

Thématiques

1. EFFICACITE ENERGETIQUE
2. RESEAUX ENERGETIQUES DU FUTUR
3. ENERGIES RENOUVELABLES

1. EFFICACITE ENERGETIQUE

CONTEXTE : RIDER (FUI)

■ **RIDER** vise à développer un **système d'information innovant**, permettant d'optimiser l'**efficacité énergétique** d'un bâtiment. Ce système fournit les fonctions nécessaires à l'obtention d'un **niveau d'optimisation intermédiaire** (entre les dispositifs existants au niveau d'un bâtiment simple et ceux du gestionnaire du réseau de distribution électrique globale).

Parties prenantes



Auteurs

Afef Denguir

afef.denguir@mines-ales.fr

Ph.D au LGI2P-EMA et LIRMM-UM2

François Trouset

francois.trouset@mines-ales.fr

Enseignant chercheur de l'EMA

Jacky Montmain

jacky.montmain@mines-ales.fr

Professeur de l'EMA

Partenaires

■ **Objectifs:** élaborer une **solution générique** pour assurer sa **réutilisabilité** et **minimiser les coûts** de sa mise en production

→ **Solution la moins dépendante possible des caractéristiques du bâtiment.**

■ L'amélioration du rendement énergétique du bâtiment est illustrée par la figure 1.

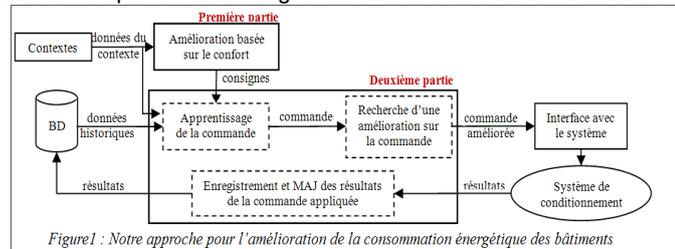


Figure 1 : Notre approche pour l'amélioration de la consommation énergétique des bâtiments

1) REGULATION BASEE SUR LE CONFORT THERMIQUE

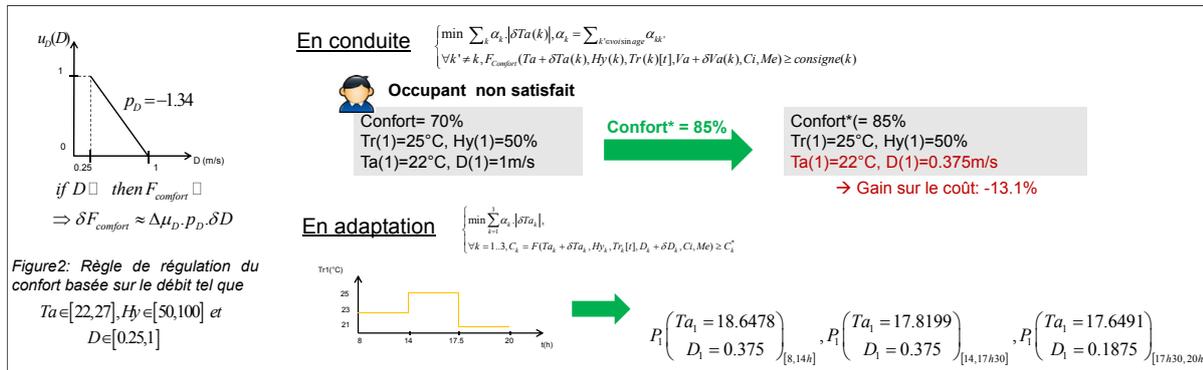
Raisonnement fondé sur une performance agrégée et un modèle de préférence

■ Identification du modèle de préférence (théorie des utilités, intégrale de Choquet) décrivant le confort thermique à partir de la norme ISO 7730. $F_{comfort} = g(u_{Ta}(Ta), \dots, u_{Ci}(Ci)) \approx 100 - PPD(Ta, D, Hy, Tr, Me, Ci)$

- défini par zone du domaine de définition du **PPD**.
- taux d'erreur inférieur à 8.6%.

■ Utilisation du modèle:

- Génération de règles de régulation simples du confort thermique (figure 2).
- Optimisation du confort des occupants et des consignes à appliquer au bâtiment à moindre coût.



2) CONDUITE RESPECTANT LES CONSIGNES DU CONFORT

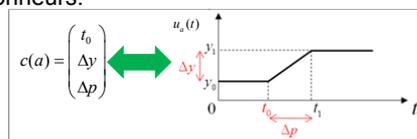
Modèle basé sur l'apprentissage et la connaissance qualitative des actions sur les performances

■ Recherche des commandes permettant d'atteindre les **consignes de confort au bon moment** et au **moindre coût**.

■ Sélection de la commande de l'historique la plus proche en terme de contexte d'application et de performances.

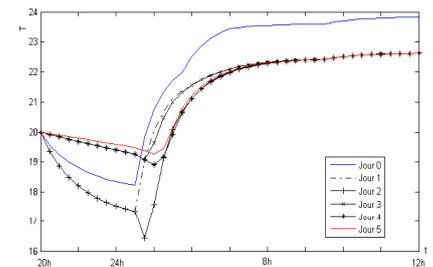
■ Amélioration qualitative de la commande basée sur l'estimation des signes des dérivées des performances sur chaque actionneur.

■ Pattern de commandes utilisé sur chacun des actionneurs:



■ Résultats théoriques: solution générique et réutilisable.

■ Résultats opérationnels: solution efficace en terme de coût, confort et rapidité de convergence.



	Jour 0	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5
Gain en coût		-14.53%	-2.51%	-4.81%	-3.72%	-0.59%
Δ Confort*	>5%			<0.5%		

* Δ Confort = écart entre le confort obtenu et la consigne de confort

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Optimisation des performances thermo-aérauliques des systèmes industriels (échangeurs de chaleur)

- Nécessité industrielle d'une recherche constante de l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés.
 - Amélioration de l'**efficacité énergétique des composants** et des procédés industriels.
 - Recherche de configurations optimales permettant de **limiter les quantités de matière nécessaires à la fabrication** des organes de transfert de chaleur à efficacité équivalente

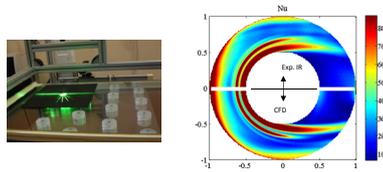


Parties prenantes

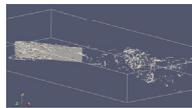


Auteurs

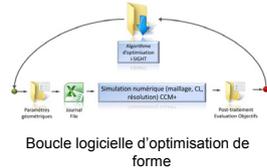
Daniel Bougeard
Serge Russeil
Jean-Luc Harion
Mines Douai
Département Energétique Industrielle



Etudes expérimentales (PIV, ThIR) et numériques (CCM+ (URANS, couplage conducto-convectif)



Isocontour λ_2 en aval d'un générateur de tourbillons en canal (DNS OpenFOAM)



Partenaires



ETUDES ET DEVELOPPEMENTS EN COURS

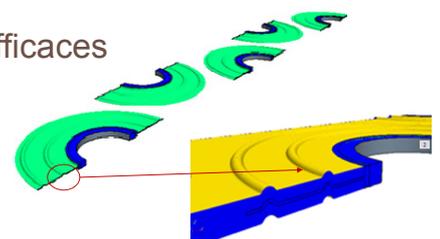
Etude locale des mécanismes dynamiques et thermiques dans les échangeurs de chaleur

- Investigations expérimentales et numériques
- Simulations numériques : analyse locale du transfert thermique dans l'écoulement, couplage conducto-convectif
 - Simulations numériques RANS, URANS → Analyse de la synergie et du taux de production d'entropie
 - Simulations numériques LES, DNS (logiciel OpenFOAM)
- Validations expérimentales par mesure de champ : Mesures PIV et thermographie infrarouge
- Techniques d'intensification des échanges par génération de vorticité : Analyse et caractérisation des dynamiques tourbillonnaires
- Boucle logicielle d'optimisation de forme
- Tests sur des installations expérimentales reproduisant des configurations industrielles

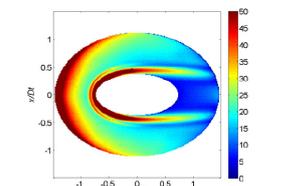
RESULTATS OBTENUS & ATTENDUS

Géométries et configurations d'échangeurs plus efficaces

- Optimisation de géométries d'ailettes d'aéro-réfrigérants industriels
 - *Projet ADEME – GEA BTT – Technip – Wieland*
 - Conception d'ailettes discontinues à hautes performances
 - *Brevet en cours de dépôt*
- Condenseur à haute efficacité énergétique (projet *FUI 2010 CAFEE*)
 - Accroissement de l'efficacité des a rocondenseurs sous vide : compétitivité des cycles de production d'électricité d'origine renouvelable
 - Diminution de la quantité de matière utilisée
 - Réduction de la puissance de ventilation : modification de l'architecture et de la géométrie des faisceaux
 - *Définition de géométries de faisceaux à tubes ailetés elliptiques*



Optimisation de géométries d'ailettes d'aéro-réfrigérants



A rocondenseur à tubes ailetés elliptiques

Accroissement des performances de transfert de chaleur et de masse dans un écoulement par contrôle passif dynamique



Parties prenantes



Auteurs

Sébastien Menanteau
Jean-Luc Harion
Mines Douai
Département Energétique Industrielle

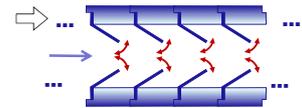
Partenaires



CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Améliorer l'efficacité des technologies existantes d'échangeurs-réacteurs multifonctionnels

- Besoin d'une recherche constante de l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés industriels.
- Application échangeurs-réacteurs multifonctionnels : amélioration des transferts de chaleur et/ou de l'homogénéisation des réactifs présents dans le fluide.
- **Objectif** : développement d'un nouveau procédé d'intensification des échangeurs-réacteurs multifonctionnels par contrôle passif dynamique de l'écoulement



Représentation d'une géométrie intérieure d'un mélangeur avec présence de générateurs de tourbillons pour l'intensification du mélange

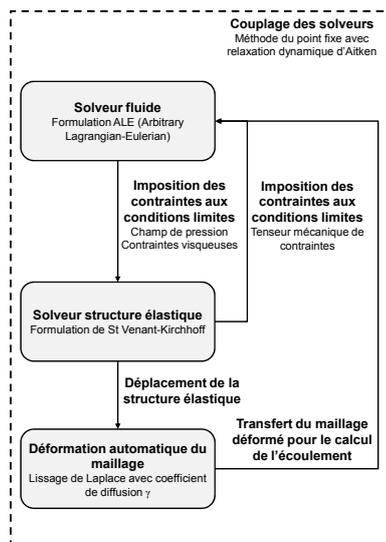
ETUDES ET DEVELOPPEMENTS EN COURS

Contrôle passif dynamique de l'écoulement par la mise en place de structures flexibles

- Procédés passifs classiques d'intensification des transferts : générateurs de tourbillons rigides
- Mise en place de structures flexibles :
 - Degrés de liberté supplémentaires permettant d'accroître les performances
 - Oscillations libres des générateurs de vorticités flexibles : génération de structures supplémentaires instationnaires

Modélisation de l'interaction fluide-structure

- Réalisation d'un outil de simulation numérique (OpenFOAM) : modélisation de l'interaction couplée entre le milieu fluide et les structures flexibles génératrices de tourbillons.
- Caractérisation fine des interactions tourbillonnaires et définition des configurations optimales : mouvements auto-entretenus et fortement chaotiques.

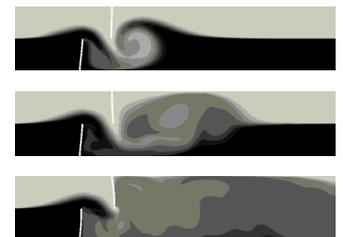


Algorithme de calcul de l'interaction couplée entre l'écoulement et les générateurs flexibles de tourbillons

RESULTATS OBTENUS & ATTENDUS

Echangeurs-réacteurs continus plus efficaces

- Solution technique passive (pas d'apport supplémentaire d'énergie au système) mais dynamique supplémentaire apportée à l'écoulement par rapport aux configurations classiques.
- Optimisation du procédé pour la génération d'un mouvement oscillant auto-entretenu des générateurs flexibles, conduisant à un mélange dynamique plus efficace.



Champs instantanés successifs du mélange d'un scalaire passif dans un écoulement 2D en présence de promoteurs flexibles [Habchi, Harion et al., 2013]

Parties prenantes



Informatique et Automatique



Auteurs

Lala RAJAOARISOA
Stéphane LECOEUICHE

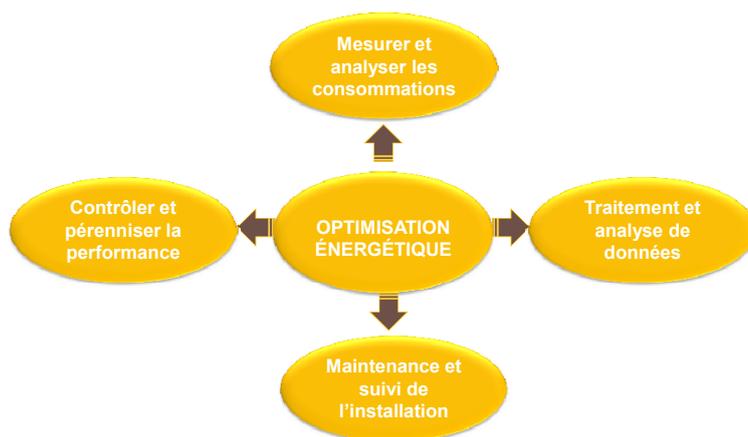
Partenaires



Cluster HBI
Pôle d'Excellence
BTP



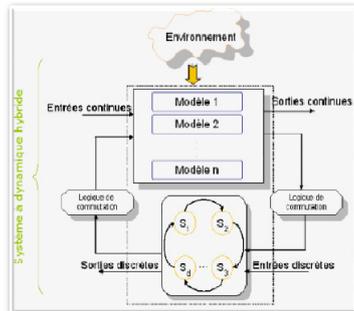
OPTIMISATION ENERGETIQUE et TECHNOLOGIES NUMERIQUES Appliquées aux Bâtiments et aux Habitats



MODELISATION A BASE DE DONNEES et IDENTIFICATION DE SYSTEMES

Approche hybride, boîte noire et boîte grise

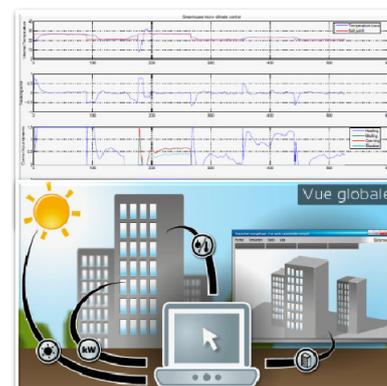
- Traitement et analyse des données (températures, humidités), des puissances entrantes (chauffage, climatisation, ventilation) et des mesures des consommations
- Identification paramétrique des modèles comportementaux
- Analyse, vérification et validation des modèles par simulation et par expérimentation
- Diagnostic thermique et extraction de caractéristiques invariantes du bâti et de l'environnement
- Etude comportementale multi-modèle du système habité.



OPTIMISATION PAR L'AUTOMATISATION ET LA REGULATION

Système numérique de régulation

- Affichage pour prise de décision en matière d'économie,
- Calculateur numérique et logiciel dédié à l'amélioration de l'efficacité énergétique,
- Optimisation des consommations et du couple consommation / confort,
- Contrôle et pérennisation des niveaux de performances,
- Architecture de gestion et de supervision centralisée et décentralisée.



Problématiques

Parties prenantes



Auteurs

Gilles MARCK^{a,b}
Maroun NEMER^a
Jean-Luc HARION^b

^aMines ParisTech
^bMines Douai

Partenaires

Conduction

■ Minimiser:

$$\bar{T} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} T d\Omega$$

ou

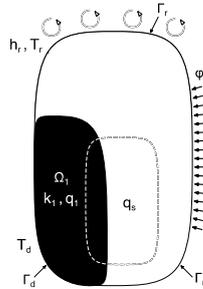
$$\text{var}(T) = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} (T - \bar{T})^2 d\Omega$$

■ Sous contrainte:

$$-\nabla \cdot (k(\eta) \nabla T) = q(\eta) + q_s$$

■ Avec:

$$\eta(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & \text{si } \mathbf{x} \in \Omega_0 \\ 1 & \text{si } \mathbf{x} \in \Omega_1 \end{cases}$$



Conducto-convection

■ Minimiser:

$$f_d(\mathbf{u}, P) = \int_{\Gamma_i \cup \Gamma_o} -\mathbf{n} \cdot \mathbf{u} \left(P + \frac{1}{2} \rho |\mathbf{u}|^2 \right) d\Gamma$$

■ Maximiser:

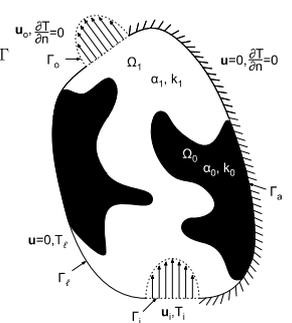
$$f_r(\mathbf{u}, T) = \int_{\Gamma_i \cup \Gamma_o} \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} \cdot (\rho C_p T) d\Gamma$$

■ Sous contraintes:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \alpha(\eta) \mathbf{u} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u}$$

$$\rho C_p (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (k(\eta) \nabla T)$$

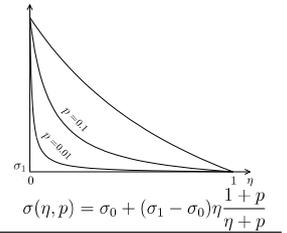
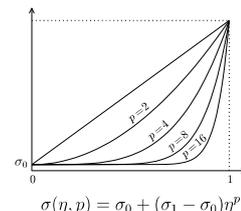


Problème: Quelle est la topologie optimale du domaine Ω_1 qui satisfait une ou plusieurs fonctions objectifs, sous la contrainte des EDP et $|\Omega_1| \leq \bar{\varphi}$, c'est-à-dire que : $\frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \eta d\Omega \leq \bar{\varphi}$

Méthodologie

Relaxation et pénalisation

■ Variation continue de la pénalisation



Dérivée de forme

■ Reformulation de f en intégrant les résidus $R(\mathbf{X}, \eta)$:

$$L(\mathbf{X}, \eta) = f(\mathbf{X}) + \underbrace{\lambda^t \cdot \mathbf{R}(\mathbf{X}, \eta)}_{=0}$$

■ Formulation du problème adjoint discret après dérivation de L :

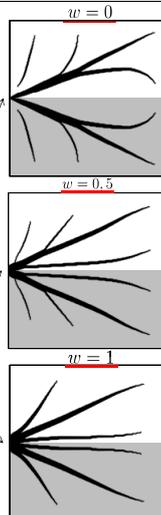
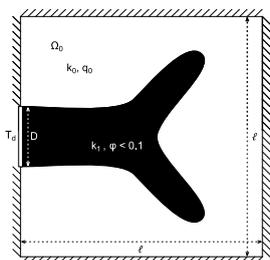
$$\frac{dL}{d\eta_i} = \lambda^t \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \eta_i} + \underbrace{\left[\frac{\partial f}{\partial \mathbf{X}} + \lambda^t \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{X}} \right]}_{=0} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \eta_i}$$

Résultats

Problème Volume-to-Point

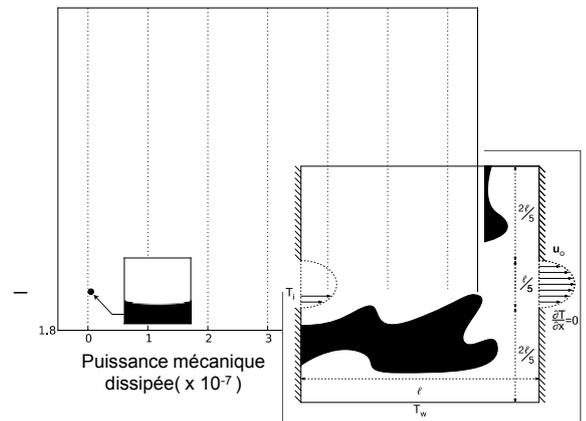
■ Recherche d'un compromis, problème bi-objectif : Configuration purement conductive

$$f(T) = w \bar{T} + (1 - w) \text{var}(T)$$



Canal plan

■ Puissance mécanique dissipée vs. puissance thermique récupérée : Configuration conducto-convective



Projet « Nanocel »

Parties prenantes

Objectifs du Cemef: préparation de matrices biosourcées super-isolantes thermiques

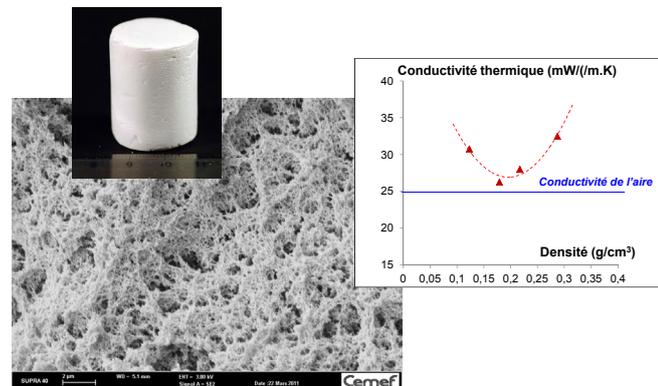


Deux polysaccharides sont utilisés:

- Cellulose
- Pectine

Aérocellulose

- Préparation de matrices à base de cellulose par dissolution, réticulation chimique, coagulation et séchage en conditions CO₂ supercritique
- Aérocellulose: matériau ultraléger et poreux
- Densité: 0.1 – 0.3 g/cm³
- Surface spécifique: 200 – 400 m²/g
- Module d'Young: 10 – 50 MPa
- Conductivité thermique: 25 – 35 mW/(m.K)



Auteurs

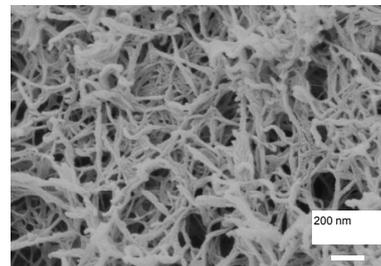
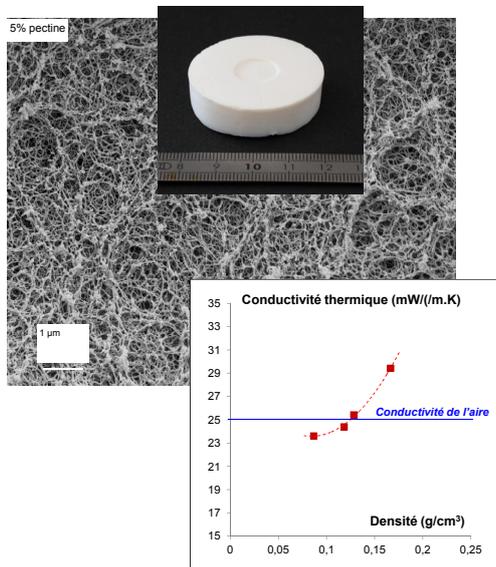
Cyrielle RUDAZ
Tatiana BUDTOVA

Partenaires



Aéropectine

- Matrice à base de pectine est préparée par dissolution, coagulation et séchage en condition CO₂ supercritique
- Densité: 0.08 – 0.2 g/cm³
- Porosité > 90%
- Surface spécifique: 200 – 300 m²/g
- Module d'Young: 5-10 MPa
- Conductivité thermique: 23 – 30 mW/(m.K)



Conclusion

- Aérocellulose: cellulose nanostructurée synthétisée
- Aéropectine: pectine nanostructurée synthétisée
- Résultats très encourageants: propriétés thermiques très proche de l'aire immobile

Remerciements:

Nous remercions Arnaud Rigacci et Pierre Ilbizian (centre PERSEE de Mines ParisTech, Sophia-Antipolis) pour les séchages supercritiques et discussions très fructueuses.

Parties prenantes



Auteurs

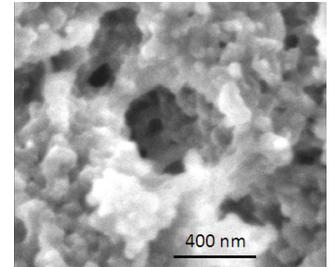
Arnaud RIGACCI
Patrick ACHARD
Christian BEAUGER

Partenaires



Contexte et objectif

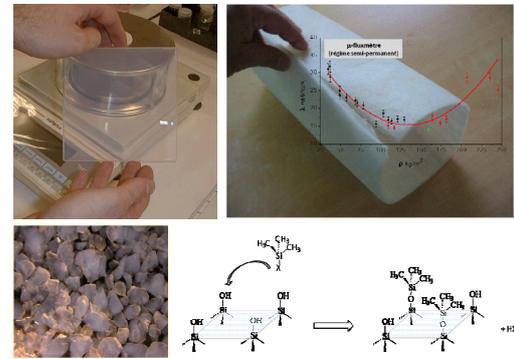
- Pour de nombreux secteurs, dont celui du bâtiment, il est nécessaire de développer des isolants thermiquement plus performants. C'est notamment le « sauf-conduit » vers l'isolation mince.
- L'objectif de ces recherches est d'élaborer - par *chimie douce* - des matériaux nanostructurés légers, présentant dans les conditions ambiantes des conductivités thermiques significativement inférieures à celle de l'air. Le champ applicatif visé en premier lieu est celui de l'enveloppe du bâtiment.



