

## Présentation des projets financés au titre de l'édition 2010 du Programme « Stockage Innovant de l'Énergie »

<b>ACRONYME et titre du projet</b>	<b>Page</b>
<b>CAP</b> : Camion à assistance pneumatique	2
<b>CARBOLEAD 2010</b> : Nouvelles grilles de carbone pour accumulateurs légers à électrodes en plomb	4
<b>CONIFER</b> : Conception et Outils iNnovants pour un réseau électrique Intelligent appliqué au FERroviaire	6
<b>LIO2</b> : Développement d'un accumulateur lithium-air à très haute capacité massique	8
<b>MAGCOOL</b> : Nouveaux matériaux à effet magnétocalorique géant autour de la température ambiante et applications à la réfrigération magnétique	10
<b>MICMCP</b> : Utilisation de Méthodes d'Identification pour la Caractérisation de Matériaux à Changement de Phases (MCP)	13
<b>SACRE</b> : Stockage par Air Comprimé pour le Réseau Electrique	15
<b>SOLIBAT</b> : Batteries "tout solide" développées par Frittage Flash	17
<b>STAID</b> : Stockage Inter Saisonnier de l'Énergie Thermique dans les Bâtiments	19
<b>STOCK-AIR 2</b> : Stockage thermique pour le chauffage thermodynamique à air des logements	21

# Programme « Stockage Innovant de l'Énergie »

Edition 2010

## Titre du projet

CAP : Camion à assistance pneumatique

### Résumé

Le concept d'hybride pneumatique permet d'absorber l'énergie cinétique du véhicule pendant les phases de décélération, et de la stocker dans un réservoir sous forme d'air comprimé, et enfin d'utiliser ultérieurement cette énergie pendant les phases moteur. Capturer, stocker et réutiliser l'énergie de freinage permet ainsi de réduire la consommation de carburant de 4% à 18%. L'idée n'est pas nouvelle, beaucoup d'articles dans la littérature défendant l'intérêt de l'hybride pneumatique, mais aucun produit n'est encore commercialisé sur le marché malgré la maturité des composants pneumatiques qui seraient impliqués dans une telle technologie. La plupart des travaux dans la littérature proposent de combiner l'hybride pneumatique avec un moteur à distribution variable afin d'employer sa flexibilité pour contrôler les flux dans les circuits d'air. Une autre catégorie de travaux propose de redessiner le moteur pour y ajouter des soupapes dédiées au fonctionnement induit par l'hybridation pneumatique. Le projet CAP vise à concevoir et à évaluer ce système pneumatique de récupération d'énergie de freinage. L'application ciblée pendant le projet est un camion long routier (40 tonnes). Cette application est connue pour sa consommation élevée de carburant et son petit potentiel pour un hybride électrique, car l'hybride électrique a un rapport rendement / prix très défavorable dans ce cas précis. Par contre, l'hybride pneumatique, grâce à sa simplicité, son coût faible, et son recyclage facile permettrait une amélioration notable de la consommation de carburant et une réduction des émissions gazeuses. Par conséquent, ce programme de recherche industrielle est pleinement en cohérence avec le troisième axe thématique de l'appel d'offre de l'ANR STOCK-E. Du point de vue des méthodes et de la démarche scientifique de mise au point d'un tel système, l'appui d'outils numériques (prototypes virtuels) aussi bien au niveau système (dimensionnement, contrôle-commande) qu'au niveau du calcul des écoulements (pertes, ondes de pression, acoustique) est essentiel. En effet, les cycles de conception de produits industriels tels que l'automobile se sont considérablement raccourcis au point de transformer les outils et la répartition des charges : on a recours à de moins en

moins d'expériences et l'intervention des sous traitants dans la conception est de plus en plus fréquente. Lors du cycle de conception d'un véhicule roulant, la prise en compte des phénomènes associés à des écoulements de fluides a pris une importance majeure sous l'effet de contraintes d'économie énergétique (aérodynamique, motorisation), de confort (bruit, climatisation) et de sécurité (freinage). Cette vision conduit naturellement à l'approche système qui consiste à décomposer l'ensemble de la chaîne en process élémentaires (bien évidemment à des échelles différentes suivant le problème à traiter), chacun caractérisé par une ou plusieurs physiques (mécanique, électricité, fluide, thermique,...) pouvant être représentées par des modèles plus ou moins imbriqués. La fidélité de ces modèles vis à vis de la physique devient une donnée essentielle, ce qui est incompatible avec les simplifications qu'impose généralement la mécanique des fluides pour avoir des temps de calcul « raisonnables ».

