

### **3. ENERGIES RENOUVELABLES**

## Posters Energies renouvelables

Fractionnement thermomécanique de la biomasse verte	Mines Albi
Séchage en vapeur d'eau surchauffée de boues résiduaires et digestats de méthanisation	Mines Albi
Effet des métaux sur les propriétés de surface des chars issus de la pyrogazéification de la biomasse contaminée	Mines Albi
Gazéification de la biomasse sous atmosphère mixte de H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub>	Mines Albi
Pré-traitement de la biomasse énergie : vers la conduite et la sécurité de la torréfaction en four tournant	Mines Albi
VALTHERA. Plaforme de Valorisation par procédés thermiques des résidus des agroressources	Mines Albi
Matériaux poreux réactifs à base de phosphates de calcium : formulation, caractérisation et application comme capteurs de contrôle des émissions	Mines Albi
Valorisation de biomasse et de déchets assistée par énergie solaire concentrée	Mines Albi
La revue scientifique internationale : Waste and biomass valorization	Mines Albi
Wasteeng conference series	Mines Albi
Etude des mécanismes physico-chimiques impliqués dans la dévolatilisation et l'oxydation de mélanges charbon/biomasse pulvérisés dans des conditions de flamme industrielle	Mines Douai
Etude de l'oxycombustion et de la combustion sous air enrichi en oxygène du charbon pulvérisé en vue de faciliter le captage du CO <sub>2</sub>	Mines Douai
Captage du CO <sub>2</sub> : Les diagrammes de phases	Mines ParisTech
Membrane composite Nafion-Sépiolite pour des performances accrues des piles à combustible à faible humidité relative	Mines ParisTech
Nanostructures de TiO <sub>2</sub> pour la génération d'H <sub>2</sub> par photolyse de l'eau : aérogels vs nanofils	Mines ParisTech
Système pile à combustible basse température (PEMFC)	Mines ParisTech
IDEAL-Cell, un nouveau concept de pile à combustible à oxydes solides. Partie 1 Génèse du concept	Mines ParisTech

IDEAL-Cell, un nouveau concept de pile à combustible à oxydes solides. Partie 2 Développement	Mines ParisTech
Vers de nouvelles générations de piles à combustible de type SOFC. Architecturation des interfaces et des composants	Mines ParisTech
Evaluation du potentiel éolien par simulation météorologique	Mines ParisTech
Reconstruction du ciel en 3D à l'aide de caméras hémisphériques filmant le ciel	Mines ParisTech
Heliosat 4 : une nouvelle méthode pour l'évaluation du rayonnement solaire au sol	Mines ParisTech
Evaluation des impacts environnementaux pour des scénarii énergétiques européens	Mines ParisTech
Modèles simplifiés de calcul d'impacts environnementaux de la production électrique des filières bas carbone	Mines ParisTech
Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par analyse de cycle de vie	Mines ParisTech
Biomasse-énergie	Mines Saint-Etienne
Chaudière à récupération de gaz à effet de serre par cycle calcique amélioré	Mines Saint-Etienne
'Astrix' : Absorbateurs Solaires haute Température Oxydo-Résistants microtexturés	Mines Saint-Etienne
Production d'hydrogène et de méthane par co-digestion anaérobie	Mines Nantes
Hydrogène : production à partir d'alcools pour des applications de type stationnaire	Mines Nantes
Valorisation du biogaz dans un moteur Diesel en mode dual fuel	Mines Nantes
Production et combustion dans un moteur diesel du biodiesel issu de la valorisation des résidus graisseux	Mines Nantes
Carburants alternatifs issus du craquage thermique/catalytique des déchets	Mines Nantes
Purification des gaz de synthèse - Aspects polluants et particules	Mines Nantes

## Parties prenantes



Université de Toulouse



## Auteurs

Marion Blanc  
Nicolas Reuge  
Bernard Auduc  
Jean Louis Dirion  
Patricia Arlabosse

## Partenaires



## Remerciements



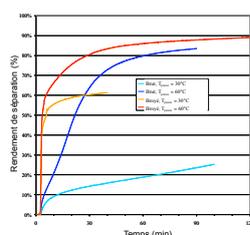
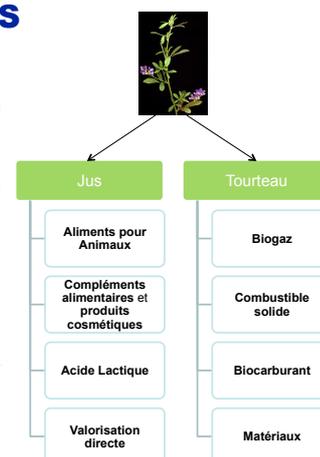
## BIORAFFINERIE VERTE : ENJEUX ET VEROUS

### Le gisement

- La biomasse herbacée constitue une ressource abondante (3.4 milliards d'ha). Un surplus de 20 millions de tMS/an est disponible au niveau Européen (gisement pour l'alimentation animale et humaine déduit).
- Les principaux composés valorisables sont les protéines (15 à 25% MS), les hydrates de carbone structuraux (30 à 50% MS), dont la moitié environ est sous forme de cellulose, ainsi que les sucres et amidons (25 à 35% MS).

### La séparation solide/liquide

- La biomasse herbacée contient, en masse, 80% d'eau et ne peut être conservée que par ensilage (voie humide) ou par séchage (voie sèche).
- Le fractionnement mécanique par pressage, prétraitement indispensable pour réduire la consommation énergétique des filières en voie sèche, ne permet d'extraire que 55% de l'eau intrinsèquement présente dans la biomasse.
- L'intensification des procédés, et notamment des procédés de séparation, et l'intégration énergétique des procédés sont deux verrous technologiques à lever.



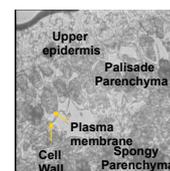
## LE PROCÉDÉ DMAT (FR 2 923 587, EP 2 212 637)

### Principe de fonctionnement

- La déshydratation mécanique assistée thermiquement (DMAT) consiste à apporter de la chaleur au cours du pressage, habituellement réalisé à température ambiante.
- Les parois de la presse sont ainsi chauffées à des températures inférieures à 70°C. Il en résulte un gradient de température dans la biomasse et un écoulement de jus vert par thermo-osmose.

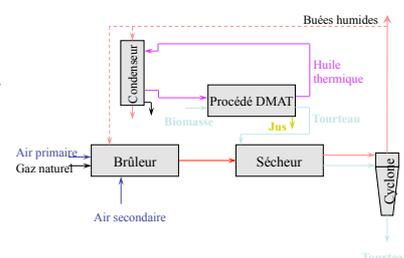
### Rendement matière

- L'apport de chaleur augmente le rendement d'extraction de 23%.
- Jusqu'à 83% de l'eau intrinsèquement présente dans la biomasse peut être séparée en phase liquide, et donc à moindre coût énergétique.
- Un pré-cisaillement de la biomasse réduit le temps d'extraction et facilite l'extraction des protéines brutes (CP=20 g/L au lieu de 12g/L).



### Performances énergétiques

- La consommation du procédé DMAT est de l'ordre de 200 kJ/kg d'eau.
- L'économie d'énergie résultant de la mise en œuvre du procédé DMAT sur une filière de valorisation en voie sèche du tourteau est de 46%.
- L'intégration énergétique conduit à une économie d'énergie de 52% pour un pincement de 20°C.



## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- La validation de la preuve du concept en continu est en cours (ANR 2010 EMMA -021-01), la stratégie de valorisation envisagée étant la concession de licences d'exploitation.
- D'autres champs d'application (macro-algues, boues de bentonite, boues de papeterie...) ont été identifiés. Les développements futurs seront consacrés au changement d'échelle pour ces matériaux.

## Parties prenantes



Université de Toulouse



## Auteurs

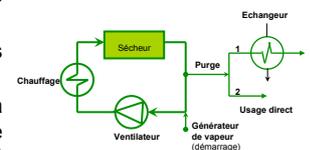
Marion Blanc  
Dung Tran  
Patricia Arlabosse

## Partenaires



## VALORISATION DES DÉCHETS HUMIDES : ENJEUX

- Les boues résiduaires et les digestats constituent un gisement de matière organique important mais leur teneur en eau élevée (80% en masse) les rend peu aptes à une valorisation.
- Les sècheurs thermiques conventionnels présentent de mauvaises caractéristiques de transfert thermique. Leur consommation énergétique varie entre 800 et 1200 kWh/t d'eau. Pour obtenir un bilan énergétique neutre sur une filière de combustion, une consommation énergétique maximale de 500 kWh/t d'eau est nécessaire.
- En outre, l'exploitation des sècheurs conventionnels est délicate (production d'odeurs désagréables, risques d'incendie et plasticité).
- Le séchage en vapeur d'eau surchauffée (VES) peut réduire significativement la consommation d'énergie (entre 75 et 85%), à condition que la vapeur d'eau produite soit valorisée. Les risques d'incendie sont éliminés et les rejets vers l'environnement réduits et mieux contrôlés.



## SÉCHAGE EN VAPEUR D'EAU SURCHAUFFÉE

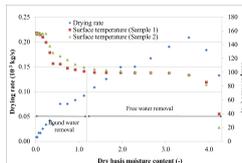
### Dispositif expérimental

- Une boucle de séchage, qui sera installée sur la plateforme ValThERA, a été conçue et construite en 2012. Elle fonctionne sous atmosphère contrôlée, de vapeur d'eau surchauffée ou d'air humide.
- Elle comprend deux cellules de séchage (lit traversé et lit léché) pouvant contenir chacune jusqu'à un kilogramme de biomasse humide. Chaque cellule repose sur des pesons pour suivre en temps réel la perte de masse de l'échantillon.



### Cinétique de séchage

- La phase de mise en température est associée à une augmentation de la teneur en eau du matériau, résultant de la condensation de la vapeur.
- La première phase de séchage, correspondant à la vaporisation de l'eau libre, est beaucoup plus longue que sous air ( $X_{crit, VES} = 1.2 \text{ kg/kgMS}$  versus  $X_{crit, air} = 1.9 \text{ kg/kgMS}$ ).
- Les limitations par les transferts internes apparaissent progressivement pendant la seconde phase de séchage. A partir d'une teneur en eau de 0.5 kg/kgMS, la structure du matériau est totalement rigidifiée et plus aucun retrait n'est observé.

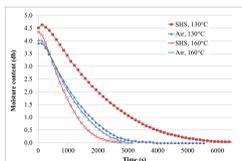
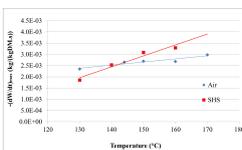


### Température d'inversion

- Il existe une température d'inversion au-delà de laquelle la vitesse de séchage est plus élevée sous VES que sous air.

$$F_{max} = -m_{DM} \frac{dW}{dt} = \frac{hS(T_{\text{fluid medium}} - T_{\text{surface}})}{\Delta h^{L-V}(T_{\text{surface}})}$$

- La valeur de cette température d'inversion dépend de la configuration géométrique. Pour une boue résiduaire urbaine digérée, extrudée sous forme de cylindres de 2.5 cm de diamètre et de 6 cm de long, la température d'inversion se situe à 142 °C pour un débit de 5813 kg/(m<sup>2</sup>.h).
- Ainsi, à 160 °C, la vitesse de séchage augmente de 23% et le temps total de séchage, et donc la longueur du sècheur, diminue de 18%.



## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- Un dispositif original a été conçu, construit et caractérisé. Ce dispositif est opérationnel. Il permet de caractériser les cinétiques de séchage sous atmosphère contrôlée dans deux configurations géométriques différentes et pour une large gamme de conditions opératoires.
- Les recherches en cours visent à caractériser la composition de la vapeur produite, la présence d'acides gras volatils, par exemple, pouvant poser des problèmes de corrosion.

## Remerciements



## Parties prenantes



Université de Toulouse



## Auteurs

Marta GALERA-MARTINEZ  
Marion DUCOUSSO  
Elsa WEISS-HORTALA  
Doan PHAM MINH  
Naomi B. KLINGHOFFER  
Marco J. CASTALDI  
Ange NZIHOU

## Partenaires



## CONTEXTE & OBJECTIFS

### Déchets de bois contaminés par des métaux (type CCA)

- Bois CCA imprégné en cuivre, chrome et arsenic (résistance aux environnements extérieurs)
- Utilisation désormais interdite, volumes importants de déchets en fin de vie (4 M t/an, Europe)
- Déchets spéciaux (présence de métaux lourds) : quels traitements adaptés?

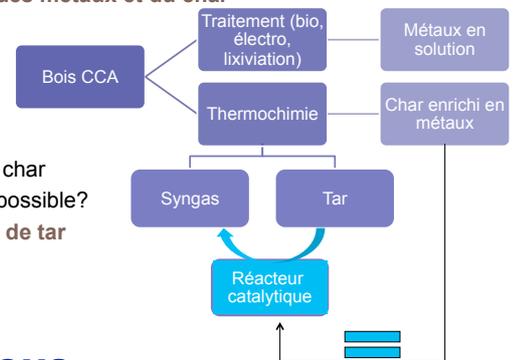
➡ Traitement thermochimique le plus adapté\*, **récupération des métaux et du char**

\*Helsen, Van den Bulck, Environ. Pollution, 2005 (Review)  
\*Kemha, Nzihou, Mateos, Chem Eng Transactions, 2011

### Pyrogazéification de bois contaminés

- 3 phases : char (résidu carboné solide), tar (liquide) et gaz
- Efficacité de gazéification réduite par la production de tar et de char
- Char enrichi en métaux lourds : application comme catalyseur possible?

➡ Réutilisation du char comme catalyseur de conversion de tar



Traverses de chemin de fer, poteaux électriques, déchets de construction

Dépôt CCA Fibres de bois de pin

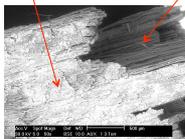


Figure 1 : image MEBE de la surface de bois de pin imprégné de CCA

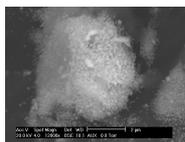


Figure 2 : image MEBE d'agglomérations de métaux

## RESULTATS & DISCUSSIONS

### Structure, texture du char de pyrogazéification (750°C)

- Répartition hétérogène des métaux dans le bois CCA brut (Fig 1)
- Pyrogazéification : agglomération de métaux à la surface du char (Fig 2)
  - Azote : réduction de la porosité, blocage des pores (concentrations locales élevées en métaux)
  - Air : augmentation de la porosité par vaporisation des métaux (pyrogazéification catalysée)
- Détermination des propriétés de surface : surface active et énergie de surface (Tableau 1)

Echantillon	N <sub>2</sub> (77K)	Isopropanol (298K)	Hexane (298K)	Tension de surface dispersive $\gamma_s^d$ (mN m <sup>-1</sup> )	Tension de surface polaire $\gamma_s^p$ (mN m <sup>-1</sup> )	Tension de surface $\gamma_s$ (mN m <sup>-1</sup> )
Pin, Air	827	580	354	73.82	10.38	85.63
CCA, Air	669	458	305	74.74	17.98	91.80
Pin, Azote	577	142	146	75.25	11.92	86.36
CCA, Azote	574	104	128	74.44	19.39	94.13

Tableau 1 : Surface spécifiques (BET Azote 77K) et surface actives (isopropanol et hexane, 25°C) valeurs en m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>. Composantes dispersives et polaires de la tension de surface des chars.

➡ Solides à forte affinité pour des espèces non polaires (environ 74 mN m<sup>-1</sup>)

## CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

### Propriétés de surface des chars CCA vs bois de pin

- Formation d'agglomérats de métaux à la surface du char
- Tension de surface polaire plus élevée en présence de métaux
- Forte affinité pour les composés non polaires

### Perspectives : propriétés catalytiques (Fig 3)

- Expériences de craquage d'hydrocarbures par suivi de la production d'hydrogène
- Suivi de la texture de la surface (blocage de pores par dépôt de carbone)
- Evolution et caractérisation des propriétés de surface ?

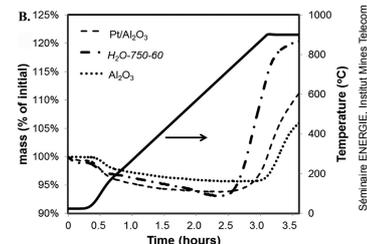


Figure 3 : Exemple de test catalytique, suivi de la masse de catalyseurs (Pt supporté sur alumine, alumine et char de peuplier) lors de la décomposition du méthane. Le char est issu de bois de peuplier et contient des clusters de Fer. Figure reproduite de Klinghoffer, Castaldi, Nzihou, Ind. Eng. Chem. Res., 2012.

## INTRODUCTION ET CONTEXTE

- Recyclage du  $CO_2$  dans un procédé de gazéification de la biomasse (Projet ANR ReCO2).
- Amélioration de la compréhension des mécanismes de la gazéification en atmosphères mixtes ( $H_2O + CO_2$ ).
- Conclusions divergentes dans la littérature sur l'action du  $CO_2$  introduit comme co-réactif avec  $H_2O$  (inhibition, additivité, synergie).