Cliché MEB illustrant la nanostructuration des phases poreuse et solide des superisolants de type aérogels

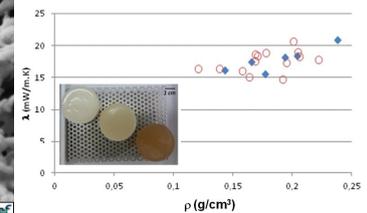
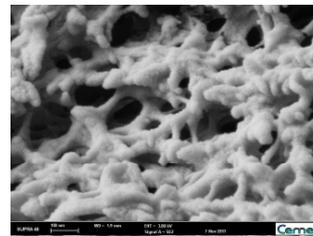
Silices superisolantes

- Les aérogels de silice sont aujourd'hui les plus aboutis d'entre ces nouveaux matériaux. Ils présentent notamment la caractéristique de pouvoir être élaborés sans passer par l'étape de séchage supercritique.
- Ils se déclinent sous diverses formes, du lit granulaire au monolithe transparent en passant par le composite flexible.
- Un simple traitement de surface permet de les rendre hydrophobes.
- Les travaux menés conjointement avec PCAS vont aujourd'hui aboutir à la première production française commercialisée.



Superisolants biosourcés

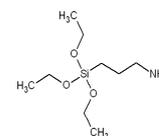
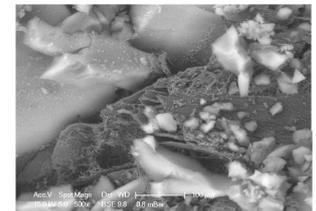
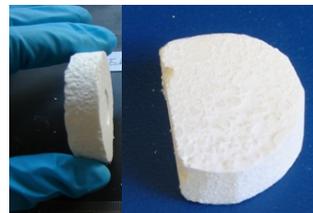
- Afin de réduire encore l'impact environnemental de ces matériaux, des superisolants à base d'acétate de cellulose ont été récemment développés.
- Ils sont obtenus par réticulation isocyanate et s'apparentent *in fine* à des « polyuréthanes verts ».



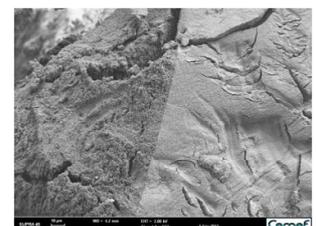
Composites et hybrides

- En vue de combiner les avantages des matrices minérales et organiques, élaborer des composites et des hybrides s'impose désormais.
- A titre d'illustration, les sols organiques peuvent être utilisés comme liants « superisolants » permettant de donner de la cohésion aux lits de silices granulaires.
- Des interfaces organo-minérales covalentes peuvent également être synthétisées afin de contribuer à améliorer encore les propriétés mécaniques.

Composites silice – polyuréthane sol-gel



Hybrides silice – polyuréthane sol-gel



Remerciements

Nous remercions vivement nos collègues du CEMEF/MINES ParisTech pour leur aide et leur soutien vis-à-vis de la caractérisation (notamment morphologique) de ces matériaux.

Enjeux : Réduire les pointes de consommation d'électricité (variation de la demande entre 40 GW l'été et 100 GW l'hiver).
Les bâtiments représentent 60% de la demande et le chauffage électrique est la principale cause de ces variations saisonnières.

Parties prenantes



Auteurs

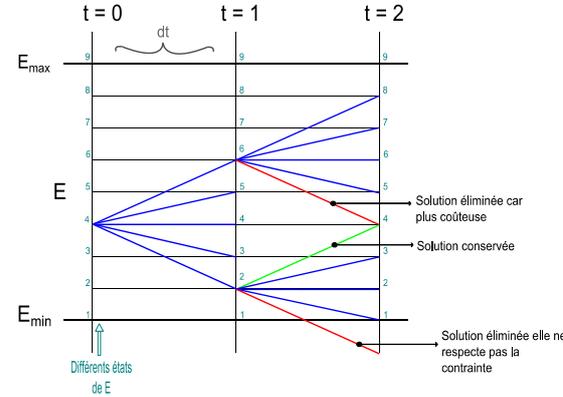
PEUPOORTIER Bruno
FAVRE Bérenger
ROBILLART Maxime

Partenaires



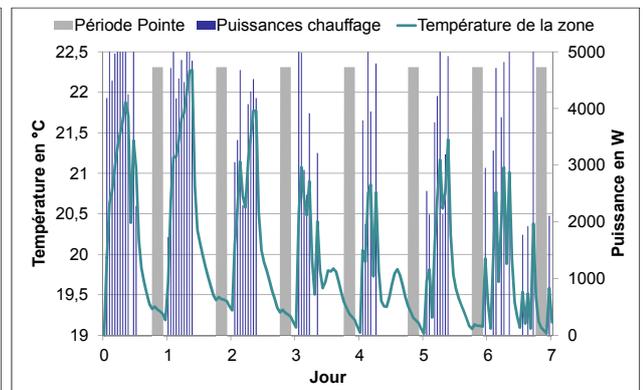
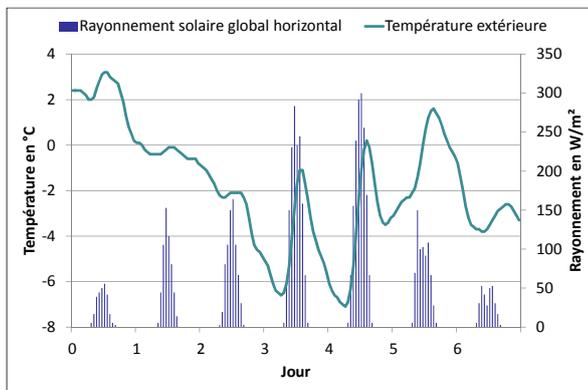
1^{ère} étape : commande prédictive

- Objectifs :
 - effacement de la consommation pendant 5 h chaque jour
 - maintien du confort thermique
- Algorithme d'optimisation : la programmation dynamique
- Variable d'état : énergie totale stockée dans le bâtiment
- Bâtiment passif (Plateforme INCAS- Chambéry – CEA - INES)
- Semaine très froide



$$\begin{matrix} \text{?} & \text{?} & \text{?} & \text{?} \\ \text{?} & \text{?} & \text{?} & \text{?} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{?} & \text{?} & \text{?} & \text{?} \\ \text{?} & \text{?} & \text{?} & \text{?} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{?} & \text{?} & \text{?} & \text{?} \\ \text{?} & \text{?} & \text{?} & \text{?} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \text{?} & \text{?} \\ \text{?} & \text{?} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{?} & \text{?} & \text{?} & \text{?} \\ \text{?} & \text{?} & \text{?} & \text{?} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{?} & \text{?} & \text{?} & \text{?} \\ \text{?} & \text{?} & \text{?} & \text{?} \end{matrix}$$



2^{ème} étape : gestion temps réel

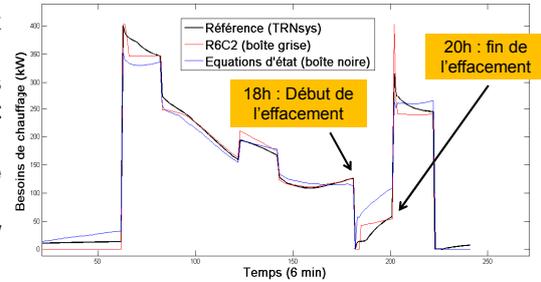
- Objectifs : développement d'outils et méthodes pour le pilotage optimal de bâtiment
- Bâtiment réhabilité avec mesures recueillies in situ
- Modélisation :
 - Bâtiment : algorithmes de calibrage en temps réel des modèles
 - Météo : Modèles ARMA de météorologie locale
- Optimisation : algorithmes de contrôle auto-adaptatif
- Application :
 - actionneurs pour les systèmes pilotés à distance
 - interface homme-machine pour le retour d'information à l'utilisateur

Deux projets ANR (SIMINTHEC et PRECISION), et développements dans le cadre de la chaire Éco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures, ParisTech en collaboration avec VINCI. Collaboration avec le Centre d'Automatique et des Systèmes.

STRATEGIES D'EFFACEMENT ET DE PILOTAGE

Parties prenantes

- Développement de modèles inverses pour la mise en place de stratégies d'effacement dans les immeubles de bureaux (Expérimentations in-situ en cours)
- Etude de stratégies d'effacement court terme intégrant les problématiques de confort et les effets de recouvrement énergétique
- Développements méthodologiques pour la valorisation de stratégies de pilotages / effacements
- Mise en évidence des impacts des pilotages optimisés ENR / Stockage / Usages



Prévision à 24h de besoin de chauffage avec modification de la température de consigne de 18h à 20h

=> Dépôt de brevet en cours : Services innovants d'information aux consommateurs (« feedback ») sur l'usage du chauffage



CES

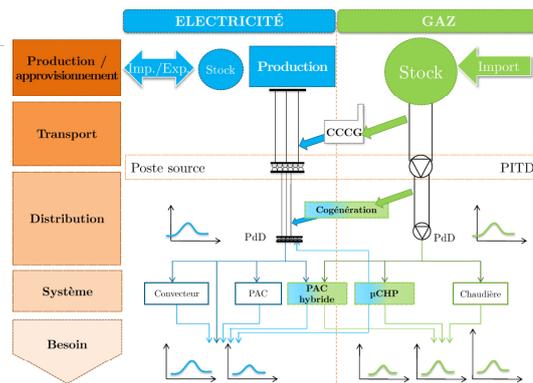
Centre Efficacité énergétique des Systèmes

Groupe MDE

IMPACT DES TECHNOLOGIES GAZ SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES

Auteurs

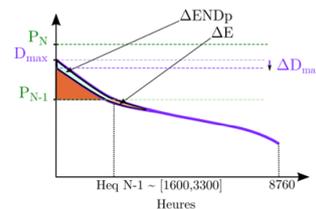
Bruno DUPLESSIS
Dominique MARCHIO
Philippe RIVIERE
Pascal STABAT



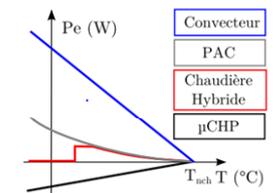
Interactions réseaux gaz/électricité

- Etude de solutions d'optimisation des facteurs de charge des réseaux gaz et électriques en jouant sur leurs interactions
- Evaluation du potentiel d'effacement des technologies gaz à l'échelle régionale par modélisation des systèmes et reconstruction bottom-up de la demande
- Evaluation du potentiel économique à partir de l'estimation de l'énergie potentielle non-distribuée et des coûts de la défaillance (26€/kWh)

=> Prix du meilleur jeune chercheur de l'industrie mondiale du gaz



Représentation de l'énergie non distribuée sur une monotone



Systèmes de chauffage et impact sur le réseau électrique

Partenaires

Grandes entreprises



PME



ECO-CONCEPTION DES SYSTEMES ÉNERGÉTIQUES DU BÂTIMENT

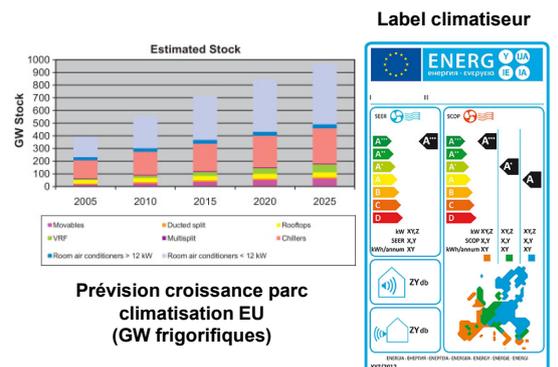
Systèmes de climatisation, de ventilation et de chauffage

- Etudes Ecodesign pour la Commission européenne : Propositions réglementaires faites à la CE pour les climatiseurs, la ventilation résidentielle, la ventilation tertiaire, la climatisation centralisée, les systèmes de contrôle des systèmes de chauffage

Méthodologie des études

Définition fonctionnelle et technique, Analyse du marché européen, Conditions d'utilisation, potentiel d'amélioration de produits représentatifs, ACV et études technico-économique d'amélioration, proposition de mesures suivant plusieurs scénarios avec impacts consommateur, industrie et réseaux : Economie >15 Mtep / an en 2025 en Europe, ~1% cons. EU.

=> Règlement UE n° 206/2012 (seuils) et label déjà en place



Prévision croissance parc climatisation EU (GW frigorifiques)

Parties prenantes



Auteurs

Elias BOULAWZ KSAYER
Walid SAID
Maroun NEMER
Samer MAALOUF
Samer Maarauji

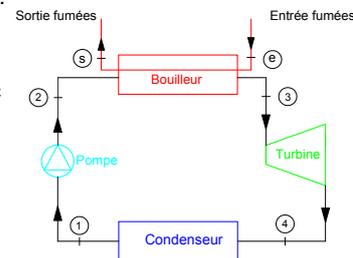
Partenaires



Revalorisation de l'énergie des gaz chauds en électricité

Projets ORACLE, ENERCO_LT & ORC-2-MECA

- Identification et caractérisation des sources de fumées et de gaz de procédés dans l'industrie: débit, température, composition.
- Conception et analyse des cycles de Rankine Organique (ORC) adaptés à chaque type et à chaque température de fumées
- Détermination des fluides de travail optimaux pour chaque niveau de température.
- Dimensionnement des systèmes ORC pour quatre niveaux de température: 400°C, 250°C, 180°C et 120°C.
- Modélisation des échangeurs de récupération de chaleur du type tube-ailette avec différents matériaux: tube cuivre, tube inox, ailette aluminium, ailette inox selon la pression du fluide de travail et la température des fumées.
- Caractérisation des échangeurs de chaleur de plusieurs types sur un banc d'essai.
- Validation du modèle de conception des échangeurs de récupération de chaleur tube-ailette pour une plage de température de 80 à 400°C.



Revalorisation de l'énergie des fumées humides en électricité dans les cimenteries

Projet LOVE

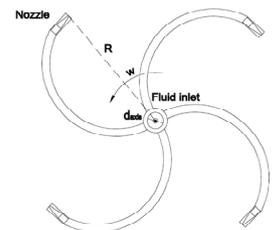
- Récupération de la chaleur latente de la vapeur d'eau des fumées
- Conception de systèmes de récupération de la chaleur latente par pulvérisation d'eau sur des garnissages
- Intégration d'un système de dépollution des fumées
- Modélisation des échangeurs ouverts à garnissage avec condensation de la vapeur d'eau
- Caractérisation de plusieurs types de garnissages: PVC et inox.
- Validation du modèle de conception des échangeurs ouverts à garnissage
- Réalisation d'un pilote produisant 100 kW_e à partir des fumées humides à 110°C avec une température de rosée de 62°C



Récupération de l'énergie de détente diphasique dans les systèmes frigorifiques

Projet TDD RAC

- Récupération de l'énergie de détente du liquide saturant dans les systèmes de réfrigération
- Conception des buses de détente diphasique avec des rendements de détente supérieur à 80%
- Modélisation des turbines diphasiques du type Hero
- Réalisation d'un banc d'essai de turbines de détente diphasique fournissant un débit de 4 kg/s
- Caractérisation expérimentale des buses de détente diphasique
- Réalisation d'une turbine diphasique de 5 kW_e pouvant être installée sur un groupe d'eau glacée de 600 kW_{th} au régime 12 - 7°C



Turbine Hero

Parties prenantes



Auteurs

H. Hagi
M. Nemer
Y. Le Moulec
C. Bouallou

Partenaires

Contexte et enjeux

Réchauffement climatique et captage du CO₂

- Environ 12 Gt de CO₂ sont émises annuellement par la production électrique, ce qui représente plus de **40 % des émissions mondiales de CO₂ d'origine anthropiques** (Fig. 1)
- **41 % de l'électricité mondiale produite à partir de charbon** (Fig. 1)
- La mise en place de la **chaîne de captage et stockage du CO₂** sur les centrales à charbon est donc primordiale pour assurer la transition énergétique et atteindre les objectifs de limitation de l'augmentation de température fixés par le GIEC

Le captage par oxy-combustion

- Alternative prometteuse au captage du CO₂ par absorption chimique
- L'**oxy-combustion** consiste à séparer l'oxygène de l'air en amont de la chaudière pour obtenir des fumées concentrées en CO₂ faciles à capter en aval
- La surconsommation liée à la séparation cryogénique de l'air (ASU) et la compression et purification du CO₂ (CPU) entraîne cependant une **pénalité énergétique élevée** pouvant représenter jusqu'à 20 % de la production

Objectifs

- Réduire la pénalité énergétique du procédé en adoptant une démarche d'**optimisation à l'échelle système** basée sur l'**analyse exergétique** et la **thermo-économie**

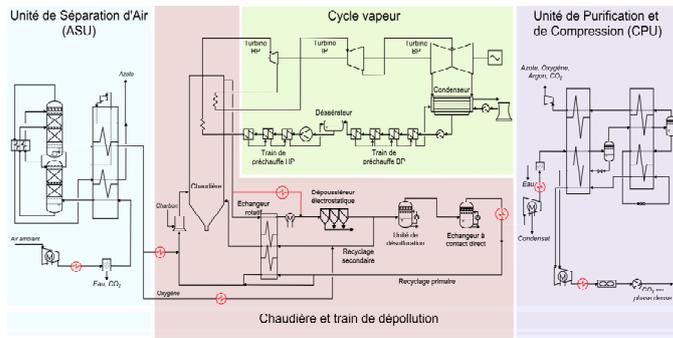
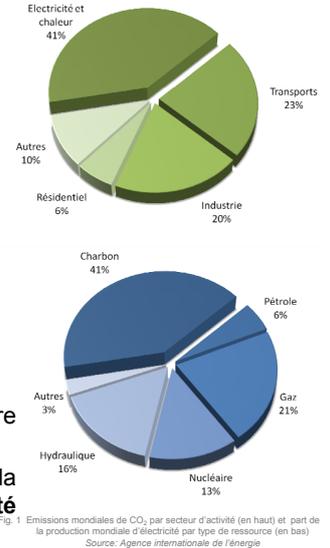


Fig. 2 Schéma simplifié d'une centrale à charbon pulvérisé fonctionnant en oxy-combustion avec captage du CO₂

Méthodologie

- **Modélisation et simulation** d'une centrale oxy-combustion de référence (Fig. 2)
- Analyse exergétique de la centrale de référence pour identifier la localisation et l'importance des irréversibilités intervenant au sein du système (Fig. 3)
- Mise en place d'une **stratégie d'intégration énergétique minimisant les pertes thermodynamiques** du procédé
 - Chaleurs de compression de l'ASU et du CPU
 - Préchauffage de l'oxygène
 - Intégration de la chaleur en surplus de l'échangeur rotatif
 - Réchauffage des fumées avec de l'eau du cycle vapeur

Résultats et perspectives

- L'analyse exergétique a permis la mise en place d'une stratégie d'intégration de chaleur raisonnée menant à une diminution de la pénalité énergétique de 19 %, soit 1,1 point sur base PCI.
- Les travaux futurs se focaliseront sur la prise en compte du critère économique dans la méthode d'intégration énergétique.

	Avant intégration	Après intégration
Production électrique nette (MW)	760	805
Consommation ASU (MW)	123	140
Consommation CPU (MW)	77	87
Rendement net (% _{PCI})	36,2	38,1
Pénalité énergétique (%-pts)	9,9	8
Pénalité énergétique (kWh/t_{CO2})	274	257

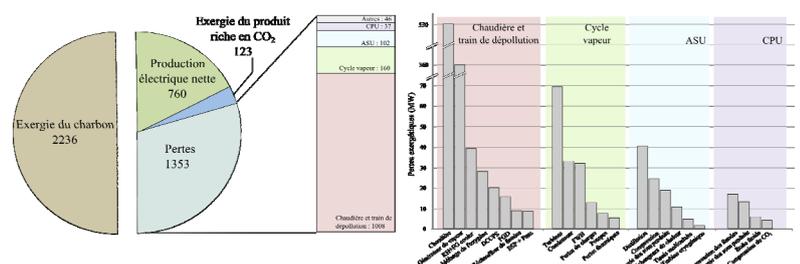


Fig. 3 Distribution de l'exergie dans le système en MW (à gauche) et répartition des pertes (à droite)

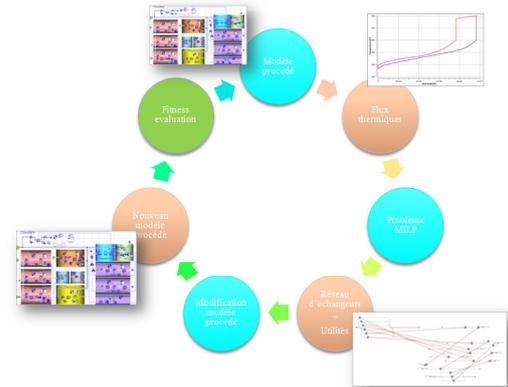
Parties prenantes



Objectif et méthodologie

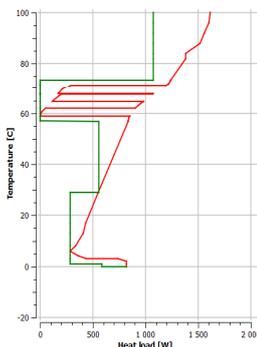
Réduire les besoins d'énergie des procédés industriels

- Identification des besoins énergétiques minimaux relatifs au procédé étudié ;
- Choix par optimisation multi objectifs (exergie, économie, environnement...) des moyens de production et de stockage des besoins énergétiques ;
- Conception thermodynamique optimisée du réseau d'échange de chaleur et des systèmes de production des besoins énergétiques;



Auteurs

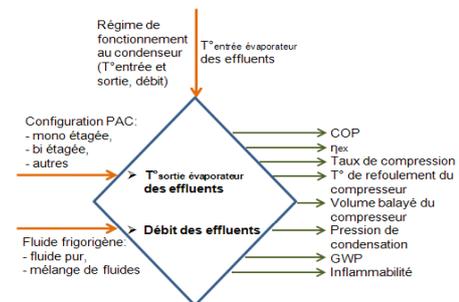
Assaad Zoughaib
Centre Efficacité
énergétique des Systèmes
Mines ParisTech



Intégration de PAC et des ORC

Identification de leur emplacement idéal dans le procédé

- Minimiser le besoin (destruction) d'exergie;
- Dans le cas de l'intégration de thermofrigopompe, la chaleur excédentaire de la zone en dessous du pincement est pompée vers la zone déficitaire;
- Conception optimisée des cycles thermodynamiques et choix des fluides de travail



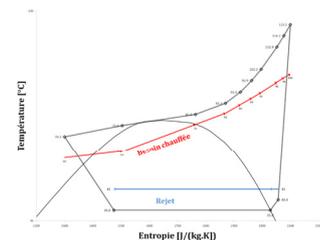
Partenaires



Identification de solutions de rupture

Définition d'une roadmap technologique

- Echangeurs solide-solide
- Pompe à chaleur transcritique à très haute température
- Cycles thermodynamiques complexes (contrôle de la composition circulante..)
- Production simultanée flexible de chaud et de froid par TFP
- Stockage d'énergie



Auteurs

Philippe BREUIL^a,
Jean-Paul VIRICELLE^a,
Christophe PIJOLAT^a
Axel BART^b,
Ronan COZIC^b
Nadine LOCOGE^c,
Nathalie REDON^c
Yves ANDRE^d

^aEMSE, ^bSRA Instruments
^cEMD, ^dEMN

OBJECTIFS

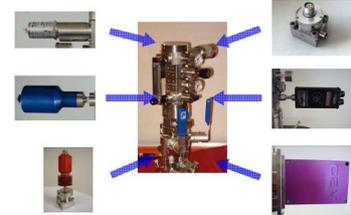
- Développer des capteurs ou analyseurs miniaturisés pour le contrôle en ligne de divers procédés :

- Analyseur de type μ GC avec préconcentrateur intégré pour analyse de traces dans des procédés industriels

Projet INNOVAL (AXELERA)

- Réseau de capteurs pour contrôle de traitement photocatalytique de l'air

Projet PHOTOC AIR (CARNOT M.I.N.E.S)

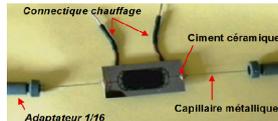


Capteurs miniaturisés au standard « NESSI » implantés sur colonne échantillonnage

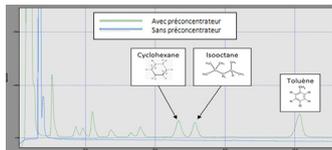
Partenaires



μ GC SRA au standard « NESSI »



Préconcentrateur sur silicium EMSE (coll. IMT-EPFL)



Chromatogramme avec/sans Préconcentrateur intégré sur μ GC SRA

Projet INNOVAL : l'instrumentation en ligne au cœur des procédés

L'analyse μ GC au standard « NESSI »

- Standard « Nessi » = concept de type « Plug and Play » pour l'instrumentation
- Développement d'un μ GC au standard NESSI (SRA)
- Evaluation des performances / dispositifs conventionnels sur gaz utilisés dans des procédés industriels (EMSE)

Développement de préconcentrateur pour analyse de traces

- Dispositif de préconcentration en amont du μ GC, à la place de l'injecteur
- Préconcentrateur : microréacteur en silicium rempli avec adsorbant et muni d'un système de chauffage pour désorption flash.