**Partenaires**

1. Renault Trucks SAS
2. LMFA – Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique - ECOLE CENTRALE DE LYON
3. Laboratoire Ampère – CNRS - INSA de Lyon

**Coordinateur**

Iyad Balloul – Renault Truck SAS.  
[iyad.balloul@volvo.com](mailto:iyad.balloul@volvo.com)

**Aide de l'ANR**

613 k€

**Début e  
du ée**

Janvier 2011 - 24 mois

**Référence**

ANR-10-STKE-04

**Label pôle**

Lyon Urban Truck&Bus 2015

# Programme « Stockage Innovant de l'Énergie »

Edition 2010

## Titre du projet

CARBOLEAD 2010 : Nouvelles grilles de carbone pour accumulateurs légers à électrodes en plomb

## Résumé

L'objectif du projet sera le développement de nouveaux collecteurs de courant pour des accumulateurs au plomb avec haute densité de l'énergie – jusqu'à 80Wh/kg. Pendant la première phase du projet on va développer des substrats conducteurs en composite de carbone avec des caractéristiques mécaniques optimisées et une structure de type « nid d'abeille (honeycomb) ». Dans la deuxième phase on développera le processus de modification de la surface du composite par une couche d'alliage plomb/étain. Les résultats obtenus vont être utilisés dans la production de plaques innovantes avec la structure de type « nid d'abeille (honeycomb) ». Ce type de structure permet d'utiliser les matériaux actifs jusqu'à 70-80% quand la taille des alvéoles du collecteur de courant innovant sont entre 1 et 2mm. La tâche finale du projet sera l'utilisation des collecteurs de courant développés dans la production des prototypes industriels des accumulateurs au plomb étanches. Quatre accumulateurs prototypes vont remplacer les accumulateurs originaux d'un scooter électrique bien commercialisé en France. Les autres prototypes vont être testés aux conditions de laboratoire sous les protocoles des régimes de voiture électrique et hybride. On caractérisera les processus de vieillissement par des mesures périodiques de spectroscopie d'impédance électrochimique. Les mécanismes de vieillissement vont être estimés par l'analyse post mortem et les résultats seront utilisés dans une optimisation technologique. Les processus de corrosion feront partie d'une tâche séparée, qui va apporter les meilleures conditions du dépôt de l'alliage plomb/étain et la meilleure stratégie de la gestion de batterie pour avoir un maximum de la vie des batteries innovantes sur les régimes de EV et HEV. La gestion des batteries sera améliorée par l'intégration des électrodes de référence Ag/Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> fabriquée industriellement par une technologie « las cut / longue durée » breveté par CEA en 2007. L'intégration des électrodes de référence comme un capteur électrochimique permettra d'optimiser la charge des batteries AGM-VRLA par rapport la durée et sécurité, de

réduire la vitesse de la corrosion des plaques positive, et de mesurer l'état charge avec des approches innovantes. L'analyse économique initial a indiqué que la technologie capable de livrer des accumulateurs au plomb avancés sur le même coût par kWh comme les batteries AGM-VRLAB et tubulaires.

**Partenaires**

1. CEA – LITEN
2. Institut Jean Lamour – CNRS
3. STECO Power
4. Material Mates

**Coordinateur**

Angel Kirchev – CEA - LITEN  
[angel.kirchev@cea.fr](mailto:angel.kirchev@cea.fr)

**Aide de l'ANR**

397 k€

**Début e durée**

Janvier 2011 - 36 mois

**Référence**

ANR-10-STKE-02

**Label pôle**

TENERRDIS

# Programme « Stockage Innovant de l'Énergie »

Edition 2010

## Titre du projet

CONIFER: Conception et Outils iNnovants pour un réseau électrique Intelligent appliqué au FERroviaire

## Résumé

La croissance du trafic ferroviaire prévue dans les années à venir doit faire face à la consommation croissante d'énergie qui y est liée : les grandes évolutions socio économiques constatées laissent présager un quadruplement de la demande voyageur à l'horizon 2030. De même, pour le transport de marchandises, les orientations définies par la loi de programme du Grenelle de l'Environnement prévoit le développement des autoroutes ferroviaires avec l'équivalent de 500 000 camions en moins chaque année qui seront transportés par le rail. Ce contexte oblige donc les acteurs du transport ferroviaire et de l'énergie à rechercher et proposer des solutions techniques permettant de répondre à cette future demande de transport tout en maîtrisant à la fois la consommation et la facture énergétique. Pour cela, une rupture scientifique et technologique du système d'électrification ferroviaire est nécessaire et devient notamment possible à travers l'intégration de dispositifs innovants de stockage d'énergie, de nouveaux moyens de production renouvelables et délocalisés, ainsi qu'une optimisation énergétique de l'architecture des réseaux. C'est donc dans la thématique du développement du réseau électrique intelligent (« Smart Grid ») que des efforts de recherche, à l'instar du projet CONIFER, doivent être déployés. Une telle transformation du réseau ferroviaire nécessite le développement préalable d'outils de conception et d'analyse permettant une modélisation des futurs réseaux électriques intelligents. Aussi le projet de recherche industrielle CONIFER (Conception et Outils iNnovants pour un réseau électrique Intelligent appliqué au FERroviaire) propose d'anticiper l'évolution de la production et la distribution de l'énergie électrique dans le domaine ferroviaire en travaillant et proposant des outils qui porteront sur deux niveaux. Pour le premier niveau d'étude, il s'agit de proposer un dimensionnement pour de nouvelles Installations Fixes de Traction Électrique Ferroviaire - IFTE (installations en bordure de voie de type sous-stations, postes électriques, caténaies...). La future IFTE hybride intégrera des sources de productions délocalisées et des systèmes de stockage aux

