

l'énergie partagée: une vision nouvelle de l'habitat, de la voiture et du territoire

Les cahiers de l'ANR - n° 2

juillet 2010



Les cahiers de l'ANR traitent de questions thématiques transverses aux différents appels à projets de l'ANR. Cette collection met en perspective les recherches, les innovations et les avancées technologiques en cours dans un domaine spécifique. Quels sont les enjeux technologiques, sociétaux, économiques, prospectifs? Quelles sont les actions de l'ANR?

Sans prétention d'exhaustivité, l'objectif est d'explicitier les grandes problématiques. Il est fait référence à différents projets de recherche financés par l'ANR. Une présentation synthétique des projets est proposée.

Chaque cahier permet donc d'approfondir la connaissance scientifique du domaine choisi. Il est utile pour les chercheurs, les décideurs mais aussi pour un large public. L'importance et la diversité des projets de recherche et des équipes scientifiques sont ainsi mises en lumière.

Une version en ligne est également disponible : www.agence-nationale-recherche.fr



Le cahier n°2 a été conçu et réalisé par Henri Vandamme et Pascal Bain, avec le concours d'Aline Tournier.

Nous remercions Gilles Brunneaux, Pascal Couffin, Marie-Ange Folacci, Philippe Freyssinet, Pierre Odru, Ludovic Valadier et l'ensemble des coordinateurs de projet pour leurs contributions.



avant-propos

La production, la distribution et le stockage de l'énergie couplés à ses usages sont devenus des enjeux majeurs de la recherche, car la stagnation des ressources pétrolifères et les politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre conditionnent très fortement les stratégies de recherche à l'échelle mondiale.

Les prochaines décennies vont probablement être fondamentalement modifiées par la transition énergétique qui va transformer les concepts de l'usage de l'énergie, notamment dans les transports et l'habitat, et probablement dans une moindre mesure dans l'industrie. Les cycles d'innovation dans le domaine énergétique étant pluri-décennaux, il s'avère nécessaire d'anticiper très largement les évolutions technologiques dans ce domaine. Cela conduit l'ensemble des Etats du monde développé et émergent à intensifier significativement leurs investissements de R&D dans le domaine de l'énergie depuis 2000.

La réduction des émissions de CO₂, la substitution progressive du pétrole comme source d'énergie embarquée, ou encore les nouveaux besoins générés par les technologies de la communication font émerger de nouveaux modèles énergétiques. Le concept de l'énergie répartie produite à partir de sources très différenciées va profondément évoluer dans l'avenir, en fonction notamment de nouveaux usages. L'énergie produite, stockée et embarquée dans une multitude de systèmes, que ce soit du bâtiment à énergie positive, en passant par le véhicule électrique jusqu'aux usages nomades des technologies de l'information et de la communication, va susciter l'émergence de nouvelles technologies, mais va également bouleverser les modèles économiques associés.

Au moment où l'Europe s'est engagée dans des objectifs ambitieux en matière d'efficacité énergétique, d'intégration des énergies renouvelables et de réduction des émissions de CO₂, il est important que la créativité française en matière de recherche technologique soit portée au meilleur niveau par les acteurs académiques et industriels. L'ANR y contribue de manière diversifiée au travers des programmes de recherche du domaine « énergie durable et environnement », mais également d'autres programmes comme « Systèmes embarqués et grandes infrastructures », « PNANO » ou « Matériaux & Procédés » et dans les appels à projets non-thématiques.

Ce cahier présente un ensemble de 64 projets de recherche sur la thématique de l'énergie répartie. Ces projets couvrent trois aspects essentiels : le captage et la transformation des énergies réparties, le transport et le stockage des vecteurs énergétiques et enfin l'usage optimisé des énergies réparties dans les secteurs des transports et du bâtiment. Il représente un état exhaustif de la diversité des projets en cours ou récemment terminés récemment sur ce thème.

Cet ouvrage de référence doit permettre aux scientifiques, aux industriels et aux pouvoirs publics impliqués dans les questions énergétiques de disposer d'une vision assez synthétique de la recherche menée en France et du rôle joué par les porteurs de projets.

Jacqueline Lecourtier

*Directeur général
de l'Agence Nationale de la Recherche*

résumé

La réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la consommation des énergies fossiles, d'une part, et la fin dans les prochaines décennies de l'ère pétrolière, d'autre part, sont deux défis majeurs à relever pour assurer les équilibres futurs de nos sociétés.

Par rapport au paysage actuel dans lequel les transports sont quasi exclusivement dépendants du pétrole et où l'électricité, en France, est en très large partie produite à partir de centrales nucléaires, nous nous orientons vers une plus grande diversification des sources énergétiques, avec un recours croissant aux énergies renouvelables (EnR), conformément à l'objectif de 20 % d'EnR dans le mix énergétique national à l'horizon 2020, auquel la France a souscrit dans le cadre d'accords européens.

Cette montée en puissance des énergies renouvelables ne pourra se faire que si elles deviennent économiquement compétitives par rapport aux énergies aujourd'hui dominantes. Des mécanismes incitatifs (crédit d'impôt, bonus-malus, tarifs de rachat...) ou réglementaires (taxe carbone, obligations de performance...) peuvent contribuer à cette compétitivité mais les marges de progrès se situent également dans une meilleure efficacité des technologies de captage de ces ressources énergétiques. C'est notamment le cas du photovoltaïque, auquel une part importante de ce cahier est consacrée, mais aussi d'autres technologies de captage ou de récupération d'énergie fatale qui pourraient être intéressantes pour des marchés de niches (thermo-électricité, photosynthèse artificielle, énergies marines...). Les bio-énergies feront l'objet d'un autre cahier.

Ces énergies, qui ne sont pas toujours produites sur le lieu de leur utilisation finale, ni au moment des pics de consommation énergétiques, doivent pouvoir être transportées et éventuellement stockées sous des formes appropriées à ces usages. La recherche de solutions techniques pour mieux piloter les réseaux de distribution d'énergie et améliorer les dispositifs de stockage, afin que production et besoins soient en meilleure adéquation, est cruciale.

C'est particulièrement vrai pour les transports routiers, dont l'avenir passe probablement par une électrification d'une partie du parc, ce qui nécessite de développer des accumulateurs fiables avec des capacités de charge importante et des modes de recharge à inventer. Ou d'imaginer des solutions utilisant comme vecteur énergétique l'hydrogène.

C'est aussi vrai pour les bâtiments, appelés à devenir de véritables centrales énergétiques, ce qui demande de reconcevoir leurs enveloppes, qui devront capter et utiliser de manière optimale les énergies renouvelables, et leurs connexions aux réseaux énergétiques.

Le présent cahier vise à dresser un panorama, non exhaustif, des actions menées dans le cadre de l'ANR sur ces questions et à montrer comment ces recherches peuvent contribuer à relever les défis énergétiques du XXI^e siècle.

Partie 1 : Une vision nouvelle de l'habitat, de la voiture et du territoire



Partie 2 : 62 projets financés par l'ANR

Est présentée ici une liste non exhaustive de 62 projets financés par l'ANR sur la période 2005-2009

Ces projets sont issus de 22 appels à projets thématiques ou non-thématiques et contribuent au financement de 12 pôles de compétitivité

1 Éléments de prospective et viabilité technico-économique

2
Capter les
ressources
énergétiques
renouvelables

3
Transporter,
transformer,
stocker,
distribuer les
énergies
réparties

4
Véhicules de transport
et groupes moto-propulseurs
avancés

5
Intégration dans les bâtiments
et les quartiers

sommaire

Avant propos	1
Résumé	2
Plan général du cahier	3
Partie 1 : Une vision nouvelle de l'habitat, de la voiture et du territoire	5
UNE ÉLECTRIFICATION CROISSANTE	5
1. L'ÉVOLUTION DU PAYSAGE ÉNERGÉTIQUE MONDIAL	7
2. LE BÂTIMENT ET LA VOITURE À L'HEURE ACTUELLE : DE GROS CONSOMMATEURS D'ÉNERGIE ET DE GROS ÉMETTEURS DE GAZ À EFFET DE SERRE	10
3. INVERSER LA TENDANCE	15
• Vers le bâtiment à énergie positive	15
• Vers des véhicules sobres et propres	18
4. LA CONVERGENCE BÂTIMENT – VÉHICULE – RÉSEAU : « HOME-TO-GRID » « VÉHICULE-TO-GRID » « VÉHICULE-TO-HOME »	26
5. QUELS RÉSEAUX ?	30
6. QUELLES VILLES ? QUELS TERRITOIRES ?	33
7. QUELLE RECHERCHE ?	35
Partie 2 : 62 projets de l'ANR	37
1. ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE ET VIABILITÉ TECHNICO-ÉCONOMIQUE	38
2. CAPTER LES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES RENOUVELABLES	42
3. TRANSPORTER, STOCKER, DISTRIBUER LES ÉNERGIES RÉPARTIES	64
4. VÉHICULES DE TRANSPORT ET GROUPES MOTO-PROPULSEURS AVANCÉS	77
5. L'INTÉGRATION DES ÉNERGIES RÉPARTIES DANS LES BÂTIMENTS ET LES QUARTIERS	98

Partie 1

Une vision nouvelle de l'habitat, de la voiture et du territoire

Le paysage énergétique français, comme celui de tous les pays engagés sur la voie de la diversification et du bon usage de leurs ressources énergétiques, est appelé à se modifier profondément dans les années à venir. Au-delà du glissement attendu vers les énergies renouvelables et d'une diversification des acteurs, c'est à une multiplication du nombre de producteurs secondaires et, plus encore, à une remise en cause de la dichotomie producteur/consommateur à laquelle il faut se préparer, les uns prenant, au gré des circonstances, la fonction des autres, éclatant du même coup l'offre énergétique. Une fonction nouvelle devrait même apparaître, celle de « stockeur », que le « producteur-consommateur » pourra endosser par intermittence, à son propre service ou au service de la communauté. Tout cela devrait conduire à une augmentation sans précédent de la connectivité énergétique du territoire, analogue à celle qu'Internet a introduite dans le domaine de l'information.

Cette évolution de fond ne se fera pas rapidement, mais elle permettra de tirer le meilleur parti de toutes les ressources disponibles. Ses moteurs objectifs sont la raréfaction des sources d'énergie conventionnelles et la diversification en cours du bouquet énergétique. Ses moteurs subjectifs ou sociétaux sont la responsabilisation du citoyen face aux changements climatiques et son désir d'être un acteur dans l'effort collectif.

UNE ÉLECTRIFICATION CROISSANTE

Elle concerne d'abord l'énergie électrique, la plus facilement transportable mais pas la plus facilement stockable, et implique de profondes évolutions pour nos deux principaux postes de consommation : le bâtiment et les transports. L'habitat, maison individuelle ou immeuble d'habitation, déjà moins énergivore qu'il ne l'était, deviendra à terme producteur d'énergie. L'immobilier tertiaire également, dans une moindre mesure. Même les sites industriels, encore plus voraces que l'habitat et le bâtiment tertiaire, suivront progressivement le même chemin en produisant eux-mêmes, au moins pour partie, l'énergie dont ils ont besoin. La voiture, certes toujours consommatrice mais de plus en plus sobre et électrifiée, acquerra le statut d'équipement domestique, au même titre qu'un capteur solaire ou qu'un lave-linge et jouera un rôle collectif positif dans la gestion de l'énergie.

Mais avant tout, c'est notre conception des réseaux de distribution qu'il faudra revoir. L'architecture centralisée du système actuel de production et de distribution d'énergie, en continu (électricité et gaz naturel) ou par paquets (produits pétroliers, du moins en aval de la raffinerie), ne le rend guère apte à accueillir massivement les énergies locales et encore moins à être en interaction avec les

utilisateurs eux-mêmes. C'est en particulier vrai pour le réseau électrique. Construit à partir d'un nombre limité de nœuds producteurs que sont les macrocentrales qui jalonnent les grands fleuves et les côtes du territoire, il est l'exemple-type d'une architecture « top-down ». Les réseaux énergétiques du futur devront avoir une capacité bien plus forte que les réseaux actuels à redistribuer localement et globalement la production et la consommation d'une multitude d'entités énergétiques, réparties sur tout le territoire. Ceci n'ira pas sans difficultés, compte tenu des investissements impliqués. La décentralisation pourrait même prendre une forme extrême, extraterritoriale, avec l'installation de centrales solaires dans les régions désertiques d'Afrique du Nord qui, somme toute, sont à distance très raisonnable des territoires européens de forte consommation. Un tel élargis-

sement des sites de production énergétique représenterait une opportunité pour les pays concernés, a priori plus intéressante que les ressources fossiles.

Précisément, si la décentralisation énergétique et le renforcement du rôle de l'électricité représentent une évolution souhaitable dans les pays du Nord, elle l'est encore plus dans les pays du Sud et elle devient vitale pour ceux qui sont encore de véritables déserts énergétiques et qui ne disposeront pas avant longtemps des ressources nécessaires à la construction d'un réseau calqué sur les nôtres. Pour eux, pouvoir produire et distribuer à proximité du lieu de production une énergie de source durable est une urgence. La connexion à une toile énergétique nationale « à l'occidentale » viendra plus tard, pour autant qu'elle se justifie, compte tenu de la distribution et de la densité de la population⁽¹⁾.



© NASA

¹ Michel Labrousse, *L'énergie répartie et la production décentralisée d'énergie*, Les Cahiers de Global Chance, n°21, mai 2006

Cette image composite de notre terre la nuit révèle la voracité énergétique globale de notre monde et les énormes disparités dont il est le siège. Certains déserts de lumière sont des zones de très faible densité de population mais d'autres sont, malheureusement, surpeuplés. Elle révèle également (taches rouges) le gaspillage des torchères qui se poursuit encore malgré le besoin d'économies d'énergie.

1 L'ÉVOLUTION DU PAYSAGE ÉNERGÉTIQUE MONDIAL

L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) publie chaque année de nombreuses statistiques sur le paysage mondial de l'énergie, ainsi que des projections sur son évolution. En 2008, elle a publié une projection à l'horizon 2030 sur les sources d'énergie primaire, selon deux scénarii⁽²⁾. Le premier, le scénario tendanciel ou scénario de référence (SR sur la figure de la page suivante), est fondé sur la poursuite de nos modes de production et de vie actuels, en tenant compte des évolutions déjà en cours. Ce scénario table sur une croissance moyenne de la demande en énergie de 1,6 % par an, ce qui tient compte du récent ralentissement de la consommation. Ceci conduit entre 2006 et 2030 à une augmentation de 45 %, de 11 730 Mtep à 17 010 Mtep. Les 87 % de cette augmentation seraient attribuables aux pays non membres de l'OCDE, ce qui feraient passer leur part dans la demande mondiale de 51 à 62 %. La barre des 50 % a été franchie en 2005. La Chine et l'Inde représenteraient à elles seules la moitié de l'augmentation de la demande mondiale.

Selon ce scénario, les combustibles fossiles représenteraient encore 80 % du « panier » énergétique primaire mondial en 2030, soit légèrement moins qu'aujourd'hui. Le pétrole reste le combustible principal, même si sa part relative baisse légèrement, de 34 à 30 %. C'est la demande en charbon qui connaît l'augmentation la plus forte en valeur absolue. Les énergies renouvelables voient leur part augmenter fortement. Ensemble, l'éolien, le solaire (photovoltaïque et thermique), l'énergie géothermique et l'énergie marine (houle, vagues et marées) augmenteraient en moyenne de 7,4 % par an sur toute la période.

Energie primaire et énergie finale

La consommation énergétique finale est celle qui est directement utilisée par le consommateur, que ce dernier soit un particulier ou une société. C'est la consommation électrique ou de gaz que mesurent nos compteurs, c'est le fuel que nous nous faisons livrer, c'est l'essence ou le gasoil que nous prenons à la pompe. L'unité communément utilisée dans les statistiques est la « tonne d'équivalent pétrole » ou Tep, qui se réfère au pouvoir calorifique de cette quantité de pétrole. Une Tep correspond à 42 GJ (giga joules). Mille KWh correspondent à 0,086 Tep, soit 86 « kilos équivalent pétrole ».

On distingue la consommation finale de la consommation primaire, qui correspond à la quantité d'énergie « brute » que l'on a dû capter, produire ou utiliser pour obtenir l'énergie finale. L'énergie primaire est donc toujours supérieure à l'énergie finale. L'écart dépend de l'efficacité des procédés de production et de distribution. Par exemple, dans le cas des carburants pétroliers, l'écart prend en compte la consommation énergétique des raffineries et celle due au transport. Dans le cas du gaz naturel, l'écart prend en compte la consommation des pompes nécessaire au transport par gazoduc, souvent considérable sur de très grandes distances. Dans le cas de l'électricité de source non renouvelable (centrale au charbon, au gaz, ou nucléaire), l'écart prend en compte la différence entre l'énergie calorifique produite par combustion ou par réaction nucléaire, et l'énergie électrique qui arrive effectivement chez le consommateur (environ un tiers seulement de la chaleur primaire dans le cas de l'électricité nucléaire, environ deux tiers dans le cas d'une centrale à gaz à cycle combine, le reste étant dissipé sous forme de chaleur dans le fleuve, la mer ou l'atmosphère à la centrale et dans le réseau de distribution). Le rapport Energie finale/Energie primaire définit l'efficacité énergétique. Elle est globalement voisine de 58 % en France.

Le second scénario suppose la mise en œuvre effective des politiques alternatives qui sont pour l'instant envisagées, notamment pour réduire la part relative du charbon, sinon sa valeur absolue, afin de maîtriser les émissions de CO₂ dont il est le principal responsable. Plus précisément, ce scénario (SPA sur la figure qui suit) envisage de mettre en œuvre – principalement dans les pays de l'OCDE – les mesures permettant de limiter

² Key World Energy Statistics 2008, International Energy Agency, disponible sur <http://www.iea.org/Textbase/publications/>

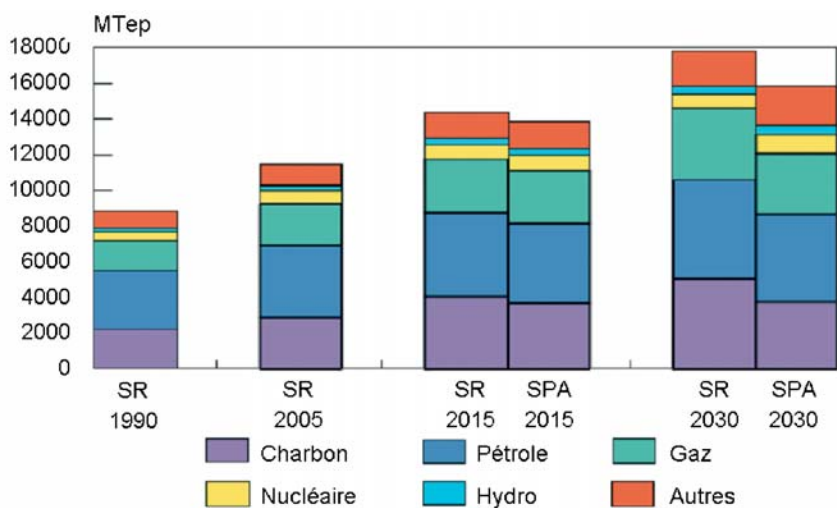
la concentration en CO₂ dans l'atmosphère à 550 ppm à l'horizon 2020 et de la faire décroître ensuite, ce qui pourrait malgré tout conduire à une augmentation globale de la température de plus de 2 °C. Même cet objectif apparemment modeste requiert un changement radical de notre rapport à l'énergie. Des objectifs plus ambitieux – atteindre

450 ppm de CO₂ par exemple – demanderaient des efforts difficiles à concevoir. La réduction *totale* des émissions des pays de l'OCDE après 2030 n'y suffirait pas.

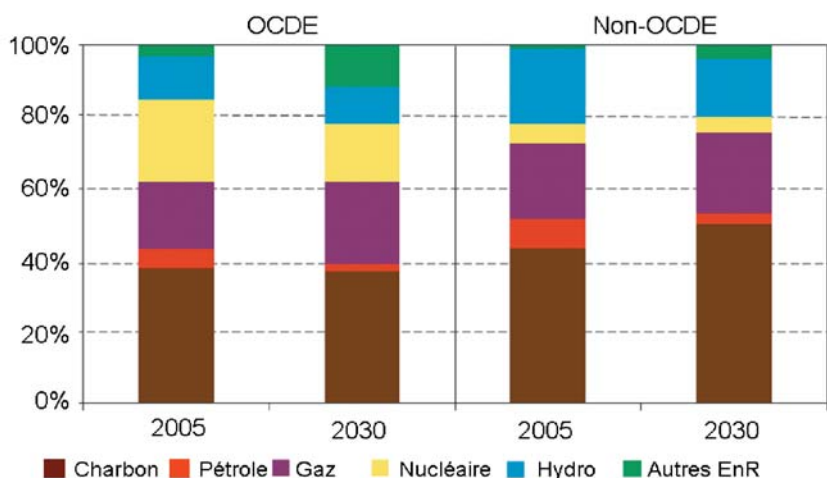
Dans ce second scénario, la demande mondiale n'augmenterait que de 1,2 % par an en moyenne, ce qui conduirait en 2030 à une demande inférieure de 9 % par rapport à celle du scénario de référence (32 % d'augmentation, au lieu de 45 %) grâce, essentiellement, à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Les combustibles fossiles perdraient des parts de marché au bénéfice du nucléaire et des énergies renouvelables. Le pétrole resterait, malgré tout, la source dominante et, au total, les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) devraient encore représenter les trois quarts de notre demande en énergie primaire.

Ce qui précède concerne les sources primaires d'énergie et non la forme – finale – sous laquelle cette énergie est utilisée. En tant que forme finale d'énergie, l'électricité occupe une place particulière dans la mesure où sa demande devrait pratiquement doubler dans les 25 prochaines années passant (en énergie finale) d'environ 15 TWh en 2005 à presque 30 TWh en 2030. Dans le scénario de référence, la demande mondiale croîtrait en moyenne de 2,8 % par an, mais la croissance serait trois fois plus forte dans les pays en développement que dans les pays de l'OCDE.

Dans les pays membres de l'OCDE, la part des énergies fossiles – essentiellement charbon et gaz – déjà voisine de 60 %, resterait à ce niveau et la part des énergies renouvelables augmenterait jusqu'à atteindre plus de 20 %, au détriment du nucléaire. Le même niveau d'énergies renouvelables serait atteint dans les autres pays, principalement grâce à l'énergie hydraulique. En revanche, la part des énergies fossiles augmenterait jusqu'à



Les statistiques et projections de l'AIE pour la consommation mondiale totale en énergie primaire, avec (scénario de politiques alternatives, SPA) ou sans (scénario de référence, SR) la mise en place de politiques alternatives (AIE, 2008).



Les projections de l'AIE en 2008 pour la part relative des différentes sources d'énergie primaire destinées à la production d'électricité. Pour avoir une vision des évolutions absolues - qui sont toutes en augmentation, à l'exception du pétrole - il faudrait multiplier la hauteur des colonnes « 2030 » par 1,45 environ pour les pays de l'OCDE et par 3 pour les autres.

approcher les 80 %, au détriment ici encore du nucléaire. Malgré cela, la contribution du nucléaire à la génération électrique augmentera partout en valeur absolue, tirée par l'augmentation de la demande. La part du pétrole pour la production d'électricité, déjà très faible, deviendrait quasiment insignifiante.

Il va sans dire qu'avec près de 80 % de son électricité d'origine nucléaire, la France représente un cas singulier. Une des particularités de la production d'électricité d'origine nucléaire est que, contrairement aux autres modes actuellement dominants de production d'électricité – centrales thermiques au charbon ou au gaz – elle possède un potentiel d'évolution technique considérable. Les réacteurs de troisième génération actuel-

lement en construction ne représentent qu'un premier pas, relativement modeste par rapport à ce que représenterait dans trente ou quarante ans le développement des réacteurs de quatrième génération à neutrons rapides et à haute température, dits « surgénérateurs ». Fonctionnant à l'isotope d'uranium ^{238}U ou à l'isotope de thorium ^{232}Th , tous deux bien plus abondants que l'isotope ^{235}U actuellement utilisé, et produisant plus de matière fissile qu'ils n'en consomment, ces réacteurs rendraient l'électricité d'origine nucléaire quasiment « renouvelable ». L'inconvénient, de taille, est la similitude de ces matières fissiles avec celles qui conduisent à l'arme nucléaire. La décision sera donc plus politique que technique.

Energie et eau

L'eau douce et propre fait désormais partie des raretés auxquelles notre civilisation a à faire face. Dans ce contexte, la consommation d'eau liée à la production d'énergie ne peut plus être considérée comme un paramètre secondaire. En Europe, c'est 31 % de l'eau prélevée qui est utilisée pour la production d'énergie et aux Etats-Unis, ce chiffre atteint 39 %.

Comme pour la production de CO_2 , les différentes filières de transformation de l'énergie sont loin d'être égales entre elles sur ce plan⁽³⁾. L'eau consommée peut être liée à la production des matériaux utilisés, à l'extraction de la ressource, au procédé industriel lui-même, au cycle thermodynamique (refroidissement), etc. Les agrocarburants de première génération sont de loin les plus gourmands, avec près de 200 m³ d'eau pour une quantité de carburant équivalent à 1 MWh. La même quantité d'énergie produite par une centrale nucléaire ou au charbon requiert environ cent fois moins d'eau et, dans le cas d'une centrale au gaz, deux cent fois moins. Le pétrole « classique » tire bien son épingle du jeu, avec environ 4 m³ d'eau par équivalent MWh, mais les « nouveaux » pétroles – bruts ultralourds ou sables bitumineux – sont quasiment aussi voraces que les biocarburants. L'éolien et le photovoltaïque sont les champions incontestés de la frugalité, avec une consommation d'eau encore mille fois inférieure à celle d'une centrale au gaz.

Inversement, la production d'eau douce pour la consommation domestique ou l'irrigation peut être très vorace en énergie. La distillation et l'osmose inverse sont les deux principaux procédés, le second étant moins énergivore que le premier. En Andalousie, c'est le tiers de la consommation électrique régionale qui est consacrée au dessalement.

³ DHI Water Policy, 2008, www.dhigroup.com ; *Le Monde*, dimanche 29 et lundi 30 mars 2009

2 LE BÂTIMENT ET LA VOITURE À L'HEURE ACTUELLE : DE GROS CONSOMMATEURS D'ÉNERGIE ET DE GROS ÉMETTEURS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Le bâtiment – habitat ou lieu de travail – et les moyens de transport représentent pour la très grande majorité d'entre nous nos principaux lieux de vie. Ce sont aussi les principales sources de consommation énergétique et d'émission de gaz à effet de serre. Une analyse même très succincte du paysage énergétique ne laisse aucun doute à ce sujet. Ce sont donc les leviers principaux sur lesquels nous pouvons agir pour préparer la transition énergétique et ralentir les changements climatiques qui s'amorcent⁽⁴⁾.

Secteur d'activité	Charbon	Produits pétroliers	Gaz	Électricité	Renouvelables thermiques**	Total
Industrie	6,5	6	12,5	11,7	1,25	37,4
Habitat et tertiaire	0,4	14,7	22,6	24	8,9	70,6
Agriculture	0	2,2	0,3	0,3	0,05	2,9
Transports	0	49,1	0,05	1,05	0,7	50,9
Total (Mtep)	6,9	72	35,4	37	10,9	161,7
Part (%)	4,2 %	44,5 %	21,6 %	22,9 %	6,7 %	100 %

** solaire thermique, géothermie, biomasse pour chauffage

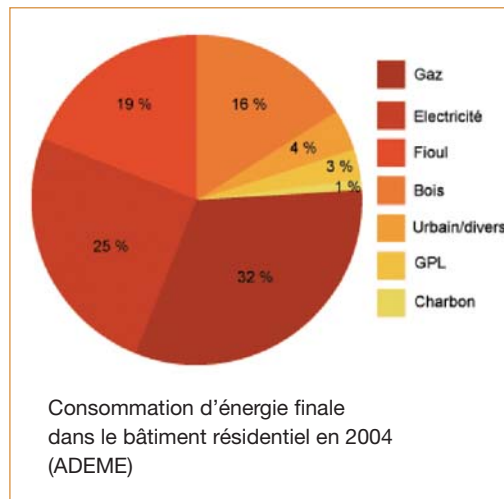
Consommation énergétique finale en France en 2006, par secteur et par produit (Mtep)

Pour avoir une idée plus précise et plus intuitivement assimilable de la manière dont nous pouvons agir, c'est l'énergie finale qu'il convient d'examiner car c'est elle que nous payons directement. D'après le bilan énergétique établi par l'Observatoire de l'Énergie de la Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (DGEMP)⁽⁵⁾, la consommation énergétique finale totale de la France s'établissait en 2006 à 161,7 Mtep, donnée « corrigée du climat ». Dans ce panier, comme au niveau mondial, les produits pétroliers liquides se taillent la part du lion avec 44,5 %. Le gaz naturel et l'électricité font à peu près jeu égal avec, respectivement, 21,6 et

22,9 %. L'électricité d'origine nucléaire représente 17 %, soit environ un sixième du total. Les énergies renouvelables thermiques – solaire thermique, combustion de bois, de déchets ou autres biomasses, géothermie – représentent 6,7 % et le charbon, bon dernier, 4,2 % seulement. Nous sommes donc globalement, comme la très grande majorité des pays du monde, encore très dépendant du gaz et du pétrole puisque ces deux ressources, importées à 98 %, assurent les deux tiers de notre consommation finale.

A quoi utilisons-nous cette énorme quantité d'énergie ? Essentiellement à chauffer nos habitations (le résidentiel) et nos lieux de travail (le tertiaire) et à nous déplacer. En 2006, le bâtiment consommait à lui tout seul 44 % de notre énergie finale totale et le transport 32 % environ. Les 30 millions de logements – dont 17 millions de maisons individuelles – et les 31 millions de véhicules que possèdent les Français représentent donc ensemble plus de 75 % de la consommation énergétique finale.

Ces deux secteurs possèdent cependant des profils énergétiques sensiblement différents. Le transport est dépendant à 97 % des produits pétroliers tandis que le panier énergétique est beaucoup plus diversifié pour le bâtiment.



⁴ Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050, rapport du Groupe de Travail présidé par Christian de Boissieu, août 2006. Disponible sur www.industrie.gouv.fr/energie/facteur4.htm

⁵ Désormais intégré au Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS), rattaché au Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) (http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/se_stats.htm)

L'éclairage : un petit poste de consommation pour les ménages, mais un grand potentiel d'économies à l'échelle du pays

L'éclairage est un poste relativement mineur dans la consommation électrique des ménages, mais il représente une part plus importante dans le tertiaire et, si on y ajoute l'éclairage des lieux publics et des sites industriels, c'est à une part proche de 20 % de l'électricité totale consommée que l'on arrive dans les pays développés. Cette énorme consommation est due à l'inefficacité notoire des lampes que nous utilisons. Les ampoules à incandescence, inventées au début du vingtième siècle, ne convertissent que 5 % environ de l'énergie électrique en lumière, le reste étant consacré à chauffer le fil. Dans un « tube » fluorescent, invention des années 30, ce chiffre atteint 20 %, le reste étant consacré à produire le gaz ionisé – invisible de l'extérieur – qui remplit le tube et qui, en excitant le revêtement fluorescent, produit la lumière blanche. Cette lumière est malheureusement de bien moindre qualité que celle, remarquablement proche de la lumière solaire, produite par une ampoule à incandescence.

La technologie d'éclairage la plus performante fait appel aux solides semiconducteurs. C'est la technologie des diodes électroluminescentes (DEL, ou LED en anglais), dans lesquelles l'électricité est convertie *directement* en lumière. Si les DEL rouges ou vertes sont familières du grand public depuis plus de vingt ans, les DEL blanches n'ont vu le jour que dans les années 90. Rien n'empêche en principe leur rendement d'avoisiner les 100 %, même si les records actuels n'atteignent « que » 80 % environ. Même avec un rendement plus faible de l'ordre de 30 %, le remplacement généralisé des sources d'éclairage actuelles, domestiques ou publiques, par des diodes électroluminescentes, représenterait une économie gigantesque. Pour les Etats-Unis, l'économie d'électricité et la réduction d'émission de CO₂ correspondrait à la suppression d'une centaine de centrales électriques au charbon (source : DOE). Pour l'instant, aucune DEL blanche ne réunit simultanément l'optimum de rendement, de qualité de lumière et de prix, mais les progrès sont remarquablement rapides.

Compte tenu des progrès réalisés ces dernières années, on peut s'interroger sur l'opportunité de généraliser en Europe les lampes fluorescentes dites « à basse consommation » ou « compactes » (des tubes enroulés ou repliés), qui contiennent de la vapeur de mercure, qui émettent une lumière de faible qualité et qui n'atteignent que relativement lentement leur luminosité nominale, alors que les DEL ne contiennent pas d'éléments toxiques, ont désormais une efficacité supérieure (les 300 lumens par watt sont en vue, à comparer aux 80 lumens/watt des lampes fluorescentes compactes), s'allument dans l'instant et possèdent une durée de vie quasi-infinie, limitée uniquement par le vieillissement de leur enveloppe. Leur coût est certes encore supérieur, mais les effets d'échelle devraient les rendre compétitives. L'état de Californie ne s'y est pas trompé, en préparant une réglementation (pas d'éléments toxiques, rendement minimal élevé) qui, de facto, rendra la lampe fluocompacte obsolète avant même sa généralisation.

Le gaz naturel et l'électricité contribuaient, respectivement, à hauteur de 32 et 34 % de la consommation finale du bâtiment, le pétrole à 21 % et les énergies thermiques renouvelables à 13 %. Le pétrole et le gaz sont utilisés principalement pour le chauffage, y compris l'eau chaude sanitaire, tandis que la consommation électrique est principalement liée à l'éclairage et aux équipements de plus en plus variés dont nous nous équipons (électroménager, multimedia...).

Une analyse plus détaillée des différents postes de consommation dans le bâtiment, montre que le chauffage et l'eau chaude sanitaire restent, malgré une légère baisse continue, le poste dominant avec près de 70 % de la consommation. La demande électrique, elle, est en augmentation régulière, ce qui va de pair avec notre soif d'équipements. Ces chiffres globaux peuvent cependant masquer des différences importantes selon le type de bâtiment, résidentiel ou tertiaire, public ou privé⁶. Par exemple, dans le tertiaire, l'éclairage et la climatisation représentent une part de la consommation énergé-

tique nettement plus importante que dans le résidentiel.

Ces chiffres, qui traduisent la réalité de la consommation, sont assez différents de la perception du consommateur. Les enquêtes réalisées en France, en Allemagne et en Belgique⁷ montrent que la plupart des ménages sous-estiment largement le poids du chauffage et de la voiture qui, en réalité, représente près de 85 % de la consommation. En revanche, ils surestiment la consommation électrique, en particulier pour l'éclairage, et l'eau chaude sanitaire, ce qui s'explique sans doute par l'utilisation répétée et consciente qu'ils font de ces commodités tout au long de la journée. Ces erreurs d'appréciation ne font que souligner à quel point l'énergie est une grandeur physique difficile à appréhender. Nous avons une vision très précise de ce que représente un kilogramme ou un litre. Nous n'avons qu'une vision très floue de ce que représente un kilojoule ou un kilowattheure.

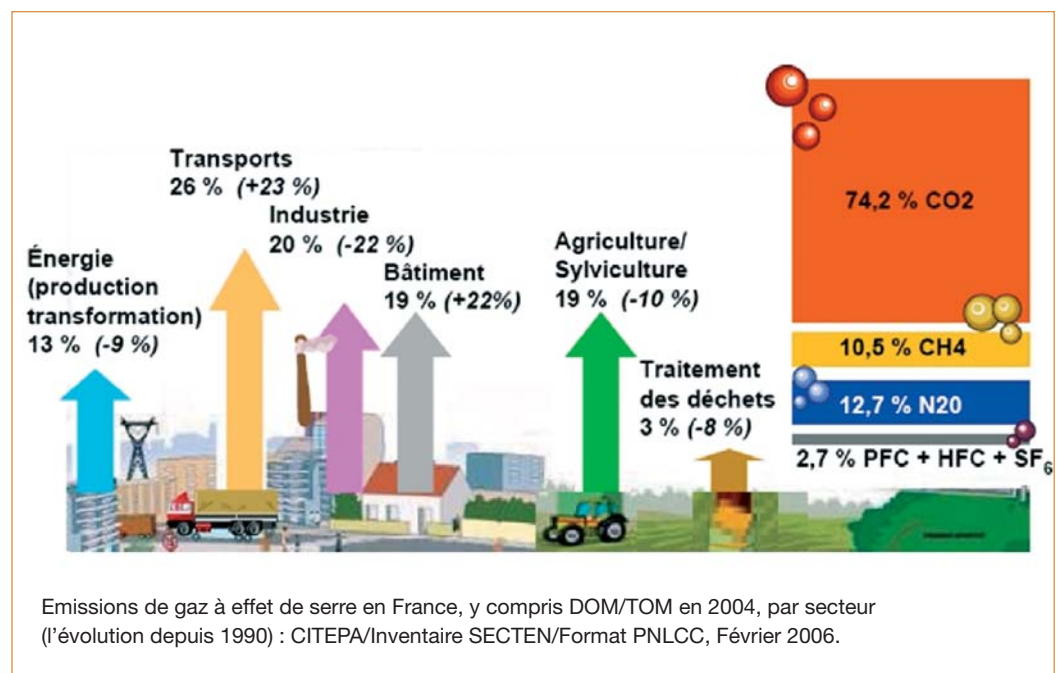
Notre consommation énergétique est à mettre en parallèle avec son impact sur l'émission de gaz à effet de serre, dont 80 %

⁶ D. Bosseboeuf, *Efficacité énergétique dans le bâtiment – La place de la France dans l'UE*, mai 2004. En collaboration avec Enerdata. (cité par D. Quenard, *Vers l'autonomie énergétique pour Se loger et Se déplacer*, Orgagec'08, 2008)

⁷ France : www.isolonslaterre.org ; Allemagne : www.zukunft-haus.info ; Belgique : Détermination de profils de ménages pour une utilisation rationnelle de l'énergie – Scientific Support Plan for a Sustainable Development Policy (SPSD II) – Research contract n° CP/50 août 2006 – Belgian Science Policy (cités par D. Quenard, *ibid*)

⁸ Ces chiffres dépendent des facteurs de pondération appliqués aux divers gaz, pour prendre en compte leur durée de vie dans l'atmosphère.

⁹ Les récents événements financiers et économiques pourraient entraîner une inversion de tendance et une modification sensible des comportements, au moins momentanément.



est à attribuer à la production, la transformation et la consommation d'énergie d'origine fossile. La figure en page précédente résume la situation en France en 2004⁽⁸⁾. On peut y voir que le bâtiment et les transports sont responsables de près de 45 % des émissions. Qui plus est, leur contribution augmente, malgré les progrès faits en matière d'isolation thermique des bâtiments et de consommation des véhicules. Ceci est vraisemblablement à attribuer à l'augmentation des distances parcourues et des surfaces chauffées⁽⁹⁾. En revanche, l'industrie est meilleure élève ; sa part ne cesse de diminuer. Les industries « du feu » (verre, ciment, céramiques et réfractaire, acier et autres métaux) sont en première ligne dans ce combat, à la fois comme accusés et comme acteurs.

Le bilan de ce qui précède n'est guère encourageant à première vue car nous ne sommes pas prêts à renoncer à un habitat et un lieu de travail confortables. La voiture particulière restera pour longtemps encore un moyen de locomotion indispensable sur une grande partie du territoire, ne fût-ce que pour rejoindre les transports en commun. Certains signes, notamment dans le monde publicitaire, dénotent cependant un changement progressif des mentalités. Un bon bilan CO₂ est désormais un argument de vente convaincant.

Plusieurs institutions se sont livrées à des projections sur les émissions de CO₂ à diverses échéances. Dans son World Energy Outlook de 2007, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) prévoit, selon le scénario tendanciel de référence (« business as usual »), une augmentation des émissions mondiales de près de 55 % à l'échéance 2030 et autant de 2030 à 2050. Une telle augmentation est inacceptable. La production d'électricité serait responsable de près de la moitié de ces émissions (le cas français est sensiblement



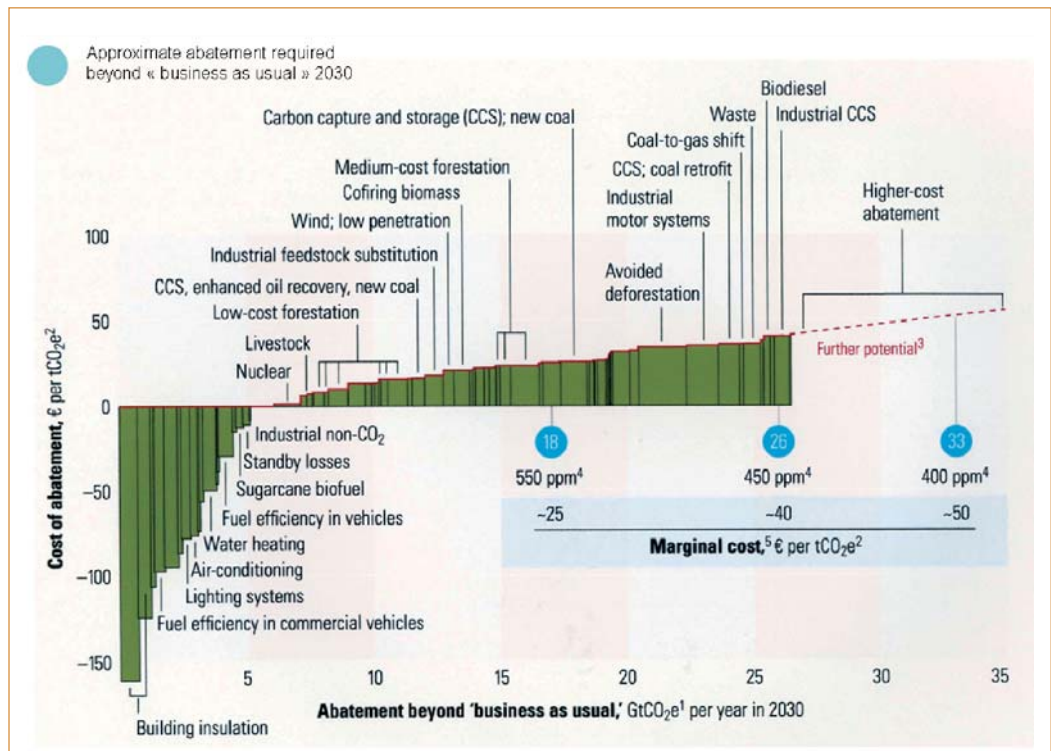
Le « bilan CO₂ » est désormais un argument de vente.

différent, rappelons-le). Selon le scénario alternatif, qui implique de mettre en œuvre les politiques d'utilisation rationnelle de l'énergie dès que leur rentabilité est assurée par l'évolution des prix, l'augmentation des émissions mondiales se limiterait à 30 % environ, ce qui est encore excessif.

Dans une autre étude récente, le cabinet Mc Kinsey, en collaboration avec le fournisseur d'énergie suédois Vattenfall, a évalué le potentiel de réduction d'émissions de gaz à effet de serre offert par la mise en œuvre des principales stratégies ou technologies envisageables, en prenant en compte leur coût croissant. L'étude couvre le domaine du bâtiment, des transports, de la production d'énergie, de l'industrie manufacturière, de la gestion des déchets et, enfin, de l'agriculture et de la gestion des forêts, dans six régions du monde : l'Amérique du Nord, l'Europe de l'Ouest, l'Europe de l'Est, les autres pays développés, la Chine et les autres pays en développement. L'étude a été réalisée à différents horizons – 2010, 2020 et 2030 – et se place dans le cadre de différents scénarii de réduction des émissions, le scénario moyen étant celui d'une teneur en CO₂ de l'ordre de 450 ppm en 2030.

L'analyse de cette courbe révèle qu'une grande partie des actions envisageables – celles qui se situent à l'extrémité gauche de la courbe – se fait à coût-bilan négatif. En d'autres termes, le bénéfice, calculé sur le cycle de vie, est supérieur à l'investissement.

¹⁹ A cost curve for greenhouse gas reduction, Per-Anders Enkvist, Tomas Nauclér & Jerker Rosander, The McKinsey Quarterly, N°1, pp 35-45, 2007. Rapport final (107 pages) disponible sur <http://www.mckinsey.com/client-service/ccsi/greenhousegas.asp>



La « courbe McKinsey » du coût de réduction des émissions de GES au-delà du niveau « business as usual ». Les quantités sont évaluées en GtCO₂e¹.

¹ GtCO₂e = gigatonne d'équivalent de dioxyde de carbone; le niveau « business as usual » est basé sur une croissance des émissions tirée principalement par la demande croissante en énergie et en moyens de transport et par la déforestation tropicale.

² tCO₂e = tonne d'équivalent de dioxyde de carbone.

³ Les mesures ayant un coût supérieur à 40 € la tonne n'ont pas été prises en compte dans l'étude.

⁴ La concentration atmosphérique de tous les GES a été recalculée en équivalents CO₂; ppm = partie par million.

⁵ Coût marginal pour éviter l'émission d'une tonne d'équivalent CO₂ dans chaque scénario.

Qui plus est, la plupart de ces actions ou de ces technologies concernent le bâtiment et le transport (isolation, climatisation, éclairage, rendement des moteurs...). Il s'agit essentiellement des économies d'énergie. Le bâtiment neuf est privilégié car c'est là que les améliorations et l'introduction d'énergies renouvelables sont les plus aisées. Mais ceci ne représente un potentiel significatif qu'en période de forte croissance économique. Le patrimoine bâti existant représente un gisement plus difficile à exploiter, mais plus stable et globalement plus important.

Viennent ensuite, à coût croissant, l'amélioration des procédés de production d'électricité notamment par l'introduction du solaire et de la biomasse dans ce mix énergétique, puis le captage et la séquestration du CO₂ dans les centrales thermiques, puis les autres industries et, enfin, la modification radicale des sources d'énergie dans le transport. Arrêter la déforestation en Afrique, en Asie du Sud-Est et en Amérique du Sud, grande productrice de CO₂, aura un coût important.

3 INVERSER LA TENDANCE

1. Vers le bâtiment à énergie positive

Au lieu d'être un lieu de vie très énergivore, le bâtiment ne pourrait-il pas être, au contraire, un ensemble autonome sur le plan énergétique et, pourquoi pas, devenir producteur excédentaire d'énergie? C'est le concept de bâtiment « à énergie positive », né il y a moins de dix ans de la réflexion sur ce à quoi l'amélioration progressive de la conception architecturale et des matériaux, complétée par l'introduction de sources d'énergie renouvelables, pourrait conduire^(11, 12, 13).

On n'en est pas arrivé là directement. L'évolution s'est faite lentement. L'amélioration des matériaux a d'abord conduit à mettre l'accent sur l'isolation. Dans certains cas, l'isolation est telle que la chaleur dissipée par les appareils électriques – éventuellement quelques ampoules – suffit à assurer le chauffage du bâtiment. Equipées d'appoints solaires thermiques pour l'eau chaude et photovoltaïque pour la consommation électrique, ces premières « maisons passives » ou « passivhaus », sur-isolées, ont vu le jour dans les années 80 en Suède et en Allemagne. Les premières n'étaient pas particulièrement attractives, ressemblant plus à des casemates qu'à des pavillons, mais les architectes ont joué leur rôle et des techniques de ventilation performantes, avec récupération d'énergie, ont été introduites. Environ 10 000 de ces maisons à très basse consommation et capables de produire autant d'énergie qu'elles n'en consomment ont été construites en Europe, dont la majorité en Allemagne (4 000 logements labellisés Passivhaus).

En 1994, l'architecte allemand Rolf Disch crée la maison à énergie positive à Fribourg. En réalisant une « passivhaus » équipée de capteurs photovoltaïques, il transforma celle-

ci en minicentrale de production électrique. Un ensemble de 59 logements, l'éco-quartier Vauban, est en cours de réalisation. Tous les bâtiments sont équipés d'une toiture entièrement photovoltaïque, d'une puissance de 3 à 12 kW ce qui, même pour la fourchette basse, est supérieur à la puissance nécessaire pour couvrir l'essentiel des besoins d'une famille. D'autres bâtiments à énergie positive existent en Europe, principalement en Allemagne et en Autriche mais aussi en France depuis 2 ans⁽¹⁴⁾. Aux Etats-Unis, la même évolution – intégrant une excellente isolation, des équipements faisant appel totalement ou au moins partiellement aux énergies renouvelables, une ventilation avec récupération d'énergie et, enfin, une toiture photovoltaïque – a donné naissance au concept de « zero energy home » ou ZEH, avec des réalisations dans le neuf comme dans l'ancien.

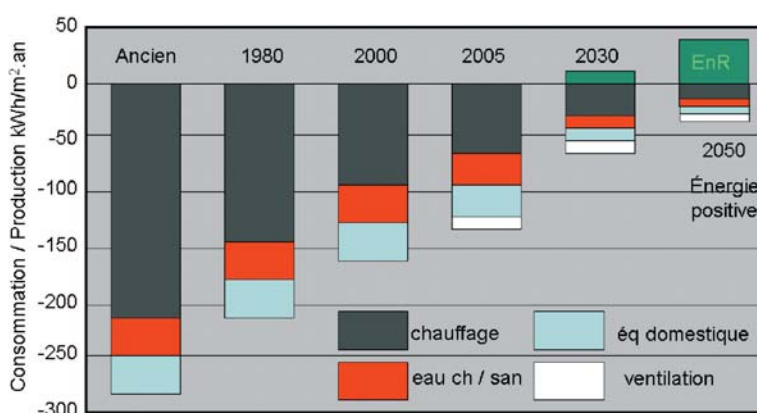
En Angleterre, un quartier d'habitation avec une densité de population particulièrement forte – BedZed, pour Beddington Zero (fossil) Energy Development – a été conçu il y a plusieurs années sur un modèle voisin, met-

¹¹ A. Maugard, J.C. Visier, D. Quenard, *Le Bâtiment à Energie Positive*, Futuribles, N°304, Janvier 2004.

¹² D. Quenard, *Vers des bâtiments à énergie positive*, dans Nouvelles Technologies de l'Energie 4. Gestion de l'énergie et efficacité énergétique, J.C. Sabonnadière, dir. Pub., Hermes-Lavoisier, 2007.

¹³ D. Quenard, *Le Bâtiment à Energie Positive*, Supplément à La Recherche, N°398, Juin 2006.

¹⁴ <http://www.plusenergie-haus.at>



Évolutions réalisées et attendues des différents postes de consommation énergétique dans l'habitat. A noter l'introduction du poste ventilation lorsque les performances énergétiques s'améliorent. Le seuil de 50 kWh/m²/an qualifie les bâtiments dits à basse consommation. De consommateur, le bâtiment peut devenir énergétiquement neutre et même devenir producteur net grâce aux dispositifs énergies renouvelables intégrés à sa structure.



© Bill Dunster Architects

En haut : un quartier d'habitation à énergie positive à Fribourg, en Allemagne.
En bas : une des réalisations pionnières, le quartier BedZed à Londres, conçu pour avoir un bilan CO₂ neutre.

tant plus l'accent sur la qualité de l'environnement et la suppression des émissions polluantes que sur les aspects strictement énergétiques.

En France, une «éco-maison» témoin conçue par la même agence ZEDfactory a été inauguré en 2008 dans la ville de Grande-Synthe à côté de Dunkerque. Dans la foulée, quatre cents habitations «zéro carbone» sont prévues.

Les tours ne sont pas en reste. Lieu de vie – essentiellement diurne – extrêmement dense, une tour est potentiellement un édifice sobre en énergie *per capita*. En revanche, l'installation des capteurs et la climatisation sobre en énergie y sont plus délicates que dans une maison individuelle ou un immeuble d'habitation et demandent des solutions innovantes. Plusieurs architectes ont conçu des projets

de tours sobres en énergie, équipées notamment de microéoliennes. A l'inverse des tours, les bâtiments très étendus comme les aéroports offrent des surfaces de toiture et des surfaces au sol très importantes, qui se prêtent bien à l'installation de capteurs et à une climatisation passive. C'est notamment le cas du Midfield Terminal de l'aéroport de Zurich, climatisé par simple passage de l'air dans les pieux de ses fondations.

L'évolution vers un bâtiment énergétiquement performant – «à basse consommation», «autosuffisant» ou même «à énergie positive» – est donc le fruit d'un ensemble de facteurs, dont le premier est une bonne implantation et une bonne intégration au site. Vient ensuite la conception globale du bâtiment, prévoyant d'emblée l'intégration des

différents éléments porteurs d'économie et de production d'énergie : l'isolation ; l'étanchéité et la ventilation (les performances de l'une implique celles de l'autre) ; le chauffage, y compris celui de l'eau chaude sanitaire ; l'éclairage et les équipements électriques ; les capteurs et convertisseurs.

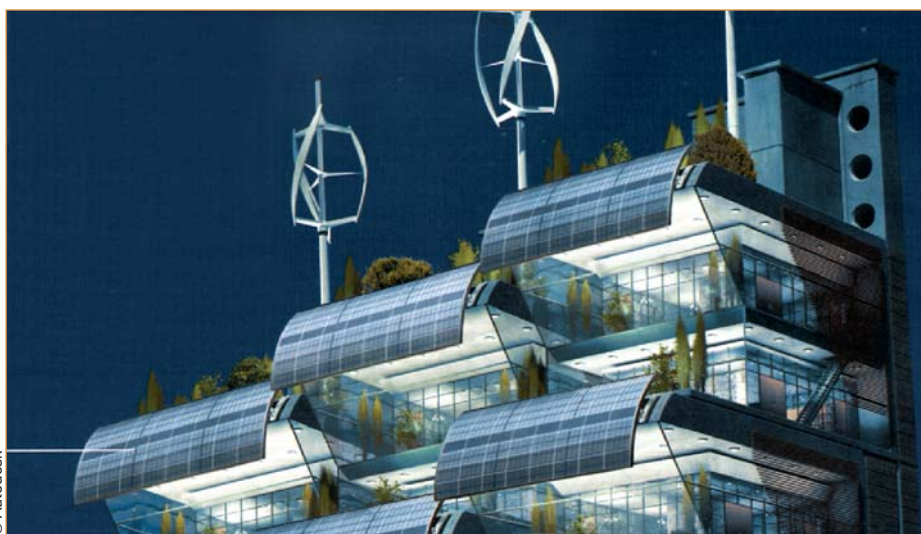
Les termes « autosuffisant » et « à énergie positive » ne sauraient cependant occulter le fait que, si le bilan énergétique des bâtiments qualifiés de la sorte est effectivement globalement nul ou même positif sur l'année, il n'en est pas ainsi à l'échelle instantanée. Les cycles et fluctuations associés aux énergies renouvelables sont rarement en phase avec ceux de la consommation. Même les bâtiments à énergie positive restent consommateurs à certains moments. Un stockage – individuel ou partagé – est donc absolument nécessaire, via un réseau dont le territoire peut aller de la maison au continent.

