

Présentation des projets financés au titre de l'édition 2009 du  
Programme Efficacité énergétique et réduction des émissions  
de CO2 dans les systèmes industriels

<b>ACRONYME et titre du projet</b>	<b>Page</b>
<b>AMELIE CO2</b> - Amélioration de l'Efficacité énergétique des centrales thermiques intégrant le captage de CO2 assisté par contacteurs membranaires	3
<b>ASCOPE</b> - Acier Sans CO2 Par Electrolyse	5
<b>ENERCO_LT</b> - Récupération d'énergie sur sources de chaleur basse température	7
<b>ISIS</b> - Solutions Innovantes pour des Systèmes de chauffage par Induction	9
<b>PACO</b> - Développement d'une pompe à chaleur à eau fonctionnant entre 90 et 130 °C utilisant un compresseur à vis ou un compresseur centrifuge à paliers magnétiques	11
<b>PYROCAPT</b> - Pyro-gazéification avec capture du CO2	13



# Programme Efficacité énergétique et réduction des émissions de CO2 dans les systèmes industriels

Edition 2009

## Titre du projet **AméliE CO2 - Amélioration de l'Efficacité énergétique des centrales thermiques intégrant le captage de CO2 assisté par contacteurs membranaires**

### Résumé

Un nouveau type de centrale électrique devra prendre le relais des installations vieillissantes en assurant conjointement une meilleure efficacité énergétique de la ressource et une minimisation des rejets de CO2 ; cela implique l'intégration de méthodes efficaces de captage du CO2 et la flexibilité de ces installations aux besoins de la production, et la minimisation du facteur carbone avec ou sans captage.

AméliE CO2 est un projet de recherche industriel de 36 mois porté par trois centres de recherche et deux acteurs industriels répondant à l'axe 2 « Production d'énergie avec réduction simultanée des émissions de CO2 et accroissement de l'efficacité de la production d'énergie ». Il vise à optimiser la production d'énergie électrique par des centrales thermiques à combustible fossile -1er terme source des sites industriels à fort tonnage- et à répondre ainsi au 1er marché de la production l'énergie par post-combustion.

L'ambition du projet est la conception et la modélisation d'une centrale thermique énergétique la plus efficace possible intégrant la réduction simultanée des émissions de CO2 de postcombustion, selon la méthode actuellement la plus prometteuse utilisant le cycle carbonate d'ammonium - bicarbonate d'ammonium assisté par contacteurs membranaires.

L'intérêt des contacteurs membranaires sera : a) de confiner l'ammoniac en phase liquide tout en permettant l'absorption ou la désorption sélective du dioxyde de carbone, b) d'élargir les plages opératoires du procédé pour permettre un taux de captage de CO2 élevé (80-90%) sans perte significative d'ammoniac gazeux, induisant ainsi une réduction des coûts énergétiques et une simplification de la chaîne de traitement, c) de régénérer la solution de carbonate dans des conditions favorables de température et/ou de pression, et d) de renforcer l'efficacité de la production d'énergie en réduisant le facteur carbone.

La structuration scientifique du projet repose sur des besoins d'acquisition de connaissances fondamentales englobant les aspects matériaux et procédés relayé par un développement technologique initial visant à qualifier la pertinence du concept de base et la faisabilité technique qui ouvrira la voie à une intégration innovante de la technologie de captage à l'ammoniac. Cette analyse fait ressortir une démarche intégrée s'appuyant sur trois axes caractérisés par la production de connaissances, le développement technologique et l'innovation industrielle.

Les travaux seront réalisés selon quatre tâches complémentaires couvrant le domaine des matériaux membranaires, la fabrication de contacteurs membranaires, l'étude du captage réactif du dioxyde de carbone et l'intégration des résultats pour la conception de centrales thermiques énergétiquement optimisées.