caractéristiques complémentaires qui permettront notamment de valoriser la récupération d'énergie du freinage des trains. Ainsi, CONIFER proposera un outil de dimensionnement optimal de la future IFTE hybride en tenant compte des contraintes liées à la sous-station, à son application mais aussi des contraintes de fiabilité et de bonne complémentarité des composants envisagés. Enfin, la future IFTE hybride associée à une intelligence de gestion de l'énergie, permettra de disposer d'un nouvel élément de base pour la conception des futurs réseaux électriques ferroviaires plus efficace en énergie. Pour le second niveau d'étude, le projet CONIFER s'intéresse au dimensionnement des futurs réseaux électriques ferroviaires intelligents dans une approche globale. Pour des soucis de simplification, le réseau considéré sera un réseau réduit que peut constituer une ligne de chemin de fer. Afin de proposer une solution optimale globale, l'approche reposera sur une vision systémique du réseau considéré. Cette approche système du futur réseau d'alimentation électrique ferroviaire nécessitera alors de considérer les organes de conversion entre le réseau de transport d'électricité et le réseau d'alimentation électrique ferroviaire, les IFTE hybrides précédemment dimensionnées, la caténaire et les trains circulant sur la voie. Le caractère intelligent du réseau se traduira par une nouvelle architecture et une stratégie de gestion des sources de production et de stockages constituées par les IFTE hybrides. Avec la mise en place et l'utilisation de ces outils, le projet CONIFER englobe donc un travail de recherche appliquée, alliant travail de conception et modélisation mais aussi un travail expérimental avec des essais sur plateformes des architectures et configurations retenues.

**Partenaires**

1. SNCF
2. L2EP – Hautes Etudes d'Ingénieurs
3. L2EI – ENSAM Lille
4. L2EP - Ecole Centrale de Lille
5. SERMA Ingénierie
6. G2ELAB – Université Joseph Fourier

**Coordinateur**

Jean Chabas – SNCF  
[jean.chabas@sncf.com](mailto:jean.chabas@sncf.com)

**Aide de l'ANR**

907 k€

**Début e durée**

Janvier 2011 - 42 mois

**Référence**

ANR-10-STKE-005

**Label pôle**





### Titre du projet

LIO2: Développement d'un accumulateur lithium-air à très haute capacité massique

### Résumé

Les batteries lithium-air représentent une rupture importante dans le domaine des batteries car elles pourraient permettre au véhicule tout électrique d'atteindre des autonomies proche du véhicule thermique (> 500 km) avec une seule charge. Un premier projet de courte durée (projet ANR « LIO » de 2 ans) a permis de montrer la faisabilité du concept Lithium-air aqueux dans lequel le produit de la réaction de décharge est stocké dans l'électrolyte aqueux et non pas dans la porosité de l'électrode à air tel que dans les systèmes Li-air anhydre. L'objectif du projet LiO2 est de lever les verrous identifiés et de s'appuyer sur les innovations du projet LIO, pour que la technologie lithium-air aqueuse puisse passer un nouveau cap vers un accumulateur pour un véhicule électrique à très haute autonomie. Pour y arriver, le projet LiO2 a pour objectifs d'augmenter la densité de courant jusqu'à 50 mA/cm<sup>2</sup>, d'augmenter le nombre de cycles à plus d'une centaine dans un premier temps, et d'augmenter la capacité à 200 mAh/cm<sup>2</sup>. Enfin, la démonstration des progrès effectués sera démontrée sur un module composé de 5 cellules en utilisant de l'air ambiant avec les objectifs de performances suivants : -2 Ah, 15V, 30 Wh -200 mAh/cm<sup>2</sup>, 10 cm<sup>2</sup> -C/10 -100 cycles Le projet LIO2 va développer de nouveaux matériaux céramiques conducteurs Li<sup>+</sup> stables en contact avec Li métal. De nouvelles membranes céramiques seront également fabriquées de façon à obtenir un compartiment étanche à l'air et à l'eau avec une barrière de faible épaisseur. Cette faible épaisseur est nécessaire pour limiter la résistance de l'électrolyte et sera obtenue grâce à un support mécanique. Plusieurs techniques de fabrication seront utilisées et comparées tel que le Spark Plasma Sintering, le coulage en bande ou le Slip Casting. De nouvelles membranes polymères électrolyte anionique particulièrement stable seront synthétisées à base de réseaux interpénétrés de polymères (RIP). Ces membranes polymères ont pour objectif de protéger l'électrode à air d'une carbonatation par le CO<sub>2</sub> de l'air et d'une précipitation de LiOH à l'intérieur de l'électrode. Une électrode à air réversible innovante sera également

