « *thermoélectriques* » plus élevées c'est-à-dire d'améliorer la capacité à produire un courant électrique à partir d'un gradient thermique donné. Pour cela, il faut faire évoluer trois propriétés physiques du matériau de façon antinomique.

La résistivité électrique doit être faible pour faciliter le transport des électrons. Mais la conductivité thermique doit aussi être la plus faible possible pour ne pas altérer la différence de température d'un bout à l'autre du matériau.

Les métaux purs ont, par exemple, une très faible résistivité électrique, une conductivité thermique élevée donc une performance thermoélectrique (figure de mérite, ZT) faible (inférieur à 1).

Les matériaux adaptés ($ZT > 1$) doivent présenter des conductivités électriques élevées et une conductivité thermique faible. Au début des années 2000, des travaux théoriques ont montré que la voie des matériaux composites ou des nanomatériaux structurés en couches minces permettait d'obtenir des ZT de l'ordre de 2, 3 voire 4. Dans le même temps, des résultats expérimentaux ont permis d'obtenir des matériaux dont le ZT se situait autour de 1.5 à 2, d'où tout un éventail d'applications diverses. C'est sur cette voie que le CEA-Liten se concentre depuis plusieurs années en exploitant tout le potentiel des nanotechnologies.



Des acteurs mondiaux comme dans tous les domaines aujourd'hui

En matière de recherche sur les matériaux thermoélectriques, les États-Unis font la course en tête. Les travaux qui sont menés ont déjà permis de développer des nanomatériaux dont le ZT est supérieur à 1.

Le Japon, tout comme les États-Unis, semble avoir pris de l'avance dans cette course engagée autour de la thermoélectricité. Des actions significatives en matière de recherche dans le domaine des matériaux et de l'optimisation de leurs propriétés thermoélectriques sont soutenues par de grands groupes industriels nippons. Le groupe Seiko a été le premier à commercialiser, dès 1998, une montre équipée d'un module thermoélectrique en tellure de bismuth.

En Europe, c'est principalement en Allemagne qu'ont été menées jusqu'à présent les actions importantes en matière de R&D dans le domaine de la thermoélectricité, en particulier au sein des instituts Fraunhofer. Cette activité a conduit à la création de plusieurs start-ups, la plus connue étant Micropelt. Celle-ci propose des matériaux thermoélectriques à base de tellure de bismuth qui seront intégrés en utilisant une technologie de type MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems)¹³.

Les nanomatériaux : une voie prometteuse pour l'innovation

En France, jusqu'à il y a quelques années, malgré de fortes compétences dans le domaine des matériaux, il subsistait un vide entre le matériau et le produit industriel.

Depuis quatre ans, le CEA-Liten, fort de ses connaissances sur les nanomatériaux, relève ce défi en misant sur les matériaux nanostructurés qui présentent des propriétés très intéressantes en thermoélectricité. Les chercheurs du CEA-Liten procèdent à l'empilement successif de nanofils ou nanocouches de silicium ou silicium/germanium afin d'exploiter les phénomènes quantiques. En jouant sur ces phénomènes, il est alors possible de dissocier les propriétés de conductivité thermique et les propriétés électriques. Cela constitue une véritable rupture par rapport aux matériaux thermoélectriques traditionnels qui permettra d'accroître significativement le ZT,

¹³ Un MEMS est un microsystème comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques, utilisant l'électricité comme source d'énergie, en vue de réaliser une fonction de capteur et/ou d'actionneur avec au moins une structure présentant des dimensions micrométriques, et que la fonction du système est en partie assurée par la forme de cette structure.

Issus de la technologie de la micro-électronique, les MEMS font appel pour leur fabrication aux microtechnologies, qui permettent une production à grande échelle. Ils sont utilisés dans des domaines aussi variés que l'automobile, l'aéronautique, la médecine, la biologie, les télécommunications, ainsi que dans certaines applications "de tous les jours" telles que certains vidéoprojecteurs, téléviseurs haute-définition ou airbags automobiles.

synonyme d'importants rendements de conversion pour ce système de récupération d'énergie. Grâce à l'apport de ces nanomatériaux, la conversion de la chaleur en électricité est extraordinairement plus importante au point que sur de très petites surfaces, de l'ordre du cm^2 , se concentrent de très fortes densités d'énergies.

Les chercheurs du laboratoire sont d'ailleurs déjà parvenus à mettre au point un générateur thermoélectrique capable de fournir une puissance de 120 microwatts pour un gradient thermique de 30°C . De plus en plus sollicités par les industriels avides de pouvoir disposer à terme de matériaux dont le ZT est supérieur à 2, les chercheurs du CEA-Liten orientent leurs recherches sur des systèmes pointus qui intégreront ces matériaux.