## MATERIEL ET METHODES

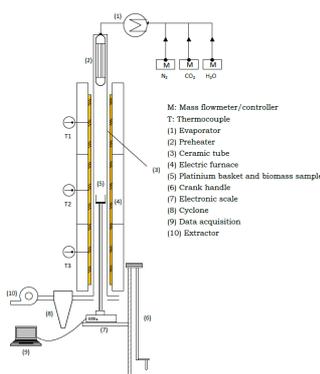
### Macro thermogravimétrie

- Vitesse de chauffe rapide ( $> 100^\circ C/min$ )  $\rightarrow$  char flash
- Essais en conditions isothermes
- Atmosphère modifiable ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  et mélanges) avant ou pendant l'expérience
- Taille des particules de 0,5 à 4 cm
- Mesure au niveau du mg/s

### Conditions expérimentales

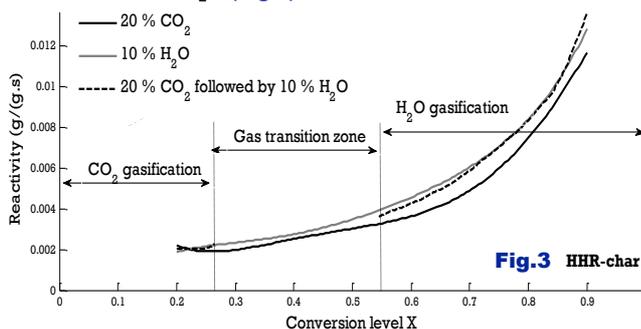
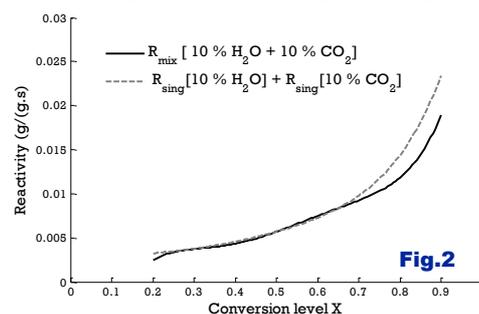
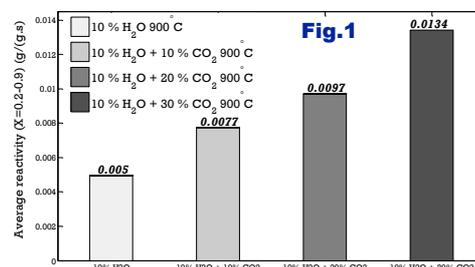
Reacting medium	Reacting gas partial pressure (atm)	Temperature ( $^\circ C$ )
$H_2O$	0.1, 0.2, 0.3	800, 850, 900, 950
$CO_2$	0.1, 0.2, 0.3	850, 900, 950
$H_2O/CO_2$	0.1/0.1; 0.1/0.2; 0.2/0.1	900

- Biomasse : Hêtre (épaisseur 1 mm, taille 4-5 mm)



## RESULTATS ET DISCUSSION

- Pour les chars flash le rapport de réactivités ( $R_{H_2O}/R_{CO_2}=1,9$ ) est plus faible que pour des chars standard ( $R_{H_2O}/R_{CO_2}=2,5-5,0$ )
- La réactivité du char augmente avec l'introduction du  $CO_2$   $\rightarrow$  Il n'y a pas d'inhibition (Fig.1).
- La réactivité du char en atmosphère mixte ( $H_2O + CO_2$ ) est la somme des réactivités en atmosphères pures (Fig.2).
- Modifier l'atmosphère de gazéification lors de l'essai montre que la gazéification partielle du char sous  $CO_2$  n'influence pas sa réactivité sous  $H_2O$  (Fig.3).



## CONCLUSION

- En condition intrinsèque, la réactivité du char peut être décrite par une loi d'additivité  $R_{H_2O+CO_2} = R_{H_2O} + R_{CO_2}$

## PERSPECTIVES

- Etude de l'influence des limitations aux transferts sur la réactivité du char en atmosphère mixte.
- Etude du rôle des minéraux sur la réactivité du char en atmosphère mixte.

## REMERCIEMENTS

- Les auteurs remercient Mr. Bernard Auduc pour son support technique, ainsi que l'Agence Nationale de la Recherche pour le financement du projet RECO2

### Parties prenantes



Université de Toulouse



### Auteurs

Chamssedine Guizani  
F. Javier Escudero Sanz  
Sylvain Salvador

### Partenaires



## Parties prenantes



Plaquettes de pin torréfiées à différentes températures

## La torréfaction : une étape de prétraitement d'avenir

Qu'est ce que la torréfaction ?

- Traitement thermochimique doux en absence d'oxygène entre 240°C et 300°C.

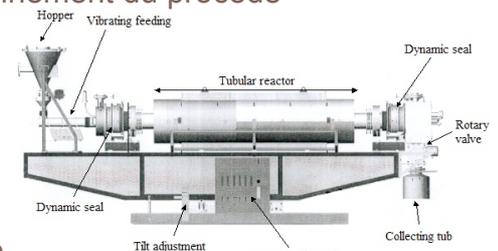
Quelles sont les avantages de la biomasse torréfiée ?

- Matériau homogène et hydrophobe : plus facile à stocker et à transporter ; propriétés moyennes proches de celles du charbon : intérêts en co-combustion.
- Meilleures broyabilité et coulabilité : intérêts techniques et avantages économiques pour les étapes de broyage et pour l'injection dans un gazéifieur ou une chaudière.
- Plus grande densité énergétique : PCI plus élevé, coûts réduits.

## Torréfaction en four tournant

1. Etude des paramètres de fonctionnement du procédé

- Temps de séjour : durée de la torréfaction.
- Niveau de température.
- Taux de remplissage et mélange de la charge.



Four tournant pilote de RAPSODEE

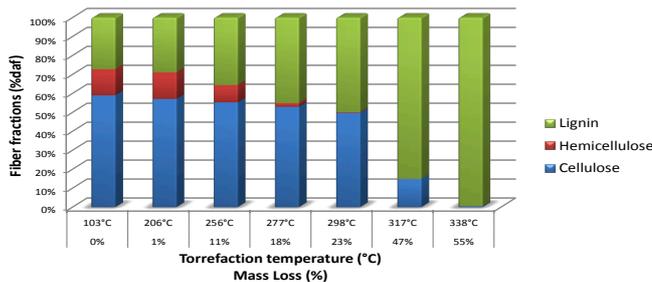


## Auteurs

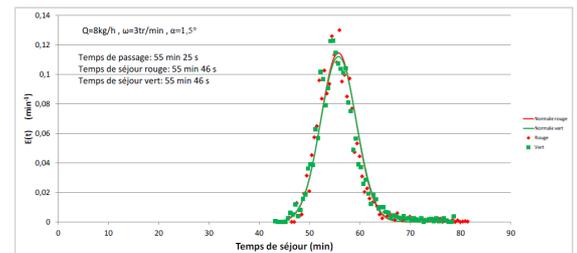
Baptiste COLIN  
Jean-Louis DIRION  
Patricia ARLABOSSE  
Sylvain SALVADOR

2. Etude de l'effet de la torréfaction sur la biomasse

- Composition chimique, composition en fibres.
- Pertes de masse, PCI.
- Cinétiques réactionnelles.



Effet de la température de torréfaction sur la composition en fibres



Exemple de résultats de distribution de temps de séjour avec des plaquettes de pin

## Partenaires



## Perspectives

1. Modélisation et simulation de la torréfaction en four tournant

- Détermination des conditions optimales de fonctionnement.
- Outil d'aide à la conduite du procédé.

2. Amélioration de la sûreté de fonctionnement

- Etude de l'exothermicité des réactions de torréfaction : apparition de points chauds.
- Etude de l'auto-inflammation de la biomasse torréfiée lors de son refroidissement.

## Parties prenantes



Université  
de Toulouse



## Auteurs

F. Javier Escudero Sanz

## Co-Financeurs



## Partenaires



Pôle de Compétitivité



## CONTEXTE ET POSITIONNEMENT

- Financement Contrat Projet Etat-Région 2007-2013.
- Positionnement basé sur les compétences de RAPSODEE et centré dans le périmètre du pôle de compétitivité Agrimip Innovation.
- Déclarée ICPE nécessitant autorisation (rubriques 2770, 2771 – traitement thermique de déchets) – Procédure en cours.



## Val-ThERA - "Plateforme de Valorisation par procédés Thermiques des Résidus de transformation des Agroressources"

### MATIERES PREMIERES

Sous-produits des transformation de la biomasse  
Résidus de biomasse

### POSITIONNEMENT TECHNIQUE

Génie des procédés Thermochimiques  
Hybridation Solaire-Biomasse

### ENVIRONNEMENT ET DEVELOPPEMENT DURABLE

Analyse des impacts environnementaux,  
sociaux et économiques

## VALTHERA EN CHIFFRES

- Investissement en équipement – 1,02M€.
- Investissement en Bâtiment. – 1,2 M€.
- Bail emphytéotique 18 ans.
- Bâtiment – Surface : 403m<sup>2</sup> SHON  
Hauteur : 6,5m hors tout

## POURQUOI CENTRER VALTHERA SUR LES DECHETS DE BIOMASSE?

### Accessibilité à la ressource → VERROU

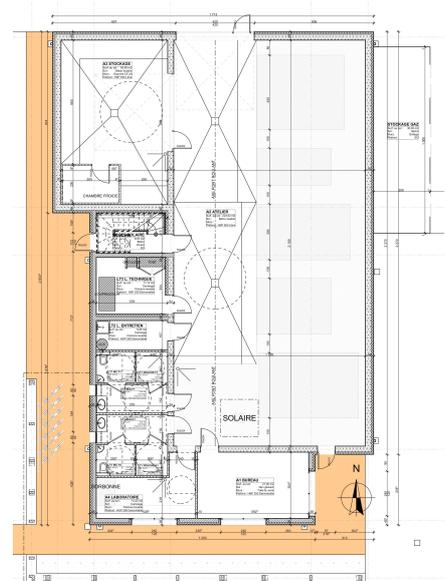
- Tension en émergence sur la ressource (biomasse propre) pour des applications énergétiques.
- Problématique existante de gestion de déchets.
- Les biomasses sans valeur marchand (résidus, déchets) = Gisement à fort potentiel.

### Objectifs

- Adapter la technologie à une large diversité de biomasses exploitables, ainsi que à l'utilisation des mélanges.
- Proposer des solutions de valorisation pour les agro-ressources polluées.

### Equipements

- Boucle de séchage
- Traitement de gaz
- Concentrateur solaire
- Caractérisation des émissions gazeuses



## CONTEXTE

- Les traitements et/ou la valorisation des déchets et des biomasses par différents procédés thermiques et biologiques génèrent des polluants gazeux.
- Il s'agit des métaux toxiques évaporés lors de l'incinération des déchets; des gaz inorganiques tels que  $H_2S$ ,  $SO_x$ ,  $NH_3$ ,  $NO_x$  lors des transformations biologiques (aérobie, anaérobie) ou thermiques (pyro-gazéification) des biomasses etc.
- L'identification sélective de ces polluants en phase gazeuse est un enjeu important.
- Dans cette optique, les matériaux à base de phosphates de calcium grâce à leur forte réactivité représentent une option intéressante pour la détection et la collecte des différents polluants évoqués. Un exemple sur le traitement des flux gazeux synthétiques contenant des métaux lourds à haute température est présenté.

### Parties prenantes



Université de Toulouse

Labex



### Auteurs

Mohamed KEMIHA  
Doan PHAM MINH  
Nathalie LYCZKO  
Ange NZIHOU  
Patrick SHARROCK

### Partenaires



## PARTIE EXPERIMENTALE

### Formulation des capteurs

- Hydroxyapatite ( $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ ): 60-95%
  - Gélatine: 5-30%
  - Bioverre ( $SiO_2$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $P_2O_5$ ,  $B_2O_3$ ): 0-10%
- ➔ Formulation, séchage, calcination (1000°C)

## RESULTATS

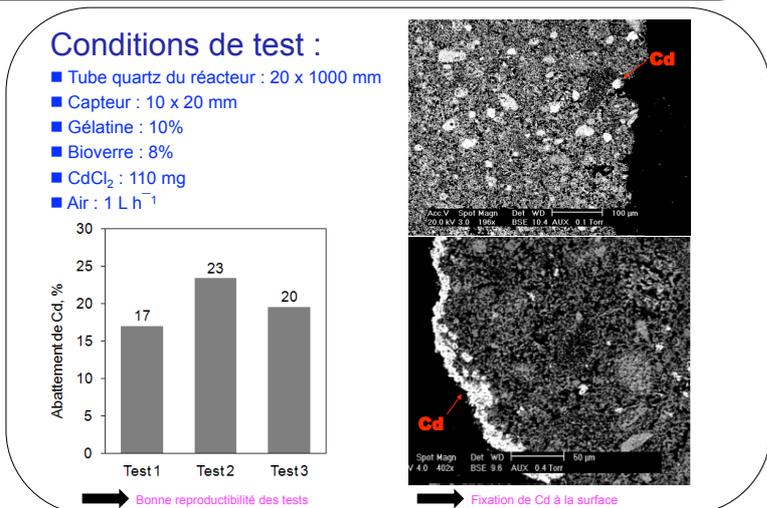
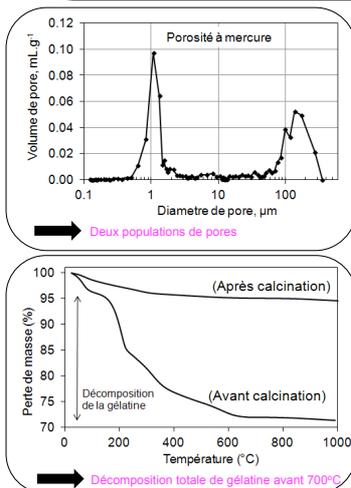
Hydroxyapatite avant formulation

MEB

Hydroxyapatite après formulation

➔ Capteurs sous formes bien définies avec création importante de pores à haute T

### Piégeage des métaux



## CONCLUSIONS

- Différents matériaux poreux (capteurs) à base d'hydroxyapatite ont été obtenus par formulation avec du bioverre et de la gélatine.
- Ces capteurs ont montré des réactivités prometteuses pour la fixation des métaux lourds (Cd, Pb, Zn, Hg) en phase gazeuse à haute température.
- Ces études sont en cours afin d'optimiser la porosité et la résistance mécanique pour différentes applications: adsorption sélective des gaz polluants ( $H_2S$ ,  $NH_3$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$ , goudrons) présents dans les biogaz issus des pyro-gazéifications ou de digestion biologique des biomasses.
- L'utilisation de ces matrices comme capteurs et détecteurs pour le contrôle des émissions polluantes est très prometteuse.

## Parties prenantes



Université de Toulouse



Auteurs

Jean Jacques BEZIAN  
Mouna EL HAFI  
Sylvain SALVADOR

## Partenaires



TOTAL



## OBJECTIFS

### Elaboration de carburants synthétiques à partir de biomasse et d'énergie solaire concentrée

La pyrogazéification de la biomasse solide pour produire des carburants de synthèse est endothermique et nécessite des niveaux de températures compatibles avec les procédés concentrant l'énergie solaire. L'objectif de nos travaux est de concevoir des réacteurs solaires pour effectuer ces réactions thermo-chimiques. Leur usage permettrait d'économiser jusqu'au tiers de la biomasse primaire.

### Traitements thermiques des déchets par énergie solaire concentrée

Le traitement des déchets (ménagers, industriels), et leur éventuelle valorisation sous forme de matière ou d'énergie passe par des procédés pour lesquels l'énergie, à quelque niveau de température que ce soit, peut être un facteur prépondérant quant à la pertinence économique. Nos travaux doivent, à terme, permettre de remplacer la plupart des sources chaudes par des sources solaires à différents niveaux de concentration. De plus, nous étudions l'impact de la présence des diverses espèces polluantes sur l'efficacité des divers traitements.



## METHODE ET MOYENS

### Outils numériques originaux

Avec des chercheurs du LAPLACE, nous avons adapté des codes de simulation numériques basés sur des techniques de Monte Carlo pour concevoir un nouvel environnement de programmation des transferts radiatifs utilisant des bibliothèques de synthèse d'images : EDSTAR.

Des codes globaux de simulation numérique ont aussi été développés, prenant en compte l'optique des concentrateurs, la thermique des récepteurs, ainsi que la thermique et la thermodynamique des réactions, y compris en présence d'espèces minoritaires catalytiques ou inhibantes.

### Prototypes et pilotes expérimentaux

En collaboration avec nos collègues du PROMES, nous nous sommes dotés d'outils expérimentaux performants : des réacteurs à lits fluidisés, des concentrateurs avec source de lumière artificielle et un collecteur linéaire de FRESNEL de 10 m<sup>2</sup> de surface, qui peut chauffer de l'air ou un liquide sous pression. Nous devons nous doter dans un proche avenir de concentrateurs ponctuels de type beam down, dont un pilote de plusieurs dizaines de kW, qui seraient parmi les premières réalisations mondiales de ce nouveau type de concentrateurs.

## RESULTATS ET PERSPECTIVES

### Résultats

Notre environnement de calcul EDSTAR est maintenant utilisé par plusieurs équipes académiques. Une version commerciale : SOLFAST est à la disposition des équipes de recherche industrielles.

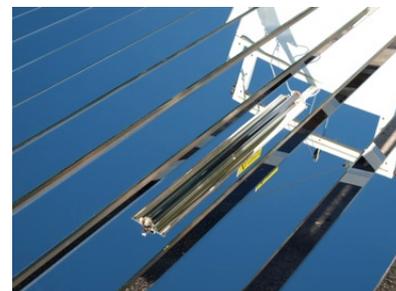
Des essais en laboratoire avec de hautes densités de flux ont montré la création de plusieurs fronts de réaction (séchage, pyrolyse, gazéification) à l'intérieur de particules de biomasse exposées à de fortes densités de flux.