Projet PHOTOC AIR (2013 -2014)

Elaboration / Validation Réseau de capteurs (EMSE-EMD)

- Choix des capteurs constituant le système multicapteur en fonction des gaz cibles
- Tests des capteurs avec mélange synthétique de gaz

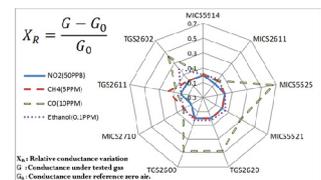
Etude des performances sur site (EMN-EMSE)

- Evaluation des capteurs en amont/aval de procédés de traitement photocatalytique
- Corrélation des paramètres du procédé / information système multicapteurs → optimisation de l'efficacité du traitement

→ Monitoring de la qualité de l'air intérieur pour aspect énergétique des bâtiments



Systèmes multicapteurs (9 gaz + humidité température)



Evaluation des performances des capteurs (analyse multivariées)

Parties prenantes



Auteurs

Pauline BRIAULT^a
Mathilde RIEU^a
Jean-Paul VIRICELLE^a
Christophe PIJOLAT^a
Richard LAUCOURNET^b
Bertrand MOREL^b
^aEMSE, ^bCEA-LITEN

Partenaires

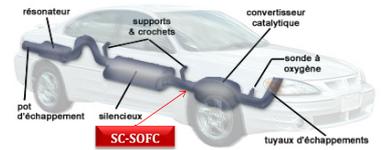


OBJECTIFS

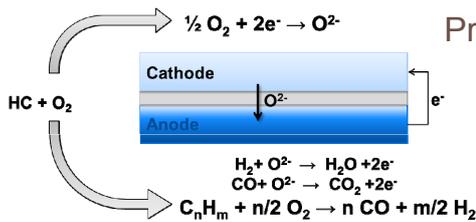
- Développer un système capable de recycler l'énergie des gaz en sortie d'un moteur thermique
- Diminution des émissions d'imbrûlés dans l'atmosphère tout en améliorant l'efficacité énergétique des véhicules

Solution étudiée : Incorporation d'une pile à combustible de type SOFC monochambre en sortie de catalyseur

- Développer une cellule SOFC et définir les conditions de fonctionnement
- Evaluer les performances de la cellule dans des conditions représentatives des gaz d'échappement
- Réaliser un démonstrateur intégrant plusieurs cellules (stack)



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT / ETAT DE L'ART



Principe de fonctionnement SOFC monochambre

- Alimentation par un mélange air/hydrocarbure (HC)
- Pas de séparation physique anode/cathode comme dans une pile conventionnelle
- Nouvelles géométries de piles possibles, empilement facilité
- Matériaux d'électrodes avec activité catalytique sélective

Etat de l'art

- Procédé de récupération d'énergie assez peu étudié
- 1 seul exemple : Hibino et al. (2008, Japon)
Test d'un stack de 12 cellules électrolyte support Ni-SDC/YSZ/LSM dans le pot d'échappement d'un scooter
1,2 W délivrés : Puissance faible mais valide le procédé!



• Hibino et al. (2008) « A Single-Chamber SOFC Stack : Energy recovery from Engine Exhaust »

RESULTATS EN COURS sur monocellule

Elaboration cellule, conditions de tests

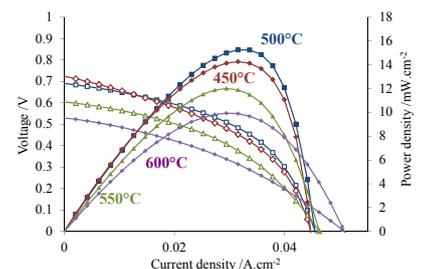
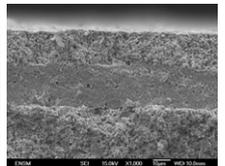
- Cellule anode support réalisée : coulage en bande + sérigraphie
- Banc de test réalisé, gaz échappement synthétique : HC (propane/propène) + O₂ + N₂ + CO + H₂ + CO₂ + H₂O
- Etude des activités catalytiques des matériaux d'électrodes

Etude des performances électrochimiques

- Etude des paramètres : température, rapport HC/O₂
- Densité de puissance de l'ordre de 16mW/cm² à 500C avec 1000ppm HC (HC/O₂=0,21)

Passage au « stack » en cours...

4 matériaux de cathode testés* (épaisseur ~40µm)
Electrolyte : CGO(Ce_{0,9}Gd_{0,1}O_{1,95}) (épaisseur~10-20µm)
Anode support : Cermet Ni-CGO (épaisseur~400µm)



Courbes de polarisation d'une monocellule sous rapport HC/O₂ = 0,21



Question de recherche : Quels sont les éléments humains et/ou techniques favorisant (leviers) ou entravant (freins) la réduction des consommations d'énergie d'un facteur 4 dans le secteur du bâtiment ?

Démarche de recherche basée sur une approche interdisciplinaire couplant :

- ❖ Une recherche action (Etudes thermiques + simulations) au sein de 3 ensembles de bâtiments sociaux regroupant **205 logements**
- ❖ Les retours d'expériences de **249 acteurs** professionnels du bâtiment via des entretiens semi-directifs et des questionnaires internet

Parties prenantes

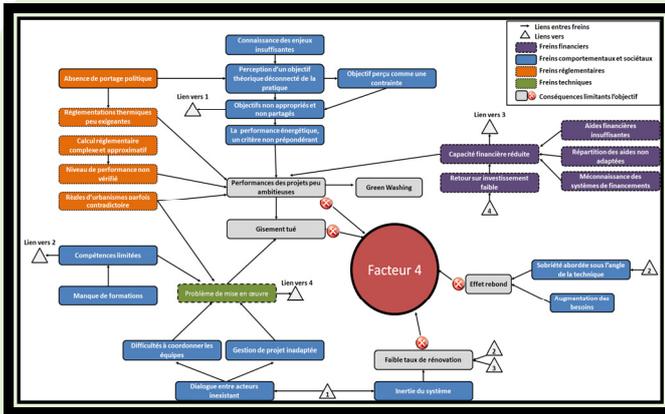


Auteurs

Jonathan VILLOT
Valérie LAFOREST
Natacha GONDRAN

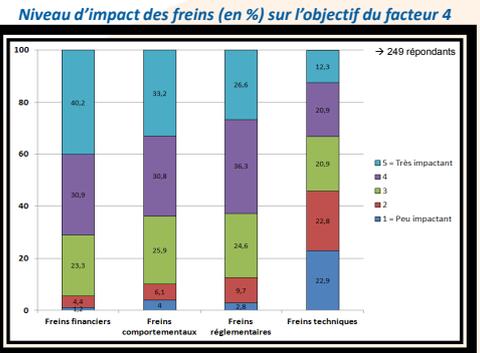
Equipe PIESO
Institut Henri Fayol
ENSM-SE

Cartographie des limites au facteur 4



- ❑ 24 types de freins identifiables présentant des interrelations fortes
- ❑ 4 catégories de freins : Financiers, comportementaux, réglementaires, techniques
- ❑ 5 conséquences majeures entravant l'objectif du facteur 4 :
 - Faible taux de rénovation
 - Effet rebond
 - Niveau de performance peu ambitieux
 - Gisement potentiel d'économie altéré
 - Green Washing

Des freins certains mais ...



- ✓ Les freins financiers, comportementaux et réglementaires sont perçus comme les plus impactants.
- ✓ Les freins techniques sont considérés comme les moins problématiques
- ✓ L'impact et l'ampleur des différentes catégories de freins restent variables selon les acteurs, leur profil, leurs expériences, et leurs projets.

... des acteurs perçus comme moteurs

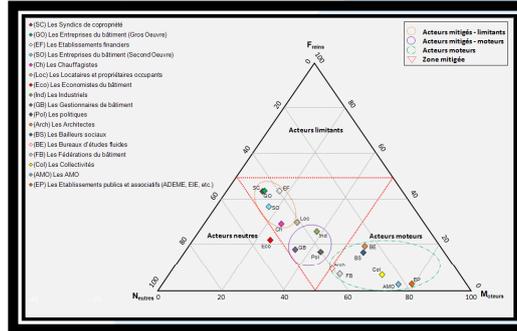
La cartographie des acteurs par l'intermédiaire d'un diagramme ternaire permet de classer ces derniers selon trois grands pôles : **moteurs, neutres, limitants**. (Le pourcentage de réponses cumulées des 249 répondants pour chaque qualificatif constitue les coordonnées des acteurs dans le diagramme).

Les intervenants de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre sont majoritairement considérés comme moteurs

Les industriels et entreprises du gros œuvre de même que les politiques sont perçus comme neutres à moteurs

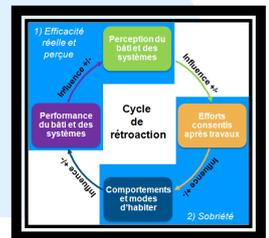
Les établissements financiers et les entreprises du second œuvre sont cités comme potentiellement limitants.

Diagramme ternaire des acteurs du bâtiment



Discours : « Dans le bâtiment, on parle de maîtrise d'ouvrage, d'AMO, de maîtrise d'œuvre, d'architecte, de bureau d'étude, tous ces gens, ça en fait du monde. Et encore si c'était que ça ! On va souvent de l'artisan travaillant seul, jusqu'aux multinationales » (E-SYND-1).1

Les habitants, acteurs clés, ont un rôle encore incertain; les efforts vers plus de sobriété étant conditionnés par l'efficacité réelle et perçue du bâti.



Vers un changement de paradigme ?



Des dissensus importants entre groupes d'acteurs (Acteurs professionnels Vs utilisateurs) se démarquent sur les notions de performance et de confort. Ainsi, le système bâtiment, apparaît encore assez loin d'une dynamique permettant un changement vers une diminution réelle et globale de ses consommations énergétiques.

Le bâtiment, face aux contraintes du facteur 4 nécessite non pas une adaptation ou une évolution, mais une rupture forte des modes de penser et d'agir traditionnels. En ce sens, aucun frein ne peut être écarté ni aucun acteur considéré comme variable d'ajustement.



Le choix d'un « sorbet »

Problématique :

Contrainte : la température du fluide frigoroporteur doit se situer entre 6 et 12°C

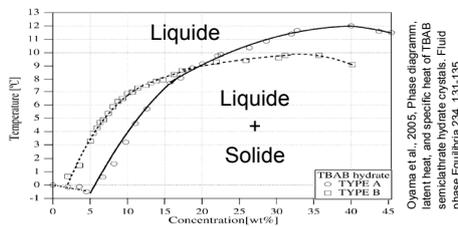
Réduire l'utilisation des fluides frigorigènes « classiques » en climatisation (CFC, HCFC, HFC)

Utiliser un fluide frigoroporteur diphasique (solide / liquide) « sorbet »

Solution de TBAB
(Bromure de Tetra-ButylAmmonium)

- Exploitation de la chaleur latente de fusion
- Possibilité de stockage et de lissage de la production frigorifique
- Sorbet concentré à 30% maximum de solide

Le sorbet diphasique d'hydrates de TBAB :



	Eau glacée initialement entre 4 et 8°C		Sorbet d'hydrates de TBAB		
	ΔT de 4 K	ΔT de 6 K	10% massique d'hydrates	20% massique d'hydrates	30% massique d'hydrates
Variation d'énergie pour 1 kg	17 kJ	25 kJ	20 kJ	40 kJ	60 kJ

Diagramme d'équilibre des hydrates de TBAB

Parties prenantes



Auteurs

Jérôme Douzet ^{a,b}
Jean-Michel Herri ^{a,b}
Fabien Chauvy ^{a,b}
Alain Lallemand ^{a,b}
Denis Flick ^c

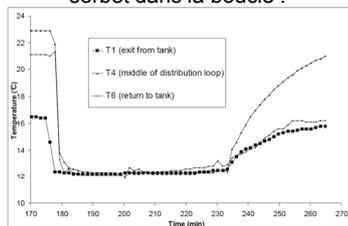
Partenaires



Transfert de technologie

De la réfrigération à la climatisation :

Températures de distribution du sorbet dans la boucle :



La température reste constante si tous les hydrates ne sont pas fondus

Ventilo-convecteurs standards Lennox

Cuve de stockage 2m³ solution de TBAB

Générateur de sorbet de glace HeatCraft (Alimenté par boucle primaire Lennox)



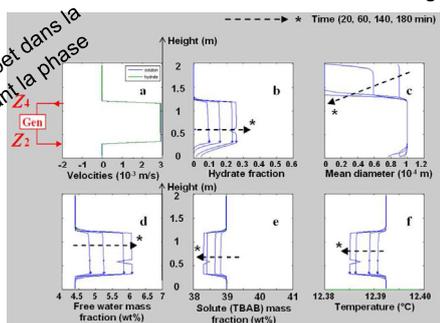
Modélisation du stockage

Buts :

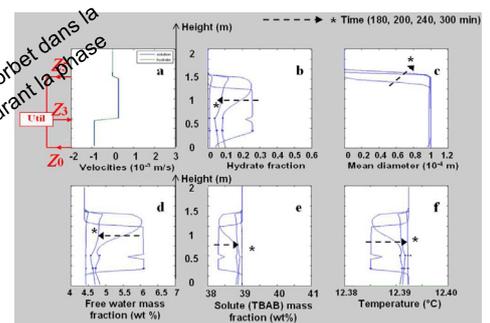
- Disposer d'un outil de simulation des caractéristiques du sorbet (température, fraction d'hydrates, taille des cristaux, composition de la phase liquide).
- Disposer d'un outil de dimensionnement de cuves de stockage de sorbets.

Exemples :

Evolution des caractéristiques du sorbet dans la cuve en fonction de la hauteur, durant la phase de génération (stockage)



Evolution des caractéristiques du sorbet dans la cuve en fonction de la hauteur, durant la phase de distribution (climatisation)



CONTEXTE

- **TIC** : « [...] branche d'activité [...] conçue pour assurer ou permettre les fonctions de traitement et de communication de l'information par des moyens électroniques, dont notamment sa transmission et son affichage » [FIUPO, 2007]
- Omniprésents (travail, loisir, santé, ...)
- Consommation de ressources
⇒ Impacts à l'échelle planétaire

- Consommation électrique des TIC
⇒ 7,3% de l'électricité française [Idate 2010]
- Apparition des labels:
↳ Consommation électrique par équipement
⇒ Energy star (1992)



Malgré ces labels, augmentation globale des consommations électriques du fait de la croissance des usages

OBJECTIFS: Représenter les impacts environnementaux d'un parc informatique sur la base d'un inventaire des équipements présents et de leur utilisation (consommations énergétiques).

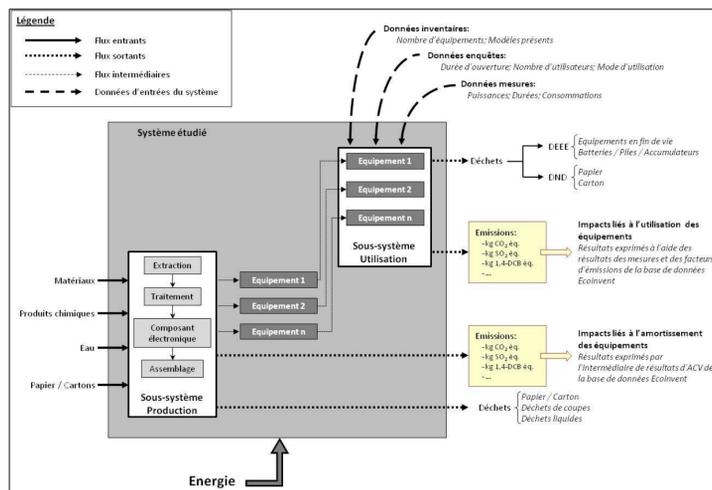
Parties prenantes



Département PIESO
Performance Industrielle et
Environnementale des Systèmes
et des Organisations

SYSTEME ETUDIÉ

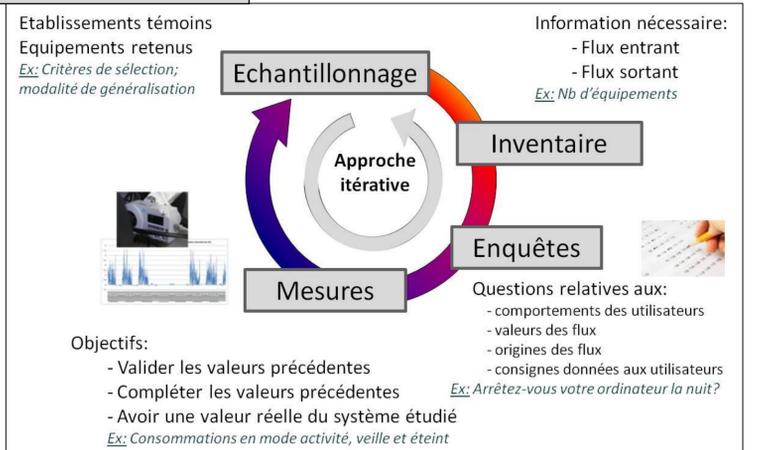
Systeme informatique d'une organisation



ETUDE DE CAS

Réalisée au sein de Casino IT

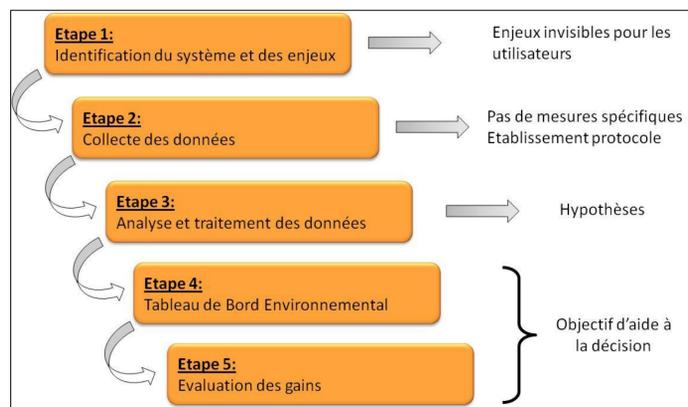
Collecte des données



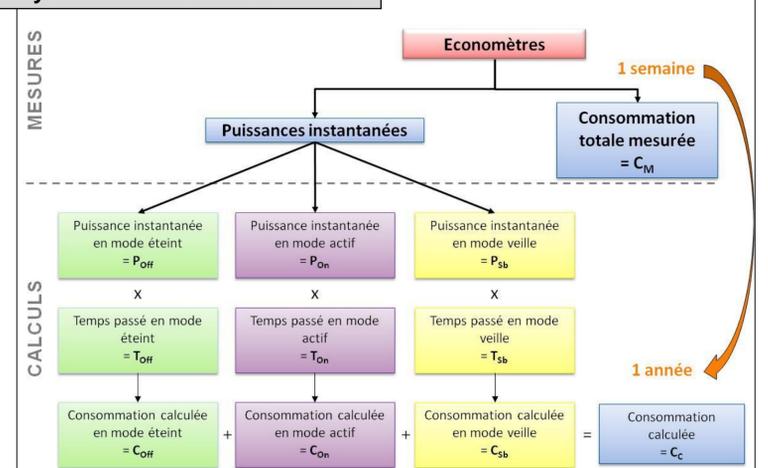
Auteurs

Valentine MOREAU
Natacha GONDRAN
Valérie LAFOREST

DÉMARCHE METHODOLOGIQUE



Analyse et traitement des données



Partenaires



CONCLUSIONS

Evaluation des gains

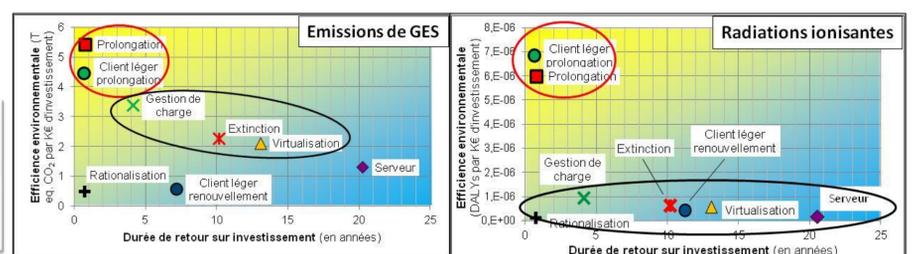
Les résultats obtenus permettent d'identifier des pistes d'optimisation :

- Réduction des consommations électriques
- Gestion du parc informatique
- Diminution des impacts environnementaux



PERSPECTIVES

- **Généralisation temporelle** = Passage de résultats d'une semaine à un an
 - ✓ Campagnes de mesures sur un mois
 - ✓ Variations 3 à 15%
 - ✓ Campagnes plus longues
- **Généralisation spatiale** = Passage de résultats d'un établissement à l'ensemble des établissements



Résultats et conclusions différentes selon les indicateurs environnementaux choisis (CO₂ versus DALYs)

Concept de "système-produit-service"

- Raisonne en termes de service et non en termes de produit
- Approche par les usages et non par les produits



Stakeholders



UMR CNRS 5157 Samovar



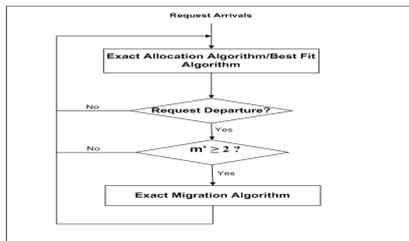
Dynamic VM scheduling

Objectives

- Proposing an energy aware VM scheduling Framework based on dynamic placement of VMs in cloud data centers.
- Proposing optimal algorithms for VM allocation and migration to reduce power consumption in cloud data centers.

Contributions

- Exact VM Allocation algorithm
- Exact VM Migration algorithm
- Adapted energy aware best fit algorithm



Mathematical Models

Exact VM Allocation

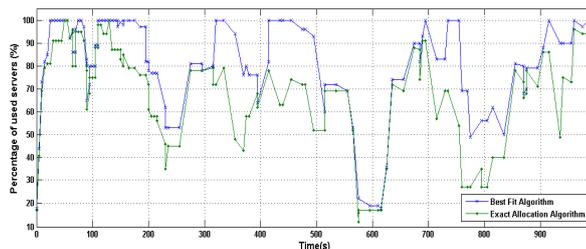
- Objective:** Initial VM placement with reducing the number of used servers.

Mathematical Programming Formulation:

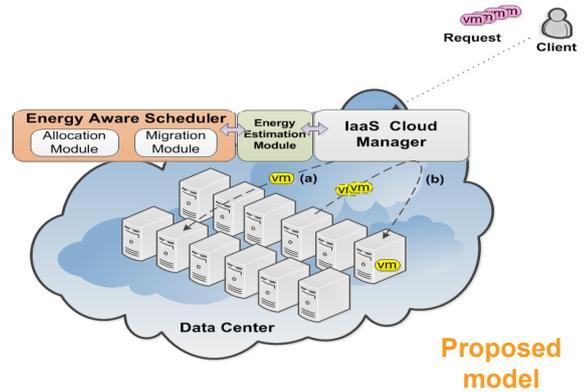
- Modelled as a bin packing problem with a minimum power consumption objective.

$$\begin{cases} \min Z = \sum_{j=1}^m e_j \\ \sum_{i=1}^n p_i x_{ij} \leq P_{j,Max} e_j - P_{j,Current} \\ \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1; \quad i \in \{1..n\}; \quad j \in \{1..m\} \\ \sum_{j=1}^m e_j \geq \left\lceil \frac{\sum_{j=1}^m P_{j,Current}}{P_{j,Max}} \right\rceil \\ e_j \in \{0, 1\}; \quad x_{ij} \in \{0, 1\} \end{cases}$$

Performance Results



- Performance comparison between the exact allocation and the best fit algorithms



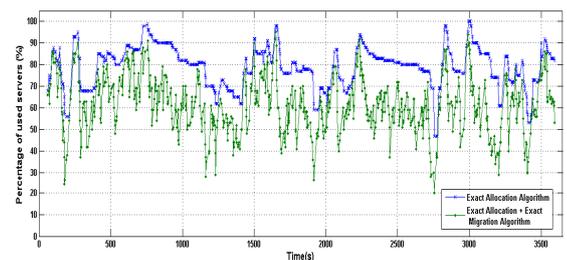
Exact VM Migration

- Objective:** Optimize constantly the number of used servers via dynamic VM consolidation.