développée qui pourra être utilisée comme électrode de dégagement d'oxygène pendant la charge. Enfin, la croissance de lithium métal sur la céramique conductrice sera étudiée par des moyens de caractérisation in-situ de cellule en charge et en cyclage. Ces études permettront d'améliorer la « cyclabilité » du lithium sur une interface solide céramique, un phénomène très peu étudiée jusqu'à présent. De nouvelles couches d'interfaces seront développées à partir de ces enseignements.

**Partenaires**

1. EDF R&D
2. ENSCBP-Institut Polytechnique de Bordeaux
3. LPPI – Université Cergy Pontoise
4. LRCS – Université de Picardie
5. CIRIMAT – Toulouse
6. Solvay France
7. Renault
8. CTI

**Coordinateur**

Philippe Stevens – EDF R&D  
[Philippe.stevens@edf.fr](mailto:Philippe.stevens@edf.fr)

**Aide de l'ANR**

989 k€

**Début e durée**

Janvier 2011 - 36 mois

**Référence**

ANR-10-STKE-001

**Label pôle**

**Titre du projet**

**MAGCOOL: Nouveaux matériaux à effet magnétocalorique géant autour de la température ambiante et applications à la réfrigération magnétique**

**Résumé**

La production de froid consomme 15% de l'énergie électrique mondiale, est importante dans nombre de secteurs comme l'agroalimentaire, la pharmacie, l'habitat ou le transport. La plupart des machines frigorifiques actuelles est basée sur le principe bien connu et bien maîtrisé de compression/détente d'un gaz, mais cette technologie génère une émission de CO<sub>2</sub> et des fuites de fluides frigorigènes (HCFC, CFC...) contribuant à la destruction de la couche d'ozone et à l'effet de serre). Les fluides de substitution en cours de d'étude posent des problèmes de mise en oeuvre ou d'efficacité. Par une rupture technologique complète, la réfrigération magnétique permet des systèmes compacts, silencieux, propres et à haut rendement énergétique. Cette technologie s'appuie d'abord sur l'effet magnétocalorique (EMC) géant de certains matériaux magnétiques autour de la température ambiante. Cet effet permet d'augmenter ou diminuer la température du matériau lors de leur aimantation ou désaimantation adiabatique autour de la température de transition de phase magnétique. Une séquence "aimantation/échanges thermiques vers froid/désaimantation/échanges thermiques vers chaud" permet ainsi un nouveau cycle de Carnot de machine frigorifique, très différent d'une machine actuelle. La problématique de cette technologie se segmente en 4 axes abordés dans ce projet: 1/trouver des matériaux EMC géant consommant peu ou pas d'éléments rares (TR par ex), 2/ produire un de ceux-ci à petite échelle (kg) par des procédés industrialisables, 3/ mettre en forme ces matériaux (souvent des poudres) en pièces statoriques de machine pour assurer un échange thermique performant avec le caloporteur, 4/accroître l'efficacité électromagnétique des systèmes en optimisant, voire repensant l'interaction entre source de champ et EMC. Ces thématiques et technologie nouvelles (10 ans environ) sont ainsi très pluridisciplinaires, et seront appliquée in fine dans le projet à un dispositif optimisé de réfrigération magnétique. Les porteurs du projet ont tous