Ainsi THERMA SCAPE (THERmoelectric MAterial for Energy Scavenging Power Expanding), projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche, et auquel participent, outre le CEA-Liten, différents partenaires universitaires et deux groupes industriels – Schneider Electric et STMicroelectronics – a pour objectif de fabriquer des matériaux nanostructurés.



Lampe dotée d'un interrupteur : la chaleur du doigt suffit à générer une impulsion déclenchant un interrupteur
© Artechnique / CEA

Les applications proposées par le CEA-Liten

Le CEA-Liten fabrique des matériaux nanocomposites, à base de tellure de bismuth et de silicium germanium, qui permettent de traiter deux gammes de températures, l'une proche de la température ambiante, l'autre à plus haute température, ceci pour différentes applications. L'objectif : valider la rupture annoncée d'un ZT égal ou supérieur à 2. La thermoélectricité deviendrait alors tout à fait compétitive et complémentaire par rapport aux systèmes à compression utilisés aujourd'hui dans nos réfrigérateurs par exemple. Avec un

ZT supérieur à 2, un certain nombre d'applications peuvent déjà être envisagées comme les microsystèmes de refroidissement sur des circuits intégrés d'ordinateurs ou d'appareils vidéo pour refroidir les composants de puissance.

Un convertisseur thermoélectrique à base de micropoudres

L'effort du CEA-Liten en thermoélectricité a porté sur le développement de nouveaux matériaux compatibles avec des marchés de masse. Ainsi, les matériaux nanostructurés de type Silicium(Si)/Silicium(Si) sur Germanium(Ge) ont été réalisés, soit sous forme d'empilements de couches minces, soit de nanopoudres. Les parties les plus délicates de ce développement concernent la qualification du procédé de dépôt appelé CVD (Chemical Vapor Déposition) haute température pour les couches minces et le broyage de la nanopoudre, aujourd'hui manipulée en boîte à gants, compte-tenu de son oxydation extrêmement rapide à l'air. Ces nouveaux matériaux pourront être utiles pour l'optimisation et la caractérisation des tissus thermoélectriques. Un démonstrateur intégrant un système ARVA (recherche de victimes d'avalanches), fonctionnant avec un interrupteur sans fil, dans le cadre du concept « *Ambient intelligence* » a été réalisé à la demande d'un partenaire industriel.

Annexes

CEA-Liten, la recherche sur les nouvelles technologies de l'énergie

Unité de Programme de la Direction de la Recherche Technologique du CEA, implantée principalement à Grenoble et Chambéry (INES), l'Institut Liten est l'un des plus importants centres européens de recherche sur les nouvelles technologies de l'énergie. Il rassemble 550 spécialistes en physique, chimie et nanomatériaux pour l'énergie, et dispose en 2008 d'un budget d'environ 66 millions d'euros.

Il signe chaque année environ 350 contrats de recherche, gère un portefeuille de 250 brevets étendus au niveau international et est l'un des laboratoires du CEA le plus créatif avec 73 nouveaux dépôts en 2007 (soit un peu plus d'un brevet par M.€ de ressources).

Sa mission principale est de soutenir l'effort français de diversification énergétique à travers une meilleure intégration des énergies à faible émission de gaz à effet de serre dans les secteurs du transport et de l'habitat. Il constitue également un laboratoire de référence pour le développement et l'usage sécurisé des nanomatériaux pour les énergies non émettrices de gaz à effet de serre.

Les marchés visés

Les activités du CEA-Liten couvrent les domaines de l'énergie solaire, de l'hydrogène et de la pile à combustible, du stockage de l'énergie et des nanomatériaux. Ces thèmes sont portés par trois départements dont les travaux et les transferts de savoir-faire s'adresseront à trois marchés :

- **Marché du bâtiment** à faible consommation d'énergie : énergie solaire photovoltaïque, systèmes électriques et thermiques, solaire thermique, intégration du solaire dans le bâtiment, analyse et modélisation des performances énergétiques ;
- **Marché du transport** : motorisation électrique (batteries avancées, piles à combustible, hybridation, production d'hydrogène, dépollution, récupération d'énergie, efficacité énergétique) ;
- **Marché de l'électronique nomade et industrie de pointe** : miniaturisation des sources d'énergie, composants électroniques par impression, surfaces intelligentes.

Une excellence scientifique reconnue à l'international

La recherche scientifique du CEA-Liten a été évaluée en 2006 par des experts indépendants mondialement réputés, parmi lesquels figurent deux prix Nobel. Ce Visiting Committee, mis en place à la demande des pouvoirs publics, a rendu un rapport très favorable.

Le programme de recherche a été qualifié de « *nouveau, ambitieux et stratégique* ». Les résultats sont jugés très encourageants et l'approche interdisciplinaire du CEA-Liten, qui combine recherche amont et impératifs à

court terme des industriels, est reconnue comme très adaptée aux défis énergétiques mondiaux.