De nombreux matériaux performants (isolants, vitrages sélectifs, DEL, matériaux à changement de phase...) et des technologies matures (capteurs solaires thermiques, capteurs photovoltaïques en silicium, pompes à chaleur...) sont d'ores et déjà disponibles sur le marché. Ce n'est pas pour autant que des progrès de fond ne sont pas nécessaires. Par exemple, pour que le photovoltaïque puisse réellement jouer un rôle en milieu urbain dense, des surfaces supplémentaires doivent être trouvées. Les surfaces de toitures sont notoirement insuffisantes. L'intégration des capteurs au bâti et les capteurs en couches minces et poreuses, transparents dans le visible et déposés sur vitrage, sont des solutions intéressantes, car ils permettent de bénéficier des énormes surfaces de façades et de murs-rideaux disponibles en centre-ville. Les rendements de ces vitrages-capteurs sont cependant encore faibles et des progrès sont nécessaires.



Maison témoin « zéro carbone » et à très faible consommation énergétique construite par le cabinet ZEDfactory à Grande-Synthe. Ce résultat est obtenu en optimisant l'orientation, l'isolation, le chauffage, la ventilation, les équipements ménagers ainsi que l'utilisation de l'eau, et en équipant le bâtiment de capteurs solaires thermiques et photovoltaïques. Ce prototype devrait se décliner en 400 exemplaires dans un écoquartier à construire.

En parallèle, la réduction substantielle du coût des capteurs photovoltaïques opaques, à haut rendement, est aussi indispensable. Les effets d'échelle sur les technologies actuelles n'y suffiront vraisemblablement pas. Des ruptures sont nécessaires, comme la fabrication à l'aide de techniques très simples, par impression à jet d'encre par exemple. Mais pour l'instant, la combinaison d'un haut rendement et d'une technologie simple reste une gageure.



La marche vers l'habitat à énergie positive n'est pas limitée à la maison individuelle... Mais la modélisation numérique des bilans devient alors rapidement un outil indispensable.



Vitrages photovoltaïques

©Sharp

La conversion thermoélectrique – conversion directe de chaleur en électricité – est un autre domaine dans lequel le verrou technologique est lié au progrès dans le domaine des matériaux. Potentiellement, la part du rayonnement solaire utilisable pour la conversion thermoélectrique (l'effet Seebeck) n'est que légèrement inférieure à celle qui est utilisable pour la conversion photovoltaïque, mais les rendements sont, eux, largement inférieurs. La raison tient aux propriétés assez contradictoires qu'un bon rendement thermoélectrique exige en termes de physique du solide⁽¹⁵⁾. Les nanomatériaux offrent une piste intéressante, mais ce n'est pas la seule.

On pourrait penser que le confort et les performances thermiques constituent un domaine dans lequel les matériaux disponibles – et surtout leurs combinaisons – sont proches de l'optimum souhaité. Les mousses polymères et les aérogels organiques ou inorganiques ont des diffusivités thermiques et des perméabilités à l'air extrêmement faibles, difficiles à surpasser dans la course aux très faibles valeurs. Mais ils manquent d'inertie. Associés à des inclusions d'un matériau « à changement de phase » solide-liquide comme la paraffine ou un sel, ils acquièrent (en apparence) l'inertie thermique qui leur manque, grâce à l'absorption et à la restitution de la chaleur latente de fusion⁽¹⁶⁾.

Malgré leurs performances remarquables, il manque encore à ces matériaux d'enveloppe la « respirabilité » de certains matériaux naturels, liée à leur capacité d'absorption, de transfert et de changement de phase de l'eau sous forme vapeur et sous forme liquide, toutes propriétés qui dépendent des caractéristiques de l'espace poreux du matériau et des couplages thermiques et hydriques qui s'y manifestent.

2. Vers des véhicules sobres et propres

Tous ceux qui ont remplacé récemment leur vieille voiture par un véhicule neuf l'auront remarqué, malgré un poids total en nette augmentation – sécurité et insonorisation obligent – la consommation a nettement baissé. Cette évolution est générale. Certes, le moteur à combustion interne reste un piètre convertisseur d'énergie par rapport au moteur électrique par exemple, mais les progrès accomplis sur la motorisation elle-même (en particulier, l'injection directe) et son contrôle ont permis de gagner en moyenne 15 % sur la consommation unitaire depuis 1990. Les émissions de CO₂, toujours par véhicule, ont diminué de 30 % depuis 1975. Malgré cela, les émissions de gaz à effet de serre dues aux transports ont augmenté de 23 % entre 1990 et 2004, d'abord à cause de l'augmentation du parc, passé de 27 à 31 millions de

¹⁵ Un faible pouvoir de diffusion des électrons – propriété typique des matériaux cristallins – et un fort pouvoir de diffusion des phonons – propriété typique des matériaux amorphes.

¹⁶ Lors d'une élévation de la température au dessus du point de fusion de l'inclusion – typiquement lors d'une pointe de chaleur de mi-journée – celle-ci fond en absorbant une quantité de chaleur correspondant à sa chaleur latente de fusion, limitant le transfert de chaleur vers l'habitation. Lors du refroidissement nocturne, l'inclusion liquéfiée se solidifie en restituant la chaleur latente, à un moment où cette restitution est agréable ou tout au moins pas pénalisante pour le confort. Le résultat net est un lissage des cycles thermiques, analogue à celui que ferait un matériau à forte inertie thermique, massif et à forte capacité calorifique, comme le béton par exemple.

véhicules en France⁽¹⁷⁾, mais pas seulement. Les distances moyennes parcourues ont elles aussi augmenté, de 30 %. La perte de proximité entre l'habitat, le lieu de travail et les centres de service en est la cause. Cette dernière évolution touche en priorité les populations à revenu modéré, à la recherche de logements abordables.

Malgré tout, la distance moyenne parcourue reste faible, du moins pour les véhicules particuliers. La typologie des déplacements dépend fortement des groupes sociaux mais de grandes tendances se dégagent⁽¹⁸⁾. La France compte actuellement 31 millions de voitures, 6 millions de véhicules utilitaires légers et environ 640 000 camions et bus⁽¹⁹⁾. Seuls les véhicules industriels roulent réellement beaucoup (environ 200 km par jour ouvrable, en moyenne). Les véhicules personnels et les utilitaires légers roulent nettement moins : environ 35 km par jour pour les premiers, un peu plus pour les seconds. Les trois-quarts du parc de véhicules particuliers sont utilisés quasiment tous les jours, week-end compris, mais plus de la moitié des déplacements sont des trajets domicile-travail ou domicile-gare. Le grand déplacement estival annuel reste généralement une exception, sauf pour les citadins des grandes villes. Cette utilisation fréquente mais « en pointillé » cache mal le fait que les voitures sont immobilisées quasiment en permanence, dans un garage ou sur un parking.

Quelles sont les pistes de progrès pour une utilisation plus rationnelle et moins énergivore ? Elles sont de deux ordres. Une première piste est liée à une meilleure organisation du transport. L'encouragement à l'utilisation des transports collectifs et au covoiturage est une démarche « de fond », à maintenir active en permanence. La co-propriété et/ou la mise en place d'un réseau très dense de location de voiture de courte durée, décentralisée, rapide

et « légère », est une autre étape. Encore embryonnaire, ce système est néanmoins en forte expansion. Il conduit à une réduction du nombre de véhicules. Concrètement, on peut espérer qu'il évite l'achat d'un second véhicule par ménage. Enfin, l'introduction généralisée des dispositifs de guidage du trafic par TIC qui devrait permettre également des progrès importants.

Une autre piste mène au véhicule lui-même. Son allègement est un premier levier. Déjà très présents, les polymères devraient voir leur rôle encore renforcé sous forme de composites. Les alliages métalliques légers seront eux aussi utilisés plus largement. Mais c'est bien entendu sur la motorisation et les carburants que porte l'essentiel des progrès attendus en matière d'économie d'énergie et de diminution des rejets.

Le Parlement européen a publié en 2007 les résultats d'une évaluation scientifique des options technologiques alternatives en matière de transport routier et aérien⁽²⁰⁾. Pour le transport routier, cinq grandes filières technologiques ont été identifiées : hydrogène et pile à combustible, véhicules électriques sur batterie, technologies hybrides, biocarburants, gaz naturel.

A long terme, c'est la filière voiture électrique alimentée par pile à combustible qui apparaît comme la plus prometteuse, en particulier avec la pile à combustible hydrogène/air, pour autant que soient résolus les nombreux problèmes technologiques qu'elle soulève, comme par exemple la durée de vie, le coût et l'efficacité des membranes et des catalyseurs. Mais c'est la disponibilité d'une source abondante d'hydrogène « propre » qui reste la pierre d'achoppement principale. Pour l'instant, l'hydrogène n'est généralement qu'un avatar du gaz naturel. Sa production par vapo-réformage catalytique ne génère pas

¹⁷ L'augmentation notable du parc français fait cependant pâle figure à côté de l'augmentation attendue du parc mondial, qui devrait doubler d'ici à 2030. Le cap du milliard de voitures a été franchi au cours de l'été 2008.

¹⁸ Rapport du projet ETHEL (Energie, Transport, Habitat, Environnement, Localisations) de l'Action Concertée Energie du Ministère de la Recherche et du CNRS, 2004. Disponible sur <http://ethel.ish-lyon.cnrs.fr/>

¹⁹ *Les clés de l'auto*, édition 2008, disponible sur <http://www.ccf.fr>

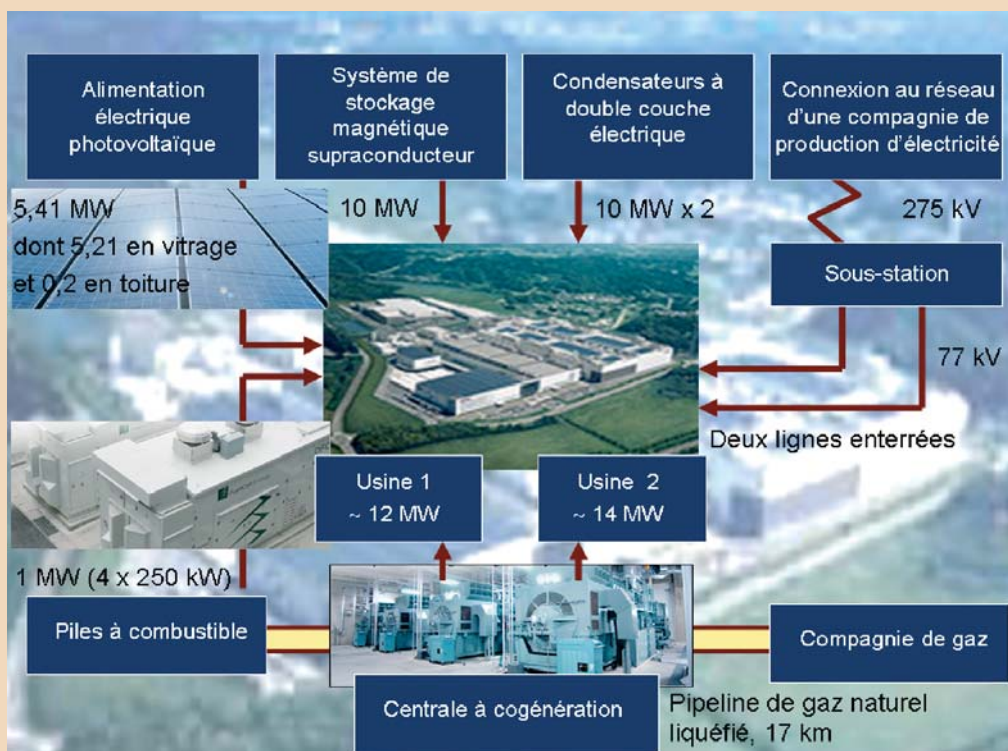
²⁰ *Alternative Technology Options for Road and Air Transport*, document IP/A/STOA/SC/2005-179, disponible sur http://www.europarl.europa.eu/stoa/publications/studies/stoa179_en.pdf

Un exemple industriel d'énergie répartie : l'usine Sharp de Kameyama

La compagnie Sharp a mis en œuvre une stratégie d'énergie répartie particulièrement volontariste dans l'ensemble de ses usines. Elle décerne en outre le label « Super-Vert » à celles qui sont particulièrement performantes sur le plan environnemental, selon les critères qu'elle a elle-même définis. La première usine à avoir décroché ce label est l'usine de Kameyama qui intègre toutes les étapes de production de téléviseurs, depuis la fabrication des écrans à cristaux liquides jusqu'au montage final des téléviseurs. L'usine

mentation de largement plus d'un millier de logements (4 kW par logement environ). Les quatre piles à combustible à haute température (650 °C, l'électrolyte est un mélange de carbonates fondus) délivrent ensemble 1 MW de puissance électrique. La chaleur dissipée est utilisée pour le chauffage. L'hydrogène qui les alimente est obtenu par réformage catalytique du gaz naturel, le même que celui qui alimente la centrale de cogénération, dont le rendement dépasse 70 % (à comparer à 33 % environ pour une centrale nucléaire). Le gaz liquéfié est amené sous forme liquide par un pipeline de 17 km venant de la ville voisine. Dans l'avenir, il est envisagé d'utiliser le biogaz obtenu par fermentation anaérobie d'eaux usées très concentrées en matières organiques.

En complément au système de production, l'usine s'est dotée d'un système de stockage à haute capacité. Il est constitué, d'une part, d'un système de stockage magnétique à supraconducteur NbTi de 1 MW et, d'autre part, d'un ensemble de condensateurs de 2 MW.



– en réalité, deux usines couplées – couvre une surface au sol de plus de 330,000 m² et est grosse consommatrice d'énergie, pour la production proprement dite et pour la climatisation.

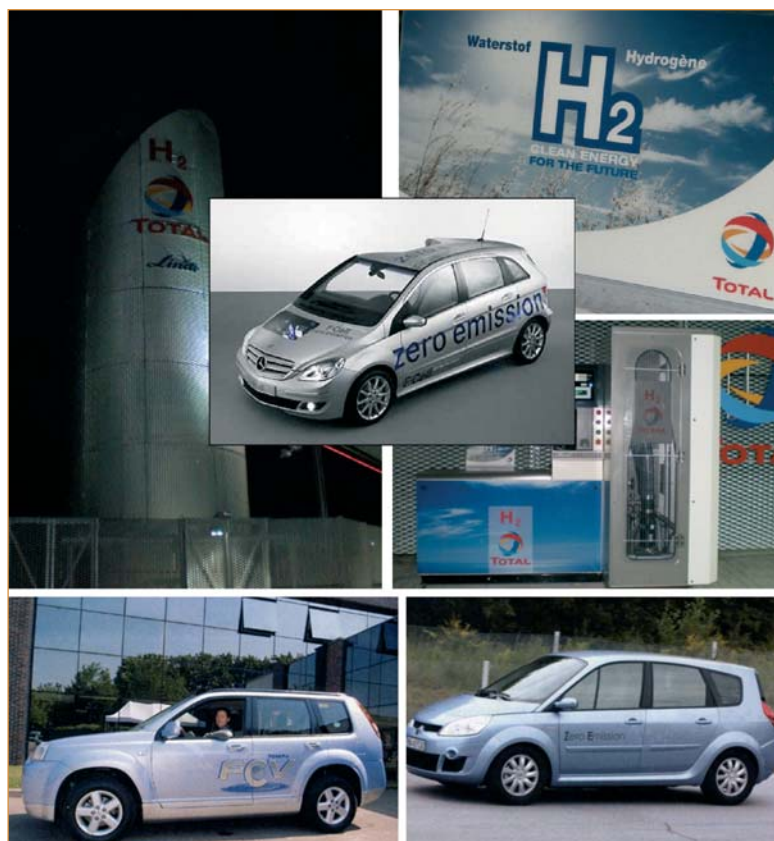
L'usine possède un système d'alimentation en énergie répartie composé d'une centrale à cogénération (électricité, chaud, froid), d'un réseau de capteurs photovoltaïques et d'une batterie de piles à combustibles. La puissance photovoltaïque installée atteint 5,4 MW environ, ce qui représente la puissance nécessaire à l'ali-

La puissance délivrée par le système d'énergie répartie installé sur site fournit environ un tiers des besoins de l'usine. En localisant ces équipements sur le site, là où se situe la demande, plutôt qu'en alimentant par une énergie électrique produite à distance, l'usine minimise les pertes de transmission et peut utiliser la chaleur co-produite avec l'électricité. Elle se met également à l'abri des coupures du réseau. Il est également plus facile d'adapter la puissance produite à la demande.

loin d'une molécule de CO_2 pour deux molécules d'hydrogène. Produit de cette manière, son intérêt est donc très limité. Son utilisation ne se justifie que si (1) le CO_2 est séquestré sur le lieu de production et (2) le rendement global de la suite « production et stockage d'hydrogène – pile à combustible – moteur électrique » est supérieur à celui d'un moteur thermique fonctionnant au gaz naturel, ce qui n'est pas le cas à l'heure actuelle.

En réalité, les filières utilisant l'hydrogène comme vecteur principal ne seront vraiment intéressantes sur le plan énergétique et « propres » sur le plan environnemental que lorsqu'elles reposeront sur de l'hydrogène produit efficacement sans émission de CO_2 . L'électrolyse de l'eau à partir d'électricité renouvelable (éolien, photovoltaïque) ou nucléaire répond à ces exigences. En particulier, le nucléaire de quatrième génération, à très haute température, devrait pouvoir fonctionner comme un co-générateur d'électricité et d'hydrogène. La photoélectrolyse de l'eau sur semi-conducteurs, la biophotolyse par « détournement » du métabolisme des organismes photosynthétiques ou encore la photosynthèse artificielle sont d'autres voies plus futuristes (surtout les deux dernières). Quelle que soit la filière, il faut garder en tête les énormes volumes de carburant exigés par le transport terrestre et aérien.

Autre problème difficile : le stockage. Les technologies utilisables en pratique se limitent pour l'instant au stockage sous forme de gaz comprimé ou sous forme liquide, ces deux technologies étant déjà mises en œuvre sur des véhicules de démonstration ou en série limitée. Même aux plus hautes pressions acceptables en pratique (700 bars), le stockage sous forme de gaz comprimé reste très volumineux. Le stockage sous forme liquide permet de réduire le volume d'un facteur 2 envi-



La Plateforme européenne sur l'hydrogène et les piles à combustible (HFP) a pour objectif de conduire à la production de plus de 400 000 véhicules à l'horizon 2020. Les réalisations en sont au stade du prototype. Mais la prétention de « zéro émission » dépend de la source d'hydrogène. Les sociétés pétrolières font, elles aussi, des efforts de démonstration.

ron, mais la liquéfaction consomme l'équivalent de 30 à 40 % de l'énergie stockée. La forme la plus prometteuse de stockage est le stockage sous forme adsorbée ou absorbée dans des solides. Le défi est de trouver des matériaux qui satisfassent simultanément trois conditions : avoir une densité d'hydrogène élevée, présenter une bonne réversibilité de charge/décharge dans un domaine de température pas trop éloigné de l'ambiante et, enfin, avoir une cinétique de charge/décharge rapide. Aucun matériau connu ne satisfait pour l'instant à ces trois conditions, sans compter le prix. Les hydrures et borohydrures d'éléments métalliques, ainsi que les carbones sont les plus prometteurs, compte tenu de leur capacité de stockage

élevée mais les problèmes de cinétique rapide et de réversibilité en conditions modérées sont loin d'être résolus.

En parallèle à la composition des matériaux, leur structuration sous forme ultradivisée, nanostructurée ou nanoporeuse est une piste intéressante car elle démultiplie les surfaces accessibles et réduit les longueurs de diffusion. Elle permet également d'associer de manière très intime des nanoparticules ou des molécules de catalyseur (pour la dissociation du dihydrogène) au matériau de stockage.

Enfin, l'infrastructure de distribution n'est pas le moindre des problèmes posés par l'utilisation de l'hydrogène dans les véhicules. L'installation d'une « pompe » à hydrogène fiable et sécurisée ne pose pas de problèmes particuliers ; l'équipement de l'ensemble du réseau routier alors que la flotte n'est qu'embryonnaire, oui ! La solution qui est déjà expérimentée en Californie est celle du clustering dans des contextes urbains ciblés. A Los Angeles, Honda a proposé en 2008 à un prix très raisonnable deux cents véhicules à pile à combustible hydrogène/air en location longue durée, dans le quartier de Santa Monica, où la distribution d'hydrogène est assurée en station service. Plus de 50 000 demandes ont été enregistrées lors du lancement de l'offre.

A court terme, avec les véhicules actuels à moteur thermique, l'introduction d'une part de biocarburants dans les produits pétroliers contribue et contribuera déjà à améliorer le bilan carbone des véhicules, pour deux raisons principales : que sont la limitation des surfaces cultivables et la compétition avec la production alimentaire, la part des biocarburants dits de première génération – le bioéthanol, obtenu en France par fermentation des sucres de betterave, de blé ou de maïs, et le biodiesel, obtenu par estérification de

l'huile de colza ou de tournesol – ne devrait pas dépasser 7 % environ. Pour atteindre ce chiffre, près de 2,5 millions d'hectares de terres sont déjà mobilisés.

Pour aller au delà, les biocarburants de seconde génération, issus de la partie ligno-cellulosique de la plante (feuilles, tige, paille, bois...), seront nécessaires. Pour l'instant, cette filière est loin d'avoir la maturité qu'ont atteint les biocarburants de première génération, dont la production utilise les sucres, l'amidon ou les huiles de la plante, molécules bien plus faciles à transformer que la lignine ou la cellulose. Deux procédés très différents sont envisagés. Le premier, thermo-chimique, fait appel à des technologies robustes et bien établies (pyrolyse, gazéification, synthèse), mais il est à rendement relativement faible. Le second, enzymatique, promet de meilleurs rendements mais il requiert des percées en génie génétique pour obtenir le cocktail enzymatique adéquat. Quelle que soit la voie choisie, avec les biocarburants de seconde génération, nous ne sommes pas sur du court terme.

Bien qu'il ne soit en aucun cas un biocarburant, le *gaz naturel* (essentiellement du méthane), avec un rapport hydrogène/carbone bien plus élevé que l'essence ou le gasoil, représente une amélioration substantielle par rapport aux carburants pétroliers actuels en termes de bilan CO₂ (un quart d'émission en moins, environ) mais ne nous libère pas pour autant de notre dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles. Une infrastructure de distribution pour certaines flottes de véhicules (mairies notamment) existe déjà. Son extension et son ouverture peuvent nous préparer à la mise en place d'une infrastructure de distribution de gaz potentiellement plus « propre », comme l'hydrogène par exemple. Contrairement au gaz naturel, d'origine fossile, le biogaz est, lui, un véritable biocarburant, d'origine renouvelable. Fruit de la fer-

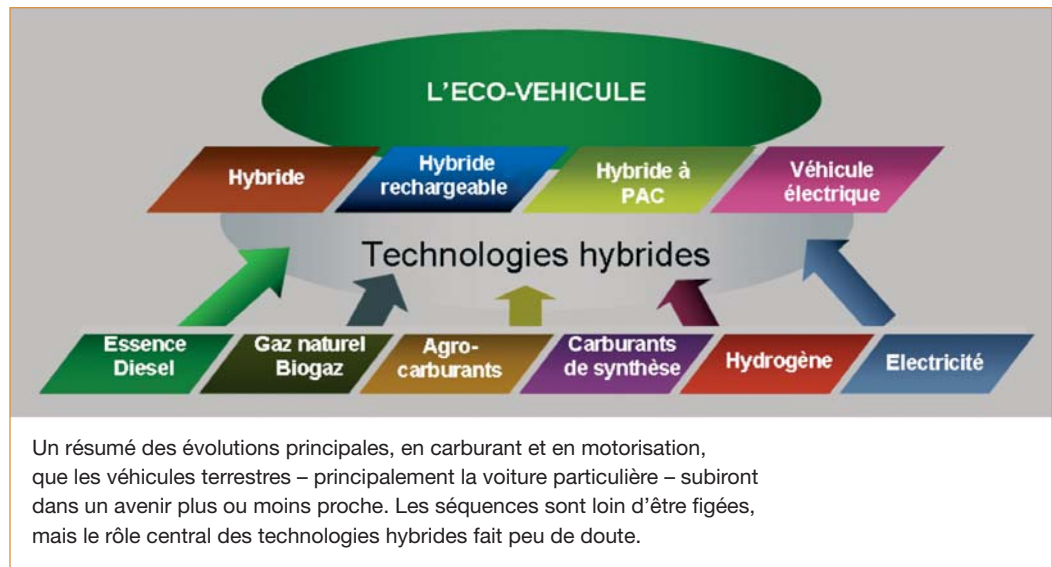


L'offre de véhicules partiellement – les hybrides – ou totalement électriques se diversifie fortement. Certains véhicules hybrides ont, en plus de leur batterie et moteur électrique, un moteur thermique fonctionnant au gaz naturel. D'autres sont équipés de batteries rechargeables sur secteur.

mentation anaérobie d'une biomasse très humide, il est composé à plus de 50 % de méthane, le reste étant du CO₂. Toutes les biomasses riches en hydrates de carbone, en protéines, graisses et même en cellulose ou hémicellulose peuvent servir de matière première. Seules les parties ligneuses (bois, paille) sont impropres à ce type de fermentation. Epuré de son CO₂, le biogaz acquiert la qualité du gaz naturel et se prête aux mêmes usages, avec un label « vert » en prime.

A moyen terme, c'est l'hybridation thermique-électrique, avec alimentation électrique sur batterie, qui semble l'évolution la plus réaliste. Quel que soit le carburant du moteur thermique – essence, gasoil, éthanol,

biodiesel, gaz naturel, biogaz ou même hydrogène – et le type de motorisation qui seront dominants dans vingt ou trente ans, la technologie hybride thermique-électrique apparaît comme un passage obligé. Sa part de marché ne cesse d'augmenter en même temps que l'offre se diversifie. Les bénéfices en termes de consommation pour de petits trajets (le cas le plus fréquent), de réduction des émissions et des nuisances sonores sont réels. La voiture hybride (VH) actuellement la plus vendue en France permet une réduction de la consommation de carburant et des émissions de CO₂, de l'ordre de 30 %, par rapport à la moyenne des véhicules du parc français.



L'hybridation du parc automobile, telle qu'elle est pratiquée et qu'elle se développe à l'heure actuelle, n'est que la première étape de son électrification. Poussée à son terme, cette électrification conduirait à des véhicules totalement électriques (VE), fonctionnant uniquement sur batteries. Force est cependant de reconnaître que, malgré des décennies de recherches, les progrès réalisés ne permettent pas encore des déplacements comparables à ceux que permettent les hydrocarbures et le moteur thermique à combustion interne, ou encore ceux que permettraient un véhicule tirant son électricité d'une pile à combustible. Différentes réalisations ont malgré tout vu le jour, dont le modèle Peugeot 307 cm³ présenté lors du dernier salon de Paris, doté d'une autonomie de 250 km, et la Chevrolet Volt de GM, dont la production devrait démarrer aux Etats-Unis. Le modèle le plus spectaculaire est sans aucun doute la Tesla, de Tesla Motors, construite sur la base d'un châssis de Lotus. Rechargeable en quelques heures sur secteur, elle a une autonomie de 250 km environ et des performances étonnantes, en accélération et en vitesse de pointe. Son succès auprès des personnalités fortunées de la côte ouest reproduit celui de la Toyota Prius à ses débuts.

La Poste, qui possède une flotte très importante de véhicules (42 000 autos), s'est dotée d'une feuille de route particulièrement ambitieuse sur la voie de l'électrification. L'ambition est de remplacer un quart de la flotte à l'horizon de cinq ans, en commençant par quelques dizaines en 2009. Cette ambition est parfaitement réaliste, compte tenu du kilométrage journalier relativement faible que parcourt chaque véhicule – rarement plus de 100 km – et de la durée nocturne disponible pour la recharge. Cette flotte de voitures électriques, dont les prototypes ont été créés par Micro-vett/Newteon et Venturi Automobiles en association avec Fiat et PSA, sera complétée par des flottes plus légères de quads électriques et de vélos à assistance électrique.

Les véhicules hybrides actuels sont loin d'atteindre, en fonctionnement tout électrique, l'autonomie des véhicules conçus pour fonctionner uniquement à l'électricité, car ils ont des batteries de faible capacité, rechargées quasiment en permanence par le moteur thermique fonctionnant à son régime optimal et par l'énergie récupérée lors du freinage. C'est ce qui, avec l'excellent rendement des moteurs électriques, permet les gains de

²¹ La définition et les implications du concept de voiture propre, Christian Cabal et Claude Gagniol, rapporteurs ; rapport réf. 2757 (Assemblée Nationale) ou réf. 125 (Sénat) de l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, 2005.

consommation et d'émission de CO₂. En fonctionnement tout électrique, ils n'ont qu'une autonomie de quelques kilomètres, insuffisante pour couvrir une part significative des déplacements.

Un objectif raisonnable pour le court terme serait d'avoir des véhicules capables de couvrir quelques dizaines de kilomètres en tout électrique. On estime qu'avec une autonomie de 40 km, c'est plus de deux tiers des déplacements qui seraient assurés⁽²¹⁾. Une telle autonomie est à portée des batteries existantes de type nickel-hydrures ou lithium-ion (les batteries des VH actuels), sans pénalisation pondérale excessive. En les rendant rechargeables sur le réseau, à la maison, au travail ou dans les parkings urbains pour autant qu'ils soient équipés de bornes, on aboutit à un concept original qui est celui de véhicule hybride rechargeable (VHR, ou PHEV pour «plug-in hybrid electric vehicle») dans lequel la motorisation des VH est complétée par des batteries de plus forte capacité.

Dans le spectre des technologies de propulsion qui vont du véhicule conventionnel à moteur thermique au véhicule tout électrique en passant par les hybrides actuels, les VHR se situent entre les deux derniers. Ils ont la possibilité de fonctionner soit en mode hybride normal, alimenté par le carburant – quel qu'il soit – du moteur thermique, soit en mode tout électrique, grâce à l'énergie fournie par un réseau. Ils offrent le meilleur des

deux technologies, avec une grande autonomie en cas de besoin et une réduction très importante des émissions (un facteur 4 par rapport à la moyenne, avec une autonomie électrique de 60 kilomètres), pour autant que l'électricité soit produite «proprement». En dehors des performances et de la durée de vie des batteries, c'est évidemment le surcoût de ce type de véhicule qui décidera de son succès. Une étude économique américaine⁽²²⁾ aboutit à la conclusion qu'au prix extrême atteint par le pétrole à l'été 2008 (5 dollars US le gallon, soit un euro le litre, environ), c'est une réduction de plus de 50 % du prix des batteries qui est encore nécessaire.

Aux Etats-Unis et en Grande Bretagne, certaines sociétés indépendantes proposent déjà des kits de transformation de VH Toyota Prius et Ford Escape en VHR. En France, EDF et Toyota ont officiellement annoncé dès 2007 un partenariat technologique pour le développement et l'évaluation de VHR en Europe. L'objectif de la collaboration est une commercialisation et le développement d'un réseau de recharge pour VE et VHR. Dans le créneau VHR, leurs efforts se sont concrétisés sous la forme d'une Toyota Prius rechargeable, dotée d'une seconde trappe pour la connexion à la borne de recharge.

²² *An innovation and policy agenda for commercially competitive plug-in hybrid electric vehicles*, D.M. Lemoine, D.M. Kammen et A.E. Farrell, Environ. Res. Lett. 3 (2008) paper 014003 (10 p.)

4 LA CONVERGENCE BÂTIMENT – VÉHICULE – RÉSEAU : «HOME-TO-GRID» «VEHICLE-TO-GRID» «VEHICLE-TO-HOME»

Avec des «gisements» d'énergie durable de mieux en mieux exploités, avec des bâtiments non seulement peu gourmands mais aussi producteurs d'énergie par intermittence grâce à des capteurs (solaires, éoliens, thermiques...) intégrés au bâti, et avec des véhicules sobres mus au moins partiellement par l'énergie électrique, (presque) tous les éléments essentiels sont réunis pour concevoir une manière radicalement différente de gérer la production et la circulation de l'énergie, en particulier électrique.

Le branchement du bâtiment sur le réseau national de distribution électrique est de l'histoire ancienne dans notre pays, comme dans tous les pays développés, à quelques exceptions près qui sont des zones de peuplement particulièrement peu denses. Mais ce branchement a pendant longtemps été unidirectionnel, du réseau vers l'habitat. Ce n'est qu'avec la montée en puissance du photovoltaïque et de l'éolien que la possibilité d'un transfert du bâtiment vers le réseau a été introduite par une décision politique qui en a fixé les conditions, plus incitatives que réellement économiques pour l'instant. C'est le concept «*Home-to-Grid*» ou H2G. Cet apport d'énergie électrique ne fait pas forcément le bonheur des compagnies de distribution, compte tenu de son caractère intermittent et du manque de coïncidence avec les pics de demande. Néanmoins, il ne fait pas de doute que la production décentralisée d'énergie électrique par des bâtiments à énergie positive se développera dans le futur.

Comment résoudre le problème du déphasage entre production et utilisation, celui du

stockage nécessaire de l'énergie excédentaire à certains moments, et celui de la satisfaction des pics de consommation à d'autres ? C'est précisément sur ce point que les véhicules hybrides rechargeables – ou, plus généralement, tout véhicule à propulsion au moins partiellement électrique – peuvent jouer un rôle inattendu, auquel les chercheurs de l'Université de Delaware ont pensé il y a plus de dix ans^(23, 24).

Les véhicules particuliers étant immobilisés plus de 95 % du temps, au garage ou au parking, pourquoi ne pas se servir des batteries de VHR (ou de VE dans un futur plus lointain) connectées au réseau, soit directement, soit via le bâtiment, comme moyen de stockage et comme source d'énergie ? Une batterie de VHR fournit une puissance de l'ordre de 10 kW. Il est facile de voir qu'avec cette puissance, même une infime fraction de la puissance totale que représente les 31 millions de véhicules du parc français – soit plus de 300 GW, plus de 6 fois tout le parc nucléaire français – (à supposer qu'ils soient tous VHR) serait suffisante pour satisfaire sans problème les pics de demande.

Comme pour le bâtiment, le caractère novateur de ce concept – celui de «*Vehicle-to-Grid*» ou V2G – réside dans la bidirectionnalité de la connexion. C'est ce qui permettrait de lisser le fonctionnement du réseau classique, en demande comme en production, les batteries absorbant l'excédent de production centralisée en période creuse, et apportant l'appoint nécessaire en période de pointe. Sa mise en pratique demande, bien entendu, la mise en place de garanties (financières, en charge résiduelle, en délais de recharge et en durée de vie de la batterie) pour les propriétaires de voitures.

Dans la même logique, pourquoi ne pas utiliser la voiture, lorsqu'elle est «arrimée» au

²³ *Electric Vehicles a New Source of Power for Electric Utilities*, W. Kempton & S. Letendre, Transportation Research, 2, 157-175 (1997)

²⁴ *Vehicle-to grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue*, Willett Kempton & Jasna Tomic, J. Power Sources, 144, 268-279 (2005)

Un exemple industriel de V2H : le siège de Google à Mountain View

La société Google, l'un des plus gros investisseurs en technologie photovoltaïque de Californie, a mis le concept en pratique en se dotant d'une flotte de Toyota Prius rechargeables, grâce à l'installation dans chaque véhicule d'une batterie Li-ion de 4,7 kWh. Ces véhicules sont mis à disposition des employés qui ont rejoint leur lieu

de travail en covoiturage, en transport en commun, à pied ou à vélo, pour leurs déplacements professionnels durant la journée. Rechargeables sur secteur, elles peuvent utiliser la production photovoltaïque de 1,6 MW de la compagnie. L'amortissement de l'installation photovoltaïque est prévu en 7,5 ans.



Le campus Google à Mountain View en Californie avec son installation photovoltaïque de 1,6 MW et sa flotte de véhicules hybrides rechargeables.

bâtiment, comme moyen de stockage de l'énergie renouvelable produite par des sources intermittentes, comme source de puissance auxiliaire, ou comme source d'énergie de secours en cas de besoin ? C'est le concept « *Vehicle-to-Home* » ou V2H. Le véhicule devient un équipement de la maison, moyen de déplacement mais aussi moyen de stockage et source d'énergie. Pour sa recharge, il pourrait bénéficier directement des capteurs du bâtiment ou du quartier, si un réseau local est installé. Le

VHR peut donc également contribuer fortement au lissage des fluctuations d'électricité de source renouvelable.

En France, la convergence bâtiment-véhicule-réseau, déclinée sous diverses formes dans ce qui précède, est un concept dont la promotion est activement faite par le CSTB, l'accent étant essentiellement mis sur l'autonomie énergétique pour se loger et se déplacer⁽²⁵⁾.

²⁵ Daniel Quenard, *Vers l'autonomie énergétique pour se loger et se déplacer*, Webzine du CSTB, mars 2008 ; *Le bâtiment à énergie positive*, La Recherche N° 398, juin 2006 ; *Vers l'autonomie énergétique*, La Recherche N° 415, janvier 2008

La route de 5^e génération

Dans une perspective encore plus large que l'intégration bâtiment-véhicule-réseau, la route elle-même – ou, plus généralement, la voie de circulation – pourrait devenir un élément essentiel du paysage énergétique. De simple chemin qu'elle était il y a quelques millénaires, la route s'est progressivement durcie et lissée pour s'adapter au transport sur roues. Elle s'est aussi équipée pour fournir les services et la sécurité que les usagers sont en droit d'attendre. Mais la plus belle des autoroutes actuelles pourrait bientôt faire pâle figure par rapport à

La signalisation du futur dépassera de loin le stade de la reconnaissance purement visuelle que nous connaissons actuellement. Les informations sur les limitations de vitesse et les dangers seront transmises directement au véhicule ; la trajectoire de ce dernier sera en permanence comparée à la trajectoire idéale et rectifiée si nécessaire, en tenant compte de la présence des autres véhicules ; les distances entre véhicules seront régulées pour optimiser les flux. Tout ceci grâce à des dispositifs communicants intégrés aux véhicules et à la chaussée⁽²⁶⁾.



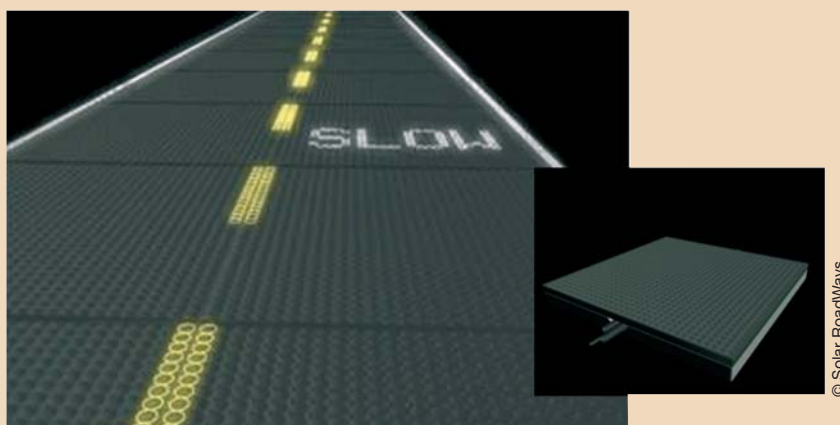
La route de 5^{ème} génération sera totalement communicante avec les véhicules pour optimiser la sécurité et les flux.

ce que nous prépare la « route de 5^e génération ». Cinquième génération, car elle succède au chemin mulotier, à la voie romaine, à la route moderne en macadam et à l'autoroute. De simple support – certes confortable et sûr – aux véhicules qu'elle était, la voie de circulation du futur deviendra, à égalité avec le véhicule, le principal élément très communicant et très actif d'un « système de transport intelligent » qui pourrait, en prime, devenir un important pourvoyeur d'énergie durable.

La route de 5^e génération sera « ouverte » en permanence⁽²⁷⁾. Les enrobés drainants actuels, qui rendent la route sèche et silencieuse, même sous pluie battante, donnent déjà un premier aperçu du confort qui nous attend. La route du futur s'auto-diagnostiquera en permanence. En cas d'intempéries hivernales, elle sera capable de se réchauffer et d'éliminer la neige et le verglas. Elle sera aussi auto-nettoyante, grâce à un revêtement photocatalytique. Mieux encore, elle sera auto-réparante. Les fissurations de fatigue se cicatrifieront

²⁶ Un premier système embarqué de « Limiteur s'Adaptant à la Vitesse Autorisée », le LAVIA a été mis au point au LCPC en collaboration avec l'INRETS et les constructeurs automobiles. Activable ou désactivable à la convenance du conducteur, ce système repose encore, en plus d'une localisation précise du véhicule par GPS, sur une énorme base de données contenant toutes les limitations de vitesse du territoire. Ceci pose de délicats problèmes de maintenance et de fiabilité, que la signalisation communicante éliminera.

²⁷ Concept « Forever open road » promu par le FEHRL – Forum of European Highways Research Laboratories – qui réunit le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, France), le BAST (Allemagne), le DRI (Danemark), le RWS DVS (Pays-Bas) et le TRL (Royaume-Uni).



La route photovoltaïque, vue par Solar RoadWays

d'elles-mêmes⁽²⁸⁾. Enfin, dernier fleuron, elle sera « verte ». Ses composants auront un faible contenu en CO₂ et seront recyclables.

D'où cette chaussée tirera-t-elle l'énergie nécessaire à toutes ses fonctionnalités ? Du soleil, essentiellement. Avec environ 7 000 km d'autoroutes, 12 000 km de routes nationales et 1 000 000 de km de voies départementales et communales, le réseau routier est un gigantesque capteur, très bon absorbeur thermique de surcroît puisque presque entièrement noir⁽²⁹⁾. Stockée sous forme thermique et partiellement électrique grâce à des capteurs photovoltaïques, cette énergie serait disponible lorsque le besoin s'en ferait sentir. Certains vont plus loin. Aux États-Unis,

la société Solar Roadways a reçu un financement du Département of Transport pour développer un démonstrateur de route photovoltaïque en verre⁽³⁰⁾. Démontable et constituée de modules intégrant des capteurs PV, des DEL pour la signalisation au sol et des supercondensateurs pour le stockage, cette chaussée multicouche est conçue pour avoir une durée de vie de plus de vingt ans sans entretien. Donner à la surface de verre une adhérence comparable à celle des meilleurs revêtements actuels n'est pas le plus mince des problèmes à résoudre. L'enjeu est impressionnant car il s'agit ni plus ni moins que de transformer le réseau routier en réseau pourvoyeur d'énergie électrique à l'échelle nationale.

²⁸ Des élastomères d'origine végétale capables de se cicatriser par simple contact après rupture ont été mis au point à l'École Supérieure de Physique et Chimie Industrielles de Paris, ESPCI-ParisTech : *Self-healing and thermoreversible rubber from supramolecular assembly*, P. Cordier, F. Tournilhac, C. Soulie-Ziakovic et L. Leibler, *Nature*, 451, 977-980 (2008). Ces matériaux sont extrêmement prometteurs pour les liants routiers, dont les plus performants à l'heure actuelle contiennent déjà une proportion notable d'élastomères.

²⁹ Dès les années 80, le LCPC envisageait d'utiliser la route comme producteur d'eau chaude, mais c'était trop tôt...

³⁰ www.solarroadways.com

5

QUELS RÉSEAUX ?

La multiplication des sites de production d'électricité (photovoltaïque, éolien, biomasse, déchets, cogénération, centrales classiques...) et la bi-directionnalité généralisée des flux d'énergie entre bâtiment, véhicule, route et réseau n'est pas sans poser de problèmes. Les réseaux centralisés actuels qui représentent des investissements colossaux – de l'ordre de plusieurs dizaines de milliards d'euros pour le réseau français de transport (RTE) et de distribution (essentiellement ERDF) – n'ont pas été conçus pour gérer une multitude d'échanges fluctuants. Les adapter à cette fonction ne serait pas une mince affaire.

Il est hors de propos que les réseaux actuels, très liés aux grands pourvoyeurs d'énergie, disparaissent, mais on peut envisager qu'ils s'ouvrent, qu'ils deviennent plus indépendants et qu'ils soient complétés par des mini-réseaux permettant à des particuliers et des entreprises de produire de l'électricité et de l'utiliser au plus près de son lieu de production.

Les « autoroutes » de l'énergie électrique resteront cependant indispensables pendant longtemps, d'autant que la production d'électricité à partir de sources renouvelables peut parfaitement être mis en œuvre sous forme de « centrales décentralisées » ou même « délocalisées ». Les parcs d'éoliennes flottantes (mais arrimées) au grand large et les fermes solaires thermiques ou photovoltaïques en milieu désertique en sont les meilleurs exemples. La transmission de courant continu à très haute tension (TCCHT), 800 kV, serait alors nécessaire pour acheminer l'énergie avec un minimum de pertes sur des distances pouvant atteindre 4 000 kilomètres.

L'Algérie a affiché ses ambitions dès 2002 en se dotant d'une entreprise nationale spécialisée, New Energy Algeria (NEAL). Cette société a entamé en 2007 la construction d'une centrale hybride solaire-gaz comprenant une centrale à gaz de 150 MW et une centrale solaire de 30 MW. L'ouverture est prévue en 2010 avec, par la suite, une évolution vers une part solaire plus importante. Plus significatif encore a été le lancement fin 2007 d'un



projet de connexion électrique TCCHT entre Adrar et Aix-la-Chapelle.

Plus fondamentale encore que l'ouverture et la répartition locale des réseaux électriques, est la nécessaire convergence des réseaux énergétiques et des réseaux d'information. Pour optimiser le système, tous ses nœuds de production, de stockage et d'utilisation, de la centrale nucléaire au lave-linge, devront être interconnectés de manière à en réguler le fonctionnement de la manière la plus intelligente possible, compte tenu du prix instantané (et local) de l'électricité. Ceci implique de doter tous les équipements de capacités d'interaction.

Ces réseaux intelligents pourront gérer activement la production, la consommation, la conversion et le stockage de l'énergie, ce qui signifie que le réseau pourrait moduler son fonctionnement non seulement en allant chercher l'énergie disponible, par exemple dans des piles à combustible fixes, des bâtiments photovoltaïques ou des batteries de VHR, tout en la payant au juste prix, mais qu'il pourrait aussi en cas de besoin ralentir la recharge d'un VHR ou modifier le fonc-

tionnement de l'électroménager domestique. Un système domotique connecté à ce réseau pourrait enclencher automatiquement des usages électroménagers dès qu'un niveau tarifaire particulièrement intéressant serait atteint ou simplement prévenir le consommateur.

L'Europe s'est dotée en 2005 de la Plateforme Technologique (*European Technology Platform* ou *ETP SmartGrids*) afin de relever ce défi^(32, 33). L'objectif est de doter l'Europe d'un réseau trans-européen capable d'exploiter de manière optimale – en fiabilité, en coût et en caractère renouvelable – non seulement de grandes centrales mais également des générateurs plus petits et décentralisés, à travers toute l'Europe. L'agrégation des générateurs décentralisés en mini ou microréseaux ou centrales « virtuelles » facilitera leur intégration. La philosophie générale est celle d'un service à l'utilisateur totalement bidirectionnel, fondé sur une architecture intelligente, multiéchelles (locale et globale) et mettant en œuvre de multiples formes d'énergie. Le même concept est étudié aux Etats-Unis avec *IntelliGrid*⁽³⁴⁾.

³² *Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future*, European Commission Publications Office, document EUR 22040 (2006), disponible sur <http://www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf>

³³ *Strategic Research Agenda for Europe's Electricity Networks of the Future*, European Commission, Directorate-General for Research Cooperation / Energy, document 22580 (2007), disponible sur http://www.smartgrids.eu/documents/sra/sra_finalversion.pdf

³⁴ <http://www.intelligrid.info/>

Les centrales « décentralisées »

Jusqu'à présent, les éoliennes marines étaient implantées par faible profondeur. Les parcs éoliens offshore danois, qui font référence, existent depuis plus de dix ans, mais sont toujours situés près des côtes, à moins de 10 m de profondeur. L'extension de ces zones est limitée par différentes contraintes, qui n'existent pas si l'implantation est faite à plus grande profondeur, de l'ordre de quelques centaines de mètres. Ceci implique cependant de passer d'une installation sur piliers à une installation sur flotteurs sous-marins, ancrés (mais pas posés) au fond. L'Allemand Siemens et le Norvégien StatoilHydro travaillent ensemble sur un projet de ce type au large de la Norvège.

Pour le solaire, le projet le plus ambitieux est sans nul doute le Plan Solaire Méditerranéen, projet phare de l'Union Pour la Méditerranée (UPM) lancée en 2008. Ce projet vise à la construction de capacités de production d'électricité bas carbone – essentiellement d'origine solaire thermique

– d'une puissance de 20 Gigawatt à l'horizon 2020. Une partie de cette production serait consommée par le marché local et une partie serait exportée vers l'Union Européenne.

Ce n'est pas le seul projet de ce type, ni même le premier. Le projet TREC (Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation) a vu le jour en 2003 à l'initiative du Club de Rome, de la Fondation Hambourgeoise de la Protection du Climat et du National Energy Center of Jordan (NERC). TREC promeut le concept « DESERTEC »⁽³¹⁾ pour la sécurité de l'approvisionnement en énergie et en eau potable en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, grâce au développement des énergies solaires et éoliennes en zone désertique.

La technologie favorisée est le solaire thermique à concentration, générant de la vapeur pour actionner des turbines et des alternateurs avec, en parallèle, des réservoirs de chaleur (sels fondus) capable de stocker de la chaleur pendant la journée et de la restituer la nuit afin de garantir une production électrique ininterrompue. La chaleur résiduelle du cycle de production d'électricité peut permettre, par cogénération, de dessaler l'eau de mer. Deux projets de production couplée d'électricité et d'eau potable sont à l'étude : l'un en Egypte, pour alimenter la bande de Gaza qui manque cruellement des deux, l'autre pour alimenter la ville de Sanaa au Yemen, dont les réserves en eau potable arrivent à épuisement.



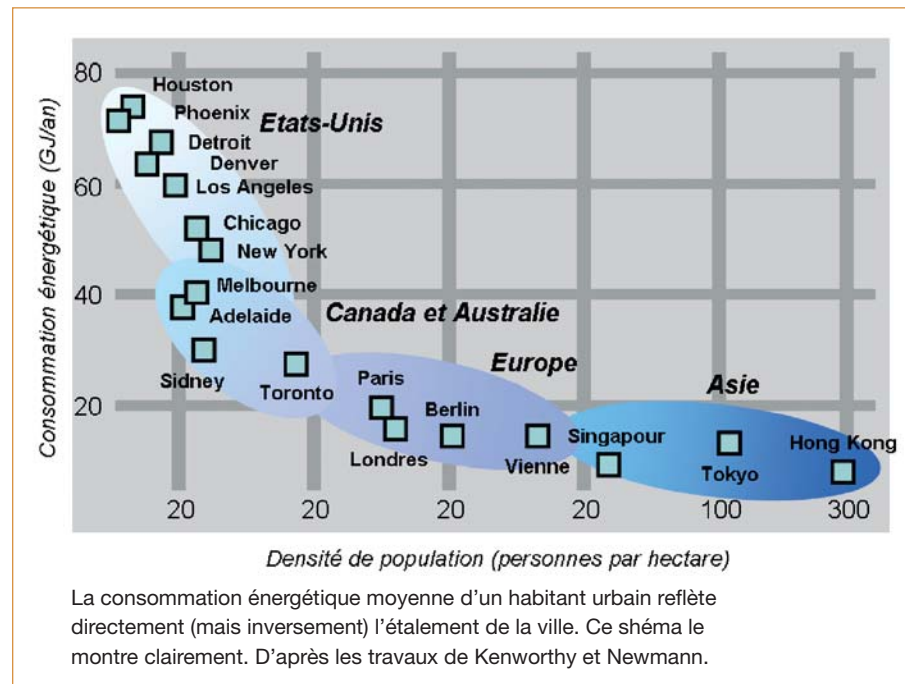
Les centrales solaires à concentration, ici la centrale PS20 en Espagne.

³¹ <http://www.DESERTEC.org>

QUELLES VILLES? QUELS TERRITOIRES?

2008 restera marquée dans l'histoire de l'humanité. Désormais, plus de la moitié de l'humanité vit en milieu urbain et cette fraction n'ira qu'en s'accroissant encore dans les prochaines décennies pour atteindre probablement 60 % en 2030 et 70 % en 2050⁽³⁵⁾. Les trois quarts de cette population urbaine se trouveraient alors en Asie et en Afrique. Bouleversante sur le plan social, cette évolution est également loin d'être innocente sur le plan énergétique et environnemental, car derrière le constat fait plus haut d'une domination des bâtiments et des transports dans la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre se cache en réalité le poids de la civilisation urbaine. Le monde s'urbanise⁽³⁶⁾ car c'est essentiellement la ville qui génère les emplois, qui concentre la vie culturelle et les soins de santé, tous facteurs positifs pour la qualité de la vie. Mais la civilisation urbaine dans son mode actuel d'organisation et de fonctionnement n'est pas durable, car incompatible avec les ressources et la préservation de la planète. Univers de tous les possibles pour l'individu d'aujourd'hui, elle en fait payer le prix fort aux générations à venir.

Souvent examinée sous l'angle du choix entre ville dense et ville étalée, la politique de la ville ne saurait cependant se résoudre à une simple question de densité⁽³⁷⁾. La ville est, bien entendu, toujours un milieu dense comparé au reste du territoire – les 3,3 milliards d'urbains de 2008 n'occupent que 3 % environ de la surface émergée de la planète – mais, à population égale, cette densité varie notablement, même au sein d'un même continent. La ville étalée est pénalisée par les déplacements qu'elle engendre, mais c'est son unité de base, la maison individuelle, qui a le plus



grand potentiel d'énergie positive. La ville dense est celle qui se prête le mieux aux transports en commun et aux commerces de proximité, mais elle draine et concentre des flux énormes de biens, d'énergie et de nourriture, souvent de sources très éloignées, totalement incapable qu'elle est d'assurer sa propre subsistance. C'est aussi la ville dense qui a l'offre culturelle la plus riche, mais c'est elle qui engendre les plus grandes aspirations à s'évader, en week-end ou en vacances, avec de longs déplacements à la clé.