travaillé récemment sur un des axes de la problématiques, et certains ont déjà une activité de collaboration principalement appuyée sur les matériaux EMC Gd et FeSiLa: on citera AMSNA-ERASTEEL pour la production de poudre, AMSNA-McPhy-INSTITUT NEEL/CRETA-G2Elab-Cooltech pour leur fonctionnalisation et test sur démonstrateur. Ces collaborations existantes ont permis d'atteindre de petite production de poudre (kg de FeSiLa) au niveau de performance de Gd, encore bien en dessous du potentiel connu. Ce projet procède d'une approche principalement expérimentale (mais aussi théorique et modélisation-système) centrée sur les matériaux allant de la recherche de base et exploratoire (INSTITUT NEEL/CRETA, ICMCB, CRISMAT) à l'innovation et optimisation des machines frigorifiques (Cooltech, G2Elab, LGeCo) en passant par la recherche appliquée de développement & innovation de matériaux EMC géant sur procédé industrialisable (McPhy, ERASTEEL, AMSNA, CRETA). Notre pays a la chance de disposer ici de tous les acteurs universitaires ou industriels indispensables tant à l'acquisition de Know How (fort potentiel de caractérisation notamment) qu'à l'étude de transposition industrielle, sur l'ensemble de la chaîne allant de la physique des matériaux, leur métallurgie, leur production (atomisation), leur fonctionnalisation (homogénéisation, insertion H), le compounding et la conception / optimisation / modélisation du système de machine frigorifique. Aussi ce projet vise à fédérer et à soutenir ce consortium de compétences et de ressources pour préparer le développement industriel de cette nouvelle technologie sur notre sol, avec une place de leader et pionnier.

#### Partenaires

1. G2ELAB – Université Joseph Fourier
2. CRETA – Institut Louis Neel
3. ICMCB
4. CRISMAT
5. ERASTEEL
6. Aperam Alloys Imphy
7. McPhy Energy SA
8. LGeCo
9. Cooltech Applications

#### Coordinateur

Afef Lebouc – G2ELAB  
[afef.lebouc@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:afef.lebouc@g2elab.grenoble-inp.fr)

#### Aide de l'ANR

1142 k€

#### Début e durée

Janvier 2011 - 42 mois

#### Référence

ANR-10-STKE-008



# Programme « Stockage Innovant de l'Énergie »

Edition 2010

## Titre du projet

MICMCP : Utilisation de Méthodes d'Identification pour la Caractérisation de Matériaux à Changement de Phases (MCP)

## Résumé

Les bâtiments représentent environ 42% de l'énergie totale finale consommée en France et 23% des émissions de CO<sub>2</sub>. Le Grenelle de l'environnement a pris la mesure de ce potentiel, et a fixé des objectifs très ambitieux pour la rénovation énergétique: réduction des consommations d'énergie de 20% dans les bâtiments tertiaires et de 12% dans les bâtiments résidentiels en 5 ans ; à l'horizon 2020, il s'agit d'avoir rénové 30% du parc résidentiel. A la dimension énergétique s'ajoute la dimension du confort des occupants, qui doit être amélioré. Le confort thermique est principalement lié à l'inertie thermique du bâtiment, surtout en été. Or, la rénovation des bâtiments par l'intérieur engendre une réduction de l'inertie du bâtiment qui pourrait être comblée par des Matériaux à Changement de Phase (MCP). L'autre atout de ces matériaux concerne le stockage d'énergie issu des apports solaires directs en mi-saison ou période hivernale pendant la journée et leur restitution en période nocturne. L'emploi des MCP est une solution intéressante parce qu'ils présentent une forte densité de stockage d'énergie, grâce à la chaleur latente de transformation, dans un volume réduit. La modélisation du comportement énergétique et thermique des bâtiments intégrant des MCP passe par la connaissance fine du processus de transition de phase. Les codes de calcul commerciaux utilisés par les professionnels du bâtiment utilisent souvent des caractéristiques apparentes qui sont mal évaluées par des pratiques actuelles. Il est toutefois indispensable de déterminer avec précision ces caractéristiques thermophysiques afin que les résultats numériques soient représentatifs des phénomènes physiques. Il est expliqué que les méthodes précédemment employées, notamment de la calorimétrie, ne sont pas suffisamment exactes; c'est pourquoi dans le cadre du projet MICMCP, nous nous proposons de travailler à la caractérisation des Matériaux à Changement de Phase par des méthodes d'identification (méthodes inverses ou algorithmes génétiques(AG)) qui donneront des résultats plus conformes à la physique des changements de phases. La caractérisation se

fera tant au réchauffement pour la fusion (équilibre thermodynamique) qu'au refroidissement à la cristallisation des liquides surfondus. Il s'agira de déterminer des caractéristiques thermiques, dites apparentes, généralement utilisées avec les logiciels du commerce. Nous proposons d'identifier par des expériences sur des échantillons de tailles et de complexité croissantes: des petits échantillons homogènes étudiés principalement en calorimétrie, des échantillons macroscopiques (fraction de litre) étudiés avec des cellules de laboratoire finement instrumentées ou sur des maquettes permettant d'étudier les MCP dans leur configuration commerciale (par exemple 1mx1m). Enfin, il sera évalué l'influence d'une plus correcte détermination des propriétés thermophysiques en application des logiciels classiques de thermique du bâtiment. Les méthodes d'identifications sont associées à la détermination des erreurs dues à la méconnaissance parfaite de certains paramètres des expériences ou des erreurs de mesures. Le projet est donc de mettre au point des méthodes numériques d'analyse de résultats expérimentaux. Il s'agira d'établir d'abord par des modèles directs la physique des phénomènes thermiques soit dans les cellules de calorimètre, soit pour les expériences d'échantillons macroscopiques, soit sur des maquettes. Ensuite le travail principal sera de mettre en oeuvre des méthodes d'identification (inverse ou algorithme génétique(AG)) dans ces trois cas et d'en déduire les erreurs de détermination. L'analyse des sensibilités sera aussi étroitement liée au dimensionnement et à la mise au point des expériences. Enfin de toutes ces études, il sera tiré un protocole d'expériences qui entrera dans la procédure d'évaluation technique des composants des industriels du bâtiment intégrant des MCP.