### Partenaires

CNRS - LSGC (partenaire coordinateur)  
Université Paul Sabatier - LGC  
ARMINES - CEP  
POLYMEM  
EDF R&D

### Coordinateur

M Denis Roizard - CNRS - LSGC  
Denis.Roizard@ensic.inpl-nancy.fr

**Aide de l'ANR** 838 k€

**Début et durée** Décembre 2008 - 36 mois

**Référence** ANR-09-EESI-001

**Label pôle**

# Programme Efficacité énergétique et réduction des émissions de CO2 dans les systèmes industriels

Edition 2009

Titre du projet

ASCOPE - Acier Sans CO2 Par Electrolyse

## Résumé

Activité industrielle de fort tonnage, l'industrie sidérurgique apparaît comme une opération emblématique des transformations matière-énergie. La production mondiale d'acier a atteint 1330 millions de tonnes en 2008. La production d'une tonne d'acier consomme environ 5.7 MW.h (électriques) (chiffre de 2007) et entraîne le rejet de 1.9 tonnes de dioxyde de carbone. Parvenir à proposer un procédé capable à la fois d'améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de CO2 suppose une remise en question radicale des procédés existants.

Diverses alternatives à la voie traditionnelle sont explorées depuis quelques années, dont la réduction électrochimique de minerai de fer (hématite). Des travaux précédents réalisés par les demandeurs ont montré que du fer pouvait être formé par réduction électrochimique de suspensions concentrées d'hématite dans un milieu 50% en masse d'hydroxyde de sodium à environ 110°C, avec électrique de production d'acier pouvant atteindre 4 MWh/tonne (en incluant le broyage du minerai et la fusion de l'acier produit à l'électrode). Récemment, nous avons mis en évidence la formation intermédiaire de magnétite dans la réduction globale (i), et que la formation de fer ne se produit pas par la réduction de Fe (III) dissous mais dans les particules solides au contact de la surface de l'électrode. Ces résultats, bien que représentant une rupture technologique dans les procédés électrochimiques et plus largement en métallurgie, ne permettent pas de proposer un procédé de production du fer par électrolyse fonctionnant avec une consommation énergétique minimale.

Le projet a pour objectif de concevoir et de tester une cellule d'électrolyse pilote permettant d'abaisser la consommation énergétique en deçà de 3.7 MWh/tonne, et d'examiner la viabilité de cette voie de production de fer/acier à très faible empreinte carbone par rapport aux

procédés classiques. Le consortium associe des spécialistes de chimie des oxydes solides, de l'électrochimie, des procédés, de l'énergétique et de la métallurgie pour la réalisation du projet de quatre ans. Le projet de recherche industrielle fera appel à des techniques expérimentales appropriées (pour l'observation, la mesure et la caractérisation) et des approches méthodologiques avancées. En particulier :

- Les études physicochimiques permettront une caractérisation plus précise des réactifs adaptés à la production du métal, ouvrant la voie à l'utilisation de nouvelles sources d'oxydes de fer (taille de particules, minéralogie, préparation).
- des cellules spécifiques seront développées pour l'évacuation efficace de l'oxygène généré à l'anode, afin de réduire les pertes par chute ohmique dans l'espace interélectrodes.
- La mise en contact du solide à convertir (particules d'hématite) sera optimisée afin d'intensifier les transferts à la cathode, pour améliorer les rendements en courant et réduire la surtension à la cathode.
- Globalement, on cherchera à atteindre une faible consommation spécifique pour aboutir au fonctionnement des cellules avec des fortes productivités de manière endothermique et en intégrant au mieux les différentes énergies mises en jeu.

**Partenaires** CNRS - LSGC (partenaire coordinateur)  
ArcelorMittal Maizières Research SA  
ENSCP - Paris Tech  
Université P. et M. Curie - LCMCP  
PROMET

**Coordinateur** M Gérard VALENTIN - CNRS - LSGC  
Gerard.Valentin@ensic.inpl-nancy.fr

**Aide de l'ANR** 980 k€

**Début et durée** Décembre 2008 - 48 mois

**Référence** ANR-09-EESI-002

**Label pôle** MIPI matériaux innovants et produits intelligents

# Programme Efficacité énergétique et réduction des émissions de CO2 dans les systèmes industriels

Edition 2009

Titre du projet

**ENERCO\_LT - Récupération d'énergie sur sources de chaleur basse température**

## Résumé

Dans un contexte où la raréfaction progressive des ressources fossiles se conjugue avec des contraintes sur les émissions de CO<sub>2</sub>, ce projet vise à améliorer l'efficacité énergétique des procédés de production de gaz industriel en particulier en ce qui concerne les rejets à basse température. Les procédés visés sont les suivants :

- Séparation d'air : la compression d'air amont de l'étape de séparation génère des rejets sous forme d'eau chaude à des température compris en général entre 80°C et 150°C, sur les unités Air Liquide, 90% de l'énergie environ est utilisée sur la compression sachant que la consommation mondiale d'énergie électrique de l'Air Liquide annuelle est de l'ordre de 22235 GW/h ( chiffres 2008 ) dont environ 20% en France. En récupérant l'énergie des rejets, on peut espérer des gains allant jusqu'à 10% de l'énergie de compression suivant les situations.