Ville dense et ville étalée sont donc toutes deux à améliorer. La première, en l'aérant, la rendant plus vivable et en diminuant sa dépendance extérieure. La seconde, en la noyant de centralités. Dans les deux cas, l'évolution souhaitable est un surcroît d'autonomie. L'énergie partagée, en créant des communautés et des territoires d'énergie durable⁽³⁸⁾, participe à cette évolution mais, seule, elle n'y suffira pas. La récupération des eaux de pluie, la lutte contre l'imperméabilisation des sols, la gestion des déchets à considérer comme des ressources et la réintroduction de circuits alimentaires de proximité (notamment de petit commerce) sont d'autres éléments importants.

³⁵ *Perspectives de l'urbanisation mondiale. Revision 2007*, New York, Nations Unies (26 février 2008)

³⁶ *Vivre en ville*, Observatoire mondial des modes de vie urbains 2008/9, ouvrage collectif sous la direction de J. Damon, PUF et Veolia Environnement, Paris (2008)

³⁷ *Un sujet émergent du Grenelle : la ville durable*, Alain Maugard, PCM N°10 (2007)

³⁸ *A Renewable Energy Community : Key Elements*, N. Carlisle, J. Elling & T. Penney, National Renewable Energy Laboratory Technical Report NREL/TP-540-42774 (2008)



© Foster & Partners

Certains pays émergents ont les moyens – financiers et territoriaux – de faire table rase de l'existant et de concevoir des éco-villes nouvelles dotées des technologies leur permettant d'avoir un bilan carbone quasi nul. C'est le cas du projet Masdar à Abu Dhabi. Conçue pour 50 000 habitants environ, la ville sera compacte afin de favoriser au maximum les déplacements à pied ou à vélo, les déplacements plus longs s'effectuant dans

de petits véhicules collectifs ou (momentanément) privés, sur rail. La ville sera quasi-autonome en énergie grâce à l'énergie solaire. Elle s'alimentera en eau de mer dessalée, tout en économisant 80 % de cette eau grâce au recyclage. Les eaux usées seront utilisées pour l'irrigation des cultures destinées à l'alimentation et aux biocarburants.

7 QUELLE RECHERCHE ?

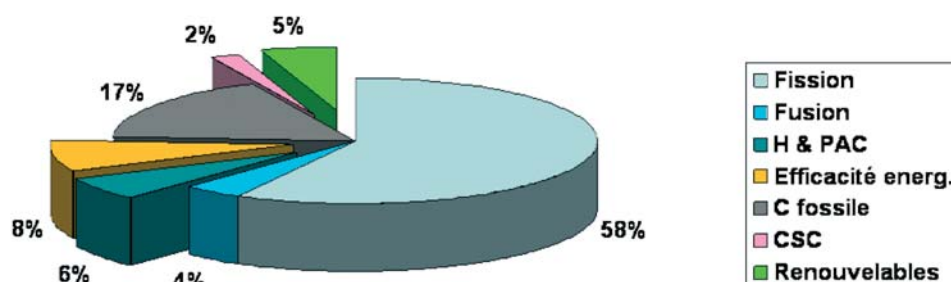
L'évolution – réelle ou prospective – vers des modes décentralisés de production, de stockage, de distribution et, surtout, de gestion d'énergie, telle qu'elle est brossée dans les paragraphes qui précèdent, suscitent des besoins multiples et extrêmement divers en matière de recherche, allant de la physique et de la chimie du solide les plus fondamentales à l'urbanisme et à l'aménagement du territoire en passant par le génie des matériaux et la gestion des réseaux complexes. L'action de l'ANR est globalement en cohérence avec ces besoins, à travers ses programmes passés et présents sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment (PREBAT puis HABISOL), le solaire photovoltaïque (Solaire PV, puis HABISOL), le véhicule sobre et propre (PREDIT, VTT), le stockage d'énergie (Stock-E), l'hydrogène et les piles à combustible (PAN-H, H-PAC) ou encore les Villes Durables. On peut y rajouter le programme Bio-énergies qui finance des recherches sur l'une des sources les plus importantes d'énergie renouvelable de la planète. Seule manque encore à l'appel pour l'instant la conception et la gestion des réseaux complexes d'information et d'énergie.

Si, dans l'absolu, l'action de l'ANR dans le domaine de l'énergie est relativement mo-

deste, c'est loin d'être le cas si l'on se focalise sur les énergies renouvelables et les éléments constitutifs du concept d'énergie répartie. La France a dépensé en 2006 environ 810 millions de dollars pour des recherches sur l'énergie, soit environ 0,034 % de son PIB, ce qui la place au quatrième rang mondial après le Japon, la Finlande et la Suède.

La part consacrée à l'électronucléaire « classique » (la fission) représente 58 % de cette somme et la part consacrée à la fusion 4 %. C'est donc près des deux tiers de l'effort national dans le domaine de l'énergie qui est encore consacré au nucléaire civil. Cette situation, déséquilibrée par rapport à l'importance réelle de l'électricité nucléaire dans le panier énergétique national, primaire ou final, est sans aucun doute le reflet de l'histoire qui a vu notre pays faire un effort remarquable dans ce domaine, effort qui s'est concrétisé par une position industrielle enviable. A l'heure actuelle, elle est anachronique.

Les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique (bâtiment et véhicule), l'hydrogène et la pile à combustible représentent pour leur part 19 % de l'effort national, soit environ 150 M€. C'est sur ces trois postes, auxquels on peut rajouter la séquestration et le stockage géologique du CO₂, que l'effort de l'ANR dans le domaine de l'énergie est



Parts respectives de divers thèmes de recherche dans l'effort national de recherche sur l'énergie en 2006. (source : DGEMP) (NB : CSC = capture et séquestration du carbone)

concentré et il y représente 60 % de l'effort total. Les projets soutenus par l'ANR sont donc des éléments-clés de l'action nationale. Les pages qui suivent présentent une sélection de projets soutenus par l'ANR. L'ANR étant une institution encore jeune, la plupart de ces projets ont été sélectionnés dans les premiers appels à propositions (appels 2005 et 2006, projets entamés en 2006 et 2007). Bon nombre d'entre eux ne sont pas encore terminés. Ils illustrent des avancées importantes et/ou des approches originales dans les domaines techniques évoqués dans cette introduction : la conception de bâtiments « in-

telligents » et économes en énergie, les matériaux et les technologies de la conversion photovoltaïque, son intégration au bâtiment, les piles à combustibles pour applications mobiles ou stationnaires, l'hydrogène comme vecteur énergétique, le stockage de l'énergie électrique, le véhicule propre et sobre, les micro-réseaux...

Au-delà de leur thème spécifique, ces projets illustrent l'un des aspects les plus riches de la vocation de l'ANR : celui d'être une agence qui soutient de manière équilibrée la recherche fondamentale et la recherche industrielle.

Projets labellisés par les pôles de compétitivité retenus dans le cahier

Pôles de compétitivité	Nombre de projets labellisés	Acronymes des projets
Tenerdis	15	ÆTIC, TWIN, MULTIXEN, QCPASSI, NANORGYSOL, SETHER, CATHY, FISYPAC, AMMPERE, ROLLPV, ARCHELIOS, DYNASIMUL, MaisonPassive, VALERIE, LiPV
Capenergies	6	Performance PV, SOLSTOCK, SOLEDO, MULTISOL, DIAPASON, MATHYSSE
MTA	4	HYBOU, LIFEMIT, MICRO 2, I-STARS
Derbi	3	THRI-PV, SolarGeoTherm, ESSI
Axelera	2	AGRI-ELEC, CATHY
S2E2	2	MENHYR, HYBOU
Advancity	1	ATESTOC
Automobile haut de gamme	1	ABHYS
Elopsys	1	CONAPOSOL
Minalogic	1	THERMAESCAPE
Mov'eo	1	ARCHYBALD
Véhicule du Futur	1	DIAPASON

Partie 2

62 projets financés par l'ANR

L'énergie répartie s'appuie sur une colonne vertébrale qu'est le réseau de transport et de distribution, éventuellement associé à du stockage de grande capacité, destiné à faire coïncider les besoins avec les impératifs de la production, notamment en présence d'énergies renouvelables intermittentes. A une extrémité de cette chaîne, se trouvent les moyens de production, aujourd'hui dominés par le parc des centrales nucléaires pour l'électricité et par les raffineries de pétrole pour les carburants destinés essentiellement au transport. A l'autre bout de ce réseau, les « consommateurs » que sont les bâtiments, les véhicules de transport..., doivent être équipés et optimisés pour utiliser au mieux l'énergie distribuée par ce réseau, en intégrant éventuellement des moyens de stockage et de régulation intelligente adéquats. Le développement de nouvelles générations de ces dispositifs, mieux adaptées aux nouvelles exigences socio-économiques et environnementales, se fonde sur des avancées scientifiques dans les domaines des matériaux, voire des nano-matériaux, des technologies de l'information et de la communication, et de l'ingénierie avancée.

ORGANISATION DE LA PARTIE 2

Cette seconde partie du cahier est consacrée à la présentation des résultats de projets de recherche, sélectionnés parmi l'ensemble des projets financés par l'ANR depuis 2005 sur ces thématiques. Elle est découpée en cinq chapitres.

Tout d'abord, les questions de prospective et d'analyse de la viabilité socio-économique des différentes filières et options font l'objet de la première section de cette partie.

Suivent des projets davantage axés sur le développement technologique, en partant des enjeux de captage et de transformation initiale des ressources énergétiques primaires renouvelables (section 2), avec le solaire principalement, mais aussi la récupération des énergies fatales, pour aller jusqu'aux usages finaux (section 4 pour les transports et section 5 pour les usages immobiliers ou domestiques), en passant par les questions de distribution intelligente et de stockage centralisé (section 3).

1 ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE ET VIABILITÉ TECHNICO- ÉCONOMIQUE

Cette première partie de présentation des résultats de projets est de loin la moins étoffée, les questions de prospective et de viabilité économique des filières énergétiques ayant fait l'objet de très peu de projets de recherche financés par l'ANR depuis sa création.

Il s'agit pourtant de questions de toute première importance, comme en témoigne les interrogations dont le Monde s'est fait écho fin janvier 2010 à travers une tribune accordée à Christian Gollier, où le chercheur toulousain s'interrogeait sur la pertinence du niveau de soutien actuel aux filières énergétiques « vertes » par un tarif de rachat de l'électricité très favorable à ces filières alors que la taxe carbone était fortement discutée.

De même, les Echos du 30 mars 2010 posaient la question du bon modèle économique du secteur industriel du photovoltaïque.

Ces questions de premier ordre n'ont été que très partiellement abordées dans les programmes sur l'énergie de l'ANR, qui avaient une vocation essentiellement technologique. En dehors du programme national de recherche sur les bio-énergies, qui a financé deux projets sur ce sujet qui seront présentés dans le cadre d'un autre cahier de l'ANR, seul le programme « Hydrogène et piles à combustible » a suscité des travaux (projet PROTEC-H2) sur la viabilité et la place d'une filière éner-

gétique, celle de l'hydrogène-carburant, dans le mix énergétique du XXI^{ème} siècle.

La création en 2008 du programme transversal « Villes durables » a toutefois favorisé l'émergence de projets pluri-disciplinaires qui s'intéressaient à la prospective de l'énergie à l'échelle des villes. Ainsi, le projet MUSCADE vise à élaborer des scénarii de production/consommation d'énergie dans les villes, sur des temps longs, de l'ordre du siècle, qui prennent en compte différents scénarii de changement climatique et qui devraient permettre de mettre en perspective la consommation énergétique urbaine et ses capacités de production d'énergies locales et renouvelables. Enfin, le projet ÆTIC s'intéresse à un nouvel outil de gouvernance territoriale que rend obligatoire de Grenelle de l'environnement pour toutes les communes de plus de 50 000 habitants, le Plan Climat-Energie territorial. Il s'agit notamment de développer une méthodologie permettant d'identifier et de hiérarchiser les actions à mettre en œuvre dans ces PCEL en se basant sur des critères technico-économiques rigoureux, avec comme cas d'école la communauté d'agglomération de Grenoble.

Notons enfin que s'il y a peu de projets ANR sur ces sujets, beaucoup de travaux se font au niveau européen ou international, notamment dans le cadre de l'Agence Internationale de l'Energie, travaux auxquels participent des laboratoires de recherche nationaux.

Éléments de prospective et viabilité technico-économique

	Acronyme et nom du projet	Le projet résumé en un titre
ÆTIC	Approche Economique Territoriale Intégrée pour le Climat	Pour une approche économique dans l'élaboration des politiques climatiques et énergétiques locales
MUSCADE	Modélisation Urbaine et Stratégies d'adaptation au Changement Climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique	Vers une ville à énergie positive à la fin du siècle ?
PROTEC-H2	Prospective Technico-Economique des filières de l'Hydrogène énergie	Quelle place et quel rôle pour l'hydrogène dans les systèmes énergétiques du futur ?

Programme Villes durables, édition 2009

Projet AETIC

Pour une approche économique dans l'élaboration des politiques climatiques et énergétiques locales

Un besoin de nouveaux outils pour la réalisation des Plans Climat-Energie Locaux

Les villes apparaissent de plus en plus comme des acteurs incontournables pour la réussite de politiques climatiques ambitieuses en raison des nombreux leviers d'action qu'elle détiennent au travers des politiques d'urbanisme et d'aménagement, de transport ou de valorisation des sources d'énergie locales. Les Plans Climat - Energie Locaux (PCEL) constituent le cadre dans lequel sont définis les objectifs pour l'énergie et la réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle du territoire.

Le but de ce projet est de développer une méthodologie permettant d'identifier et de hiérarchiser les actions à mettre en œuvre dans ces PCEL en se basant sur des critères technico-économiques rigoureux. Le choix de la Communauté d'Agglomération de Grenoble comme objet d'étude résulte de l'engagement ancien de l'agglomération dans une démarche de développement durable et en particulier dans l'élaboration d'un PCEL qui traduisent une forte motivation sur ces questions, essentielle à la réalisation du projet.

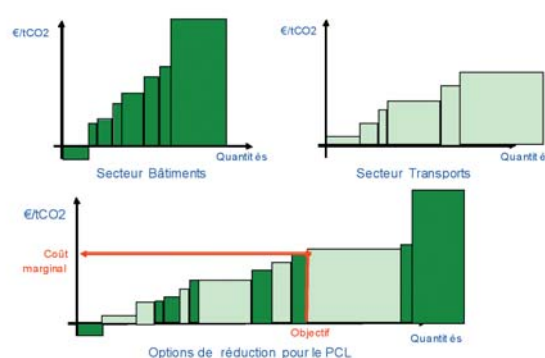
Une démarche d'identification et de hiérarchisation des options de réduction des émissions

La démarche qui est mise en œuvre par le projet consiste à identifier, quantifier et analyser économiquement l'ensemble des options de réduction des émissions de gaz à effet de serre disponibles sur l'agglomération de Grenoble, puis à les ordonner de façon à construire un programme « coût – efficace » c'est-à-dire qui assure qu'un objectif donné de réduction est atteint au moindre coût pour la collectivité.

Les options de réduction sont analysées sur trois secteurs : le secteur du bâtiment pour lequel les potentiels sont considérables en particulier dans le parc existant, celui des transports qui est abordé conjointement à la problématique d'usage des sols (on examinera des scénarii très contrastés dans l'usage des sols reflétant des choix de densification ou au contraire d'étalement urbain) et enfin celui des énergies renouvelables et des réseaux énergétiques locaux. L'ensemble des éléments ainsi rassemblés sera ensuite intégré dans un outil qui permettra d'identifier, pour un objectif donné de réduction des émissions, les actions à mettre en œuvre selon les secteurs, selon une logique d'efficacité économique.

L'analyse économique des PCEL nécessite le développement d'une méthodologie spécifique qui sera élaborée ici sur le cas de l'agglomération de Grenoble mais qui devra par la suite pouvoir être transposée à d'autres territoires.

La démarche coût-efficacité appliquée aux Plans Climat Locaux



Un outil permettra d'intégrer les différentes options sectorielles de réduction des émissions à l'échelle du territoire

Le projet « AETIC : Approche Economique Territoriale Intégrée pour le Climat »

est un projet de développement expérimental coordonné par le LEPII (Université de Grenoble) auquel contribuent différents types de partenaires : le CSTB, une fondation, l'IDDRI, un laboratoire de recherche (PACTE – Université de Grenoble), et des entreprises (VEOLIA) et bureau d'études (ENERDATA). Le projet a démarré en janvier 2010 pour une durée de 36 mois. Le coût global du projet est de 1 440 k€ dont un financement ANR de 600 k€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Trois principaux résultats sont attendus du projet AETIC :

- ◆ la production des informations et données de base nécessaires à l'élaboration d'une politique cohérente sur l'énergie et le climat à l'échelle de la ville,
- ◆ une analyse économique du Plan Climat-Energie Local de l'agglomération de Grenoble
- ◆ l'élaboration d'une méthodologie nouvelle susceptible d'être appliquée (par les partenaires privés du projet en particulier) dans d'autres situations pour contribuer à la définition de politiques énergie et climat à l'échelle locale.

Production scientifique et brevets

Sans objet pour l'instant, le projet étant encore au tout début de sa mise en œuvre.

Programme « Villes durables », édition 2009

Projet MUSCADE

Vers une ville à énergie positive à la fin du siècle ?

Changement climatique, énergie dans les villes et expansion urbaine : trois problématiques clés de la ville durable.

Les villes sont particulièrement concernées par le changement climatique : l'énergie utilisée par les villes est la source majeure des rejets anthropiques de gaz à effet de serre, qui sont la cause du réchauffement climatique global ; cette tendance globale est accentuée, à l'échelle locale, par la formation d'îlots de chaleur urbains influencés par la morphologie et la croissance des villes.

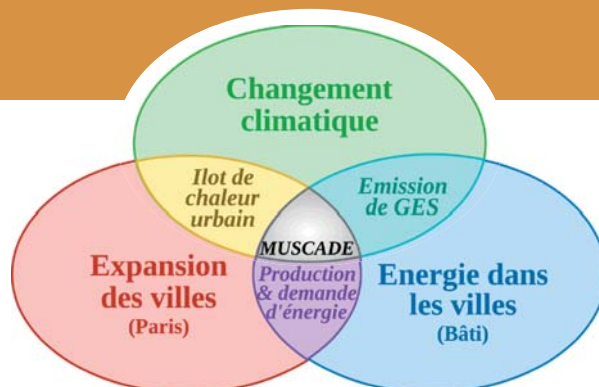
Le projet MUSCADE vise à étudier cette problématique, dans un contexte complexe avec des constantes de temps propres au changement climatique et à l'inertie d'évolution des villes qui obligent à raisonner à l'échelle du siècle. L'étude des interactions entre changement climatique, énergie dans les villes et expansion urbaine, de nos jours jusqu'à 2100, permettra, au travers de scénarii et de simulations, de mettre en perspective la consommation énergétique de la ville et ses capacités de production d'énergies locales et renouvelables. Le projet MUSCADE vise ainsi à apporter des éléments d'évaluation aux décideurs urbains qui doivent bâtir la ville durable de demain.

Un modèle numérique pour évaluer des stratégies d'adaptation de l'agglomération parisienne au changement climatique

Un « système ville », constitué à partir des processus liés à l'énergie, permettra de développer un modèle numérique d'expansion urbaine, de simulation du climat urbain et de simulation du couple offre-demande énergétique du bâti sur l'ensemble de l'agglomération.

Pour le modèle NEDUM du CIRED, qui reproduit les mécanismes socio-économiques sous-jacents à la dynamique d'un système urbain, une densité spatialisée des activités de la ville sera développée et validée à partir de l'analyse de l'étalement de la tache urbaine parisienne des années 70 jusqu'à nos jours.

Le modèle Town Energy Balance (TEB) permet de simuler le microclimat urbain, à partir des processus physiques liés à la géométrie urbaine et des échanges entre le bâti et l'extérieur. A partir de modèles dédiés à l'échelle du bâtiment et du quartier, des améliorations importantes seront apportées à TEB en terme bilan interne du bâti, l'influence de l'agencement de l'îlot, de technologies de production décentralisées d'énergie et de choix d'implantation. Pour alimenter le modèle, on construira un jeu de scénarii combinant hypothèses climatiques (basées sur les scénarii du GIEC), macroéconomiques (prix de l'énergie, croissance, démographie),



évolutions du domaine urbain (ville étendue, compacte, « verte »), techniques de bâti (performances énergétiques, réglementations), et production d'énergie décentralisée (technologies, choix d'implantation).

Le projet « MUSCADE : Modélisation Urbaine et Stratégies d'adaptation au Changement Climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le GAME (Météo-France). Le partenariat multidisciplinaire est constitué du CIRED, du CSTB, du LIENS (CNRS, Université de La Rochelle) et du LRA-GRECAU (Ecole d'Architecture de Toulouse). Le projet a débuté en décembre 2009 pour une durée totale de 3 ans. Il bénéficie d'un financement ANR de 650 k€ pour un coût global de l'ordre de 2,4 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Un premier résultat attendu est la construction de scénarii pertinents à l'échelle 2100, combinant hypothèses climatiques, macroéconomiques, évolutions du domaine urbain, techniques de bâti, et production d'énergie décentralisée.

Les principaux résultats de simulation, pour chaque scénario, concerneront la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation dans le bâti, la demande et la production décentralisée d'énergie, et la répartition des différents types d'énergie, l'îlot de chaleur urbain, les émissions de gaz à effet de serre.

Il sera alors possible d'identifier, parmi tous les scénarii étudiés, ceux qui constituent une réelle stratégie d'adaptation au changement climatique.

Production scientifique et brevets

Les résultats seront publiés dans des revues spécialisées internationales.

Programme « Hydrogène et piles à combustible », édition 2005

Projet PROTEC-H2

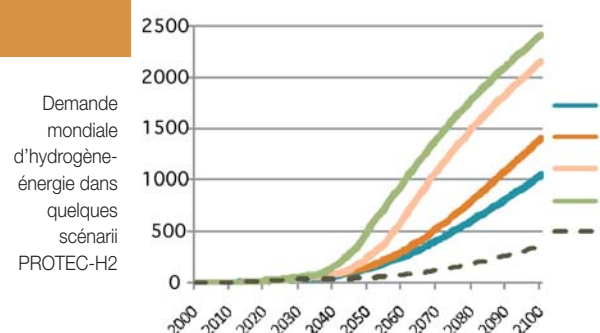
Quelle place et quel rôle pour l'hydrogène dans les systèmes énergétiques du futur ?

Organisation de l'information technico-économique sur les technologies entrant dans la chaîne hydrogène-carburant

Dans une première phase du projet, les partenaires ont organisé l'information technico-économique sur les technologies pertinentes de la chaîne hydrogène-transport. Pour ce faire, une base de données en ligne, homogène, rigoureuse et partageables a été créée puis alimentée par les partenaires du projet, en charge des champs technologiques en lien avec leur domaine d'expertise). Dans la philosophie de PROTEC-H2, les sources sont scrupuleusement renseignées et sont les plus diversifiées possibles afin de refléter au mieux la richesse de la littérature. Ces caractéristiques font de la base de données PROTEC-H2 un objet unique par rapport aux bases concurrentes. L'outil réalisé contient des données pour un grand nombre de technologies de l'hydrogène et des transports, de la production à l'utilisation dans les véhicules et participe à la constitution d'un savoir commun au sein de la communauté des technologues français. Par la suite il pourra constituer un élément indispensable pour le suivi et l'analyse des politiques technologiques, en particulier pour l'évaluation du potentiel de développement de la filière hydrogène-énergie à l'aide de modèles prospectifs.

Analyse prospective des filières technologiques dans le cadre de scénarii de déploiement de l'hydrogène dans les transports

Dans une deuxième phase, le projet a fourni un exercice inédit de prospective technico-économique des filières technologiques entrant dans les champs du programme « hydrogène et piles à combustibles » ou directement en concurrence avec elles. Pour ce faire, le modèle POLES (modèle de simulation du système énergétique mondial) a été développé puis alimenté par l'information recueillie et organisée durant la première phase du projet. En particulier, l'adaptation du modèle POLES a permis une meilleure représentation du transport et de la distribution de l'hydrogène ainsi que la représentation de ruptures technologiques. Ces évolutions du modèle ont permis de simuler des scénarii beaucoup plus ambitieux du point de vue de l'analyse de la contribution de l'hydrogène à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et aux changements structurels du système énergétique. Les scénarii de long terme ont été évalués et comparés à d'autres études, en particulier aux résultats du projet européen HyWays.



Le projet de recherche « PROTEC-H2 : Prospective Technico-Economique des filières de l'Hydrogène énergie » était un projet de recherche fondamentale coordonné par ENERDATA. Il associait deux laboratoires du CNRS (LEPII et CIRED), ainsi qu'EDF, le CEA, l'IFP et le BRGM. Le projet a commencé en décembre 2005 et s'est terminé en décembre 2008. Il a bénéficié d'un financement ANR de 360 k€ pour un coût global de l'ordre de 690 k€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Le premier fait marquant concerne la mise en ligne de la base de données PROTEC-H2, accessible pour l'ensemble des partenaires du projet.

L'analyse prospective a su apporter un certain nombre d'éclairages concernant les conditions de l'émergence de l'hydrogène comme carburant privilégié dans le secteur des transports. Les scénarii développés ont confirmé le rôle potentiel de l'hydrogène au niveau mondial pour la pacification des marchés internationaux de l'énergie à long-terme ainsi que pour la lutte contre le changement climatique, à condition que son déploiement soit accompagné d'une politique climatique ambitieuse.

Production scientifique et brevets

Deux communications ont été faites, lors de la 4e conférence ENERDAY (Energy Economics and Technology) à Dresde en avril 2009 et dans le cadre de la conférence IEW 2009 (International Energy Workshop) à Venise en juin 2009.

2 CAPTER LES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES RENOUVELABLES

La problématique du captage des énergies renouvelables est essentiellement une question de coût et de compétitivité économiques des technologies à déployer, vis-à-vis des systèmes qui assurent le mix énergétique national actuel. C'est pourquoi la plupart des projets ANR dédiés à cette problématique partagent comme objectif une réduction du rapport € par kilowatt-heure produit.

C'était d'ailleurs l'objectif affiché par le programme Solaire photovoltaïque lancé en 2005 dès la création de l'ANR, dont le programme «Habitat intelligent et solaire photovoltaïque» a pris le relais à partir de 2008. Cet effort continu de l'ANR pour soutenir le développement du photovoltaïque se reflète par la part très largement majoritaire que prennent ces projets dans cette partie du cahier. En effet, la seule autre grande filière d'énergie renouvelable à laquelle l'ANR a consacré un programme dédié est celle des bio-énergies, qui feront l'objet de présentation dans un autre cahier de l'ANR.

production électrique réelle par rapport aux prévisions peut remettre en cause la viabilité économique du projet. L'objet du projet Performance PV était précisément d'affiner ces prévisions, en produisant un outil prédictif plus fiable, à partir de fichiers météo précis et d'une étude de l'impact du vieillissement des panneaux sur les performances.

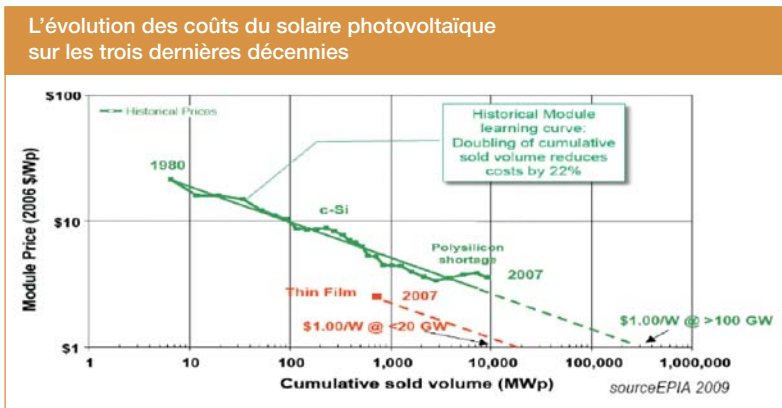
Quand on parle du photovoltaïque, on devrait en réalité utiliser le pluriel, tant les technologies sont diverses et les nouveaux concepts foisonnent d'innovation. On peut toutefois distinguer trois grandes générations de photovoltaïque.

Le photovoltaïque en silicium cristallin massif

Tout d'abord la plus ancienne, qui occupe aujourd'hui quasiment 80% du marché mondial, mais dont la part est en train de se réduire très fortement au profit des filières de seconde génération (dites en couches minces): ce photovoltaïque de première génération repose sur des modes de production bien maîtrisés, qui utilisent comme matière première un silicium cristallin issu en général des rebuts de l'industrie micro-électronique. C'est aussi la filière qui permet d'obtenir les rendements de conversion de l'énergie solaire les plus élevés (de l'ordre de 19% pour les meilleurs des modules commerciaux).

Si on regarde la structure des coûts d'une installation photovoltaïque à base de silicium cristallin massif (figure 2), on voit que l'on peut utiliser plusieurs leviers pour les faire baisser.

Une première solution est d'utiliser une matière première silicium moins coûteuse et d'optimiser la première étape du procédé de fabrication, la production du lingot de silicium. C'était l'objectif du projet TWIN, qui visait à développer une filière utilisant comme matière première du silicium métallurgique et produi-



Les filières photovoltaïques

La question de la rentabilité d'une installation photovoltaïque nécessite le développement d'outil d'évaluation des performances attendues, sachant qu'une variation de 1% sur la

sant des lingots dans un « creuset froid ». On peut aussi utiliser un autre silicium de qualité solaire, le silicium dit de type n, comme le proposait le projet MULTIXEN.

Une autre voie possible pour la réduction des coûts est d'augmenter les rendements de conversion des cellules, à coût constant de production. Le projet QCPASSI visait le développement de cellules photovoltaïques avec des rendements supérieurs à 20 %, en ayant recours à une structure innovante à hétéro-jonctions silicium amorphe / silicium cristallin et contacts en face arrière.

Enfin, l'on peut réduire les coûts en réduisant la quantité de matière première nécessaire, comme le proposait le projet RubanSolaire en visant la mise au point d'une technique de « tirage » de ruban de silicium de faible épaisseur (moins de 100 microns); ce procédé a aussi l'avantage de se passer de l'étape usuelle de la production du lingot de silicium avant son découpage en plaquettes minces de 200 à 180 microns.

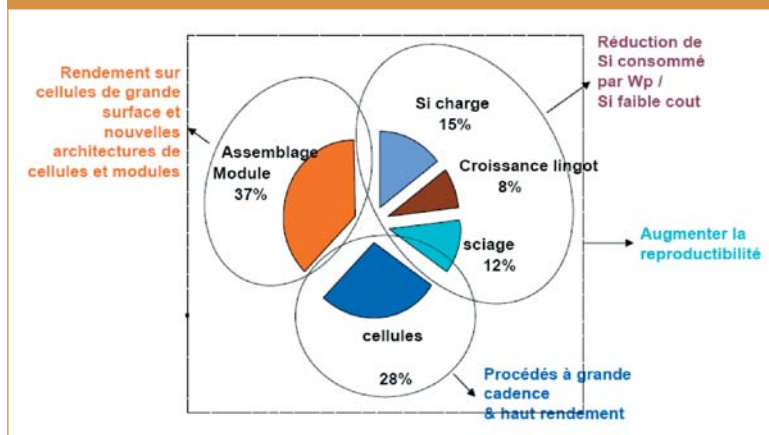
La seconde génération photovoltaïque : les filières en couches minces

La seconde génération de photovoltaïque pousse plus loin cette idée de la réduction des épaisseurs de matière première utilisée, en changeant totalement le process de production des cellules. Il s'agit maintenant de déposer une couche mince de matériau semi-conducteur sur un substrat qui n'est pas nécessairement du verre, qui peut être un substrat flexible ou/et à bas coût. Les travaux financés par l'ANR sur ce sujet portaient essentiellement sur le développement et l'amélioration des procédés de fabrication de ces cellules.

Deux grandes voies sont explorées en France :

- ◆ les couches minces à base de silicium, sujet de recherche des projets CRISILAL et

La structure de coût d'un module photovoltaïque



ATOS. CRISILAL qui visait le développement d'une méthode de dépôt d'une couche de silicium amorphe relativement épais sur des substrats métalliques, avec comme défi majeur de trouver une couche barrière suffisamment efficace pour éviter la diffusion des impuretés du substrat vers la couche semi-conductrice. ATOS se proposait de développer une structure tandem innovante constituée d'une cellule avant en silicium polymorphe hydrogéné et d'une cellule arrière en silicium microcristallin hydrogéné. L'objectif final du projet était d'obtenir des panneaux de rendement supérieur à 12 %.

- ◆ les couches minces utilisant comme semi-conducteur le CIS (Cuivre-Indium-Sélénium), qui faisait l'objet des recherches des projets CISEL et BBCIGSe. CISEL utilisait une technique de dépôt en solution par électrolyse, permettant d'atteindre des coûts de fabrication beaucoup plus bas que les procédés sous vide, alors que BBCIGSe se concentrait sur l'obtention de rendements plus élevés, en utilisant des absorbeurs à grand gap et une technique de dépôt par co-évaporation.

La troisième génération photovoltaïque : les nouveaux concepts

Cette troisième voie, bien moins avancée du point de vue de la maturité technologique que les deux précédentes a suscité des projets davantage tournés vers la recherche fon-

damentale et l'exploration de nouveaux matériaux ou dispositifs pour le photovoltaïque. On peut distinguer deux grandes voies de recherche :

◆ l'utilisation de matériaux organiques, qui peuvent être mis en œuvre facilement ; le projet NANORGYSOL a permis de mener des travaux d'inventaire et de caractérisation très avancés sur les différents matériaux potentiels pour réaliser ce type de cellules. CONAPOSOL s'est concentré sur un type de cellules photovoltaïques organiques (P3HT-PCBM), avec pour objectif d'en augmenter sensiblement les rendements en y incorporant des nano-tubes de carbone.

◆ la mise en œuvre de concepts d'ingénierie opto-électronique ; SPARCS ambitionnait de démontrer le potentiel des cristaux photoniques, des réseaux de diffraction ou des structures à plasmons de surface pour améliorer les conditions de collecte et d'absorption de la lumière du spectre solaire par une cellule et donc son rendement. THRI-PV avait choisi de travailler sur des dispositifs utilisant la conversion du spectre solaire (up conversion) et des concepts à porteurs chauds pour atteindre le même objectif.

Enfin, OxTiMIB visait à créer une rupture technologique dans le domaine des cellules photovoltaïques et des photo-batteries par le développement d'un système couplé de conversion et de stockage de l'énergie solaire utilisant sols-gels photosensibles à base d'oxyde de titane.

Explorer d'autres technologies de captage d'énergie

Les travaux de R&D sur le captage des ressources énergétiques renouvelables ne se limitent pas au domaine du photovoltaïque (et des bio-énergies). D'autres filières sont quasi matures (éolien et solaire thermique notamment) et n'ont pas fait l'objet de travaux soutenus par l'ANR. En revanche, des concepts

beaucoup plus exploratoires y ont trouvé leur place, principalement dans le cadre du programme non thématique « blanc » mais aussi dans des programmes thématiques qui réservent une place aux recherches plus fondamentales.

Ainsi, en restant dans le domaine de la production directe d'électricité, le projet AgriElec vise à évaluer le potentiel des piles à combustible microbiennes pour la production d'électricité à partir des effluents des industries du papier et de déchets agricoles.

Les mécanismes inspirés par le fonctionnement du vivant constituent également une source d'inspiration pour la production énergétique, comme le montre le projet HYPHO qui se proposait de développer un dispositif permettant la production d'hydrogène à partir de l'eau et d'énergie solaire, par photosynthèse artificielle.

Enfin, la récupération et l'usage optimal des sources d'énergie fatale, en général perdue par diffusion thermique, est une voie à explorer, notamment pour améliorer les rendements et l'autonomie énergétiques d'appareils nomades ou de véhicules.

La thermo-électricité constitue une piste intéressante pour transformer cette chaleur en électricité directement utilisable comme l'a montré le projet THERMAESCAPE, qui a développé de nouveaux matériaux thermo-électriques en travaillant sur les propriétés de la matière à l'échelle nanométrique pour améliorer leurs performances en récupération d'énergie comme en refroidissement.

Le projet SESAM s'est aussi intéressé au problème de la récupération d'énergie pour alimenter des objets dispersés dans l'environnement, comme les puces RFID, pour lesquels l'autonomie énergétique est cruciale. Il a notamment développé des sources de récupération d'énergie vibratoire innovantes à transduction piézoélectrique et piézo-électrostatique.

Capter les ressources énergétiques renouvelables

Acronyme et nom du projet

Le projet résumé en un titre

Les filières photovoltaïques

Performance PV	Performance PV	Vers une réduction massive des incertitudes sur le rendement du photovoltaïque
TWIN	Filière électromagnétique de réductions des coûts des cellules photovoltaïques à base de silicium multicristallin	Créer une filière photovoltaïque compétitive à base de silicium métallurgique
MULTIXEN	Silicium multicristallin de type n pour la fabrication de cellules solaires à bas coût et à rendement de conversion élevé	Du silicium de qualité solaire de type N pour application photovoltaïque
QCPASSI	Cellules photovoltaïques silicium à hétéro-jonctions et structure interdigitée en face arrière associé à un effet de multiplication quantique en face avant pour une augmentation du rendement de conversion	Les cellules photovoltaïques à haut rendement du futur
RUBANSOLAIRE	Ruban mince de silicium pour cellules solaires	Réduire l'épaisseur des plaques de silicium cristallin pour diminuer les coûts du photovoltaïque
CRISILAL	Recristallisation de couches minces de silicium déposées sur alliages métalliques	Les technologies films minces silicium, avenir de l'énergie photovoltaïque
ATOS	Associations Tandem Optimisées pour le Solaire	Vers un saut technologique grâce à des couches minces de silicium déposées par plasma
CISEL	CuIn(S,Se) ₂ Electro-déposés	Un procédé innovant de dépôt de couches minces CIS pour du photovoltaïque à bas coût
BBCIGSe	Broad Band gap CIGSe Solar Cells	Le photovoltaïque en couches minces CIS à haut rendement
NANORGYSOL	Cellules solaires photovoltaïques à base de nouveaux matériaux organiques et hybrides nanostructurés	Le photovoltaïque à base de nouveaux matériaux organiques et hybrides nanostructurés
CONAPOSOL	Composites nanotubes de carbone polymère pour la réalisation de cellules solaires	L'apport des nanomatériaux au solaire photovoltaïque organique
SPARCS	Structures Photoniques pour l'Amélioration du Rendement des Cellules Solaires	Cristaux photoniques, plasmons et réseaux de diffraction pour l'énergie solaire
THRI-PV	Très Hauts Rendements et Innovation Photovoltaïque	Le photovoltaïque à très hauts rendements
OXTiMIB	Photovoltaïque IIIème génération (MIBs) et Photobatterie	Nano-OxTi pour la conversion et le stockage de l'énergie solaire

Explorer d'autres technologies de captage d'énergie

AGRIELEC	Conception basée sur la connaissance de piles à combustible microbiennes pour la production d'électricité à partir de déchets des filières agricole et forestière	Produire de l'électricité à partir de résidus agricoles et forestiers
HYPHO	Photooxidation of organic substrates coupled to the reduction of protons : Sustainable hydrogen production	Vers une feuille artificielle produisant de l'hydrogène
THERMAESCAPE	Thermoelectric materials for energy scavenging power expanding	Nanomatériaux thermoélectriques : vers une électronique nomade autonome et performante
SESAM	Récupération adaptative des énergies ambiantes pour l'alimentation de micro-systèmes autonomes	Recycler les sources d'énergie présentes dans l'environnement pour permettre la suppression des piles électriques

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2005

Projet Performance PV

Vers une réduction massive des incertitudes sur le rendement du photovoltaïque

Prédire les performances du photovoltaïque

Le marché pour les systèmes photovoltaïques pourrait, en 2020, représenter un chiffre d'affaires de 25 milliards d'euros par an et, pourtant, les incertitudes pour les investisseurs demeurent très importantes :

- ◆ La puissance d'un module photovoltaïque est connue avec une précision faible, l'incertitude allant de quelques pourcents pour les modules au silicium cristallin jusqu'à 10 voire 15 % pour les nouvelles technologies en couches minces ;
- ◆ La production électrique d'une centrale photovoltaïque à partir de mesures météo standard n'est prévisible qu'à $\pm 10\%$ dans la plupart des cas ;
- ◆ La durée de vie des modules photovoltaïques est estimée entre 20 et 30 ans (soit une incertitude de 50 %) ;

La rentabilité financière des grands projets est très sensible à ces incertitudes, puisque le bénéfice attendu est typiquement de l'ordre de 10 %. Toute variation de 1 % de la production électrique, donc des entrées d'argent, impacte gravement cette rentabilité financière.

Le projet Performance PV France a été donc conçu pour garantir la mise en place raisonnée de la filière photovoltaïque en France.

Une approche systématique des problématiques, du test du module jusqu'à sa réforme

Le projet a quantifié les sources majeures d'incertitude. Pour la mesure de la puissance des modules, nous nous sommes intéressés à la métrologie fine du rayonnement solaire qui n'atteint pas la précision habituellement rencontrée en métrologie. Il fallait notamment mieux relier le système de mesures de l'Organisation Météorologique Mondiale au Système International des Poids et Mesures.

Pour la mesure de la ressource énergétique, nous avons étudié les méthodes permettant de passer d'une ressource sur un plan horizontal (stations météo, satellite) à la ressource sur un plan incliné pour des cellules photovoltaïques. Pour la prédiction de la rentabilité financière, nous nous sommes focalisés sur le lien entre la caractérisation des performances des modules photovoltaïques en ensoleillement naturel et leur production électrique sur le terrain. Enfin, l'étude du vieillissement des modules photovoltaïques a mis en œuvre des méthodes de vieillissement accéléré en chambre climatique, avec introduction de contraintes représentatives du vieillissement réel et analyse de l'évolution des caractéristiques électriques des modules.



Le projet de recherche industrielle « Performance PV » était coordonné par l'INES. Il a associé des industriels, Photowatt et Tennesol, des laboratoires de recherche, le CEP (Ecole des Mines de Paris) Armines, le CETHIL (CNRS, INSA de Lyon, Université de Lyon 1), l'IRDEP (CNRS, ENSCP, EDF) et l'Université de la Réunion et des organismes nationaux de référence (Laboratoire National d'Essai et Météo France). Le projet a duré de décembre 2005 à novembre 2008. Il a bénéficié d'un financement ANR de 567 k€ pour un coût total de 1,028 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Les progrès sur la mesure du rayonnement sont le socle d'une future métrologie nationale de la puissance des modules photovoltaïques.

L'expérimentation sur la ressource solaire et la modélisation précise des performances du photovoltaïque ouvrent la voie à une exploration systématique du potentiel photovoltaïque sur le territoire français.

L'étude du vieillissement des modules a défini les bases d'un vaste programme de recherche visant à réduire cette hypothèque majeure pour le photovoltaïque.

Production scientifique et brevets

Les articles publiés décrivent les principaux résultats du projet, tant en terme de modélisation de la ressource énergétique (Solar Energy - 2008) que de description des nouvelles méthodes d'investigation des performances du photovoltaïque et de son vieillissement (congrès photovoltaïques européens PVSEC 2007 – méthode MotherPV, et PVSEC 2008 – méthode VIM Variable Illumination Measurements).

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2005

Projet TWIN

Créer une filière photovoltaïque compétitive à base de silicium métallurgique

Utiliser le silicium métallurgique comme matière première pour le photovoltaïque

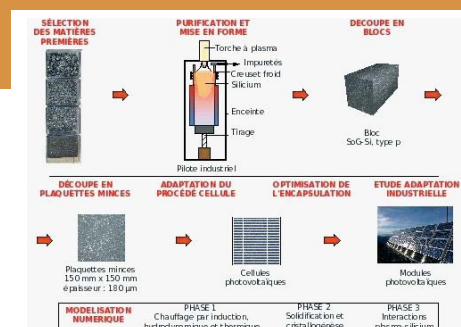
La réduction du coût de la filière photovoltaïque est un axe majeur de la recherche actuelle sur la production d'électricité d'origine photovoltaïque. Une grande partie du coût des cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin est liée au coût de la matière première silicium et aux procédés de production des wafers. Ce silicium est en général issu des déchets de l'industrie micro-électronique.

Le projet TWIN visait à s'affranchir de cette dépendance en utilisant un silicium de moindre qualité électronique, le silicium métallurgique. Malheureusement, ce silicium contient un grand nombre d'impuretés (bore, phosphore...) et un des principaux défis est de purifier ce silicium afin que le rendement final des cellules reste convenable (supérieur à 12 %) et que le rapport kWh/€ soit favorable à cette nouvelle filière.

Les grandes étapes du procédé TWIN

Ainsi, le premier défi était de purifier par procédé plasma un silicium de qualité métallurgique avant de découper les lingots obtenus en plaquettes minces et d'optimiser le procédé de fabrication des cellules photovoltaïques. L'ENSCP a mené une étude approfondie sur la purification du silicium par plasma d'argon oxygéné et/ou hydrogéné en s'intéressant plus particulièrement à l'effet de la polarisation de l'échantillon lors du traitement.

EMIX a mis en place un pilote industriel, permettant d'assurer simultanément la fusion du silicium par induction électromagnétique (qui évite d'utiliser des creusets et des fours comme dans le procédé standard) et sa purification par une torche plasma pour obtenir des blocs de silicium multicristallin de qualité solaire photovoltaïque. La capacité du pilote est de 100 kg. PHOTOWATT a réalisé la découpe des blocs en plaquettes d'épaisseur 220 μm dans un premier temps puis 180/190 μm dans un second temps. Enfin, le CEA a caractérisé l'ensemble des plaquettes du projet et a réalisé des cellules à partir des matériaux standards, à base de silicium de qualité solaire photovoltaïque, et à partir de silicium métallurgique raffiné, dit UMG.



Le projet de recherche industriel « TWIN : Filière électromagnétique de réductions des coûts des cellules photovoltaïques à base de silicium multicristallin » était coordonné par la PME EMIX. Il associait également deux laboratoires de recherche publique, le Laboratoire de Génie des Procédés Plasmas et Traitement de Surface (ENSCP) et le Liten (CEA) et un autre industriel PHOTOWATT. Le projet a commencé en décembre 2005 pour une durée de 44 mois. Le budget global du projet était de 2,094 M€ et il bénéficiait d'un financement ANR de 1,124 M€.

IMPACT

Résultats majeurs

Un des résultats majeurs du projet concerne la maîtrise de la production d'un silicium de qualité UMG cristallisé dans un four à coulée continue. La consommation énergétique par kilogramme de silicium produit a également été divisée par deux par rapport au procédé standard. Après préparation des blocs et découpe en plaquettes, le CEA et PHOTOWATT ont réalisé des cellules dont le rendement de conversion s'est avéré très prometteur vis à vis de la qualité et du coût de la matière première. L'intérêt de la découpe en plaquettes minces d'épaisseur 180/190 μm a également été montré.

Le projet TWIN a permis d'acquérir une expérience forte dans l'utilisation du silicium métallurgique, depuis sa cristallisation jusqu'à l'optimisation du procédé de fabrication des cellules, consolidant ainsi la filière photovoltaïque française. A terme, l'utilisation croissante de silicium métallurgique atténuera la dépendance des fabricants de blocs vis à vis des producteurs de silicium polycristallin.

Production scientifique et brevets

Outre le développement du pilote industriel de purification et de tirage de lingots de silicium, le projet a donné lieu à une publication dans une revue internationale à comité de lecture (Solar Energy Materials & Solar Cells 91 - 2007) et à deux communications publiées dans des actes de grandes conférences internationales (22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 35 th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films).

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2007

Projet MULTIXEN

Du silicium de qualité solaire de type N pour application photovoltaïque

Intérêts potentiels du silicium de qualité solaire de type N

L'utilisation d'un silicium de qualité solaire (dit UMG) pour des applications photovoltaïques nécessite de lever trois verrous :

- ◆ obtenir un rendement de conversion suffisant (supérieur à 14 %), généralement limité par une concentration élevée en impuretés métalliques et dopantes ;
- ◆ limiter la dégradation du rendement de la cellule sous éclairage provenant de l'association des paires bore-oxygène ;
- ◆ garantir un rendement de production de lingots de silicium utilisable élevé (plus de 90 %), celui-ci étant jusqu'à présent limité par la variation importante des dopants le long du lingot.

Le silicium de type N, matériau actuellement peu utilisé dans l'industrie photovoltaïque, présente néanmoins plusieurs avantages : sa moindre sensibilité à la plupart des impuretés métalliques, sa durée de vie indépendante du niveau d'injection et son insensibilité à la dégradation sous éclairage. Plus spécifiquement, le rendement de conversion des cellules, la flexibilité sur la purification du silicium, le rendement matière et les performances des cellules sous éclairage variable sont les avantages potentiels que se proposait de caractériser le projet MULTIXEN.

Silicium de type N : Cristallisation, caractérisation et fabrication de cellules

Jusqu'à présent, la technologie industrielle de fabrication de cellules est basée sur un silicium de type p. L'utilisation de silicium de type n nécessite d'une part de réaliser des lingots aux propriétés bien définies et d'autre part de développer un ou plusieurs procédés de fabrication adaptés à ce matériau. Afin d'étudier l'influence des impuretés métalliques et de la compensation (dopants bore & phosphore), des lingots de dimension réduite (8 kg) sont dans un premier temps réalisés à partir d'une charge de silicium de qualité solaire puis sciés en plaquettes de 200 μm d'épaisseur. Afin de réduire la concentration en bore, le silicium d'origine métallurgique est, dans certains cas, purifié par torche plasma. Les plaquettes sont ensuite caractérisées électriquement et l'évolution de leurs propriétés est étudiée au cours des différentes étapes du procédé de fabrication de cellules. Deux procédés à haute température (émetteur bore en face avant et émetteur Al en face arrière) sont développés au sein du projet ainsi qu'un procédé à basse température (hétérojonction) dont l'objectif est de limiter la dégradation du matériau. Ces développements sont menés dans un premier temps sur silicium monocristallin.

Photo de l'architecture de cellule réalisée dans le cadre du projet MULTIXEN



(b) Face Avant

Le projet « MULTIXEN : Silicium multicristallin de type n pour la fabrication de cellules solaires à bas coût et à rendement de conversion élevé » est un projet de recherche industrielle, coordonné par le Liten (CEA). Il associe aussi plusieurs laboratoires de recherche, LPICM (CNRS, Ecole Polytechnique), LGEP (CNRS, SUPELEC), IM2NP (CNRS, Universités Paul Cézanne, Provence et Sud Toulon Var), SIMaP (INP Grenoble) et deux industriels, Apollon Solar et Photowatt. Le projet a commencé en janvier 2008 pour une durée de trois ans. Il bénéficie d'un financement ANR de 1,104 M€, pour un budget global de l'ordre de 2,37 M€.

IMPACT

Résultats majeurs

Concernant le développement des procédés de cellules, un rendement de 17.3% certifié indépendamment a été obtenu sur la technologie de cellule à émetteur inversé (surface de 148 cm^2). Des rendements de l'ordre de 17% sont également atteints sur grande surface pour une structure à émetteur bore en face avant. A partir de cette technologie, des cellules ont été fabriquées sur une brique de silicium multicristallin de qualité solaire fournie par PHOTOWATT. La meilleure cellule présente un rendement de 14.2% sur 156 cm^2 et le rendement moyen obtenu sur l'intégralité du lingot est supérieur à 13.5%. Par ailleurs, aucune dégradation des performances des cellules sous éclairage n'a été constatée. Des améliorations sur la technologie sont encore possibles.

Production scientifique et brevets

Deux études ont été publiées dans des journaux à comité de lecture et une présentation orale a été réalisée à la conférence EMRS à Strasbourg en Juin 2008. L'étude la plus récente (J. Jourdan et al. Materials Science & Engineering B, 2008) consiste à analyser l'évolution des propriétés électriques du silicium multicristallin de type n, lorsque celui-ci est soumis à des traitements à haute température, tels que la diffusion bore. Malgré la dégradation constatée de la qualité du matériau lors de la diffusion bore, il apparaît que les propriétés retrouvent leur niveau initial à la suite d'une diffusion phosphore, nécessaire dans le procédé de cellule pour la formation du champ répulsif arrière. L'autre étude (J. Jourdan et al., Progress In Photovoltaics : Research and Applications, 2008) est basée sur la formation de l'émetteur bore par centrifugation. L'étude montre que cette technique induit une contamination métallique du matériau, limitant ainsi les performances de la cellule.

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2006

Projet QCPASSI

Les cellules photovoltaïques à haut rendement du futur

Développer un nouveau type de cellule photovoltaïque à haut rendement sur silicium cristallin

La production photovoltaïque connaît depuis plusieurs années une croissance très forte (entre 30-40 % par an entre 2003 et 2009). Les modules à base de silicium cristallin (c-Si) représentent aujourd'hui plus de 80 % du marché. Cette technologie bénéficie d'une importante base de savoir-faire, d'une fiabilité prouvée et des rendements élevés. L'amélioration de la compétitivité de l'électricité photovoltaïque exige une réduction drastique des coûts pour atteindre moins de 1€/Wc. Une des voies possibles est celle des hauts rendements (plus de 20 %).

Le projet QCPASSI visait cet objectif, en développant une structure innovante à hétérojonctions (HET) et contacts en face arrière (Rear Contact Cell ou RCC). L'utilisation d'hétérojonctions silicium amorphe/cristallin permet la fabrication de cellules sur substrats minces (réduction du coût matière) dans un procédé à faible budget thermique (≤ 200 °C). La structure à hétérojonctions et contacts en face arrière (HET-RCC) a un rendement potentiel supérieur à 25 % car elle permet la réduction des pertes optiques et résistives tout en diminuant les recombinaisons. De plus, les cellules de type contact face arrière sont très aisément intégrables du point de vue architectural et esthétique puisqu'elles ne présentent pas de métallisations en face avant.

L'hétérojonction silicium amorphe/cristallin adaptée aux cellules à contacts en face arrière

La démarche a consisté dans un premier temps à déterminer les empilements de matériaux permettant la réalisation des électrodes sur le silicium cristallin. Ces empilements sont constitués d'une couche de silicium amorphe hydrogéné dopé n ou p recouvert d'un matériau conducteur. L'évaluation des pertes résistives et des propriétés de passivation des différents empilements a été menée dans le but de les utiliser sur la structure HET-RCC. Un procédé de localisation de ces différents empilements utilisant des masques métalliques alignés mécaniquement a ensuite été développé.

La suite des travaux a consisté à déterminer une Couche Anti-Reflet (CAR) adaptée à la face avant des cellules HET-RCC (excellente passivation de surface et bonnes propriétés optiques). Des démonstrateurs de cellules HET-RCC sur grande surface (26 cm²) ont ensuite été fabriqués en utilisant les empilements et la CAR étudiés précédemment. Des modélisations 2D développées dans le projet ont également permis d'optimiser la structure et de déterminer les paramètres limitant théoriquement son rendement.