Mathematical Programming Formulation:

- Based on a mathematical model for VM consolidation via migration that relies on a linear integer programming formulation.

$$\begin{cases} \max M = \sum_{i=1}^{m'} P_{i,Idle} y_i - \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{m'} \sum_{k=1}^{q_i} p'_k z_{ijk} \\ z_{ijk} + z_{jlk} \leq 1 \quad j \neq i; \quad l \neq j; \quad k \neq k' \\ \sum_{j=1}^{m'} \sum_{j \neq i} z_{ijk} \leq 1 \quad i \in \{1..m'\}; \quad j \in \{1..m'\}; \quad l \in \{1..m'\} \\ k \in \{1..q_i\}; \quad k' \in \{1..q_j\} \\ \sum_{i=1}^{m'} \sum_{k=1}^{q_i} p_k z_{ijk} \leq (P_{j,Max} - P_{j,Current}) (1 - y_j) \\ \sum_{j=1}^{m'} \sum_{k=1}^{q_i} z_{ijk} = q_i y_i; \quad z_{ijk} \in \{0, 1\}; \quad y_i \in \{0, 1\} \\ \sum_{i=1}^{m'} y_i \leq m' - \left\lceil \frac{\sum_{j=1}^{m'} P_{j,Current}}{P_{j,Max}} \right\rceil \\ z_{ijk} \Delta t_k \geq T_0 \end{cases}$$



- Performance comparison of the exact allocation algorithm with and without migration

Parties prenantes



Auteurs

Dincer Ibrahim, Pr,
UIOT, Canada

Rozen Marc, Pr,
UIOT, Canada

Bianchi Daniel, DE,
IRCELYON

Gaillard François, DE,
IRCELYON
Cazagliu Bogdan, HDR,
IFSTAR, Nantes

Florian Huchet, Dr,
IFSTAR, Nantes

Piton Maxime
Doctorant, Ecole SPIGA

Le Corre Olivier, Mines Nantes

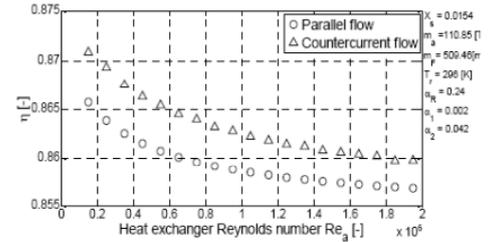
Partenaires



Procédé continu de centrale d'enrobage

Transferts thermo-convectifs avec une condition limite tournante

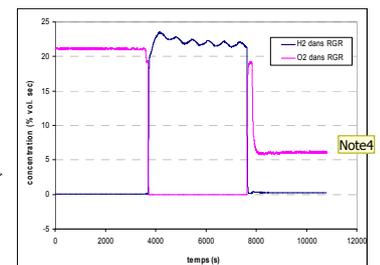
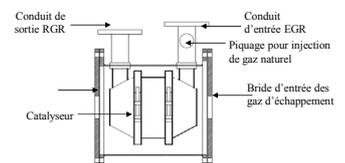
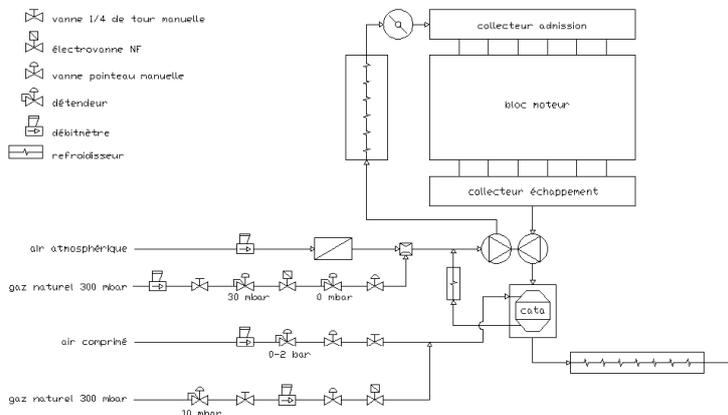
- **Objectif:** Réduire la consommation de combustible.
- **Moyen:** Définir un échangeur à ailettes droites ou hélicoïdales.
- **Méthode:** Approches numérique et expérimentale.
 - Caractérisation moyennée selon l'écoulement longitudinal (bilan masse et énergie) et confrontation avec les mesures.
 - Etude locale des champs de vitesse dans l'échangeur et confrontation aux mesures.
- **Résultat attendu:** Enveloppe soleau / Brevet sur le design de l'échangeur, valorisation scientifique.



Production in-situ d'hydrogène à partir de fumées

Vapo-réformage ou Oxydation partielle du gaz naturel

- **Objectif:** Améliorer le rendement des installations de cogénération alimentées par du GN: application aux moteurs thermiques stationnaires.
- **Moyen:** Introduire un catalyseur dans les fumées et créer une boucle en amont du turbo soit en condition de vapo-réformage soit d'oxydation partielle.
- **Méthode:** test de différents catalyseurs sur de longues durées.
- **Résultat:**
 - Brevet : WO2011010069 (A1) — 2011-01-27
 - Article :
 - Le Corre, O., Rahmouni, C., Saikaly, K., Dincer, I. Effect of H2 produced through steam methane reforming on CHP plant efficiency (2011) International Journal of Hydrogen Energy, 36 (17), pp. 11457-11466. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.11.126
 - Le Corre, O., Saikaly, K., Rosen, M.A. Effects on CHP plant efficiency of H 2 production through partial oxidation of natural gas over two group VIII metal catalysts (2012) International Journal of Hydrogen Energy, 37 (13), pp. 10380-10389. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.015



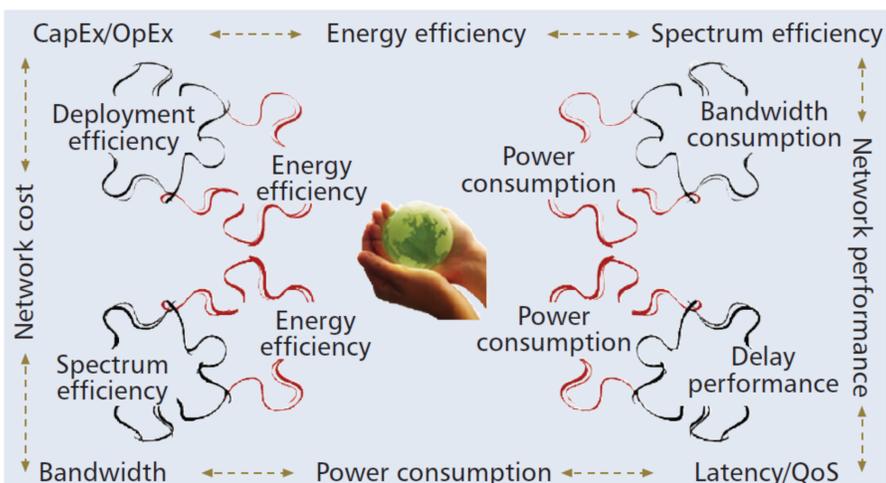
Energy Efficiency and Cloud Radio Network

Navid Nikaein, Christian Bonnet, Raymond Knopp, and Florian Kaltenberger
EURECOM, Mobile Communication Department
Email: firstname.name@eurecom.fr

I. Context and Motivations

- **Exponential growth of mobile Internet traffic volume**
 - ❖ Emergence of 4G/5G coupled with Internet-capable mobile devices
 - ❖ New applications and services : M2M, online gaming, interactive mobile video and mobile TV, context-aware and 3D applications
- **But, the revenues are not increasing with the traffic volume**
 - Per-bit energy consumption cannot follow traffic growth
 - Overall operating BS cell power cannot follow BS growth
- **Operators are seeking more cost-effective solutions to**
 - ❖ Introduce new applications and services, and enhance user QoE
 - ❖ Increase system capacity, 1000 times of today's throughput
 - ❖ Cope with the network traffic workload load demand and supply due to spatio-temporal traffic fluctuations
 - ❖ Reduce the total energy budget, and EMF emission
- **Green radio key enablers**
 - ❖ Small cell, HetNet, Relaying, Massive MIMO, and **Cloud-RAN**
 - ❖ Traffic management, offloading, content-optimized network
 - ❖ Virtualization, cloud computing, Software-defined network (SDN)
 - ❖ Network-wide coordination and orchestration

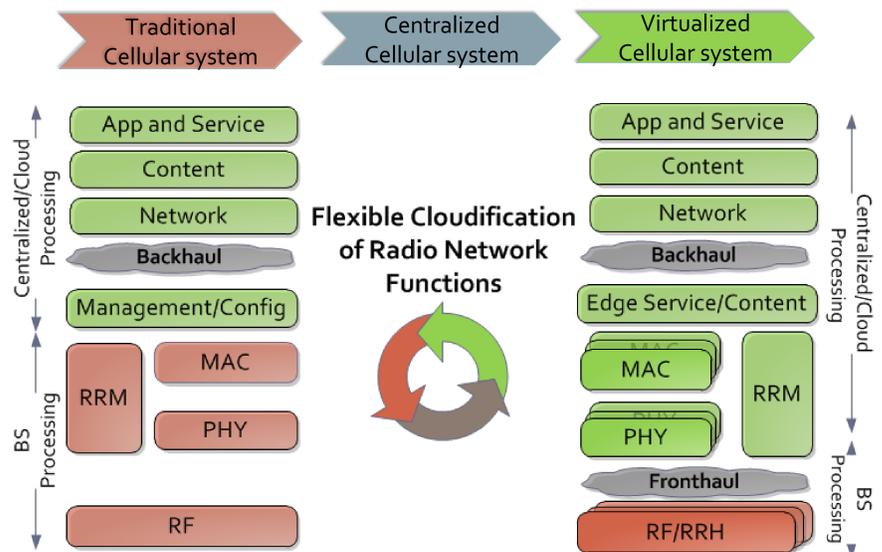
II. Fundamental Trade-offs on Green Radio



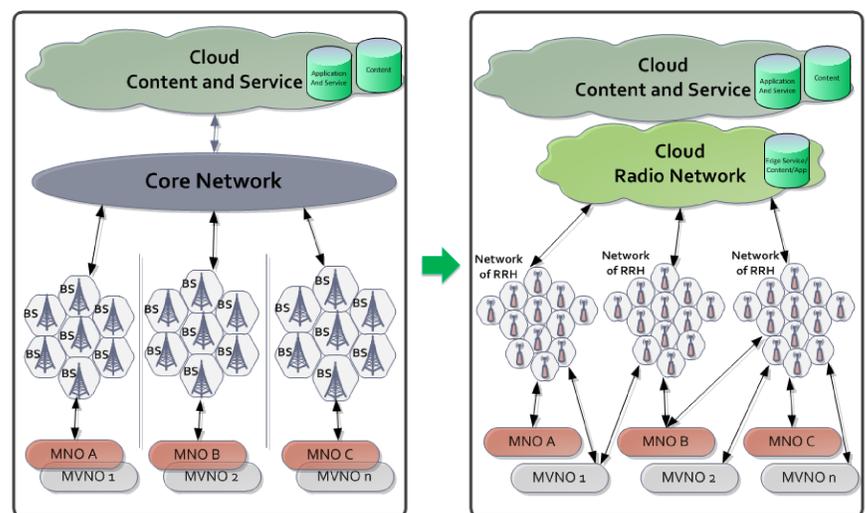
Source: Fundamental Trade-offs on Green Wireless Networks, IEEE Communication Magazine

- **Interplay between cost, latency, bandwidth, rate, and energy**
- **Trading for power**
 - ❖ Expanding the **bandwidth** for a given rate requirement ?
 - ❖ Reducing the **transmission rate** for a given bandwidth ?
 - ❖ **Delaying the service time** without deviating a given QoS ?
- **BS cell size and energy efficiency**
 - Reducing the cell size shorten distances between network and terminals → Lower the TX power up to 10dB and same SINR
- **Latency and energy efficiency**
 - ❖ Minimizing protocol latency minimizes energy consumption in DSP, embedded system, and processor on both network and terminal
- **BS availability and energy efficiency**
 - ❖ Only 20% of BS sites carry 80% of traffic
 - ❖ Turn BS on and off for dynamic load balancing and traffic flow offloading → adjust the network workload demand and supply
- **Content availability and energy efficiency**
 - ❖ The majority of mobile data is content-based services (video, web)
 - ❖ Place and store popular content at the network edge (prefetching/caching) → reduce the E2E latency/energy
- **Novel Radio transmission technologies and architectures**
 - ❖ Radio network cloudification and delivery as a service

III. Cloudification of Radio Network



- **Centralized/virtualized base station pool**
 - ❖ Migration from expensive specific hardware to GP platforms → **lower the cost of equipment**
 - ❖ Load balancing and traffic offloading to meet traffic fluctuation → **energy saving by dynamically turning on and off the RAN**
 - ❖ Rapid provisioning and new service adoption → **meet new traffic demands**
 - ❖ Efficient coordination and interference management across cells → **increase the overall system capacity and radio collaboration**
- **Scenarios**
 - ❖ **MVNOaaS**: value-added content and service bundle
 - ❖ **PMRaaS**: dedicated and reliable content and service bundle

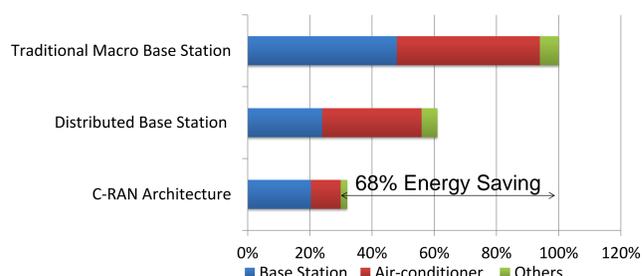


IV. Cloud-RAN Reduces 68% Power Consumption*

- **Majority of power consumption is from BS**
 - ❖ 50% by RAN
 - ❖ 50% by Air conditioning and other facility equipment

Scenario : China Mobile typical site model, total power consumption of traditional macro BS is 100%

RAN Energy Budget	Base Station	Air Conditioning	Other Major equipment	Total	Energy saving (%)
Traditional Macro Base Station	48%	46%	6%	100%	NA
Distributed Base Station	24%	32%	5%	61%	39%
C-RAN Architecture	20.4%	9.6%	2%	32%	68%



*Source: China Mobile and ZTE

2. RESEAUX ENERGETIQUES DU FUTUR

Parties prenantes



Informatique et
Automatique

Auteurs

J. Dibangoye
A. Doniec
H. Fakhm
F. Colas
X. Guillaud

Partenaires



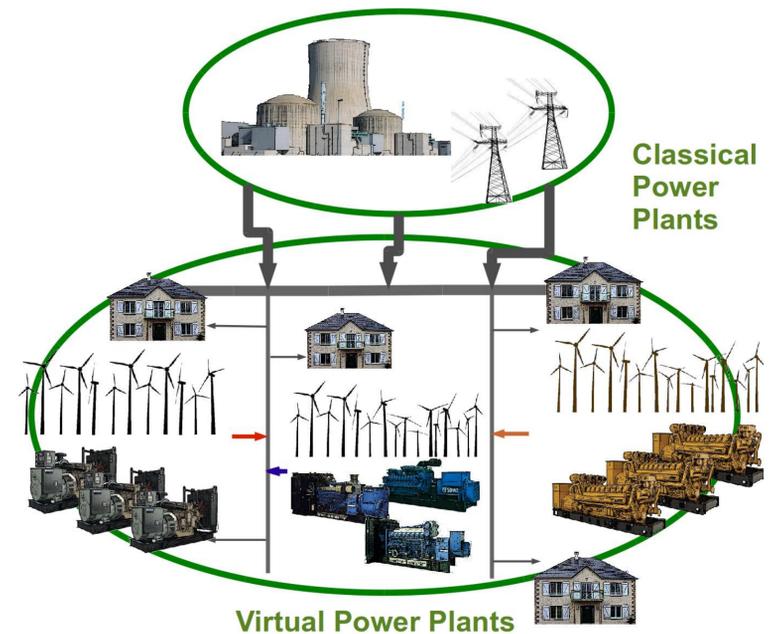
Agents for Virtual Power Plant

Context

- AgentVPP: a project funded by ADEME (2009-2012)
- Study the relevance and the impact of multi-agents systems for the management of Virtual Power Plant

Aim

- Solving the sequential stochastic Unit Commitment Problem (UCP) for a Virtual Power Plant involving several embedded generators:
 - Finding the optimal schedules and amounts of power to be generated by a set of units in response to an electricity demand forecast
 - Taking potential breakdowns of units into account
 - Scheduling the production in a distributed way

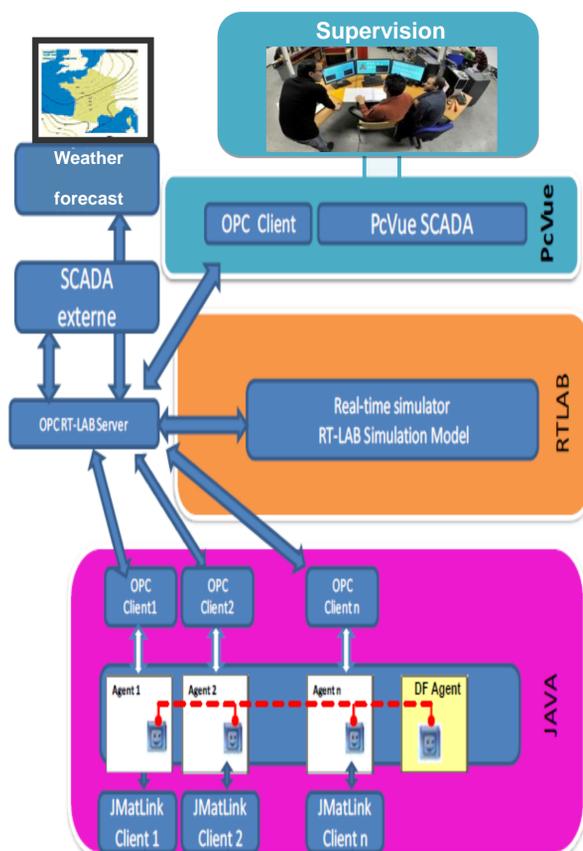


Proposed approach

UCP as Multi-Agent Markov Decision Problem (MMDP)

- Formulation of stochastic Unit Commitment Problem as a multi-agent sequential decision problem viewed as a set of quadratically-constrained optimization problems to solve
- Proposition of a new algorithm based on:
 - Distributed gradient optimisation
 - Multi-agent protocol dealing with local and global constraints of the problem

Experiments

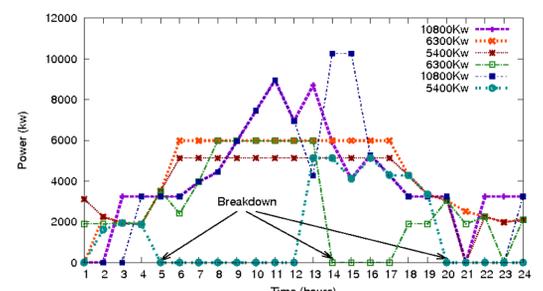
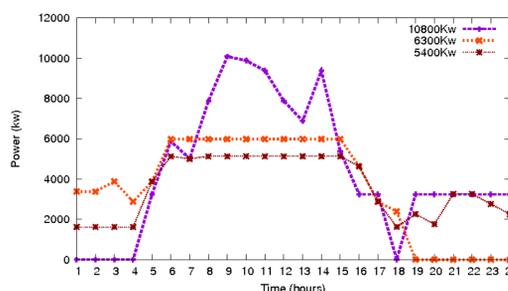


Real-time platform

- All experiments are performed on a real-time platform based on:
 - a distributed real-time simulator: RT-LAB
 - a supervision software: PC Vue
 - a Java multi-agent platform: Jade
 - OPC for communication

Scenario

- Several wind farms (wind turbines + diesel generators + energy storage) deployed on an IEEE 14-nodes networks
- Different numbers / types of generating units considered
- Test with and without breakdowns



Parties prenantes



Auteurs

Bossavy Arthur
Kariniotakis Georges
Girard Robin
Bocquet Alexis
Michiorri Andrea

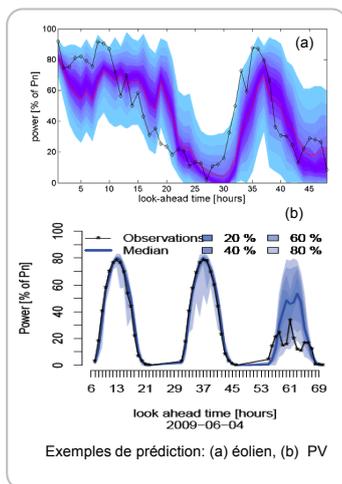
Partenaires (industriels)



Prédire pour mieux gérer

Les enjeux

- L'exploitation des réseaux électriques intégrant une part importante des énergies renouvelables (EnR: éolienne et solaire) doit faire face à de nouvelles difficultés liées au caractère variable et non contrôlable de ces dernières.
- La prédiction à court-terme (i.e., à horizon de quelques heures / jours) de la production EnR permet de faciliter diverses opérations de gestion: la planification de la production d'unités conventionnelles ou d'opérations de maintenance, l'évaluation des réserves, gestion de congestion etc.
- Dans un contexte de dérégulation des marchés de l'électricité, elle permet d'accroître les revenus des producteurs en limitant les pénalités liées aux écarts entre leur provision attendue et réelle.



Prédire le temps pour prédire la production

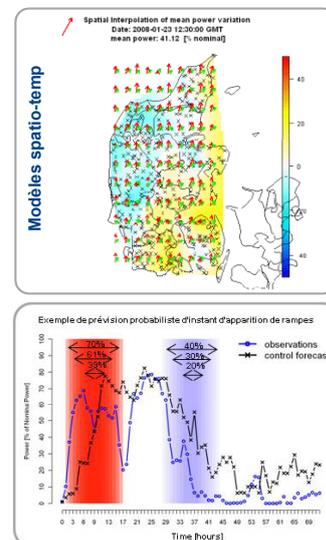
La méthodologie

- La prédiction de la production éolienne et photovoltaïque pour un horizon dépassant quelques heures nécessite de connaître l'évolution des conditions météorologiques.
- Des estimations de l'évolution de certaines variables d'intérêt (vitesse et direction du vent, irradiation solaire, température, etc.), fournies par des modèles numériques (NWP), sont utilisées en entrée des modèles de prédiction de la production.
- Ces derniers sont des modèles destinés à convertir en puissance électrique les estimations fournies par les NWP, en s'appuyant notamment sur des données de production historique.
- Les modèles actuels fournissent des estimations moyennes du niveau de production pour un horizon donné, associées à des estimations d'incertitude (e.g., intervalles de confiance).

Toujours chercher à mieux prédire ...

Les axes de recherche au sein de PERSEE

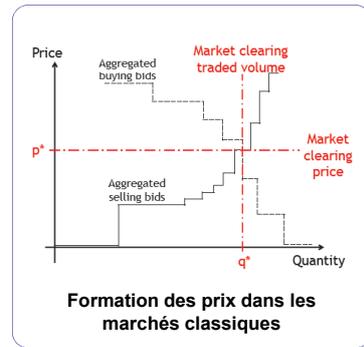
- Une priorité de recherche depuis 1992.
- **Projets sur la prédiction éolienne** en coordination: Anemos (FP5), Anemos.plus (FP6), SafeWind (FP7), Enseole...
- **Projets sur la prédiction PV**: Microgrids (FP5), MoreMicrogrids (FP6), Grid4EU (FP7), NiceGrid (AMI),...
- L'activité de recherche vise à développer des solutions pour:
 - Améliorer la performance des modèles de prédiction à différentes échelles temporelles (i.e. 5 min – 10 jours) et spatiales (au niveau local / ferme, régional, voire national).
 - Estimer l'incertitude des prévisions d'une manière fiable via des approches probabilistes .
 - Prévoir les situations extrêmes: e.g. prédiction de rampes, prédiction d'ensembles, indices de risque, scénarios de prédiction etc.
 - Intégrer les prévisions via des méthodes d'optimisation stochastique dans les outils de prise de décision pour la gestion du système électrique.



Contexte

Producteurs EnR et marchés de l'électricité

- Chaque jour J, les opérations du jour J+1 sont déterminées via le marché de gros en sélectionnant les offres des producteurs permettant de satisfaire la demande électrique en minimisant les coûts.
- En temps réel, des erreurs de prévision entraînent un déséquilibre entre l'offre et la demande. Pour compenser ces écarts, le gestionnaire de réseau fait appel aux réserves.
- Les producteurs EnR sont pénalisés pour les écarts constatés entre la production vendue et celle réalisée.
- Le faible coût de fonctionnement des EnR abaisse le prix du marché. Dans ce contexte, la participation au marché de services système peut représenter un biais supplémentaire de rémunération pour les producteurs renouvelables.