- Production de gaz de synthèse : Par vaporéformage, Air Liquide produit des gaz de synthèse H<sub>2</sub> - CO. Ces gaz produits au niveau du four sont progressivement refroidis contre les fluides froids rentrant jusqu'à un niveau de 140°C puis refroidis une fois encore jusqu'à la température ambiante notamment au travers d'aéro-réfrigérants. Pour une unité « standard » de 135000Nm<sup>3</sup>/h de gaz de synthèse, il existe ainsi un potentiel allant jusqu'à 23MW en puissance d'énergie récupérable à basse température sachant que la production globale de l'Air Liquide en 2009 d'environ 1.5 million de Nm<sup>3</sup>/h, cela fait un potentiel total annuel de 2 TWh

- Capture du CO<sub>2</sub> de combustion : Les centrales thermiques de production d'énergie notamment dans le cas de l'oxycombustion génèrent des fumées chaudes à une température de 150°C et la séparation du CO<sub>2</sub> nécessite de refroidir ces fumées.

- Capture du CO<sub>2</sub> sur les fumées de Haut-Fourneaux sidérurgiques : Un haut fourneau produit classiquement jusqu'à 200000Nm<sup>3</sup>/h

de fumées à une température comprise entre 100°C et 200°C, et comme ci-dessus la capture du CO<sub>2</sub> nécessite de refroidir jusqu'à l'ambiante ces fumées.

Il existe donc un potentiel très important de récupération d'énergie si l'on parvient à traiter efficacement les gaz à basse température.

Le projet consiste ainsi à développer des solutions ( cycles )thermodynamiques et les technologies associées permettant la conversion de chaleur basse température en énergie mécanique. La contrainte du faible écart entre la source et le puits de chaleur consiste une difficulté majeure. Parallèlement les pressions étant ( sauf pour les gaz de synthèse ) basses, les pertes de pression générées par les échangeurs primaires ne doivent pas ruiner les efforts de récupération. Enfin les échangeurs primaires étant exposés à la corrosion, il est important de trouver des solutions industrielles à ces contraintes.

Parmi les cycles envisagés, les cycles de Rankine organiques figurent en bonne place et ont fait l'objet de développements récents mettant en évidence l'importance des fluides de travail en fonction des températures des sources. Les fluides trans-critiques en particulier peuvent être intéressants du fait de l'absence de paliers de condensation.

Le programme de travail se décline donc en une phase d'études théoriques permettant d'évaluer exactement le potentiel énergétique valorisable, de comparer les différentes solutions possibles et de sélectionner celles qui sont les plus pertinentes, puis une phase de sélection et de développement des composants à savoir principalement échangeurs et organes de détente extrapolables à une échelle industrielle, cette phase comprenant notamment des bancs d'essais ciblés. Les systèmes trans-critiques feront l'objet d'une expérimentation particulière du fait des particularités qui leur sont associées (pression, ...). Enfin une phase pilote d'une installation d'une centaine de kW est planifiée permettant de démontrer la faisabilité industrielle de la solution choisie,

**Partenaires**

AIR LIQUIDE (partenaire coordinateur)  
CNRS - PROMES  
EDF R&D  
ARMINES - CEP  
CEA LITEN  
CIAT

**Coordinateur**

M Marc Wagner - AIR LIQUIDE  
marc.wagner@airliquide.com

**Aide de l'ANR**

945 k€

**Début et durée**

Décembre 2008 - 36 mois

**Référence**

ANR-09-EESI-003

**Label pôle**

AXELERA ; DERBI (Energies Renouvelables Bâtiment - Industrie) ;  
TENERRDIS



# Programme Efficacité énergétique et réduction des émissions de CO2 dans les systèmes industriels

Edition 2009

## Titre du projet

## ISIS - Solutions Innovantes pour des Systèmes de chauffage par Induction

### Résumé

70 % de l'énergie est utilisée dans l'industrie en France à des fins de chauffage, essentiellement pour la fabrication des produits, marginalement pour les locaux industriels. Il convient donc d'améliorer les usages de la chaleur.