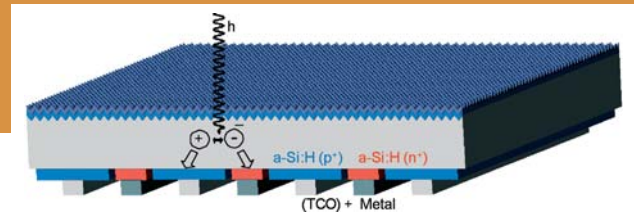


Schéma de la structure HET-RCC. La face avant de la cellule est libre de métallisations, ce qui permet un meilleur rendement tout en facilitant l'intégration en module et au bâti.

Le projet de recherche industrielle « QCPASSI : Cellules photovoltaïques silicium à hétéro-jonctions et structure interdigitée en face arrière associé à un effet de multiplication quantique en face avant pour une augmentation du rendement de conversion » était coordonné par le Liten (CEA). Il associait également des laboratoires de recherche publique français, LPCIM (CNRS, Ecole Polytechnique) et LGEP (CNRS, SUPELEC) et néerlandais, ECN et l'Université d'Utrecht, ainsi qu'un industriel, Photowatt. Le projet a commencé en novembre 2005 pour une durée de 3 ans. Il bénéficiait d'un financement ANR de 1,09 M€ pour un budget global de l'ordre de 2,3 M€.

IMPACT

Résultats majeurs

Ce projet a permis le développement des cellules HET-RCC grâce à la mise au point d'un procédé original de localisation par masques métalliques sur grande surface. Ce procédé est potentiellement applicable sur des cellules de taille industrielle. L'application de ce procédé a abouti à la fabrication de démonstrateurs fonctionnels de 26 cm² sur silicium cristallin de type n. Les premières cellules fabriquées montrent un rendement de 9,4 % ce qui constitue un record mondial sur cette surface. L'amélioration de ces performances dépend de l'optimisation de la structure principalement au niveau des métallisations (largeur et hauteur des dépôts métalliques). Un outil de modélisation complet a été développé afin d'étudier théoriquement le potentiel des cellules HET-RCC. Cet outil permet également d'optimiser la géométrie des dispositifs en vue d'améliorer leur rendement.

Production scientifique et brevets

Deux publications scientifiques ont été faites au sujet de la modélisation des cellules HET-RCC, l'une dans Materials Science and Engineering B et l'autre à la 23^e conférence européenne sur le photovoltaïque. A cette conférence, une communication sur les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de QCPASSI a également été faite. Deux publications ont également présentées à l'ICANS en août 2009 suivies de deux autres à la 24^e conférence européenne sur le photovoltaïque, à Hambourg.

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2006

Projet RubanSolaire

Réduire l'épaisseur des plaques de silicium cristallin pour diminuer les coûts du photovoltaïque

Tirer des rubans de silicium pour réduire les coûts

Les technologies photovoltaïques de demain devront répondre à des caractéristiques que l'on peut résumer de la manière suivante : leur structure de coût doit leur permettre d'atteindre la « parité réseau », leur rendement de conversion doit être suffisant pour leur permettre de s'intégrer à l'espace utile souvent réduit des toits des habitations ; par ailleurs, elles doivent être ouvertes à des applications souples, notamment pour les grands toits des bâtiments tertiaires, et enfin elles doivent être à base de matières premières abondantes pour pouvoir suivre le développement considérable qui sera celui du photovoltaïque dans les décennies à venir. Les technologies à base de silicium cristallin ultra-mince (autour de 50 μm) répondent de manière idéale à cet ensemble de caractéristiques, mais l'élaboration de ces plaques (« wafers ») cristallines ultraminces reste jusqu'ici délicate et coûteuse.

L'objectif du projet RUBANSOLAIRE était de démontrer la faisabilité de cellules minces photovoltaïques à haut rendement et à bas coût en développant un procédé de croissance d'un ruban de silicium flexible.

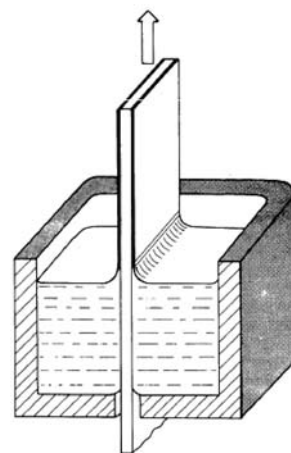
Le principal défi scientifique et technologique est d'arriver à maîtriser les contraintes dues au tirage pour produire des rubans de grande largeur (100 mm), à grande vitesse (>5 cm/mn). De plus, il était nécessaire de développer de nouvelles techniques de passivation de surface et de contacts métalliques interdigités en face arrière (nature, structure et mode de dépôt) adaptés à des rubans ultraminces.

Maîtriser les contraintes liées au procédé de tirage du ruban

Le premier volet du projet consistait à développer un procédé de croissance de ruban appelé RST (Ruban de silicium sur Substrat Temporaire) qui permet le dépôt d'un film de silicium sur chacune des faces opposées d'un support en carbone (disponible en rouleaux) éliminé ultérieurement par brûlage. Il regroupe d'une part les activités articulées autour de la préparation de plaques de silicium « planes » minces (environ 100 μm) avec un objectif de largeur de 10 cm et d'autre part, les activités de mesure et de simulation des contraintes dans les structures afin réduire les écarts à la planéité des plaques de silicium RST.

Le second volet du projet se focalisait sur le développement de concepts et de procédés innovants, tels que de nouvelles méthodes de passivation de surface et de dépôts de contacts, combinés à des architectures de cellules à hétérojonctions (HJT) et à contact en face arrière (RCC) avec un objectif de haut rendement (16 %) et de faible coût de fabrication.

Enfin, une étude technico-économique complétait ces deux volets, avec pour objectif d'évaluer la pertinence d'un développement industriel des différents procédés proposés dans le projet.



Le procédé RST

Le projet « RubanSolaire : Ruban mince de silicium pour cellules solaires » était un projet de recherche industrielle coordonné par SolarForce. Il associait l'INESS (CNRS, Université Louis Pasteur), le GEMPPM (CNRS, INSA de Lyon), Total, l'IMEC et Photovolttec (Belgique). Il a commencé en décembre 2006, pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement ANR de 476 k€ pour un coût global de l'ordre de 2,1 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Parmi les résultats marquants, on peut citer le tirage de rubans RST quasi-plans à 4,5 cm/mn en largeur 80 mm et avec une épaisseur de silicium de 100 μm . La modélisation thermomécanique prédictive des déformations des rubans RST au tirage a été réalisée.

Les rendements de conversion atteignent 18,3 % ($V_{co} = 608$ mV, $J_{ph} = 41,3$ mA/cm², FF = 72,6) sur cellule RCC témoin (Si Cz 120 μm) et les cellules construites avec le matériau RST obtiennent 12,5 %. Enfin, la texturation plasma permet d'augmenter le courant de court-circuit de 25 %.

Production scientifique et brevets

Ce projet a donné lieu à deux communications invitées publiées dans les actes de la 24^e conférence européenne sur le photovoltaïque.

La fabrication de plaques de silicium RST quasi-plans de largeur 100 mm et d'épaisseur 100 μm est maintenant accessible. Les outils de simulation thermique et thermomécanique développés dans ce contrat ont été prolongés par un contrat OSEO intitulé O DEFORMATION en cours. Ces éléments vont permettre d'accélérer la maîtrise du tirage de rubans RST plans et en corollaire, de lancer un programme d'optimisation des cellules réalisées à partir de ce matériau, programme seulement abordé en fin de ce contrat.

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2007

Projet CRISILAL

Les technologies films minces silicium, avenir de l'énergie photovoltaïque

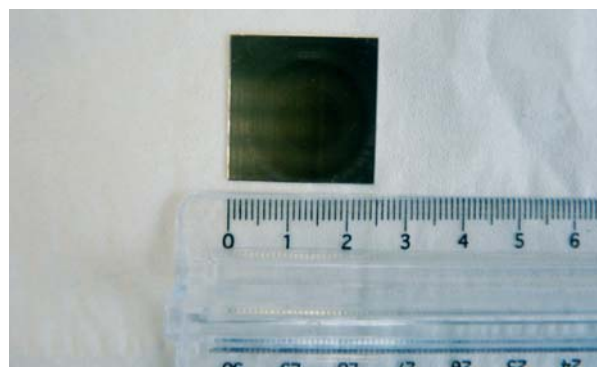
Maîtriser la recristallisation de films minces de silicium sur substrats métalliques

L'industrie du photovoltaïque connaît actuellement un accroissement considérable, ponctué souvent et comme récemment par la pénurie de silicium de qualité solaire. Une des voies pour permettre à ce secteur de poursuivre sa croissance est le développement des technologies de dépôt de films minces (moins de 10 μm) sur des substrats à bas coût, qui consomme moins de silicium. Toutefois, les rendements atteints par ces filières restent encore très inférieurs à ceux des technologies sur plaquettes de 250 μm d'épaisseur, notamment car le dépôt direct des films de silicium conduit à des tailles de grains de silicium insuffisantes.

Dans ce contexte, le projet CRISILAL visait à recristalliser des films de silicium amorphe suffisamment épais déposés sur des substrats d'alliages métalliques minces en évitant la diffusion d'impuretés électriquement actives par le choix d'une couche barrière efficace entre le substrat et le silicium. Le substrat en alliage métallique mince a été choisi pour sa bonne adéquation avec une application bâtiment dans la perspective d'un second projet visant à développer une technologie de cellules silicium sur alliage métallique.

Optimisation de la qualité cristalline des films de silicium par trois procédés : recuit thermique conventionnel, recuit rapide, fusion de zone

Des feuillets métalliques minces de différentes natures sont élaborés en fonction des spécificités requises et testés. Sur ces substrats, sont déposés des couches barrières qui doivent être imperméables aux éléments pouvant diffuser dans le silicium. Plusieurs techniques de dépôt ont été utilisées en fonction de la nature de la couche (centrifugation à partir d'une solution liquide, évaporation par arc cathodique, pulvérisation cathodique magnétron, PECVD). Le film mince de silicium est déposé par évaporation par faisceau d'électrons, procédé à grande vitesse de dépôt compatible avec une application industrielle ultérieure. Les films sont ensuite recristallisés soit en phase solide (recuit thermique conventionnel ou recuit rapide), soit en phase liquide (fusion de zone), dans l'optique de mieux comprendre les mécanismes de recristallisation et d'identifier le procédé le mieux adapté en terme de tailles de grains et de qualité cristalline.



Feuillard métallique

Le projet de recherche industrielle « CRISILAL : Recristallisation de couches minces de silicium déposées sur alliages métalliques » était coordonné par l'Institut National de l'Énergie Solaire. Il associait trois industriels, Arcelor Mittal Stainless & Nickel Alloys, Annealsys et Photowatt ainsi que deux laboratoires du CEA-Grenoble (DTNM/LTS, DTH/LCPEM) et le laboratoire InESS de l'Université de Strasbourg. Le projet a commencé en janvier 2008 pour une durée de 24 mois. Il bénéficiait d'un financement ANR de 667 k€ pour un coût global de l'ordre de 1,4 M€. Ce projet avait été labellisé par le pôle de compétitivité Tenerdis.

IMPACT

Résultats majeurs

Deux alliages métalliques et deux couches barrières potentiellement imperméables aux impuretés du substrat ont été identifiés. Les procédés de recristallisation ont été développés. Des empilements sont en cours de réalisation pour être recristallisés en phase solide. Des couches barrières spécifiques à la recristallisation en phase liquide sont en cours de mise au point. Un modèle de calcul des coûts est en cours d'élaboration pour réaliser l'évaluation économique de la technologie.

Production scientifique et brevets

Ce projet a donné lieu à deux publications, l'une dans des actes de conférence (Materials Research Conference, Sping meeting, San Francisco 2009), l'autre dans une revue à comité de lecture (Solar Energy Materials & Solar Cells).

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2005

Projet ATOS

Vers un saut technologique grâce à des couches minces de silicium déposées par plasma

Développer une filière couches minces silicium française

Ce projet avait pour objectif de développer une nouvelle filière de cellules photovoltaïques en couches minces de silicium, à partir de solutions innovantes de type tandem à électrodes intermédiaires. La cellule tandem est constituée d'une cellule avant de type PIN en silicium polymorphe hydrogéné (pm-Si:H) et d'une cellule arrière en silicium microcristallin hydrogéné (μ -Si:H). L'objectif final du projet était d'obtenir un rendement supérieur à 12 % pour les modules assemblés.

Les travaux envisagés dans le projet portaient sur plusieurs aspects :

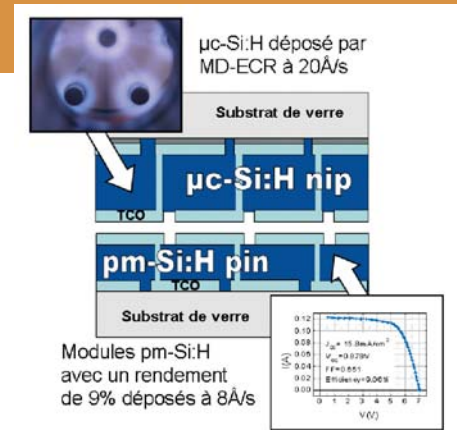
- ◆ développement des couches minces de pm-Si:H et de μ -Si:H. Pour ces deux matériaux réputés pour leur meilleure stabilité par rapport au silicium amorphe, l'effort a porté sur l'augmentation de la vitesse de dépôt, qui est un des freins au développement industriel,
- ◆ développement d'une filière française d'oxyde transparent conducteur,
- ◆ fabrication de modules à base de pm-Si:H et de μ -Si:H,
- ◆ études sur les aspects "système" et l'association intelligente des modules pour une meilleure commande et une meilleure utilisation de la puissance maximale disponible.

Réduction des coûts par une augmentation des vitesses de dépôt combiné à une approche système

Les résultats pour les modules à base de silicium polymorphe ont largement dépassé les objectifs initiaux. Ainsi, des modules de 100 cm² présentant des rendements de 9% ont été fabriqués à partir de ce matériau déposé à 1 nm/s.

Le développement de couches de μ -Si:H par plasma micro-ondes a permis d'identifier les paramètres critiques de cette technique : contrôle de la température du substrat, fort flux d'hydrogène atomique, contamination par l'oxygène et l'azote des couches de silicium microcristallin. C'est pourquoi des recherches ont été menées en parallèle par la technique classique PECVD. Ils ont permis d'atteindre l'objectif d'ATOS en termes de rendement (9%) bien qu'à une vitesse de dépôt inférieure (0.3 nm/s).

Ce projet ne se limitait toutefois pas à des avancées sur les matériaux et les cellules ; il ambitionnait également de travailler sur les systèmes et l'association intelligente des modules pour une meilleure commande et une meilleure utilisation de la puissance maximale disponible. Ces études ont montré l'intérêt des systèmes de commande de type MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour maximiser l'énergie produite par les modules et ont permis de quantifier le gain en énergie produite par rapport à la filière sans association tandem et sans commande.



Le projet de recherche industrielle « ATOS : Associations Tandem Optimisées pour le Solaire » était coordonné par le laboratoire PICM (CNRS, Ecole Polytechnique). Il associait deux autres laboratoires publics, le LAAS (CNRS) et le LGEP (CNRS, SUPELEC), une PME, SOLEMS et deux groupes industriels, Saint Gobain Recherche et Total. Le projet a commencé en novembre 2006 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'un financement ANR de 1.3 M€ pour un coût global de l'ordre de 3.2 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Le principal résultat est la démonstration de la faisabilité de mini-modules à base de silicium polymorphe avec des rendements de 9% et cela pour des vitesses de dépôt 3 à 5 fois supérieures à celles de la technologie actuelle en silicium amorphe. Parmi les résultats marquants nous pouvons citer :

- ◆ l'obtention d'une densité de défauts au niveau de Fermi de $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$, la plus faible jamais mesurée pour une couche mince de silicium,
- ◆ le dépôt à 3 nm/s de couches minces de μ -Si par plasma micro-ondes (MDECR),
- ◆ l'amélioration des propriétés optiques et électriques de couches d'oxydes transparents conducteurs (ZnO et SnO₂),
- ◆ l'évaluation en termes de gain en production d'énergie et de fiabilité industrielle des modules à 4 fils.

Les résultats obtenus dans le projet ATOS ont été perçus très positivement par Total, qui a décidé de créer une équipe de R&D commune avec le LPICM pour les approfondir et ont par ailleurs conduit à la création de la start-up SOLSIA, qui travaille au développement d'une ligne pilote dans cette filière.

Production scientifique et brevets

Ce projet a donné lieu à trois publications dans des revues à comité de lecture et a fait l'objet de trois thèses, couvrant les aspects matériaux, cellules solaires et système.

Programme Solaire Photovoltaïque, édition 2005

Projet CISEL

Un procédé innovant de dépôt de couches minces CIS pour du photovoltaïque à bas coût

Le CIS, une filière prometteuse pour le photovoltaïque en couches minces

On assiste ces dernières années à l'apparition sur le marché de cellules photovoltaïques basées sur d'autres matériaux que le silicium et notamment le diséléniure de cuivre et d'indium (CuInSe₂, ou CIS). Les records de rendements de conversion obtenus en laboratoires approchent les 19,5 % pour le CIGS, les modules, dont la commercialisation a commencé, atteignent des rendements de 11 à 13 %.

Ces nouvelles filières devraient permettre d'importantes réductions du coût de l'électricité photovoltaïque, en associant des technologies en couches minces (économie de matière en raison des épaisseurs de quelques microns, températures d'élaboration inférieures à 600 °C) et des performances élevées.

En effet, en général, la production de cellules photovoltaïques utilise des méthodes de dépôt sous vide poussé, afin de garantir une grande qualité du matériau semi-conducteur.

Le défi du procédé de fabrication CISEL est de remplacer ce type de procédé, souvent onéreux, par un procédé en deux étapes, utilisant notamment une technique de dépôt en solution suivi d'un recuit thermique. Ce procédé doit conduire à des matériaux ayant des qualités électroniques proches de ceux obtenus par le procédé traditionnel, avec un gain considérable sur les coûts de production.

Mieux comprendre les mécanismes physiques des différentes étapes du process CISEL

Le process de fabrication CISEL actuel se décompose en six étapes principales :

- ◆ dépôt d'une couche de molybdène sur du verre de vitre,
- ◆ dépôt par électrolyse d'une couche de CuInSe₂ sur le molybdène (Mo), qui sert d'électrode de travail dans la cellule électrochimique,
- ◆ recuit thermique de ces couches dans un four,
- ◆ dépôt des couches supérieures de CdS et de ZnO,
- ◆ prise des contacts électriques et fabrication des modules.

Le projet proposé à l'ANR avait pour objectifs :

- ◆ d'améliorer les rendements photovoltaïques et la reproductibilité du procédé CISEL, en visant une valeur moyenne reproductible de 8 % sur 5x5 cm²,
- ◆ de garantir l'acceptabilité du process CISEL, en substituant, à performance équivalente, la couche de CdS par une jonction de type Zn (O, S) ou In₂S₃. Plusieurs méthodes de dépôt ont été évaluées (CBD, PVD, et MOCVD),
- ◆ de réaliser des modules de démonstration (gravure, connectique, encapsulation) et d'évaluer leur performance dans la durée,

- ◆ de consolider l'évaluation du coût de production, ses caractéristiques environnementales et énergétiques (dont l'évaluation du temps de retour sur investissement et de l'impact en termes d'émission de CO₂).

Le projet ANR ne s'intéressait pas à l'étape d'électro-dépôt et aux méthodes de dépôt chimique en solution de la jonction qui ont été traités dans le cadre du projet européen STREP LARCIS.

Le projet « CISEL : CuIn (S, Se) 2 Electro-déposés » est un projet de recherche industriel coordonné par l'IRDEP (laboratoire mixte CNRS, ENSCP, EDF). Il associe aussi deux laboratoires de recherche du CEA (Liten et Grethe), le laboratoire LAMP (CNRS, Université de Nantes) et un autre partenaire industriel, Saint-Gobain Recherche. Le projet a commencé en novembre 2005 et s'est achevé en août 2008. Il a bénéficié d'un financement ANR de 1,2 M€ pour un coût total de 4,3 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Ce projet a permis de mieux comprendre et d'améliorer l'homogénéité spatiale du précurseur CISe, les mécanismes de recristallisation lors du recuit, de définir des méthodes de caractérisation et de diagnostic optoélectroniques pour identifier et quantifier des pertes liées aux anomalies de chaque étape, de mettre en place de nouvelles techniques de caractérisation physico-chimique et de réaliser un modèle de simulation du fonctionnement des cellules CISEL.

Le rendement moyen des cellules obtenues par ce procédé est de 8,5 % sur des plaques 5x5 cm².

Production scientifique et brevets

Ce projet a donné lieu à trois publications dans des revues internationales à comité de lecture, et à quelques conférences invitées dans des colloques internationaux et notamment le colloque européen de référence sur le photovoltaïque (European Photovoltaic Solar Energy Conference).

Toutefois, la retombée la plus importante est la création en janvier 2009 du spin-off NEXCIS afin d'accélérer l'industrialisation du process CISEL. En effet, le passage à l'étape industrielle du projet CISEL nécessite des études de développement de type ingénierie, utilisant des technologies et des ressources qui dépassent celle d'un laboratoire de recherche, d'autre part la possibilité de production industrielle ne peut s'envisager que si des assurances sur la fiabilité des procédés, la reproductibilité, les possibilités de scale-up ou sur la réduction du taux de rebut sont apportées.

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2006

Projet BBCIGSE

Le photovoltaïque en couches minces CIS à haut rendement

Les défis scientifiques d'une filière CIGS à haut rendement

Les cellules à base de Cu (In, Ga) Se₂ obtenues par des procédés de co-évaporation atteignent des rendements records de conversion de 20 %, et une dizaine d'équipes scientifiques à travers le monde obtiennent régulièrement des cellules de rendement de conversion supérieurs à 15 %.

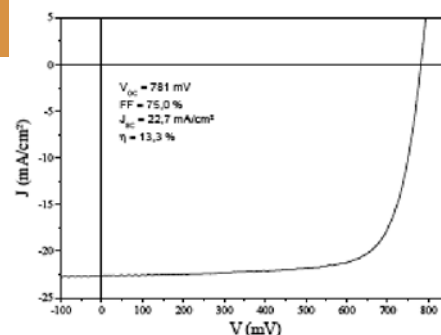
L'ensemble de la communauté scientifique constate que lorsqu'on cherche à augmenter la largeur de la bande interdite (E_g : gap) du CIS en remplaçant partiellement l'indium par du gallium, les cellules ont des rendements maximaux pour des valeurs de E_g comprises entre 1,1 et 1,2 eV, pour des taux de Ga de 30 %. Un argumentaire générique et purement optique (sans considérations d'évacuation du courant) situe la conversion maximale pour les cellules entre 1,4 et 1,5 eV.

L'incapacité actuelle à réaliser des dispositifs de qualité avec des absorbeurs « grand gap » (ou Broad Band) représente un verrou majeur pour l'obtention des dispositifs à haut rendement. La recherche d'absorbeurs de la famille CIGSe (ou substitution In/Al ou Se/S) de gaps optimaux pour des mono-jonction ou de couples de gaps optimaux pour les structures tandems (multi-jonctions) doit résoudre le même problème : lever la limitation structurelle pour réaliser des dispositifs de rendement de conversion élevé (> 20 %) utilisant des absorbeurs de gaps entre 1,4 et 1,7 eV.

Une approche originale

Le projet BBCIGSE avait pour ambition d'approfondir la connaissance des matériaux CIGSe à grands gaps, ainsi que de développer des voies technologiques pour la réalisation de dispositifs photovoltaïques à haut rendement (plus de 20 %, en mono- et en multi-jonctions).

L'approche du consortium comprenait une étude cristallographique des matériaux (massifs et couches minces), un effort de synthèse par co-évaporation des dispositifs complets en couches minces (CIGSe grand gap et couches tampon alternatives In₂S₃ et Zn (O, S) présumées adéquats), un effort de synthèse des matériaux par mise en œuvre d'un procédé innovant MOCVD, de l'appareil et des molécules précurseurs nécessaires, un effort d'analyse opto-électronique des matériaux et des dispositifs obtenus en fonction de leur gap.



Dispositif à 55 % de Ga ($E_g = 1,34$ eV) réalisé au LAMP par co-évaporation et couche tampon (CBD)CdS

Le projet « BBCIGSE : Broad Band gap CIGSe Solar Cells »

était un projet de recherche fondamentale coordonné par le Laboratoire des matériaux photovoltaïques (LAMP CNRS, Université de Nantes). Il associait également l'Institut Jean Rouxel des Matériaux de Nantes (UMR 6502 CNRS, Université de Nantes), l'IR-CELYON (CNRS, Université de Lyon 1), le LGEP (UMR 8597 CNRS, SUPELEC), le Liten (CEA), et deux entreprises, KEMSTREAM et Saint-Gobain Recherche. Il s'est déroulé de décembre 2006 à novembre 2009. Il a bénéficié d'un financement ANR de 1,03 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Parmi les résultats acquis, citons la compréhension accrue de la structure des matériaux à grand gap, à la fois du côté structural et du côté opto-électronique. Si les pièces du puzzle « Grand Gap » sont en train d'identifier, qu'ils résultent en une percée technologique ou en une explication d'impossibilité technique reste encore une question ouverte.

Les recettes « empiriques » de synthèse pour le CIGSe de qualité à 50 % de Ga par co-évaporation sont établies. Ces avancées permettent de pousser un peu les valeurs du gap utilisables.

Les résultats des dispositifs CIGSe obtenus par co-évaporation à Nantes (13,3 % à 781 mV (55 % de Ga) et en collaboration avec Uppsala (13,1 % à 797 mV (54 % de Ga) avec CdS et 14,5 % à 717 mV (45 % de Ga) avec Zn (O, S) sont remarquables. Il a aussi permis de développer un procédé de synthèse de précurseurs métalliques évitant l'utilisation de H₂Se, hautement toxique.

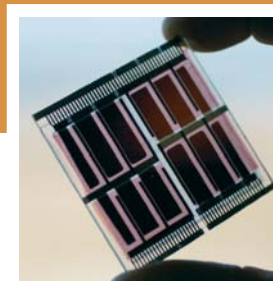
Production scientifique et brevets

Ce projet a donné lieu à trois publications dans des revues internationales à comité de lecture et à trois présentations en tant qu'invité dans de grandes conférences internationales.

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2005

Projet NANORGYSOL

Le photovoltaïque à base de nouveaux matériaux organiques et hybrides nanostructurés



De nouveaux matériaux pour la conversion photovoltaïque

Bien que la puissance solaire reçue par la terre représente 10 000 fois la consommation énergétique globale actuelle, l'énergie photovoltaïque est à ce jour la plus coûteuse et une des moins utilisées. Ceci tient notamment au fait que la tension croissante sur le marché du silicium issu de la microélectronique implique un coût de module élevé nuisant à la compétitivité de cette énergie. La recherche pour la mise au point de nouveaux matériaux moins coûteux associés à une mise en oeuvre novatrice est donc particulièrement active.

La progression extrêmement rapide des performances des cellules solaires photovoltaïques à base de matériaux organiques et hybrides nanostructurés au début des années 2000 a suscité l'intérêt d'industriels et de nombreux laboratoires de recherche en Europe. Ainsi, cette activité s'est-elle très largement développée en France.

Le projet NANORGYSOL visait à fédérer et structurer les efforts des principales équipes françaises actives sur le sujet pour aboutir à des cellules solaires photovoltaïques performantes et peu coûteuses.

Explorer différents concepts

Ce projet avait pour objectif d'analyser un grand nombre de matériaux et de concepts de cellules photovoltaïques afin d'évaluer les potentialités et pouvoir faire des choix stratégiques en terme de filières à développer. Trois voies ont été explorées en parallèle :

- ◆ les cellules « tout organique » à base de polymères solubles. Les synthèses ont été confiées au LPCP, au LEMOH, au LPPI, au LIPHT, au LMOPS et au LCOO, tandis que l'élaboration des cellules a été confiée au LCS, au InESS et à l'IMS. Des rendements de 1,45 % et de 1,1 % ont été obtenus respectivement sur poly (3-octylphénylthiophène (LPCP) et sur poly (Cyano Hexyl Oxy Bi Thiophènes (LEMOH), deux produits originaux issus du consortium. Un rendement de 4,9 % a été obtenu sur P3HT : PCBM commerciaux au LCS,

- ◆ les cellules « tout organique » à base de petites molécules. Les synthèses ont été confiées au CIMMA, au CRPP, à l'IPCMS, au LPPI, et au LCC, tandis que l'élaboration des cellules a été confiée au LAPLACE, à l'XLIM et au POMA. Un rendement de 0,4 % a été obtenu sur des dérivés originaux du pérylène (LPPI et XLIM), tandis que des rendements de 2 % et de 1,9 % ont été obtenus respectivement sur pentacène/pérylène coévaporés (POMA) et sur phtalocyanine de cuivre/C60 (XLIM), des produits commerciaux,

- ◆ les cellules « hybride solide » à base d'oxydes mésoporeux, photosensibilisés ou non, et de polymères « hybride solide » à base de nanoparticules de CdSe et de polymères.

Les synthèses ont été confiées au LCOO, au LCMC, au LEMOH et au LACReM, tandis que l'élaboration des cellules a été confiée au POMA et au LCS. Les premières cellules TiO₂ pérylène ont été réalisées (LCOO et POMA).

Le projet de recherche fondamentale « NANORGYSOL : Cellules solaires photovoltaïques à base de nouveaux matériaux organiques et hybrides nanostructurés » était coordonné par le CEA-INES. Il associait 21 laboratoires de recherche publique. Le projet a commencé en décembre 2005 pour une durée de 24 mois. Il a bénéficié d'un financement ANR de 1,4 M€ pour un coût global de l'ordre de 5,8 M€.

IMPACT

Résultats majeurs

Le choix de la meilleure voie/matériau a été décidé à l'issue de la première année du projet. Les matériaux commerciaux : le poly (3-hexylthiophène) (P3HT) et le dérivé de C60 (PCBM) ont été choisis comme matériaux de référence pour l'exécution du démonstrateur 10x10 cm. Ils présentent les meilleurs rendements de conversion à l'heure actuelle, et surtout permettent de garantir un approvisionnement fiable en qualité et quantité.

Les meilleures performances actuelles sur ces matériaux ont été obtenues au LCS (CEA-INES RDI) sur un concept conducteur polymère par voie humide, avec la mesure en condition de laboratoire d'un rendement de conversion de 4,9 %. En vue d'une certification, le LCS développe une technique d'encapsulation verre. Le passage au format 10x10 cm a été effectué en décembre 2007 par le LCS, en présentant un premier démonstrateur de 75 cm² de surface active, fournissant 120 mA de courant.

Production scientifique et brevets

Ce projet a été très fructueux en terme de communications scientifiques, puisque près de 96 communications orales en congrès internationaux et 73 articles dans des revues à comité de lecture ont été présentés au nom du consortium durant ces deux ans.

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2006

Projet CONAPOSOL

L'apport des nanomatériaux au solaire photovoltaïque organique

Des nanotubes de carbone pour améliorer le rendement des cellules solaires organiques

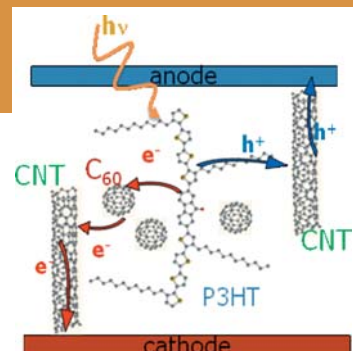
Les cellules solaires organiques peuvent constituer une alternative bas-coût et faible poids pour la fabrication de panneaux solaires de grandes surfaces. Ces cellules solaires reposent sur le concept d'hétérojonctions de volumes polymère-fullerène où les excitons photo-générés dans le polymère sont séparés sous l'influence du champ interne à l'interface avec le fullerène.

Toutefois ces systèmes présentent un rendement limité par l'acheminement des charges vers les électrodes. Ce point a été considéré en incluant des nanotubes de carbones (NTC) dans l'hétérojonction de volume P3HT-PCBM, la référence à l'heure actuelle. Ces nano-objets possèdent une anisotropie de forme pouvant améliorer considérablement la percolation des charges. Les objectifs visés ont été de réaliser des NTC de longueur adaptée à la réalisation de cellules solaires, d'étudier leur dispersion dans la matrice polymère par procédés physiques et par fonctionnalisation avec des oligomères conjugués, et finalement de renforcer les propriétés de transports par orientation des NTC sous champ électrique perpendiculairement aux électrodes. Le but est de réaliser une cellule solaire performante constituée de matériaux développables à grande échelle pour une production de masse.

Une action concertée synthèse-caractérisations-réalisation des cellules solaires

Pour mener à bien le projet, des synthèses de nanotubes de carbone double-parois (DWCNTs) ont été réalisées, le but étant d'obtenir des lots de DWCNTs reproductibles. Une méthode de coupage par broyage a ensuite été mise au point pour qu'ils aient une longueur adaptée (environ 150 nm) pour être incorporés dans les cellules solaires organiques. En parallèle, l'étude de leur dispersion dans une matrice polymère a été effectuée, ainsi que la synthèse d'oligomères conjugués destinés à fonctionnaliser ces DWCNTs pour aider à cette dispersion et contribuer à l'absorption du rayonnement solaire. L'étude de l'orientation sous champ électrique des nanotubes a été étudiée sur des électrodes interdigitées de structure planaire permettant l'observation des effets électriques par microscopie. Une fois les synthèses et la mise au point de l'orientation des nanotubes effectuées, des composites polymères-DWCNTs et polymères-DWCNTs-fullerène ont été réalisés et inclus dans une structure verticale de cellule solaire. Il a alors suffi de transposer la méthode d'orientation des nanotubes sous champ électrique à cette structure pour obtenir des cellules solaires avec des nanotubes perpendiculaires aux électrodes.

Schéma d'une cellule solaire P3HT-PCBM-NTC. Un photon est absorbé par le P3HT avec cheminement de l'électron $P3HT \rightarrow C60 \rightarrow NTC \rightarrow$ cathode et cheminement du trou $P3HT \rightarrow NTC \rightarrow$ anode.



Le projet « CONAPOSOL : Composites nanotubes de carbone polymère pour la réalisation de cellules solaires » est un projet de recherche fondamental coordonné par le laboratoire XLIM (CNRS, Université de Limoges) qui associe également les laboratoires CIRIMAT, LEMOH, Laplace et LGEP. Le projet a débuté en décembre 2007 pour une durée de 3 ans. Il a bénéficié d'un financement ANR de 461 k€ pour un budget total de 1,06 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Des cellules solaires P3HT-PCBM-NTC ont été obtenues avec des rendements à l'état de l'art : 5,5 % pour les meilleures (4,5 % en moyenne), soit une augmentation significative par rapport à des cellules sans NTC (autour de 4 %). Les améliorations sont obtenues par orientation des NTC sous champ électrique lors de l'étape de recuit des cellules. La méthode de coupage des NTC, leur orientation sous champ électrique, ainsi que la synthèse de nouveaux oligomères de thiophène-fluorénone ayant des propriétés d'auto-organisation remarquables et susceptibles de fonctionnaliser les NTC ont également été validées.

Production scientifique et brevets

Trois articles dans des revues internationales (*Advanced Materials*, *J. Phys. Chem. C* et *Nanotechnology*) déjà publiés, un article présenté à la 23rd International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors, Utrecht (à paraître dans *Physica Status Solidi c*), un article soumis à *Polymer International*, un autre en préparation, huit communications dans des congrès internationaux, dont quatre communications invitées. Enfin, une thèse financée dans le cadre du projet a été soutenue.

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2007

Projet SPARCS

Cristaux photoniques, plasmons et réseaux de diffraction pour l'énergie solaire

Contrôler la collecte et l'absorption de la lumière du soleil

Dans les cellules photovoltaïques exploitant de fines couches absorbantes, le rendement est limité par la faible quantité de lumière effectivement absorbée. En réalisant des cristaux photoniques, des réseaux de diffraction ou des structures à plasmons de surface au-dessus ou au sein même de la couche active, les conditions de collecte de la lumière du spectre solaire et son absorption dans une cellule sont profondément modifiées.

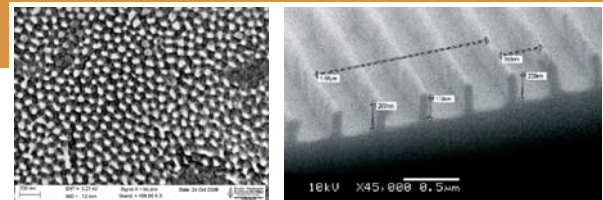
L'objectif du projet est de démontrer tout le potentiel de ces structures photoniques pour augmenter le rendement de tels dispositifs. Il s'attache à explorer les potentialités offertes par l'ingénierie nano-photonique, dans le cas de cellules exploitant des couches absorbantes en silicium et à base de matériaux organiques. Le potentiel de ces nouveaux concepts de cellules est d'abord évalué théoriquement et expérimentalement, sur de simples objets d'étude. Il est ensuite envisagé de véritables cellules photovoltaïques intégrant une structure micro ou nano-photonique.

Vers des cellules photovoltaïques « photonisées » : conception globale et intégration technologique

La démarche combine la modélisation et la simulation électro-optique globale et l'exploitation de processus de nano-structuration à coût maîtrisés et compatibles avec de grandes surfaces.

Un premier objectif est de modéliser l'impact sur les propriétés optiques et électriques d'une telle intégration. Divers concepts innovants sont proposés pour augmenter l'absorption sur l'ensemble du spectre solaire, tout en conservant une bonne acceptation angulaire, ainsi que des pertes électriques raisonnables. Ces concepts sont validés théoriquement en procédant à des simulations globales et multi-domaines.

Sur le plan technologique, les partenaires du projet développent et exploitent des procédés de nano-structuration originaux comme le nano-velours, ou plus courants, comme la nano-implosion ou la lithographie holographique. Il s'agira ensuite d'intégrer de tels procédés avec les étapes habituelles de réalisation de cellules photovoltaïques, afin de créer une nouvelle filière technologique.



(a) Premières structures photoniques réalisées : nanovelours à base de matériaux organiques (a) et cristal photonique en silicium amorphe (b)

Le projet de recherche fondamentale « SPARCS : Structures Photoniques pour l'Amélioration du Rendement des Cellules Solaires » est coordonné par l'Institut des Nanotechnologies de Lyon (CNRS, Ecole Centrale de Lyon, INSA de Lyon, Université de Lyon 1). Il associe aussi IM2NP (CNRS, Universités Paul Cézanne, Provence et Sud Toulon Var) le LPICM (CNRS, Ecole Polytechnique) et deux laboratoires du CEA (LETI, et Liten). Le projet a commencé en janvier 2008 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 1,02 M€, pour un coût global de l'ordre de 2.7 M€.

IMPACT

Résultats majeurs

À l'issue de la première phase du projet, la méthodologie de modélisation et de simulation de cellules photovoltaïques « photonisées » a été mise en place. Il s'agissait d'exploiter une plateforme fondée sur l'exploitation de diverses méthodes optiques (FDTD, RCWA, MMP), intégrables dans des outils de simulation standard (SILVACO, SENTAURUS). Des premiers designs permettant une augmentation significative de l'absorption de fines couches absorbantes ont pu être proposés, et certains des concepts d'ingénierie photonique ont été validés.

Sur le plan technologique, des procédés de nanostructuration à bas coût ont été mis au point. À ce stade, des premières structures photoniques ont pu être réalisées, et ont permis de mesurer une augmentation de l'absorption d'environ 50% sur certaines couches minces absorbantes.

Production scientifique et brevets

Ces travaux ont donné lieu à deux publications (Applied Physics Letters, Opt. Express). Les premiers résultats ont, en outre, fait l'objet de six communications invitées dans des conférences internationales (5th Russian-French workshop on Nanosciences and Nanotechnologies, Moscou, décembre 2008, PECS VIII, Photonic Electromagnetic Crystal Structures Meeting, Sydney, avril 2009, Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, Shanghai, novembre 2009, SPIE Optics and Photonics, San Diego, août 2009, Proc. SPIE, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hambourg, septembre 2009, 4th Korean-French LIA Workshop on Photonics and Nanostructures, Jeju, octobre 2009).

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2006

Projet THRI-PV

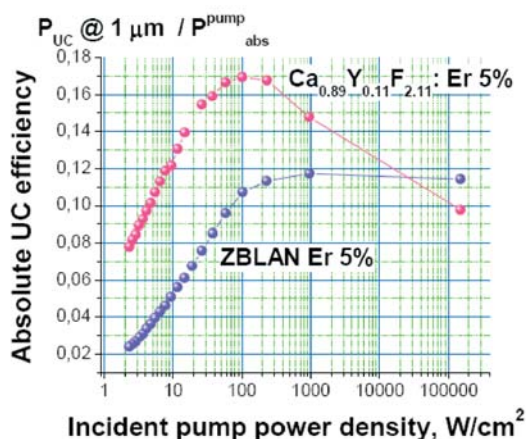
Le photovoltaïque à très hauts rendements

De nouveaux concepts à très hauts rendements

Le plus sévère des freins actuels au développement de l'énergie photovoltaïque est son coût de production : à 2,0 €/Wc (coût de revient de la partie module), il n'est globalement pas compétitif par rapport aux autres sources d'énergie réparties. Les cellules en couches minces basées sur des procédés bas coût, devraient permettre une première rupture en passant le coût du Wc sous l'€/Wc malgré des rendements limités (moins de 15%). Pour aller au delà, le principal levier disponible est d'augmenter significativement les rendements. Il s'agit donc de repenser de manière radicale la conversion photovoltaïque, pour atteindre des rendements de conversion très élevés (supérieurs à 40%), tout en conservant des coûts de fabrication fortement contraints. Des solutions de principe ont été proposées, et de nouveaux matériaux, capables de les mettre en oeuvre sont en train d'apparaître.

Travailler sur une très large palette de concepts...

L'objectif du projet est de préparer les ruptures technologiques permettant des rendements de conversion photovoltaïque à plus 40%, en explorant des possibilités innovantes, comme l'up conversion ou l'utilisation de porteurs chauds et en faisant la démonstration expérimentale de la possibilité (ou non) d'une vraie rupture compte-tenu de l'avancement actuel scientifique et technologique, en accélérant la découverte et la mise en oeuvre des nouveaux matériaux nécessaires par la mise au point de caractérisations sans contact et en préparant, le cas échéant, la réalisation de prototypes de dispositifs à très hauts rendements.



Mesures de rendement énergétique (rapport entre la puissance émise à 1 μm et la puissance incidente à 1,5 μm) pour deux échantillons

Le projet de recherche fondamentale « THRI-PV: Très Hauts Rendements et Innovation Photovoltaïque » est coordonné par l'IRDEP (CNRS, ENSCP, EDF). Il associe le LGEP (CNRS, SUPELEC), le LCAES, l'EM2C (CNRS), le CEM2 (CNRS, Université de Montpellier), l'Institut Lavoisier IREM (CNRS) et le LPN (CNRS). Le projet a commencé en décembre 2006 pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'un financement ANR de 740 k€ pour un coût global de l'ordre de 3,36 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

En ce qui concerne l'up conversion, les progrès ont été très rapides puisqu'en 2007 a été obtenu un rendement de conversion de 5% (sous concentration x 40000), en 2008, 12% (11% @ x 23000) et en 2009, 17% (13% @ x 2000). Les rendements absolus de conversion IR/proche infrarouge obtenus pour les matériaux à up conversion sont les meilleurs jamais reportés dans la littérature. Citons également comme résultats remarquables la génération de photocourant dans une cellule photovoltaïque par excitation sub-bandgap et la modélisation du courant obtenu à partir des données physiques.

La faisabilité de principe d'une cellule solaire à porteurs chauds a été montrée. La modélisation de ces systèmes, dont la physique est complexe, a permis de mieux comprendre les phénomènes de thermalisation de porteurs fortement hors équilibre dans des nanostructures et de proposer des solutions pour améliorer considérablement le couplage photon-matériau actif. Des dispositifs complets ont pu être réalisés et caractérisés. Les vitesses de thermalisation de porteurs chauds mesurées à basse température, entre 2 et 10 W/cm²/K, sont compatibles avec l'utilisation de l'excédent d'énergie des porteurs chauds avec un rendement possible de 60%.

L'ensemble des résultats obtenus sur la caractérisation optique de matériaux potentiels pour les cellules PV a conduit à un dépôt de brevet IRDEP-ILV.

Production scientifique et brevets

Fin 2009, cinq articles avaient été publiés dans des revues internationales (J. Opt. Soc. A, 26, (2009), APL 93, (2008), Thin Sol. Films 516, (2008), Sol. En. Mat. and Solar Cells, 93, 713 (2009), J. Appl. Phys) et trois articles dans des revues plus « généralistes » (Reflète de la physique 2007, EuroPhysics News 2009, Actualités Chimiques 2009)

Le projet a également donné lieu à trois conférences invitées et dix autres communications dans des colloques.

Enfin, il a contribué à un film CNRS, « Super photon pour maxi Watt ».

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2006

Projet OxTiMIB

Nano-OxTi pour la conversion et le stockage de l'énergie solaire

Des nanomatériaux pour la conversion de l'énergie solaire...

Afin de rendre l'énergie photovoltaïque compétitive vis à vis de l'électricité produite par les centrales thermiques utilisant les combustibles fossiles, il importe de réduire le coût du watt installé et d'augmenter significativement les performances des cellules. Les meilleures cellules solaires à simple jonction (Si, CIGS...) atteignent des rendements de 19–25% et leur limite théorique est de 32%. De nouveaux concepts, structures et méthodes pour capturer l'énergie solaire sans thermalisation des charges sont nécessaires pour dépasser cette barrière et accéder à des cellules solaires ayant des efficacités supérieures à 50%. Les matériaux jouent un rôle clef dans les différents aspects de la conversion de l'énergie solaire.

Au delà des modules qui portent les cellules photovoltaïques, le stockage reste le point faible de la filière énergétique. Les récents développements dans la synthèse et la caractérisation des nanomatériaux offrent de nouvelles opportunités, mais des études complémentaires concernant leurs propriétés photo-électrochimiques sont nécessaires afin d'acquérir une meilleure compréhension des phénomènes Red-Ox aux interfaces. Ce point constitue, très probablement, une des clefs qui permettra d'optimiser la conversion et le stockage de l'énergie solaire en énergie chimique.

...au développement de cellules photovoltaïques à très haut rendement et de photo-batteries rechargeables.

Ce projet visait à créer une rupture technologique dans le domaine des cellules photovoltaïques et des photo-batteries par le développement d'un système de conversion et de stockage de l'énergie solaire qui soit efficace, de faible coût, et qui réponde aux enjeux environnementaux. L'approche adoptée consistait à analyser, modéliser, comprendre et exploiter les propriétés originales de nanomatériaux récemment synthétisés à l'IMN, précurseurs et sols-gels photosensibles à base d'oxyde de titane, afin de développer de nouveaux photo-dispositifs et d'optimiser leur fonctionnement. De nouveaux outils de caractérisation, d'analyse et de modélisation permettent d'étudier les modifications structurales induites par l'irradiation et les propriétés photo-électrochimiques aux interfaces (nature chimique et électronique des états de surface, structure des sites actifs...) et d'optimiser la conversion de l'énergie solaire en énergie chimique.



Transformation réversible de l'énergie solaire en énergie chimique

Le projet « OxTiMIB : Photovoltaïque IIIème génération (MIBs) et Photobatterie » était un projet de recherche fondamentale coordonné par l'Institut des Matériaux de Nantes, (CNRS, Université de Nantes). Il associait également le Laboratoire de Physique de l'Etat Condensé (CNRS, Université du Mans), le Groupe Matière Condensée et Matériaux (CNRS, Université de Rennes), le laboratoire Chimie Théorique Méthodologies Modélisations, (CNRS, Université de Montpellier), le laboratoire Propriétés Optiques des Matériaux et Applications (CNRS, Université d'Angers), et le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, (CNRS). Le projet a commencé en décembre 2006 pour une durée de 3 ans. Il a bénéficié d'un financement ANR de 737 k€ pour un coût global de l'ordre de 2,728 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Les procédés de chimie douce développés permettent de stabiliser des solutions colloïdales contenant des nanoparticules à base d'oxyde de titane dont les dimensions peuvent atteindre 1 à 3nm. La composition chimique des solutions colloïdales et la structure des espèces inorganiques ont été précisées. L'existence d'une bande intermédiaire dans ces nanomatériaux est susceptible d'accroître significativement les performances des cellules photovoltaïques en raison d'une meilleure capture de la lumière du spectre solaire. La réversibilité des phénomènes de charge (sous illumination)/décharge autorise le développement de photobatterie. La photo-batterie rechargeable est un nouveau dispositif solaire qui a deux fonctions : la conversion opto-électrique et le stockage sous forme d'énergie électrochimique. Elle présente donc l'avantage de pouvoir stocker l'énergie solaire tout en s'affranchissant des batteries externes et des circuits de contrôle.

Production scientifique et brevets

Ce projet a donné lieu à une douzaine de publications dans des revues internationales à comité de lecture (*Chem. Mater., Advanced Materials, Advanced Functional Materials, J. Phys. Chem. C, Crystal Growth & Design, Appl. Surf. Sci.*...), à une quarantaine de communications orales/affiches dans des congrès Nationaux et Internationaux, à six conférences invités, et à trois dépôts de brevets avec extension à l'Europe, au Japon et aux Etats-Unis.

Programme Bio-énergies, édition 2008

Projet AgriElec

Produire de l'électricité à partir de résidus agricoles et forestiers

Une pile à combustible qui utilise des micro-organismes comme catalyseurs

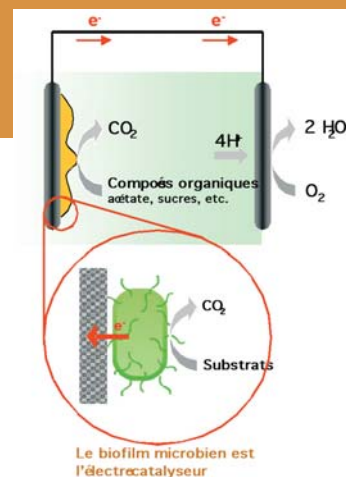
Schématiquement, une pile à combustible est composée d'une anode qui assure l'oxydation du combustible et injecte les électrons produits dans le circuit externe et d'une cathode qui boucle le circuit, le plus souvent pour les piles fonctionnant à température ambiante, en réalisant la réduction de l'oxygène.

L'intensité du courant qui traverse le circuit externe dépend de l'efficacité des catalyseurs qui accélèrent chacune des réactions d'électrodes. Il a été découvert au début des années 2000 que des microorganismes adhérents à la surface des électrodes permettent de catalyser toute sorte de réactions électrochimiques. C'est un saut scientifique majeur qui ouvre des applications très prometteuses car il est devenu possible d'utiliser comme combustible de pile toute sorte de matières organiques : des acétates, des sucres, des alcools, mais aussi les déchets organiques contenus dans les effluents urbains et industriels ou les résidus agricoles et forestiers. Grâce à la technologie des piles à combustible microbiennes (PCM) l'énergie chimique contenue dans les résidus organiques peut être transformée directement en électricité.

Identifier les micro-organismes électro-actifs efficaces et optimiser les modules de pile

Le projet AgriElec veut évaluer le potentiel des PCM pour la production d'électricité à partir d'effluents des industries du papier et de déchets agricoles (paille de blé, tige de maïs). La première phase du projet consiste à identifier des micro-organismes capables de catalyser l'oxydation électrochimique de ces composés. Les flores des sols et des effluents à exploiter seront investiguées en priorité. La très riche biodiversité des milieux Amazoniens (Guyane) sera également une source privilégiée pour la recherche de micro-organismes électro-actifs. Une procédure de formation de films microbiens (biofilms) sera définie afin de favoriser le développement des bactéries d'intérêt et optimiser la vitesse des transferts d'électrons aux interfaces électrode/biofilm. Le couplage de l'électrochimie analytique aux outils de la biologie moléculaire et aux techniques d'imagerie par microscopie permettra d'établir des corrélations entre l'électro-activité des biofilms, leur structure et leur composition microbienne. Des structurations de surface aux échelles micro et nano seront tentées pour améliorer la colonisation de la surface des électrodes par les micro-organismes d'intérêt. Ces recherches se concentreront sur les anodes microbiennes. La partie cathodique mettra en œuvre des cathodes à air abiotiques qui seront améliorées en prenant en compte les contraintes (composition du milieu, pH proche de la neutralité) propres au fonctionnement des PCM.

Schéma d'une pile à combustible microbienne (PCM). A l'anode un biofilm microbien catalyse l'oxydation de composés organiques; la cathode dite «à air» assure la réduction de l'oxygène.



Le projet AgriElec est un projet de recherche fondamentale coordonné par le laboratoire de Génie Chimique (CNRS – université de Toulouse) auquel sont associés le laboratoire d'écologie microbienne et d'environnements extrêmes (LEMIRE, CEA, CNRS, Université d'Aix-Marseille II), le laboratoire écologie des forêts guyanaises, (ECOFOG, Cayenne, Université des Antilles et de la Guyane, CNRS, INRA, CIRAD, AgroParisTech), le laboratoire d'étude de la corrosion aqueuse (LECA, CEA-Saclay), le Centre Technique du Papier (CTP, Grenoble), la société PaxiTech SAS (Grenoble) et le laboratoire de chimie agro-industrielle (LCA, INRA, INPT, ENSIACET); AgriElec a démarré en décembre 2008 pour une durée de 48 mois; il bénéficie d'un financement ANR de 1,167 M€ pour un coût global de 2,862 M€. Le projet a été labellisé par les pôles de compétitivité Agrimp Innovation (Midi-Pyrénées), Axelera (Lyon & Rhône-Alpes) et Capénergies (PACA et Corse).

IMPACTS

Résultats majeurs

Le projet a identifié de nouveaux milieux naturels et industriels dont la flore microbienne permet de former des biofilms électro-actifs très efficaces sur l'anode. Des densités de courant supérieures à 10A/m² sont maintenant obtenues régulièrement pour des potentiels inférieurs à 0V (référence ESH), valeurs qui se situent au niveau des toutes meilleures performances actuelles pour les PCM. De nouvelles souches de micro-organismes électro-actifs ont été identifiées et sont en cours d'isolement.

Production scientifique et brevets

Plusieurs résultats seront exposés en particulier lors du congrès annuel de l'International Society of Electrochemistry (ISE, septembre 2010) qui consacre un symposium aux biopiles.