### Perspectives

Nous avons entamé des études quant à l'optimisation couplée des concentrateurs solaires et des réacteurs en fonction des applications projetées.

Nous explorons les potentialités d'autres procédés industriels quant à leur possible solarisation.

Nous travaillons aussi sur des schémas de centrales solaires utilisant de la biomasse en hybridation.





La Revue scientifique internationale  
 « Waste and Biomass Valorization » :  
 Un Journal scientifique international dans le  
 domaine de la Valorisation Energétique et  
 Matière de Biomasse et Déchets (Springer)

Centre RAPSODEE UMR CNRS 5302



**springer.com**

Parties prenantes



Auteur

Ange NZIHOU

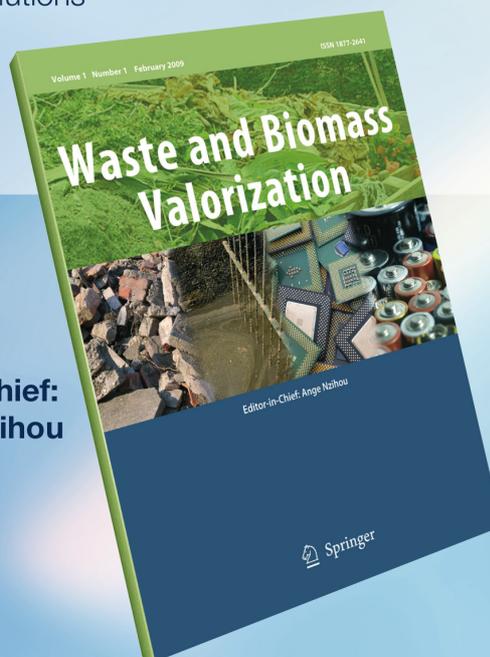
## Waste and Biomass Valorization

**Journal objective:** To gather and disseminate the research and experiences on the transformation of waste and biomass to energy, fuels, and other useful materials (valorization), with particular focus on environmental quality and sustainability goals.

*Waste and Biomass Valorization is currently covered by the following (A&I) services:*

SCOPUS, Chemical Abstracts Service (CAS), Google Scholar, Academic OneFile, EI-Compendex, EnCompassLit, OCLC, Summon by Serial Solutions

ISI Application for Evaluation made on **April 26, 2012.**



**Editor-in-chief:  
Ange Nzihou**

Submit online at:  
[www.editorialmanager.com/WAVE](http://www.editorialmanager.com/WAVE)

Collaborations



Organisateurs



Auteurs

Ange NZIHOU  
F. Javier ESCUDERO SANZ  
Elsa WEISS  
Marion MANIN

Co-Organisateurs



En collaboration avec



August 25-28, 2014  
Rio de Janeiro, Brazil

5<sup>th</sup>  
**International  
Conference on Engineering  
for Waste and Biomass  
Valorisation**

**Submit abstract  
for WasteEng 2014 Conference**

**Breaking barriers and featuring cutting-edge R&D on the Conversion of Biomass and Waste to Energy and useful Materials.**

**WasteEng<sup>14</sup>**

**WasteEng  
Conference Series**

**International recognition - Previous events**

Key issues such as life cycle and risk assessment, decision making are also vigorously addressed!

Keep yourself in the loop with news and updates. Take part in the discussions and receive the latest news on Biomass, Waste and related issues. Check the details on abstract preparation and submit at the conference website:

<http://www.wasteeng2014.org/>

Sincerely yours,

Prof. Ange Nzihou, Chair of WasteEng2014  
Dr. Sergio Guerreiro and  
Prof. Electo Silva Lora  
Co-Chairs of WasteEng2014

**WasteEng  
Conference Series**  
**International recognition - Previous events**

- WasteEng 2012 in Porto (Portugal)- 480 contributions from 53 Countries
- WasteEng 2010 in Beijing (China)- 320 contributions from 50 Countries
- WasteEng 2008 in Patras (Greece)- 280 contributions from 45 Countries
- WasteEng 2005 in Albi (France)- 310 contributions from 49 Countries

**Special Issues:**

- Joint Symposium with American Institute of Chemical Engineering (AIChE) at the Spring meeting, Chicago 2011
- Joint Symposium with American Chemical Society at the ACS national meeting, San Francisco 2010
- WasteEng Africa 2009, Ouagadougou (Burkina Faso)

Organised by :

In collaboration with :

Co-organised by :

[www.wasteeng2014.org](http://www.wasteeng2014.org)

## CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Le recours aux biocombustibles : élément de réponse face au déclin des ressources en énergie fossile

### Parties prenantes



- Augmentation continue de la consommation d'énergie et déclin des ressources en combustibles fossiles → Nécessité de faire appel à des vecteurs énergétiques alternatifs tels que ceux issus de la biomasse (bois, cultures énergétiques dédiées, coproduits agricoles, etc.).
- Problématique de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de polluants en sortie des systèmes de combustion → Recherche de nouveaux modes de combustion ayant une faible empreinte environnementale (co-combustion de charbon et de biomasse dans les centrales électriques).
- Le recours à des vecteurs énergétiques biosourcés en tant qu'additif et/ou substitut va modifier de manière significative les processus de dévolatilisation et d'oxydation des particules de combustible → Nécessité de réaliser des études complémentaires portant sur la co-combustion de mélanges à base de charbon et de biomasse pulvérisés.
- **Objectif** : Obtenir et implémenter des données cinétiques inédites dans les codes de calcul en vue de disposer d'outils numériques prédictifs permettant d'apporter des solutions plus précises à l'échelle de la production industrielle d'énergie.



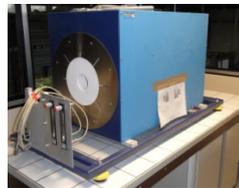
## STRATEGIE DE RECHERCHE ADOPTEE

Acquisition d'une base de données cinétiques inédites pour la combustion des mélanges charbon/biomasse en vue de renseigner les codes de calcul

- Etude du comportement d'oxydation des combustibles biosourcés par thermobalance (analyses thermogravimétriques (ATG), thermiques différentielles (ATD) et calorimétriques différentielles (DSC))
- Etude des émissions polluantes issues de l'oxydation des mélanges charbon/biomasse à l'aide d'un four tubulaire associé à des analyseurs de gaz (étude à faible gradient de chauffe).
- Analyse du comportement en combustion des mélanges charbon/biomasse pulvérisés dans des **conditions de flamme industrielle** (utilisation d'un brûleur hybride permettant de reproduire le mode d'inflammation des particules de combustible, la température de combustion ainsi que les gradients de chauffe (de l'ordre de  $10^6$  K/s) rencontrés industriellement).
- Modélisation des résultats obtenus et obtention de données cinétiques inédites relatives aux processus de dévolatilisation et d'oxydation des combustibles biosourcés.



Thermobalance



Four tubulaire



Brûleur hybride développé au Département Energétique Industrielle



## RESULTATS OBTENUS

Mieux appréhender les processus de combustion des combustibles biosourcés pour mieux prédire le comportement d'installations industrielles

- Obtention de données cinétiques relatives au comportement en dévolatilisation de mélanges à base de charbon et de bois contenant jusqu'à 30% de biocombustible.
- Détermination de l'impact de l'adjonction de la biomasse sur les émissions de  $\text{NO}_x$  et sur les caractéristiques des flammes obtenues (température, stabilité, propriétés radiatives, etc.).
- Implémentation des données obtenues dans des codes de calcul en vue de simuler différents types de technologies de chaudière (chaudière à grille mobile, chaudière à lit fluidisé, spreader stockeur et chaudière à charbon pulvérisé) → Projet partenarial en cours de montage avec la société Européenne de Biomasse et le centre efficacité énergétique des systèmes (CES) de Mines ParisTech.

### Auteur

Romain Lemaire  
Mines Douai  
Département Energétique Industrielle

### Partenaires



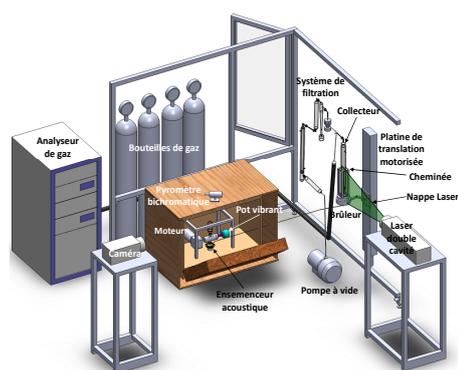
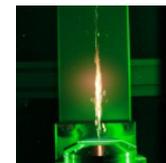
## CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

### Parties prenantes



### Concilier utilisation du charbon et réduction des émissions de GES

- Part croissante occupée par le charbon dans la partition énergétique mondiale → Problématique relative à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES).
- Différentes stratégies de capture et de stockage du CO<sub>2</sub> actuellement étudiées. Dans ce domaine, l'**oxycombustion** permet d'obtenir des fumées riches en CO<sub>2</sub> ce qui limite le coût énergétique associé à sa capture postcombustion.
- Le recours à des atmosphères enrichies en oxygène tend à modifier de manière significative les processus de dévolatilisation et d'oxydation des particules de charbon → Nécessité de mener des études complémentaires portant sur la combustion du charbon pulvérisé sous atmosphères plus ou moins riches en O<sub>2</sub>.
- **Objectif** : Obtenir et implémenter des données cinétiques inédites dans les codes de calcul en vue de disposer d'outils numériques prédictifs permettant d'apporter des solutions plus précises à l'échelle de la production industrielle d'énergie.



Représentation schématique du banc expérimental développé à Mines Douai pour l'étude de l'oxydation des combustibles solides sous atmosphères plus ou moins riches en oxygène

## STRATEGIE DE RECHERCHE ADOPTEE

De l'étude locale des cinétiques de combustion à l'obtention de données extrapolables à l'échelle industrielle

- Mise au point d'un banc expérimental permettant d'analyser le comportement en combustion de solides pulvérisés dans des **conditions analogues à celles rencontrées industriellement** (mode d'inflammation des particules de combustible, température de combustion, gradient de chauffe (de l'ordre de 10<sup>6</sup> K/s)).
- Caractérisation détaillée des champs réactionnels (pyrométrie, PIV) et mesures des taux de dévolatilisation et des concentrations d'espèces diverses (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, etc.) dans les flammes.
- Modélisation des résultats obtenus et obtention de données cinétiques inédites relatives aux processus de dévolatilisation et d'oxydation du charbon sous atmosphères enrichies en oxygène.

### Auteur

Romain Lemaire  
Mines Douai  
Département Energétique  
Industrielle

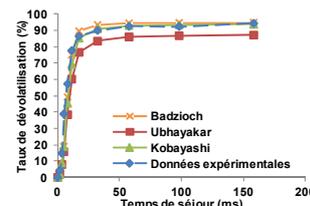
### Partenaires



## RESULTATS OBTENUS

Mieux appréhender les processus d'oxycombustion du charbon pour mieux prédire le comportement d'installations industrielles

- Processus de dévolatilisation peu affectés par l'atmosphère de combustion. Seule l'histoire thermique des particules de charbon tend à influencer de manière significative les taux de matières volatiles relarguées.
- L'oxydation du combustible étant plus complète sous atmosphères enrichies en oxygène, il en résulte une augmentation de la température d'oxydation du charbon ainsi qu'une augmentation des quantités de NO formées (NO combustible).
- La modélisation des profils de dévolatilisation obtenus expérimentalement a permis de déterminer des constantes cinétiques appropriées qui pourront être implémentées dans les codes de calcul en vue de mieux prendre en compte ce processus qui joue un rôle essentiel dans les problématiques de stabilité de flamme au niveau des brûleurs industriels.



## Parties prenantes



## Pourquoi et comment

### Importance des diagrammes de phases

- Le dimensionnement et l'optimisation des procédés nécessitent de connaître parfaitement les diagrammes de phases: ils permettent de définir si une solution est envisageable, sa difficulté de mise en œuvre et son coût.
- La caractérisation des diagrammes requiert des modèle de propriétés thermodynamiques dont la paramétrisation nécessite des données expérimentales.
- Développement d'appareillage de mesures des propriétés thermodynamiques
- Les solutions de captage du CO<sub>2</sub> dépendent des caractéristiques chimiques et physiques du CO<sub>2</sub> mais aussi de son niveau de concentration: gaz acide, point triple à -56,6°C, formation d'hydrates de gaz, affinité avec des solvants physiques, etc..

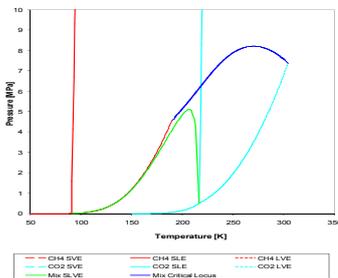


## Auteur

Christophe Coquelet

Directeur Centre Thermodynamique des Procédés (CTP)

+33164694962



## Partenaires



## Solutions matures

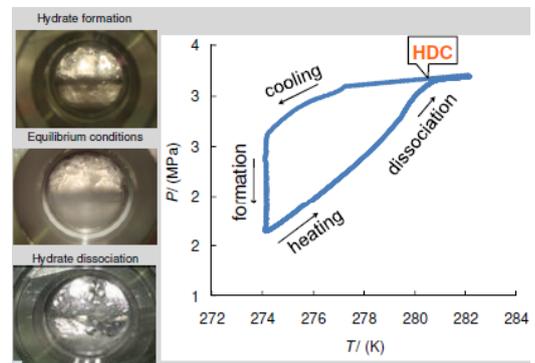
### Captage aux amines ou cryogénique

- Le CO<sub>2</sub> est un gaz acide. Utilisation de solvants chimiques de type alkanolamines (MEA)
  - Fort lien avec le traitement du gaz naturel
  - Nécessité de connaître l'évolution de la pression partielle en fonction des taux charges
  - Utilisation de cellule d'équilibre adaptée: mesures des compositions et développement de modèles spécifiques (modèles électrolytiques)
- Le CO<sub>2</sub> est solide en condition cryogénique
  - Mesure des propriétés d'équilibre liquide/vapeur et solide/liquide
  - Développement de modèles spécifiques (développement de nouvelles équations d'état)

## Solution innovante

### Captage par hydrates de gaz

- Solution moins énergivore à priori
- Besoin de données en présence de promoteurs thermodynamiques (ex: TBAB)
- Développement de méthodologies expérimentales
- Utilisation de codes de calcul pour la caractérisation des données (méthodes Parrish et Prausnitz)



## Parties prenantes



## Auteurs

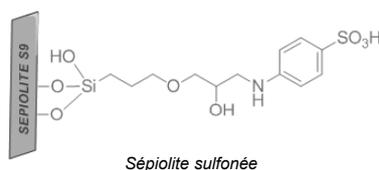
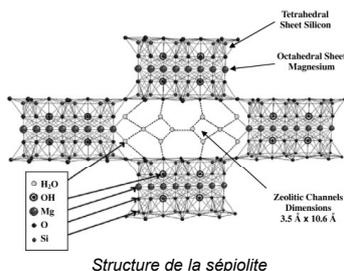
Christian BEAUGER  
Guillaume LAINE  
Arnaud RIGACCI  
Alain BURR  
Aurélie TAGUET  
Belkacem OTAZAGHINE

## Contexte et objectif

- Du fait de leur large domaine applicatif (transport, mobile ou stationnaire), les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) comptent parmi les piles les plus étudiées. Néanmoins, malgré de nombreuses avancées, elles souffrent encore de limitations. L'une d'elles concerne la membrane électrolytique qui limite leur température d'utilisation. Augmenter cette température permettrait, entre autres, de mieux valoriser la chaleur produite, de réduire la taille des systèmes de refroidissement ou encore de limiter les problèmes d'empoisonnement du catalyseur. Cela nécessite de développer des membranes alternatives au Nafion largement employée aujourd'hui.
- L'objectif de ces travaux, menés dans le cadre d'une action du groupe Nanomines, était donc de préparer et évaluer des membranes composites, Nafion-sépiolite, capables de fonctionner à haute température et faible humidité relative pour éviter de devoir augmenter la pression de fonctionnement des systèmes, alors que la conduction protonique nécessite que la membrane soit humidifiée.



Membrane composite Nafion-sépiolite (10 %m)

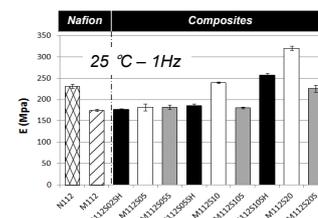


## Modification de la sépiolite et préparation des membranes.

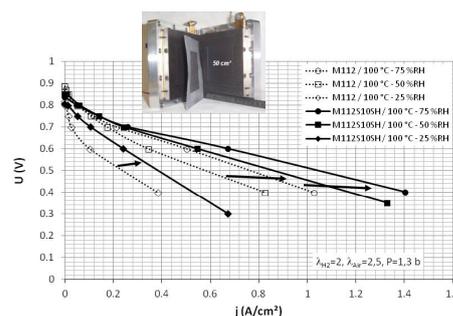
- La sépiolite est une argile fibreuse fortement hydrophile. Ajoutée au Nafion elle permet de retenir l'eau au sein de la membrane. Sa fonctionnalisation (sulfonation) est rendue inévitable par la nécessité de conserver une bonne conduction protonique assurée dans le Nafion par les groupements sulfoniques. Cette étape a fait l'objet d'une étude ciblée.
- Les membranes ont été préparées par évaporation de solvants à partir d'une dispersion de Nafion dans l'alcool additionnée de sépiolite fonctionnalisée. Elles ont été insérées dans des assemblages membrane-électrodes (AMEs) pour pouvoir être testées sur banc de test monocellule dans les conditions de fonctionnement des piles à combustible.