Parties prenantes



PERSEE



Auteurs

Fiona Foucault
Robin Girard
Georges Kariniotakis

Partenaires

SafeWind

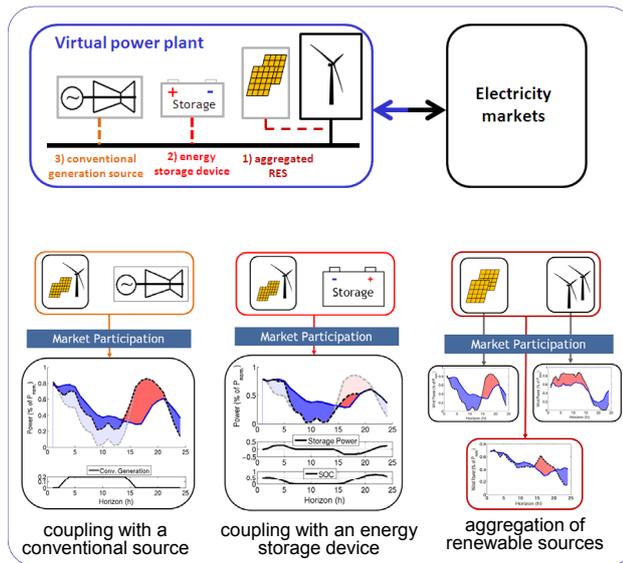
23 partenaires



22 partenaires



8 partenaires



Valorisation de la production

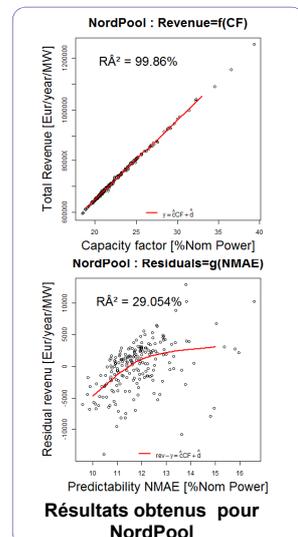
Activité R&D au sein de PERSEE

- Au Centre PERSEE nous développons des approches pour optimiser la valorisation de la production EnR dans les marchés de l'électricité:
- **Gestion des centrales virtuelles:**
 - Couplage des EnR avec des options de "hedging" physique (e.g. stockage, unités conventionnelles, agrégation, etc).
 - Etude des options de "hedging" financier (e.g. participation aux marchés infra – journalières)
- **Valorisation locale :**
 - Méthodes de participation aux marchés à **prix locaux**
 - Etude des marchés de **services système** et des mécanismes de **capacité**.

L'investissement dans un contexte de marché

Le rôle de la prédictibilité

- Lors du choix d'implantation, un site est généralement sélectionné en fonction de son facteur de charge estimé, c.a.d. le taux de production annuel au vu de la capacité nominale des installations.
- Il peut également être caractérisé par un niveau de prédictibilité c.a.d d'erreurs de prévision. Les sites à terrains complexes ont généralement un facteur de charge important avec une prédictibilité plus faible et inversement pour les sites à terrain plat.
- Un compromis entre ces deux caractéristiques pourrait donc être avantageux, dans le cadre de ventes sur un marché où les erreurs sont pénalisées.
- PERSEE a mené un travail sur des données éoliennes Danoises, et des données de marché de NordPool (pays nordiques), OMEL (Espagne), PJM (US). Il démontre que la prédictibilité est pour l'instant un facteur faiblement impactant, le facteur de charge expliquant la plus grande partie du revenu des producteurs.



Parties prenantes



PERSEE



Auteurs

François-Pascal Neirac
Robin Girard
Georges Kariniotakis
Christophe Tan
Thibaut Barbier
(Centre PERSEE, Département DEP)

Partenaires



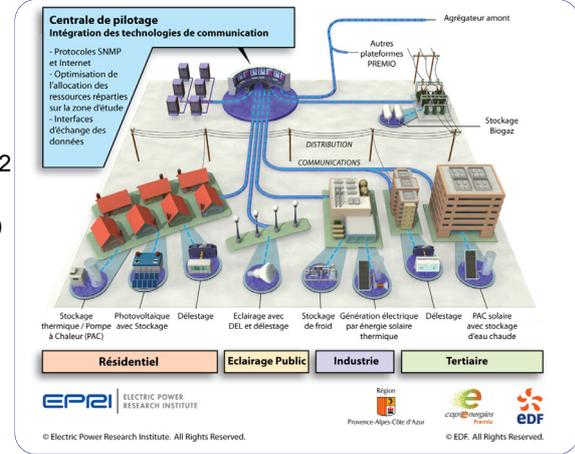
CONTEXTE

Le démonstrateur **PREMIO** (2008-2012) a été la première plateforme smartgrid en France :

- Pour tester en grandeur réelle des technologies smart-grid (52 appareils contrôlés par une centrale de pilotage)
- Implantée dans la ville de Lambesc (8500 habitants, Dép. 13)

PERSEE a développé un simulateur

- Re créant un "Lambesc" virtuel simulant chaque bâtiment
- Re créant par simulation la courbe de charge
- Permettant d'évaluer le déploiement à grande échelle des technologies Premio



METHODOLOGIE

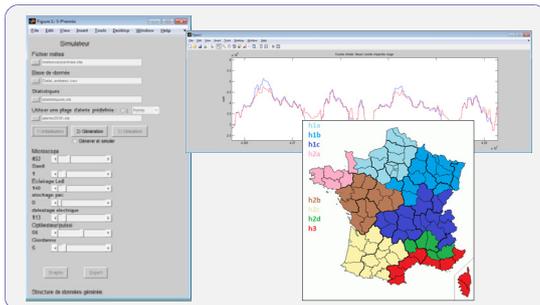
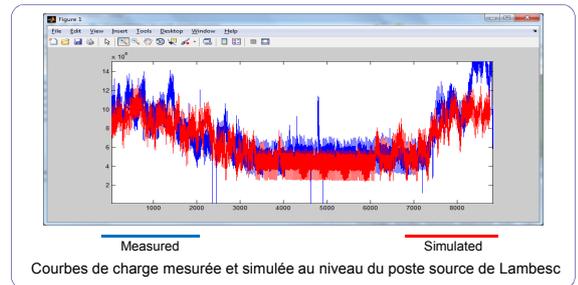
Création d'une ville virtuelle :

- Utilisation du modèle Territoire 3D : modèle 3D intégral de la France
 - Chaque bâtiment identifié, Géométrie {x,y,z}, volume, ...
 - Nature (résidentiel, ...), vétusté, ...
- Dans chaque bâtiment, placement aléatoire :
 - D'occupants
- D'équipements électriques (chauffage, électro-ménager, éclairage, ...)
 - En accord avec les statistiques connues (INSEE, taux d'équipement, ...)
- Simulation de chaque équipement
 - Modèles physiques et stochastiques
 - Prise en compte du comportement aléatoire (allumages, durées, ...)
 - Prise en compte du climat (simulation thermique du chauffage électrique, éclairage, ...)

RESULTATS

Reconstitution de la courbe de charge

- Agrégation des 52500 courbes de charge
- La simulation respecte :
 - Puissance, Energie, Facteur de forme
 - Variabilités : diurne, hebdomadaire, saisonnière
 - Pics de consommation



DEVELOPPEMENTS

Validation et développement avancé

- Validation en cours avec ERDF sur
 - un grand nombre de postes Hta-BT
 - Des données bâtiment « linky ».
- Nouveaux développements
 - Nouvelle implémentation (R/C++) plus rapide plus modulable
 - Mise en place d'un protocole d'évaluation



Parties prenantes



Auteurs

Andrea Michiorri

Georges Kariniotakis

Partenaires



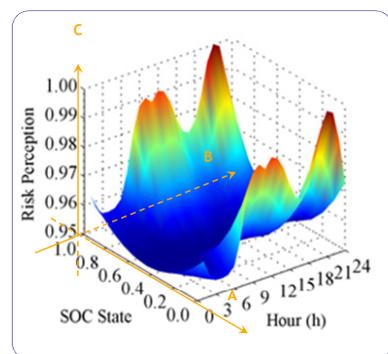
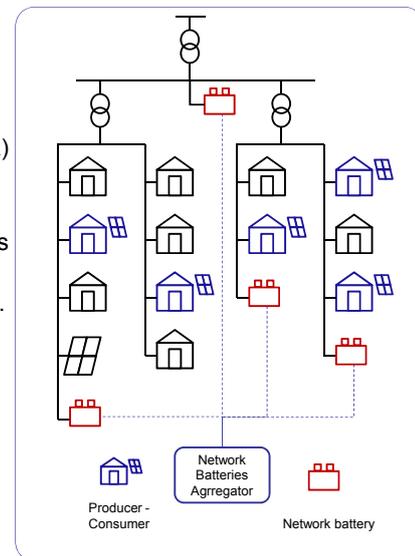
Active distribution network management

Regulatory and technological changes promote research on distribution network

- Necessity to integrate weather dependent renewable generation (EnR) such as Photovoltaic, Wind, Wave and Tidal
- Availability of cheaper and reliable ICT (smart meters, energy boxes...)
- Existence of markets where can be offered and traded between parties ancillary services such as stability reserve, voltage regulation, etc.
- New components : i.e.: storage devices load transformer tap changers...

R&D activities in PERSEE:

- PROJECTS: Microgrids (FP5), MoreMicroGrids (FP6), Anemos.plus (FP6), GRID4EU (FP7), Nice Grid...
- Development of methods for the management of distribution networks based on stochastic optimisation approaches. Applications to microgrids, virtual power plants, EnR/storage coordination a.o.



Risk perception in storage management

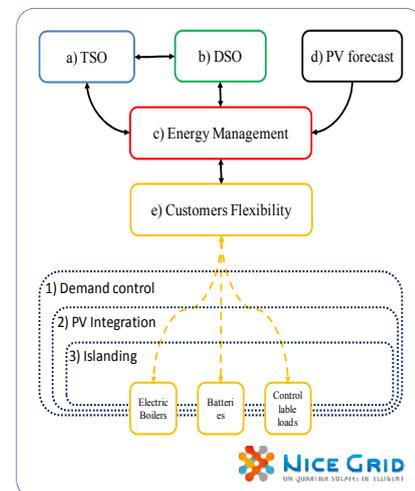
Stochastic weather dependent production can be dealt with appropriate techniques

- Defined as an intuitive risk judgment indicating which alternatives are riskier and which are safer and modelled as a three-dimensional surface:
 - A: Technology-related preferences. A preferred State of Charge per hour is specified
 - B: Time dependant preferences of the decision maker
 - C: Value of the perceived risk
- Application to microgrid management

Network battery management

Research and demonstration in Nice Grid

- ARMNES develops a "Network Batteries Aggregator" for the predictive management of 5 large batteries, of a size ranging from 30 kW to 1100 kW. It is responsible for :
 - The definition of a daily optimal plan for each battery,
 - The definition of flexibility offers to the Network Energy Manager.
- The optimal plans take into account several specific objectives for the network batteries:
 - Dynamic voltage control on the low voltage network to facilitate the integration of renewable sources,
 - Transmission network contingency support with load shedding,
 - Substation peak load shaving,
 - Support branch islanding, in order to improve the security of supply.



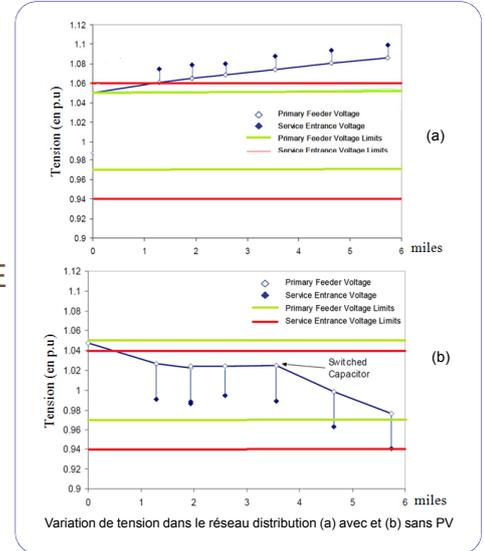
Contexte

Développement de la production décentralisée/EnR

- Favorisée par une baisse des coûts unitaires et les faibles effets d'échelle
- Conséquences :
 - Modification de l'équilibre offre-demande
 - Modification des besoins de réserves
 - Possibilité de *reverse power flow* dans le réseau de distribution

Stockage et Smartgrids: R&D au sein de PERSEE

- Dimensionnement/simulation du fonctionnement des moyens de stockage
- Gestion prédictive des micro-réseaux incluant du stockage
- Gestion des centrales virtuelles ou physiques EnR/stockage (i.e. AO CRE)
- Etude du rôle du stockage dans la planification de réseaux de distribution
- **PROJETS:** Anemos.plus, Microgrids, More-Microgrids, NiceGrid, Grid4EU, Thèse CSTB....



Parties prenantes



PERSEE



Auteurs

Robin Girard
François-Pascal Neirac
Andréa Michiorri
Georges Kariniotakis
Thierry Guiot
Yassine Abdelouadoud

Rôle du stockage

Déplacement d'énergie

- Optimiser le coût de production en diminuant le recours aux moyens de pointe ou en optimisant les achats sur le marché
- Eviter un investissement dans un moyen de production de pointe

Qualité et fiabilité de la fourniture

- Suivi et régulation de charge
- Fourniture de réserve primaire, secondaire et tertiaire
- Réglage de tension

Optimisation de la planification du réseau

- Gestion de la congestion des lignes
- Evitement/ajournement d'investissements

Méthodologie et résultats (simulation du stockage)

La simulation du stockage est un *Optimal Power Flow*

- Non linéaire, non convexe, à nombre entiers, de grande dimension ($N > 10^6$)
- Séparation du problème pour résolution itérative
- Définition d'un critère de criticité pour limiter le temps de calcul
- Méthode innovante de résolution des sous-problèmes

$$P_{j,t} - \sum_{kk \in KK_j, ll \in KL_j} R_{ll} \times \frac{P_{kk,t}^2 + Q_{kk,t}^2}{U_{kk,t}^2} - \sum_{kk \in KK_j} P_{kk,t} = P_{j,t}^{Charge_nette}$$

$$Q_{j,t} - \sum_{kk \in KK_j, ll \in KL_j} X_{ll} \times \frac{P_{kk,t}^2 + Q_{kk,t}^2}{U_{kk,t}^2} - \sum_{kk \in KK_j} Q_{kk,t} = Q_{j,t}^{Charge_nette}$$

$$U_{j,t}^2 + 2 \times \left(P_{j,t} \times R_l + Q_{j,t} \times X_l - \frac{U_{l,t}}{2} \right) \times U_{j,t} + Z_l^2 \times S_{j,t}^2 = 0$$

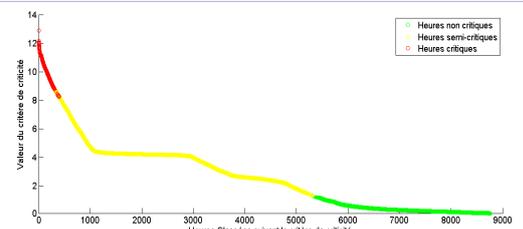
$$U_{j,t} = V_{j,t}^2$$

$$Z_l^2 = R_l^2 + X_l^2$$

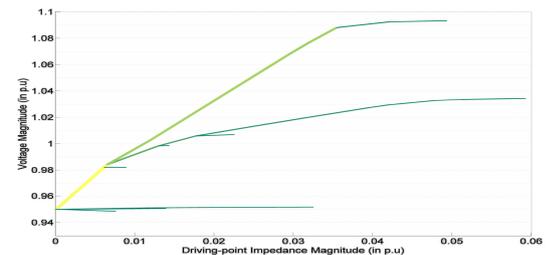
$$S_{j,t}^2 = P_{j,t}^2 + Q_{j,t}^2$$

$$V_{min} \leq V_{j,t} \leq V_{max}$$

Equations modélisant l'application « réglage de tension »



Classement des heures à l'aide du critère de criticité



Exemple de power flow résultant du problème d'optimisation

Partenaires



Parties prenantes



OBJECTIVES

The integration of wind generation into power systems is affected by wind variability and uncertainties in the forecasting of the expected power output.

The main objective of SafeWind project is to substantially improve wind power predictability in challenging or "extreme" situations for facilitating wind power integration at various spatial scales: local, regional, European.

OUTLOOK OF RESULTS

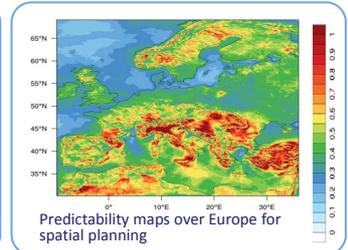
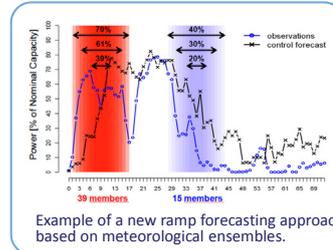
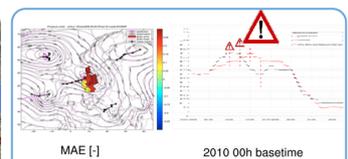
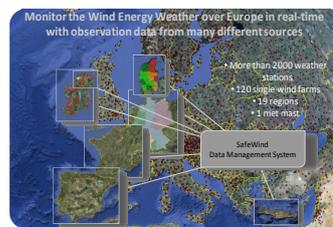
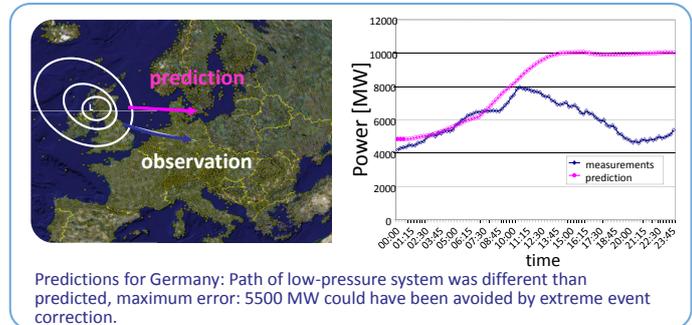
Solutions were developed for:

- Wind power ramps forecasting
- Extreme event forecasting (i.e. cut-off events)
- Spatio-temporal forecasting (up to 20% improvements)
- Wind power forecast scenarios for power system management tools
- Methods to monitor and assess the wind energy weather situation over Europe for detecting severe deviations in wind power forecasts
- Models for alerting and warning to react to severe deviations

Auteurs

Georges Kariniotakis
Robin Girard
Alexis Bocquet
Arthur Bossavy
Mathieu Reboul

Partenaires



A follow-up of the FP5 and F6 projects:



HIGHLIGHTS

Academic excellence and European leadership in the field with more than 140 scientific publications (~40 journal papers).

State-of-the-art solutions to facilitate large-scale wind energy integration into electricity grids.

Solutions close to the business processes of the European power systems industry.

Worldwide business opportunities for high-end European technology. SMEs in the project use the new knowledge to provide forecasting services worldwide.



Parties prenantes



- Grid4eu is a large-scale demonstration project of **advanced Smart Grids solutions** with wide **replication** and **scalability** potential for Europe.
- It lays the groundwork for the development of tomorrow's electricity grids.
- It is carried out by **6 Distribution System Operators**, covering more than 50% of the electricity supply in Europe.
- It tests the potential of smart grids technologies for massive **renewable energy integration**, **electric vehicle** development, **grid automation**, **energy storage**, **energy efficiency** and **load reduction**.

ARMINES participates in Grid4eu and NiceGrid with the Centre **PERSEE**, which contributes on :

- Short-term PV generation forecasting,
- Management of the network batteries,
- Simulation of the smart grid operation,
- Evaluation of replicability and scalability potential

Auteurs

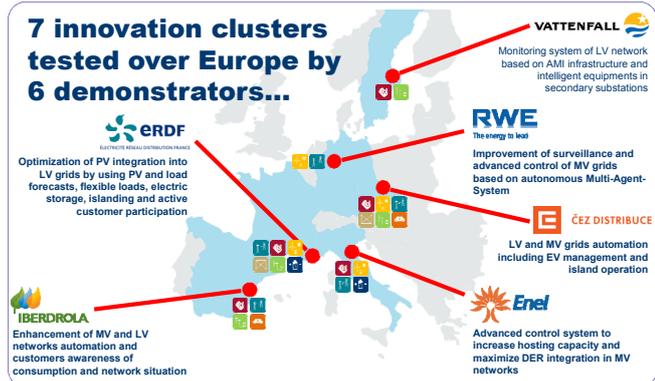
Georges Kariniotakis
 Andrea Michiorri
 Alexis Bocquet
 Arthur Bossavy
 Robin Girard



- Nice Grid is one of the 6 demos of Grid4eu. It aims at testing the operation of a **smart grid** with **enhanced communication** and **response capabilities**, and **high penetration of dispersed solar power sources** connected to individual **energy storage units**.

- The **objectives** are:
 - Optimize a LV grid with a massive penetration from decentralized generation (i.e. PV) and storage.
 - Plan microgrid islanding based on PV generation and storage capabilities
 - Engage consumers with a proactive role in the management of their electricity generation, consumption and storage
 - Facilitate testing of innovative business models and services.

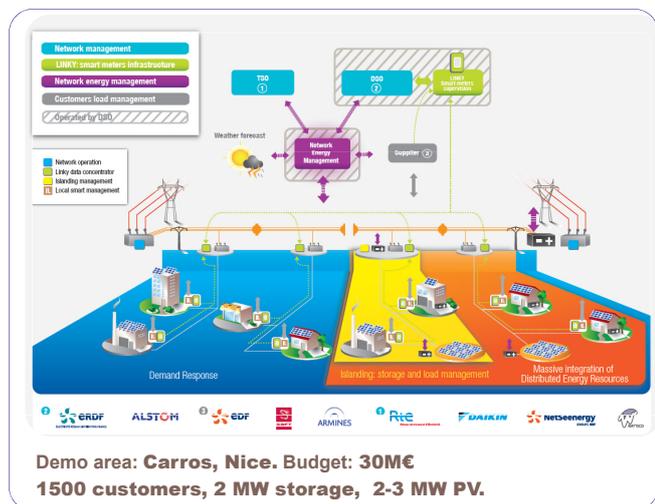
Partenaires



Key figures
 27 partners, 10 countries,
 54 M€ budget, 25 M€ EC grant

Partners
 ABB, Alstom Grid, Armines, CEZ Distribuce, CEZ Group, Cisco, Comillas, Current, EDF, eMeter, Enel Distribuzione, ERDF, Iberdrola Distribucion, Iberdrola Generation, Iron, KTH, KUL, Landis+Gyr, Ormazabal, RSE, RWE, Schneider Electric, Selta, Siemens, TUD, Vattenfall, Eldistribution, ZIV

www.grid4eu.eu

www.nicegrid.fr




Parties prenantes



Auteurs

H. Er-rbib
C. Bouallou

Partenaires

Contexte général

- La production d'électricité a atteint 4 447,5 TWh en 2011 dans le monde, dépassant les 20% de la production totale (20,2% en 2011);
- Les énergies renouvelables (EnR) sont peu polluantes mais fluctuantes : problème de stockage;
- Les accumulateurs d'électricité sont très volumineux et de durée de vie limitée;
- Le stockage de l'électricité sous forme de méthane présente les avantages suivants:
 - Un gain environnemental lié au déverrouillage du déploiement à grande échelle d'énergies décarbonées;
 - Indépendance vis-à-vis des ressources fossiles;
 - Réduire les coûts induits par la consommation de l'électricité;
 - Assurer le contrôle et l'ajustement de l'énergie électrique (qualité et stabilité de l'énergie).

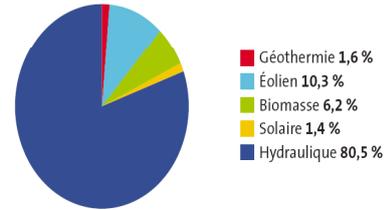
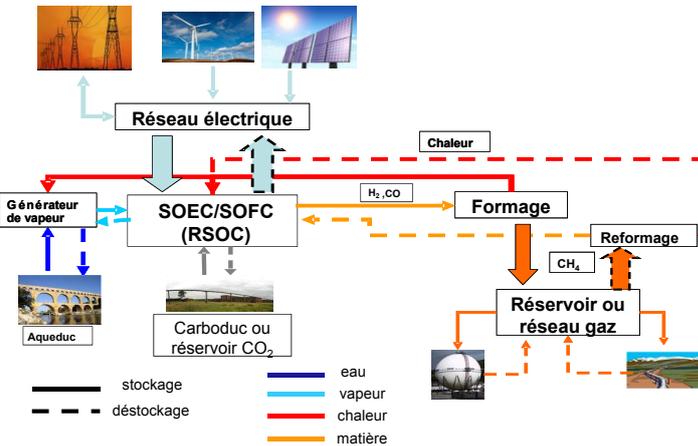


Fig.1 : La production électrique d'origine renouvelable en 2011
Source: Agence Internationale de l'énergie

Objectifs

- Conception un procédé réversible de stockage et déstockage de l'électricité sous forme de méthane de synthèse en utilisant un co-électrolyseur à haute température;
- Etude énergétique et économique d'un système fonctionnant à charge variable allant jusqu'à l'inversion.