Programme « Blanc », édition 2005

Projet HYPHO

Vers une feuille artificielle produisant de l'hydrogène

Produire de l'hydrogène à partir de la photosynthèse artificielle

L'hydrogène est appelé à jouer un rôle primordial dans les énergies du futur dans le monde. Le problème majeur reste sans doute sa production. Pour l'instant, les procédés disponibles sont le craquage très polluant des composés organiques et les électrolyses très coûteuses.

Ce projet vise à développer de nouveaux procédés non polluants de production d'hydrogène.

La stratégie adoptée par le projet est basée sur l'utilisation de la lumière solaire et de l'eau pour mener à bien, d'une part, la photooxydation de substrats organiques conduisant à des composés à grande valeur ajoutée et, d'autre part, la récupération des électrons obtenus dans ce processus pour réduire des protons en dihydrogène.

Le projet est divisé en deux grandes parties ; d'une part, il s'agit d'élaborer de nouveaux assemblages moléculaires constitués d'un chromophore photo-actif et d'une unité catalytique oxydante et d'autre part, de développer des complexes de métaux de transition de la première ligne pour la réduction de protons en hydrogène.

De nombreux verrous scientifiques avant d'avoir un prototype opérationnel

Le challenge de cette approche réside en la mise au point de photo-catalyseurs pour l'oxydation des substrats organiques. Il s'agit de réaliser en ce sens l'assemblage supramoléculaire d'un chromophore photo-actif et l'unité catalytique du processus d'oxydation. Sous irradiation, on génère le motif métal-oxo à partir de celui du métal-eau du centre catalytique à travers des réactions de transfert d'électrons et protons. La réaction catalytique peut ainsi avoir lieu avec transfert de l'atome d'oxygène venant de l'eau aux substrats et régénération du complexe avec le motif métal-eau.

Pour cela, il s'agissait de lever un certain nombre de verrous :

- ◆ maîtriser les processus d'accumulation de charges photoinduites au niveau du site catalytique,
- ◆ élaborer des sites catalytiques très robustes pour les réactions d'oxydation,
- ◆ développer de nouvelles tactiques synthétiques pour l'assemblage de photocatalyseurs,
- ◆ mettre en forme des photocatalyseurs sur des électrodes modifiées,
- ◆ améliorer les performances des catalyseurs pour la réduction de protons en H₂,
- ◆ améliorer le contact électrique entre le catalyseur de réduction et la surface de l'électrode,
- ◆ coupler les réactions de photooxydation et de réduction.

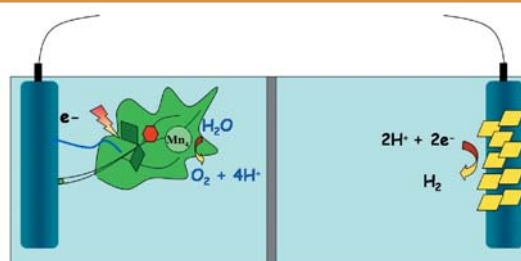


Schéma du dispositif final couplant une réaction de photooxydation (avec l'eau comme réactif) et la production de l'hydrogène

Le projet «HYPHO: Photooxidation of organic substrates coupled to the reduction of protons: Sustainable hydrogen production» était un projet de recherche fondamentale coordonné par le Laboratoire de Chimie Inorganique de l'Université Paris Sud. Il associait également les laboratoires iBiTec et Chimie des Surfaces et Interfaces du CEA Saclay. Il a commencé en janvier 2006 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement ANR de 350 k€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Une nouvelle famille de ligand espaceur jouant le rôle de relais électronique a été obtenu. Le projet a également permis de développer une méthode de synthèse pour relier les différents modules, qui a été brevetée.

La synthèse de ligands hétéroditopiques cibles du projet ainsi que le complexe mixte Ruthénium (II)-Manganèse (III) ont été faites et la photo-oxydation du Mn (III) en Mn (IV) sous irradiation a été démontrée.

Enfin, des catalyseurs de réduction de protons présentant une activité de moitié du platine ont été élaborés, et ont fait l'objet du dépôt d'un brevet.

Production scientifique et brevets (environ 500 caractères espaces compris)

Outre les deux brevets déjà mentionnés, ces résultats ont donné lieu à quatre publications dans des revues à comité de lecture et à cinq communications invitées, publiées dans des actes de conférences internationales.

Programme « PNANO », édition 2006

Projet THERMAESCAPE

Nanomatériaux thermoélectriques : vers une électronique nomade autonome et performante

Des matériaux thermoélectriques à la hauteur des enjeux technologiques

Les dispositifs électroniques portables, qu'ils soient à usages communicatifs, médicaux ou organisationnels, nous accompagnent dans la vie quotidienne et nous rendent de très nombreux services. Leurs temps d'usage sont cependant limités, du fait d'une autonomie insuffisante ou de problèmes de sur-échauffement.

Dans un contexte de développement exponentiel des besoins et d'émergence de nouvelles fonctionnalités, les systèmes de récupération d'énergie capables de répondre aux défis techniques et aux besoins d'autonomie et de performance des objets nomades de prochaine génération occuperont une place de choix dans l'évolution de ces technologies.

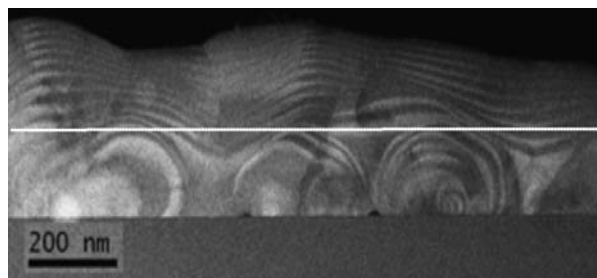
Le projet THERMAESCAPE visait à développer des matériaux thermoélectriques en rupture, tirant profit des propriétés de la matière à l'échelle nanométrique pour exalter leurs performances en récupération d'énergie comme en refroidissement. La mise en œuvre de procédés de fabrication industriels devrait permettre la fabrication de composants thermoélectriques, démontrant les performances attendues, et assurer la possibilité d'un potentiel transfert de technologie vers des partenaires industriels du secteur.

Un contrôle et une compréhension des mécanismes à l'échelle nanométrique

Le projet proposait de mettre en œuvre les outils technologiques et scientifiques pour définir de manière optimale une hétéro-structure à nanoparticules, en vue d'obtenir une rupture en termes de propriétés thermoélectriques. L'introduction de nanoparticules multi-dispersées dans des hétérostructures doit permettre la diffusion des phonons thermiques dans une gamme spectrale plus large, conduisant à des valeurs de conductivités thermiques inférieures à celle de l'alliage.

Au niveau scientifique, la compréhension des phénomènes de diffusion des phonons par une distribution relativement dense de nanoparticules doit être maîtrisée. La modélisation de ces mécanismes doit permettre l'optimisation de la taille et de la distribution spatiale des nanoparticules.

Au niveau technologique, il s'agira de mettre en œuvre une technique de croissance industrielle et de conduire le matériau développé jusqu'à un micro dispositif thermo-électrique de preuve de concept permettant de valider les performances attendues du matériau dans des applications industrielles potentielles.



Croissance de super-réseaux de boîtes quantiques polycristallines de Ge (en clair) dans SiGe (en sombre) par dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Le projet « THERMAESCAPE : Thermoelectric materials for energy scavenging power expanding »

est un projet de recherche fondamentale coordonné par le Liten (CEA). Il associe des partenaires académiques tels que l'EM2C (CNRS, Ecole Centrale de Paris), le CPMOH (CNRS, Université de Bordeaux), et le LPICM (CNRS, Ecole Polytechnique), et deux partenaires industriels, STMicroelectronics et Schneider Electric. Le projet a commencé en janvier 2007 pour une durée de 36 mois et a été prolongé de 6 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 553 k€ pour un coût global de l'ordre de 1,037 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

La conductivité thermique minimale atteignable dans des nanostructures parfaitement maîtrisées a été calculée. La croissance de superréseaux de puits quantiques poly-cristallins (respectivement monocristallins) par CVD a démontré expérimentalement la réduction de la conductivité thermique de 45 % (respectivement 20 %). Les premiers superréseaux de boîtes quantiques monocristallines dans Si et poly-cristallines dans SiGe (première mondiale) ont à leurs tours été obtenus. Le dimensionnement de dispositifs thermoélectriques permet d'envisager une utilisation prometteuse de ces matériaux dans des applications spécifiques à nos partenaires industriels.

Production scientifique et brevets

Les résultats ont été présentés dans 11 conférences internationales. Un papier a été publié dans Journal of Electronic Materials, concernant la modélisation dans les cristaux phononiques. Le travail sur la modélisation et démonstration de la baisse de conductivité thermique dans les superréseaux de boîtes quantiques monocristallines a été soumis et revu pour publication à Nature Materials. Deux articles sur la modélisation dans les matériaux nanoporeux et les nanofils ont été soumis et revus pour publication dans Physical Review Letters.

Programme « Systèmes embarqués et grandes infrastructures », édition 2008

Projet SESAM

Recycler les sources d'énergie présentes dans l'environnement pour permettre la suppression des piles électriques

Permettre l'autonomie énergétique illimitée des nœuds de communications dans un réseau de capteurs abandonnés communicants

Les applications envisagées pour des capteurs autonomes et communicants ne cessent de croître : tags RFID actifs permettant d'accroître la distance de lecture, système de monitoring (température, poids, chocs, évolution des structures...), surveillance des paramètres physiologiques d'une personne. Les domaines sont aussi divers que le médical, l'automobile, le sport, l'aéronautique, le bâtiment, la domotique. Le point bloquant reste la réalisation physique du nœud intégré. Plusieurs verrous sont à lever : l'autonomie énergétique, la consommation des interfaces capteurs, la gestion de la communication entre les nœuds...

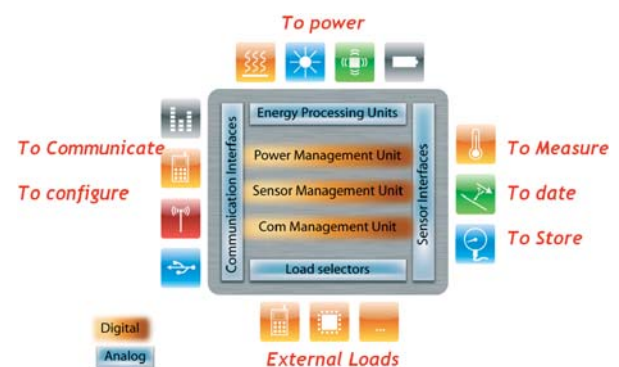
Le projet SESAM se propose de travailler sur l'autonomie énergétique. Son objectif est de développer un microsystème de récupération et de management de l'énergie, adaptable, reconfigurable et robuste. Cela impose de s'appuyer sur des sources d'énergie multiples et d'être conscient des variations de l'environnement et de l'énergie disponible. Le problème technique à résoudre est le suivant : comment optimiser, en termes de rendement, en temps réel, la récupération, l'utilisation et le stockage de l'énergie, en fonction des besoins énergétiques de l'application et du niveau de l'énergie disponible dans l'environnement.

Une technologie asynchrone ultra-basse consommation et des convertisseurs d'énergie miniatures pour un système optimal

Le projet consiste à réaliser un système composé de plusieurs sources d'énergie de natures variées et implémentées dans des technologies différentes, et comprenant une unité de gestion d'énergie jouant le rôle d'interface entre les sources, la charge et la batterie. L'unité de gestion doit être consciente de l'état de chacune des sources et capable d'orienter les flux d'énergie entre les sources externes, une batterie et les capteurs, d'une manière qui optimise le temps d'autonomie du système.

L'apport d'une intelligence dans la gestion des flux d'énergie permet la recherche d'un algorithme de gestion optimale d'énergie. Le projet envisage d'employer un cœur de processeur asynchrone associé à l'utilisation d'une électronique ultra basse consommation. La diversité des sources d'énergie rend moins probable une faillite énergétique. Il s'agira également de développer des sources de récupération d'énergie vibratoires (REV) innovantes à transduction piézoélectrique et piézo-électrostatique en technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems). Et le système global devra gérer aussi les sources d'énergie thermique et photovoltaïque.

Enfin il s'agira de développer une plateforme de modélisation du système global : il s'agit d'un système complexe et hétérogène, pour lequel, à l'heure actuelle, il n'existe pas de technique de modélisation simple.



SESAM : Une plateforme pour la gestion d'un système autonome à multiple sources d'énergie

Le projet « SESAM : Récupération adaptative des énergies ambiantes pour l'alimentation de microsystèmes autonomes » est un projet de recherche fondamentale coordonné par le laboratoire ESYCOM (ESIEE, Université Paris-Est). Il associe aussi le CEA-LETI, le LIP6 (CNRS, Université Pierre et Marie Curie) et le laboratoire TIMA (CNRS, INP Grenoble, Université Joseph Fourier). Le projet a commencé en mars 2009 et dure 36 mois : il bénéficie d'un financement ANR de 1,1 M€ pour un coût global de l'ordre de 3 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Parmi les principaux résultats obtenus à ce jour, on peut citer le développement d'une plateforme de récupération d'énergie à multiple sources. Cela a demandé de mettre au point une méthode non linéaire, passive et automatique, d'adaptation en fréquence qui permet aux REV de suivre les variations fréquentielles des vibrations, une méthode automatique d'adaptation aux variations d'amplitude des vibrations d'un REV à transduction électrostatique et une méthode d'optimisation d'un REV électrostatique pour le rendre peu sensible aux variations d'amplitude des vibrations.

Production scientifique et brevets

Onze articles ont été publiés dans des actes de conférences, notamment MRS Fall meeting'09, IEEE BMAS'09, DTIP'10 et IEEE NEWCAS'10.

3 TRANSPORTER, STOCKER, DISTRIBUER LES ÉNERGIES RÉPARTIES

Entre le captage des ressources énergétiques et leur usage final, que ce soit dans le domaine des transports, du bâtiment, de l'industrie ou des appareils nomades, il est nécessaire de transporter cette énergie et éventuellement de la stocker, dès que l'usage n'est pas concomitant à la production.

Stocker l'énergie pour réguler les réseaux de distribution

Ce stockage peut prendre de nombreuses formes différentes, adaptées à la fois au mode de production, au vecteur énergétique et aux besoins de l'utilisateur final. Cette partie du cahier se limite à présenter des projets qui s'intéressent aux modes de stockage de très grandes capacités, dont l'objectif est de réguler la distribution d'énergie au niveau des grands exploitants d'infrastructures et de réseaux.

Les stockages directement liés aux usages dans le domaine des transports ou du bâtiment, qui obéissent à des cahiers des charges spécifiques à ces types d'utilisation, sont présentés dans les parties correspondantes du cahier.

Les trois projets présentés concernent tous un stockage sous forme thermique, même pour stocker de l'électricité. Le stockage électrochimique de grande capacité fait peu l'objet de recherches en France, bien qu'un démonstrateur utilisant une technologie NaS (sodium-soufre) développée au Japon ait été mis en place sur l'île de la Réunion avec le soutien de l'ADEME.

Le projet SETHER vise à développer une technologie très innovante de stockage de l'électricité sous forme de chaleur sensible

dans des matériaux réfractaires portés à haute température alors que le projet Solar-GeoTherm ambitionne plus classiquement d'évaluer les capacités d'un massif rocheux pour le stockage et le déstockage optimal de l'énergie thermique produite par une installation solaire, via un transfert de chaleur vers le sous-sol par sondes géothermiques.

La régulation de la production d'énergie solaire sous la forme d'un stockage tampon était aussi l'objectif du projet SOLSTOCK. Ce projet se proposait d'utiliser un matériau inerte semblable à une céramique, obtenu en faisant fondre à haute température des déchets d'amiante, matériau présentant de très bonnes propriétés de stockage de la chaleur à un faible coût, pour être utilisé comme dispositif de stockage dans des centrales solaires à concentration.

Stocker et transporter sous forme d'hydrogène les énergies réparties

Une autre manière de stocker l'énergie envisageable consiste à la transformer en un vecteur énergétique plus facile à stocker et à transporter en grande quantité. L'hydrogène paraît être un bon candidat. C'était l'objet du projet CYRANO-1 que d'évaluer la pertinence technico-économique d'un stockage tampon de l'électricité produite par des parcs éoliens sous la forme d'hydrogène injecté dans des gazoducs afin d'assurer la régulation d'un réseau alimentant un demi million de personnes.

Il reste toutefois quelques challenges technologiques à lever pour assurer le transport d'hydrogène efficacement sur de longues distances à des coûts maîtrisés. C'était l'objet des projets CATHY et POLHYTUBE que d'examiner cette question. Le premier a adopté une démarche assez conservative, consistant à évaluer dans quelle mesure les gazoducs existants pouvaient être adaptés

pour transporter de l'hydrogène à haute pression. L'objectif était de quantifier l'altération des propriétés mécaniques de l'acier « X80 » en milieu hydrogène pressurisé à 300 bars. Le projet POLHYTUBE s'est placé dans une perspective de création de nouveaux réseaux de transport d'hydrogène, en examinant quels polymères plus adaptés que le polyéthylène pourraient être utilisés pour limiter les pertes et garantir la durée de vie de ces réseaux.

Piloter intelligemment les réseaux de distribution

On peut aussi réinjecter directement sur le réseau électrique l'énergie produite par les sources renouvelables, en y associant en bout de chaîne, au niveau de l'utilisateur final, soit un dispositif de stockage tampon (sous la forme d'une batterie très souvent), soit un système de gestion intelligente qui va essayer de faire coïncider la production avec l'usage de l'énergie.

Le projet MICROSCOPE ambitionnait précisément de développer des systèmes de production de la pointe électrique à bas coût pour les réseaux non interconnectés (notamment les réseaux îliens), à partir d'une production locale photovoltaïque couplée à un stockage d'énergie qui prenait la forme d'une batterie au plomb comprimé, dispositif performant, à bas coût, avec un cyclage adapté au photovoltaïque.

La problématique des micro-réseaux autonomes (pour des applications dans les pays

en voie de développement ou pour les réseaux îliens non connectés aux grandes infrastructures de transport électriques) a également fait l'objet du projet SOLEDO, qui s'est attaché à concevoir des systèmes de génération photovoltaïque en mini-réseau exploitant des moyens de communication et une gestion intelligente de l'énergie produite, stockée et consommée.

Deux autres projets « smart-grids » font également l'objet de présentations dans ce cahier. Le projet SUPERENER prenait le problème du point de vue du gestionnaire du réseau, en s'intéressant à la question de l'intégration et de la gestion de multiples générateurs d'électricité (notamment photovoltaïques et éoliens) dans un micro-réseau et a développé une approche méthodologique pour la conception de la supervision énergétique centralisée du micro-réseau, intégrant les spécificités de ces nouveaux types de générateurs et leur capacité à participer à la gestion du réseau. À l'inverse, le projet MULTISOL partait du point de vue du consommateur individuel, qui devient aussi producteur d'énergie, dans un habitat équipé de photovoltaïque par exemple. L'architecture logicielle développée dans le cadre de ce projet permet d'optimiser l'utilisation locale de l'énergie électrique en fonction de critères écologiques (réduction des émissions de CO₂), économique (minimisation du coût en euros) tout en respectant le confort pour l'utilisateur.

Transporter, stocker, distribuer les énergies réparties

Acronyme et nom du projet

Le projet résumé en un titre

Stocker l'énergie pour réguler les réseaux de distribution

SEThER	Stockage d'Electricité sous forme THERmique à haute température	Stocker sous forme thermique l'électricité
SolarGeoTherm	Stockage et déstockage supervisés dans un massif rocheux de l'énergie thermique produite par une installation solaire	Stocker la chaleur solaire dans le sous-sol
SOLSTOCK	Stockage thermique pour centrale solaire à forte concentration	Des déchets ultimes au secours des centrales électriques solaires thermiques

Stocker et transporter sous forme d'hydrogène les énergies réparties

CYRANO-1	Canalisations hYdrogène pour Réserve tAmpon d'éNergie renOuvlable-1	L'hydrogène au service des éoliennes et de la régulation du réseau électrique
CATHY	Caractérisation des Aciers pour le Transport de l'Hydrogène	Acier haute résistance pour transport et stockage de l'hydrogène par gazoduc
POLHYTUBE	Développement et étude de matériaux innovants pour les réseaux de distribution d'Hydrogène	Développement de matériaux sûrs pour les réseaux de distribution d'hydrogène

Piloter intelligemment les réseaux de distribution

MICROSCOPE	Micro-Injecteur Connecté au Réseau pour Optimiser par le Stockage la COurbe de Production Electrique	Stocker l'électricité photovoltaïque pour optimiser la courbe de charge
SOLEDO	SOLution globale pour un mini réseau avec Energie Décentralisée photovoltaïque en source principale et gestion Optimisée des flux de production et de consommation	Un mini-réseau pour une gestion optimisée des flux de production décentralisé et de consommation d'électricité
SUPERENER	Supervision énergétique des centrales dispersées permettant la fourniture de services système au sein d'un micro réseau	Innovations technologiques pour un développement massif des générateurs à base d'énergie renouvelable
MULTISOL	Optimisation des flux électriques dans un bâtiment photovoltaïque	Optimiser les flux électriques dans les bâtiments

Programme « Stockage innovant de l'énergie », édition 2009

Projet SETHER

Stocker sous forme thermique l'électricité

Développer une solution de stockage d'électricité en réponse aux enjeux énergétiques actuels et futurs

Le développement de solutions innovantes de stockage d'électricité répond au double enjeu de l'introduction massive des énergies renouvelables sur le réseau électrique et du besoin de moyens économiques et écologiques de production d'énergie en période de pointe, s'adaptant aux fortes fluctuations de la consommation électrique.

La technologie étudiée dans le cadre du projet SETHER est une solution innovante de stockage électrique de grande capacité, en rupture technologique avec les systèmes existants. Brevetée par Saipem, partenaire du projet, elle repose sur un cycle thermodynamique où l'énergie électrique est stockée sous forme de chaleur sensible dans des matériaux réfractaires portés à haute température puis restituée lorsqu'un besoin de production électrique apparaît.

Le projet SETHER permettra de mener l'ensemble des travaux de R&D préliminaires à la mise en œuvre de la technologie de stockage sous forme thermique à haute température. Si les travaux réalisés s'avèrent concluants, il pourrait permettre la réalisation de prototypes puis la mise en service d'installations industrielles de stockage utilisant ce procédé innovant.

Un projet de recherche autour d'une solution en rupture technologique

Le dispositif de stockage comprend deux enceintes pressurisées constituées d'un lit de solide (une enceinte à haute température et une enceinte à basse température) reliées entre elles par des turbomachines. Durant la phase de stockage, l'électricité est utilisée pour entraîner une pompe à chaleur qui transfère de la chaleur de l'enceinte basse température à l'enceinte haute température, par la circulation en circuit fermé d'un gaz neutre. Durant la phase de décharge, la chaleur entre l'enceinte à haute température et celle à basse température est transformée en énergie mécanique par une machine thermique (ensemble turbine-compresseur) qui entraîne une génératrice renvoyant l'énergie dans le réseau.

Ce procédé de stockage est caractérisé par un rendement de cycle élevé, du fait de l'utilisation d'une pompe à chaleur pour la charge, qui compense le faible rendement de la conversion énergie thermique-énergie mécanique lors de la décharge. Ce système permet ainsi d'avoir un rendement de cycle charge/décharge s'affranchissant du rendement de Carnot. Les études préliminaires ont montré qu'un rendement global de 70% est accessible avec les performances des turbomachines existantes.

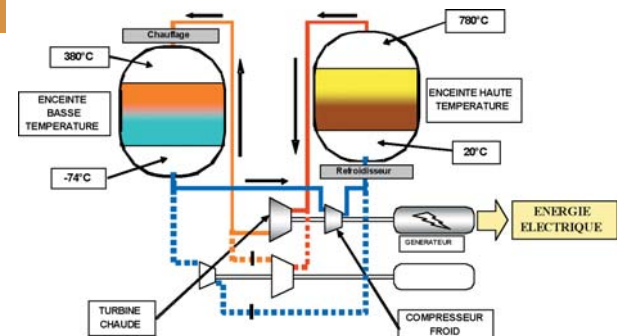


Schéma du procédé lors des phases de décharge

Le projet «SEETHER: Stockage d'Electricité sous forme THERmique à haute température» est un projet de recherche industrielle coordonné par l'entreprise POWEO. Il associe également Saipem, CEA-GRETh, ENSCI-GEMH, ONERA, CNAM. Il a commencé en décembre 2008 pour une durée de 36 mois; il bénéficie d'un financement ANR de 782 k€ pour un budget total d'environ 1,7 M€.

Résultats majeurs

Le projet a permis des avancées portant sur la modélisation thermodynamique du procédé, l'étude et la validation expérimentale des matériaux réfractaires et de leur géométrie ainsi que l'étude des turbomachines adaptées au procédé. Les études de conception technologique ont également été menées.

La technologie étudiée présente un intérêt économique, industriel et environnemental majeur. Elle pourrait être particulièrement adaptée pour le stockage de grande capacité connecté au réseau, avec une densité de stockage élevée, un très bon rendement et un coût de stockage limité. Cette solution pourrait avoir de nombreuses applications industrielles: unités de production de pointe économiques et respectueuses de l'environnement, outils de développement et de valorisation des énergies renouvelables, capacités d'ajustement permettant de sécuriser les réseaux électriques.

Programme « Stockage innovant de l'énergie », édition 2008

Projet SolarGeoTherm

Stocker la chaleur solaire dans le sous-sol

Stockage et déstockage supervisés dans un massif rocheux de l'énergie thermique produite par une installation solaire

L'utilisation de capteurs solaires thermiques aboutit à une production de chaleur fortement intermittente et souvent décalée dans le temps par rapport aux besoins.

Le projet SolarGeoTherm s'attache à évaluer les capacités d'un massif rocheux pour le stockage et le déstockage optimal de l'énergie thermique produite par une installation solaire, via un transfert de chaleur vers le sous-sol par sondes géothermiques. Le projet maîtrise complètement, par régulation, les paramètres de stockage et déstockage, en dehors de toute interférence d'utilisation parasite. Cette liberté de paramétrage permet de préparer dans les meilleures conditions la modélisation du comportement thermique du massif rocheux et des échanges sonde-massif. L'optimisation des échanges thermiques et l'équilibre dans le temps de ces échanges sont étudiés en paramétrant notamment les intervalles de stockage-déstockage non nécessairement inter-saisonniers.

Un site expérimental dans les schistes cambriens du massif des Aspres

La partie expérimentale du projet se déroule sur un site pyrénéen, dans un environnement géologique de grés-pélites rubanées gris-verdâtres de l'Aspre-Formation de Jujols du Paléozoïque, en dehors de tout aquifère majeur ou de circulation d'eau dans des fractures.

Le site est équipé de trois forages géothermiques de 180 mètres de profondeur utilisés pour l'injection et le soutirage de chaleur, de 40 m² de capteurs solaires thermiques et d'aérothermes faisant fonction de dispositif de dissipation thermique. Les forages principaux se positionnent sur les sommets d'un triangle équilatéral de 5 m de côté. Tous les forages sont instrumentés par une fibre optique permettant des mesures de température sur toute leur longueur. Les trajectographies des trois forages profonds ont été établies. Sur ces mêmes forages ont été réalisées une imagerie paroi et les diagraphies résistivité (long & short normal resistivity) et Gamma naturel (natural gamma). Le site expérimental a également fait l'objet pour l'étude de sa fracturation d'une reconnaissance géophysique de surface par panneaux électriques.

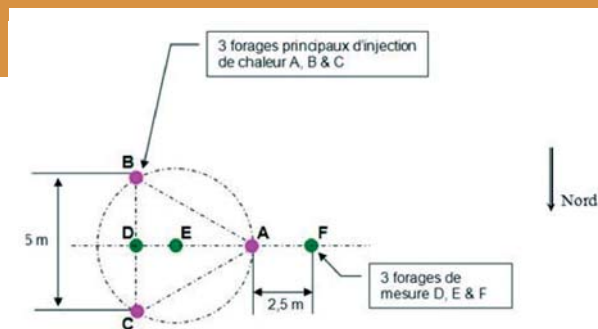


Schéma horizontal de la disposition des forages

Le projet « SolarGeoTherm : Stockage et déstockage supervisés dans un massif rocheux de l'énergie thermique produite par une installation solaire »

est un projet de recherche industrielle coordonné par le BRGM. Il associe également le laboratoire ELIAUS (Université de Perpignan), Dominguez-Energie et le laboratoire PROMES (UPR 8521 CNRS). Le projet a commencé en décembre 2008 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 500 k€ pour un coût global de l'ordre de 1 M€.

IMPACTS**Résultats majeurs**

Une émission d'un choc thermique sur un des forages profonds (1 000 litres d'eau à 70 °C injectés en une heure dans une boucle la sonde géothermique) a permis d'enregistrer la montée en température dans le forage, et sur 6 jours consécutifs la période de relaxation. Ce test a permis d'acquérir de façon détaillée les paramètres thermophysiques du massif rocheux sur toute la longueur du forage avant même que l'installation expérimentale soit totalement opérationnelle.

L'acquisition en continu des mesures de température lors d'opérations de stockage/déstockage de chaleur conduites dans le cadre de plans d'expérience établis a commencé en décembre 2009, date de la mise en opération de l'installation expérimentale.

Production scientifique et brevets

Deux thèses sont en cours dans les laboratoires ELIAUS et PROMES.

Le livrable final du projet Solargeotherm est un guide de conception et de bonne pratique des installations géothermiques utilisant la ressource du stockage dans un massif rocheux de l'énergie thermique produite par une installation solaire.

Programme « Matériaux et procédés », édition 2007

Projet SOLSTOCK

Des déchets ultimes au secours des centrales électriques solaires thermiques

Stocker l'énergie thermique à haute température pour faire fonctionner les centrales électrosolaires à concentration lorsque le soleil fait défaut

L'électricité solaire peut être produite à l'aide de centrales photovoltaïques ou de centrales solaires thermiques. Ces dernières sont semblables aux centrales au charbon sauf que la chaudière a été remplacée par un champ de miroirs pour concentrer le rayonnement solaire et le transformer en chaleur à haute température (250 à 800 °C suivant les technologies).

Ces procédés industriels aujourd'hui matures ont été développés il y a 30 ans et sont en plein essor à travers le monde. Leur compétitivité et leur fiabilité ainsi que la qualité de l'électricité produite sont lourdement pénalisées par les intermittences solaires. Il est donc nécessaire de stocker l'énergie thermique disponible en milieu de journée pour l'exploiter lorsque le soleil fait défaut.

Des systèmes de stockage ont été développés dans les années 80 mais ils sont à ce jour trop chers ou trop dangereux. Les quantités de chaleur à stocker étant très importantes, il est nécessaire de mettre en œuvre de larges quantités de matériaux de stockage (30 000 tonnes pour une centrale de 50 MWe comme à Andasol en Espagne). Il est aujourd'hui indispensable de trouver de nouveaux modes de stockage de l'énergie thermique qui soient en même temps durables et économiques.

Des matériaux inertes issus du traitement industriel de déchets amiantés pour optimiser le fonctionnement des centrales électriques solaires.

Au cours du XX^{ème} siècle, l'homme a consommé 174 millions de tonnes d'amianté à travers le monde. Aujourd'hui, son utilisation est interdite et l'amianté exploitée doit être éliminée. La seule manière de la rendre inoffensive est de la faire fondre à 1 400 °C pour supprimer sa structure fibreuse responsable de sa dangerosité. Cette opération est actuellement réalisée industriellement et la France est un des rares pays au monde à maîtriser cette technologie et à l'exporter. A l'issue de ce traitement (dont le coût est à la charge du propriétaire des déchets, principe du pollueur-payeur), un matériau inerte semblable à une céramique est obtenu.

Les propriétés de ce matériau, récemment étudiées au cours du programme Solstock, ont démontré qu'il s'agit du candidat idéal pour le stockage thermique à l'échelle industrielle : une très grande stabilité thermique jusqu'à 1 200 °C, une bonne capacité de stockage, une disponibilité quasi-illimitée, un très faible coût (8 euros la tonne). Son utilisation dans le cadre des centrales électrosolaires lui redonne ainsi un nouveau cycle de vie (assurant un retour sur l'investissement énergétique de la vitrification) et va permettre de développer l'industrie du traitement des déchets amiantés en ouvrant un marché à fort potentiel.



Centrale électrique solaire pilote de Thémis (Pyrénées Orientales) où sera testé le stockage à base de céramiques issues du traitement de déchets amiantés.

Le projet de recherche « SOLSTOCK : stockage thermique pour centrale solaire à forte concentration »

est un projet de recherche industrielle coordonné par le laboratoire PROMES (CNRS). Il associe aussi le CEMHTI (CNRS) et un industriel, CRISTOPIA. Il a commencé en mars 2008 pour une durée de 36 mois ; il bénéficie d'un financement ANR de 438 k€ pour un coût global d'environ 811 k€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Le principal résultat des deux premières années du programme SOLSTOCK a été l'identification des céramiques issues du traitement thermique des déchets amiantés comme matériaux quasi-idéaux pour le stockage industriel thermique à haute température. Il ouvre de nombreuses perspectives comme le nouveau projet ANR SESCO qui vient de commencer et qui consiste à réaliser dans les quatre ans à venir des modules échangeurs/stockeurs directement sur le site industriel de vitrification des déchets amiantés puis de les tester dans une centrale électrosolaire thermique pilote de 4 MW.

Production scientifique et brevets

La valorisation des céramiques issues de la vitrification des déchets amiantés pour le stockage de l'énergie a fait l'objet d'un dépôt de brevet Français par le CNRS en juin 2009. Depuis, le concept et les premiers résultats ont été présentés à Stockholm lors de la conférence internationale Effstock, à la conférence internationale Energy Sustainability de l'ASME à San Francisco en Juillet 2009 et à la conférence internationale SolarPaces de Berlin en septembre 2009. Une prochaine communication sera faite à la conférence internationale WasteEng en Mai 2010 à Pékin.

Programme « Hydrogène et piles à combustible », édition 2008

Projet CYRANO-1

L'Hydrogène au Service des Eoliennes et de la Régulation du Réseau Electrique

Pallier l'intermittence de la production électrique des éoliennes pour satisfaire les pointes de consommation et réguler le réseau électrique

L'énergie électrique produite par les parcs éoliens a un caractère intermittent lié aux conditions de vent. Ce moyen de production électrique n'est donc pas toujours en phase avec les pointes de consommation et complique la régulation du réseau électrique. L'association d'un réservoir tampon aux fermes éoliennes devrait permettre de pallier cette déficience.

Le projet CYRANO-1 s'intéresse au couplage de parcs éoliens avec un stockage tampon d'hydrogène pressurisé pour la régulation d'un réseau électrique alimentant une population de 500 000 habitants. Lors des périodes creuses de demande, la production électrique des parcs éoliens est convertie en hydrogène via des électrolyseurs. Puis l'hydrogène est injecté dans des gazoducs qui assurent son stockage et son transport vers des piles à combustible. Celles-ci renforcent alors le réseau lorsque la production des parcs éoliens est insuffisante pour répondre à la demande.

Ce projet consiste à mener l'analyse technico-économique de solutions industrielles « Eoliennes – Electrolyseurs - Réservoir tampon hydrogène par gazoducs - PAC » intégrées dans un réseau électrique selon des scénarii définis. Les aspects réglementaires et sécuritaires sont pris en compte dans cette analyse.

Une production électrique optimisée des parcs éoliens

Le projet a pour objectif de développer des modèles d'optimisation de la chaîne intégrant les éléments techniques, économiques et juridiques. Pour dimensionner correctement le système « parc éolien - stockage d'hydrogène – PAC », il s'agit de commencer par faire l'inventaire des composants de la chaîne (éolienne, électrolyseur, compresseur, gazoduc, PAC) en caractérisant leurs performances, leurs limitations actuelles et leurs coûts.

Les modèles développés seront testés en Bretagne, sur un territoire d'environ 500 000 habitants. Les profils réels annuels de vent sont ceux des stations de Brest et Quimper. Les résultats présentent les éléments de fonctionnement de la chaîne au cours du temps (répartition des flux électriques à partir de l'éolien, profils des débits H2 à la sortie des électrolyseurs, de pression H2 dans les gazoducs, profils des productions électriques globales de la chaîne...).

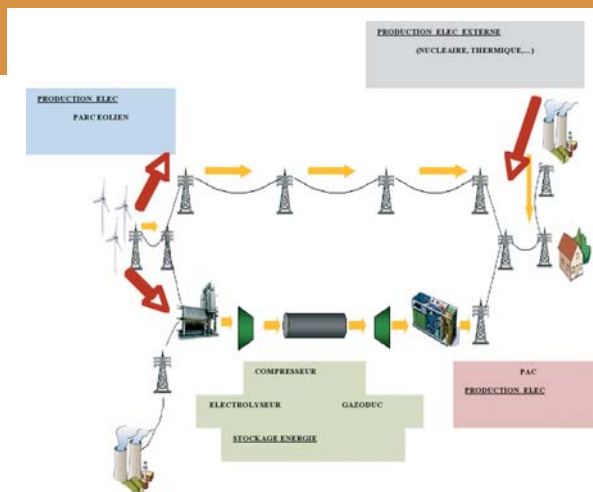


Schéma d'une chaîne « Parcs éoliens-stockage H2-PAC » raccordée à un réseau électrique

Le projet « CYRANO 1: Canalisations hYdrogène pour Réserve tAmpon d'éNergie renOUvelable-1 » est un projet de recherche industrielle coordonné par GDF Suez. Il associe aussi l'IN-ERIS, le CEA et HELION. Il a débuté en janvier 2009, pour une durée de 30 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 271 k€ pour un budget total de 542 k€.

IMPACTS**Résultats majeurs**

Depuis janvier 2009, un certain nombre de résultats sont acquis : un premier inventaire des composants existant sur le marché (éoliennes, électrolyseurs...) de la chaîne « CYRANO » avec fiches descriptives de leurs caractéristiques techniques et économiques, une revue de la réglementation liée aux parcs éoliens et aux installations hydrogène.

Les principaux résultats attendus pour la fin du projet concernent l'implémentation de modèles d'optimisation pour le dimensionnement de la chaîne « CYRANO », leur test sur la région Bretagne selon divers scénarii, et une conclusion sur la pertinence technico-économique d'un tel système.

Production scientifique et brevets

Ce projet, qui n'a qu'un an d'existence, n'a pour l'instant fait l'objet que d'une présentation orale au colloque AFH2 en décembre 2009 à Lyon.

Programme « Hydrogène et piles à combustible », édition 2005

Projet CATHY

Acier haute résistance pour transport et stockage de l'hydrogène par gazoduc

Réduire les coûts du transport de l'hydrogène par gazoduc

Le transport de l'hydrogène par gazoduc existe depuis une cinquantaine d'années pour alimenter des sites industriels. En Europe, la longueur totale est d'environ 1 500 km (nord de la France, Belgique, Hollande, bassin de la Ruhr). Ces gazoducs dont certains opèrent à 100 bars sont en acier basse résistance pour éviter des risques de fragilisation par l'hydrogène. Pourtant, le transport à des pressions plus élevées (supérieur à 150 bars) dans des gazoducs en acier haute résistance peut réduire sensiblement le coût du transport.

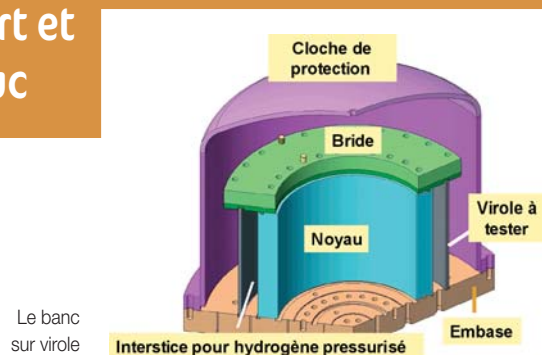
Le projet CATHY-GDF vise à évaluer l'aptitude d'une canalisation à résistance élevée (nuance X80) à transporter l'hydrogène à haute pression. Pour cet objectif, le projet investit dans des moyens d'essais pour simuler le comportement de défauts réalistes sur un gazoduc pressurisé en milieu hydrogène et met au point un outil particulier de laboratoire, appelé banc sur virole. Cet outil permettra de comprendre l'interaction des défauts sur les gazoducs avec l'hydrogène pressurisé en interne. Les résultats conduiront à proposer une première recommandation sur l'emploi d'un gazoduc en acier X80 pour le transport de l'hydrogène.

Impact de l'hydrogène sur l'acier X80 et tolérance aux défauts dans les canalisations

Les essais ont pour but de quantifier l'altération des propriétés mécaniques de l'acier X80 en milieu hydrogène pressurisé à 300 bar et de valider un outil particulier, le banc sur virole, destiné à reproduire expérimentalement dans des conditions proches de la réalité le fonctionnement d'un gazoduc en pression hydrogène. Les propriétés étudiées sont la résistance mécanique en traction, la résistance à la fissuration sous chargement croissant, la résistance au chargement par fatigue.

Ces propriétés sont caractérisées en milieu air (milieu de référence), puis en milieu hydrogène pressurisé à 300 bars pour quantifier l'impact de l'hydrogène sur la fragilisation du matériau. Par ailleurs, une soudure d'assemblage est élaborée et aussi caractérisée en milieu air et hydrogène.

En parallèle, le cahier des charges du banc sur virole est établi. La conception retenue, présentée en illustration, est constituée d'un noyau pour limiter la quantité d'hydrogène pressurisé entre le noyau et la virole qui est la portion de tube à tester.



Le projet « CATHY : Caractérisation des Aciers pour le Transport de l'Hydrogène » est un projet de recherche industrielle coordonné par GDF SUEZ. Il associe aussi Air Liquide, le CEA et LIMHP (CNRS, Université Paris 13). Le projet a commencé en décembre 2005 pour une durée de 3 ans et demi. Il a bénéficié d'un financement ANR de 1,3 M€ pour un budget global de l'ordre de 2,7 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Le projet a permis de montrer que l'acier X80 ainsi que la soudure de rabotage ont une qualité satisfaisante pour le transport de gaz naturel par gazoduc ; selon l'ISO 11114-4 méthode A, cet acier est acceptable pour le transport de l'hydrogène en bouteille puisque son indice de fragilité est inférieur à 2. Sa résistance mécanique en milieu hydrogène à 300 bars est la même qu'en milieu air mais avec une capacité de déformation réduite.

En revanche, la résistance à la propagation de fissure chute d'un facteur cinq en milieu hydrogène à 300 bars. Ce résultat complète et consolide les travaux de Praxair sur l'X80.

Production scientifique et brevets

Ce projet a donné lieu à trois conférences invitées dans des colloques internationaux (2008 International Hydrogen Conference, 2008 IHC, septembre 2008, International Gas Union Research Conference, IGRC2008, octobre 2008 et 12th International Conference on Fracture, ICF12, juillet 2009) et à une présentation au comité de normalisation ISO/TC 58/WG7.

Programme « Hydrogène et piles à combustible », édition 2006

Projet POLHYTUBE

Développement de matériaux sûrs pour les réseaux de distribution d'hydrogène

Des matériaux innovants pour les réseaux de distribution d'hydrogène

En France, le réseau de transport de gaz naturel en acier est raccordé au réseau de distribution fonctionnant sous plus faible pression. Celui-ci (d'une longueur de 165 000 km) est essentiellement constitué de canalisations en matériau polymère de type polyéthylène (PE). Avec l'introduction dans ces réseaux de mélanges de gaz comportant de l'hydrogène puis le passage à de l'hydrogène pur, le principal verrou à lever concerne l'augmentation sensible de la perméabilité, c'est-à-dire du débit d'hydrogène à travers les parois des canalisations (ou autres équipements en matières plastiques) compte tenu du caractère très volatil de ce gaz.

Il en résulte des implications potentielles en termes de sécurité mais aussi de pertes économiques. D'autres interrogations concernent évidemment le comportement à long terme des matériaux polymères essentiellement en termes de propriétés barrière, de comportement mécanique et de dégradation des matériaux. Il importe de bien caractériser et préparer les réseaux de distribution existants et à venir (en proposant des polymères plus performants et innovants que le PE) à cette introduction massive d'hydrogène.

L'objectif du projet POLHYTUBE est d'évaluer les solutions matériaux capables de répondre aux interrogations précédentes en termes de débit et vieillissement en environnement hydrogène. Le polyéthylène, matériau de base des canalisations de distribution de gaz naturel, servira de matériau de référence.

Caractérisation des matériaux et développement de méthodologies et équipements spécifiques

En premier lieu, des équipements spécifiques fonctionnant sous hydrogène ont été développés et validés. Les matériaux de référence considérés ont été le polyéthylène, matériau de base des canalisations de distribution de gaz naturel, ainsi que le PA11. Les premiers essais réalisés sur le PE100 ont permis de valider les conditions opératoires et protocoles expérimentaux d'analyse. Ce matériau a été entièrement caractérisé d'un point de vue morphologique, mécanique, barrière mais aussi l'évolution de ces caractéristiques en fonction d'un vieillissement sous atmosphère d'hydrogène. Le même protocole a ensuite été appliqué au PA11. Les résultats mettent en évidence que les propriétés barrière et mécaniques ne sont pas impactées par le vieillissement (jusqu'à 1 an sous 20 bar d'hydrogène en température).

L'étape suivante a consisté à appliquer ces moyens et méthodologies pour tester divers systèmes matériaux avec des propriétés barrière améliorées (autres thermoplastiques, mélanges de poly-

Système expérimental permettant de réaliser des essais mécaniques sous pression d'hydrogène



mères, structures multicouches...). La première phase a consisté à tester la perméabilité et les caractéristiques mécaniques de base puis des caractérisations plus lourdes assimilables à des tests de qualifications (tenue à long terme en environnement hydrogène afin de déterminer la pression de service, test de soudage et vérification de la soudure) auront pour but d'aboutir à des solutions capables de satisfaire à l'application de distribution de l'hydrogène. Enfin, une évaluation économique sera réalisée.

Le projet de recherche industrielle « POLHYTUBE: Développement et étude de matériaux innovants pour les réseaux de distribution d'Hydrogène » est coordonné par l'IFP. Il associe des partenaires industriels, Arkema et Air Liquide ainsi que des laboratoires de recherche publique, (CEA) (ENSMA), (INSA, UCBL). Le projet a commencé en décembre 2006 pour une durée de 42 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 1,6 M€ pour un coût global de l'ordre de 2,9 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Le projet a permis de valider des équipements expérimentaux lourds fonctionnant sous environnement hydrogène. Il a notamment déterminé l'évolution du coefficient de perméabilité des polymères PE100 et PA11 en présence d'hydrogène; les résultats montrent que des conditions de mise en œuvre choisies n'ont pas d'influence sur la perméabilité, que l'évolution de la perméabilité avec la température suit une loi de type Arrhénius et qu'il n'y a pas d'influence sur le PE100 et le PA11 après 400 jours de test. Ils indiquent également que PA11 présente de meilleures propriétés barrière à l'hydrogène que le PE100.

Ce projet a également permis de définir des méthodologies fines d'étude des microstructures de matériaux barrière à l'hydrogène.

Production scientifique et brevets

Un poster a été présenté lors du congrès Hydrogen & Fuel Cells 2009 à Vancouver. Il fera également l'objet d'une communication lors la prochaine World Hydrogen Energy Conference.

Programme « Solaire Photovoltaïque », édition 2005

Projet MICROSCOPE

Stocker l'électricité photovoltaïque pour optimiser la courbe de charge

Un système intégré production / stockage / ré-injection de l'électricité pour les réseaux non connectés

Le projet MICROSCOPE (Micro Injecteur Connecté au Réseau pour Optimiser par le Stockage la COurbe de Production Electrique) visait à développer des systèmes de production de la pointe électrique à bas coût pour les réseaux non interconnectés (notamment les réseaux îliens), à partir d'une production locale photovoltaïque couplée à un stockage d'énergie.

La dissémination de tels systèmes installés par EDF directement dans l'habitation doit permettre de réduire significativement le recours aux moyens de production de pointes classiques fonctionnant à partir de combustibles fossiles, qui sont peu efficaces, polluants et très coûteux.

Le projet visait à lever un certain nombre de verrous techniques : développer une batterie performante bas coût avec un cyclage adapté au photovoltaïque, concevoir une architecture optimisée pour les panneaux solaires associée à un régulateur innovant, mettre au point un convertisseur spécifique raccordé au réseau, fiable et peu coûteux.

Enfin, il s'agissait d'imaginer une stratégie opératoire optimale pour l'ensemble du réseau.

Optimiser l'intégration de composants à bas coût et fiables

EDF et CEAC (EXIDE) ont développé une batterie au plomb comprimé, dérivée d'une batterie de démarrage à bas coût, reposant d'une part sur une mise en compression des éléments de la batterie, et d'autre part sur l'incorporation d'additifs pour augmenter l'énergie spécifique.

Le LAAS-CNRS a développé les cartes MPPT/BOOST (12 V – 48 V) qui ont pour objet de maximiser le rendement de chaque module photovoltaïque. Les résultats montrent un gain de production au niveau de chaque module d'au moins 10 %. Le LAAS-CNRS a également fabriqué une carte de régulation, dédiée et optimisée, pour le système complet, qui remplacera avantageusement l'automate actuel et la carte entrée-sortie.

EDF et IES ont breveté un algorithme de charge de batterie innovant qui permet la recharge en 4 heures contre 8 heures habituellement. Cet algorithme permet de déstratifier précocement l'électrolyte pendant la phase de décroissance du courant à tension constante, grâce à la mesure du courant d'acceptance de la batterie. Cet algorithme a été implémenté dans un chargeur commercial de la société IES-SYNERGY et intégré au système MICROSCOPE.

Vue de la partie électrotechnique du système MICROSCOPE



Le projet « MICROSCOPE : Micro-Injecteur Connecté au Réseau pour Optimiser par le Stockage la COurbe de Production Electrique » était un projet de recherche industrielle coordonné par EDF R&D. Il associait aussi le CIRIMAT (Université de Toulouse), le LAAS (CNRS), l'IES (Institut d'Electronique du Sud), le LI2C (Université Pierre et Marie Curie), le Liten (CEA) et Exide Technologie. Le projet a débuté en novembre 2005 et s'est achevé en mai 2009. Il a bénéficié d'un financement ANR de 1,2 M€ pour un coût total de 2,5 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Douze prototypes complets MICROSCOPE ont été construits pour valider les principales innovations et démontrer leurs viabilités technique et économique. Ils bénéficient en particulier de travaux innovants sur les batteries avec la technologie bas coût Plomb Comprimé et de leur recharge, l'optimisation du produit photovoltaïque à partir de dispositifs MPPT/BOOST performants, la conversion de puissance permettant la ré-injection de l'énergie à la demande du réseau.

Production scientifique et brevets

Outre le produit MICROSCOPE développé dans le cadre du projet, EDF et IES ont breveté un algorithme pour la charge rapide de la batterie.

Programme « Solaire Photovoltaïque », édition 2006

Projet SOLEDO

Un mini-réseau pour une gestion optimisée des flux de production décentralisée et de consommation d'électricité

Un défi de société: apporter une électricité décarbonnée à deux milliards de personnes

Aujourd'hui le problème de l'accès à l'énergie électrique se pose encore pour 2 milliards d'individus. Le renchérissement du coût du pétrole met en difficulté d'exploitation des mini réseaux existants alimentés par groupe à carburant fossile. De même, les futurs réseaux doivent être pensés avec d'autres sources d'énergie. Le besoin en mini réseaux avec source d'énergie photovoltaïque est considérable, et le marché peut s'estimer en milliers de mini réseaux à mettre en place d'ici 2010 sur l'ensemble de la planète.

L'enjeu du projet SOLEDO était de concevoir des systèmes de génération photovoltaïque en mini-réseau exploitant des moyens de communication et une gestion intelligente de l'énergie produite, stockée et consommée pour minimiser le coût global sur cycle de vie. L'originalité majeure de la démarche porte sur la gestion de la consommation et l'introduction de moyens de communication entre les organes du système. Les puissances visées sont dans la gamme des 10 à 100 kW, qui répond à un marché réel et aux produits dont le développement est prévu, mais le principe est parfaitement extensible vers les plus faibles et plus fortes puissances.

Une solution potentielle, le mini-réseau supervisé

Les objectifs du projet étaient de développer un contrôleur multi-sources d'énergie communiquant avec un gestionnaire des utilisations (solutions d'hybridation algorithmes de gestion...) et de mettre au point une unité de supervision indépendante.

L'optimisation production/consommation était obtenue par une unité de contrôle et de gestion intelligente avec la possibilité d'ajuster la consommation selon des critères justifiés. Cette gestion doit permettre d'éviter un trop fort dimensionnement du champ photovoltaïque et ainsi de réduire le coût de l'installation. La surveillance de la génération et de la consommation s'appuie sur le développement d'un système de communication et de comptage de l'énergie par courant porteur, permettant de s'affranchir de solution lourde dans une configuration d'équipements distants les uns des autres. Enfin, il s'agissait de valider le système complet, sur plate forme de tests avec champs solaires de 7 kW.

Le projet «SOLEDO: SOLution globale pour un mini réseau avec Energie Décentralisée photovoltaïque en source principale et gestion Optimisée des flux de production et de consommation» était un projet de recherche industrielle coordonné par AEG Power Solutions. Il associait aussi deux laboratoires de recherche, le SATIE (ENS Cachan) et le CEP (Ecole des Mines de Paris) et trois autres entreprises, APEX BP Solar, LAN-DIS + GYR et TRANSENERGIE. Il s'est déroulé de décembre 2006 à novembre 2009.

IMPACTS

Résultats majeurs

Dans l'optimisation du processus «Réseau de Distribution électrique» / « Consommation», intégrant des ENR, on retiendra une amélioration significative en terme de réduction des coûts dû à la gestion des profils de consommation, avec prise en compte d'une fonction d'écrêtage (limite contractuelle du prélèvement de puissance sur le réseau);

Le projet a également permis des avancées pour la mise en œuvre d'une méthode d'optimisation en temps réel des profils de consommation et l'optimisation de l'opération combinée de diverses sources d'énergie autonomes.

Ces acquis vont être utilisés dans des développements en cours menés par divers opérateurs en énergie sur les réseaux intelligents avec intégration de sources d'énergie renouvelables et stockage d'énergie.

Production scientifique et brevets

Ce projet a donné lieu principalement à du développement technique, présenté dans quelques conférences.