## Performances comparées au Nafion.

- Les membranes composites (M112S...) présentent une capacité d'échange ionique identique à celle du Nafion (N112, M112) tout en ayant une meilleure reprise hydrique, laquelle augmente avec la quantité de sépiolite.
- La résistance à la traction est également améliorée, avec un module élastique augmentant aussi avec la quantité de sépiolite, brute ou sulfonée. On attend donc une durée de vie allongée du fait d'une meilleure résistance aux sollicitations mécaniques résultant du phénomène de gonflement (*swelling*).
- Enfin les performances en AME sont significativement supérieures à celles du Nafion à 100 °C, entre 25 et 75% d'humidité relative. Le gain de puissance à 0,6 V est de 50% à 50% d'humidité relative.



Module élastique mesuré en analyse mécanique dynamique (DMA)



Courbes de polarisation comparées (Nafion pur vs composite 10% m)

## Parties prenantes



## Auteurs

Christian BEAUGER  
Daniela D'Elia  
Jean-François HOCHEPIED  
Arnaud RIGACCI  
Patrick ACHARD  
Nicolas KELLER  
Valérie KELLER

## Partenaires



## Contexte et objectif

■ Photolyse et photoélectrolyse figurent parmi les rares procédés de génération d'hydrogène dits "propres", *i.e.* ne produisant pas de "déchets". Ces processus pâtissent encore d'un manque d'efficacité notamment du fait (i) d'une mauvaise adéquation entre le *bandgap* des semi-conducteurs utilisés et le domaine spectral de la lumière exploitable, (ii) de la recombinaison des porteurs de charge (e<sup>-</sup> & h<sup>+</sup>) créés sous illumination et (iii) de la réversibilité de la réaction de dissociation de l'eau.

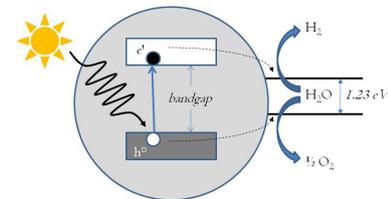
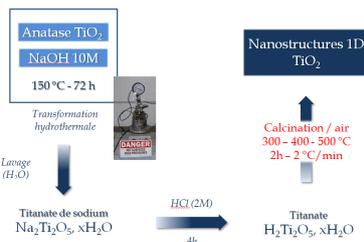


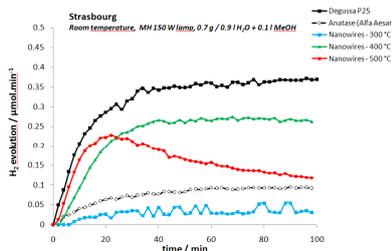
Schéma de principe illustrant la photolyse directe de l'eau sur une particule.

■ L'objectif de ces travaux, réalisés dans le cadre d'un projet Carnot M.I.N.E.S., est d'étudier l'influence de la morphologie de différentes nanostructures de TiO<sub>2</sub> (nanofils et aérogels) sur l'efficacité énergétique de la conversion de l'énergie solaire en hydrogène.

### Voie de synthèse des nanofils



### Génération d'H<sub>2</sub>



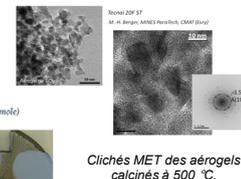
## Nanofils de TiO<sub>2</sub>

- Les conditions de synthèse utilisées permettent d'obtenir des nanotubes de TiO<sub>2</sub> dont la part de TiO<sub>2</sub>(B) décroît lorsque la température de calcination augmente pour laisser place à de l'anatase.
- L'augmentation de la température de calcination semble également provoquer un morcellement des fils conduisant à une dégradation déjà significative à 500 °C, vraisemblablement responsable en partie de la chute de production d'H<sub>2</sub> observée.
- Le *bandgap*, déterminé par traitement des courbes de réflexion diffuse, est proche de 3,25 eV pour l'ensemble des matériaux synthétisés.
- Les nanofils calcinés à 400 °C ont permis d'obtenir des performances meilleures que celles de particules d'anatase commerciales, bien qu'inférieures à celles du P25, photocatalyseur de référence de la société Degussa.

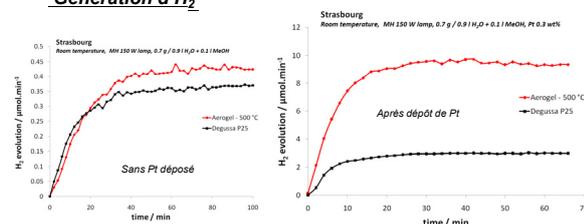
## Aérogels de TiO<sub>2</sub>

- Bien que séchés en conditions supercritiques, les gels préparés conduisent à des aérogels fragmentés, constitués de particules d'anatase après calcination, jusqu'à 500 °C. A 600 °C apparaît déjà la phase rutile, moins adaptée à la photolyse de l'eau.
- Après calcination à 500 °C, le matériau obtenu a un *bandgap* voisin de 3.25 eV et présente des performances supérieures à celle du P25.
- L'écart de performance est encore plus marqué pour les matériaux supportant des nanoparticules de platine (déposées par réduction de sels de Pt, H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>) qui se révèlent être trois fois plus actifs que le P25.

### Voie de synthèse des aérogels



### Génération d'H<sub>2</sub>



## Contexte et objectifs

### Parties prenantes



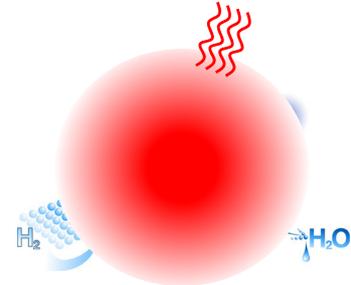
### Auteurs

Christian BEAUGER  
Patrick ACHARD  
Rudolf METKEMEIJER

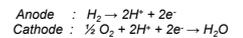
### Partenaires



- Les piles à combustible basse température à membrane échangeuse de protons (PEMFC) ont l'avantage « d'adresser » un large domaine applicatif. L'électricité et la chaleur, produites à partir d'hydrogène et d'oxygène, peuvent être avantageusement utilisées pour développer les transports électriques, augmenter l'autonomie des appareils électriques nomades ou encore proposer des systèmes de cogénération efficaces pour l'habitat par exemple.
- Depuis plus de 20 ans les recherches menées à MINES ParisTech (CEP-Sophia puis PERSEE) visent à améliorer la connaissance de ces systèmes pour proposer des architectures innovantes et augmenter leur efficacité énergétique, principalement dans le cadre des applications transports et stationnaires. Elles ont été initiées dans le cadre d'un projet européen piloté par RENAULT et se sont consolidés au travers de plusieurs projets nationaux et européens, en collaboration avec notamment l'ADEME, AIR LIQUIDE, GDF, AXANE, HELION, 3M et plus récemment SYMBIO FUEL CELL.
- Cette activité a pu être menée grâce à la création d'un laboratoire dédié, autorisant des expérimentations en totale autonomie (24/7). Elle permet la formation d'élèves de MINES ParisTech (Ingénieurs et Mastères Spécialisés) et leur apprentissage sur ces technologies de l'hydrogène et des piles à combustible.



Principe de fonctionnement des PEMFC



FEVER (FP5)



ECA-HELION



APACHE (FUI)

## Applications transports (sélection de projets)

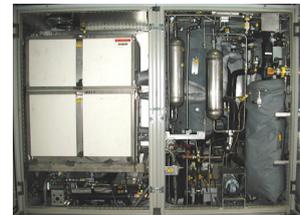
- **FEVER (FP5)** : étude *stack* (3\*10kW) pour la traction automobile.  
*Thèse Luc ROUYEYRE, David PICOT*
- **ECA-HELION** (*Thèse Ewan RAUGEL*), **PAC-SM1&2** (ANR) : PAC anaérobies confinées (sous-marin autonome).
- **APACHE (FUI)** : traction électrique d'avion léger.  
*Thèse Théophile HORDE*
- **NEIGE(CIR)** : *range extender* automobile.  
*Thèse Benjamin De Grisard*

## Applications stationnaires (sélection de projets)

- **PVFCSYS (FP5)** : couplage PV-Electrolyseur-PEMFC.  
*Thèse Séverine BUSQUET*
- **EPACOP (Ademe)** : cogénération pour le bâtiment.  
*Thèse Charles-Emile HUBERT*
- **BALISES (ANR)** : alimentation d'antennes de téléphonie mobile en site isolé.



PVFCSYS (FP5)



EPACOP (Ademe)



BALISES (ANR)

### Parties prenantes



### Auteurs

Alain THOREL  
Anthony CHESNAUD  
João ABREU

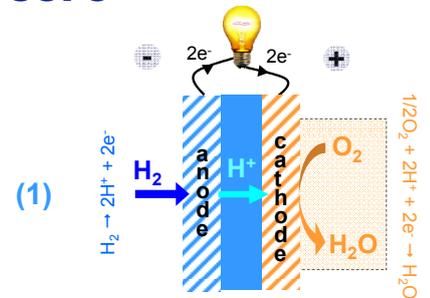
## Etat de l'art : problématique des PCFC\* et SOFC\*\*

### \* Proton Conducting Fuel Cell (1)

- Développement en cours, performances faibles
- Atmosphère oxydante (O<sub>2</sub> / H<sub>2</sub>O) corrosive côté cathodique

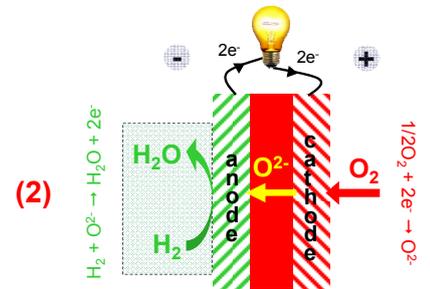
### \*\* Solid Oxide Fuel Cell (2)

- Système plus mature que (1) ; coût élevé, problème de vieillissement
- Température de fonctionnement très élevée (> 900 °C)
- Atmosphère réductrice (H<sub>2</sub> / H<sub>2</sub>O) corrosive côté anodique



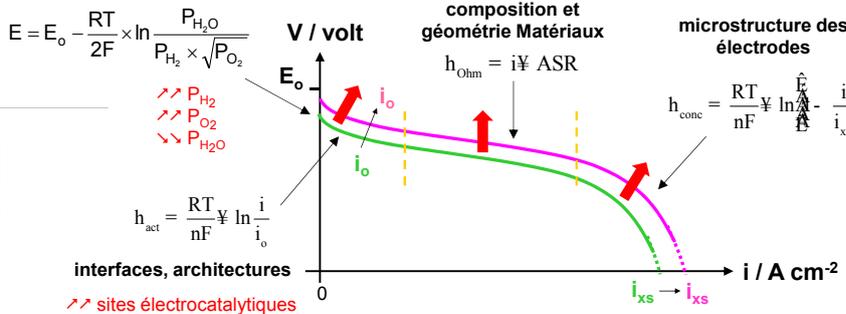
### Dans les cas (1) et (2) :

- L'eau diminue fortement l'efficacité des électrodes
- La présence de l'eau rend très difficile la pressurisation
- Les électrodes ne peuvent pas être optimisées efficacement
- Le fuel ou le comburant sont dilués, abaissant l'efficacité
- Une partie de la chaleur de réaction est perdue



## Un nouveau concept minimisant les surtensions aux électrodes

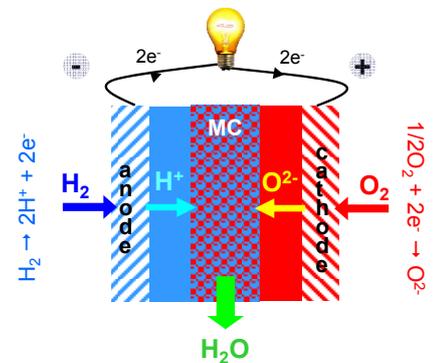
force électromotrice :  $E = E_0 - \frac{RT}{2F} \times \ln \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \times \sqrt{P_{O_2}}}$



$$E = E_0 - i \times R_T - \frac{RT}{F} \times \ln \left[ \frac{1}{2} \times \left[ \left( \frac{i}{i_0} \right) + \sqrt{\left( \frac{i}{i_0} \right)^2 + 4} \right] \right] + \frac{RT}{4F} \times \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{cs}} \right) + \frac{RT}{2F} \times \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{as}} \right) - \frac{RT}{2F} \times \ln \left( 1 + \frac{P_{H_2O}^0 \times i}{P_{H_2O}^0 \times i_{as}} \right)$$

## Les avantages inhérents à ce concept

- Le fuel (côté anodique) ou le comburant (côté cathodique) ne sont pas dilués
- La corrosion des électrodes est fortement limitée
- Chaque compartiment joue un seul rôle et donc peut être facilement optimisé
- Diminution des surtensions d'activation et de concentration aux électrodes
- De l'eau pure valorisable est produite dans la membrane centrale (MC)
- Pressurisation aisée



### Partenaires



Parties prenantes



Auteurs

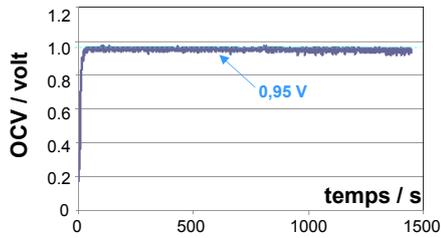
Alain THOREL  
Anthony CHESNAUD  
João ABREU

Partenaires

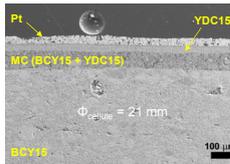


### Preuve du concept : 5 critères (I à V) (électrolyte BCY15 support)

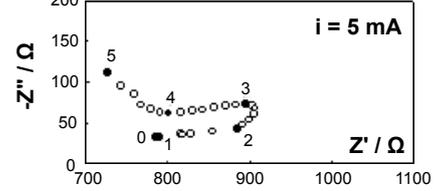
(I) une OCV stable sous H<sub>2</sub> à 600 °C



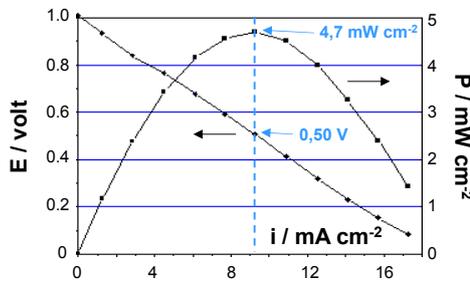
Prototype (électrolyte support)



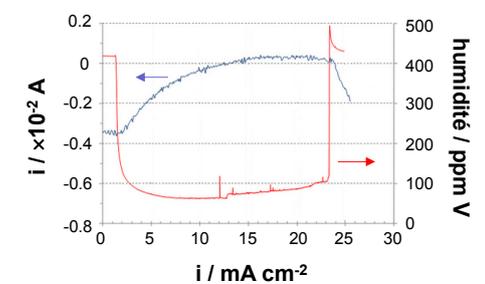
(III) une signature de la formation d'eau par spectrométrie d'impédance



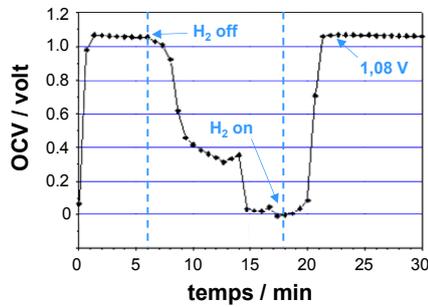
(II) une courbe i/E stable à 600 °C



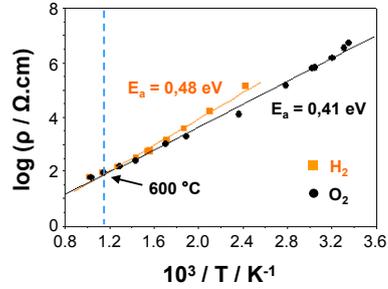
(IV) mesure de la quantité d'eau en fonction du courant débité



(V) cycles H<sub>2</sub> "on" / H<sub>2</sub> "off" à 600 °C

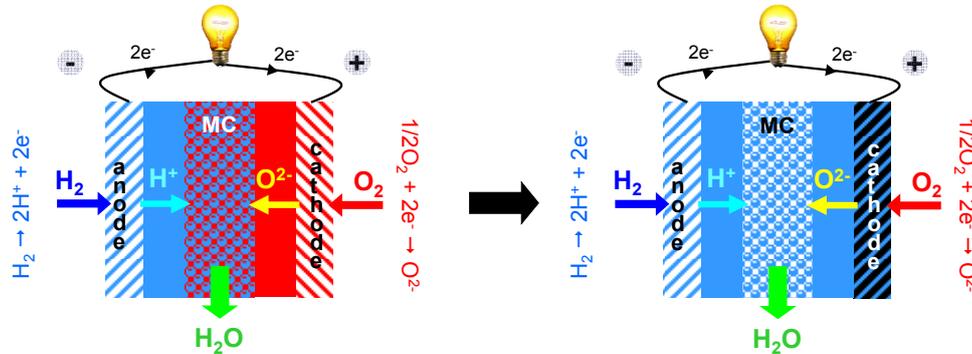


### BCY15 : conducteur mixte (H<sup>+</sup>/O<sup>2-</sup>)



$\sigma_{H^+}$  (BCY15) sous H<sub>2</sub>  
=  $\sigma_{O^{2-}}$  (BCY15) sous O<sub>2</sub>  
à 600 °C