Description du procédé



- Dans la phase de stockage, le réacteur électrochimique fonctionne en mode électrolyseur (SOEC) et consomme l'électricité EnR excédentaire en co-électrolysant de l'eau et du CO₂, en provenance soit de réservoirs, soit de réseaux d'approvisionnement;
- Dans la phase de déstockage, c'est-à-dire quand le réseau électrique redevient demandeur d'électricité, le fonctionnement de l'électrolyseur est inversé, il fonctionne alors en mode pile (SOFC) et consomme du gaz en produisant de l'énergie électrique. Ce gaz provient alors du réseau gaz;
- Pour initier le cycle de stockage/déstockage, la quantité de CO₂ nécessaire est introduite pour le stockage et est capturée au déstockage;
- Le procédé est un système ouvert avec des connexions en amont et en aval (réseau électrique et réseau gaz), sans limite de volume ni de lieu de déstockage et de stockage.

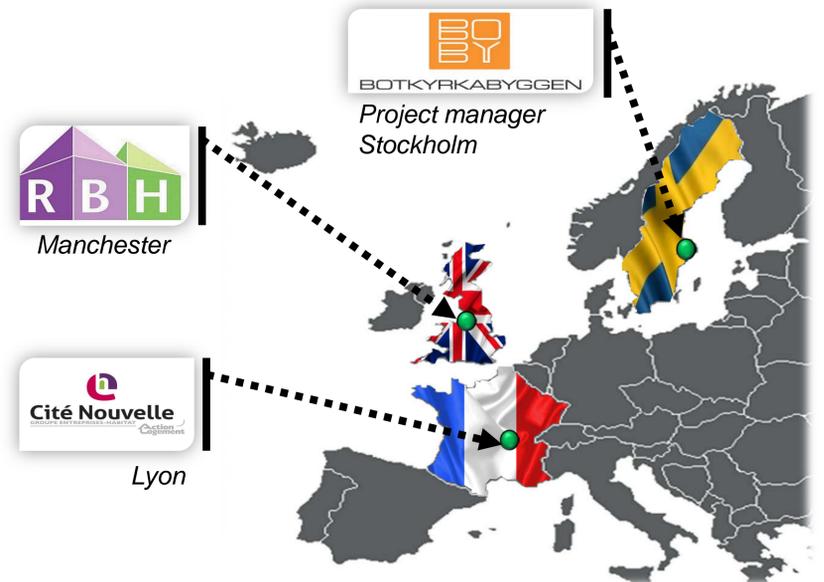
Résultats et perspectives

- Le procédé conçu permet de stocker 5,46 MW et de déstocker 11,08 MW;
- L'efficacité énergétique lors de la production d'électricité est 36,4%;
- Bilan CO₂:
 - -256 g/kWh en phase de stockage;
 - 325 g/kWh en phase de déstockage;
- Les prochains travaux porteront sur des simulations énergétique et fluïdique des unités conçues en mode dynamique.

Mode	Stockage				Déstockage			
	Consommation (kW)		Production (kW)		Consommation (kW)		Production (kW)	
Forme	Elec.	Therm.	Elec.	Therm.	Elec.	Therm.	Elec.	Therm.
RSOC	5463,98	1669,22	-	-	-	-	11080,83	2299,64
Total	6275,42	4578,16	185,96	5163,18	4479,84	14934,34	12183,86	16612,58
Net	6089,46	-	-	585,02	-	-	7704,02	1678,24

OBJECTIVE

The objective of the SHOWE-IT project is to demonstrate, under real conditions, how advanced ICT components and systems can enable services that help reduce energy and water consumption in social housing across Europe. To achieve this, the project takes a demand-driven approach, prioritizing as starting point an affordable investment per dwelling (about 2000 €), and putting in place an integrated and easy replicable ICT-based services. The project expects to achieve an overall energy and water consumption reduction of 20 %.



Stakeholders



Authors

Jonathan **VILLOT**
 Natacha **GONDRAN**
 Florent **BREUIL**
 Equipe **PIESO**
 Institut Henri Fayol
 ENSM-SE

Partners



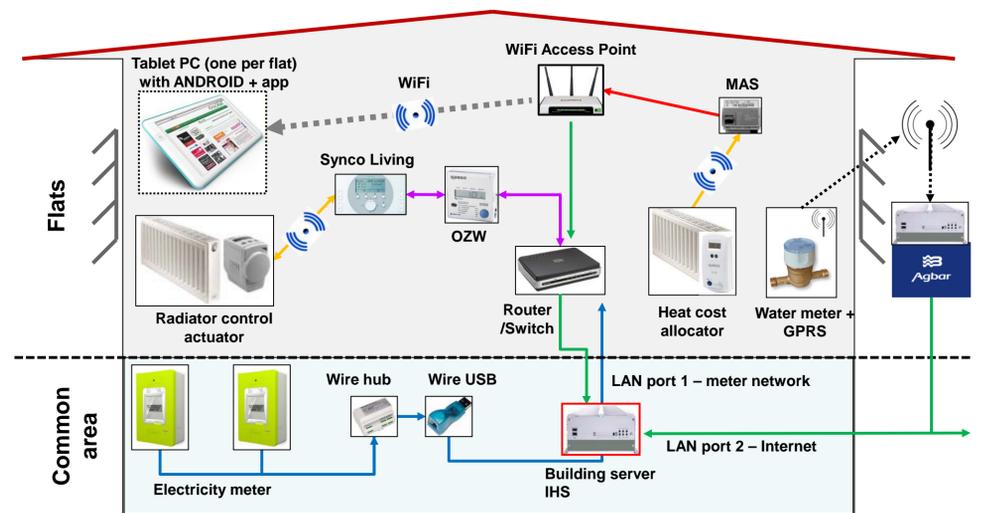
PILOT SITES

The project regroup 12 partners. Among them, some companies like Siemens, GDF Suez, Acciona aim at creating a solid demand for such energy & water saving ICT based solutions. The service developed will be tested in three social housing companies (183 dwellings) corresponding to the average mix of the majority of the EU social housing stock (individual homes, tower blocks, etc).

SYSTEM ARCHITECTURE

SHOWE-IT will supply a set of ICT-based services to SHC pilot sites to help optimize energy and water consumption. The most relevant technical elements to be integrated are the following:

- ✓ Synco living home automation system
- ✓ Wide Area Communication
- ✓ Water metering: meters
- ✓ Electricity & gas metering
- ✓ Consumption visualization application
- ✓ End user display: ANDROID home tablet



SAVINGS & SCIENTIFIC BOTTLENECK

The role of ARMINES/IHF in this project is to develop a methodology to estimate the effective savings and analyze the data to assess the interest of such a system. In SHOWE-IT, the main scientific bottleneck is due to the lack of comparative data to estimate the savings, once the technology is put in place. Considering the context of the project, the option that fits better is the CGPG method (Control Group/Pilot Group). The CGPG consists of establishing two groups with the same kind of profile in each location. One group have intervention (pilot group) and the other (control group) have not. The savings are calculated by an indirect comparison (using a kriging approach) between those two groups.

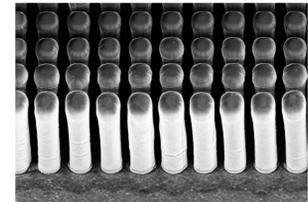
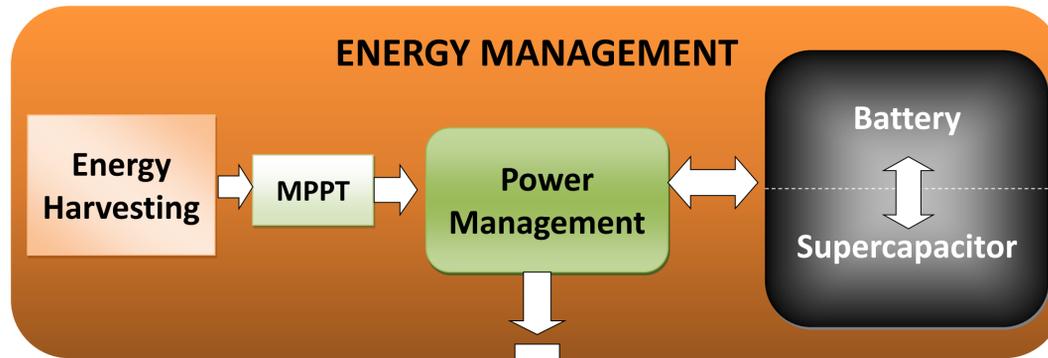


Within the team CSAM (Circuits, Systèmes et Applications des Microondes) of IEMN (Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie) and within IRCICA (Institut de Recherche sur les Composants logiciels et matériels pour l'Information et la Communication Avancée - USR CNRS 3080) we develop a research on ultra low power sensor networks. Our goal is to minimize the energy consumption so that the life duration of the network could be infinitely long. We develop studies including nanotechnologies (energy harvesting, storage devices), RF front-ends design, energy management but also radio channel and interference modeling and MAC layer optimization.

Main contributors



Energy Optimization: from the node...



3D Li-ion microbattery

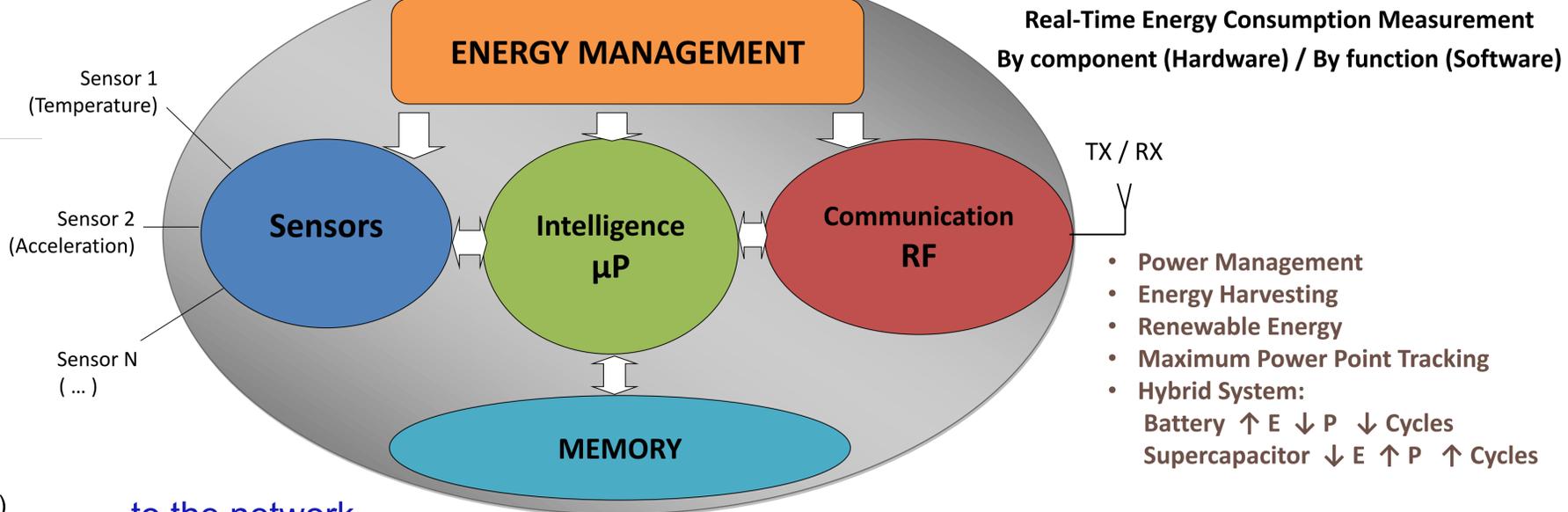


Supercapacitor

Authors

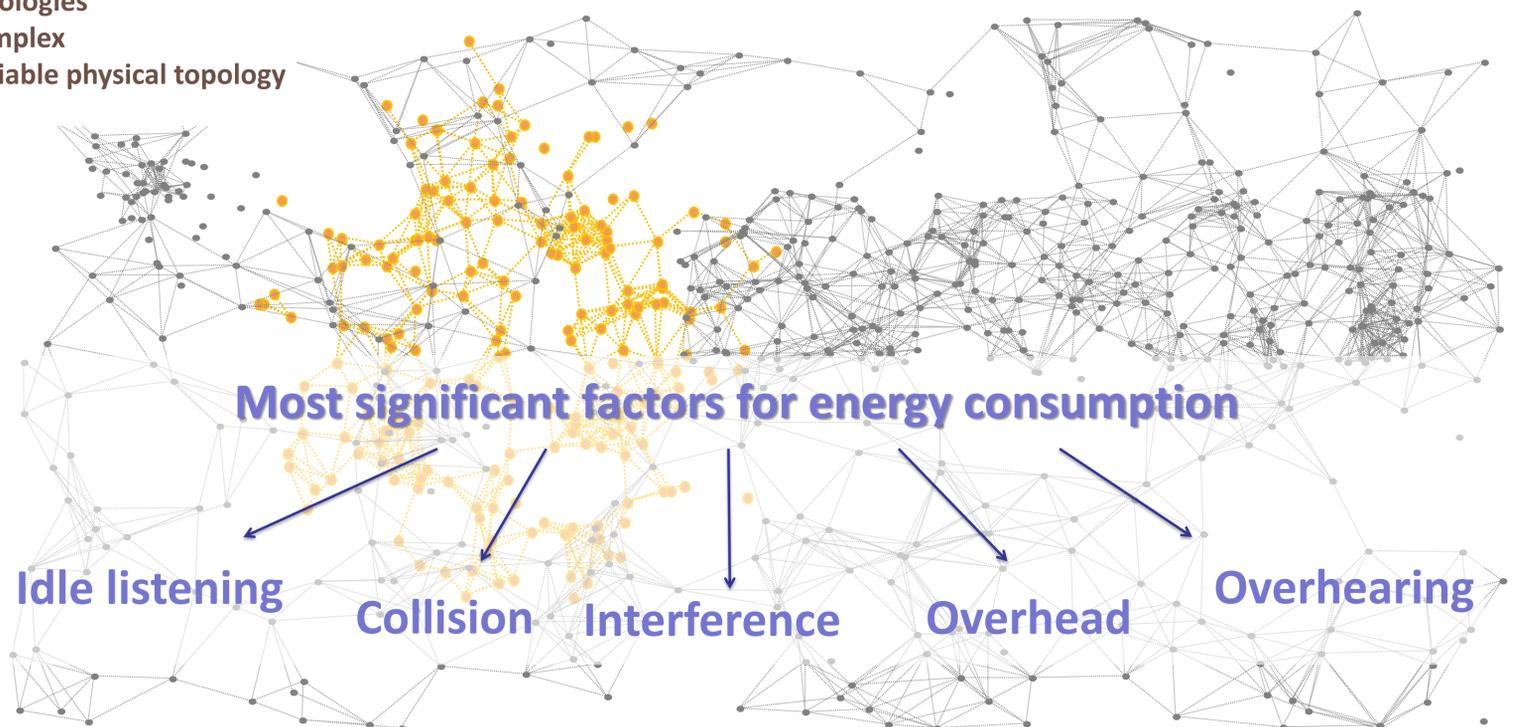
- Laurent CLAVIER
- Viktor TOLDOV
- Román IGUAL
- Nathalie ROLLAND
- Rédha KASSI
- Christophe LETHIEN
- Christophe LOYEZ
- Alexandre BOE
- Nathalie MITTON (Inria)
- Thomas VANTROYS (LIFL)
- ...

Partners



... to the network

- Large scale
- Different logical topologies
- Complex
- Variable physical topology



Conclusion

Our aim is to create an experimental environment where we can accurately evaluate the energy consumption and optimize at the node level and at the network level the main factors of energy dissipation.

Abstract

One of the most important goals of the 21st century is to change radically the way our society produces and distributes energy. This broad objective embodies in the smart grid's futuristic vision of a completely decentralized system powered by renewable plants. Imagine indeed such a real time power network in which everyone could be a consumer or a producer. Based on a coupled information system, each user would be able to buy/sell energy at a time depending price that would allow a homogenization of the consumption, eradicating the well-known morning/evening pick. This attractive idea is currently booming in the scientific community as it generates intellectual challenges in various domains. Nevertheless, lots of unanswered questions remain. The first steps are currently accomplished with the appearance of smart meters or the development of more efficient energy storage devices. However, the design of the decentralized information system of the smart grid, which will have to deal with huge amounts of sensor's data in order to control the system within its stability region, seems to be still in search. We propose thus to build a model for this information system based on various tools of the complex system theory.

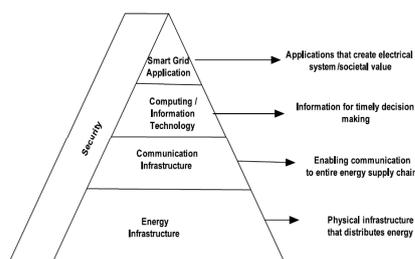
Parties prenantes



A new architecture for a "smarter" system

Issue: Probably no longer possible to operate in centralized way when including a large amount of hardly controllable and predictable renewable generators.

Solution: Necessity to modernize the power system by adding key technologies (Sensing and Measurement, Advanced control methods and components, Improved interfaces and Decision Support).



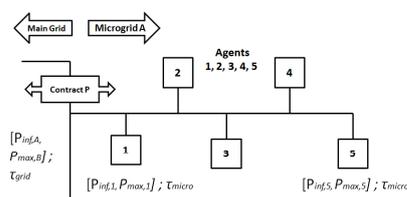
- Producer + Consumer**
 - Not only consume, but produce, sell and store energy
 - Economically interested, prosumers expect retributions
- Interesting idea, but :
 - How can a prosumer reach the grid's requirements (quality, stability, power...) to sell energy ?
 - Sell energy to who ?
 - How to retribute prosumers ?
 - How to deal with a huge amount of constantly changing buying/selling agents ?

Auteurs

Nicolas Gensollen
Vincent Gauthier
Monique Becker
Michel Marot

Toward a distributed infrastructure: Multi-Level Consensus in The Smart Grid under Dynamic Agent Behaviors

I. Distributed algorithms for reaching consensus



- If $\sum_{i \in A} P_{max,i} < P$ then A cannot afford the contract.
- If $\sum_{i \in A} P_{max,i} \geq P$ then $\Delta P = P - \sum_{i \in A} P_{min,i}$ is divided incrementally among agents with a consensus algorithm to reach equilibrium :

II. Issues

- Which entities are responsible for the decisions ?
- How can Microgrids form clusters ?
- How can a network be subdivided into microgrid communities ?
- How can the demand be managed in islanding context ?

III. Virtual Power Plant

- How to form profitable coalitions in a decentralized way ?
- How to model realistic agent behaviors (cooperative/non cooperative) ?

Expected Results

Build a model that include various level of design constraints

- I. Behaviors (Agent Model for the Prosumers, Coalitions of multiple Prosumers)
- II. Centralized/Decentralized control of the Energy Demand/Production (Consensus)
- III. Network infrastructures (Duplex Electrical Bus, Topology, complex systems)

Télécom SudParis

Hossam Afifi
hossam.afifi@it-sudparis.eu

Michel Marot
Michel.marot@it-sudparis.eu

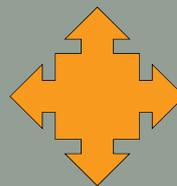
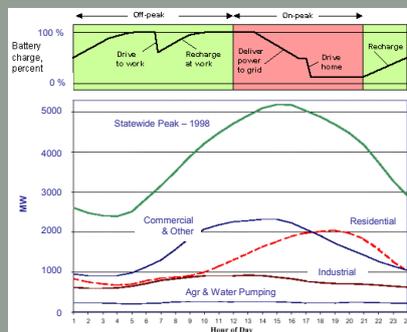
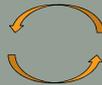
Télécom ParisTech

Houda Labiod



Un nouvel écosystème

Fournis de l'énergie &
Échange de l'information

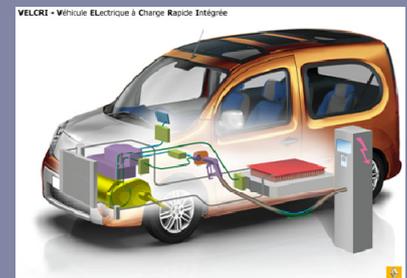


Fournisseur d'énergie (distribué) &
Echange de l'informations



Besoin de Communications

- Mesurer, échanger
 - La consommation des véhicules
 - L'état de charge de la batterie
- Optimiser la recharge des véhicules en fonction :
 - De la localisation
 - De la demande en énergétiques
 - De la disponibilité de la production d'énergie
 - Du type de batterie
- Fournir la tarification adapté à tout type de recharge/échange de batteries



Communications de machine à machine

Un environnement multi-utilisateur, multi opérateurs, et distribué

- Développement d'une interface sécurisée de communication entre le véhicule et l'infrastructure de distribution d'électricité (sans fil, filaire)
 - Communication Multimodale
 - Inspiration du système de roaming du réseau cellulaire pour l'identification, l'authentification et la facturation (sur facture domicile)
 - Pervasivité des moyens de communications dans le véhicule
 - Authentification des véhicules, et le paiement sécurisé des recharges
- Communication du niveaux de la batterie aux différents éléments du réseau
 - Stations de recharge
 - Infrastructure de production d'énergie
- La batterie devient un élément de stockage d'énergie faisant partie du réseau de distribution d'énergie



PRINCIPE

Proposer une infrastructure de recharge pour véhicules électriques:

- Adaptée aux véhicules privés hybrides ou 100% électriques
- Ne nécessitant pas de coût de génie civil: réutilisation des réseaux d'éclairage publics existants
- Consommant de nuit l'énergie non utilisée par l'éclairage urbain après la période de chauffe des lampes
- Reposant sur une réservation à distance par l'utilisateur d'une borne de recharge choisie parmi plusieurs proposées sur son smartphone par le serveur central Telewatt

Objectifs de la contribution de Télécom ParisTech

Conception d'un algorithme d'affectation des bornes de recharge :

- Optimisant l'utilisation du système à chaque instant
- Ne perturbant pas de nuit le bon fonctionnement de l'éclairage urbain

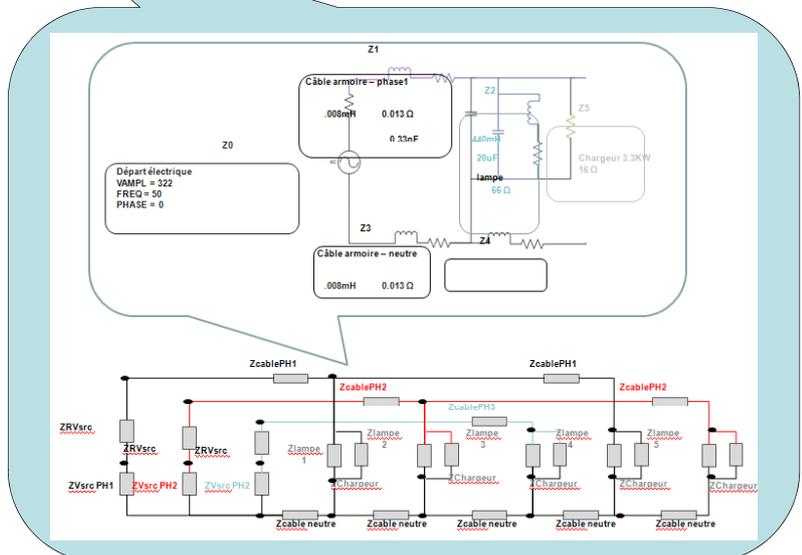
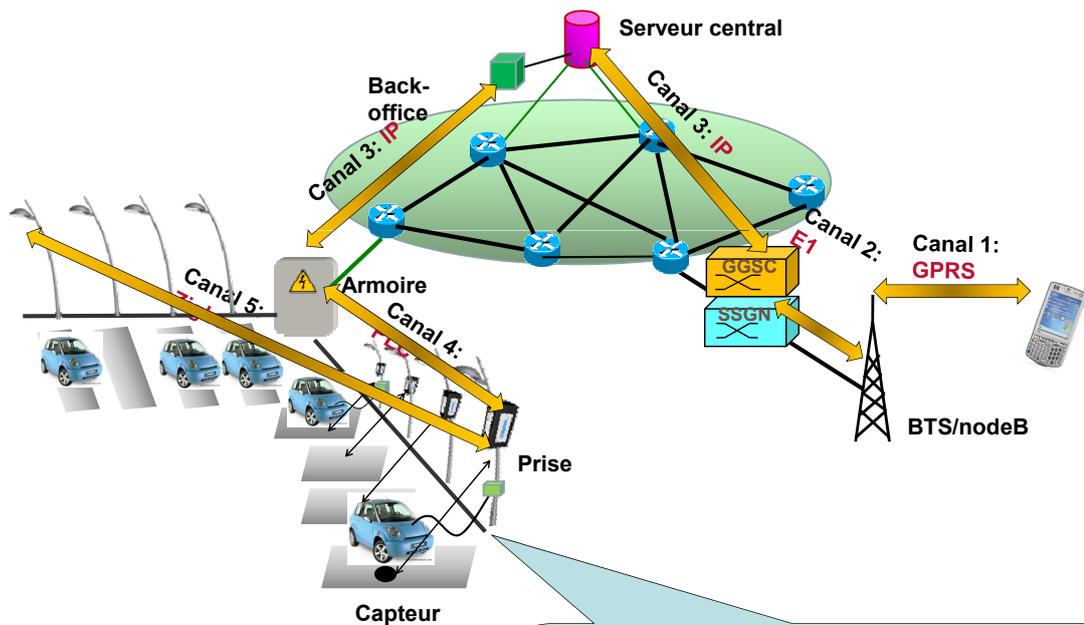
Parties prenantes