Programme « Blanc – Jeunes chercheurs », édition 2005

Projet SUPERENER

Innovations technologiques pour un développement massif des générateurs à base d'énergie renouvelable

Participation des générateurs à base d'énergie renouvelable à la gestion d'un micro réseau

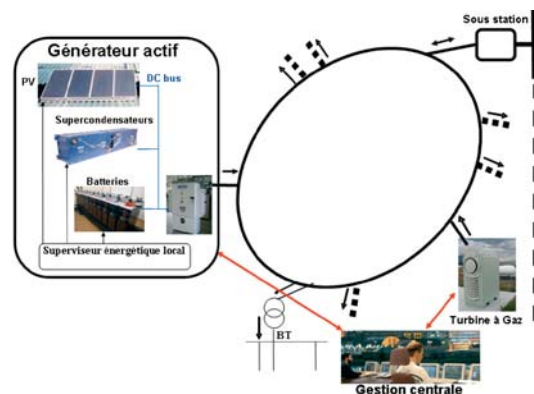
L'arrivée de nombreuses unités de faible production électrique non interfacées avec un poste de supervision conduit à de profondes mutations sur la gestion du système électrique actuel. Une évolution vers de nouvelles architectures de réseau électrique bien adaptées à ces nouveaux modes de production dispersée sera à imaginer pour les temps futurs. Afin d'en améliorer la fiabilité, une nouvelle architecture consiste à regrouper les différents producteurs et consommateurs autour d'un réseau moyenne tension pouvant fonctionner en îlotage ou connecté au reste du réseau principal.

L'objectif de ce projet était, tout d'abord, de trouver des solutions technologiques permettant de pouvoir utiliser des générateurs à base d'énergie renouvelable pour régler un micro réseau et permettre son fonctionnement correct. Ensuite, il convient de gérer d'une façon technique et économique les déséquilibres entre la production électrique de tous ces générateurs et la consommation et ceci pour l'ensemble du micro réseau. Une supervision globale pour la répartition de l'énergie à délivrer et des différents services pour le réglage du micro réseau a été imaginée et mise en œuvre.

Le stockage intégré pour compenser les fluctuations et fournir des services au système électrique

Les solutions proposées se déclinent sous deux axes. Le premier concerne la transformation des générateurs à base d'énergie renouvelable en générateurs actifs pouvant participer à la gestion d'un micro réseau. Une première innovation matérielle consiste à imaginer des chaînes énergétiques permettant la connexion d'éléments de stockage au sein même du générateur. L'autre est propre à la supervision locale des flux énergétiques au sein de ce générateur entre la source primaire, le stockage et les puissances envoyées sur le réseau en fonction des besoins demandés par le gestionnaire.

Le second axe consiste à imaginer une supervision centrale du micro réseau intégrant les spécificités de ces nouveaux types de générateurs et leur capacité à participer à la gestion du réseau. L'objectif est d'en améliorer la fiabilité tout en augmentant l'efficacité de la distribution globale énergétique. Les générateurs actifs à base d'énergie renouvelable sont au cœur de ce système électrique avec comme objectif de contribuer à l'augmentation de leur taux de pénétration. L'enjeu majeur était le développement d'une approche méthodologique pour la conception de la supervision énergétique du micro réseau. Cette supervision détermine les grandeurs de référence permettant de satisfaire des objectifs déterminés, et ce malgré un caractère fluctuant et mal déterminé de l'environnement (charges, sources primaires renouvelables, état du réseau...). La production des générateurs et indirectement la sollicitation de leurs éléments de stockage sont modulées en fonction des besoins du micro-réseau.



Structure d'un générateur actif à base de panneaux PV interfacé à une supervision centrale

Le projet « SUPERENER: Supervision énergétique des centrales dispersées permettant la fourniture de services système au sein d'un micro réseau » est un projet de recherche académique coordonné par l'Ecole Centrale de Lille qui associe également des enseignants-chercheurs des Arts et Métiers Paris-Tech et Hautes Etudes d'Ingénieurs. Il a commencé en décembre 2005 pour une durée de 3 ans avec un financement ANR de 148 k€ pour un budget total de 441 k€.

IMPACTS

Résultats majeurs

De nouveaux générateurs éoliens et photovoltaïques ont été conçus afin d'intégrer du stockage permettant de garantir une marge de disponibilité énergétique. Une structure hiérarchique particulière du dispositif de commande de ces générateurs a permis de gérer les flux internes de puissance (entre le générateur, le stockage et le réseau) ainsi que la fourniture de possibilités d'action pour le réglage du micro réseau.

Une supervision centrale d'un micro réseau a été proposée afin d'intégrer les spécificités de ces nouveaux types de générateurs et leur capacité à participer à la gestion du réseau.

Production scientifique et brevets

Quatre publications scientifiques dans des revues avec comité de lecture ont été réalisées (International Journal of Hydrogen Energy, Elsevier, IEEE on Transaction on Industrial Electronics, International Journal of Integrated Energy Systems et European Journal of Electrical Engineering, Renewable energy).

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2005

Projet MULTISOL

Optimiser les flux électriques dans les bâtiments

Concilier production d'électricité d'origine photovoltaïque et usages de l'électricité à l'échelle du bâtiment

Un fort taux de pénétration d'énergies intermittentes comme le solaire photovoltaïque risque de générer de fortes perturbations sur un réseau électrique qui n'avait pas été prévu pour les incorporer. De plus, le maximum de l'électricité du photovoltaïque localisé dans une période spécifique de la journée, ne coïncide pas avec le pic de consommation estival notamment, qui intervient en soirée.

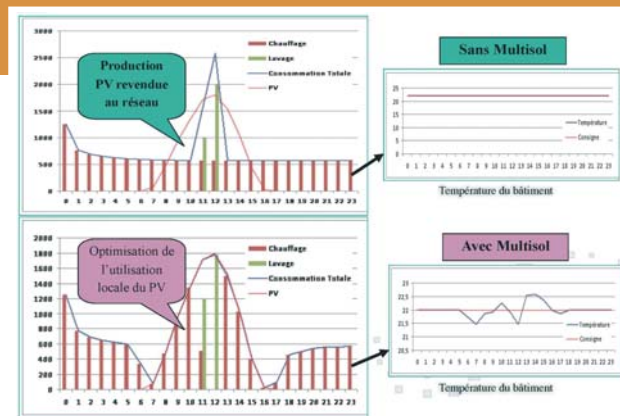
MULTISOL vise à résoudre ces problèmes en s'intéressant à l'échelle du bâtiment. Il avait pour vocation de proposer et de développer une architecture énergétique globale novatrice axée autour du solaire et de la gestion intelligente des charges où le réseau apparaît dorénavant comme un simple appoint pour le bâtiment et où le bâtiment apparaît pour le réseau comme un consommateur stable, capable de lisser ses propres pointes de consommation d'une part et éventuellement disponible d'autre part pour aider à la régulation globale du réseau, en s'appuyant sur l'autonomie et les surplus de production du bâtiment.

Optimisation éco-environnementale et locale des consommations d'électricité

L'architecture MULTISOL permet d'optimiser l'utilisation locale de l'énergie électrique en fonction de critères écologiques (réduction des émissions de CO₂), économique (minimisation du coût en euros) tout en respectant le confort pour l'utilisateur. Il tient notamment compte de l'utilisation de différentes sources d'énergies intermittentes ou permanentes (photovoltaïque, batteries, réseaux électrique...), et joue sur l'optimisation globale du système en décalant dans le temps certains besoins (lave-linge, lave-vaisselle...), en réinjectant les surplus de production d'énergie sur le réseau ou en la stockant (batteries, mais aussi utilisation pour le ballon d'eau chaude ou le réfrigérateur).

Le système définit trois niveaux de pilotage correspondant à différents horizons de temps :

- ◆ un mécanisme anticipatif qui calcule un plan global de production et de consommation d'énergie pour des événements prévus à l'avance (périodes de l'ordre de l'heure) ;
- ◆ un mécanisme réactif qui permet de réagir à des événements non prévus lors de la phase d'anticipation (périodes de l'ordre de la minute) ;
- ◆ un mécanisme local relié étroitement aux contrôleurs des différents équipements est pour le moment peu utilisé (thermostat de chauffage par exemple).



Exemple de décalage de charges avec MULTISOL

Le projet « MULTISOL : Optimisation des flux électriques dans un bâtiment photovoltaïque »

était un projet de recherche industrielle coordonné par le CEA – INES. Il associait également deux laboratoires de recherche de l'INP Grenoble (G2eLab et G-Scop), le CEP (Ecole des Mines de Paris) et Schneider Electric. Il s'est déroulé de décembre 2005 à juillet 2009. Il a bénéficié d'un financement ANR de 865 k€.

IMPACTS

Résultats majeurs

La preuve du concept a été faite, à la fois en simulation (valorisation optimale de la production locale d'énergie photovoltaïque tout en préservant le confort de l'utilisateur) et en test réel (modélage de la courbe de consommation du logement en fonction des besoins du gestionnaire de réseau tout en respectant le confort de l'utilisateur).

Production scientifique et brevets

Ce projet a notamment donné lieu à des présentations invitées dans le cadre des deux principales conférences internationales photovoltaïques, 24th EU PVSEC et 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion.

Enfin, une start-up (Vesta-System) est en cours de création pour la valorisation industrielle du logiciel.

4 VÉHICULES DE TRANSPORT ET GROUPES MOTO-PROPULSEURS AVANCÉS

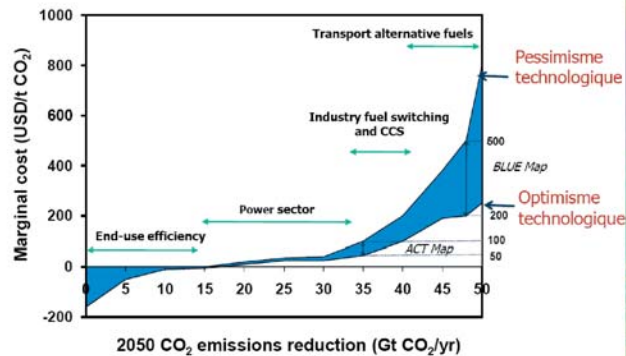
Sortir les transports de leur dépendance au pétrole ne se fera qu'à des coûts élevés, comme le montre la figure ci-contre, en raison des importants verrous technico-économiques qui restent à lever.

Plusieurs pistes sont envisagées aujourd'hui, sans qu'aucune ne s'impose d'une manière évidente à moyen terme, les transports étant probablement appelés à fortement diversifier, dans les décennies à venir, leurs sources d'énergie et leurs groupes motopropulseurs, en fonction de la taille, de la puissance requise et de l'usage du véhicule (urbain, interrégional, distance journalière parcourue...).

Les véhicules ayant besoin d'autonomie sur de longues distances continueront probablement à fonctionner avec des carburants liquides de type hydrocarbures, qui restent de loin le mode de stockage de l'énergie ayant les plus fortes densités massique et volumique (voir figure ci-dessous). Les hydrocarbures d'origine non fossiles pourront être obtenus par transformation de la biomasse, comme le décrira le cahier de l'ANR consacré aux bioénergies, alors les moteurs à combustion interne devront subir des modifications mineures pour être adaptés aux caractéristiques physiques (viscosité cinématique, indices d'octane et de cétane...) de ces carburants.

L'autre grande voie possible de diversification énergétique du parc de véhicules de transport est celle de l'électrification. Cette voie se scinde en deux options :

- ◆ Un véhicule électrique alimenté par une pile à combustible à hydrogène,
- ◆ Un véhicule électrique qui utilise l'énergie stockée dans un dispositif électrochimique (batteries, supercapacité...).



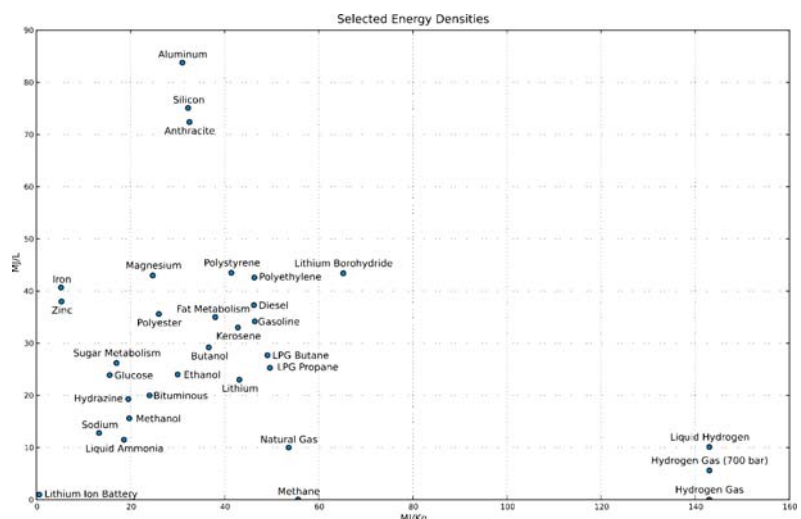
Ramener les émissions aux niveaux actuels d'ici 2050 exige des options qui coûtent jusqu'à 50 USD par tonne de CO₂. Réduire les émissions de 50 % exige des options qui coûtent jusqu'à 200 USD par tonne, peut-être même 500 USD par tonne

In support of the G8 Plan of Action

© OCELI/IRA - 2008

Coûts marginaux des réductions d'émissions de gaz à effet de serre en fonction des secteurs d'activité

Bien entendu, des hybridations de ces différentes options sont envisageables, y compris avec des motorisations à combustion interne, au moins pendant une période de transition avant que ne s'impose une éventuelle solution universelle comme l'est aujourd'hui le pétrole...



Comparaison des densités massique et volumique des différents modes de stockage de l'énergie pour les véhicules de transport.

Le véhicule à hydrogène et pile à combustible

Les deux premiers appels à projets du programme ANR «hydrogène et pile à combustible» ciblaient principalement des projets vi-



sant principalement à développer une filière industrielle de l'hydrogène et des piles à combustible (PAC) compatible avec les contraintes de l'usage automobile. La technologie de pile la plus étudiée est la PEMFC, pile à combustible à basse température, compatible avec un usage automobile en raison de sa faible température de fonctionnement qui permet une meilleure gestion thermique et de sa capacité à un démarrage rapide.

Un usage répandu de ces piles se heurte encore à un verrou majeur, leur coût, en raison notamment de l'usage de platine, ainsi que du coût des plaques bipolaires et de la membrane. Plusieurs projets se sont attaqués à ces verrous : INNOVAME, dont l'ambition était de concevoir de nouveaux matériaux et de composants moins coûteux pour la fabrication du cœur de pile (l'assemblage membrane-électrodes ou AME), DIAMANT, qui visait à proposer de nouvelles solutions matériaux pour réaliser des plaques bipolaires métalliques embouties.

Ce projet s'intéressait également à la question du vieillissement et de la dégradation de ces plaques bipolaires, qui est un des autres verrous à une adoption des PAC dans les véhicules. En effet, des phénomènes physico-chimiques dégradent les performances des piles à combustibles au fur et à mesure de leur fonctionnement et réduisent leur durée de vie. Un de ces problèmes est lié à la gestion de l'eau, auquel s'attaquait le projet CHAMEAU dont l'objectif était de mieux comprendre les mécanismes de transfert d'eau dans les AME en combinant caractérisations hors pile, essais en pile et modélisation. Le projet MENHYR avait quant à lui pour but de développer des membranes pour pile à combustible fonctionnant dans une large gamme de température notamment entre 100 et 150 °C sous faible taux d'hydratation.

Dans une perspective plus globale d'aide à la conception et à la maintenance, le projet DIAPASON visait à mettre au point un outil de

diagnostic des défauts liés à une mauvaise gestion de l'eau ou une contamination par des gaz réactifs (hydrogène ou air pollué...), principales sources de dégradation des performances des PAC.

Un des autres verrous à l'émergence des véhicules à hydrogène est le stockage d'une quantité d'hydrogène suffisante pour assurer une autonomie du même ordre de grandeur que les véhicules à moteurs à combustion interne. Une voie potentielle, la plus mature, est celle du réservoir d'hydrogène à haute pression (700 bars) ; le projet HYBOU se proposait de développer de nouveaux matériaux et procédés d'élaboration pour ces réservoirs haute pression, afin d'augmenter leurs performances (capacité de stockage, température d'utilisation, durée de vie, sécurité) et diminuer leur coût (matières premières et procédés). A plus long terme, aujourd'hui encore cantonné à la recherche exploratoire, se dessine le stockage de l'hydrogène sous forme solide, par adsorption, dans des hydrures ou dans des nanotubes de carbone par exemple. Le projet de recherche fondamentale MATHYSSE vise à combiner deux de ces matériaux, les hydrures et des matériaux nanoporeux en un hybride pour stocker de cette manière l'hydrogène.

Enfin, il s'agit d'assembler ces différentes briques technologiques dans un véhicule, pour vérifier que l'ensemble fonctionne de manière cohérente. Ainsi, l'objectif du projet FISYPAC était de valider une technologie de pile à combustible à bord d'un véhicule dans une configuration « Range Extender » où deux sources d'énergie sont hybridées : un générateur électrique à pile à combustible d'une puissance nominale de 20 kW alimenté en hydrogène stocké à 700 bars et une batterie Li-ion de 13 kWh.

Le véhicule électrique ou hybride

L'hybridation énergétique des véhicules implique quasiment toujours un système de

stockage d'énergie sous forme électrochimique (accumulateurs, super-condensateurs...) voire mécanique (volant d'inertie); pour ces véhicules « électrifiés », plusieurs options sont possibles, depuis les hybridations douces, à base d'alternateur-démarrateurs (système de Stop & Start disponibles sur certains modèles) où le moteur thermique est coupé lors de l'arrêt au feu rouge par exemple, au véhicule tout électrique avec une autonomie la plus élevée possible en passant par les hybridations complètes qui offrent une autonomie de quelques dizaines de kilomètres en mode électrique et/ou une recharge par le réseau.

Le véhicule tout électrique est confronté à deux défis majeurs, sur lesquels porte l'essentiel des efforts de recherche : son autonomie et son coût ; si des réponses peuvent venir de dispositifs qui ne sont pas du ressort de la recherche technologique (par exemple, mise en place d'un système de location des batteries plutôt que vente pour réduire le coût d'achat du véhicule électrique), des ruptures technologiques pourraient permettre de lever ces verrous.

L'ambition du projet LIO est précisément de développer une technologie en rupture, la batterie Lithium-air, par rapport aux batteries actuelles pour augmenter significativement l'autonomie (plus de 1 000 km contre au mieux 300 km pour les meilleures technologies actuelles) des futurs véhicules électriques. Le projet MAHYA adoptait une démarche plus conservatrice, en visant l'augmentation de la puissance des batteries Nickel-Métal Hydrure pour des applications de transport qui nécessitent ponctuellement une forte puissance instantanée. C'était aussi l'ambition du projet ABHYS que de développer un système de stockage électrochimique, sous la forme d'un super-condensateur à électrodes innovantes, pour ces applications demandant une forte puissance.

Comme la durée de vie des batteries impacte leur coût, il est nécessaire de disposer d'ou-

tils qui optimisent leur fonctionnement pour augmenter cette durée de vie. L'objectif du projet LIFEMIT était de développer un modèle virtuel de batterie intégrant la gestion batterie pour en garantir cette durée de vie ainsi qu'une puissance optimale.

L'hybridation ne concerne pas seulement les véhicules automobiles : elle apporte également une plus grande efficacité énergétique aux véhicules lourds (camions, autobus...), même s'il n'est pour l'instant pas envisageable de confier à un seul moteur électrique la propulsion de ces véhicules. Le projet ARCHYBALD se proposait d'étudier des chaînes de traction hybride formée autour d'un alternateur-démarrateur ou d'un split, associé à des dispositifs de stockage d'énergie capacitifs pour la puissance, et électrochimique pour l'énergie, offrant des fonctions et des performances significatives pour la réduction jusque 20-30 % de consommations et d'émissions polluantes de véhicules lourds de plus de vingt tonnes. Le projet MICRO2 se focalisait sur l'étude expérimentale d'un système stop&start pour les micro-bus alors que le projet I-STARS visait le développement d'un stop&start de seconde génération pouvant répondre simultanément à une demande de fort volume et de bas coût.

Enfin, le stockage d'énergie électrique à bord des véhicules peut se faire sous forme mécanique par exemple, comme le projet VITFER voulait le démontrer pour des véhicules ferroviaires.

Véhicules de transport et groupes moto-propulseurs avancés

Acronyme et nom du projet

Le projet résumé en un titre

Le véhicule à hydrogène et pile à combustible

INNOVAME	Conception innovante de matériaux pour assemblage membranes-électrodes	Des piles à hydrogène abordables et fiables
DIAMANT	Développement de plaques bipolaires métalliques embouties en terme de matériaux et étude de leur stabilité en milieu pile à combustible	Pour faire de la pile à combustible une réalité dans l'automobile de demain
CHAMEAU	Compréhension et Amélioration de la gestion de l'EAU dans les PEMFC	Des propriétés des composants aux performances globales des piles à combustibles
MENHYR	Membranes Hybrides Robustes	Nouveaux matériaux hybrides organique-inorganique pour application membrane protonique pour piles à combustible PEMFC
DIAPASON	Méthodes de Diagnostic pour Piles à combustible pour les applications Automobile et Stationnaire sans instrumentation	Un outil de diagnostic de l'état de santé d'une pile à combustible pour une plus grande durée de vie et une meilleure fiabilité
HYBOU	Matériaux innovants pour liners polymères et coques composites de Réservoirs de type IV	L'hydrogène comprimé : un carburant propre, inodore et non toxique pour les véhicules du futur
MATHYSSE	Matériaux HYbrides pour le Stockage Solide de l'hydrogène	Propriétés de stockage de l'hydrogène dans des hybrides à base de répliques de carbone et de matériaux de type MIL
FISYPAC	Fiabilisation Système Pile A Combustible	Le véhicule hybride à pile à combustible – une solution de mobilité pour l'avenir

Le véhicule électrique ou hybridé

LIO	Faisabilité d'une batterie Lithium-air	1000 km d'autonomie pour un véhicule électrique grâce à une batterie lithium qui respire
MAHYA	Nouvelle génération de Matériaux Hydrurables pour Accumulateurs Ni-MH	De nouvelles perspectives pour les accumulateurs Nickel Metal Hydrure
ABHYS	Aqueous Based Hybrid Supercapacitor	Des systèmes de stockage d'énergie écologiques et performants pour des applications stationnaires et mobiles
LIFEMIT	Application des batteries de forte puissance Lithium-Ion dans les applications véhicules ferroviaires et militaires terrestres	Les batteries virtuelles, un outil pour améliorer les performances énergétiques
ARCHYBALD	ARChitectures HYBrides Adaptées aux véhicules Lourds à forte Disponibilité	Hybrider des véhicules lourds
MICRO 2	Microbus Micro-Hybride	Microbus Micro-Hybride
I-STARS	Integrated Starter Alternator Reversible System	Vers une nouvelle génération de systèmes "stop&start"
VITFER	Volant d'Inertie optimisé pour des applications de Transport FERroviaire	Véhicules ferroviaires et stockage d'énergie mécanique par volant d'inertie

Programme « Hydrogène et piles à combustible », édition 2005

Projet INNOVAME

Des piles à hydrogène abordables et fiables

Diminuer le coût des piles à combustible : un enjeu primordial

A ce jour, un des verrous technologiques majeurs au développement à grande échelle des piles à combustible (PAC) de type pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) réside dans la diminution de son coût de fabrication. Dans le système PAC, le coût de la couche catalytique représente le deuxième poste, principalement en raison de l'usage d'un catalyseur en métal noble, le platine. La répartition du platine dans la couche active est un enjeu majeur car environ 75 % du platine présent reste inactif.

Le projet INNOVAME vise à la conception de matériaux et de composants innovants pour la fabrication du cœur de pile, également nommé « assemblages membrane-électrodes » (AME), en intégrant les nécessités technico-économiques industrielles. Le consortium porte ses efforts sur les 3 composants du cœur de pile : la membrane conductrice protonique, les matériaux de la couche active et les matériaux de couche de diffusion des gaz.

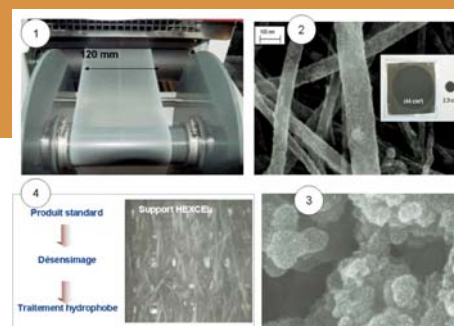
Améliorer les différents composants du cœur de pile

Pour la membrane conductrice protonique, il s'agit de réaliser par extrusion des membranes de Nafion additivées d'argiles sulfonées (quelques %) présentant des propriétés de rétention d'eau améliorées afin de conserver de bonnes performances en pile en gaz sec.

Pour les électrodes, l'objectif est de réduire la quantité du catalyseur platine. D'une part, des précurseurs de platine spécifiquement adaptés à la technique de dépôt en phase vapeur (MOCVD) ont été synthétisés. Ces dépôts ont permis à l'anode d'augmenter de 40 % le taux d'utilisation du platine dans la couche active par rapport aux électrodes commerciales E-TEK. D'autre part, des couches actives réalisées en associant, par voie liquide, un électro-catalyseur à des nanotubes de carbone (NTC) par un enrobage organique donne des nano-objets d'une dimension de 2 nm avec une teneur en matière organique de l'ordre de 19 %.

Pour la couche de diffusion des gaz (GDL), on cherche à augmenter les conductivités électroniques (longitudinales et transversales) ainsi que la perméabilité aux gaz afin d'améliorer les performances en fonctionnement sous air, à faible pression.

Les briques technologiques validées en AME de 25 cm² ont ensuite été assemblées en stack de cinq monocellules de 100 cm² avec des performances mesurées très encourageantes.



1 : Membrane hybride Nafion-Argile

2 : Cathode à teneur en Pt optimisée (110 µg/cm²)3. Anode à teneur en Pt optimisée (35µg/cm²) : points blancs représentant les clusters de Pt de 4nm

4. Couche de diffusion Hexcel

Le projet de recherche « INNOVAME : Conception innovante de matériaux pour assemblage membranes-électrodes »

est un projet de recherche industrielle coordonné par le CEA. Il associe également des laboratoires de recherche publics : LPCI (CNRS), LIMHP (CNRS), et des unités de recherche de la DAM, de la DRT et de la DSM du CEA et des industriels, Arkema, Batscap, Hélium, Hexcel. Le projet a commencé en janvier 2006 pour une durée de trois ans. Il a bénéficié d'un financement ANR de 1,84 M€ pour un budget global de 5,16 M€.

IMPACTS**Résultats majeurs**

Le premier fait marquant du projet est l'extrusion de 1 kg de Nafion qui a permis d'obtenir des membranes de 70 à 80 micromètres d'épaisseur après traitement chimique d'acidification. Un taux de 2 % d'argile permet ainsi une amélioration des performances avec de bonnes propriétés mécaniques.

Le deuxième fait marquant concerne l'amélioration des performances de la pile tout en réduisant le taux de platine des électrodes : pour une anode élaborée par MOCVD avec Pt54 : on obtient les mêmes performances avec 35 µg/cm² qu'avec 500 µg/cm² ; pour une cathode Pt/NTC, on observe les mêmes performances avec 110 µg/cm² qu'avec 500 µg/cm².

La troisième avancée technologique concerne les couches de diffusion à base de tissus industriels HEXCEL qui montrent à 100 °C 1,2 bars 50 % HR des performances à l'anode supérieure à la référence (feutre et tissu Zoltek).

Production scientifique et brevets

Les travaux sur les membranes ont permis le dépôt de trois brevets et ont fait l'objet de six publications. Le développement d'électrodes à faibles chargement a conduit à déposer cinq brevets et quatre publications. Citons de plus une thèse sur la réalisation d'anodes à base de nanotubes de carbone enrobés de Pt. Des communications orales ont également été données dans le cadre d'une vingtaine de colloques, séminaires et conférences.

Programme « Hydrogène et piles à combustible », édition 2005

Projet DIAMANT

Pour faire de la pile à combustible une réalité dans l'automobile de demain

Nouveaux matériaux pour pile à combustible automobile

Dans le contexte mondial de nécessité de rationaliser les sources d'énergie et de réduire les émissions de gaz à effet de serre, la pile à combustible est appelée à jouer un rôle primordial pour le développement du véhicule propre. Toutefois, cette technologie ne deviendra crédible que si les verrous technologiques sont levés et que les solutions apportées sont réalistes en terme de coût. En réponse à ce besoin de progrès, le projet vise à proposer des solutions matériaux pour réaliser des plaques bipolaires métalliques embouties répondant aux spécifications techniques d'une utilisation en pile à combustible pour application automobile.

La démarche scientifique déployée permet d'enrichir la compréhension des phénomènes physico-chimiques mis en œuvre dans une pile à combustible et susceptible d'impacter l'intégrité de la plaque bipolaire. Les investigations effectuées ex-situ et in-situ avec de nouveaux matériaux ou revêtements permettent de conforter ces phénomènes et de proposer des solutions matériaux répondant aux besoins fonctionnels.

Les résultats acquis guideront l'élaboration des spécifications techniques des futures générations de plaques bipolaires et orienteront le choix matériaux par rapport à des critères techniques (rendement pile et durée de vie) et économiques liés à une industrie de forts volumes.

De l'approche phénoménologique au développement matériaux

A partir d'une description fondamentale des mécanismes physico-chimiques en pile à combustible, une spécification technique de plaques bipolaires métalliques embouties est établie dans une perspective d'application automobile. Sur cette base, une sélection de nuances d'aciers inoxydables et le revêtement est effectuée.

Les solutions matériaux retenues sont dans un premier temps caractérisées à partir de tests en milieu simulé afin de sélectionner les meilleures pour les valider ensuite en pile à combustible. Des caractérisations *post mortem* sont menées sur les plaques bipolaires pour observer les modes de dégradations ou les évolutions des propriétés des matériaux (décollement du revêtement, traces de corrosion/passivation, accroissement de la résistance de contact...).

Évaluation des matériaux en pile à combustible.



Le projet de recherche industrielle « DIAMANT : Développement de plaques bipolaires métalliques embouties en terme de matériaux et étude de leur stabilité en milieu pile à combustible » était coordonné par PSA Peugeot Citroën. Il associait trois autres partenaires industriels, ArcelorMittal Stainless & Nickel Alloys, ArcelorMittal Innovation et REINZ, ainsi que cinq organismes publics de recherche : le CEA, le MATEIS (INSA de Lyon), le CEP (Ecole des Mines de Paris), le CDM (Ecole des Mines) et le LISE (CNRS, Université Pierre et Marie Curie). Le projet a commencé en juin 2007 pour une durée de 30 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 1,152 M€ pour un coût global de l'ordre de 2,5 M€.

IMPACT

Résultats majeurs

Le premier résultat majeur du projet est une description fondamentale des mécanismes physico-chimiques de la pile à combustible qui a servi de base à la rédaction d'une spécification technique fonctionnelle de plaques bipolaires métalliques embouties et permis la définition/sélection et réalisation des matériaux et revêtements étudiés. Les caractérisations physico-chimiques et électrochimiques en milieu simulé ont permis la sélection des échantillons à tester en pile, constituant le second résultat majeur du projet.

Les caractérisations en pile à combustible, réalisées pour le matériau et le revêtement de référence, sont en cours d'acquisition pour les autres nuances et revêtements.

Production scientifique et brevets

Un article est en cours de rédaction sur des revêtements polymères carbonés.

Programme « Hydrogène et piles à combustible », édition 2006

Projet CHAMEAU

Des propriétés des composants aux performances globales des piles à combustibles

Contribuer à lever certains verrous des piles à combustible

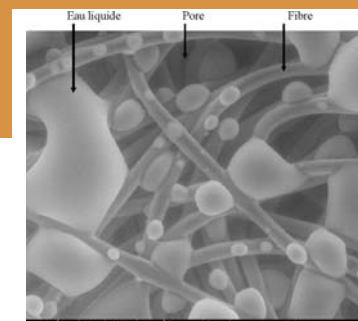
Les piles à combustible basse température (PEMFC) constituent une solution prometteuse pour la production non polluante d'énergie électrique mais certains verrous restent à lever pour que cette technologie soit mise sur le marché. Ceci passe par une amélioration des composants du cœur de pile (Assemblage Membrane Electrodes ou AME) ce qui nécessite de maîtriser suffisamment le lien entre les propriétés de ces composants et leurs performances. A l'heure actuelle leur conception est essentiellement empirique, ce qui limite les améliorations possibles compte tenu du fort couplage entre les nombreux mécanismes physiques. Le projet se focalise sur la gestion de l'eau qui est un des verrous actuel limitant les performances des PEMFC. L'objectif du projet est de mettre en place une démarche scientifique permettant de mieux comprendre les mécanismes de transfert d'eau dans les AME en combinant caractérisations hors pile, essais en pile et modélisation. Cette démarche doit permettre ensuite de proposer des améliorations de composants.

Le couplage modélisation et expérimentation permettra de s'orienter vers des outils validés de conception de composants

Des modèles numériques sont mis en place pour calculer la performance (relation tension/courant) d'un AME en fonction des propriétés des matériaux utilisés. Ces modèles prennent en compte les divers mécanismes physiques en jeu (transferts électriques, thermiques, fluidiques mono et diphasique, électrochimie). Les propriétés des composants (structure, porosité, mouillabilité, perméabilité, conductivités...) sont mesurées expérimentalement. Des améliorations et/ou validations sont apportées aux modèles de performance par des analyses expérimentales spécifiques (mouillabilité), des modélisations locales (mécanismes diphasiques) ou des diagnostics locaux (transferts dans les membranes, mesures de température et de tension au sein de l'AME par micro-capteurs...).

Des essais de performance sont réalisés pour diverses conditions de fonctionnement et divers composants et servent de base au calage et à la validation des modèles. L'effet de certains paramètres de conception des composants est analysé. Sur cette base, des améliorations de composants pourront être proposées. La caractérisation expérimentale des mécanismes permet de mieux comprendre le lien entre la structure des composants et leur comportement.

Visualisation des lieux de condensation de l'eau sur les fibres des couches de diffusion



Le projet «CHAMEAU: Compréhension et AMélioration de la gestion de l'EAU dans les PEMFC» est un projet de recherche fondamentale coordonné par le CEA. Il associe des partenaires industriels, PSA Peugeot Citroën, Hélion, Paxitech et des laboratoires de recherche publique, SIMaP (CNRS, INP Grenoble), IMFT (CNRS, ENSEEIHT, Université de Toulouse), LET (CNRS, ENSMA, Université de Poitiers), LML (CNRS, Ecole Centrale de Lille). Le projet a commencé en décembre 2006 et dure 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 1,5 M€ pour un coût global de 2,97 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Des expériences d'hydratation d'une couche de diffusion ont mis en évidence deux types de lieux d'apparition préférentiels de l'eau. Le premier, indépendant de l'histoire du matériau, est lié à la présence de défauts hydrophiles sur la surface des fibres. Le second se situe aux lieux de croisement de fibres demeurées humides à la suite d'une précédente hydratation. Après un séchage partiel, l'eau condensera plutôt sous forme d'un film entraînant un noyage plus rapide de la couche ce qui diminuera les performances de la pile. Les modélisations locales ont défini certaines limites des modèles « macroscopiques » classiques en particulier vis-à-vis du blocage des pores par l'eau liquide ce qui peut expliquer une mauvaise estimation de l'effet de l'eau liquide sur les performances des piles (accès des gaz aux sites actifs).

Certaines modifications des couches ont permis d'obtenir des gains significatifs de performance.

Production scientifique et brevets

Début 2010, le projet avait fait l'objet de trois articles dans des revues à comité de lecture et de huit communications orales, dans des domaines couvrant la modélisation (écoulements diphasiques dans les milieux fibreux par la méthode des réseaux de pores; influence de la mouillabilité sur les mécanismes de transfert; analyse des effets d'échelle; validation expérimentale des modèles de performance de PEMFC), l'analyse expérimentale des mécanismes de transfert diphasique (détermination des profils d'eau dans les membranes par diffusion de neutrons) et la caractérisation des composants du cœur de pile (mouillabilité; propriétés de transport convectif).

Programme « Hydrogène et piles à combustible », édition 2006

Projet MENHYR

Nouveaux matériaux hybrides organique-inorganique pour application membrane protonique pour piles à combustible PEMFC

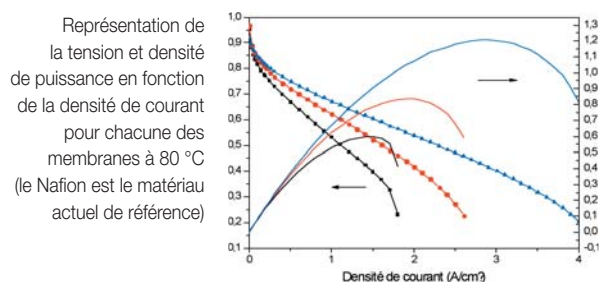
Les hybrides réinventent la membrane électrolyte pour pile à combustible PEMFC

Afin de répondre aux besoins spécifiques de la pile à combustible PEMFC pour l'application automobile, des nouveaux concepts de matériaux hybrides organique-inorganique ont été proposés. Ces innovations se situent au niveau de la membrane conductrice de protons qui doit posséder d'excellentes propriétés de conduction ionique en milieu faiblement hydraté à des températures supérieures à 100 °C. Les limites de fonctionnement imposées par les matériaux purement organiques sont dépassées grâce à cette approche hybride, notamment par la mise en place d'une structure particulière qui favorise les capacités de rétention d'eau au cœur de la membrane ainsi qu'une conduction protonique préférentiellement localisée au niveau d'un réseau inorganique poreux et figé. Les premiers matériaux développés présentent déjà d'intéressantes propriétés en pile à combustible, et laissent présager d'une nouvelle génération de membranes hybrides pour l'application PEMFC.

Nouvelles membranes hybrides pour piles à combustible PEMFC

Le projet MENHYR a pour but de développer des membranes pour pile à combustible fonctionnant dans une large gamme de température notamment entre 100 et 150 °C sous faible taux d'hydratation. Pour cela, ce projet s'appuie sur un concept novateur de matériau hybride comprenant une matrice organique qui assure les propriétés de tenue mécanique et chimique et une phase inorganique qui apporte la majeure partie de la conductivité protonique. Pour permettre un fonctionnement sur une large gamme de températures (entre 20 et 150 °C), la conduction protonique est assurée par une double fonction sulfonique et phosphonique.

Pour atteindre cet objectif ambitieux, trois chemins critiques ont été suivis ; le premier porte sur des membranes à base de PVDF (Polyfluorure de vinylidène) chargé en silice sulfonée. Il avait pour but de valider le concept de membrane hybride à base de silice greffée dispersée dans le PVDF et de sélectionner le meilleur mode de préparation. Le deuxième chemin critique porte sur des membranes à base de PBI sulfoné dopé par de l'acide phosphonique. Des membranes hybrides sont obtenues en incorporant des charges inorganiques phosphonées pour améliorer la conductivité à plus basses températures autour de 120 °C. Le troisième chemin critique consiste à développer des membranes à base de PVDF chargé en silice greffée capables de fonctionner au delà de 100 °C.



Le projet de recherche industrielle « MENHYR : Membranes Hybrides Robustes » est coordonné par le CEA. Il associe deux partenaires industriels, IRMA et EDF-Eifer, ainsi que des partenaires académiques : PCI (CNRS, Université du Maine), LCMC (CNRS, Université Pierre et Marie Curie), Institut Charles Gerhardt (CNRS, ENSCM, Université de Montpellier II). Le projet a commencé en décembre 2006 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 1,96 M€ pour un coût global de l'ordre de 3,8 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Le projet a permis de démontrer la pertinence du concept de matériau hybride pour des applications en pile à combustible. Avec une densité de puissance max de 1,2 W/cm² à 80 °C sous H₂/O₂ sec, le système PVDF / Silice sulfoné constitue d'ores et déjà une alternative à « bas coût » crédible à la membrane commerciale Nafion.

Un projet de pré-industrialisation de la production en continu de la membrane PVDF / silice sulfoné par le procédé d'enduction est en cours de montage (Projet MENHATE). Il sera financé par l'ADEME. Ce projet a pour ambition de créer une filière française de production de membrane à faible coût. Une deuxième phase pourrait être mise en place courant 2010 en intégrant les progrès réalisés sur la bi-fonctionnalisation, la fluoration et l'optimisation de la matrice organique et la charge inorganique de manière à produire une membrane fonctionnant au delà de 100 °C.

Production scientifique et brevets

Un article a été publié dans Journal of membrane science et un autre dans Phys. Chem. Chem. Phys. Cinq Communications ont été publiées dans des actes de colloques à comité de lecture. Un brevet a été déposé en 2007 et un brevet est en cours de dépôt.

Programme « Hydrogène et piles à combustible », édition 2006

Projet DIAPASON

Un outil de diagnostic de l'état de santé d'une pile à combustible pour une plus grande durée de vie et une meilleure fiabilité

Améliorer la fiabilité et la durée de vie des piles à combustible pour les systèmes de cogénération et l'automobile

La fiabilité et la durée de vie sont des critères majeurs d'une commercialisation réussie des piles à combustible. Celles-ci subissent trois types de dégradation au cours de leur fonctionnement : celles, irréversibles, liées au vieillissement ou à une contamination sévère des composants ; celles, généralement réversibles, liées à des changements rapides de conditions opératoires (ex : pics de puissance) et celles associées à des incidents de fonctionnement (ex : défaut de régulation).

Pour répondre aux critères de fiabilité et de durée de vie requis par les applications, les fabricants de pile et de systèmes ont besoin d'un outil d'identification des causes de défaillance afin d'en réparer les conséquences. Cet outil doit aussi être capable de détecter et de diagnostiquer un défaut dès son apparition, afin que la régulation s'adapte et empêche la pile de défaillir, assurant la continuité de son fonctionnement. Idéalement, il définirait les actions de maintenance préventive.

Dans le cas des piles à combustible PEMFC, une mauvaise gestion de l'eau ou une contamination de ses composants par les gaz réactifs (air pollué ou hydrogène produit in situ à partir d'hydrocarbures) sont les principales sources de dégradations, tant réversibles qu'irréversibles. L'objectif du projet est de mettre au point un outil de diagnostic de ces défauts, en se limitant aux mesures accessibles sur un système commercial.

Développement de modèles physiques et boîtes noires validés sur des mesures d'impédance et de réponses des tensions individuelles à des créneaux de courant

Le projet s'appuie sur deux techniques très répandues dans le domaine de la caractérisation de systèmes électrochimiques que sont la spectroscopie d'impédance et les créneaux de courant. Ces techniques ont été mises en œuvre sur trois technologies de piles à combustible PEMFC sur lesquelles des conditions dégradantes ont été délibérément appliquées. Parallèlement, des modèles physiques (basés sur la résolution d'équations physiques) et des modèles boîtes noires (basés, entre autres, sur les réseaux de neurones) ont été développés. Les données expérimentales ont servi à alimenter et/ou valider les modèles.

Dans une deuxième étape, le plus fiable de ces modèles sert de base au développement d'un algorithme dont le rôle est de classer l'état du système à un instant donné selon différentes catégories dont un état "normal" et plusieurs états "dégradés". Cet algo-

ritme est ensuite intégré dans un système de mesure spécialement développé dans le projet, validé sur un stack en fonctionnement.

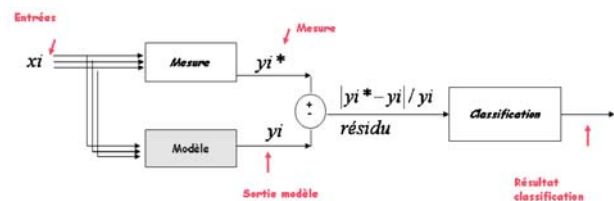


Schéma de principe du fonctionnement d'un outil de diagnostic

Le projet de recherche industrielle « DIAPASON : Méthodes de DIAGNOSTIC pour Piles à combustible pour les applications Automobile et Stationnaire sans instrumentation » était coordonné par EDF-Eiffer. Il associait aussi Hélon, l'INRIA, le CEA et le FC Lab. Le projet a commencé en décembre 2006 pour une durée de 36 mois. Il bénéficiait d'un financement ANR de 1,041 M€ pour un budget global de 1,7 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Le projet a permis de développer un impédancemètre haute tension capable de mesurer simultanément le spectre d'impédance d'un stack de 500 We et d'une cellule (ou d'un groupe de cellules) individuelle. Il a aussi permis de développer un algorithme de détection des défauts liés à la gestion de l'eau à partir de signaux issus de mesures de créneaux de courant et d'un système d'acquisition de tension de cellule à base de GMR capable d'acquérir 24 cellules en 1.2 ms. La combinaison de ces deux éléments permettra d'atteindre l'objectif final du projet : développer un outil de diagnostic avec une instrumentation minimale.

Production scientifique et brevets

Les résultats de ce projet ont été valorisés à travers la publication de deux articles dans une revue internationale à comité de lecture (J. Power Sources, Vol 183 et Vol 194), par une communication invitée dans une conférence (European Control Conference, Budapest July 2009) et par le dépôt d'un brevet en 2009.

Programme « Hydrogène et piles à combustible », édition 2005

Projet HYBOU

L'hydrogène comprimé : un carburant propre, inodore et non toxique pour les véhicules du futur

Le développement d'un réservoir pour le stockage hyperbare d'hydrogène à haute performance et industrialisable

Le stockage haute pression d'hydrogène (700bar) est un élément clé dans le développement de l'hydrogène comme vecteur énergétique, en particulier, dans l'industrie automobile. Les réservoirs pour le stockage haute pression d'hydrogène gazeux sont constitués de deux éléments : un liner étanche à l'hydrogène et une coque composite pour assurer la tenue mécanique. Les réservoirs de type III ont montré la durée de vie limitée de leur liner métallique, c'est pourquoi une nouvelle génération de réservoir (type IV) avec un liner polymère a été développée. La référence actuelle au niveau européen possède une vessie d'étanchéité en polyamide-6. Ces liners ont montré leurs limites en termes de température d'utilisation et de procédé de mise en œuvre.

Le projet HYBOU avait pour objectifs de développer, d'étudier et de valider de nouveaux matériaux et procédés d'élaboration pour les réservoirs haute pression, afin d'augmenter leurs performances (capacité de stockage, température d'utilisation, durée de vie, sécurité) et diminuer leur coût (matières premières et procédés).

Un liner innovant et des fibres « haute résistance » pour les réservoirs de stockage d'hydrogène hyperbare

Le projet HYBOU a nécessité de développer un liner à stabilité thermique améliorée et barrière à l'hydrogène. Grâce à ce projet, les relations entre la structure des polymères thermodurcissables et leurs propriétés barrières à l'hydrogène ont été étudiées. Le rotomoulage réactif, un procédé innovant, a permis de produire des liners à basse température et avec une productivité améliorée (~facteur 6) par rapport à l'état antérieur. Ce projet a également nécessité l'étude de fibres « haute résistance » permettant un bobinage innovant. Une nouvelle résine thermodurcissable optimisée pour l'enroulement filamentaire a été développée tout comme de nouveaux moyens de caractérisations simulant les contraintes subies par le réservoir au cours de son utilisation (fatigue thermomécanique). Enfin, le projet a permis de caractériser et d'optimiser l'architecture de la coque composite afin d'accroître les performances spécifiques de ces composites épais tout en identifiant les contributions des différents facteurs influant (paramètres d'élaboration, design, séquence de stratification, tension...) sur les propriétés finales des réservoirs.

En haut : un liner rotomoulé en polyuréthane.
En bas : le réservoir après un test d'éclatement.



Le projet « HYBOU : Matériaux innovants pour Liners Polymères et Coques composites de Réservoirs de type IV » était un projet de recherche industrielle coordonné par le CEA. Il associait également deux partenaires industriels, Air Liquide et RAIGI et deux partenaires universitaires, ENSAM et ENSMA. Il avait commencé en décembre 2005 pour une durée de 39 mois. Il a bénéficié d'un financement ANR de 1,145 M€ pour un budget global de l'ordre de 1,9 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

La démonstration de la faisabilité du rotomoulage de systèmes réactifs thermodurcissables a été le premier résultat majeur. Par la suite, la réalisation du premier prototype en fin de seconde année a été une étape importante qui a démontré la faisabilité complète du procédé de fabrication partant du liner thermodurcissable, réalisé par rotomoulage réactif, puis bobiné avec une fibre haute performance. Le passage de ce jalon a permis d'initier les phases de retour d'expérience et d'optimisation aussi bien sur la formulation que sur les procédés de mise en œuvre et le dimensionnement des réservoirs. L'atteinte de propriétés barrière à l'hydrogène supérieures à la référence puis la première validation des propriétés mécaniques en éclatement sur ces matériaux totalement nouveaux dans le domaine constituent le point d'orgue du projet.

Production scientifique et brevets

Les résultats du projet ont été présentés dans plusieurs conférences internationales : HFC (Canada) ; JNC (France) ; ICCM (UK), 17th World Hydrogen Energy Conference WHEC2008, Brisbane, 4th MAM, Allemagne, Colloque RTS, Paris (2007). D'autre part, deux brevets ont également pu être déposés.

Enfin, RAIGI, une PME partenaire, commence à commercialiser des grades polyuréthanes industriels pour le rotomoulage.

Programme « Hydrogène et piles à combustible », édition 2007

Projet MATHYSSE

Propriétés de stockage de l'hydrogène dans des hybrides à base de répliques de carbone et de matériaux de type MIL

Stocker l'hydrogène dans des matériaux solides

Le stockage de l'hydrogène est l'un des verrous majeurs à l'utilisation de ce gaz comme vecteur énergétique dans des applications embarquées.

A côté de solutions telles que la compression et la liquéfaction, le stockage réversible de l'hydrogène dans des matériaux solides offre une alternative prometteuse. Deux classes de matériaux sont actuellement étudiées pour le stockage de l'hydrogène : les hydrures métalliques/complexes et les matériaux poreux, mais chacune présente des désavantages (cinétique lente et/ou thermodynamique défavorable).

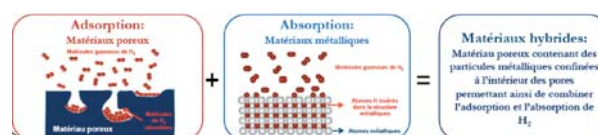
Le projet MATHYSSE se propose de combiner les deux types de classe de matériaux et de développer de nouveaux hybrides obtenus par dépôt d'espèces métalliques dans les cavités de matériaux nanoporeux. L'objectif est de tirer profit des propriétés d'adsorption de la structure poreuse et des propriétés d'absorption des espèces métalliques.

Synthétiser de nouveaux hybrides hydrures/matériaux nanoporeux

Les matériaux hybrides sont synthétisés à partir de répliques de carbone ou de matériaux de type MIL (Matériaux de l'Institut Lavoisier) dans lesquelles des nanoparticules métalliques ou intermétalliques sont insérées par imprégnation liquide.

Ensuite, ces hybrides sont caractérisés afin de déterminer leurs propriétés physico-chimiques (composition chimique, structure, microstructure, texture) et de sorption de l'hydrogène. L'interaction entre particules métalliques et structure poreuse doit permettre d'augmenter la capacité de stockage via un effet coopératif. Afin de mieux comprendre ces effets, des simulations sont effectuées pour modéliser les interactions entre les surfaces des matériaux poreux et les nanoparticules métalliques insérées.

La maîtrise de la synthèse de tels matériaux hybrides, aujourd'hui inédits, est une occasion unique d'étudier l'effet de confinement de particules métalliques nanométriques et de mieux comprendre les effets de taille sur les propriétés physico-chimiques et thermodynamiques de ces hybrides.



Le projet « MATHYSSE: MATériaux HYbrides pour le Stockage Solide de l'hydrogène » était un projet de recherche fondamentale coordonné par le CMTR-IMCPE (CNRS, Université Paris 12). Il associe quatre autres partenaires académiques, le LCP (CNRS, Université de Provence, Université de la Méditerranée, Université Paul Cézanne), le CINAM (CNRS, Université d'Aix-Marseille), l'IS2M (CNRS, Université de Mulhouse Colmar Alsace) et l'Institut Lavoisier (CNRS, Université de Versailles). Il a commencé en janvier 2008 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 884 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Les premiers résultats montrent que les matériaux hybrides à base de nanoparticules de Pd insérées dans une structure poreuse possèdent une capacité de stockage d'hydrogène à la température ambiante supérieure au matériau poreux seul ce qui suggère un effet coopératif des molécules d'hydrogène et des nanoparticules métalliques.

Une étude énergétique de l'interaction entre l'hydrogène et les matériaux préparés dans le cadre de ce projet est en cours.

La méthode de synthèse sera étendue à des matériaux hybrides contenant des nano-alliages métalliques confinés dans les porosités. La modélisation de la croissance de nano-agrégats métalliques dans un matériau poreux peut informer sur la dispersion et la taille des nanoparticules métalliques qui joue un rôle déterminant dans l'effet coopératif.

Programme « Hydrogène et piles à combustible », édition 2005

Projet FISYPAC

Le véhicule hybride à pile à combustible – une solution de mobilité pour l'avenir

**Véhicule Zéro émission :
une ambition qui se concrétise**

La raréfaction à terme des ressources pétrolières et les contraintes visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre incitent les constructeurs automobiles à se tourner vers de nouveaux groupes moto-propulseurs, principalement à moteur électrique. Diverses architectures sont explorées : véhicules électriques à batteries rechargeables, véhicules à pile à combustibles, et toutes les hybridations intermédiaires.

Le projet FISYPAC, focalisé sur la maîtrise des technologies des véhicules électriques visait à valider la technologie pile à combustible GENEPAC à bord d'un véhicule dans une configuration « Range Extender » où deux sources d'énergie sont hybridées : un générateur électrique à pile à combustible d'une puissance nominale de 20 kW alimenté en Hydrogène stocké à 700 bar et une batterie Li-ion de 13 kWh. Ce véhicule préfigure ce que sera la technologie automobile de demain avec une perspective de début de commercialisation à l'horizon des années 2020.

**Une technologie de pointe
en réponse aux attentes clients**

Les travaux consistaient à montrer la viabilité de la technologie pile à combustible pour une application automobile en réalisant un véhicule électrique hybride en sources d'énergies, construit sur la base d'une 307 CC.

Les travaux ont porté sur quatre grands thèmes :

- ◆ la caractérisation de la pile à combustible (type PEMFC) pour guider la conception du système et pour valider des voies de progrès permettant d'augmenter la densité de puissance, le rendement et la durée de vie de la pile,
- ◆ la conception et la réalisation d'un système pile à combustible d'une puissance nominale de 17 kW pour intégration véhicule,
- ◆ la conception et la réalisation d'organes de puissance électrotechniques à haut rendement tels que batterie Li-ion, convertisseurs de tensions ainsi que l'étude et la réalisation de cartes de diagnostic de tensions de cellules individuelles de pile à combustible,
- ◆ l'intégration véhicule et la validation embarquée d'une nouvelle chaîne de traction électrique, du système PAC et de son stockage hydrogène à 700 bars.