### Amélioration du concept : configuration monolithique®



- Meilleures compatibilités thermo-mécanique et chimique
- // surfaces d'échange et \\\ tortuosité de la phase solide au sein de MC
- Fabrication beaucoup plus aisée



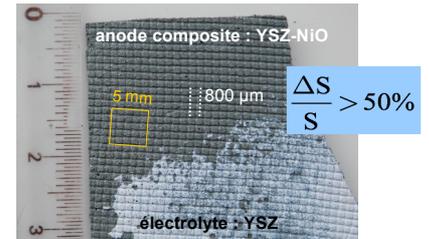
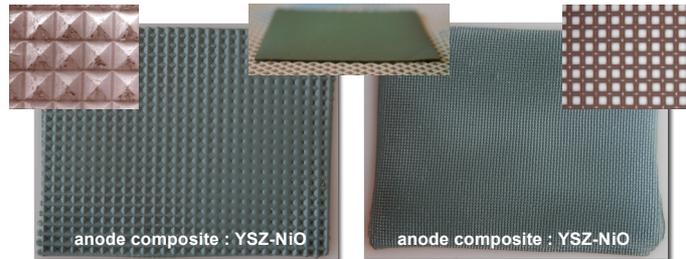
### Parties prenantes



### Auteurs

Anthony CHESNAUD  
Alain THOREL  
Maya GEAGEA  
David MASSON  
Francesco DELLORO

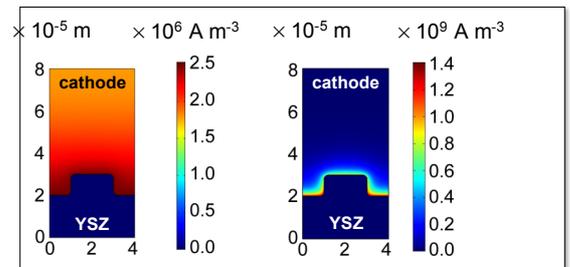
## Architecture des interfaces électrode/électrolyte



### Avancées technologiques

- Intégration bilatérale des composants
- Déploiement des surfaces d'échange
  - proportionnel à la géométrie du motif
  - augmentation des courants d'échange ( $i_0$ )
  - intérêt confirmé par modélisation électrochimique
- Miniaturisation des systèmes (2D → 3D)

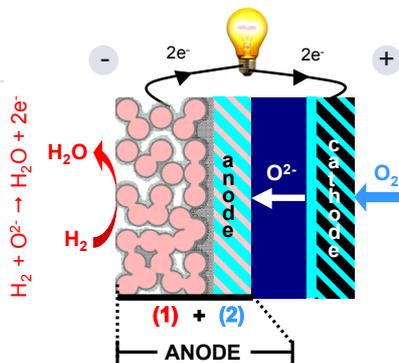
### Modélisation (éléments finis) :



## Un concept à anode support innovante architecturée



### Partenaires



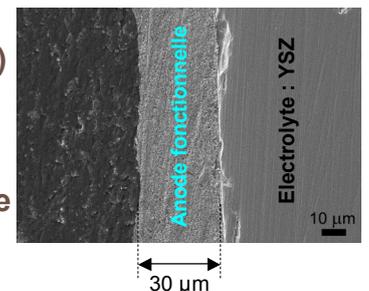
1ère G	2ème G	3ème G	4ème G
ESC	ASC	MSC	???
(-) puissance (+) flexibilité (+) robustesse	(+) puissance (-) flexibilité (-) sensibilité (S) (-) cycle thermique (-) cycle rédox	(+) puissance (-) flexibilité (-) sensibilité (S) (+) cycle thermique (+) cycle rédox	(+) puissance (+) flexibilité (+) sensibilité (S) (+) cycle thermique (+) cycle rédox

### (1) Anode support : bi-composants (métal + céramique)

- Mousse métallique : « intégration mécanique » et « collection du courant »
- Céramique : conducteur mixte  $O^{2-}$  et majoritairement électronique

### (2) Anode fonctionnelle : céramique composite poreuse

- Conducteur mixte,  $O^{2-}$  et électrons
- Réaction d'oxydation de l'hydrogène et évacuation de l'eau formée
- 1 atout majeur : pas de particules de nickel (→ stabilité thermique en cyclage redox)



## Parties prenantes



## Auteurs

Alexandre Boilley

Thierry Ranchin

Centre O.I.E.

Observation, Impacts, Energie

Sophia Antipolis

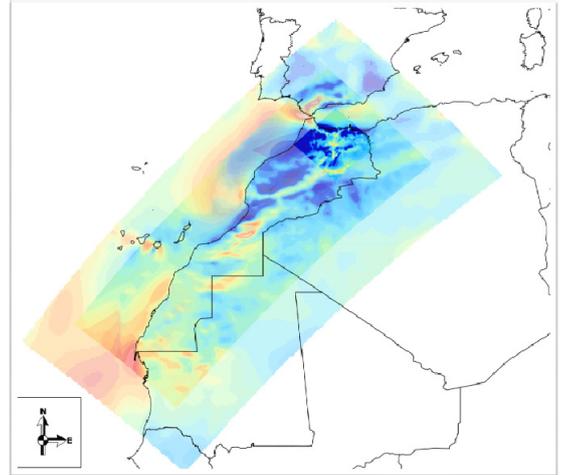
## Partenaires



## PROJET ATLCOTES

### Réalisation d'un atlas éolien pour le Maroc

- Projet en partenariat avec l'Institut de Recherche en Energie Solaire et en Energies Nouvelles (IRESEN).
- Le Maroc s'est engagé dans une évaluation des ressources en énergies renouvelables.
- D'ici 2020, 40 % de l'énergie produite au Maroc le sera par des énergies renouvelables.
- Pour cette raison, il est nécessaire d'évaluer les ressources, en particulier les ressources éoliennes.
- Les méthodes d'évaluation traditionnelles se basent sur un réseau dense de mesures, qui n'est pas disponible au Maroc.
- Le Centre O.I.E. de MINES ParisTech et ses partenaires ont mis en place une méthode basée sur un modèle numérique météorologique afin d'obtenir une longue série de données sur terre comme sur mer.

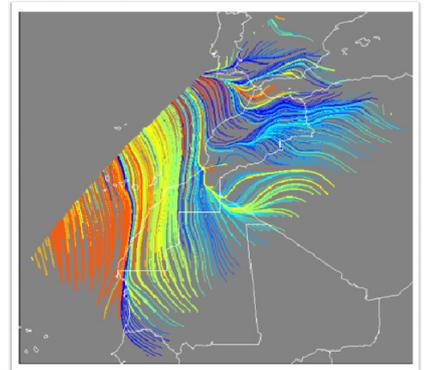


Superposition de la moyenne annuelle de l'intensité du vent (m/s) à 100 m au-dessus du sol pour 25 km, 8 km et 2.5 km de résolution. L'intensité du vent est faible pour les couleurs froides et augmente vers les couleurs chaudes.

## EVALUATION PAR MODELE METEOROLOGIQUE

### WRF

- Nous utilisons le modèle *Weather Research and Forecasting (WRF)*.
- C'est un modèle gratuit et collaboratif mis en place par plusieurs agences publiques américaines comme le *National Center for Atmospheric Research (NCAR)* et le *National Center for Environmental Predictions (NCEP)*.
- Un modèle météorologique résout les équations de Navier-Stokes complétées par les équations de la thermodynamique.
- Nous couplons WRF avec les ré-analyses du *European Center for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF)*.
- L'année 2009 sur le Maroc a été calculée au centre O.I.E..
- La formation du personnel marocain a permis la simulation de l'année 2010 à l'IRESEN.

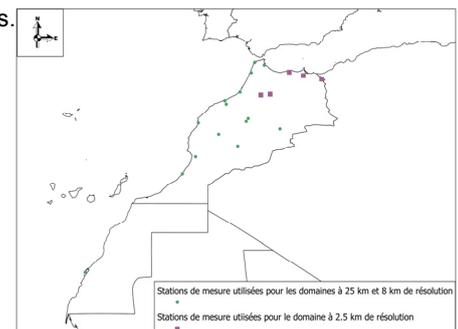


Représentation de l'atlas sous forme de lignes de courant.

## RESULTATS

- Obtention de trois atlas à différentes résolutions horizontales : 25 km, 8 km et 2,5 km.
- Nous avons comparé les résultats obtenus sur un an à 25 km et 8 km avec 24 stations de surface et les résultats à 2.5 km avec 5 stations.
- La synthèse des résultats est présentée dans le tableau ci-dessous.

	Vent moyen à 10 m (m/s)	Biais (m/s)	EQM (m/s)	Ecart-type	Corrélation
Observations	4,0				
25 km	4,9	0,9	2,0	1,5	0,650
8 km	4,5	0,6	1,8	1,4	0,716
2.5 km	3,8	0,5	1,4	1,2	0,772



## Parties prenantes



## Auteurs

Jérémy Buchholtzer

Philippe Blanc

Pierre Massip

Centre O.I.E.

Observation, Impacts, Energie

Sophia Antipolis

## Partenaires



## Projet

- Projet en partenariat avec EDF R&D dont le but est de prédire à très court terme la production d'énergie d'origine photovoltaïque à la Réunion pour optimiser la gestion du système électrique de l'île.
- L'objectif est de prévoir le rayonnement direct et diffus sur les panneaux solaires à l'aide de deux caméras hémisphériques (fish-eye) qui filment le ciel pour ensuite faire le lien avec la production électrique.
- Une précédente étude a déjà établi un lien entre les images issues d'une caméra et les mesures pyranométriques associées [1].
- Ce travail s'appuie sur les données d'une station météorologique complète de très grande qualité installée à la réunion par EDF R&D en 2011 (cf. photo à droite) [2].



Station météorologique à la réunion

## Méthode

### Principales étapes

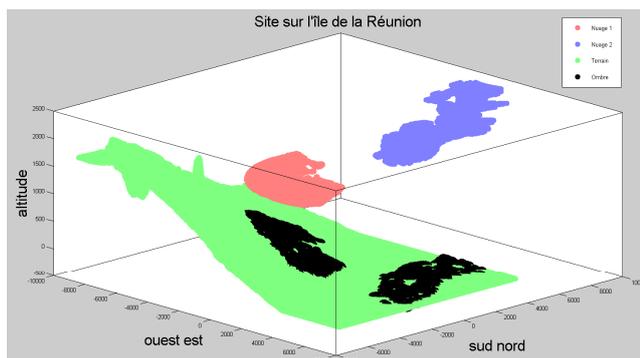
- Calibration des caméras pour lier chaque pixel à une direction de visée en azimut et élévation.
- Segmentations permettant de détecter les nuages dans chacune des images.
- Mise en correspondance de pixels entre les images à l'aide de techniques de corrélation ou de SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*).
- Estimation de la hauteur des nuages obtenue par *stéréophotogrammétrie*.
- Détermination de l'ombre portée des différents nuages sur la centrale photovoltaïque (connaissant la position angulaire du Soleil)



Image du ciel prise avec la caméra

## Résultats préliminaires

### Vision en 3D de la scène



Représentation de la scène en 3D

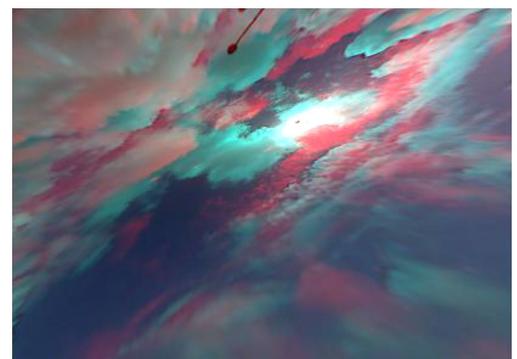


Image anaglyphe à regarder avec les lunettes 3D

- Description 3D des nuages.
- Ombres portées des nuages sur les panneaux photovoltaïques.
- Perspectives : prédiction de l'ombre portée par la mise en place d'un algorithme de flot optique et prédiction de la production électrique.

[1] C. Gauchet, P. Blanc, B. Espinar, Surface solar irradiance estimation with low-cost fish-eye camera, in: COST WIRE Workshop on "Remote Sensing Measurements for Renewable Energy", DTU Risoe, DK, 2012: p. 4.

[2] Contact: Dominique DEMENGEL (dominique.demengel@edf.fr)



## Parties prenantes



## Auteurs

Zhipeng Qu  
Philippe Blanc  
Benoît Gschwind  
Mireille Lefèvre  
Lucien Wald

Centre O.I.E.  
Observation, Impacts, Energie  
Sophia Antipolis

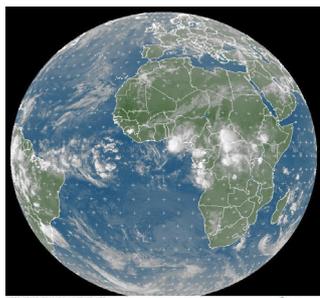
## Partenaires



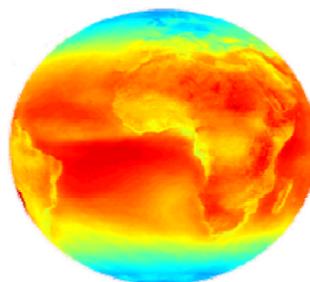
## Evaluation du rayonnement solaire à partir des images satellitaires

La connaissance précise du rayonnement solaire disponible au sol est importante dans les domaines de l'énergie, de la biomasse, de l'agriculture, du climat, de la santé humaine, etc. Les images satellitaires sont maintenant un moyen indispensable pour l'évaluation de ce rayonnement.

Images du satellite Météosat



Rayonnement solaire à la surface



Méthodes Heliosat  
➔

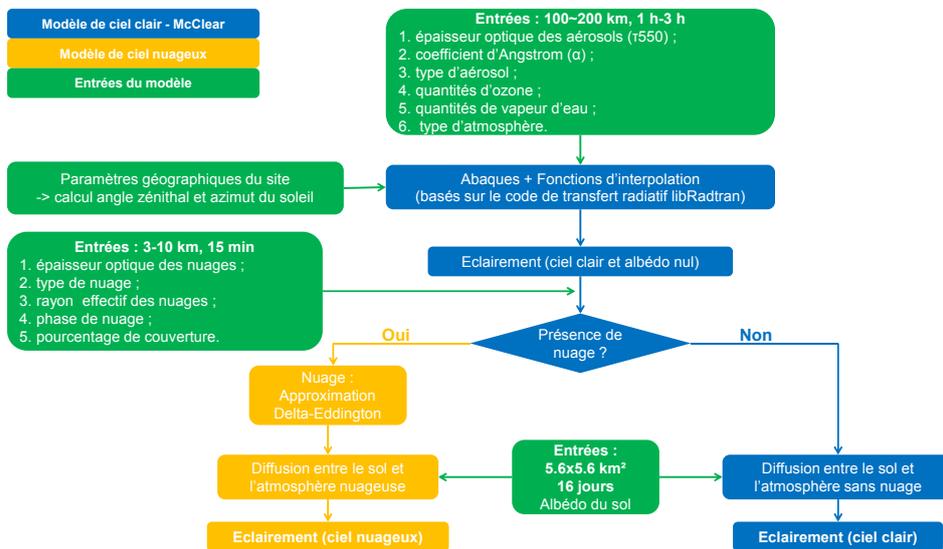
## Une nouvelle méthode : Heliosat-4

### Heliosat-1,-2 : méthodes existantes basées sur l'indice d'enneuagement

- La principale limitation : paramètres internes déterminés de manière empirique qui influencent de façon importante la qualité du résultat.

### Heliosat-4 : une nouvelle méthode basée sur la simulation du transfert radiatif dans l'atmosphère

- Les différents phénomènes d'interaction du rayonnement avec les gaz, les aérosols, les gouttelettes d'eau, les cristaux de glace des nuages sont pris en compte.
- Les paramètres d'entrée sont issus des images satellitaires (propriétés des nuages, réflectance du sol), et des modèles météorologiques (quantité d'ozone, vapeur d'eau et propriétés des aérosols).
- Les paramètres d'entrée sont fournis par le projet européen MACC/MACC-II (<http://www.gmes-atmosphere.eu>).



La structure de la méthode Heliosat-4

## Conclusion

- La méthode Heliosat-4 permet une évaluation rapide et précise du rayonnement disponible au sol.
- La validation de Heliosat-4 montre une performance satisfaisante par rapport aux méthodes existantes et éprouvées pour le rayonnement global ; ainsi qu'une meilleure performance pour le rayonnement direct, qui est essentiel pour les systèmes de conversion par voie thermodynamique.
- Cette première version de Heliosat-4 sera mise en opération en octobre 2013.
- Des améliorations sont prévues sur la qualité des données d'entrée et le modèle de ciel nuageux.