Des moyens et des plates-formes technologiques

Le CEA-Liten dispose de salles blanches, d'équipements lourds de caractérisation et de test. Il a également accès aux autres installations du centre du CEA de Grenoble et de Minatec : accélérateurs, moyens d'analyses et de caractérisation, etc.

Il développe des plates-formes technologiques avec des partenaires de recherche et des industriels : FCLab à Belfort (Tests de piles à combustible pour les transports), D2M et ISIS à Saint-Etienne (traitement des surfaces en voie sèche et humide). Il est le principal instigateur de l'Institut national de l'énergie solaire (INES), basé à Chambéry.

Son avenir se construit enfin à l'échelle internationale, dans le cadre de collaborations européennes et du pôle de compétitivité des énergies renouvelables Tenerrdis, dont il est l'un des principaux acteurs.

Partenariats industriels : une tendance forte qui se confirme

Le CEA-Liten a signé, en 2007, 43 contrats bilatéraux, dont 28 avec des grands groupes et 15 avec des PME. L'internationalisation de son activité ne fait plus de doute : les partenaires de recherche (industriels et organismes de recherche) proviennent de différents pays, la plupart en Europe. Les premiers contrats hors Europe sont en montage et devraient être signés rapidement. Les cibles identifiées sont l'Asie pour le stockage de l'énergie et l'électronique organique et le Moyen-Orient pour la filière hydrogène et l'énergie solaire.

Parmi ces industriels, figurent des grands groupes du transport (automobile, aéronautique, transport maritime), de l'énergie, de la microélectronique ou du bâtiment.

Les trois domaines de recherche technologique développés au Liten ont vu augmenter leur chiffre d'affaires d'environ 25% au cours de l'année 2006 et 30 % au cours de l'année 2007. Une croissance du même ordre est attendue en 2008. Pour la pile à combustible, le Liten a initié plusieurs projets de démonstration avec des partenaires industriels à partir de la technologie « *Genepac* » issue des développements pour l'automobile.

Côté énergie solaire, l'année 2007 a été marquée par la création de la société PV Alliance avec Photowatt et EDF ENR. Cette nouvelle société sera dédiée à l'élaboration de cellules solaires photovoltaïques et à la validation technico-économique des concepts issus de l'INES.

Enfin, les besoins énergétiques pour les applications nomades ne cessent de s'accroître. Le Liten y a notamment répondu en créant un laboratoire commun avec STMicroelectronics, division de Tours.

D'autres transferts et partenariats ont été mis en place autour de l'électronique organique et du textile instrumenté.

STMicroelectronics, fabricant mondial de semiconducteurs

STMicroelectronics est l'un des plus grands fabricants mondiaux de semiconducteurs, avec un chiffre d'affaires net de 10 milliards de dollars en 2007 et un leadership dans de nombreux domaines. ST emploie environ 40 000 personnes et compte 13 sites de production dans le monde dont celui de Tours.

Le centre STMicroelectronics à Tours est spécialisé en Recherche & Développement, conception et production de composants électroniques spécifiques pour la gestion de l'énergie, la protection et le filtrage. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications : télécommunications, industrie, grand public, informatique et automobile.

Grâce à sa politique d'innovation continue, la division produits ASD et IPAD¹⁴ a acquis une position de leader mondial pour ses familles de produits dédiés à la gestion de l'énergie, à la protection et aux fonctions de filtrage, ceci, dans un marché très concurrentiel.

Depuis 1996, ses partenariats avec les laboratoires de R&D français et européens ainsi qu'avec les centres de formation universitaires, ont conduit en 2000, à la création du CNRT (Centre National de Recherche Technologique), devenu la plateforme technologique du CERTeM (Centre d'Etudes et Recherche Technologique en Microélectronique) en 2006, et à la labellisation du pôle de compétitivité S²E² (Sciences et Systèmes de l'Energie Electrique). Ainsi, en juin 2007, un accord a été signé avec le CEA-Liten pour la création d'un laboratoire en commun situé à Tours et Grenoble, pour le développement des micro-batteries, des piles à combustible et de nouvelles sources d'énergie. Et en janvier 2008, le site ST Tours s'est engagé dans le programme G²REC¹⁵ pour la création de nouveaux composants basés sur de nouveaux matériaux encore plus performants que le silicium : le nitrure de gallium et le carbure de silicium.

¹⁴ ASD pour Application Specific Discretes : regroupe plusieurs composants de Puissance (redresseurs, triacs, composants de protection, etc...) sur une même puce – IPAD pour Integrated Passive and Active Devices : intègre des fonctions de résistance, de capacité et d'inductance, en plus des fonctions actives (diodes, thyristors)

¹⁵ G²REC : Grand Gap Rectifier, partenariat avec 4 sociétés PME, 2 laboratoires publics et un industriel : ST.