Véhicule FISYPAC réalisé durant le projet, construit sur une plateforme Peugeot 307CC (Vitesse maximale de 155 km/h - Autonomie sur batterie de 75 km ou 450 km en fonctionnement hybride)

Le projet de recherche industrielle « FISYPAC : Fiabilisation Système Pile A Combustible » était coordonné par PSA Peugeot Citroën. Côté industriels, il associait aussi la SAFT, Bertin technologies, Sherpa engineering, 3D-PLUS, ArcelorMittal Stainless and nickel alloys, ArcelorMittal Innovation, Soprano et EMC, ainsi que des laboratoires publics, le CEA et L2ES (Université Technologique de Belfort-Montbéliard). Le projet a commencé en décembre 2005 pour une durée de 42 mois. Il a bénéficié d'un financement ANR de 4,7 M€ pour un coût global d'environ 9 M€.

IMPACTS**Résultats majeurs**

Les différentes actions menées sur les composants pile ont permis d'augmenter significativement sa puissance spécifique pour atteindre 2,1 kW/L et 1,4 kW/kg pour une durée de vie sur cycle représentatif automobile de 2200h.

L'architecture et la définition organique retenue pour le système PAC alimenté en hydrogène comprimé stocké à 700 bar, nous amène à un rendement de 47 % à la puissance nominale de 17 kW, performance rendue possible notamment grâce à l'intégration d'un éjecteur pour la recirculation.

L'électronique de puissance a été particulièrement optimisée ; le rendement atteint au niveau du convertisseur HT/HT de 96 % à la puissance maximale de 23 kW. La batterie a été optimisée en terme de compacité pour assurer son intégration en lieu et place de la roue de secours (densité énergétique : 100 Wh/L et 88 Wh/kg).

Une consommation du véhicule de 995g d'hydrogène aux 100km a été mesurée sur banc dynamométrique sur la base du règlement Européen R101 adapté dans le cadre du projet Européen FUEVA aux véhicules pile à combustible. Ce niveau de performances se situe au meilleur niveau mondial et témoigne des efforts effectués par chacun des partenaires pour concevoir des composants à haut rendement.

Production scientifique et brevets

Durant le projet, une dizaine de brevets ont été produits dont une majorité sont maintenant étendus à l'étranger. Neuf publications scientifiques ont été réalisées. Par ailleurs, le véhicule dans sa version électrique sur batterie a été exposé au Mondial de l'Automobile 2008.

Programme « Stockage innovant de l'énergie », édition 2007

Projet LIO

1 000 km d'autonomie pour un véhicule électrique grâce à une batterie lithium qui respire

Une batterie à très haute capacité grâce au couple lithium/air

Un des principaux freins au développement du véhicule tout électrique est son autonomie, aujourd'hui inférieure à 200 km. Cette limitation est liée au poids des batteries, et plus particulièrement à leur densité d'énergie massique. Les meilleures batteries actuelles (lithium-ion, lithium polymère, sodium chlorure de nickel ou Zebra) ont une densité d'énergie comprise entre 100 et 120 Wh/kg pour un système complet et jusqu'à 220 Wh/kg pour une cellule, avec un coût encore trop important pour une utilisation à grande échelle. Les meilleures de ces batteries ne permettent pas de dépasser les 300 km et un saut technologique est nécessaire pour approcher l'autonomie du moteur à essence.

Le projet LIO explore la faisabilité d'une nouvelle technologie de batterie en rupture avec les batteries existantes. Elle utilise une électrode négative ayant une capacité massique la plus élevée possible : le lithium métal, couplée à une électrode dont la matière active n'est pas stockée : une électrode à air. Cette technologie permettrait théoriquement au véhicule électrique de dépasser une autonomie de 1 000 km.

Séparer un milieu anhydre d'un milieu aqueux par une membrane céramique conductrice

La clé du fonctionnement d'une batterie lithium-air réside dans la séparation entre le lithium métal de l'électrode négative et l'électrolyte aqueux utilisé pour l'électrode positive, l'électrode à air. Ce séparateur doit être conducteur ionique de lithium pour boucler le circuit électrique, doit être stable en contact avec le lithium métal et l'électrolyte aqueux, et doit être parfaitement étanche à l'air et l'eau pour empêcher une autodécharge de la batterie par réaction du lithium. Deux autres innovations ont également été utilisées dans le projet LIO pour lever les verrous : une électrode à air réversible pour pouvoir recharger la batterie sans endommager l'électrode à air, et une membrane polymère ionique conductrice intégrée à l'électrode à air, pour filtrer le CO_2 de l'air et empêcher la formation de carbonate de lithium dans cette électrode.

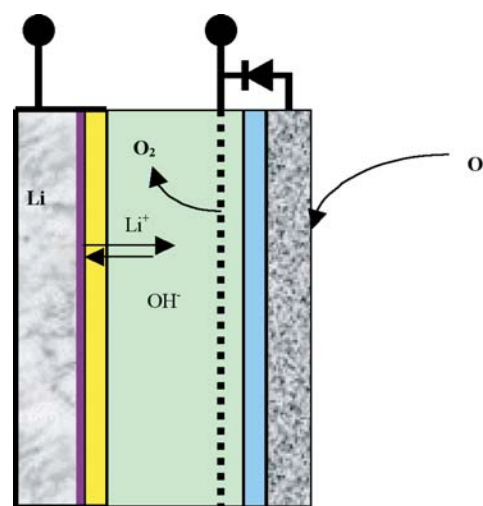


Schéma de principe de la batterie Li-air

Le projet « LIO : Faisabilité d'une batterie Lithium-air » est un projet de recherche fondamentale coordonné par EDF R&D. Il associe aussi la SAFT, ainsi que deux laboratoires publics : l'ICMCB (CNRS, ENSCPB, Université de Bordeaux) et le LPPI (Université de Cergy Pontoise). Le projet a commencé en décembre 2007 pour une durée de 24 mois ; il bénéficie d'un financement ANR de 636 k€ pour un coût global de l'ordre de 1,2 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Le dépôt de lithium métal à partir d'une solution aqueuse à température ambiante a été démontré dans une série de cellules lithium-air fabriquées par les partenaires du projet LIO. La stabilité de l'électrode à air composite a été vérifiée pendant 1000h de fonctionnement, grâce à l'utilisation d'une membrane anionique. En l'absence d'une telle membrane, la durée de vie de l'électrode tombe à 40h.

Une batterie Li-air fonctionnelle a été réalisée et son fonctionnement a été suivi pendant 300h et 40 cycles de décharge/recharge.

Production scientifique et brevets

Trois brevets ont été déposés en 2009 pour protéger les innovations dans l'électrode à air.

Programme « Stockage innovant de l'énergie », édition 2007

Projet MAHYA

De nouvelles perspectives pour les accumulateurs Nickel Metal Hydrure

Amélioration de la technologie Nickel-Metal Hydrure (Ni/MH) pour applications de forte puissance

Les applications des accumulateurs Nickel-Métal Hydrure (Ni/MH) nécessitent des puissances de plus en plus importantes, notamment des applications de transport (vélo électrique, véhicule hybride...). Cet accroissement de puissance peut être obtenu en développant de nouveaux alliages hydrurables de plus grande capacité massique. De récents travaux font état d'alliages de type AB_x ($3.5 < x < 5$) qui présentent des capacités spécifiques pouvant atteindre 410 mAh/g (vs 300 mAh/g avec les alliages AB_5 existants).

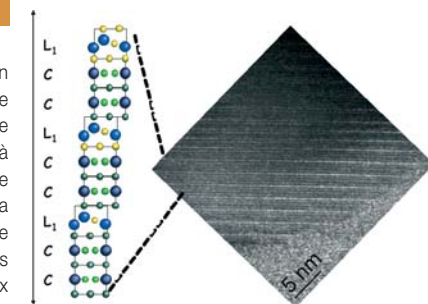
Le présent projet vise à améliorer cette technologie Ni/MH en développant une nouvelle génération d'électrode négative. Il s'agit de développer et optimiser une nouvelle génération de matériaux hydrurables de type $(R,Mg)Ni_x$ avec $3.5 < x < 5$ et où R sont des terres rares, caractérisés par une capacité massique supérieure à 340 mAh/g, (plus de 115 % de celle des alliages hydrurables AB_5 actuels), une vitesse de corrosion de moins de 120 % de celle des AB_5 et une aptitude à la charge équivalente à celle des alliages AB_5 . Les conditions de mise en œuvre d'éléments Ni/MH de puissance utilisant ces matériaux hydrurables de nouvelle génération seront définies et optimisées.

Associer la maîtrise de l'élaboration des alliages à la caractérisation de leur microstructure et de leurs performances électrochimiques

La démarche consiste à travailler sur l'élaboration d'alliages de composition identique aux AB_5 mais de microstructures différentes grâce à l'utilisation de méthodes classiques (fusion en four à induction) et avancées (trempe ultrarapide, frittage flash) puis à caractériser leur microstructure, en volume et en surface, par microscopie électronique à haute résolution. Il s'agit enfin de mesurer leurs performances électrochimiques, notamment en termes de résistance à la corrosion et de chargeabilité.

Par ailleurs, la charge de ces nouveaux matériaux est étudiée en réaction solide gaz et en électrochimie. La comparaison des résultats obtenus selon ces deux méthodes doit permettre de déterminer le caractère volumique ou superficiel du phénomène limitant la charge de ces nouveaux matériaux. En fonction de ce résultat, des traitements de volume (précipitation de phases secondaires par exemple) ou de surface (décapage, enrichissement en certaines espèces, dépôt de phases superficielles) seront réalisés et leur impact sur la chargeabilité en électrochimie sera évalué.

Représentation schématique et image en microscopie électronique à transmission haute résolution de la microstructure d'une des phases présentes dans les nouveaux matériaux hydrurables étudiés.



Le projet de recherche industrielle « MAHYA : Nouvelle génération de Matériaux Hydrurables pour Accumulateurs Ni-MH » est coordonné par la SAFT. Il associe aussi deux laboratoires de recherche publique, le CMTR (CNRS Thiais, ICMPE) et le CEMES (CNRS Toulouse). Il a commencé en décembre 2007 pour une durée de 30 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 590 k€ pour un budget global de l'ordre de 1,5 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Le premier résultat marquant de ce projet montre que les différents modes d'élaboration se traduisent pour une même composition par des différences notables en termes de capacité en fonctionnement électrochimique et que les différences observées s'expliquent par les propriétés des alliages en réaction solide gaz. Par ailleurs, l'étude d'alliages de différentes compositions a permis de corréliser leur résistance à la corrosion avec certaines caractéristiques de leur composition. Enfin, le caractère superficiel ou volumique du phénomène limitant la cinétique de charge a été déterminé.

Production scientifique et brevets

Un article traitant de l'effet de la substitution partielle de Mg dans des alliages du système La-Ni sur leur caractéristiques microstructurales, les propriétés thermodynamiques de leurs hydrures et leur fonctionnement électrochimique a été publié (Electrochimica Acta, 54 - 2009).

Programme « Stockage innovant de l'énergie », édition 2007

Projet ABHYS

Des systèmes de stockage d'énergie écologiques et performants pour des applications stationnaires et mobiles

Développer une technologie alternative industriellement viable pour les supercondensateurs

Le développement des véhicules électriques et hybrides et l'essor des énergies renouvelables entraînent une demande croissante de systèmes de stockage d'énergie électrique. Les accumulateurs ne peuvent répondre seuls aux contraintes de forte puissance sans surdimensionnement excessif et/ou diminution de leur durée de vie. Le couplage avec des supercondensateurs permet de répondre à des pics de puissance de façon cyclique (plusieurs centaines de milliers de fois) sans dégradation de performances. Le supercondensateur participe également à l'amélioration du rendement global du système de propulsion électrique.

La technologie actuelle des supercondensateurs associe deux électrodes de carbone dans un électrolyte organique. Une solution alternative et éco-responsable consiste à coupler une électrode négative de carbone à une électrode positive à base de dioxyde de manganèse (système hybride) dans un milieu aqueux neutre, conduisant ainsi à une augmentation de la densité d'énergie et à une amélioration de la sécurité chimique et thermique. La maturation technologique d'un tel dispositif et l'évaluation de ses performances tant électrochimiques que thermiques font l'objet du projet ABHYS.

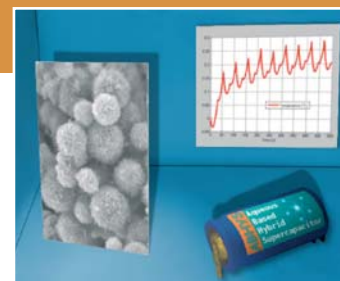
Optimiser tous les constituants du supercondensateur hybride

Les innovations du projet portent sur l'amélioration des densités de puissance et d'énergie, tout en conservant les points forts du dispositif hybride : de bonnes performances électrothermiques et un faible impact environnemental.

L'usage de forts courants entraîne en effet des problèmes thermiques associés à des électrolytes à bas point d'ébullition, ce qui n'est pas le cas en milieu aqueux. La synthèse de matériaux d'électrode performants, le couplage de ces matériaux avec les collecteurs de courant et l'assemblage des électrodes ainsi constituées sont les leviers majeurs du projet.

Les améliorations sont évaluées à travers des outils de métrologie et de modélisation thermique et électrique spécialement développés pour l'étude du dispositif hybride.

L'optimisation des différents matériaux et composants du supercondensateur ABHYS lui procure des performances électriques accrues et une meilleure sécurité thermique.



Le projet «ABHYS: Aqueous Based Hybrid Supercapacitor»

est un projet de recherche fondamentale coordonné par le LGMPA (Université de Nantes). Il associe trois autres laboratoires publics : l'Institut Charles Gerhardt (CNRS, Université Montpellier 2), le CRMD (CNRS, Université d'Orléans) et le CIRIMAT (CNRS, Université Paul Sabatier) et un industriel, la société batScap. Le projet a commencé en décembre 2007 pour une durée de trois ans. Il bénéficie d'un financement ANR de 900 k€ et d'un abondement de 12 000 € de la part du pôle de compétitivité Automobile haut de gamme (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes) pour un coût global de l'ordre de 2,4 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Des prototypes de 1F (F=Farad), réalisés à partir des matériaux et électrodes optimisés, ont démontré des durées de vie de plusieurs dizaines de milliers de cycles avec des performances électrochimiques améliorées par rapport au concept initial de supercondensateur hybride. L'utilisation de différents électrolytes aqueux neutres et leur composition permet également de moduler les plages de températures de fonctionnement et la longévité du système. Les mesures électrothermiques mettent en évidence des comportements singuliers par rapport aux supercondensateurs usuels procurant ainsi au projet de nouvelles perspectives scientifiques et technologiques.

Les efforts actuels portent sur le changement d'échelle des prototypes en termes de capacité, mais les travaux sur les constituants du système se poursuivent et devraient encore permettre d'optimiser les performances.

Production scientifique et brevets

Le projet a donné lieu à une vingtaine de communications internationales, ainsi qu'à sept articles publiés dans des revues scientifiques internationales. Les participants du projet sont à l'origine d'une conférence internationale sur les super-condensateurs (ISEECap 09, www.iseecap09.org) qui a rassemblé une centaine de participants à Nantes du 29 juin au 2 juillet 2009.

Programme « Véhicules Propres et Economés », édition 2006

Projet LIFEMIT

Les batteries virtuelles, un outil pour améliorer les performances énergétiques

Développement de batteries virtuelles opérationnelles

Les modèles de batterie usuels ne prennent pas en compte l'impact des sollicitations sur la durée de vie de la batterie. Or, les batteries sont capables d'accepter des courants de courtes durées plusieurs fois supérieurs aux courants continus. Il est donc possible, par une gestion optimale de la batterie, d'augmenter considérablement la puissance disponible.

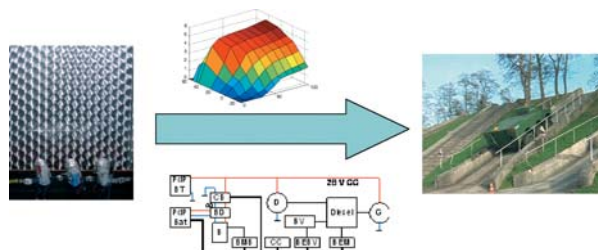
L'objectif du projet Lifemit était de développer les outils pour permettre cette optimisation, en s'appuyant sur un modèle virtuel intégrant la gestion batterie pour garantir la durée de vie et une puissance optimale pour une utilisation sur véhicule de type ferroviaire ou de type véhicule militaire hybride terrestre.

Ce développement s'appuie sur une campagne de tests électriques intensifs. Ces « batteries virtuelles » seront ensuite déployées dans des modèles électriques de véhicules afin d'optimiser l'architecture et la gestion énergétique. Les aspects sécurité et fiabilité sont pris en compte dans la démarche afin d'assurer une mise en œuvre sans risque sur les personnes et les matériels.

Du virtuel au réel

L'objet de cette démarche complémentaire est d'étudier et d'améliorer à une échelle très réduite les différents maillons de la chaîne d'un système batterie. La chaîne de mesure est évaluée dans un environnement de fonctionnement sévère pour garantir la représentativité des valeurs traitées ultérieurement par l'intelligence associée à la batterie. Les aspects sécurité et disponibilité sont analysés suivants des scénarii de mise en œuvre des batteries dans les véhicules.

Ces différentes démarches permettent d'augmenter la maturité des systèmes pour réduire le risque et donc le coût de développement des batteries, favorisant ainsi leur déploiement.



Optimisation énergétique des systèmes intégrant des batteries lithium-ion

Le projet de recherche industrielle « LIFEMIT : Application des batteries de forte puissance Lithium-Ion dans les applications véhicules ferroviaires et militaires terrestres » est coordonné par SAFT. Il associe un second industriel, NEXTER, un laboratoire privé, l'EIGSI, et deux établissements publics, le GREEN (ENSEM-INPL Nancy) et l'IMS (ENSEIRB). Le projet a commencé en janvier 2008 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 1 M€ pour un budget global de l'ordre de 2,1 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

A la fin de sa première année, des outils spécifiques ont été développés, en particulier une charge active de 36kW permettant de tester les batteries en environnement d'électronique puissance. Des batteries virtuelles ont été développées intégrant la gestion optimisée de la puissance. Ces batteries virtuelles sont en cours d'utilisation dans des modèles de véhicule complets. Certains résultats encourageant montrent un gain significatif en utilisant des batteries lithium-ion.

Production scientifique et brevets

Le projet Lifemit a été présenté au réseau MEGEVH. Une communication orale, « Tools and process for optimal integration of Battery systems », a été faite au congrès Decielec 2009.

Programme « Véhicules de Transport Terrestre », édition 2009

Projet SIMCAL

Prévoir le comportement des batteries pour Véhicules Electriques et Hybrides tout au long de leur vie

Modéliser le vieillissement de systèmes de stockage d'énergie embarqués dans des véhicules électriques et hybrides

L'énergie électrique prend une place de plus en plus importante dans les véhicules pour un grand nombre d'applications. Cette électrification croissante fait intervenir des systèmes de stockage d'énergie (« SSE ») embarqués pour permettre une gestion optimum de l'énergie à bord (auxiliaires, récupération au freinage...). Mais l'usage de ces systèmes de stockage se heurte encore aujourd'hui à plusieurs difficultés majeures :

- ◆ la complexité des architectures, dans leur mise en œuvre et leur gestion, nécessite une approche par simulation pour les dimensionnements et les optimisations. Une telle approche, qui doit être globale depuis l'électrochimie du SSE jusqu'au système véhicule et à son usage, est extrêmement difficile à mettre en place et de fait peu utilisée,

- ◆ l'évolution de la nature des sollicitations des systèmes de stockage, ainsi que l'utilisation de composants et d'architectures innovants induisent une incertitude sur leurs modes de vieillissement et leur durée de vie qui sont actuellement un problème majeur. Dans tous les cas, le développement d'outils de simulation de comportement et de vieillissement de ces systèmes associé à une compréhension des phénomènes impliqués sont absolument nécessaires. Le projet Simstock lancé en 2007 et soutenu par l'ADEME, avait pour objectif de réaliser la modélisation du comportement de systèmes de stockage d'énergie embarqués dans des véhicules hybrides, en prenant notamment en compte leur vieillissement en usage. Ce type de modélisation, pour être efficace, nécessite la constitution des très grosses bases de données expérimentales traduisant le comportement à l'usage de différentes technologies utilisées aujourd'hui (batteries type Li-Ion, NiMH, supercondensateurs...).

Le projet Simstock étudie les batteries en usage, alors que celles-ci (dans le cas des véhicules particuliers) vieillissent sur un parking pendant 95 % du temps. Le projet Simcal a donc pour objectif de modéliser ce mode de vieillissement complémentaire du précédent en prenant en compte les conditions particulières qui s'y rattachent (soleil, pluie, nuit, jour, été, hiver...).

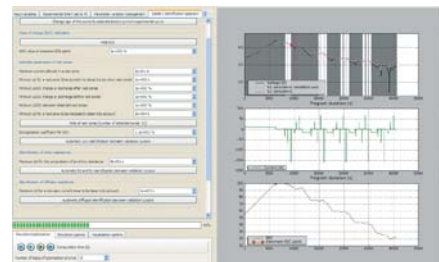
Des bases de données uniques et un modèle complexe dans un logiciel de modélisation « industriel »

Les moyens expérimentaux mis en œuvre dans les huit laboratoires réalisant les essais (18 bancs d'essais dans le cadre de Simstock et sept enceintes thermiques et dispositifs associés dans le cadre de Simcal) permettront de mettre à disposition des partenaires du projet des bases de données expérimentales uniques. Elles concerneront un ensemble de six technologies Li-Ion représentatives d'une majorité des technologies existantes aujourd'hui et une technologie NiMH. Ces bases de données per-

mettront également de réaliser des études sur les mécanismes de vieillissement en usage réel impossibles autrement, susceptible de conduire à des méthodes d'amélioration des durées de vie.

Elles permettront également après intégration dans AMESim (logiciel de simulation automobile produit par LMS-Imagine) de réaliser des simulations de fonctionnement de véhicules Electriques et Hybrides, y compris lorsque ceux-ci ont un certain âge. Comme cet outil est aujourd'hui couramment utilisé dans l'industrie automobile, ce nouveau module devrait pouvoir être d'une grande aide, aussi bien pour le dimensionnement que pour la « qualification » des solutions techniques choisies.

Exemple de simulation du comportement d'une batterie dans un véhicule hybride



Le projet de recherche industrielle « SIMCAL : Étude et modélisation du vieillissement calendaire des batteries NiMH et Li-Ion embarqués dans des véhicules routiers » est coordonné par le CEA. Il associe cinq industriels (EDF, PSA, Renault, SAFT et Valeo) et sept laboratoires de recherche publique : l'IFP, l'EIGSI, le LEC (UTC), le LRCS (CNRS, Université de Picardie), le LMS-IMAGINE, le LTE (INRETS) et l'IMS (ENSEIRB). Le projet a commencé en octobre 2009 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 1,7 M€ pour un budget global de l'ordre de 3,6 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Les campagnes d'essais à conduire étant très longues (plus d'une année par type de technologie), les résultats expérimentaux qui serviront de base à tous les développements ultérieurs ne commenceront à être disponibles que vers mi-2011.

Aujourd'hui, l'ensemble des protocoles expérimentaux ont été mis au point et les essais sont en phase de démarrage.

Sur le plan scientifique, le projet SIMCAL permettra de disposer d'une bibliothèque de modèles de vieillissement calendaire pour différentes technologies de batteries. L'analyse de l'évolution chimique des éléments au cours de ces études de vieillissement constituera un autre apport précieux à la communauté scientifique. Enfin, sur le plan économique, les modèles développés permettront d'apporter une meilleure évaluation de la durée de vie et de l'évolution des performances des batteries, et par voie de conséquence, d'optimiser leur dimensionnement au sein des systèmes.

Programme « Véhicules propres et économes », édition 2007

Projet ARCHYBALD

Hybrider des véhicules lourds

Economiser 20-30 % d'énergie grâce à une architecture hybride optimisée

L'hybridation de différentes sources énergétiques pour assurer les besoins énergétiques (propulsion, auxiliaires, confort...) des véhicules de transport est une voie particulièrement intéressante à explorer, pour permettre de limiter la dépendance aux seuls carburants d'origine fossile.

Le projet se propose d'étudier des chaînes de traction hybride formée autour d'un alerno-démarrateur ou d'un split, associé à des dispositifs de stockage d'énergie capacitifs pour la puissance et électrochimique pour l'énergie, offrant des fonctions et des performances significatives pour la réduction jusque 20-30 % de consommations et d'émissions polluantes de véhicules lourds de plus de vingt tonnes.

La prise en compte des caractéristiques des applications considérées (civiles comme la desserte urbaine ou militaires comme le transport de troupes) conduit à définir les principaux enjeux communs de ce projet :

- ◆ la réduction de la consommation et des émissions polluantes des véhicules de type poids lourd,
- ◆ l'obtention de performances élevées,
- ◆ l'obtention d'une grande disponibilité même en cas de défaillance.

Il s'agit tout d'abord de préciser le besoin, puis d'évaluer les différentes architectures possibles. Des démonstrations particulières sur les verrous technologiques permettront de mieux cerner les caractéristiques des briques élémentaires nécessaires au système complet.

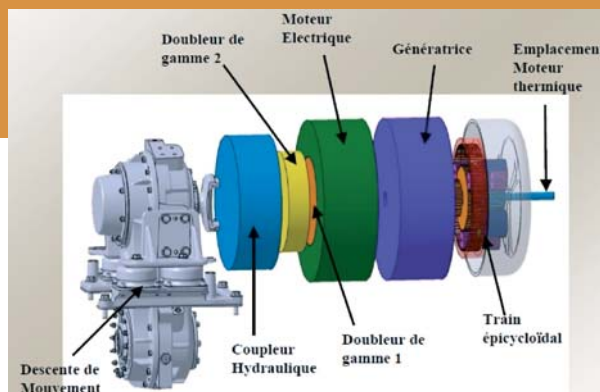
Une approche système indispensable

Les principales innovations technologiques visées par le projet concerne la gestion de stockage multi-source (couplage batteries / super-condensateurs), la conception de machines électriques compactes à haut rendement, et l'optimisation des échanges d'énergie avec le milieu environnant (plug-in, plug-out).

Idéalement, le sous-système doit autoriser les fonctions de start&stop, de freinage récupératif, de roulage tout électrique à basse vitesse, d'assistance du moteur thermique, de boost, de connexion au réseau EDF, d'alimentation du réseau de bord, de groupe électrogène.

S'agissant d'un véhicule à usage professionnel, la capacité à démarrer le véhicule y compris en cas de défaillance de la machine électrique doit être préservée (ce n'est pas le cas de toutes les architectures hybrides actuelles).

Les différentes alternatives technologiques, ainsi que leur couplage au niveau du système, sont analysées au travers de simulations et d'évaluations expérimentales locales sur des points nécessitant une acquisition de données.



Outre les performances et la disponibilité du sous-système, on porte une attention particulière à sa compacité, sa durée de vie, son rendement et son coût global de possession.

Le projet « ARCHYBALD: ARCHitectures HYBrides Adaptées aux véhicules Lourds à forte Disponibilité » est un projet de recherche industrielle coordonné par NEXTER. Il associe également les laboratoires FEMTO-ST (CNRS, Université de Franche-Comté), LTE et LTN (INRETS) et L2EP (Université de Lille 1) ainsi que Batscap. Il a commencé en janvier 2008 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 940 k€ pour un coût global de l'ordre de 1,8 M€.

IMPACTS**Résultats majeurs**

Fin 2009, une étude permettant d'analyser finement le besoin a été réalisée et a permis de définir le cahier des charges. La conception de dérivation de puissance sur un double train planétaire a été choisie sur des critères de potentiel d'innovation et de compacité. Les éléments du cahier des charges comprennent aussi bien des éléments de définition des contraintes (couple, vitesse, rendement, échauffement) que des profils de puissance basée sur l'analyse de mission types pour les véhicules.

La faisabilité d'un tel système a été étudiée et établie, ce qui a permis d'aboutir à une définition de l'architecture globale du système hybride. La conception des machines électriques, du système de stockage d'énergie et de la transmission mécanique a débuté. En particulier des premières expériences de caractérisation des systèmes de stockage (batteries/ super-condensateurs) ont été effectuées.

Production scientifique et brevets

Ce projet a donné lieu à des présentations dans deux conférences internationales et un colloque, et fait l'objet de trois thèses : une thèse sur le sujet du stockage de l'énergie électrique, une sur le sujet de la motorisation électrique, et enfin, une sur la modélisation système et la gestion d'énergie.

Ce projet fait partie intégrante des projets du réseau scientifique français MEGEVH sur la gestion d'énergie de véhicules électriques et hybrides.

Programme « Véhicules propres et économes », édition 2006

Projet MICRO²

Microbus Micro-Hybride



Expérimenter en conditions réelles un micro-bus à système « stop&start »...

L'objectif du projet MICRO² était de démontrer la pertinence technique, économique et environnementale d'un concept Stop&Start dans le domaine de transport public en zone urbaine. Dans un premier temps, il s'agissait d'étudier le fonctionnement d'un véhicule de faible capacité (microbus GRUAU 22 places), l'extension vers des véhicules urbains de plus grande capacité et dotés de motorisations dans la gamme de trois à six litres étant également envisageable.

Le projet comprenait l'étude, la réalisation, l'expérimentation en conditions réelles et la modélisation de la chaîne de traction intégrée. Le système micro-hybride (Stop&Start) était doté de la récupération d'énergie de freinage par super-condensateurs et convertisseur de tension (système StARS+X de Valeo).

... pour développer les connaissances et identifier les points durs sur l'hybridation des véhicules lourds

MICRO² avait pour objectif de contribuer à l'accroissement des connaissances sur les points suivants :

- ◆ dimensionnement et adaptation d'un système « automobile » aux spécificités des bus (fort couple de démarrage, réseau 24V),
- ◆ interfaçage du système micro-hybride avec les systèmes de management moteur et véhicule,
- ◆ conditions de fonctionnement des composants de cette architecture suivant les usages, en particulier pour le système de stockage d'énergie vis-à-vis de son vieillissement en mode Stop&Start,
- ◆ bilan énergie-pollution permettant de faire apparaître le gain potentiel des fonctionnalités Stop&Start et récupération au freinage suivant un usage de transport collectif,
- ◆ développement et validation d'un outil permettant de prédire le gain en consommation d'énergie suivant les conditions de fonctionnement propres à un exploitant.

Le projet « MICRO²: Microbus Micro-Hybride » était un projet de recherche industrielle coordonné par Valeo Systèmes Electriques. Il associait également le LTE (INRETS) et trois entreprises, GRUAU, la RATP et Véolia Transport. Il a commencé en 2007 pour une durée de 30 mois. Il a bénéficié d'un financement ANR de 537 k€ pour un coût global estimé à 1,6 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Le projet a permis de réaliser un démonstrateur mettant en œuvre un système d'alternateur entraîné par courroie sur la façade « accessoires » sur un micro bus GRUAU. Ce système permet aussi de faire de la récupération d'énergie électrique durant les phases de décélération sur des super condensateurs.

Les performances du démonstrateur ont ensuite été évaluées par différents partenaires du projet :

- ◆ des tests et mesures effectués par la RATP sur le réseau parisien ont permis de montrer les bénéfices du système, soit un gain de consommation de l'ordre de 12 %, un confort amélioré pour les utilisateurs, et une image positive pour l'exploitant. En outre, l'analyse a permis de faire la part des gains entre fonctionnement Stop&Start et freinage récupératif, estimés respectivement à 75 % et 25 %,
- ◆ des tests et mesures effectués par Véolia Transport sur le réseau CTB de Bourges (en milieu peu dense) ont montré un gain de l'ordre de 10 % en consommation avec le système Stop&Start par rapport au moteur thermique seul,
- ◆ un outil de simulation a été développé par l'INRETS et ses résultats ont été comparés à des résultats d'essai, montrant la capacité du simulateur à anticiper les gains de consommation sur de nouvelles architectures moteur.

Production scientifique et brevets

Les résultats du projet ont été présentés aux 6^{ème} journées d'études des bus propres à Lille les 24 et 25 septembre 2007, et de nombreuses publications ont été effectuées dans la presse quotidienne.

Un brevet a été déposé dans le cadre du projet par Valeo sur un algorithme de commande du système altemo démarreur qui a été mis en œuvre sur le micro bus.

Programme « Véhicules propres et économes », édition 2006

Projet I-STARS

Vers une nouvelle génération de systèmes « stop&start »

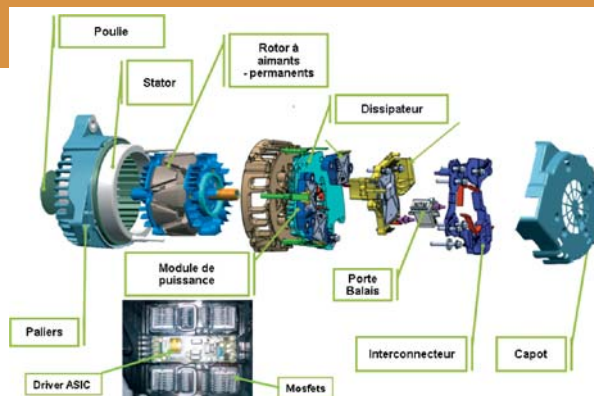
Un alerno-démarrreur réversible intégré de deuxième génération

Valeo avait développé la première génération de système « Stop and Start », en association avec Citroën lors du démarrage du projet. Ce système d'alternateur entraîné par courroie permettait d'arrêter le moteur thermique pendant les phases d'arrêt et de le redémarrer rapidement et silencieusement. Il n'en résulte aucune consommation, et donc, ni émission de polluants, ni bruit et ni vibrations durant les phases d'arrêt. Cette technologie permet aussi des économies d'énergie grâce au rendement amélioré de la machine en mode générateur.

Fort de cette première expérience réussie, le but de ce projet était de développer une technologie d'électronique de puissance intégrée originale (Insulated moulded Lead Frame ou IML), pour permettre la mise sur le marché de la deuxième génération du système « Stop and Start » pouvant répondre simultanément à une demande de fort volume et de bas coût.

De fortes contraintes sur le cahier des charges industriel

Réaliser un tel alerno-démarrreur présentait un certain nombre de défis scientifiques et techniques. Il s'agissait tout d'abord de développer un module de puissance « bras de pont » acceptant des courants continus de 200A allant temporairement jusqu'à 680A piloté par un circuit intégré (type ASIC) intégrant le redressement synchrone. Il s'agissait aussi de développer un module de contrôle en technologie hybride intégrant un circuit intégré comprenant un cœur de microprocesseur et un circuit d'excitation. Cette technologie devait en outre, pouvoir fonctionner dans un environnement très sévère (fortes températures, niveaux vibratoires élevés et fortes contraintes électro-magnétiques), s'intégrer dans le volume d'un alternateur classique et avoir un niveau de fiabilité équivalent aux alternateurs actuels.



Le projet « I-STARS: integrated Starter Alternator Reversible System » était un projet de recherche industrielle coordonné par Valeo Systèmes Electriques. Il associait également le Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN - INRETS). Il a commencé en mars 2007 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement ANR de 1,7 M€ pour un coût global de l'ordre de 5,7 M€. A noter que ce projet faisait partie d'une collaboration associant des sociétés Belge et Allemande dans le cadre du projet euréka i-StARS E !3734.

IMPACTS

Résultats majeurs

Le résultat majeur du projet est la mise en production série du système « Stop and Start » intégré « i-StARS » en 2010 avec deux constructeurs, pour un volume estimé de production sur trois ans supérieur à un million de véhicules.

Du point de vue scientifique, le cœur du projet a consisté à mettre en œuvre la technologie IML (Insulated Molded Leadframe) d'intégration d'électronique de puissance. Cette technologie basée sur le brasage laser permet la gestion de gradients de température très importants sur des très courtes distances (de l'ordre de quelques mm), permettant ainsi d'effectuer un brasage haute température sans pour autant faire fondre le support plastique. Il en reste une forte diminution des coûts de production de part la possibilité d'utiliser des matériaux à moindres coûts.

Production scientifique et brevets

Ce projet a donné lieu au dépôt d'une quinzaine de brevets, principalement dans le cadre de la mise au point de la technologie IML.

Programme « Stockage innovant de l'énergie », édition 2008

Projet VITFER

Véhicules ferroviaires et stockage d'énergie mécanique par volant d'inertie

Recherche d'optimisation des performances et intégration des aspects sécurité dans le développement d'un volant d'inertie adapté au ferroviaire.

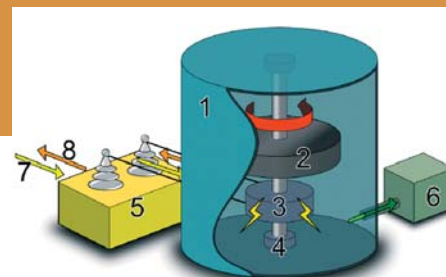
L'état de l'art des systèmes de stockage d'énergie à bord des véhicules ferroviaires montre que plusieurs technologies sont possibles : batteries, super-capacités, volants d'inertie... Ces technologies présentant des caractéristiques assez différentes qui doivent être analysées en fonction du cahier des charges (énergie, puissance, durée de vie, cyclages thermique et mécanique). Avec des caractéristiques de puissance, de durée de vie et de coût de possession bien adaptés aux applications ferroviaires, le volant d'inertie représente une technologie prometteuse et susceptible de déboucher sur le plan industriel. Néanmoins, le volant d'inertie à grande vitesse est encore loin d'un organe industrialisable et des efforts de R&D sont nécessaires particulièrement au niveau système et intégration afin de garantir ses performances et sa fiabilité.

Après une mise à plat de la technologie associée à un état de l'art très poussé, le projet vise à développer et tester en endurance un démonstrateur de volant d'inertie.

Le volant d'inertie, une technologie complexe et pluridisciplinaire

Même si le principe de stockage d'énergie inertiel est connu depuis très longtemps, son application dans un système embarqué reste un défi. En effet, cette technologie est complexe et fait appel à plusieurs disciplines pour sa conception et sa mise en œuvre. On peut décomposer le système volant en plusieurs fonctions majeures : le rotor assurant l'inertie, la machine électrique assurant la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, l'enveloppe étanche et sous vide refermant le rotor et la machine, l'onduleur assurant la régulation de l'énergie électrique et le pilotage de la machine et finalement des paliers assurant le guidage du rotor.

Par ailleurs, des fonctions support sont nécessaires pour garantir le bon fonctionnement du système : une pompe à vide, un système de refroidissement et un système de capteurs. La recherche est clairement pluridisciplinaire : mécanique (dimensionnement, dynamique des rotors), électrotechnique (machines électriques haute vitesse), thermique (avec présence du vide), électronique de puissance, électronique de contrôle, matériaux (choix, caractérisations et vieillissement thermique et mécanique).



Principes et architecture simplifiée d'un système volant d'inertie : une enceinte sous vide (1), rotor d'inertie (2), une machine électrique (3), paliers de guidage (4), un convertisseur électronique (5), pompe à vide (6), flux d'énergie : charge volant (7), décharge volant (8)

Le projet «VITFER: stockage d'énergie par un système de Volant d'Inertie optimisé pour des applications de Transport FERroviaire» est un projet de recherche industrielle coordonné par Alstom Transport. Il associe les départements DMA et ENISYS de l'institut FEMTO-ST et SADAC une PME spécialisée dans les composites de structures. Le projet a commencé en décembre 2008 et dure 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 1,76 M€ pour un coût global de l'ordre de 3,6 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Les premiers résultats de projet ont permis de choisir l'architecture du démonstrateur volant d'inertie à développer avec prise en compte de l'aspect modulaire du système.

Du point de vue des matériaux à utiliser, dans un premier temps, le rotor sera en acier. Parallèlement, les travaux continuent sur les matériaux composites notamment en termes de caractérisations en vieillissement thermique et mécanique. En effet, pour ces matériaux, les règles de dimensionnement n'existent pas et il est nécessaire d'aboutir à des règles pour entamer le développement.

Production scientifique et brevets

Un brevet sur l'architecture du volant est en cours de dépôt. Un article scientifique a été soumis à VPPC « Vehicle Power and Propulsion Conference » 2010. Ce papier traite de l'optimisation des dimensionnements de la machine électrique et de l'onduleur de puissance.

5 L'INTÉGRATION DES ÉNERGIES RÉPARTIES DANS LES BÂTIMENTS ET LES QUARTIERS

Au niveau des bâtiments et des quartiers, il s'agit de disposer de produits qui vont permettre d'être intégrés pour capter, transformer, utiliser, voire stocker, les énergies disponibles dans l'environnement immédiat.

Les équipements pour exploiter les énergies renouvelables au niveau des bâtiments

Cela passe par la mise en place d'équipements pour capter et transformer les ressources énergétiques locales. Deux projets se sont plus particulièrement focalisés sur les modes de transformation finale de ces énergies pour satisfaire le confort des habitants. Ainsi, le projet AMMPERe visait à développer un appareil multi-fonctions à très faible émissions de CO₂, adapté aux besoins de chauffage, de rafraîchissement, de ventilation et de production d'eau chaude d'un bâtiment à très basse consommation énergétique, intégrant l'utilisation des énergies renouvelables (pompes à chaleur, capteurs solaires). Le projet CETI s'intéressait à la cogénération avec pour ambition de mettre au point une chaudière avec deux moteurs Stirling, permettant une modulation de la puissance électrique de sortie de 0 à 100% et un fonctionnement autonome, à un coût de fabrication et de maintenance sans commune mesure avec les systèmes actuellement sur le marché.

Coupler plusieurs équipements énergétiques pour maximiser les performances du système global était aussi l'ambition du projet PACAir+PV, en partant du simple constat que le rendement des modules photovoltaïques chute lorsque la température en face arrière augmente, alors que l'on pourrait utiliser

cette chaleur pour améliorer le coefficient de performance d'une pompe à chaleur à air.

Le projet ROLL-PV se proposait de développer des panneaux solaires photovoltaïques adaptés aux toitures métalliques des bâtiments tertiaires industriels, le challenge étant de développer un procédé de dépôt de cellules silicium cristallin en bande sur des substrats en acier nervuré ainsi qu'une connectique de jonction plate intégrée en surface des panneaux pour faciliter leur pose. Une réflexion sur le recyclage de ses produits était également engagée dans le cadre de ce projet.

Enfin, intégrer des panneaux solaires photovoltaïques dans un bâtiment ne doit pas se faire au détriment de la sécurité, notamment des personnes (pompiers...) intervenants lors d'un incendie. Un coupe-circuit intelligent doit être mis en place pour déconnecter les panneaux photovoltaïques de l'installation électrique en cas d'incident; l'objectif du projet HERMES était précisément de mettre au point un tel interrupteur automatique fonctionnant dès qu'une défaillance est détectée sur le réseau.

Vers une conception optimisée d'enveloppes multifonctionnelles des bâtiments

L'autre problématique à laquelle doit faire face le particulier qui veut installer des panneaux photovoltaïques est celle du dimensionnement de son installation pour en vérifier aisément la rentabilité. Le projet ARCHELIOS a permis de développer un outil simple de dimensionnement d'une installation photovoltaïque destiné aux installateurs, permettant de réaliser l'étude complète d'une installation photovoltaïque, de l'évaluation du gisement solaire au calcul de rentabilité économique.

Au-delà de cet outil dédié au dimensionnement de l'installation photovoltaïque, il est nécessaire de disposer d'outils de simulation et

d'aide à la conception globale des bâtiments de demain, à très faible consommation ou à énergie positive, qui permettent de traiter tous les aspects énergétiques. C'est un chantier auquel s'attaque le projet DYNASIMUL, qui constitue une des contributions de la R&D à une initiative nationale de création d'une plateforme de simulation partagée à destination des professionnels (SIMBIO). DYNASIMUL s'est notamment attaqué à la question de l'interopérabilité d'environnements logiciels qui avaient été développés indépendamment pour traiter tel ou tel problème énergétique. L'autre objectif du projet était de développer des méthodes de réduction de modèles permettant de concilier les exigences de complexification et de précision relatives aux modèles physiques avec la parcimonie requise pour une adoption par le milieu professionnel.

Ces codes de calcul doivent évidemment être testés par des expérimentations; c'était l'objet du projet MaisonPassive, qui a permis de concevoir puis de construire deux maisons à très faible consommation dont les performances ont été mesurées grâce à un réseau dense de capteurs.

Enfin, le concept de bâtiment à énergie positive invite à se reposer des questions fondamentales sur le rôle de l'enveloppe du bâtiment, qui ne doit pas servir que d'isolation. Elle doit devenir un capteur de l'ensemble des énergies présentes dans l'environnement immédiat du bâtiment. Le projet VALERIE vise à explorer des concepts très innovants d'enveloppes qui vont permettre d'optimiser le captage et l'usage de ces énergies.

Lisser la demande énergétique par du stockage local

Les dispositifs de stockage de grande capacité, destinés à lisser la production intermittente des énergies renouvelables, ont déjà

été décrits dans une précédente partie. Ici, on s'intéresse à des modes de stockage de plus petite échelle, intégrés dans le bâtiment ou mutualisés au niveau de l'îlot urbain, dont les dimensionnements (en taille mais aussi en termes économique ou de maintenance) sont dictés par les usages finaux des énergies qu'ils stockent.

Les projets PROSSIS et ESSI s'intéressent au stockage inter-saisonnier de la chaleur dans l'habitat. PROSSIS vise à développer un système innovant de stockage de chaleur solaire inter-saisonnier utilisant un procédé basé sur les phénomènes d'absorption par une solution en sel concentrée, alors qu'ESSI étudie et compare plusieurs méthodes de stockage de la chaleur, avec l'ambition de mettre au point un réacteur solide/gaz de haute densité énergétique pour le stockage électrochimique de la chaleur.

Le stockage de chaleur peut aussi s'envisager à une échelle plus grande que celle du bâtiment, celle du quartier, ce qui permet de mutualiser les investissements nécessaires et d'utiliser les réseaux de chaleur. Le projet ATESTOC imagine pour alimenter un éco-quartier un stockage d'énergie thermique en aquifère, en injectant de l'énergie solaire dans un aquifère pendant l'été pour l'extraire en hiver et inversement, en y stockant du froid hivernal pour l'utiliser pour le confort d'été. De manière similaire, GEOSTOCAL s'intéresse aux capacités de stockage thermique inter-saisonnier de puits géothermique pour alimenter un réseaux de chaleur urbain, avec comme champs d'expérimentation l'aquifère du Dogger d'Ivry sur Seine.

Enfin, le stockage direct de l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques est traité par le projet LiPV, qui vise la production d'un panneau intégrant une batterie au Lithium-ion dimensionnée pour ce type d'application.

L'intégration des énergies réparties dans les bâtiments et les quartiers

Acronyme et nom du projet

Le projet résumé en un titre

Les équipements pour exploiter les énergies renouvelables au niveau des bâtiments

AMMPERE	Appareil Multifonctions dédié aux Maisons Passives et utilisant les Energies Renouvelables	Un appareil multifonctions adapté aux maisons à basse consommation
CETI	Chaudière Electro Thermique Intégrée	Une chaudière innovante génère de l'électricité pour l'habitat ou le réseau
PACAir+PV	Système de Pompe à Chaleur à Air et PhotoVoltaïque intégré au bâtiment	Optimiser un système de pompe à chaleur et d'installation photovoltaïque
ROLLPV	Procédé continu d'encapsulation à pression atmosphérique pour wafers Silicium, composants multi-fonctionnels d'enveloppes associés et recyclabilité	Couvrir les toitures industrielles de solaire photovoltaïque
HERMES	Harmonisation et intégration de dispositifs Electroniques pour la Réalisation d'un Module photovoltaïque Evolué dans un Système solaire optimisé	Modules photovoltaïques intelligents pour l'amélioration de la sécurité

Vers une conception optimisée d'enveloppes multifonctionnelles des bâtiments

ARCHELIOS	Logiciel libre photovoltaïque	Le photovoltaïque rendu accessible aux professionnels en toute liberté
DYNASIMUL	Développement d'une plate-forme commune de simulation	Développement d'une plate-forme commune de simulation thermique du bâtiment
MaisonPassive	Conception et validation expérimentale de maisons passives	Maisons passives : Réduire la consommation en alliant simplicité et confort
VALERIE	Valorisation par l'enveloppe du bâtiment des ressources énergétiques immédiatement exploitables	Une enveloppe de bâtiment reconçue pour mieux exploiter les ressources énergétiques locales

Lisser la demande énergétique par du stockage local

PROSSIS	PROcédé pour le Stockage Solaire Inter Saison	Stocker l'énergie solaire estivale pour se chauffer l'hiver
ESSI	Evaluation comparée des Systèmes de Stockage Intersaisonnier	Quelle technologie pour le stockage longue durée d'énergie thermique ?
ATESTOC	Stockage d'énergie thermique en aquifère pour la réalisation d'éco-quartier : Etude d'un site à proximité de Valenciennes	L'indépendance énergétique d'un éco-quartier par l'agriculture et la géothermie
GHOSTOCAL	GEO-STOckage de ChALEur	Stockage inter-saisonnier en aquifère profond pour alimenter les réseaux de chaleur
LiPV	Batterie Lithium-Ion et photovoltaïque	Module photovoltaïque multifonctionnel autonome à fort potentiel d'intégration

Programme « Efficacité énergétique dans les bâtiments », édition 2007

Projet AMMPERE

Un appareil multifonctions adapté aux maisons basse consommation

Optimisation du confort et des performances maisons basse consommation

Alors que le marché des « maisons passives » a amorcé son développement depuis plusieurs années en Allemagne, en Autriche et en Suisse, et qu'une croissance soutenue est observée, celui-ci démarre en France, mais avec une vigueur importante qui va s'accroître dans les années à venir suite aux nouvelles directives en matière de performances énergétiques de l'habitat issues des réflexions du Grenelle de l'environnement.

Le projet AMMPERE vise à développer un appareil multi-fonctions permettant d'assurer les besoins de chauffage, de rafraîchissement, de ventilation et de production d'eau chaude sanitaire de ce type d'habitation. Une attention particulière est accordée :

- ◆ à l'adaptation aux caractéristiques du marché français, notamment au travers des réglementations, du contexte énergétique, et des structurations tarifaires des offres énergétiques (abonnement, coût de l'énergie),
- ◆ à l'intégration des énergies renouvelables et à l'utilisation de produits ou composants respectueux de l'environnement,
- ◆ à l'optimisation du fonctionnement du point de vue de la consommation énergétique, mais aussi des émissions de CO₂, tout en maintenant un niveau de confort élevé pour les occupants.

Développer un système permettant de satisfaire les besoins énergétiques des maisons basse consommation

Pour atteindre cette finalité, ce projet se décompose en plusieurs étapes. En premier lieu, il s'agit de maîtriser les conditions de conception de cet appareil multifonctions grâce à une analyse des différents postes de consommations énergétiques suivant des scénarii types.

En second lieu, les meilleures briques technologiques (sous-ensembles technologiques assurant une partie des fonctions) qui doivent être mises en œuvre pour assurer de façon optimale le confort des occupants tout en ayant une consommation énergétique la plus faible possible sont identifiées.

En troisième lieu, la réalisation d'un prototype doit permettre de valider les choix technologiques réalisés et les performances du produit en terme énergétique, de confort et de satisfaction des fonctions essentielles par la réalisation d'essais en dynamique de l'ensemble du système sur un banc d'essai semi-virtuel.

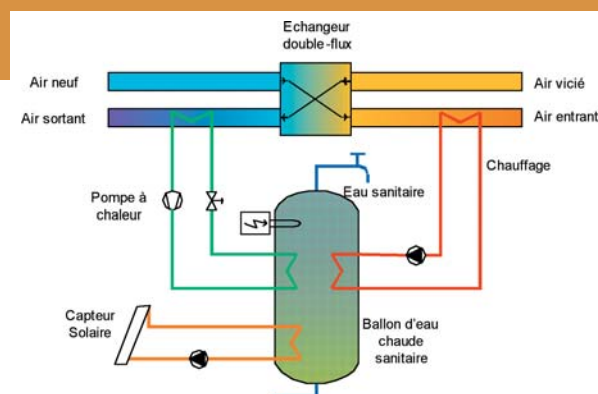


Schéma de principe d'un appareil multifonctions

Le projet de recherche industrielle « AMMPERE: Appareil Multifonctions dédié aux Maisons Passives et utilisant les Energies Renouvelables » est coordonné par le CEA à l'INES. Il associe également le CETIAT et le Groupe Atlantic. Le projet a commencé en février 2008 et pour une durée de 36 mois : il bénéficie d'un financement ANR de 393 k€ pour un coût global de l'ordre de 786 k€.

IMPACT

Résultats majeurs

Les premières études ont permis de mieux cerner la répartition des besoins de chauffage, de rafraîchissement, de ventilation et d'eau chaude sanitaire selon la typologie de maison et le climat local. Une analyse de sensibilité pour différents climats, typologies et inerties de maison a permis de connaître leurs influences sur les besoins et les puissances nécessaires au chauffage et au rafraîchissement des bâtiments. Sur ces bases techniques et en intégrant les données issues d'une étude réglementaire et normative, deux architectures d'appareil multifonctions ont été définies. Ces systèmes sont en cours de modélisation afin d'être étudiés plus précisément à l'aide d'un logiciel de simulation dynamique.

Production scientifique et brevets

Un brevet est en cours de dépôt.

Programme « Blanc », édition 2008

Projet CETI

Une chaudière innovante génère de l'électricité pour l'habitat ou le réseau

Génération conjointe d'électricité et de chaleur dans une structure innovante

Une étude de marché a montré qu'il existe un marché très important dans le domaine des chaudières électrogènes. Le projet vise à intégrer dans les dimensions d'une chaudière à condensation actuelle, au sol ou murale, un système de deux moteurs Stirling à pistons libres couplés par une génératrice linéaire asynchrone à mover massif. Cette structure brevetée est inédite. Elle nécessite des études spécifiques tant sur les matériaux, la conception, la réalisation mais aussi sur le contrôle commande de la machine électrique et du système complet.

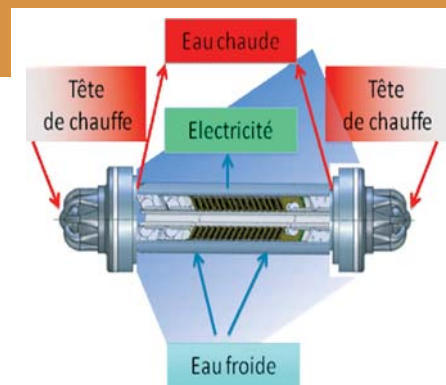
On peut espérer obtenir des performances globales avec des coûts de fabrication et de maintenance sans commune mesure avec les systèmes actuellement sur le marché. Le système CETI permettra, entre autre, une modulation de la puissance électrique de sortie de 0 à 100% et un fonctionnement autonome que les autres systèmes ne peuvent pas intégrer.