## Parties prenantes



## Auteurs

Mireille Lefèvre  
Isabelle Blanc  
Benoît Gschwind  
Thierry Ranchin

Centre O.I.E.  
Observation, Impacts, Energie  
Sophia Antipolis

## Partenaires



## Les particules fines : un polluant majeur pour la santé humaine

Projet EnerGEO : simulation de scénarios et calcul d'impacts des polluants sur l'environnement et la santé humaine : <http://www.energeo-project.eu>

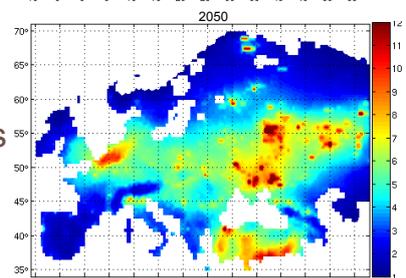
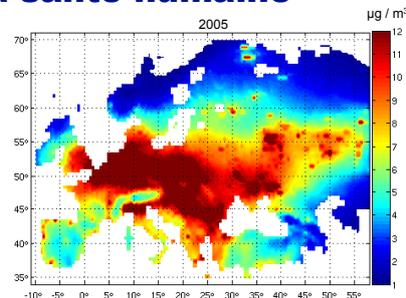


L'espérance de vie : un indicateur clé pour comparer les impacts des scénarios énergétiques

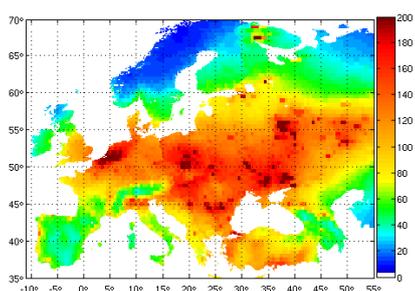
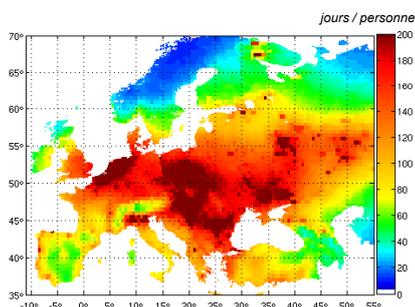
- Scénario de référence : législation européenne actuelle avec son objectif de réduction de certains polluants dont les  $PM_{2.5}$ , particules fines de taille 2.5  $\mu m$ .
- Evaluation d'autres scénarios pour différents bouquets électriques par rapport à cette référence, à l'égard des impacts sur l'espérance de vie.
- Méthode standard d'évaluation **statique** : elle considère comme constante la concentration en  $PM_{2.5}$  pendant la vie de la population exposée.

Nécessité d'intégrer la dimension temporelle des scénarios

- Horizon des scénarios énergétiques : 2050.
- Evolution importante de l'exposition aux  $PM_{2.5}$  pendant la vie de la population.
- Proposition d'une méthode **dynamique** afin de comparer les scénarios dans leur dimension temporelle.



Concentrations en  $PM_{2.5}$  dans le scénario de référence en 2005 et en 2050. Résolution 20 km x 20 km.



Perte d'espérance de vie pour la population des plus de 30 ans en 2005, pour les approches statique (en haut) et dynamique (en bas) avec le scénario de référence. Résolution 20 km x 20 km.

## Cartes d'impacts sur la santé humaine

### Sources des données

- IIASA<sup>[1]</sup> pour les cartes de concentrations en  $PM_{2.5}$  estimées par le modèle GAINS dans le scénario de référence en 2005, 2030, 2040 et 2050.
- Les Nations Unies<sup>[2]</sup> pour les effectifs par cohorte de 5 ans et leurs taux de mortalité par pays, de 1950 à 2100. La population concernée est celle des plus de 30 ans en 2005.
- SEDAC<sup>[3]</sup> pour les cartes de densité de population en 2005, 2010 et 2015.
- Pope (2002)<sup>[4]</sup> pour la valeur du risque relatif d'exposition aux  $PM_{2.5}$  d'une population des plus de 30 ans.

### Prise en compte de la dynamique du scénario

- Algorithme basé sur une approche recommandée par la « Task Force on Health »<sup>[5]</sup> et IIASA<sup>[1]</sup> : la perte d'espérance de vie représente la différence entre l'espérance de vie calculée avec les concentrations en  $PM_{2.5}$  observées au long de la vie d'une population, et l'espérance de vie sans exposition.
- Interpolations temporelles des concentrations en  $PM_{2.5}$  dans les scénarios (de 2005 à 2050) tout au long de la vie de la population.

## Conclusions

- Résultats sensiblement différents, de l'ordre de 20 % inférieurs dans le modèle **dynamique** par rapport au modèle **statique** ne prenant pas en compte l'évolution temporelle des taux de polluants.
- Approche plus réaliste dans le cadre de comparaisons de scénarios.
- Tableaux et cartes d'impacts pour les différents scénarios accessibles sur le site de la plate-forme d'intégration du projet européen EnerGEO : [http://viewer.webservice-energy.org/energeo\\_pia/index.htm](http://viewer.webservice-energy.org/energeo_pia/index.htm)



[1] International Institute for Applied Systems Analysis, Austria. [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. The 2010 Revision of the World Population Prospects. [3] SEDAC : Socio Economic Data and Applications Center, Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University. Gridded Population of the World (v3). [4] Pope, C. et al. 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama-Journal of the American Medical Association*, 287: 1132-1141. [5] TFH. 2003. Modelling and assessment of the health impact of particulate matter and ozone. EB.AIR/WG.1/2003/11, United Nations Economic Commission for Europe, Task Force on Health, Geneva.

The research leading to these results receives funding from European Community's Seventh Framework Programme (FP7, 2007-2013) under Grant Agreement Number 226364.

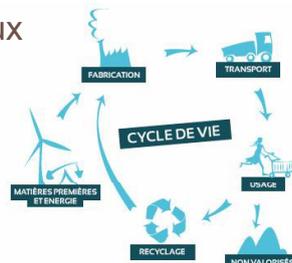


## Problématique environnementale de la production d'électricité

Parties prenantes

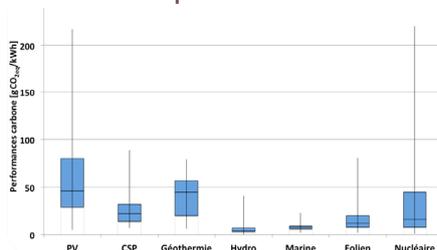
Des panoramas exhaustifs d'impacts environnementaux des filières à définir...

- Développement des filières de production d'électricité bas carbone
- ➔ Approche directe, considérant les impacts uniquement liés à la phase d'exploitation insuffisante
- Prise en compte détaillée du cycle de vie nécessaire
- ➔ Approche détaillée chronophage et intensive en ressources humaines



L'approche cycle de vie, « du berceau à la tombe », source : ADEME

... Mais filière de production électrique = ensemble hétérogène de systèmes



Variabilité des performances carbone des filières de production [1]

- Agrégation des performances carbone (g CO<sub>2</sub> eq/kWh) des systèmes pour représenter une filière
- ➔ Large variabilité, sur plusieurs ordres de grandeur
- Evaluation des origines de la variabilité des impacts environnementaux nécessaire mais indisponible
- ➔ Agrégation des revues de littérature insatisfaisante, besoin d'outils d'aide à la décision identifiant les filières et les configurations de ses sous-systèmes minimisant les impacts

## Comment prendre en compte l'hétérogénéité des filières tout en simplifiant l'approche cycle de vie?

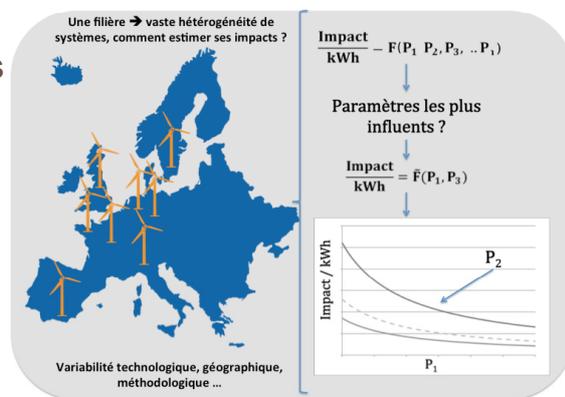
Partenaires

Outil simplifié estimant les performances carbone des filières et de ses sous-systèmes

- 1 - Identification des sources de variabilité d'une filière (technologique, géographique, méthodologique)
- 2 - Caractérisation de ces sources (intervalles de valeurs, distributions statistiques)
- 3 - Simulation type Monte Carlo des performances environnementales d'un ensemble de systèmes représentant la filière

### ➔ Profil environnemental de la filière

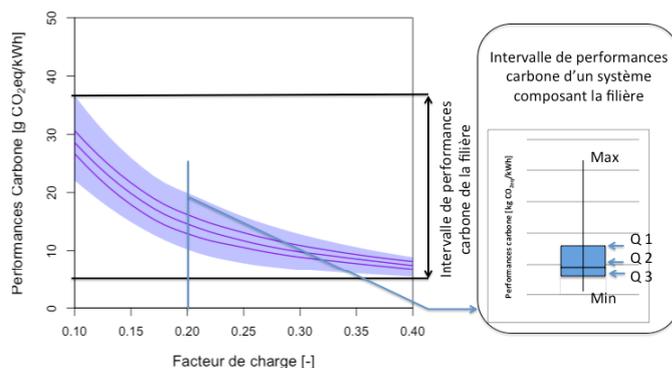
- 4 - Identification des sources principales de variabilité par analyse de sensibilité globale
- 5 - Définition d'un modèle simplifié d'estimation des performances environnementales des systèmes



Comment estimer les performances environnementales d'une filière simplement ? [2]

## Résultats

- 1<sup>ère</sup> application aux performances carbone de la filière éolienne terrestre en Europe
- ➔ Identification du facteur de charge et de la durée de vie comme paramètres les plus influents sur les performances carbone
- Modèle simplifié défini, permettant l'accès rapide à l'information environnementale pour les filières et ses sous-systèmes
- Application à venir sur les filières photovoltaïque et géothermie



Modèle simplifié d'estimation des performances carbone de l'éolien pour une durée de vie de 20 ans [2]

[1] IPCC, *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2011.

[2] P. Padey, R. Girard, D. le Boulch, and I. Blanc, "From LCAs to Simplified Models: A Generic Methodology Applied to Wind Power Electricity," *Environmental Science & Technology*, 2013.



## Parties prenantes



## Auteurs

Isabelle Blanc  
Didier Beloin-Sain-Pierre

Centre O.I.E.  
Observation, Impacts, Energie  
Sophia Antipolis

## Partenaires



## Public visé : les concepteurs de systèmes PV

Première méthode d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques sur leur cycle de vie en France

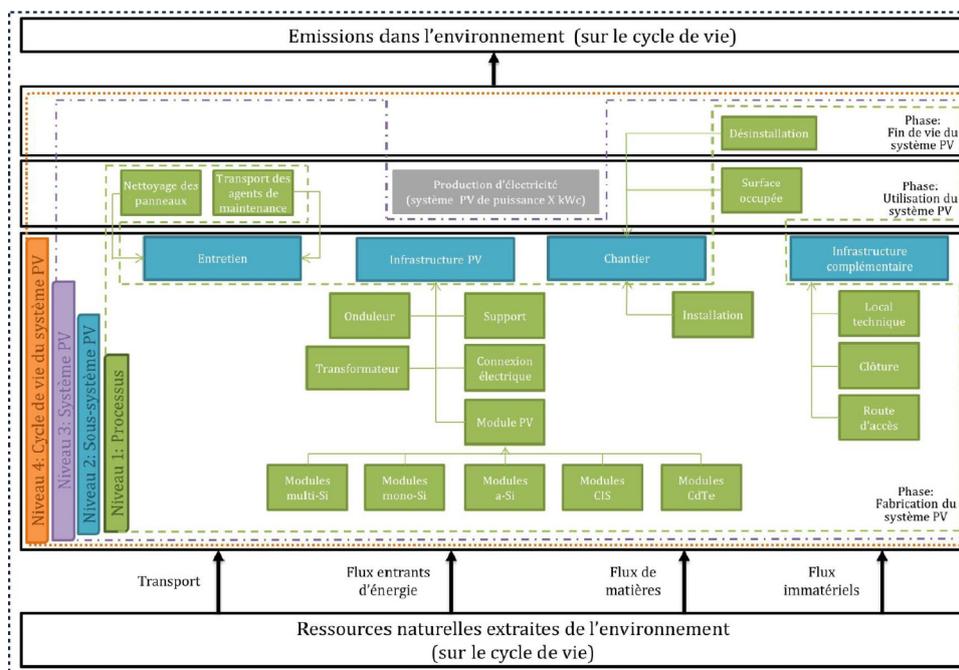
- apporter aux instances décisionnaires responsables de la conception, de la prescription et de l'exploitation des systèmes PV une information relative aux impacts environnementaux générés par le système PV tout au long de son cycle de vie, afin qu'ils l'intègrent comme critère de décision dans leur stratégie d'investissement.
- permettre d'évaluer les systèmes PV sur la base de leurs performances environnementales, et ce dans un cadre comparable.



## Une approche conservatrice & incitative

Un mode d'emploi détaillé de la méthode sur 4 niveaux

- Certaines valeurs de facteurs d'impacts, nécessaires à l'évaluation des impacts environnementaux du système photovoltaïque, proposées par défaut à l'utilisateur de ce référentiel sont volontairement conservatrices.
- Ce choix de valeurs conservatrices a pour objectif d'inciter les fabricants de composants du système photovoltaïque à substituer ces valeurs conservatrices par leur propre valeur afin de mieux correspondre à la réalité environnementale des composants du système PV.
- Les valeurs conservatrices ainsi proposées ne sont pas représentatives de la filière photovoltaïque et doivent être strictement utilisées dans le cadre de ce référentiel méthodologique.



## Conclusion

- Un premier cadre méthodologique soutenu par l'ADEME et réalisé en concertation avec un panel d'industriels parties prenantes : EDF, GIMELEC, TOTAL, SER, JUWI, SOLAIS, PHOTOWATT, CEA, CERTISOLIS, CSTB, NEXIS
- 5 ans de validité mais révision possible selon les avancées méthodologiques et l'évolution du marché.



## Auteurs

René GUYONNET  
Alexandre GOVIN  
Olivier BONNEFOY

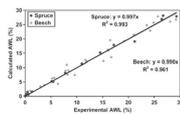
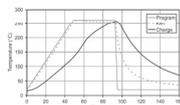
## Partenaires



## L'Ecole des Mines de Saint-Etienne

### Une expertise de longue date

- Nombreuses études sur les traitements biologiques et thermiques de biomasse depuis les années 80. Application à l'énergie, aux matériaux (bois massif, composites plâtre-bois), à la chimie (pharmacopée), ...
- Dépôt de brevets, cession de licences et construction d'usines pour la torréfaction et la réification.
- Plusieurs projets collaboratifs en cours, ouverture possible du partenariat à des acteurs académiques et/ou industriels.



## Torréfaction

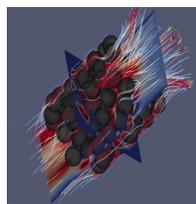
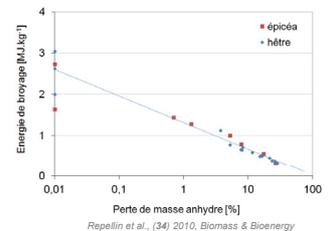
### Un procédé - clé

- Idéal pour augmenter : (i) la densité volumique [MJ/kg] pour réduire coûts transport (ii) la fragilité du bois pour réduire coûts de broyage et (iii) l'homogénéité entre biomasses pour régulariser les procédés en aval.
- Biomasse 2G = sans conflit avec cultures alimentaires. Production de combustible (agro-pellets et gaz naturel de synthèse) pour chauffage et/ou production d'électricité et carburant liquide pour transport routier.
- De nombreuses études réalisées sur les conditions optimales de torréfaction.

## Broyage

### Un poste consommateur d'énergie

- Objectif : diminuer la consommation énergétique en optimisant les conditions de torréfaction et la technologie du broyeur.
- Dispositif expérimentaux : broyeurs, presse, tomographe RX, émission acoustique.



CFDEM-LBM Project

## Sûreté du procédé de torréfaction

### Risque d'emballement thermique (pyrolyse/incendie)

- Approche expérimentale multi-échelles (cm<sup>3</sup> et dm<sup>3</sup>). Extension future au m<sup>3</sup>.
- Modélisation numérique : Discrete Element Method + CFD (Lattice Boltzmann Method) avec couplage aéraulique / thermique.

## Transport pneumatique et injection

### Rhéologie des poudres de biomasse

- Influence des conditions de torréfaction et de broyage sur l'aptitude d'une poudre à être transportée.
- Dispositifs expérimentaux : rhéomètre à poudre, colonne de fluidisation + tomographie à capacitance électrique, cellule de cisaillement, analyse morphologique, volumétre, Flodex, ... + modélisation DEM.



Rhéomètre à poudre FT4

## ● Problématique

### Parties prenantes



■ Ce projet vise en premier lieu le captage et le stockage du CO<sub>2</sub> produit par des chaudières industrielles, c'est-à-dire par des chaudières dont la puissance thermique est typiquement comprise entre 50 et 300 MWth.

■ Le procédé envisagé est basé sur le captage du CO<sub>2</sub> en voie sèche par des absorbants calciques. L'originalité du projet consiste à utiliser des absorbants spécialement synthétisés pour disposer d'une forte stabilité et permettre ainsi de très nombreux cycles « carbonatation/décarbonatation ».



## ● Nouvelle formulation d'absorbants

■ L'évaluation des performances des absorbants a été effectuée en les soumettant à des cycles répétitifs « carbonatation – décarbonatation », dans une thermobalance. Il s'agit donc d'une analyse thermogravimétrique sur des échantillons de faibles quantités (moins de 1 g).