**Partenaires**

1. LATEP – Université de Pau
2. LEMTI - Université d'Artois
3. CETHIL – INSA de Lyon

**Coordinateur**

Jean Pierre Dumas – LATEP  
[jean-pierre.dumas@univ-pau.fr](mailto:jean-pierre.dumas@univ-pau.fr)

**Aide de l'ANR**

685 k€

**Début e durée**

Janvier 2010 - 36 mois

**Référence**

ANR-10-STKE-003

**L bel pôle**

# Programme « Stockage Innovant de l'Énergie »

Edition 2010

## Titre du projet

## SACRE: Stockage par Air Comprimé pour le Réseau Electrique

### Résumé

Malgré le bon fonctionnement de Huntorf, le CAES n'a pas connu le développement attendu dans les années 80. Il apparaît pourtant, dans leur gamme de puissances, comme la seule alternative aux stations hydroélectriques de pompage-turbinage. Les évolutions du contexte énergétique et technique modifient cette situation. D'une part, des techniques « adiabatiques », intégrant la récupération de la chaleur produite à la compression, permettraient des rendements globaux de 70%, surtout si, de plus, on recherche systématiquement des améliorations, au niveau du train de compression, de la turbine, des matériaux de stockage de la chaleur et de l'échangeur associé ; et qu'on vérifie la disponibilité de vides souterrains proches du réseau. D'autre part, la possibilité d'un stockage de l'énergie produite accroît l'intérêt de sources d'énergie intermittentes, dont l'éolien, et les préoccupations environnementales conduisent à évaluer les avantages du stockage plus complètement, en y intégrant le bilan carbone, la gestion et le dimensionnement du réseau de transport. Le premier volet de SACRE est donc une modélisation, d'abord statique, du système électrique français, qui permettra de dégager une localisation optimale des stockages. Une modélisation d'une journée-type permettra un dimensionnement plus fin des caractéristiques du stockage. La rentabilité sera jugée par une approche marginale ; on mettra aussi en oeuvre une méthode de valorisation comparant deux modèles d'équilibre avec et sans unités CAES, les gains étant élargis à la diminution des besoins d'investissement pour la pointe et à la réduction d'émissions de CO<sub>2</sub>. Plusieurs concepts de train de compression seront envisagés. On examinera plusieurs positionnements du stockage de chaleur dans le train, un éventuel découplage permettant le stockage de la chaleur à basse pression, et l'usage de matériaux avancés. On examinera le pré-dimensionnement d'une turbine axiale à un ou deux corps pour s'affranchir du laminage en sortie de caverne. D'autres améliorations résideront dans le filtrage des débris, causes d'arrêts, et dans la capacité à monter rapidement en pleine puissance. Un second volet concerne l'étude des techniques de stockage de l'air, cavités salines,



aquifères, cavités minées et, en référence, stockages de surface. On réalisera une cartographie des sites disponibles, accompagnée de fourchettes de coûts du KWh stocké, et une étude de conception détaillée : problèmes d'architecture de puits, de grands diamètres de tubes, de corrosion par l'air salé et de protection de l'environnement (fin du cycle de vie). Le retour d'expérience de Huntorf montre un écaillage de la paroi assez intense mais tolérable. Le calcul numérique précisera comment extrapoler à d'autres profondeurs, formes et natures du cycle appliqué ; et comment adapter à ces conditions un programme expérimental. Un CAES adiabatique est aussi un stockage de chaleur dans des conditions exigeantes- typiquement 650°C, 70 bars et air chargé en sel. Pour le matériau de stockage, on s'oriente vers des céramiques issues du traitement des déchets. Il peut s'agir d'une innovation décisive. On effectuera l'optimisation de l'architecture de l'échangeur ; les matériaux feront l'objet d'une caractérisation complète. On disposera ainsi des données nécessaires à la réalisation d'un prototype d'un m3. Les conditions d'extrapolation à échelle 1 seront discutées ainsi que les répercussions de l'approche par stockage étagé et du choix de l'enveloppe du matériau. L'assemblage des divers éléments techniques se fera à travers l'étude du comportement de l'air pendant la compression et la détente. Un premier dimensionnement d'un système adiabatique avancé sera effectué la première année ; il constituera une colonne vertébrale pour la suite du projet, permettant l'évaluation des résultats des diverses parties du programme et une mise à jour permanente au fur et à mesure des progrès qu'elles auront permis.