L'induction est la meilleure technologie disponible de chauffage de solides dans les Industries Agro-Alimentaires (IAA) et en métallurgie (traitement thermique des métaux et fusion). Précis et de bon rendement, l'induction est utilisable soit pour chauffer directement des métaux, soit pour chauffer des fluides dans une cuve.

Cette technique électrothermique recèle encore des possibilités importantes de progrès technologique. Ainsi le concept « d'inducteur universel », développement de couples générateurs / inducteurs permettant une plus grande adaptabilité à la charge, rend les équipements beaucoup plus génériques, donc moins chers et aptes à de nouvelles applications.

L'objectif de ce projet est donc de favoriser la pénétration de l'induction dans les différents secteurs industriels où elle peut s'avérer particulièrement performante. Pour cela il faudra aborder ce travail sous trois angles complémentaires :

- La recherche technico-économique des potentiels de pénétration de la technique de chauffage par induction
- L'amélioration des performances de la conversion électrothermique des équipements de chauffage par induction
- La récupération de l'énergie fatalement perdue et sa réutilisation de préférence dans la ligne de fabrication

### Partenaires

EDF (partenaire coordinateur)  
CNRS - SIMAP  
INPT - LAPLACE  
FIVES CELES  
ATYS  
ARMINES-CEP  
CNRS - CRISMAT

### Coordinateur

M Bernard PAYA - EDF  
bernard.paya@edf.fr

### Aide de l'ANR

1206 k€

### Début et durée

Décembre 2008 - 40 mois

### Référence

ANR-09-EESI-004

### Label pôle

CAPENERGIES ; S2E2 (Sciences et Systèmes de l'Energie Electrique)



**Titre du projet** **PACO - Développement d'une pompe à chaleur à eau fonctionnant entre 90 et 130 °C utilisant un compresseur à vis ou un compresseur centrifuge à paliers magnétiques**

**Résumé**

Des études ont mis en évidence l'importance des besoins en calories à des températures de 100 à 150 °C (20 TWh/an en France). Par ailleurs, les rejets calorifiques à des températures de l'ordre de 90 °C sont importants. Les pompes à chaleur existantes ne permettent pas de travailler à ces niveaux de températures. Pour développer une pompe à chaleur répondant à ces besoins (PAC Très Haute Température : PAC THT), l'eau est un fluide frigorigène avantageux : GWP nul, coefficients de performances élevés, disponibilité infinie... Par ailleurs, l'eau est déjà couramment utilisée comme fluide dans des applications de Compression Mécanique de Vapeur (la CMV est une PAC en circuit ouvert) associée à des opérations de déshydratation (concentration plus particulièrement). Dans ces cas, on constate certaines limites liées aux machines de compression (facteur de compression insuffisant pour un investissement acceptable).

L'objectif du projet est de réaliser une pompe à chaleur fonctionnant en eau à des températures entre 90 °C et 140 °C et de montrer sa faisabilité industrielle et ses performances. Le principal problème est lié à la compression de la vapeur d'eau. Deux machines de compression potentielles ont été identifiées :

- Une machine centrifuge à paliers magnétiques, développée par Johnson Controls, déjà utilisée sur d'autres fluides, répondrait aux besoins de la PAC THT avec quelques modifications ; elle répondrait alors aussi à un besoin dans le domaine de la concentration par évaporation en augmentant les facteurs de concentration accessibles par la CMV,
- Un compresseur à double vis, développé par la société suédoise SRM, adaptable à la vapeur d'eau, permettrait des taux de compression très importants (différences de température entre évaporateur et condenseurs supérieures à 40 ou 50 °C).