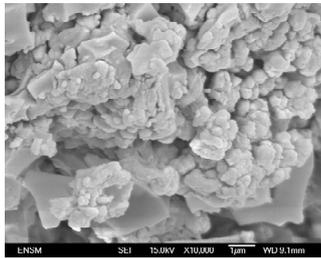
■ Trois absorbants ont été testés : un calcaire naturel (carrières de Tamuin au Mexique), un absorbant commercial (développé pour des applications AER et WGS) et un absorbant issu des travaux de formulation menés par l'EMSE, préparé à partir d'un mélange de CaCO<sub>3</sub> et de Ti(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>.



### Auteurs

Laetitia VIEILLE<sup>a</sup>  
Alexandre GOVIN<sup>a</sup>  
Philippe GROSSEAU<sup>a</sup>  
Bruno ADAM<sup>b</sup>  
Gérard MARTIN<sup>b</sup>  
John ROESLER<sup>c</sup>

### Partenaires



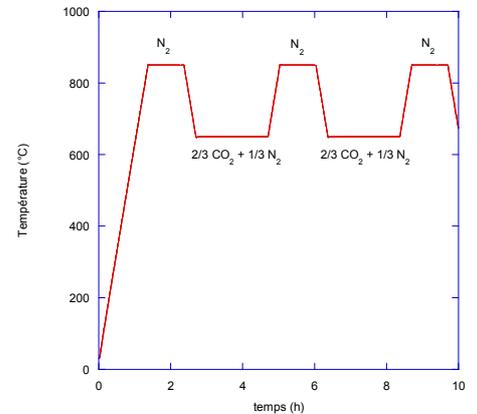
Cliché MEB de la chaux dopée à l'éthoxyde de titane

■ Particules fines de CaO dispersées dans des blocs denses de TiO<sub>2</sub>, ceci permet de stabiliser la microstructure de CaO et éviter le frittage des particules entre elles.

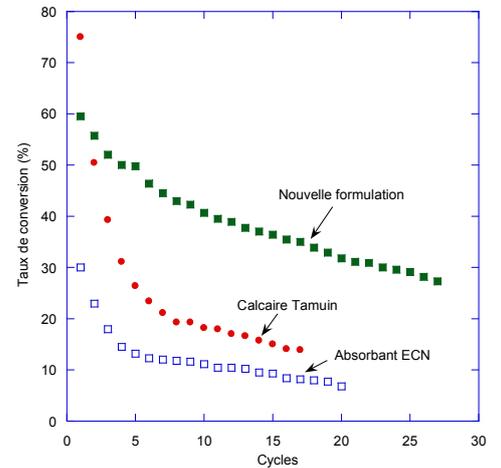
$$\text{Taux de conversion (\%)} = (\text{mol de CO}_2 \text{ absorbé} / \text{mol de CaO}) \times 100$$

■ Après 30 cycles, la réactivité de l'absorbant EMSE est nettement supérieure à celle du calcaire naturel de Tamuin ou à celle du produit commercial (absorbant ECN).

■ Le taux de conversion ↓ quand le nombre de cycles ↑



Protocole opératoire



Résultats des tests de vieillissement des différents absorbants

## ● Conclusion

■ Les performances de captage du CO<sub>2</sub> pour un absorbant naturel (type calcaire Tamuin) sont moins bonnes que celles du produit formulé, de plus, il est moins résistant au vieillissement.

■ De part les nombreuses formulations testées, il apparaît que le dopage de CaO à l'éthoxyde de titane est le plus efficace. La teneur en dopant doit être assez importante afin de stabiliser la microstructure de CaO et éviter le frittage des particules entre elles.

■ On peut considérer qu'avec un calcaire naturel, on peut maintenir une capacité moyenne d'absorption de 20 % pendant 5 à 10 cycles, tandis qu'avec un produit formulé spécifiquement, comme le carbonate de calcium dopé à l'éthoxyde de titane, cette capacité pourrait être maintenue pendant 50 à 100 cycles.

## Parties prenantes



Laboratoire George Friedel  
UMR CNRS 5307



## Vers une nouvelle génération de centrales solaires thermiques

### Centrales solaires de type Fresnel

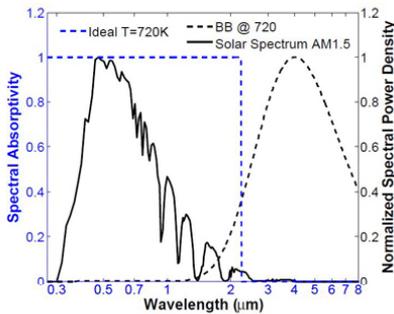
- Le rayonnement réfléchi concentré dans un seul tube absorbteur
- Températures atteintes (600-650°C) supérieures que dans les centrales paraboliques linéaires → **rendement plus élevé** *mais*
- Utilisation de tubes doubles évacués problématique
- Durabilité des matériaux ?
- Comment assurer une faible émissivité IR ?



CNIM Fresnel/DSG pilot plant in La Seyne sur Mer

### Solution envisagée

#### Absorbteurs revêtus et microtexturés



<http://spie.org/x37901.xml?ArticleID=x37901>

- Assurer l'absorption maximale de la partie visible du spectre solaire
- Limiter, en même temps, l'émissivité IR
- ↓
- Multicouches de films minces aux propriétés optiques exigées
- 'Microtexturation' de la couche extérieure
- ↓
- Un simple tube absorbteur métallique (acier inoxydable, alliage base Ni) revêtu assurerait alors la même fonction qu'un tube double évacué, tout en pouvant être exploité à des températures plus élevées

## Auteurs

Jacques Stolarz  
Krzysztof Wolski  
Max Boudes  
Claire Roume

## Partenaires



Institut de recherches en ingénierie des surfaces



Laboratoire Hubert Curien  
UMR CNRS 5516

### Comment garantir la durabilité des absorbteurs ?

#### Sollicitations très complexes

- Contraintes mécaniques (pression interne) et thermiques cycliques, fatigue-fluage, oxydation, stabilité optique et adhérence du revêtement ... pendant 20 ans de service envisagés
- ↓
- Problème du choix de matériau à résoudre (acier inoxydable, alliage base-Ni)

#### Développement d'une procédure d'essai accélérée adaptée aux absorbteurs

- Objectif : reproduire, lors d'un essai de quelques jours, l'endommagement pouvant se développer pendant des années de service
- ↓
- Solutions inspirées par les études de la corrosion sous contrainte (CSC) et de fatigue-corrosion (FC)

## Est-il possible de produire de l'hydrogène par voie biologique avec une approche « waste to energy » ?

Parties prenantes



- Sélection de résidus agricoles pour équilibrer les besoins nutritionnels des microorganismes lors de la co-digestion .
- Application à la problématique Colombienne



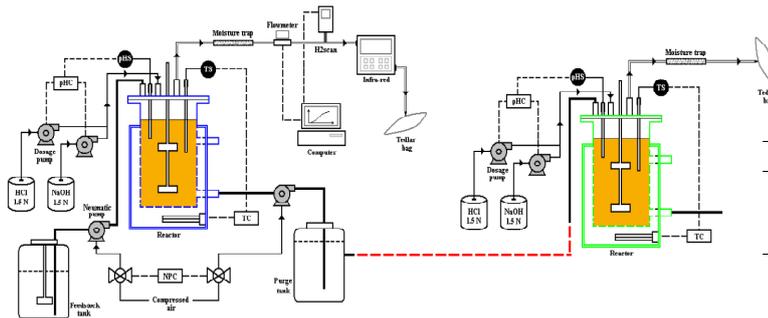
Substrate	Nutrients	Carbohydrates	Alkalinity	Microorganisms	Availability
	↓ Mg, Zn and Fe	↓ Soluble	↑ Buffer	↑ <i>Bacillus and Clostridium</i>	↑ Continuous
	↑	↑	↓	↓	↓

Tableau 1. Caractéristiques du lisier de porc et des résidus de café.

## Conditions opératoires

Auteurs

Y. Andres M.A. Hernández,  
Ecoles des Mines de Nantes,  
DSEE, Nantes, France  
and  
M.S. Rodríguez  
CIIA, Department of Civil and  
Environmental Engineering,  
University of Los Andes



Parameter/Condition	C1	C2	C3	C4
Substrates ratio (SM:CM)*	7:3	5:5	3:7	5:5
OLR (kg COD/m <sup>3</sup> d)	6	6	6	12

Parameter\Reactor	Units	Hydrogen	Methane
Working volume	L	5.5	6.0
Feedstock	L	3.5	4.0
pH		5.5	6.5
Temperature	°C	55	35
Retention time	d	1	7
Agitation	rpm	200	100

Tableau 2. Paramètres opératoires pour la production d'hydrogène et de méthane

## Résultats

Condition	H <sub>2</sub> reactor kJ/Lw	CH <sub>4</sub> reactor kJ/Lw	H <sub>2</sub> contribution %	Overall energy kJ/Lw
1	1.4	79.1	1.7	80.5
2	4.5	66.6	6.4	71.1
3	5.8	54.9	9.5	60.6
4	9.5	91.8	9.4	101.3

- L'hydrogène produit représente 10 % de l'énergie produite par le système,
- Nécessité d'ajouter une deuxième étape pour une stabilisation complète des résidus,
- Le premier réacteur sert de prétraitement pour la production de méthane.

Si l'objectif est la production d'hydrogène et le traitement des déchets l'approche proposée montre sa faisabilité.

## Parties prenantes



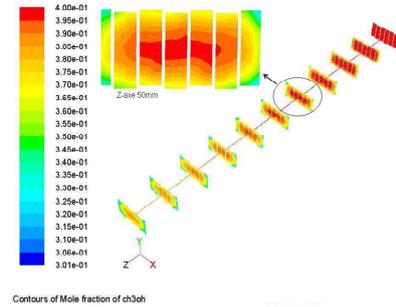
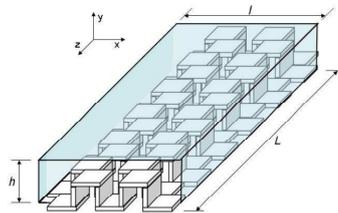
## Auteurs

Peerhossaini H., Prof., LTN, Nantes  
de la Valle D., HDR, LTN, Nantes  
Llorca J., Prof., UPC, Barcelone  
Casanova I., Prof., UPC, Barcelone  
Saikaly K., Doctorat soutenu  
Pacheco L., Doctorat soutenu  
Hedayati A., Doctorant SPIGA double diplôme  
Truffet L., HDR, DAP, Mines Nantes  
Lacarrière B., Dr, Mines Nantes  
Le Corre O., Mines Nantes

## Vapo-reformage du méthanol

Intensification de l'activité par intégration de promoteur de turbulence

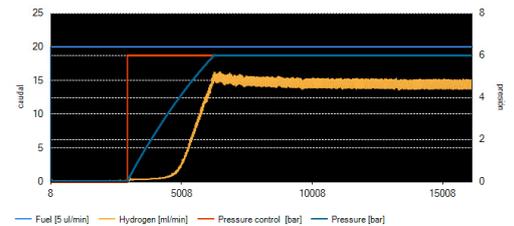
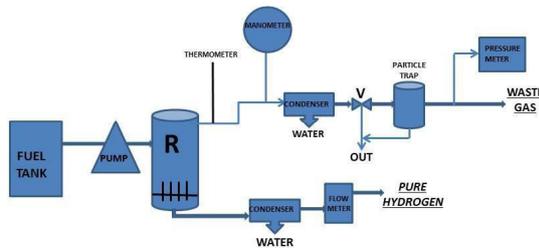
- Echangeur multi-fonctionnel catalytique.
- Modélisation 1D, 2D et 3D en stationnaire.
- Modèle réactionnel de Peppley à .
- Ailettes décalées de type OSF.



## Vapo-reformage de l'éthanol

Catalyseur Pd-Rh/CeO<sub>2</sub> avec purification

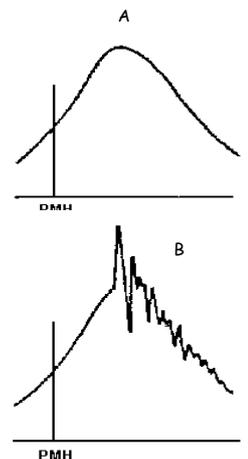
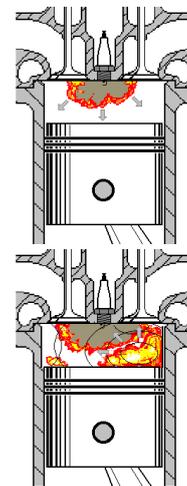
- Caractérisation du catalyseur.
- Contrôle de la production H<sub>2</sub> en fonction de la puissance électrique en sortie de PAC.



## Cliquetis dans les moteurs à gaz

Protection préventive de la qualité du gaz

- Combustion anormale.
- Caractérisation par l'indice de méthane, mélange H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>.
- Approche expérimentale, haute fréquence.
- Proposition d'une courbe enveloppe du signal filtré.
- Création d'un dispositif breveté de protection.
  - WO2008035014



## Parties prenantes



## OBJECTIFS DES RECHERCHES

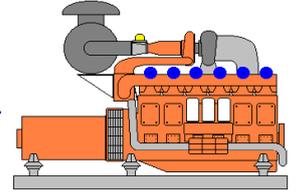


Raréfaction des énergies fossiles

Utilisation de carburants alternatifs (Biogaz)

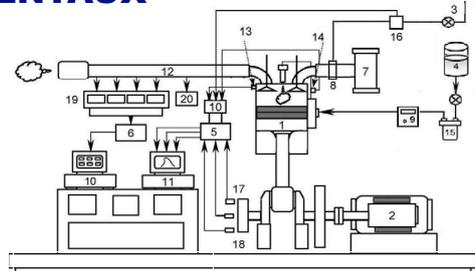
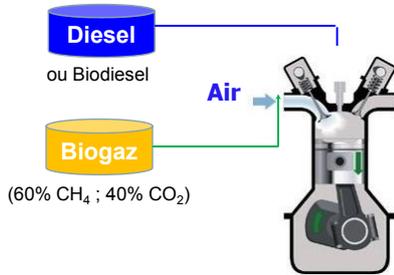
Etude du mode de combustion Dual-fuel (DF)

Essais banc moteur & Modélisation thermodynamique



Performances ?  
Emissions polluantes ?

## METHODE & MOYENS EXPERIMENTAUX



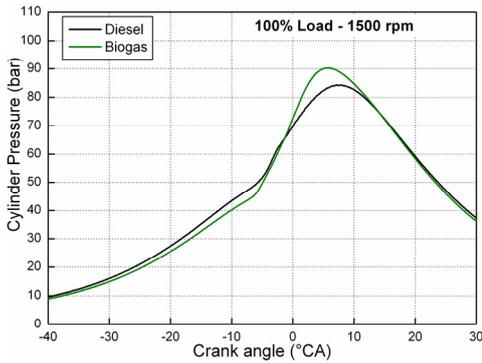
1. Test engine	11. Fast data acquisition system
2. Dynamometer	12. Slow data acquisition system
3. Gaseous fuel supply	13. Cylinder pressure sensor
4. Gasoil tank	14. Injection pressure sensor
5. A/D card for pressure	15. Diesel fuel filter
6. A/D card for Analyzer	16. Gaseous fuel flow meter
7. Air tank	17. TDC encoder
8. Air-gas Mixer	18. Speed sensor
9. Diesel flow meter	19. Exhaust gas analyzer
10. Charge Amplifier	20. Smoke meter

## Auteurs

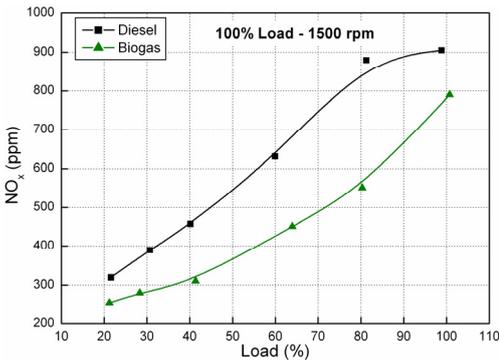
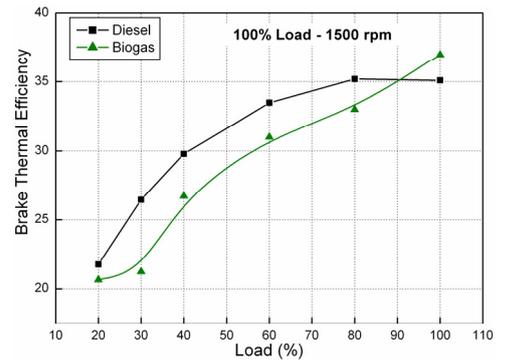
Khaled LOUBAR  
Mohand TAZEROUT  
GEPEA, UMR 6144, DSEE,  
Ecole des Mines de Nantes

- ❖ Moteur Diesel modifié pour fonctionner en Dual-fuel,
- ❖ La consommation de gasoil : ~10% de la puissance nominale,
- ❖ Aspiration naturelle,
- ❖ Comparaison fonctionnement Diesel (D) Vs Dual-fuel (DF).