Auteurs

- Maurice GAGNAIRE (Professeur)
- Fadi Abi ABDALLAH (Ingénieur de Recherche)
- Sawsan AL ZAHR (Ingénieur de Recherche)
- Mario ALVARADO (Doctorant)

Partenaires



Parties prenantes



Objectifs du projet GreenFeed

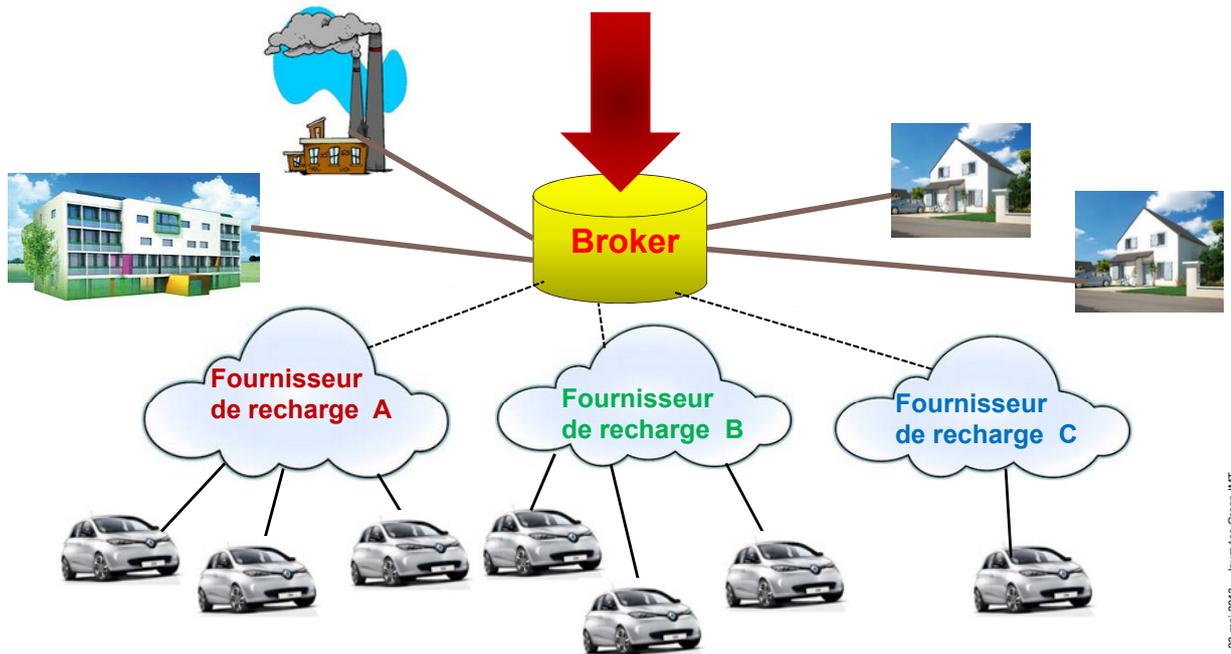
Concevoir un « broker » de service de recharge de véhicules électriques:

- Autorisant l'interopérabilité de services de recharge (*roaming* de service de recharge)
- Contribuant à la normalisation ISO CEI15118

Partenaires

VU LOG

Carsharing Technologies and Services



Objectifs de la contribution de Télécom ParisTech

- Conception d'algorithmes de partage de charge entre les différentes sources d'énergie tirant profit des énergies renouvelables
- Utilisation de modèles prédictifs (statistiques sur les déplacements urbains, prévisions météorologiques)
- Politiques de *pricing* entre fournisseurs d'énergie et fournisseurs de services de recharge
- Conception et étude de configurations types (*use case*)

Auteurs

- Maurice GAGNAIRE (Professeur)
- Fadi Abi ABDALLAH (Ingénieur de Recherche)
- Sawsan AL ZAHR (Ingénieur de Recherche)
- Isabel AMIGO (Postdoc)
- Felipe DIAZ (doctorant)

WHY A SMARTER GRID?

- Reduce CO2 emission (The 20-20-20 targets)
- Energy self sufficiency
- Enhance reliability
- Reduce capex and opex costs
- Advanced service models

CRISIS MANAGEMENT (power shortage)

- Traditional approach: Rolling blackout
- Our approach: Differentiated services
 - Continuous supply for critical loads
 - Take into account utility for users depending on their characteristics, environmental conditions and appliances' operation
- Fairness

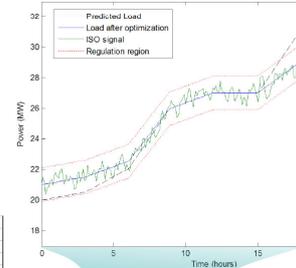


MEANS

- Change the load curve shape (reduce peak, lower consumption)
- Distributed energy resources
- Renewable energy sources (wind, PV,...)
- Enhance efficiency

AGGREGATORS

- Provide advanced DR mechanism to leverage consumers' storage capabilities and load and generation flexibility
- Enable prosumers' participation in the electricity market, including ancillary market
- Dynamically optimize Aggregator's decisions based on: load forecasts, client policies, market prices, flexibility capabilities and ISO signals



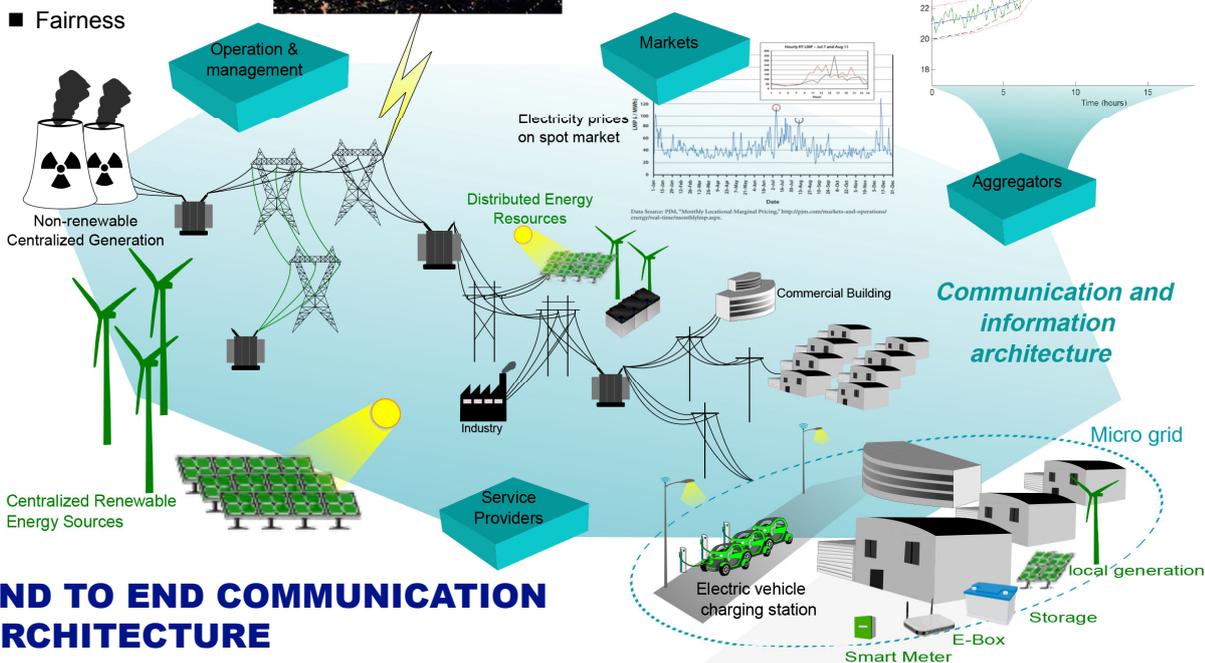
Stakeholders



Authors

- PhDs:
- BLIMAN Federico
 - HORTA Jose
 - KADDAH Rim
 - OBADIA Mathis
- Advisors:
- KOFMAN Daniel
 - ROUGIER Jean-Louis

Partners

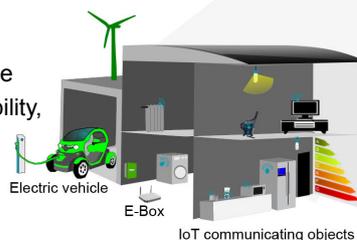


END TO END COMMUNICATION ARCHITECTURE

- Provide interconnection of actors/devices for advanced services and enhanced controls
- Optimal distribution of overall system intelligence
- Requirements: Interoperability, Flexibility, Reliability, Security, CAPEX & OPEX.
- Based on ESOs work for M/490 mandate

INTERNET OF THINGS

- Architecture for customer energy management system targeting autonomic policies' implementation:
 - auto-discovery, self-configuration and self-healing
- Solutions for advanced grid monitoring and control
- Smart grid, vehicles, cities and homes convergence



MICROGRID MANAGEMENT

- Manage cooperatively electricity production and consumption locally on a neighborhood or campus level
- Leverage local storage and renewable energy sourcing capabilities
- Enhance efficiency (e.g., less transport losses)
- Ensure overall system visibility, stability and predictability

1. CONTEXTE

Smart Grid

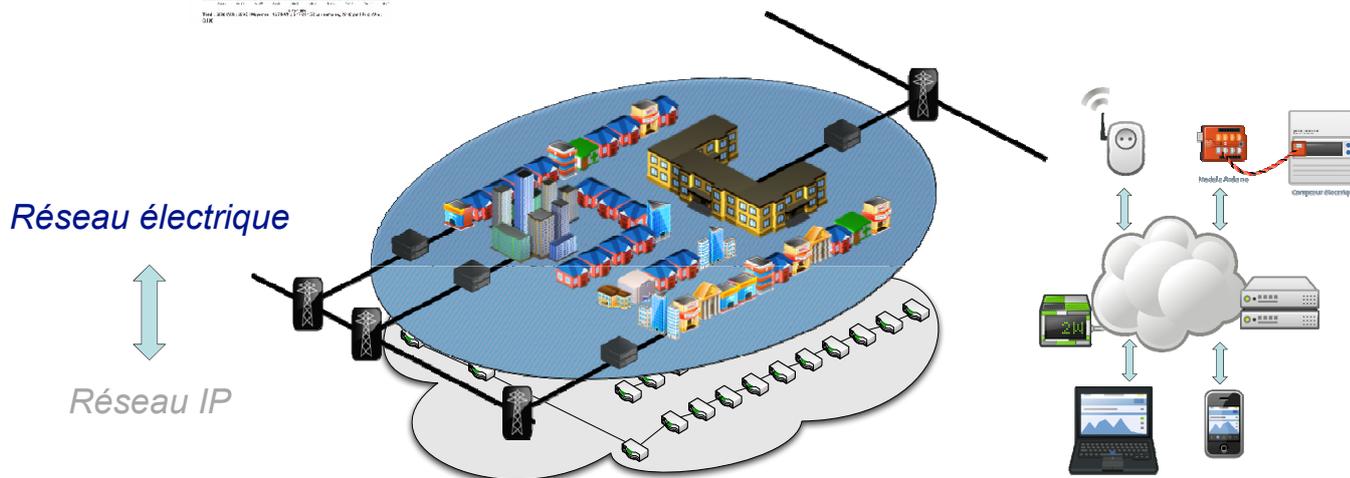
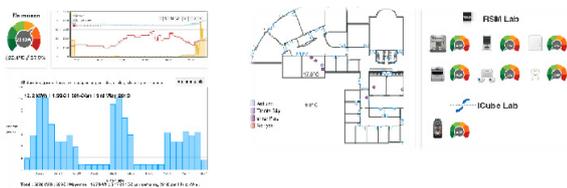
- Evolution du réseau de distribution d'électricité
- Smart Grid = Power Grid + Communications + Big Data*

Smart Campus

- Campus instrumenté pour mesurer et piloter la consommation électrique en temps réel
- Expérimentation avec les algorithmes de gestion
- Interaction avec le Smart Grid
- Intégration des moyens de transport des agents, e.g. gestion de la recharge des voitures électriques

Auteurs

Alexander PELOV
Baptiste GAULTIER
Nicolas MONTAVONT
Laurent TOUTAIN



2. SmartTB

- Smart Campus de TELECOM Bretagne
 - Mesure et pilotage des prises électriques
 - Intégration des compteurs d'électricité existants
 - Optimisation de la consommation électrique
 - Réduction en heure de pointe
- Architecture et protocoles en cours de standardisation
 - REST - ETSI M2M, IPSO, CoAP
 - IETF 6LoWPAN, IETF RPL
 - IEEE 802.15.4, BLE, DECT ULE (CAT-iq), DASH7
- Développement d'une pile protocolaire pour des équipements ultra-contraints – picoIPv6
- SGC Web 2.0 spécialisé sur l'énergie
- Identification non-intrusive des appareils (NILM)
- Sélectionné par l'Appel « Innovation » de l'IMT 2013

3. LE GRAND PUBLIC

- Ateliers « Construire son compteur communicant »
- Open-source, open-hardware
- Déploiement à grande échelle

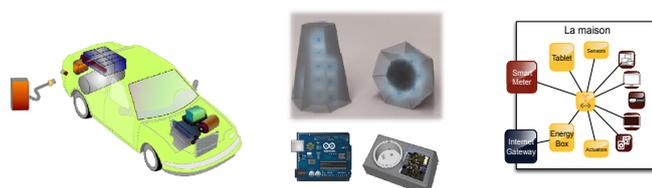


Partenaires Industriels

Hackable Devices
SnootLab Homadeus
Kerlink Orange
WattEco Connected Object
Coronis
ITRON

4. PROJETS CONNEXES

- Intégration de la gestion de recharge de voitures électriques
 - Projet EGUISE (ADEME AMI)
- Interaction avec la maison connectée
 - Tablettes, Smartphones, Energy Box
- Conception des objets communicants pour la maîtrise de l'énergie à la maison
 - Collaboration avec l'Ecole des Beaux-Arts, Rennes
- La maîtrise de l'énergie dans les datacenters
 - Collaboration avec l'Ecole des Mines de Nantes

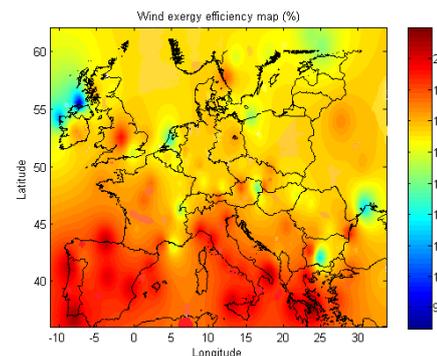


Parties prenantes



Analyse exergetique

- Objectif: Comparer exergetiquement les énergies renouvelables (éolienne/solaire)
- 100 stations météorologiques.
- Rendement exergetique d'éoliennes (modèle de Pedersen et al.) et de cellules PV (modèle de Joshi et al.).
- Traitement d'années types issues du DOE.



Analyse émergetique

eMergie : concept introduit par Prof. H.T. Odum

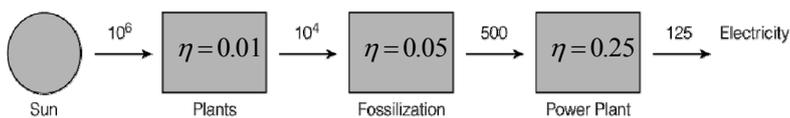
- Empreinte énergétique d'un produit/bien/service.
- ex: ressources fossiles, résultante d'un processus sur plusieurs millions d'années.
- Mode d'analyse complémentaire à l'ACV

Auteurs

Dincer I., Prof., UOIT
 Rosen M., Prof. UOIT
 Feidt M., Prof., Nancy
 Truffet L., HDR, DAP, Mines Nantes
 Broc JS., Dr, Mines Nantes
 Amponsah N., Doctorat soutenu
 Jamali-Zghal N., Doctorante SPIGA
 Lacarrière B., Dr, Mines Nantes
 Le Corre O., Mines Nantes

ELECTRIC ENERGY CHAIN

Decreasing quantity, calories/time

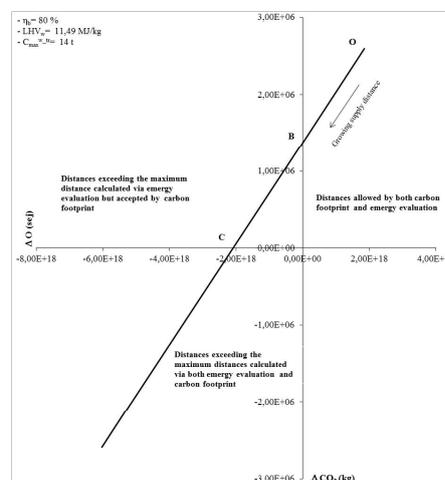


Bilan CO₂ - émergie

Application à une chaufferie bois

- Objectif: Pertinence d'une substitution de chaudière gaz naturel par une chaufferie bois énergie
- Moyen : déterminer la distance limite de transport du bois énergie par une analyse CO₂ et une analyse émergie.

Analyse de la co-combustion (biomasse-camion)/(charbon-train)



Parties prenantes



Auteurs

Charlotte Marguerite
Bernard Bourges
Bruno Lacarrière

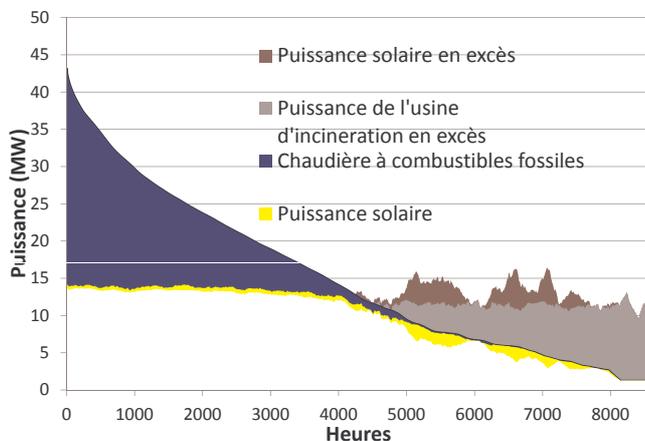
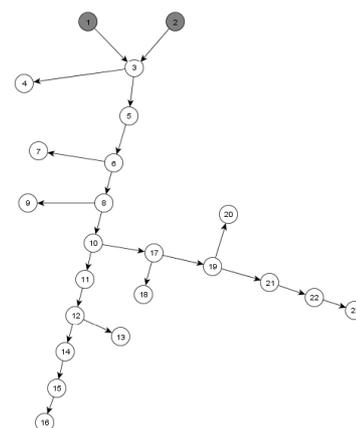
Partenaires



Objectifs et principes du modèle

Gestion stratégique d'un réseau de chaleur

- Outil d'aide à la décision (usage ex-ante) : Construction de nouveaux réseaux, intégration de nouvelles installations de production de chaleur, etc.
- Outil d'évaluation et de suivi des performances (usage ex-post) : diagnostic, analyse des performances réelles, amélioration du fonctionnement.
- Comparaison de scénarios variés : structure de la demande, variations temporelles de certains paramètres (coûts, puissances disponibles, etc.).
- Représentation d'un réseau de chaleur par un graphe orienté avec des nœuds (consommateurs et sources de production) et des arcs (canalisations du réseau). Simulation du fonctionnement du réseau grâce au formalisme de la programmation linéaire.
- Composants et sources de chaleur disponibles : chaufferie à énergie fossile, UIOM, solaire thermique, géothermie, stockage de chaleur, source virtuelle (effacement de consommateur).
- En cours d'intégration : cogénération, pompe à chaleur, interconnexion de réseaux.



Exemple de résultats

Puissances disponibles

- Le modèle donne à chaque instant les puissances fournies par chaque source de production et les puissances circulant dans chaque branche du réseau.
- Ces données de sortie sont traitées pour obtenir la courbe des puissances classées. On peut ainsi répartir globalement la production de chaleur entre les différentes sources, dimensionner les installations, etc.
- Le cas présenté correspond au réseau de chaleur Malakoff-Beaulieu à Nantes, dans un scénario incluant du solaire thermique.

Exemple de résultats

Bilan énergétique et économique

- Le bilan annuel est calculé à partir des puissances à chaque pas de temps.
- Le bilan énergétique du réseau donne l'énergie totale distribuée par chaque source de production, son taux de couverture et les pertes totales de distribution.
- Le bilan économique donne le coût moyen de production du MWh et le coût total de la production de chaleur au cours de l'année.

Energie distribuée (MWh)	Source de production de chaleur	Taux de couverture	Pertes totales (MWh)
79 107	UIOM	60%	
46 801	Chaudière gaz (22MW)	36%	
5 359	Panneaux solaires (20 000m ²)	4%	

Coût moyen (€/MWh)	Coût total (k€)
14.90	1 957

A need for Green Mobile/Wireless Access Networks

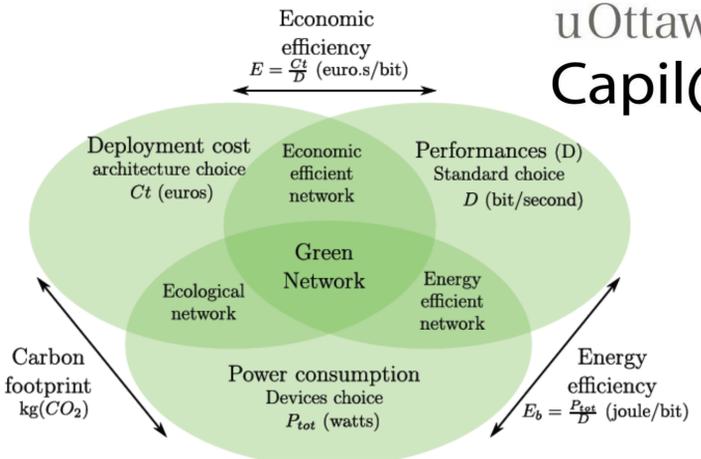
Mobile/Cellular Networks

- 21% of France Telecom's network total energy consumption (1341.5 GW.h, 2006)
- out of which more than 80% is attributable to Base Stations (BS).