Les principales phases du projet sont :

- des études de cas types pour identifier un site d'accueil de la PAC THT après réalisation et essais et un site d'accueil sur un évaporateur de la machine centrifuge à paliers magnétiques,
- la conception et la fabrication de la la PAC THT qui pourra être associée avec les deux machines de compression,
- la fabrication et le couplage à la PAC du compresseur à vis SRM, suivi d'essais en laboratoire,
- la fabrication et le couplage à la PAC du compresseur à paliers magnétiques Johnson Controls, suivi d'essais en laboratoire,
- la valorisation par l'implantation sur des sites industriels et la communication

Les partenaires se complètent parfaitement pour arriver à l'objectif :

- EDF dispose de laboratoires et de moyens d'essais permettant de tester les machines, et a une certaine expérience aussi bien dans le domaine des Pompes à Chaleur que dans la CMV et la compression de vapeur d'eau,
- FRANCE EVAPORATION a conçu et réalisé de nombreuses installations de concentration par évaporation avec CMV,
- JOHNSON CONTROLS maîtrise les Pompes à Chaleur et les machines de compression à paliers magnétiques,
- AGROPARISTECH (UMR1145) connaît parfaitement le domaine de la concentration par évaporation et du séchage dans les IAA,
- CETHIL et IMB (appuyés par le CEA/LETh et l'Ecole Centrale de Lyon) sont des laboratoires universitaires compétents sur les pompes à chaleur et sur la modélisation des machines centrifuges.

**Partenaires**

EDF R&D (partenaire coordinateur)  
 France Evaporation  
 Johnson Controls  
 Institut Polytechnique de Bordeaux - ENSEIRB-MATMECA  
 Insa de Lyon - CETHIL  
 AGROPARISTECH

**Coordinateur**

M Jean-Francois BERAIL - EDF R&D  
 jean-francois.berail@edf.fr

**Aide de l'ANR**

1279 k€

**Début et durée**

Décembre 2008 - 48 mois

**Référence**

ANR-09-EESI-005

**Label pôle**

AXELERA ; CAPENERGIES

# Programme Efficacité énergétique et réduction des émissions de CO2 dans les systèmes industriels

Edition 2009

## Titre du projet

## PYROCAPT - Pyro-gazéification avec capture du CO2

### Résumé

Le présent projet est un développement expérimental qui vise à l'adaptation d'une unité existante de pyro-gazéification intégrée des déchets et des combustibles solides, en lit fluidisé dense, suivie d'une postcombustion des gaz produits, à la capture du CO2 produit, avant rejet à l'atmosphère, tout en assurant des rendements de valorisation énergétique élevés.

Le principe du procédé utilisé, (O2/FGR - Flue Gas Recycling), est de remplacer le ballast azote de l'air, par des fumées neutres (CO2, H2O) soutirées en aval, après la chaudière de récupération, et de réaliser un mélange comburant synthétique, composé, à priori, de 21% d'oxygène et de 79% de gaz neutres.

Cette recherche vise à l'implantation du procédé de recyclage des fumées soutirées en aval, et à leur mélange avec de l'air enrichi ou de l'oxygène, pour réaliser, à la fois :

- l'apport endothermique nécessaire à la gazéification de la charge entrante, par combustion partielle dans le lit fluidisé de gazéification,
- l'oxydation en phase homogène des gaz produits, dans une chambre secondaire de postcombustion, fonctionnant à faible excès d'air.

Une chaudière de récupération, placée en aval, permet la valorisation à fort rendement énergétique du contenu thermo-chimique de la charge entrante, à la fois par :

- la minimisation des débits de fumées rejetés à l'atmosphère, liée aux faibles excès d'air synthétique utilisés, mais aussi, par
- l'amélioration des propriétés d'émissivité radiative des fumées, celles-ci ne

Les fumées, dont la fraction H2O peut être condensée en sortie, sont alors constituées majoritairement de CO2, qui se trouve ainsi séparé, avant compression et stockage. Ce projet vise également à valider la pertinence économique et environnementale de ce nouveau concept.

### Partenaires

OP Systemes (partenaire coordinateur)  
ARMINES - CEP  
APESA

### Coordinateur

M Olivier Girinon - OP Systemes  
o.girinon@opsystemes.com

### Aide de l'ANR

1215 k€

### Début et durée

Décembre 2008 - 30 mois

### Référence

ANR-09-EESI-006

### Label pôle