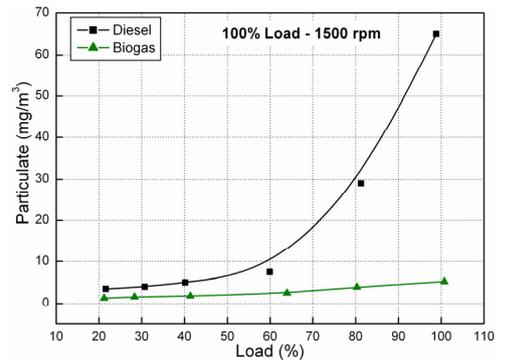
## EXEMPLES DE RESULTATS



- ❖ Pic de pression plus important en DF
- ❖ Rendement proche de celui du Diesel et devient plus intéressant aux fortes charges pour le Dual-fuel



- ❖ Emissions de NOx plus faibles en DF
- ❖ Réduction drastique des émissions de particules en DF par rapport au Diesel



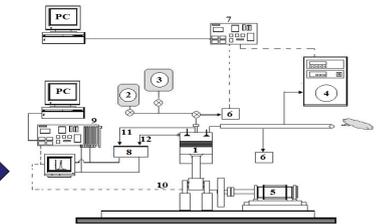
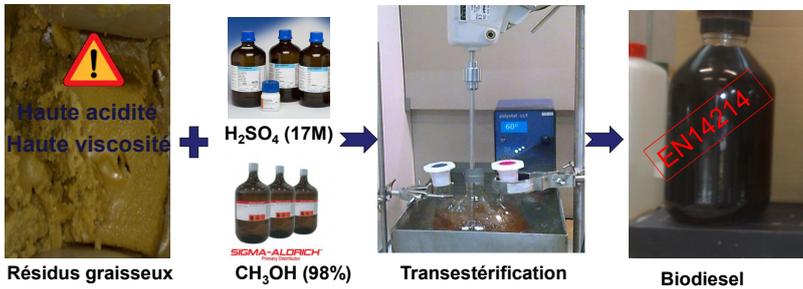
Parties prenantes



## Contexte et objectifs

Dans le cadre de la valorisation énergétique des déchets graisseux, cette étude a pour but de déterminer les conditions optimales conduisant à la production du biodiesel à partir des résidus graisseux issus des activités menées par le centre de traitement des matières d'assainissement (CTMA) situé à Lussac (33). Et de tester les performances et les émissions polluantes d'un moteur diesel alimenté par le biodiesel élaboré et de les comparer à celles produites par le Diesel conventionnel.

## Méthodes expérimentales



1. Moteur diesel
2. Réservoir du biodiesel
3. Réservoir de gasoil
4. Analyseur de fumée
5. Frein dynamométrique
6. Analyseur des particules
7. Système d'acquisition lente
8. Amplificateurs de signal
9. Système d'acquisition rapide
10. Capteur de vitesse de rotation
11. Capteur de pression d'injection
12. Capteur de pression cylindre

Auteurs

Nom des auteurs  
Sary AWAD  
Maria PARASCHIV  
Khaled LOUBAR  
Mohand TAZEROUT

Partenaires



## Résultats

### Production du biodiesel

Les conditions optimales de production du biodiesel

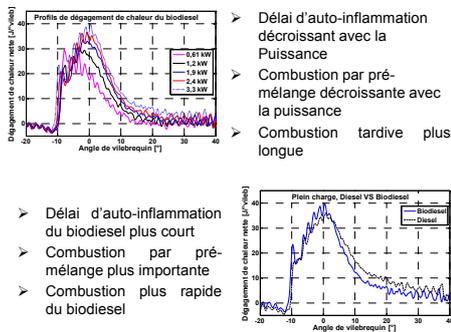
	*Méthanol [%]	* $H_2SO_4$ [%]	Durée [h]	**Acidité du produit [ $mg_{KOH}/g_g$ ]
1 <sup>ère</sup> étape	30	3,6	3	
Lavage	*20% (volume) d'eau			
séparation	Production de 100g de résidus solides			
Séchage	*5% (masse) $CaCl_2$			
2 <sup>ème</sup> étape	30	1,8	3	8,4
Lavage	*20% (volume) d'eau			
Séchage	*5% (masse) $CaCl_2$			
Rendement	98%			0,3

\* Les valeurs sont rapportées à la masse de graisse utilisée  
\*\* Teneur en acides gras libres

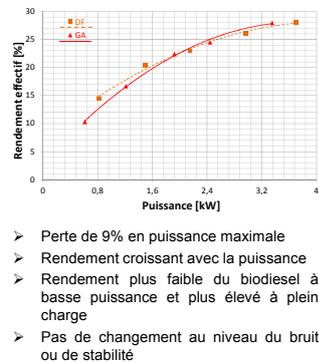
### Propriétés du biodiesel élaboré, comparées à la norme Européenne EN14214

Propriété	Unité	EN14214	1 <sup>ère</sup> étape	2 <sup>ème</sup> étape
Densité	g/l	860-900	870	870
Formule empirique			$C_{18}H_{35}O_2$	$C_{18}H_{35}O_2$
PCI	MJ/kg		37	37
Viscosité à 40°C	mm <sup>2</sup> /s	3,5 - 5,0	5,7	5,0
Point éclair	°C	>101	138	138
Teneur en Eau	%	<0,05	-	-
Acidité	$mg_{KOH}/g$	<0,5	8,4	0,3
Teneur en Soufre	%	<0,001	<0,01	<0,01

## Combustion

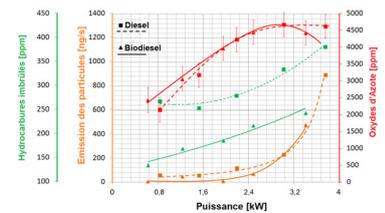


## Performances



## Émissions polluantes

- Réduction de 50% des hydrocarbures imbrûlés avec le biodiesel
- Réduction des particules et du monoxyde de carbone à faibles charges
- Légère augmentation des oxydes d'azote aux charges moyennes

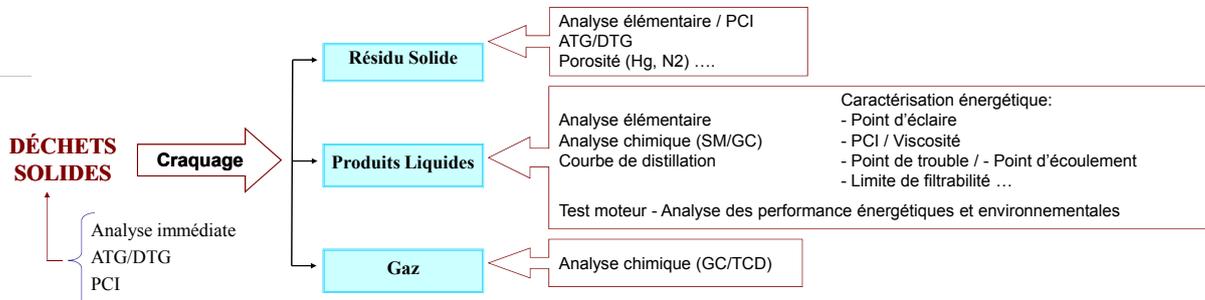


## Conclusions

Dans ce travail une méthode de production du biodiesel à partir des résidus de graisse animale, bon marché, a été proposée. Le carburant produit est conforme à la Norme Européenne EN14214 relative au biodiesel. La combustion en moteur Diesel du biocarburant a résulté des performances similaires à celles du Diesel conventionnel avec une réduction importante des émissions polluantes.

## DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

Parties prenantes

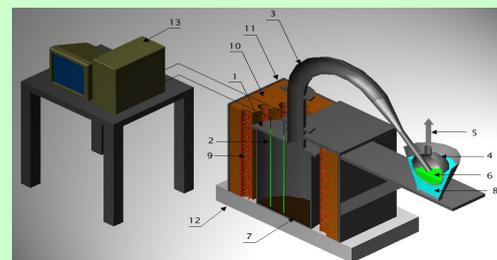


### Matières premières & Produits de craquage

- polypropylène: "PP",
- polyéthylène - basse et haute densité: "HDPE", "LDPE"
- composites (poly-hydrocarbures renforcés avec fibres de verres)



### Dispositif expérimental



Auteurs

Maria PARASCHIV

Radu KUNCSEK

Mohand TAZEROUT

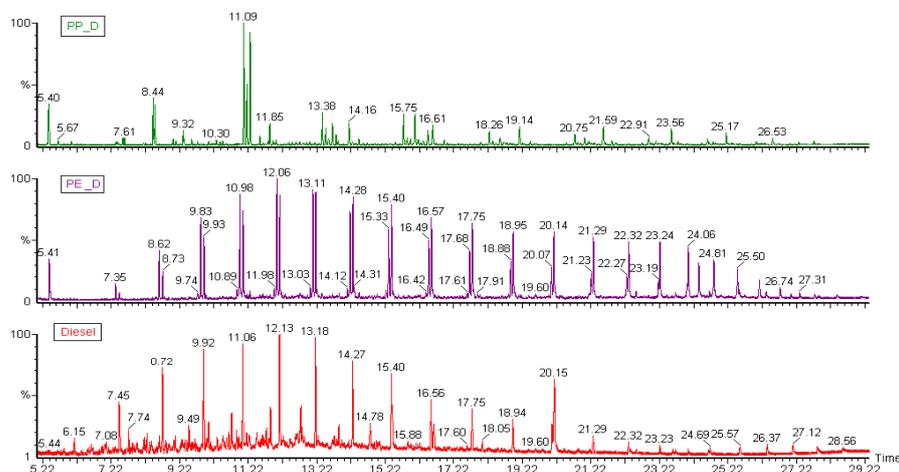
## CARACTÉRISATIONS CHIMIQUE ET ÉNERGÉTIQUE DES CARBURANTS

### Composition chimique de gaz (%vol)

Déchets	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
PP	-	0,31	20,46	6,74	41,75	21,97	8,76
LDPE	-	0,47	14,53	33,25	19,87	23,10	8,77
HDPE	-	0,87	12,44	35,20	16,58	25,10	9,22
Composite	3,97	7,46	9,63	8,16	33,17	31,56	5,41

### Les caractéristiques énergétiques des carburants alternatifs prêts pour le test moteur

Propriété	PP - Fraction Diesel	PE - Fraction Diesel	Diesel - Normes UE	Diesel - Valeurs mesurées
Viscosité dynamique à 40°C (mPa·s)	1,53	1,80	1,6 - 3,7	1,32
Pouvoir calorifique (MJ/kg)	47,00	45,00	42,50	44,00
Point trouble (°C)	-34	-8	< -5	-8
Point d'écoulement (°C)	-33	-7	-	-27
Température limite de filtrabilité (°C)	-5	8	< -20	-16
Point d'éclair (°C)	50	58	> 55	65



Parties prenantes



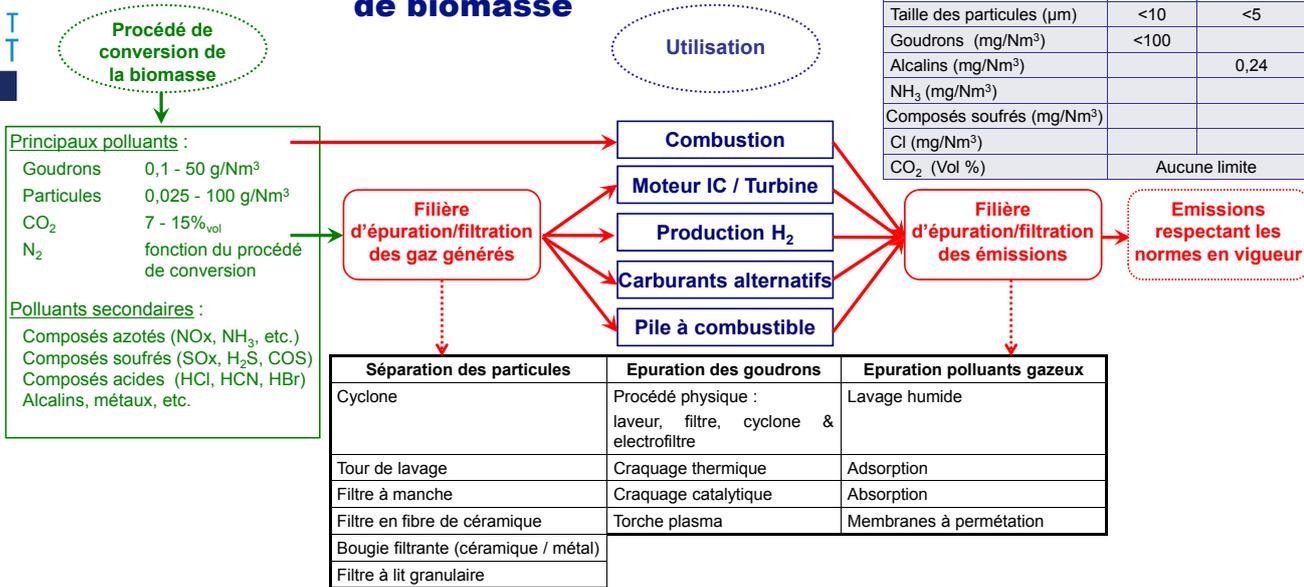
## Problématique

La valorisation de résidus (déchets forestiers, déchets agricoles, boues activées, etc.) en vecteur énergétique conduit à l'obtention de gaz qui contiennent des impuretés carbonées, des métaux et alcalins ainsi que des gaz indésirables (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, HCN, etc.). Les gaz de pyrolyse, syngas et biogaz doivent être purifiés de ces polluants avant de pouvoir être valorisés via des procédés de conversion énergétique (chaudière, moteur, turbine, etc.) afin de se prémunir de tout problème de corrosion, de casse et/ou de vieillissement prématuré des installations. Par ailleurs, en sortie du système de conversion énergétique les fumées d'échappement doivent être également traitées pour limiter et maîtriser les émissions de polluants ultimes.

Exemple de spécifications requises avant utilisation

Composants	Moteur IC	Turbine à gaz
Particules (mg/Nm <sup>3</sup> )	<50	<30
Taille des particules (µm)	<10	<5
Goudrons (mg/Nm <sup>3</sup> )	<100	
Alcalins (mg/Nm <sup>3</sup> )		0,24
NH <sub>3</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )		
Composés soufrés (mg/Nm <sup>3</sup> )		
Cl (mg/Nm <sup>3</sup> )		
CO <sub>2</sub> (Vol %)	Aucune limite	

## Filière de valorisation énergétique de biomasse

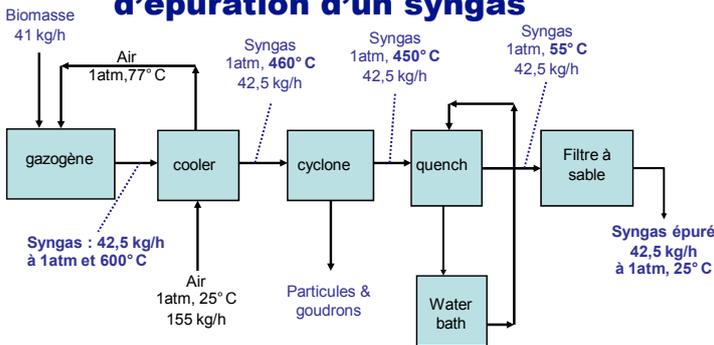


Auteurs

Audrey VILLOT,  
Laurence LE COQ

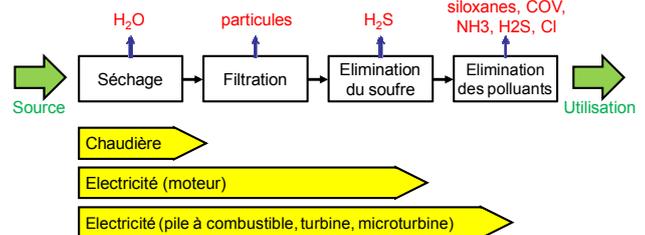
GEPEA, Mines de Nantes, DSEE  
4 rue Alfred Kastler, BP 20722  
44307 Nantes Cedex 3

## Exemple d'une filière d'épuration d'un syngas

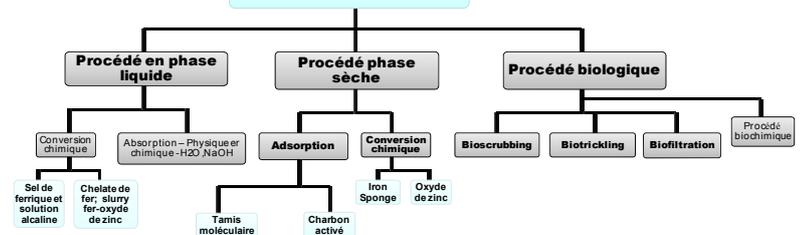


Séparation des particules	T (°C)	Efficacité de filtration	ΔP (kPa)
Cyclone	100-900	> 5µm; 80%	< 10
Filtre à manche	60-250	> 0,3µm; 99-99,8%	1-2,5
Wet scrubber (venturi)	20-100	0,1-1µm; 85-95% autrement 90-99%	5-20
Filtre en fibre de céramique	200-800	> 0,3µm; 99-99,8%	1-2,5
Bougie filtrante (céramique)	200-800	> 0,1µm; 99,5-99,99%	1-5
Bougie filtrante (métal)	200-800	> 1µm; 99-99,5%	< 1
Filtre à lit granulaire	200-800	Dépend du débit et du gateau de filtration; 95-99,9%	< 10

## Exemple d'une filière d'épuration d'un biogaz



## Procédé d'élimination H<sub>2</sub>S



### La filière de traitement/d'épuration doit :

- Permettre d'accéder aux spécifications de qualité de gaz requises par le système de conversion énergétique ;
- Etre efficace et robuste à la variation de composition du gaz brut;
- Présenter un coût économique et énergétique acceptable.