#### Partenaires

1. LMS – Ecole Polytechnique
2. Laboratoire PROMES – Perpignan
3. EDF R&D
4. GEOSTOCK
5. L2EP – HEI Lille

#### Coordinateur

Pierre Berest - LMS  
[Berest@lms.polytechnique.fr](mailto:Berest@lms.polytechnique.fr)

#### Aide de l'ANR

666 k€

#### Début e durée

Janvier 2011 - 36 mois

#### Référence

ANR-10-STKE-006

#### Label pôle

DERBI

# Programme « Stockage Innovant de l'Énergie »

Edition 2010

## Titre du projet

SOLIBAT: Batteries "tout solide" développées par Frittage Flash

## Résumé

Depuis les années 90, les batteries Li-ion sont les systèmes de stockage de l'énergie les plus utilisés pour les applications portables. Cependant, leurs limites intrinsèques sont en passe d'être atteintes, alors que la demande en termes de performances et de sécurité est sans cesse grandissante. Les batteries commerciales actuelles risquent de ne pas pouvoir satisfaire les besoins des applications émergentes (véhicules électriques et hybrides, stockage des énergies renouvelables,...), voire des applications plus spécifiques à forte valeur ajoutée. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de développer des technologies avancées de systèmes de stockage ayant des caractéristiques telles que grandes densités d'énergie, longue durée de vie, bas coût de production, peu ou pas de maintenance et une grande sécurité d'utilisation. Les batteries « tout solide » sont susceptibles de répondre à ces demandes tout en présentant un intérêt supplémentaire si l'on considère des fonctionnements à haute température ou le design de cellules particulières. Jusqu'alors le développement de ce type de technologie se heurtait au problème de leur mise en forme. Répondant à l'objectif annoncé, les résultats obtenus dans le cadre du projet CeraLion (Stock-E-07-04) démontrent la faisabilité du développement en une étape et des temps courts de batteries massives "tout solide" par Frittage Flash (ou Spark Plasma Sintering SPS). L'objectif de ce nouveau projet est de valoriser nos précédents résultats et le brevet en cours de dépôt en amenant l'utilisation de la technologie "tout solide" aux portes des applications. Le projet proposé nécessite dans un premier temps de rester très fondamental en imposant un travail d'optimisation des matériaux existants pour améliorer les performances de nos prototypes. Cela ne pourra être atteint qu'en considérant en parallèle une approche formulation/mélange des composés solides (matériau actif, électrolyte, conducteur électronique) présents dans les électrodes composites. Ces dernières doivent présenter une microstructure optimisée garantissant la percolation ionique et électronique au sein du volume de la

céramique sans pénaliser la densité d'énergie. La mise en forme par SPS des batteries "tout solide" sera optimisée par un contrôle des paramètres ajustables du procédé de frittage dont l'étude de l'influence sur le comportement électrochimique des cellules permettra d'isoler les conditions optimales. Ces conditions permettront de développer des cellules, dont certaines présenteront des géométries particulières, qui seront soumises à des tests standards par notre partenaire industriel, afin de valider la technologie "tout solide".