Etude de l'intégration d'une génératrice asynchrone linéaire mue par deux moteurs Stirling montés en opposition

Un des principaux enjeux scientifiques est d'étudier et de caractériser les phénomènes de couplage multi physique au sein d'un système de cogénération intégré. La chaudière est un simple tube chauffé à ses deux extrémités, générant de l'électricité en son milieu. Ce tube comprend deux moteurs Stirling en opposition avec le piston libre commun dont la jupe est le « mover » du générateur asynchrone linéaire (tube de 1m de long et un diamètre de 200mm pour $P_e=1kW$ et $P_{th}=10kW$).

Le dimensionnement global est complexe car multi-physique (thermique, mécanique, électrotechnique); de plus, l'aspect contrôle-commande est décisif dans ce projet. En effet, les moteurs Stirling à piston libre sont instables et leur montage en opposition (machines duales) implique un pilotage de l'ensemble via la machine électrique qui devra stabiliser les moteurs en lissant les inévitables dissymétries thermiques ou mécaniques.

Afin d'optimiser globalement le co-générateur, ont été défini des modèles analytiques thermiques et électriques spécifiques qui peuvent être couplés. Enfin, ont été réalisés différentes maquettes électriques et thermiques ainsi que des bancs d'essais spécifiques (régénérateurs et échangeurs en mode gaz pulsés ou alternés par exemple).



Le cogénérateur est chauffé à ses extrémités par du gaz, la chaleur est récupérée sous forme d'eau chaude et la machine asynchrone linéaire (vue « éclatée ») fournit l'énergie électrique.

Le projet « CETI: Chaudière Electro Thermique Intégrée », coordonné par le SATIE (laboratoire associé CNRS, ENS Cachan, CNAM et Université de Cergy Pontoise) associe le laboratoire FEMTO de Belfort et un industriel GDF-SUEZ. Le projet a démarré en janvier 2009 pour une durée de 3 ans. Il bénéficie d'un financement ANR de 500 k€ pour un budget total de l'ordre 1,5 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Un résultat notable est le développement de modèles analytiques couplés tenant compte des spécificités de la machine linéaire asynchrone et des moteurs Stirling à piston libre montés en fonctionnement « dual ». La réalisation de maquettes thermiques et électrique a validé ces modèles.

Un autre point marquant concerne les premiers résultats significatifs obtenus sur le banc de test de régénérateurs et échangeurs en mode « gaz alternés ou pulsés ». Ce domaine est encore très peu exploré car difficile à instrumenter en terme de pression et de température instantanées.

Production scientifique et brevets

Un article a été publié dans le numéro spécial cogénération de la revue 3EI, « micro cogénération, système à structure innovante: moteur thermique Stirling double effet et Machine asynchrone linéaire ».

L'avancement du projet a été présenté à la 4ème journée cogénération au CNAM (<http://energie.cnrs.ensma.fr/new/spip/spip.php?article122>) et une vidéo est téléchargeable sur http://imedia.emn.fr/podcast/ColloqueEnergie/ColloqueEnergie_7.m4v

Programme « Habitat Intelligent et Solaire photovoltaïque », édition 2008

Projet PACAir+PV

Optimiser un système de pompe à chaleur et d'installation photovoltaïque

Pourquoi coupler pompe à chaleur et photovoltaïque ?

Le nombre de bâtiments équipés à la fois de Pompe à Chaleur à air et de capteurs photovoltaïques est en augmentation. Mais la conception actuelle de tels systèmes n'est en général pas optimale car les interactions possibles entre les deux composants ne sont pas envisagées. Le rendement des modules PV étant au mieux de l'ordre de 20 %, environ 80 % de l'énergie incidente est potentiellement disponible sous forme de chaleur qui peut être valorisée grâce à la PAC. De plus, on sait que le rendement de certains modules augmente quand leur température diminue (et inversement, leur performance se dégrade en cas de surchauffe en face arrière des modules), ce qui pourrait être obtenu grâce à la PAC.

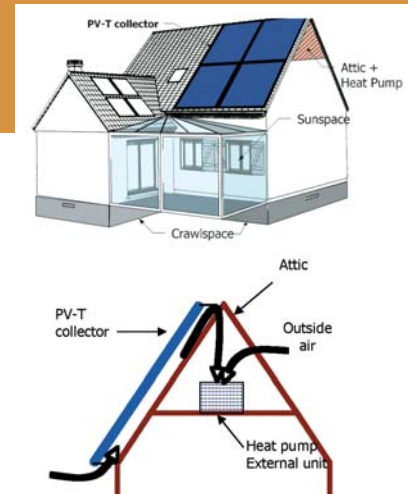
Le projet vise donc à améliorer le fonctionnement à la fois des capteurs photovoltaïques et des pompes à chaleur à air en les couplant du point de vue thermique.

Des modèles aux tests en conditions réelles

Il a pour objectif d'étudier, à la fois par la modélisation et par l'expérimentation, une innovation technologique consistant à :

- ◆ utiliser la chaleur produite par les modules PV pour augmenter la température de la source froide, et donc le COP de la PAC, et si possible éviter le problème de givrage,
- ◆ utiliser l'air refroidi en sortie de l'évaporateur pour améliorer le rendement des modules PV,
- ◆ réguler les circulations d'air en fonction des conditions extérieures et des besoins du bâtiment,
- ◆ optimiser le choix des modules PV et du type de PAC pour réduire les impacts environnementaux globaux du système.

Une analyse préliminaire permettra de sélectionner une ou plusieurs configurations possibles. Un prototype sera ensuite conçu et réalisé, et des travaux de modélisation seront également menés, afin d'implémenter et d'intégrer le modèle dans un outil de simulation de bâtiment. Le prototype sera ensuite testé sur une plate-forme de mesure, puis installé dans une maison neuve performante. L'analyse des résultats de mesure ainsi que des simulations sur des cas d'étude permettront d'apporter des réponses sur le potentiel d'application de ce concept.



Le projet « PACAir + PV » est un projet de recherche industrielle coordonné par le CEP (Ecole des Mines de Paris). Il associe également le CEA-INES, un industriel spécialiste des pompes à chaleur (CIAT) et un bureau d'étude spécialiste de l'intégration du photovoltaïque (CYTHELIA).

IMPACTS

Résultats majeurs

Un prototype de pompe à chaleur sera développé puis appliqué à un cas d'étude concret. D'autre part, un modèle sera développé puis validé pour étendre le champ d'étude à d'autres configurations envisageables, ce modèle étant développé dans un prototype logiciel.

Production scientifique et brevets

Du point de vue théorique, une thèse est en cours sur la modélisation et la simulation de l'ensemble photovoltaïque + PAC à air intégré au bâtiment.

Une première communication a déjà été publiée (Filliard B., Guivarch A., Jabbar M. : " Simulation of the thermal interaction between a building integrated photovoltaic collector and an air source heat pump " ; CISBAT, Lausanne, 2009)

Les développements envisagés pourront éventuellement faire l'objet de brevets dans le cadre de l'accord de collaboration signé par le consortium.

Programme « Solaire Photovoltaïque », édition 2006

Projet ROLL-PV

Couvrir les toitures industrielles de solaire photovoltaïque

Un marché porteur pour le développement du photovoltaïque, les toitures métalliques

Les couvertures et façades métalliques des bâtiments commerciaux et industriels présentent un marché extrêmement vaste, de l'ordre de 100 millions de m²/an dans le périmètre de l'Union européenne. Ce marché offre des perspectives très intéressantes pour le déploiement du photovoltaïque, dans la mesure où des produits adaptés lui seront proposés.

L'enjeu du projet à finalité technologique ROLL-PV était précisément de positionner un produit compétitif d'enveloppe multifonctionnel de type « acier photovoltaïque », dont le coût de revient global devait être inférieur à 2,90 €/Wc sur la base du cours moyen d'achat des cellules en silicium cristallin sur le marché mondial. Il s'agissait notamment de mettre au point un process innovant de production de panneaux photovoltaïque composites pour enveloppes de bâtiments avec une électronique associée permettant de baisser drastiquement les coûts. Ces panneaux intègrent des wafers de silicium cristallin collés soûplement sur un support autoporteur. Le support choisi est en acier, matériau particulièrement répandu en tant que composant d'enveloppe dans le secteur tertiaire, industriel et agricole, dans les bâtiments publics, les centres commerciaux, et les plateformes logistiques.

Développer un produit adapté à ce marché

Le projet visait à développer une méthode de dépôt de cellules silicium cristallin en bande, avec une vitesse d'un mètre par minute, sur des substrats en acier nervuré utilisés comme matériaux d'enveloppe dans les bâtiments. Il s'agissait également de mettre au point, à l'échelle prototype, une connectique de jonction plate intégrée en surface des panneaux métalliques photovoltaïques, cette disposition permettant d'éviter le percement de ces derniers. Enfin, il s'agissait d'anticiper la fin de vie et la déconstruction des toitures tout en favorisant l'éco-conception et la recyclabilité des matériaux. Il fallait donc définir à l'échelle du laboratoire un procédé de recyclage des panneaux composites photovoltaïques obtenus après intégration des cellules en silicium sur le métal. Pour cela, les partenaires du projet ont travaillé sur des solutions alternatives de matériaux composites pour la fixation et l'encapsulation permettant une bonne recyclabilité, notamment la récupération du silicium et du verre blanc.

Le projet « ROLL-PV: Procédé continu d'encapsulation à pression atmosphérique pour wafers Silicium, composants multi-fonctionnels d'enveloppes associés et recyclabilité » était un projet de recherche industrielle coordonné par la PME Sunland 21. Il associait aussi trois autres PME, le CETIM (Centre technique des industries mécaniques), la SERAM (Société d'Etudes et de Recherches de l'ENSAM) et le Liten (CEA). Il s'est déroulé de décembre 2006 à avril 2009. Il a bénéficié d'un financement ANR de 428 k€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Une ligne pilote de capacité initiale 3,0 MWp a été développée chez Sunland 21. Elle a abouti à la validation d'un process d'assemblage à chaud et/ou à froid des panneaux métalliques PV, et ce, à une vitesse trois fois supérieure à la vitesse initialement estimée.

La question du recyclage des panneaux photovoltaïques commençant à se poser, le projet a également permis de définir un process mécanique, physique et chimique de démantèlement des panneaux composites en fin de vie, permettant de garantir un taux de valorisation des matériaux supérieur à 80 %.

Production scientifique et brevets

Fin 2009, deux demandes de brevets avaient été co-déposées par des partenaires du projet.

Il a permis de développer une offre architecturale flexible, facilement intégrable à de nombreux bâtiments professionnels.

Enfin, le savoir faire process développé dans le cadre de ROLL-PV est transposable aux couches minces photovoltaïques.

Programme « Solaire Photovoltaïque », édition 2006

Projet HERMES

Modules photovoltaïques intelligents pour l'amélioration de la sécurité

Améliorer la sécurité des personnes et des biens

L'accroissement du nombre d'installations photovoltaïques pose de nombreux problèmes d'usage non résolus comme, par exemple, la mise hors tension des modules pour des raisons de sécurité d'intervention dans les systèmes connectés au réseau, le vol de plus en plus fréquent des modules, particulièrement en sites isolés, ou encore la mesure en temps réel de l'activité de chacun des modules, afin d'identifier d'éventuelles défaillances ou pertes de production du générateur.

Afin de répondre à cette problématique, le projet HERMES avait pour objectif d'intégrer à moindre coût un interrupteur électronique et une acquisition de mesures dans chacun des modules photovoltaïques avec une intelligence déportée et centralisée. Lorsqu'ils sont connectés dans le système auquel ils sont affectés, les modules reçoivent régulièrement un ordre de fermeture de l'interrupteur leur permettant d'être opérationnels. En cas de rupture de cette communication, l'interrupteur intégré au module photovoltaïque s'ouvre automatiquement, rendant le module inopérant. L'intégration d'un dispositif électronique d'acquisition de mesures dans chaque module permet le suivi des performances et la maintenance prédictive de l'ensemble du système.

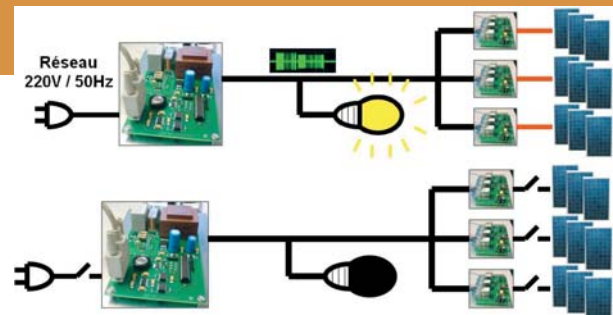
Il s'agissait donc de développer :

- ◆ un interrupteur électronique et une acquisition de mesures dans chaque module,
- ◆ un gestionnaire centralisé intelligent (stockage de mesures et traitement de l'information),
- ◆ un système de communication associée.

Une communication bidirectionnelle par courant porteur en ligne

Afin de permettre non seulement le contrôle des Interrupteurs Automatiques de Sécurité embarqués dans les modules depuis le Contrôleur Automatique de Sécurité situé à proximité de l'onduleur, mais aussi le rapatriement des données mesurées au niveau du Contrôleur, des cartes électroniques permettant la communication par courant porteur en ligne sur un câblage en courant continu (ce mode de communication est généralement utilisé en courant alternatif), de même qu'un protocole de communication par courant porteur en ligne ont été développés.

Cette technologie de communication a été testée en situation réelle, ce qui a permis de valider son fonctionnement, puis le fonctionnement de la solution HERMES avec une ou plusieurs chaînes de modules ; la fonction de sécurité étant assurée, de même que la fonction de mesure et de transmission des données mesurées des modules vers le Contrôleur.



Les différents états de la solution HERMES

Le projet « HERMES : Harmonisation et intégration de dispositifs Electroniques pour la Réalisation d'un Module photovoltaïque Evolué dans un Système solaire optimisé » est un projet de recherche industrielle coordonné par le bureau d'études Trans-énergie. Il associe aussi le laboratoire AMPERE (CNRS, Ecole Centrale de Lyon, INSA de Lyon, Université de Lyon 1), le Liten (CEA), TENESOL Technologie et LANDIS + GYR. Le projet s'est déroulé de décembre 2006 à février 2009 et a bénéficié d'un financement ANR de 494 k€.

IMPACTS

Résultats majeurs

La fonction antivol a dû être abandonnée compte tenu de l'absence de composant, à l'heure actuelle, satisfaisant aux conditions de fonctionnement du système, notamment pour les caractéristiques électriques et la fiabilité. Par contre, le projet s'est focalisé sur la fonction « sécurité » jugée plus prioritaire que la fonction « antivol ».

Dans cette optique, la solution HERMES qui a été développée intègre une fonction de sécurité active, mesure et enregistre des valeurs de tensions et des courants de chaque chaîne photovoltaïque fonctionnant sur la base des grandeurs électriques précédentes. De telles fonctions nécessitent une communication bidirectionnelle entre le Contrôleur Automatique de sécurité (CAS) et chaque Interrupteur Automatique de Sécurité (IAS).

Production scientifique et brevets

Le projet a donné lieu à plusieurs communications dans des colloques.

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2006

Projet ARCHELIOS

Le photovoltaïque rendu accessible aux professionnels en toute liberté

Rendre la prévision du productible photovoltaïque accessible

Développé depuis 2001 sous EXCEL, le logiciel ARCHELIOS permet d'évaluer un projet photovoltaïque, du gisement solaire au calcul économique, en passant par le calepinage des modules. Entièrement accessible par l'utilisateur, il était « ouvert » et évolutif en fonction des besoins de l'utilisateur, avec pour contre partie tous les inconvénients d'être dépendant d'un tableur propriétaire (interface VISUAL BASIC peu ergonomique, problèmes de compatibilité, temps de calcul).

Le projet consistait à réécrire ARCHELIOS en langage compatible avec LINUX, MAC OS et Windows, lui adjoindre une interface conviviale qui permette de le rendre facilement utilisable par des formateurs, et enfin de l'enrichir d'une base de données conséquentes à l'usage des installateurs, des bureaux d'étude et des architectes.

Un accès libre au logiciel et une interface conviviale

Il s'agissait de concevoir un logiciel robuste mais simple d'utilisation afin que le plus grand nombre d'acteurs du solaire photovoltaïque, et en premier lieu les installateurs, s'équipe d'un outil qui les aide à professionnaliser leurs méthodes de travail, sans les complexifier outre-mesure.

C'est donc une logique d'accessibilité qui a guidé ce travail, cette dernière se traduisant également dans la fixation de tarifs attractifs, et dans la forme même du logiciel puisqu'il a été développé sous une licence de logiciel libre, qui permet à tout membre compétent de la communauté du solaire de l'enrichir au bénéfice de tous les utilisateurs.

Le logiciel permet de réaliser, dans un temps très court, l'étude complète d'une installation photovoltaïque (qu'elle soit connectée au réseau ou en système autonome sur batteries) de l'évaluation du gisement solaire au calcul de rentabilité économique.

Le projet de recherche « ARCHELIOS : logiciel libre photovoltaïque » était coordonné par le bureau d'étude Cythelia. Il associait également le LOCIE (CNRS, Université de Savoie). Il avait débuté en décembre 2006 pour une durée de 18 mois. Il a bénéficié d'un financement ANR de 60 k€ pour un budget global de l'ordre de 115 k€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Parmi les principales innovations apportées par le logiciel, figurent le calcul automatique des masques lointains, une saisie des masques proches, une saisie des champs photovoltaïques simplifiée, un module permettant le calepinage d'une toiture photovoltaïque ou encore, l'édition d'un rapport au format PDF.

Depuis octobre 2008, ARCHELIOS est disponible en téléchargement libre et gratuit avec une base de données limitée sur le site www.archelios.fr. Fin mars 2009, plus de 7 000 téléchargements ont été enregistrés. Les utilisateurs sont souvent des installateurs, qui trouvent dans ARCHELIOS une simplicité d'utilisation plus grande que dans les logiciels de dimensionnement concurrents (PVsyst, PVSOL...).

Une base de données météo et de matériel très complète, mise à jour tous les ans (plus de 400 stations météo, 600 modules, 170 onduleurs, 30 régulateurs et 60 batteries) est commercialisée par Cythelia.

Production scientifique et brevets

Le projet a fait l'objet de communications sous forme de posters et de présentations. La marque ARCHELIOS est déposée à l'INPI, ainsi qu'un copyright concernant les droits d'auteur sur www.copyrightdepot.com

Programme « Efficacité énergétique dans les bâtiments », édition 2006

Projet DYNASIMUL

Développement d'une plate-forme commune de simulation thermique du bâtiment

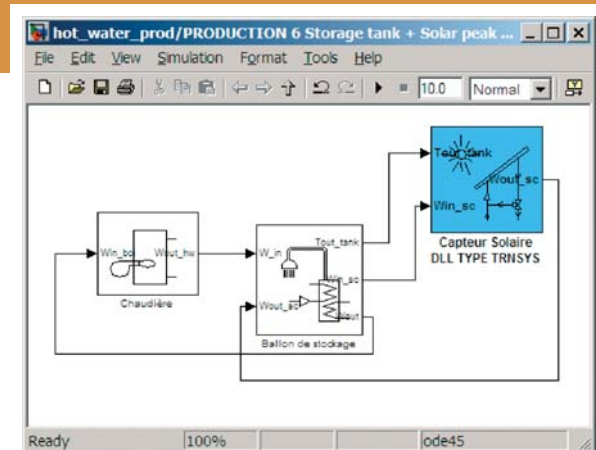
Développer des plates-forme de simulations opérationnelles

Avec l'arrivée des bâtiments basse consommation, une optimisation de l'ensemble « bâtiment systèmes » devient de moins en moins faisable, en raison de la complexité de l'ensemble, en travaillant de façon isolée sur un phénomène. Pour optimiser le problème, une prise en compte globale des phénomènes est nécessaire. Aujourd'hui, il ne s'agit donc plus d'utiliser un seul outil logiciel mais des environnements de simulation qui collaborent entre eux, permettant ainsi d'améliorer la qualité de la simulation en prenant en compte un plus grand nombre de phénomènes physiques de façon couplée. Cette partie du projet avait pour but de travailler sur le couplage entre les différents environnements de simulation existants.

Développer une nouvelle approche de modélisation

Enfin, l'autre objectif du projet était de développer des méthodes permettant de concilier les exigences de complexification et de précision relatives aux modèles physiques avec la parcimonie requise par les nouvelles applications de la modélisation, jusqu'à aujourd'hui centrée sur la conception. Les thèmes abordés concernent :

- ◆ la réduction des problèmes de diffusion, en particulier la conduction au travers du sol pour la simulation d'échangeur air-sol mais également des problèmes non linéaires au sein des matériaux à changement de phase,
- ◆ la réduction de problèmes de convection en explorant les applications de la POD à l'équation de conservation de l'énergie dans l'air, les méthodes de réduction "a priori" des équations non linéaires ou encore le problème de multiplicité des solutions des problèmes aérauliques,
- ◆ le développement d'un modeleur-mailleur 3D.



Ce projet coordonné par le LOCIE, FRE CNRS 3220 dans le cadre d'INES-RDI associe des laboratoires de recherche français impliqué dans la simulation thermique des bâtiments (CEP Mines Paristech, CETHIL, DGCB ENTPE, INES-RDI CEA, LEPTIAB, LPBS, TREFLE), le CSTB ainsi qu'un bureau d'étude (CYTHELIA). Le projet a commencé en avril 2007 pour une durée de 3 ans. Il bénéficie d'un financement ANR de 860 k€ pour un budget total de 1,85 M€.

IMPACT

Résultats majeurs

Sur les aspects interopérabilité des outils de calcul, la principale avancée est le couplage des logiciels MATLAB SIMULINK et TRNSYS. On peut donc maintenant utiliser des modèles écrits dans MATLAB SIMULINK au sein de TRNSYS mais aussi utiliser des modèles implémentés dans TRNSYS au sein de MATLAB SIMULINK. La base de donnée accueillant les bibliothèques de modèles et de matériaux est opérationnelle et en cours de test auprès des partenaires du projet qui la renseignent.

Enfin, les résultats majeurs sur la réduction de modèles concernent des avancées sur les méthodes de résolution des problèmes de conduction avec changement de phase, sur l'utilisation de la méthode POD à l'équation de conservation de l'énergie dans l'air ainsi que sur le développement d'un modeleur-mailleur 3D.

Production scientifique et brevets

Un article est paru dans la revue scientifique Applied Energy sur la réduction du modèle de conduction dans le sol et plusieurs articles feront l'objet de présentations à la conférence internationale Building Simulation de Glasgow.

Programme « Efficacité énergétique dans les bâtiments », édition 2006

Projet MAISON PASSIVE

Maisons passives : Réduire la consommation en alliant simplicité et confort



Une « maison passive »
après réalisation

Concevoir et construire des bâtiments expérimentaux à haute efficacité énergétique

L'objectif de ce projet réside dans la conception, la réalisation et l'évaluation d'un type de construction innovant à forte efficacité énergétique dit passif. Il s'agit de concevoir par des outils de simulation d'une part, et par des connaissances dans le domaine de l'innovation technologique d'autre part, un nouveau concept d'habitation dont la très faible consommation énergétique serait compensé en grande partie par l'énergie solaire tant thermique que photovoltaïque, les objectifs quantitatifs nécessitant d'être chiffrés dans le cadre de ce projet.

Un des intérêts majeurs de ce travail se situe dans les possibilités de validation a posteriori des objectifs envisagés par la réalisation *in situ* et la mesure des performances réelles de maisons expérimentales. De façon à donner suffisamment d'ouverture au projet, deux types de construction étaient envisagés, l'un en bois avec isolation en ouate de cellulose intégrée, l'autre en blocs de béton associés à un matériau d'isolation dont les caractéristiques et la mise en œuvre permettent d'atteindre les objectifs envisagés.

Les principales retombées scientifiques de ce projet étaient la création d'une base de données expérimentales et la confrontation des modèles de simulation avec des résultats de mesure.

Des bâtiments démonstrateurs dans un environnement contrôlé

Ces bâtiments démonstrateurs sont à l'échelle 1 sur 2 niveaux de 50m² environ. Leur géométrie est simple, de base rectangulaire afin de faciliter la validation des codes de calcul. L'enveloppe a été optimisée afin de diminuer les déperditions thermiques (épaisseur d'isolant, réduction maximale des ponts thermiques, forte étanchéité à l'air...), maximiser les apports solaires en hiver (dimensions et types des vitrages sud/est/ouest/nord) et améliorer le confort d'été (protections solaires, isolation extérieure couplée à une forte inertie interne et surventilation nocturne...). Pour un meilleur contrôle sur le fonctionnement des bâtiments, le profil d'utilisation est simulé : présence humaine, éclairage, cuisson, usage d'eau chaude, fonctionnement des volets...). Enfin, plus de 200 capteurs soigneusement placés permettent un suivi expérimental précis.

Le projet de recherche « MaisonPassive: conception et validation expérimentale de maisons passives »

est coordonné par le LMOPS (CNRS). Il associe comme autres partenaires l'INES (CEA), le CEP (Ecoles des Mines de Paris), le CETE de Lyon (Centre d'Etude Technique de l'Equipeement), le CETIAT (Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques), le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment Grenoble), Saint-Gobain, Philippe Bouche Architecte, Maisons Giraud. Le projet, labellisé Tennerdis, a débuté en avril 2007 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 496 k€ pour un coût global de l'ordre de 1,03 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Les résultats du projet sont de plusieurs types. Tout d'abord, le projet a permis de décrire avec précision ce qu'on appelle réellement « maison passive » en indiquant les niveaux d'efficacité énergétique requis, les critères permettant de garantir cette performance tout en précisant les conditions de confort nécessaires pour éviter les températures très froides, les surchauffes d'été ou une qualité d'air inacceptable.

Le second point concernait les résultats de simulation permettant de présenter un bilan déperditif de chaque élément de la maison. En effet, pour être opérationnel, un outil de simulation doit être capable de présenter de façon synthétique la répartition des déperditions pour l'ensemble du bâtiment de façon à identifier chaque domaine lié à des consommations énergétiques, ce qui permettra par comparaison à des valeurs de référence d'optimiser la conception du bâtiment.

Un autre apport important est la construction même des maisons expérimentales, qui peut être l'objet de nombreuses imperfections et un des points clés de cette optimisation se situe dans la maîtrise des technologies mises en œuvre par les différents intervenants sur le chantier. Un suivi permanent doit être réalisé de façon à éviter dans la mesure du possible des déperditions liées à des imperfections dans la réalisation.

Production scientifique

Ce projet a donné lieu à deux publications dans des revues internationales à comité de lecture (The international Scientific journal for alternative Energy and Ecology, Solar Energy, septembre 2008), ainsi qu'à des communications dans des colloques scientifiques (COBEE 2008, SFT 2008, IBPSA- France 2008...).

Programme « Habitat intelligent et Solaire photovoltaïque », édition 2008

Projet VALERIE

Une enveloppe de bâtiment reconçue pour mieux exploiter les ressources énergétiques locales

Un constat : des apports extérieurs nettement supérieurs aux besoins des bâtiments

En gérant les relations entre l'espace intérieur et l'environnement extérieur, l'enveloppe et le système de ventilation d'un bâtiment jouent un rôle essentiel en matière d'efficacité énergétique. La bonne règle actuelle consiste essentiellement à isoler. Il faut comprendre par là, isoler l'intérieur du bâtiment de son environnement. Pourtant cet environnement, le sol, l'air, le soleil, le ciel et, pourquoi pas, le vent, offrent aux bâtiments des sources d'énergie, même quand il fait froid, et des puits de chaleur, même en période chaude. La pratique classique consistant à isoler le bâtiment n'est donc peut-être pas la seule approche pertinente pour répondre aux besoins d'éco-efficacité énergétique. On peut en effet considérer l'environnement comme un potentiel énergétique que l'enveloppe et le système de ventilation doivent, non pas repousser ou isoler, mais utiliser.

Dans cet esprit, le projet VALERIE propose de mettre en évidence et d'estimer l'importance de ce potentiel avant d'établir les méthodes et les modèles qui permettront de définir des familles de nouveaux concepts d'enveloppes capables de l'exploiter au mieux.

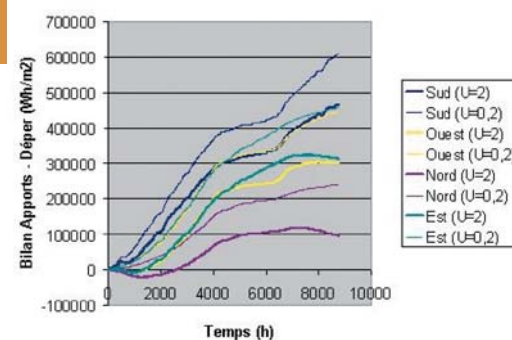
Vers une nouvelle conception de l'enveloppe du bâtiment

A cette fin, il propose une démarche en trois étapes principales qui permettront de définir et d'évaluer le potentiel énergétique disponible, d'estimer la valorisation de ce potentiel par des bâtiments types actuels et par des solutions connues, puis de dresser le cahier des charges et d'évaluer des concepts innovants définis par leurs propriétés physiques.

Cet ensemble est complété par une quatrième et dernière étape qui vise à identifier et décrire les freins potentiels susceptibles d'entraver la diffusion des solutions nouvelles sur le terrain, et à proposer des solutions permettant de limiter leurs effets.

Le projet s'appuie sur des outils de simulation énergétique des bâtiments, développés ou exploités par les partenaires,

En éclairant, par une vision nette et chiffrée du potentiel énergétique, les voies possibles de développement de composants d'enveloppe actifs, ce projet peut contribuer à mieux discerner dans cet ensemble les voies d'innovation les plus prometteuses.



Bilan annuel entre les apports solaires reçus par une paroi verticale et sa déperdition durant les périodes où la température extérieure est inférieure à la température de confort (prise à 19°C).

Le projet de recherche fondamentale « VALERIE : Valorisation par l'enveloppe du bâtiment des ressources énergétiques immédiatement exploitables » est coordonné par EDF R&D. Il associe trois laboratoires de recherche, le CEP (Ecole des Mines de Paris), le CETHIL (CNRS, INSA Lyon, Université de Lyon 1) et le LOCIE (CNRS, Université de Savoie), ainsi que le bureau d'études OASIS. Il a commencé en décembre 2008, pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 707 k€ pour un coût global de l'ordre de 1,5 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Les premiers résultats de ce projet concernent la quantification fine du potentiel énergétique disponible et exploitable pour les besoins du bâtiment, directement ou indirectement après une phase de stockage. L'accent a été mis sur la description des sources et puits énergétique, sur leurs principales caractéristiques et les moyens physiques qui pourraient permettre de les transférer. Des indicateurs de confort ont également été pris en compte. Il a ainsi pu montrer que ce potentiel est très largement supérieur aux besoins thermiques d'un bâtiment conçu aujourd'hui.

Reste maintenant à examiner et évaluer des concepts innovants d'enveloppes qui vont permettre d'exploiter ce potentiel, tout en garantissant les autres fonctions de l'enveloppe.

Programme « Stockage innovant de l'énergie », édition 2007

Projet PROSSIS

Stocker l'énergie solaire estivale pour se chauffer l'hiver

Les enjeux d'un stockage inter-saisonnier

L'utilisation de capteurs solaires thermiques aboutit à une production de chaleur fortement intermittente et décalée dans le temps par rapport aux besoins de chauffage, concentré en métropole sur la période hivernal. Si l'on pouvait stocker sur une longue période la chaleur captée par des panneaux solaires en été, on pourrait ainsi économiser de l'énergie.

Malheureusement, aujourd'hui, les dispositifs de stockage de chaleur dans les bâtiments utilisent soit la chaleur sensible (chauffage d'une masse d'eau par exemple) soit la chaleur latente (matériaux à changement de phase par exemple) et sont inadaptés à des stockages de longue durée en raison de pertes importantes. Le stockage sous forme de potentiel chimique se révèle être adapté au stockage de l'énergie sur le long terme en raison de ses faibles pertes thermiques. Toutefois, il n'existe pas à l'heure actuelle de système dédié à ce type de stockage.

L'objectif de ce projet est de développer un système innovant de stockage de chaleur solaire intersaison par un procédé original basé sur les phénomènes d'absorption, pour des applications de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire dans l'habitat individuel.

Un procédé innovant de stockage de l'énergie solaire inter-saisonnier

Le principe est de faire fonctionner une pompe à chaleur à absorption en deux demi-cycles en ajoutant des réservoirs de stockage.

Pendant l'été ou en inter-saison lors de journées bien ensoleillées, l'énergie solaire est absorbée par un capteur solaire et délivrée à une solution diluée. Celle-ci libère l'eau sous forme de vapeur et devient de plus en plus concentrée en sel. Afin d'améliorer la densité énergétique du stockage, la concentration de la solution au delà de la courbe de cristallisation est envisagée. Le potentiel chimique de cette solution (contenant ou non du solide) peut être conservé aussi longtemps que nécessaire à la température du sol. En hiver, les réservoirs sont connectés et la vapeur d'eau est absorbée par la solution concentrée en sel. L'énergie thermique produite par cette sorption est récupérée pour le chauffage du bâtiment. La solution diluée est stockée dans un autre réservoir pour être réutilisée en été.

Ce projet pluridisciplinaire met en jeu plusieurs thématiques scientifiques : thermodynamique, génie des procédés, transferts de chaleur et de matière, mécanique des fluides, cristallisation et chimie.



Principe du procédé de stockage par absorption

Le projet « PROSSIS : PROCÉDÉ pour le Stockage Solaire Inter Saison » est un projet de recherche industrielle coordonné par le LOCIE (CNRS, Université de Savoie) ; il associe également le laboratoire LEGI (Université de Grenoble), le Liten (CEA), le LAGEP (CNRS, Université de Lyon 1) et un industriel, la CIAT. Il a commencé en décembre 2007, pour une durée de 48 mois ; il bénéficie d'un financement ANR de 445 k€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Le sel retenu après évaluation multicritères est le bromure de lithium. Le volume de solution de LiBr nécessaire au stockage de 1800 kWh (besoin de chauffage d'une maison passive de 120 m²) a été évalué pour diverses conditions de fonctionnement.

Le fait d'admettre la cristallisation durant le stockage permet de réduire considérablement le volume de stockage de même que les quantités de sel requises. Cela pose toutefois quelques difficultés technologiques.

Le projet envisage de stocker la solution riche avec du cristal. Un travail supplémentaire a été mené sur les phénomènes physiques de l'absorption qui permet d'acquérir des connaissances nécessaires pour optimiser la conception de composants et du système.

Production scientifique et brevets

Ce projet a donné lieu à une publication dans une revue internationale à comité de lecture et à cinq communications.

Programme « Stockage innovant de l'énergie », édition 2008

Projet ESSI

Quelle technologie pour le stockage longue durée d'énergie thermique ?

Stockage thermochimique de l'énergie thermique

Le projet ESSI s'inscrit dans la problématique générale du stockage intersaisonnier ou de longue durée de l'énergie thermique. D'origine industrielle (chaleur fatale) ou solaire, plusieurs niveaux de température peuvent être identifiés suivant les applications visées :

- ◆ les procédés basse température ($< 120\text{ °C}$), de faibles puissances (1 à 50 kW), destinés essentiellement à l'habitat ou au tertiaire,
- ◆ les procédés moyennes températures ($120\text{ °C} < T < 450\text{ °C}$), ou hautes températures ($T > 450\text{ °C}$), destinés à réduire la consommation de chaleur d'origine fossile dans l'industrie.

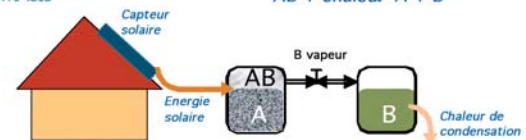
Bien que le système étudié dans ce projet (stockage thermochimique) puisse couvrir l'ensemble de ces applications, l'étude sera limitée au développement d'un prototype de stockage de longue durée dédié au chauffage de l'habitat. Ce choix se justifie par l'enjeu considérable et à court terme que représente la diminution de la consommation énergétique dans ce domaine. D'autre part, ce domaine de température offre plusieurs solutions technologiques concurrentes (chaleur sensible, chaleur latente, absorption) en cours de validation et d'expertise, que nous nous proposons de comparer dans la dernière phase de ce projet.

Développement d'un réacteur thermochimique de haute densité énergétique

Outre le développement expérimental d'un prototype, le projet ESSI comprend un volet de recherche fondamentale portant d'une part, sur les transferts de masse et de chaleur au sein d'un milieu poreux fortement densifié et d'autre part, sur deux configurations de procédé thermochimique : soit un procédé classique constitué d'un réacteur solide/gaz et d'un évapo-condenseur, soit un procédé ouvert, ne comprenant qu'un réacteur solide/gaz réagissant directement avec humidité de l'air. Dans les deux cas, l'optimisation du réacteur passe par sa modélisation 2D, couplant transfert de masse, de chaleur et cinétique chimique au sein du matériau réactif. Cette étape implique également la mesure des paramètres de transfert sur un banc de caractérisation, pour des densités de matériau qui n'ont jamais été testées auparavant.

La dernière phase du projet concerne l'évaluation des performances et la comparaison des différentes technologies possibles. L'objectif est ici d'établir le domaine de pertinence pour chaque système, tant en performance énergétique, qu'en complexité et coûts estimés.

stockage
Durant l'été



déstockage
Durant l'hiver



Principe du procédé thermochimique : l'été, l'énergie solaire permet la décomposition d'un AB en un composé A et de la vapeur B. La vapeur B est condensée dans un condenseur enterré. En hiver, la réaction inverse permet la restitution de la chaleur de réaction utilisable par un plancher chauffant.

Le projet « ESSI: Evaluation comparée des Systèmes de Stockage Intersaisonnier » est un projet de recherche coordonnée par PROMES (UPR 8521 CNRS) ; il associe trois laboratoires publics, l'INES-CEA, le LOCIE (CNRS, Université de Savoie) et le LaTEP (CNRS, Université de Pau) et une entreprise spécialisée dans la géothermie (Dominguez Energie). Le projet a commencé en décembre 2008 pour une durée de 48 mois, il bénéficie d'un financement ANR de 742 k€ pour un coût global de l'ordre de 1,7 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Les travaux d'évaluation des performances cibles sont aujourd'hui terminés. La modélisation du bâtiment, des profils d'occupation et des besoins d'eau chaude sanitaire a été effectuée et a permis de définir le système de stockage en terme de puissance et d'énergie stockée.

La méthodologie pour l'optimisation d'un réacteur solide/gaz de haute densité énergétique a débuté : pré-dimensionnement des réseaux de diffuseurs de chaleur et de matière par approche constructale, puis modélisation 2D. Enfin, le banc de caractérisation est en cours de montage.

Production scientifique et brevets

Ce projet a déjà donné lieu à une publication dans une revue internationale à comité de lecture et à une communication dans une Journée de la SFT (Société Française de Thermique).

Programme « Stockage innovant de l'énergie », édition 2008

Projet ATESTOC

L'indépendance énergétique d'un éco-quartier par l'agriculture et la géothermie

Fourniture de chaleur et de froid renouvelables à un éco-quartier

Dans une optique de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de l'habitat, le projet s'intéresse à une production locale et au fil des saisons d'une énergie thermique renouvelable. Le stockage d'énergie thermique en aquifère (SETA) consiste à injecter de l'énergie solaire dans un aquifère pendant l'été pour l'extraire en hiver lorsque les besoins de chaleur le demandent. Inversement, le froid hivernal est stocké et sera utilisé pour le confort d'été. Le stockage sur 6 mois est rendu possible grâce à l'inertie thermique de la Terre et aux échangeurs à haut rendement, couplés à des pompes à chaleur, utilisés en entrée et en sortie de nappe aquifère. L'eau chaude est produite à l'intérieur de serres agricoles en exploitation, grâce à l'énergie solaire et à l'effet de serre. Les jardins familiaux et associatifs accompagnent le tissu urbain et jouent leur rôle de source de vie en circuit court. Enfin, les résidus des récoltes et la fraction fermentescible des ordures ménagères alimenteront un méthaniseur qui pourra combler en partie les besoins électriques et satisfaire partiellement les besoins en eau chaude sanitaire des logements.

Une approche globale de l'environnement, de l'urbanisme et de l'énergie

Ce projet pluridisciplinaire aborde le thème de la production et de la consommation d'énergie d'un éco-quartier selon plusieurs approches, centrées autour du concept de stockage d'énergie thermique en aquifère. Des études géologiques, dont 3 forages de 30 à 100 mètres, sont menées afin de caractériser la capacité de l'aquifère. Une simulation numérique permettra de prévoir le comportement de celui-ci pendant quelques décennies à venir. La serre, considérée comme capteur solaire, produit de l'eau chaude en excédent par rapport à ses besoins. Cette production est évaluée grâce à un modèle thermique dynamique de serre agricole fermée; ce modèle inclut notamment la consommation énergétique des plantes, l'utilisation d'échangeurs à fils fins, la consommation d'eau chaude et froide et d'électricité. Des tests de mise en œuvre des échangeurs à fils fins et de stockage d'énergie en bassin sont menés dans des serres expérimentales et permettront de valider les modèles numériques.

Par ailleurs, une étude d'implantation urbanistique et architecturale ayant pour objectif l'obtention du label BBC (Bâtiment Basse Consommation) est menée en parallèle d'une étude d'impact environnemental.



Exemple d'implantation

Le projet «ATESTOC: Stockage d'énergie thermique en aquifère pour la réalisation d'éco-quartier: Etude d'un site à proximité de Valenciennes» est un projet de recherche industrielle et de développement de concept urbanistique coordonné par le bureau d'études pour les énergies renouvelables ESETA. Il associe en outre le cabinet d'architecture Collet, l'INERIS, le BRGM, l'EIVP, le CTIFL et le CEP (Ecoles des Mines de Paris). Le projet a commencé en décembre 2008 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 750 k€ pour un budget global estimé à 1,2 M€.

IMPACTS

Résultats majeurs

Une première estimation énergétique révèle que la serre de 2 hectares permettra de satisfaire les besoins en chaleur des 400 logements prévus sur le site du projet. La construction de ce site a vocation à démontrer la robustesse technique et économique du concept de « cité serre ».

Une serre fermée expérimentale adossée à un stockage en bassin, a déjà mis en évidence une diminution de la consommation énergétique de 20 % et de l'émission de GES de 40 %, tout en augmentant la production agricole de 34 %.

Enfin un cadre légal a été proposé afin de combler le vide juridique autour de l'exploitation d'un SETA.

Production scientifique et brevets

Un objectif majeur du projet est de donner un cadre de développement au concept de « cité-serre » et au SETA. Il s'agira de créer un outil d'aide à la décision autant pour les promoteurs et développeurs que pour les pouvoirs publics.

En prolongement, le développement d'un logiciel de pilotage du système serre – stockage – consommateurs pourra être envisagé. En dehors de la conception des échangeurs, les résultats du projet seront intégralement publiés et ne feront pas l'objet de brevets.

Programme « Stockage innovant de l'énergie », édition 2007

Projet GEOSTOCAL

Stockage inter-saisonnier en aquifère profond pour alimenter les réseaux de chaleur.

Quelles conditions locales pour engager un projet de stockage géologique de chaleur ?

Le décalage entre les besoins de chauffage en hiver et la production de chaleur inutilisée en période estivale fait naturellement émerger la question des possibilités d'un stockage inter-saisonnier d'énergie thermique. L'objectif du projet GEOSTOCAL était d'étudier la faisabilité scientifique, technique et économique d'un tel stockage en aquifère.

Pour qu'un tel procédé puisse se développer, il faut localement et simultanément disposer :

- 1) d'une source de chaleur excédentaire en période estivale,
- 2) de niveaux géologiques permettant du stockage (réservoir aquifère),
- 3) d'un potentiel de valorisation du déstockage en période hivernale.

Les défis scientifiques et techniques auxquels s'attaquait le projet consistait à définir des méthodes et des procédés pour assurer une pérennité accrue des opérations géothermiques, pour maîtriser les phénomènes hydro-géo-chimiques qui pourraient avoir un impact négatif sur la performance à long terme, pour concevoir la réversibilité des sens de circulation dans les puits géothermiques (pour assurer les fonctions de stockage et de déstockage), pour proposer des puissances thermiques supérieures à la géothermie classique et pour garantir à long terme la compatibilité vis-à-vis du développement urbain.

Un site pilote en île de France

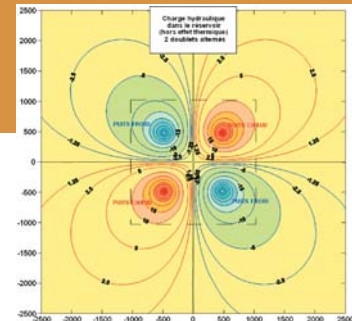
Le projet a permis de montrer que les trois conditions sont parfaitement remplies sur un site situé à Ivry-sur-Seine. Les trois usines d'incinération des ordures ménagères parisiennes produisent de la chaleur en excès en période estivale : une puissance (jusqu'à 100 MW) pourrait être accessible à Ivry via le réseau de vapeur de la CPCU.

L'aquifère du Dogger est un réservoir géologique potentiellement favorable pour du stockage. Un ancien doublet géothermique sur le site d'Ivry donne accès à une première connaissance locale du réservoir qui est complétée par les retours sur expérience des nombreuses exploitations de la ressource géothermique du Dogger en Ile de France.

Les besoins énergétiques du réseau de chaleur local existant devraient pouvoir facilement bénéficier de l'énergie déstockée. De plus, un projet de renouvellement urbain programmé à Ivry prévoit à moyen terme l'extension des réseaux de chaleur avec des caractéristiques directement compatibles avec la température de déstockage.

Exemple de représentation des charges hydrauliques (en mètres d'eau) dans le réservoir Dogger pour une distance entre puits de 960 m, un débit moyen de 250m³/h,

en période estivale (mode stockage) - Cas de la configuration optimisée pour minimiser les interférences hydrauliques avec le voisinage.



Le projet « GEOSTOCAL : GEO-STOCKAGE de ChALEUR » est un projet de recherche industrielle, coordonné par le BRGM. Il associe également l'IFP, le CEP (Ecoles des Mines de Paris), l'EIVP, l'Université de Marne-la-Vallée, CPCU, CFG-Services. Le projet a commencé le 1^{er} décembre 2007 pour une durée de 36 mois. Il bénéficie d'un financement ANR de 800 k€ sur un budget global de 1,68 M€.

Résultats majeurs

Un scénario a été consolidé pour le site d'Ivry : la chaleur sera stockée vers 1 600 m de profondeur, dans l'aquifère du Dogger. La solution technique de base est le doublet constitué de deux puits géothermiques identiques et réversibles. L'eau de l'aquifère circulera alternativement dans un sens puis dans l'autre pour être réchauffée vers 95°C l'été afin de constituer un stock d'énergie, et céder son énergie pour alimenter un réseau de chaleur urbain l'hiver.

Le débit nominal d'eau sera de 250 à 300 m³/h. L'efficacité énergétique sera supérieure à 75 % une fois passées les premières années de mise en température des formations géologiques. L'ajout ultérieur d'autres forages permettra de faire face à l'accroissement de la demande tout en optimisant la configuration.

Comme tous les milieux géologiques, la structure du réservoir du Dogger ne présente pas un seul niveau producteur continu, mais une alternance de niveaux producteurs et de niveaux imperméables. Cette structure, très variable en fonction des localisations, n'est connue qu'en un nombre réduit de points traversés par des forages.

Le projet a analysé numériquement, sur le très long terme, l'effet de ce feuilletage sur la performance thermique des cycles successifs stockage/déstockage en comparant les comportements thermiques d'un réservoir de structure simple (monocouche) et d'un réservoir feuilleté de même performance hydraulique. On constate qu'un régime d'équilibre est atteint (autour de la dixième année) et que, indépendamment de la structure monocouche ou multicouche, la température de l'eau tout au long de la période de déstockage, reste très supérieure à celle nécessaire pour alimenter un réseau de chaleur (70°C). Tout ceci indique que les prédictions de comportement thermique du réservoir sont robustes vis-à-vis de la connaissance forcément limitée du réservoir.

Programme « Solaire photovoltaïque », édition 2006

Projet LiPV

Module photovoltaïque multifonctionnel autonome à fort potentiel d'intégration

Modularité et facilité de manutention et d'installation

Les systèmes photovoltaïques ont l'avantage de pouvoir s'intégrer en milieu rural comme en milieu urbain. Ce critère architectural a été mis en avant au niveau français pour l'intégration au bâti, ce qui a permis le développement de systèmes photovoltaïques esthétiques, compacts, tout en étant conformes aux normes de solidité et d'étanchéité des bâtiments.

Aujourd'hui, avec l'apport du stockage, ce critère d'intégration est remis en question car au sein des systèmes photovoltaïques intégrant une fonction de stockage, les composants tels que la batterie, le régulateur, l'onduleur sont distants. De plus, cet éloignement conduit inévitablement à des pertes en ligne et donc à des rendements énergétiques plus faibles qu'attendus.

L'objectif du projet Module LiPV était de développer un produit photovoltaïque autonome, avec un potentiel d'intégration maximal (poids inférieur à 30kg, surface n'excédant pas la surface du panneau lui-même, profondeur inférieure à 65 mm), modulaire (associable entre eux pour fournir une puissance électrique plus importante et stocker un plus grand nombre de Watt-heure), à production pilotable afin de mettre en adéquation les besoins du consommateur ou du gestionnaire de réseau et la production énergétique.

Une intégration mécanique, thermique et énergétique optimisée du système de stockage lithium-ion et des fonctions électroniques de gestion et de conversion énergétique.

La conception d'un tel module photovoltaïque « multifonctionnel » est complexe car les fonctions production, stockage et conversion, bien que présentant des comportements et des sensibilités thermiques très différents, doivent pouvoir cohabiter dans un espace réduit, sans que cela n'impacte de façon drastique la productivité, la fiabilité et la longévité du système complet. La technologie lithium-ion a été choisie comme technologie de stockage, en raison de ses énergies massique et volumique qui autorisent le dimensionnement d'éléments plats, prismatiques et positionnables sur la face arrière du panneau. Deux couples électrochimiques, à base de phosphate de fer/graphite et d'oxydes mixtes (cobalt, nickel, aluminium) / graphite ont été évalués en terme de longévité et de sécurité de fonctionnement.

Les fonctions électroniques, comprenant un convertisseur DC/DC et fonction MPPT (Maximum Power Point Tracker), un régulateur et un BMS (Battery Management System) ont été conçus pour répondre aux critères de fiabilité et de longévité et dimensionnés pour maximiser le rendement énergétique global du module.

Pré-prototype :
maquette réalisée
en Avril 2009.

Puissance PV : 75 W ;
Energie batterie : 480 Wh ;
Poids total : 30 kg ;
Dimensions hors-tout :
profondeur 62 mm,
longueur 1237 mm,
largeur 556 mm



Le projet de recherche industrielle « LiPV : Batterie Lithium-ion et photovoltaïque » était coordonné par le CEA – INES. Il associait également le LCE (CEA), le LAAS (CNRS) et un industriel, la SAFT. Le projet a commencé en janvier 2007 pour une durée de 36 mois. Il a bénéficié d'un financement ANR de 1 M€ pour un budget global de l'ordre de 1,9 M€.

IMPACT

Résultats majeurs

Un produit photovoltaïque innovant, autonome, de faibles poids et profondeur, lui conférant une facilité de manutention et d'installation, a été développé. Chaque module peut fonctionner indépendamment ou être associé entre eux, offrant ainsi une modularité sur la puissance installée évolutive en fonction des besoins de l'utilisateur et adaptative à la place disponible.

Les tests de vieillissement accéléré réalisés sur des éléments Li-ion du prototype montrent que l'exigence décennale sera atteinte, conformément au cahier des charges du module. Leur comportement en fonctionnement abusif a été évalué et des fonctions de sécurité ont été implémentées. La productivité devrait être maximisée grâce aux choix d'intégration décidés pour l'électronique de conversion et de gestion du module. La phase finale de démonstration permettra de tester le module multifonctionnel en ensoleillement réel (mesures thermiques, performance énergétique) et de confirmer nos choix de conception. Le marché visé est, dans l'état actuel de développement du module multifonctionnel, le marché off-grid industriel (mobilier urbain).

Production scientifique et brevets

Plusieurs articles ont été publiés, qui couvrent, d'une part, la conception de l'architecture électrique du module multifonctionnel et, d'autre part, l'aspect sécurité des éléments lithium-ion vis-à-vis de leur stabilité thermique.

Notes:

Notes:

Création : Sally Lewis
Réalisation - Impression : Navis

Dépôt légal à parution
ISSN en cours

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

212 rue de Bercy - 75012 Paris
Tél. : +33 (0)1 78 09 80 00
www.agence-nationale-recherche.fr



« Au service de la science et de la technologie, l'ANR apporte sa pierre à l'édifice des connaissances et des innovations afin de répondre aux besoins de notre société.

Les cahiers de l'ANR devraient permettre au plus grand nombre d'appréhender les actions de recherche soutenues par l'ANR sur des sujets essentiels pour notre futur. »

Jacqueline Lecourtier,
Directeur général de l'ANR

L'énergie partagée: une vision nouvelle de l'habitat, de la voiture et du territoire

La réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la consommation des énergies fossiles et la fin dans les prochaines décennies de l'ère pétrolière sont deux défis majeurs à relever pour assurer les équilibres futurs de nos sociétés.

La montée en puissance des énergies renouvelables ne pourra se faire que si elles deviennent économiquement compétitives par rapport aux énergies aujourd'hui dominantes. Des mécanismes incitatifs (crédit d'impôt, bonus-malus, tarifs de rachat...) ou réglementaires (taxe carbone, obligations de performance...) peuvent contribuer à cette compétitivité mais les marges de progrès se situent également dans une meilleure efficacité des technologies de captage de ces ressources énergétiques. C'est notamment le cas du photovoltaïque, auquel une part importante de ce cahier est consacrée, mais aussi d'autres technologies de captage ou de récupération d'énergie fatale qui pourraient être intéressantes pour des marchés de niches (thermo-électricité, photosynthèse artificielle, énergies marines...).

Ces énergies, qui ne sont pas toujours produites sur le lieu de leur utilisation finale, ni au moment des pics de consommation énergétiques, doivent pouvoir être transportées et éventuellement stockées sous des formes appropriées à ces usages. La recherche de solutions techniques pour mieux piloter les réseaux de distribution d'énergie et améliorer les dispositifs de stockage, afin que production et besoins soient en meilleure adéquation, est cruciale.

Le présent cahier vise à dresser un panorama, non exhaustif, des actions menées dans le cadre de l'ANR sur ces questions et à montrer comment ces recherches peuvent contribuer à relever les défis énergétiques du XXI^{ème} siècle.

www.agence-nationale-recherche.fr

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