**Partenaires**

1. CEMES – CNRS – Midi Pyrénées
2. LRCS – Université de Picardie
3. Laboratoire Chimie Provence
4. SAFT

**Coordinateur**

Mickael Dollé – CEMES  
Mickael.dolle@cemes.fr

**Aide de l'ANR**

675 k€

**Début e durée**

Janvier 2011 - 36 mois

**Référence**

ANR-10-STKE-007

**Label pôle**

AEROSPACE VALLEY

# Programme « Stockage Innovant de l'Énergie »

Edition 2010

<b>Titre du projet</b>	<b>STAID: Stockage Inter Saisonnier de l'Énergie Thermique dans les Bâtiments</b>
<b>Résumé</b>	<p>Le projet STAID (Stockage Inter Saisonnier de l'Énergie Thermique dans les Bâtiments) a pour objectif la mise au point et l'évaluation d'un système compact de stockage de chaleur inter saisonnier pour une utilisation dans les bâtiments. Le matériau de stockage de l'énergie thermique est basé sur un composite zéolite et sulfate de magnésium, mais sera optimisé dans le cadre du projet pour augmenter la densité d'énergie stockable. L'intérêt du choix de ces matériaux réside à la fois dans leur prix et leur impact environnemental très faible. L'intégration du matériau dans le système de stockage est un point clé du projet. Pour cela, un réacteur sera conçu afin de répondre aux problèmes de puissance de chaleur nécessaire ainsi que de quantité d'énergie à stocker. Ce réacteur sera couplé à un capteur solaire sous vide à air. Pendant les périodes ensoleillées, l'air chauffé provenant du capteur passera dans le réacteur afin de provoquer les réactions permettant le stockage de l'énergie thermique. En période de froid, l'air humide extrait du bâtiment sera utilisé comme vecteur afin de déstocker la chaleur dans le réacteur. Une fois les réactions terminées, l'air chaud et sec passera par un échangeur de chaleur et chauffera ainsi l'air neuf provenant de l'extérieur. Le système ainsi conçu sera permettra un stockage de chaleur à long terme sans pertes thermiques.</p>
<b>Partenaires</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. CETHIL – INSA Lyon</li><li>2. EDF R&amp;D</li><li>3. CETIAT</li><li>4. IRCELYON</li><li>5. LOCIE</li></ol>
<b>Coordinateur</b>	Frédéric Kuznik – CETHIL <a href="mailto:Frederic.kuznik@insa-lyon.fr">Frederic.kuznik@insa-lyon.fr</a>
<b>Aide de l'ANR</b>	759 k€
<b>Début e durée</b>	Janvier 2011 - 36 mois

**Référence** ANR-10-STKE-009

**Label pôle** AXELERA - TENERRDIS

# Programme « Stockage Innovant de l'Énergie »

Edition 2010

## Titre du projet

STOCK-AIR 2: Stockage thermique pour le chauffage thermodynamique à air des logements

## Résumé

Le projet « Stock-air 2 » vise à réaliser et à réguler une solution couplant une pompe à chaleur air/air et un stockage thermique par matériaux à changement de phase (MCP) pour répondre à la demande d'effacement de la pointe électrique de 18h00 à 20h00. Cette solution technologique est énergétiquement pertinente tant pour la rénovation du chauffage par effet Joule du parc existant que pour les bâtiments basse consommation de demain. En effet le stockage par changement de phase solide / liquide stabilise la température de condensation de la pompe à chaleur, ce qui permet de choisir un niveau qui maximise le coefficient de performance saisonnier. D'autre part, le changement de phase permet des fonctionnements continus du système thermodynamique et limite drastiquement les pertes énergétiques dues aux cycles de fonctionnement courts associés aux faibles charges thermiques. Ce projet a pour ambition de mener un développement qui va d'une recherche amont portant sur de nouveaux matériaux jusqu'à une recherche appliquée portant sur des systèmes de chauffage intégrant un stockage d'énergie testés en conditions réelles d'utilisation. Les MCP développés présenteront des changements de phase adaptés aux niveaux de température des systèmes de chauffage à air c'est-à-dire entre 30 et 50 °C. Ces MCP seront intégrés dans des échangeurs stockeurs/déstockeurs. Deux grandes options techniques seront étudiées en parallèle : - intégration du MCP dans le condenseur de la pompe à chaleur en tirant avantage des hauts coefficients d'échange thermique - intégration dans le circuit aéraulique en améliorant la surface d'échange air/paroi. Le projet est conduit selon une double approche : systémique faisant appel à la simulation numérique, et technologique pour développer des matériaux et des systèmes à vitesses de stockage-déstockage adaptées au système de chauffage visé. Une des originalités du projet vise à lever les obstacles liés au retard aux changements de phase ainsi qu'aux changements de phase partiels par intégration de MCP dans des surfaces d'échange à flux thermiques élevés (de 40 à 500 W/m<sup>2</sup>.K). Une des tâches du projet porte sur la

conception de conteneurs de MCP. Les qualités demandées à ces conteneurs seront : une très faible perméance au matériau actif, une résistance à la corrosion, une résistance à la fatigue, une bonne performance d'échange thermique. Le projet permettra la réalisation et les tests de deux démonstrateurs physiques d'échangeurs-stockeurs : l'un destiné à être intégré dans le condenseur d'une PAC (unité intérieure) et l'autre intégré en gaines ou plénum. Une fois ces systèmes mis au point en laboratoire, ils seront testés dans des maisons individuelles occupées normalement. Les performances analysées seront aussi bien énergétiques qu'en confort ressenti par les occupants.

**Partenaires**

1. ARMINES
2. EDF
3. CETHIL
4. RIBO SA
5. AIRWELL INDUSTRIES
6. Laboratoire des Sciences de l'Habitat

**Coordinateur**

Denis Clodic – ARMINES  
[denis.clodic@mines-paristech.fr](mailto:denis.clodic@mines-paristech.fr)

**Aide de l'ANR**

626 k€

**Début e durée**

Janvier 2011 - 36 mois

**Référence**

ANR-10-STKE-010

**Label pôle**

AXELERA - TENNERDIS