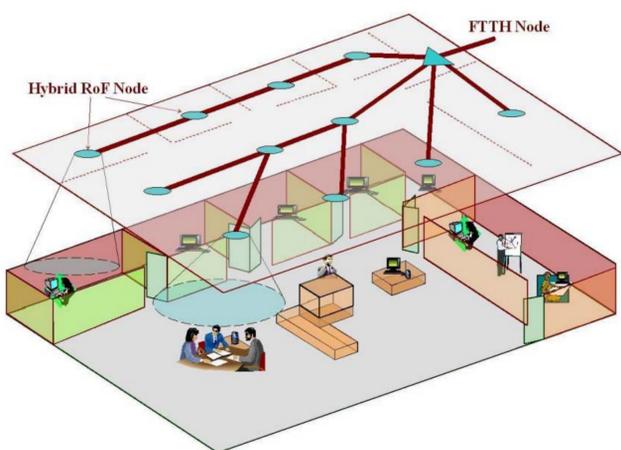
Home Networks

- more than 50 % is consumed by users : overall daily consumption estimated to 73 GW.h in France (2008)

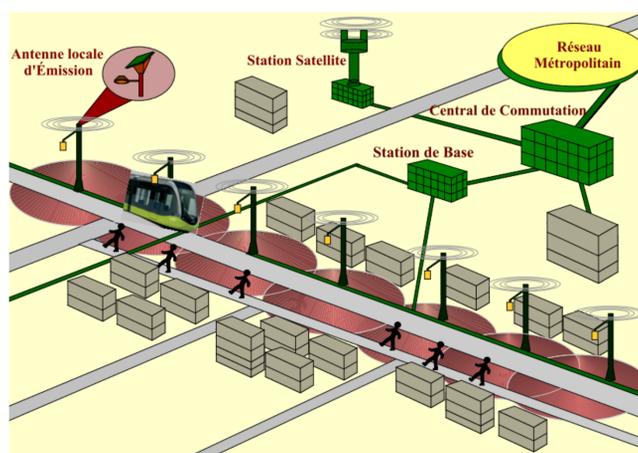
Metrics for green networks



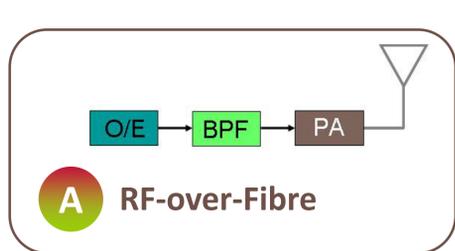
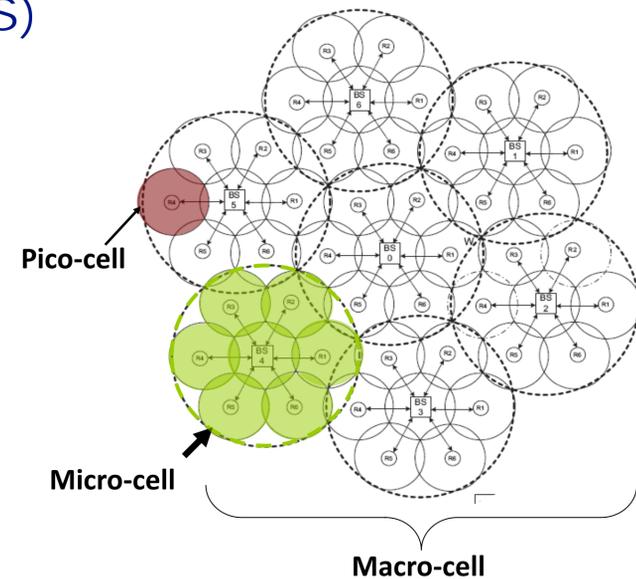
Radio-over-Fibre (RoF) distributed antenna systems (DAS)



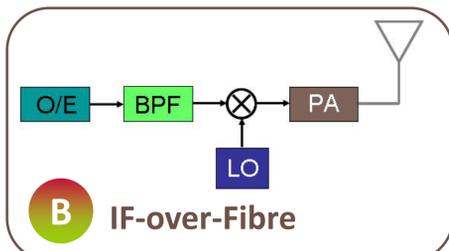
Home Networks : *ORIGIN*



Access Networks in Digital Cities : *CapilRTram*



A RF-over-Fibre



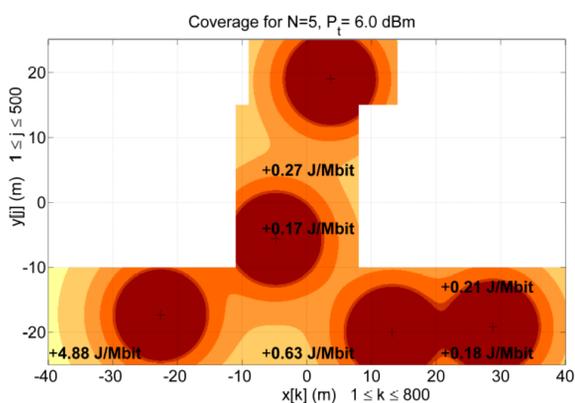
B IF-over-Fibre

- C** Baseband-over-Fibre
- D** Digitized IF-over-Fibre
- E** Digitized RF-over-Fibre

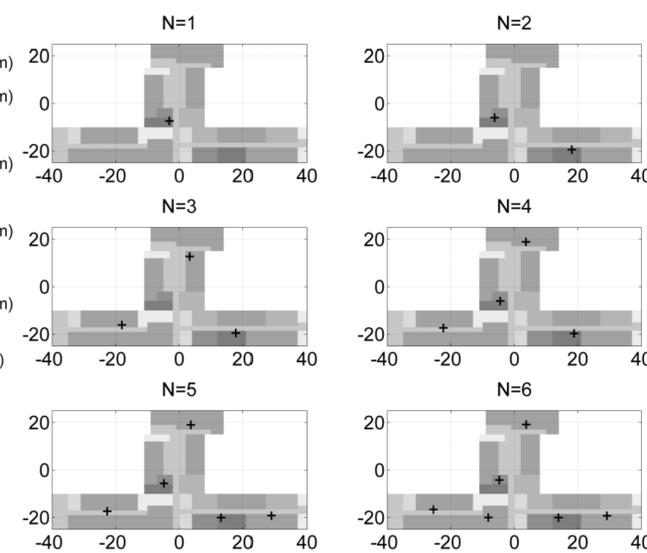
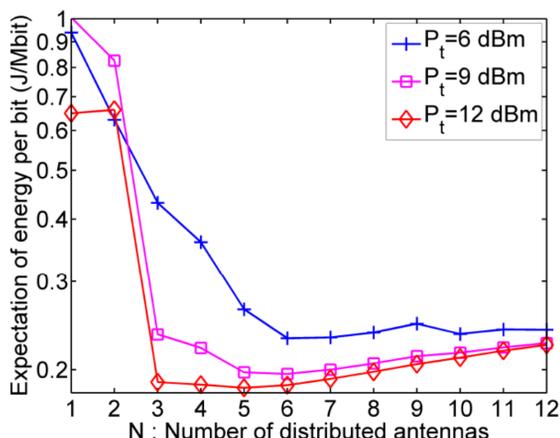
O/E : Optoelectronic interface / LO : Local Oscillator / PA : Power Amplifier

RoF Scheme	Circular cell		
	Macro	Micro	Pico
C	2.05	2.51	2.40
A	0.49	0.1	0.14
B	0.91	0.57	0.70
E	0.68	0.72	0.82
D	1.10	1.19	1.38

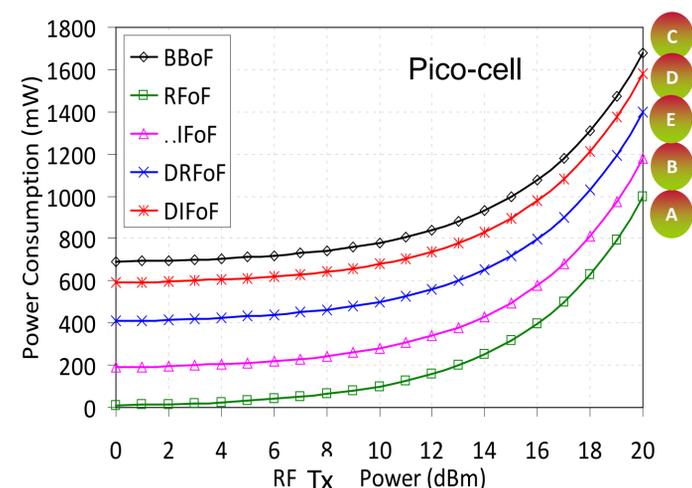
Total power consumed per covered area (mW/m²) for various cell sizes and RoF transport schemes



Energy efficiency of a WiFi-over-Fibre DAS in an indoor environment (simulation)



Optimum antenna placement algorithm (Telecom Bretagne campus)



Power consumption of a picocellular RoF-DAS according to transmit power for various RoF transport schemes

Conclusions

Analogue RoF for micro-cellular deployments

- Reduced total energy consumption
- Highest energy efficiency (mW/m²)
- Extremely simplified remote antenna units

Perspectives

- Increasing energy efficiency by :
 - dynamically switching on/off remote antenna units
 - low-energy automatic gain control techniques
- Energy efficiency of millimetre-wave RoF DAS

3. ENERGIES RENOUVELABLES

Parties prenantes



Université de Toulouse



Auteurs

Marion Blanc
Nicolas Reuge
Bernard Auduc
Jean Louis Dirion
Patricia Arlabosse

Partenaires



Remerciements



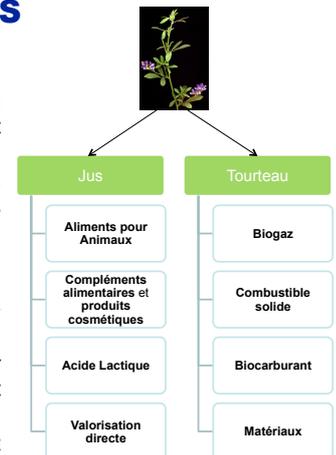
BIORAFFINERIE VERTE : ENJEUX ET VERROUS

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

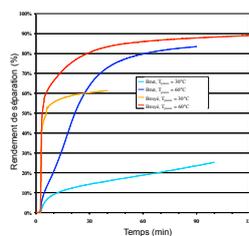
- La biomasse herbacée contient, en masse, 80% d'eau et ne peut être conservée que par ensilage (voie humide) ou par séchage (voie sèche).
- Le fractionnement mécanique par pressage, prétraitement indispensable pour réduire la consommation énergétique des filières en voie sèche, ne permet d'extraire 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)

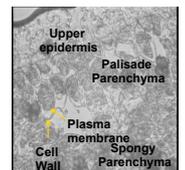
Principe de fonctionnement

- 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.



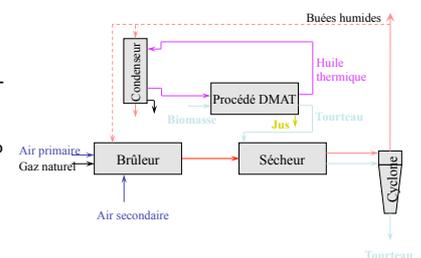
Rendement matière

- 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

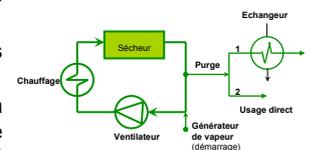
Patricia Arlabosse

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

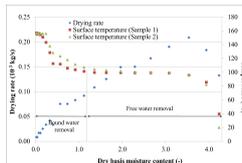
Dispositif expérimental

- 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.

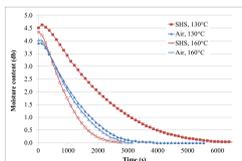
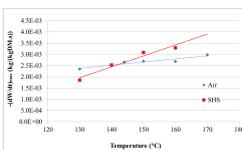


Température d'inversion

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

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

- 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/(m².h).
- Ainsi, à 160 °C, la vitesse de séchage augmente de 23% et le temps total de séchage, et donc la longueur du sécheur, 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?

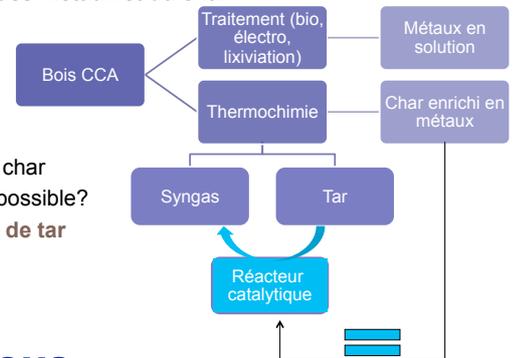
➡ Traitement thermochimique le plus adapté*, **récupération des métaux et du char**

*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

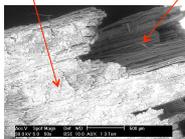


Figure 1 : image MEBE de la surface de bois de pin imprégné de CCA

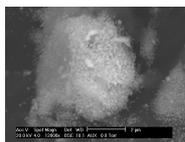


Figure 2 : image MEBE d'agglomérations de métaux

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 ₂ (77K)	Isopropanol (298K)	Hexane (298K)	Tension de surface dispersive γ_s^d (mN m ⁻¹)	Tension de surface polaire γ_s^p (mN m ⁻¹)	Tension de surface γ_s (mN m ⁻¹)
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 m² g⁻¹. Composantes dispersives et polaires de la tension de surface des chars.

➡ Solides à forte affinité pour des espèces non polaires (environ 74 mN m⁻¹)

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 ?

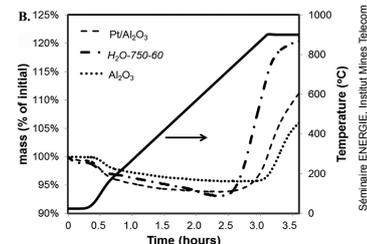


Figure 3 : Exemple de test catalytique, suivi de la masse de catalyseurs (Pt supporté sur alumine, alumine et char de peuplier) lors de la décomposition du méthane. Le char est issu de bois de peuplier et contient des clusters de Fer. Figure reproduite de Klinghoffer, Castaldi, Nzihou, Ind. Eng. Chem.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

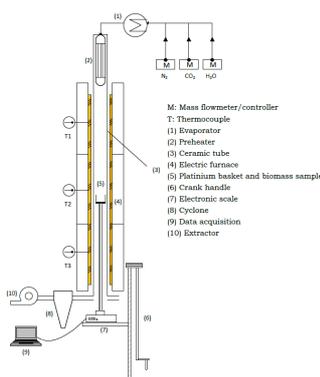
Macro thermogravimétrie

- 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

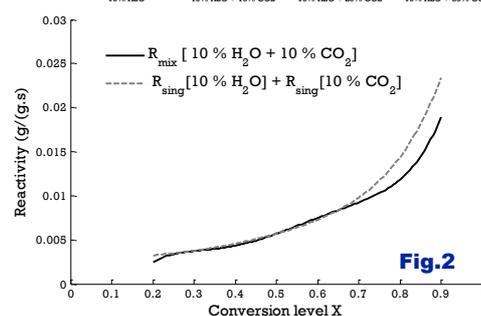
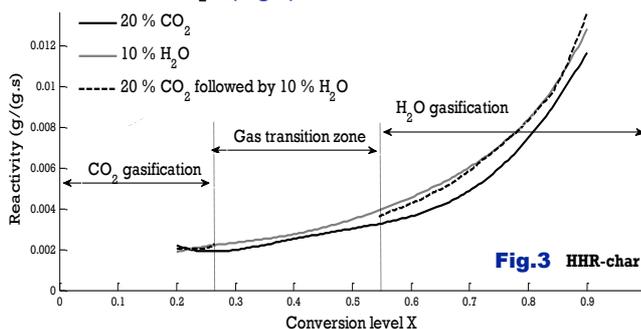
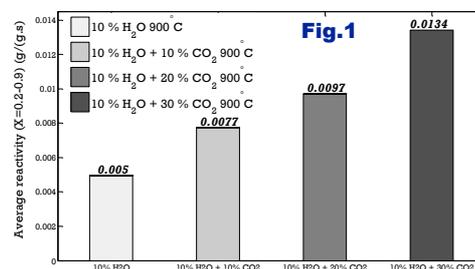
Reacting medium	Reacting gas partial pressure (atm)	Temperature ($^\circ C$)
H_2O	0.1, 0.2, 0.3	800, 850, 900, 950
CO_2	0.1, 0.2, 0.3	850, 900, 950
H_2O/CO_2	0.1/0.1; 0.1/0.2; 0.2/0.1	900

- 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.

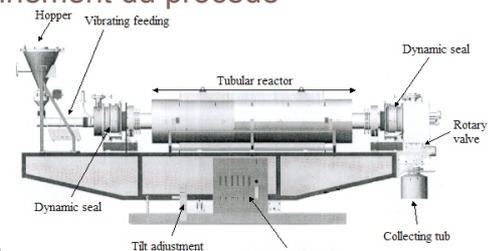
Quelles sont les avantages de la biomasse torréfiée ?

- 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

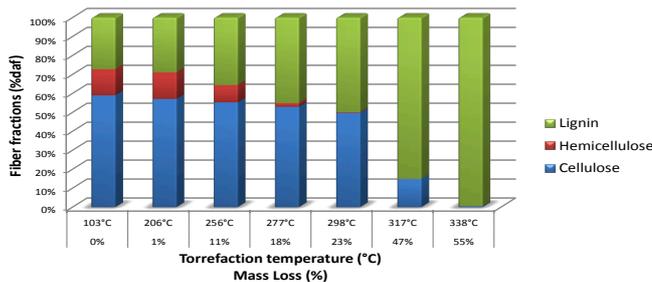


Auteurs

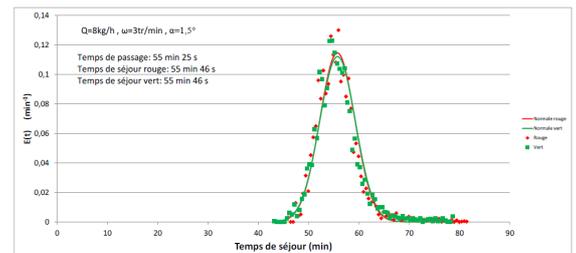
Baptiste COLIN
Jean-Louis DIRION
Patricia ARLABOSSE
Sylvain SALVADOR

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-Financiers



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 : 403m² SHON
Hauteur : 6,5m hors tout

POURQUOI CENTRER VALTHERA SUR LES DECHETS DE BIOMASSE?

Accessibilité à la ressource → VERROU

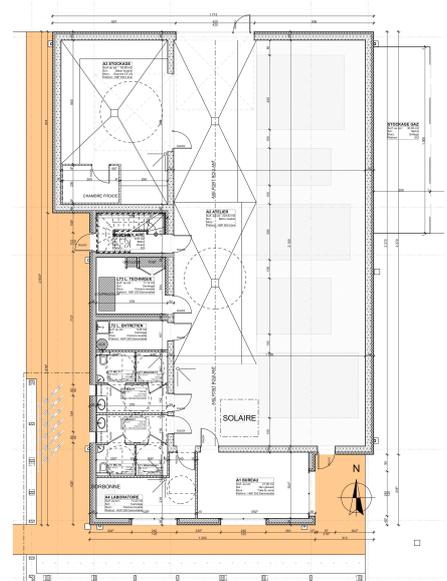
- Tension en émergence sur la ressource (biomasse propre) pour des applications énergétiques.
- Problématique existante de gestion de déchets.
- Les biomasses sans valeur marchand (résidus, déchets) = Gisement à fort potentiel.

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

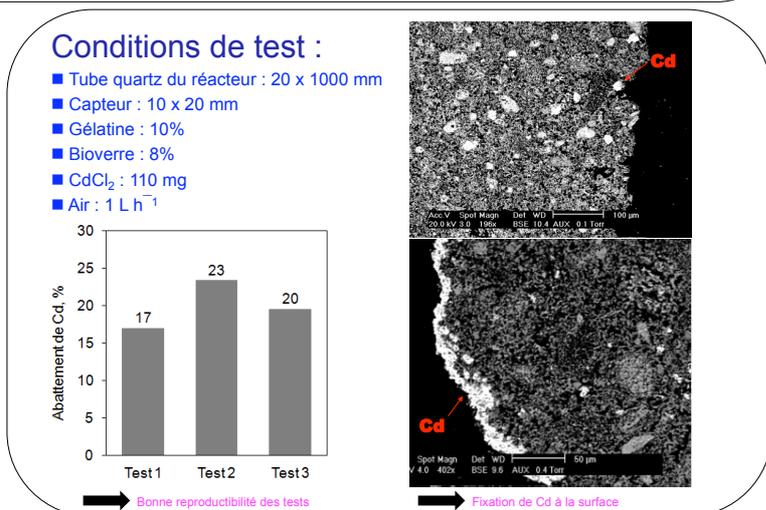
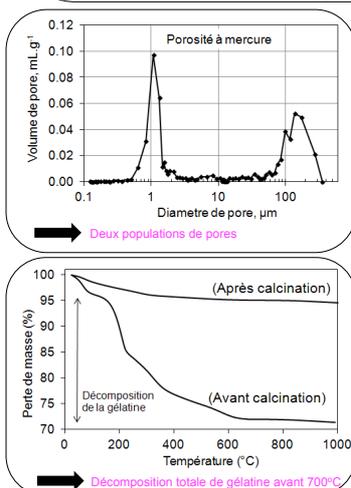
Hydroxyapatite avant formulation

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



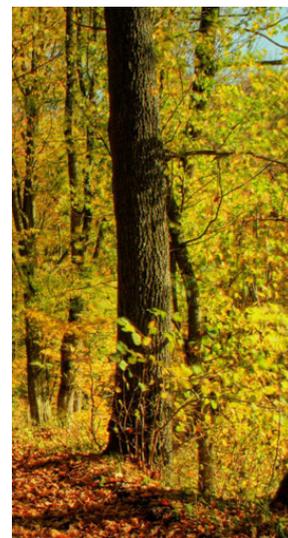
OBJECTIFS

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 m² 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.

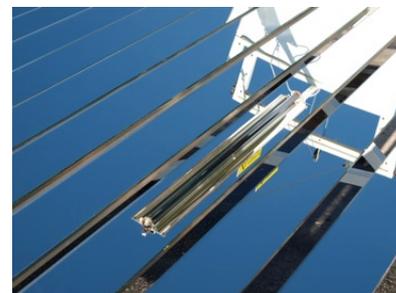
Des essais en laboratoire avec de hautes densités de flux ont montré la création de plusieurs fronts de réaction (séchage, pyrolyse, gazéification) à l'intérieur de particules de biomasse exposées à de fortes densités de flux.

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

Collaborations



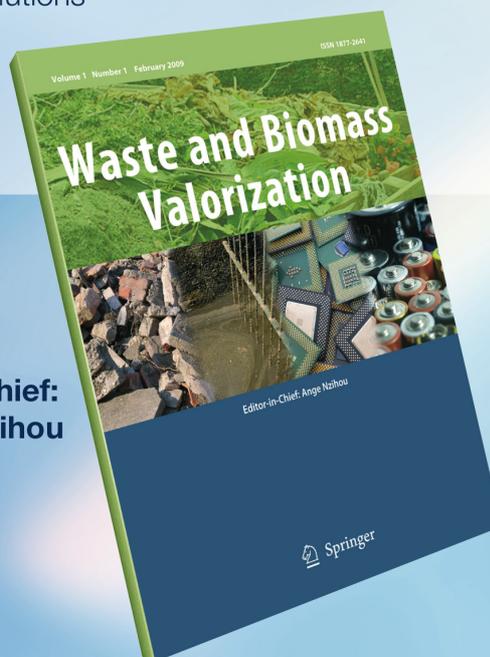
Waste and Biomass Valorization

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

Contact waste-biomass-valorization@mines-albi.fr

Site web www.springer.com/engineering/journal/12649

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

5th
*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.

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

WasteEng¹⁴
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

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.



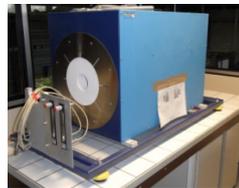
STRATEGIE DE RECHERCHE ADOPTEE

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 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



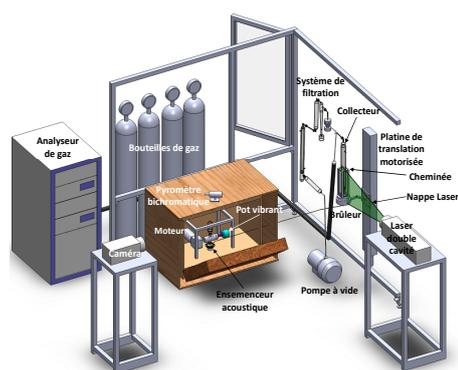
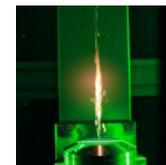
CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

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 CO₂ actuellement étudiées. Dans ce domaine, l'**oxycombustion** permet d'obtenir des fumées riches en CO₂ 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 O₂.
- **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 10⁶ K/s)).
- Caractérisation détaillée des champs réactionnels (pyrométrie, PIV) et mesures des taux de dévolatilisation et des concentrations d'espèces diverses (O₂, CO₂, CO, NO, NO_x, SO_x, 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

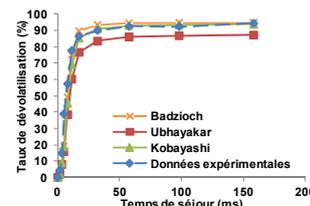
Partenaires



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.



Modélisation de la cinétique de dévolatilisation d'un charbon pulvérisé sous oxygène - Confrontation de données expérimentales et simulées

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 modèles de propriétés thermodynamiques dont la paramétrisation nécessite des données expérimentales.
- Développement d'appareillage de mesures des propriétés thermodynamiques
- Les solutions de captage du CO₂ dépendent des caractéristiques chimiques et physiques du CO₂ 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..

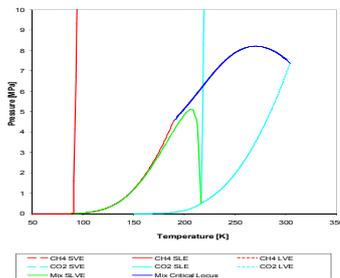


Auteur

Christophe Coquelet

Directeur Centre Thermodynamique des Procédés (CTP)

+33164694962



Partenaires



Solutions matures

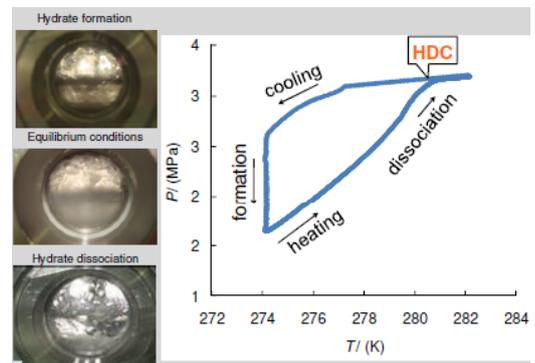
Captage aux amines ou cryogénique

- Le CO₂ 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 CO₂ 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

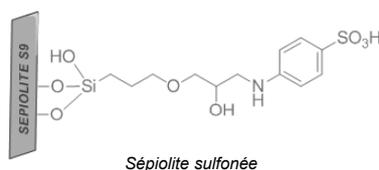
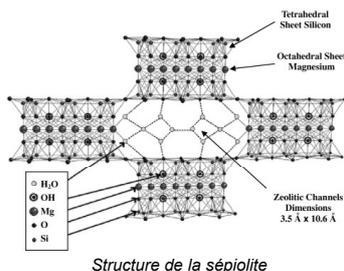
Christian BEAUGER
Guillaume LAINE
Arnaud RIGACCI
Alain BURR
Aurélie TAGUET
Belkacem OTAZAGHINE

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)

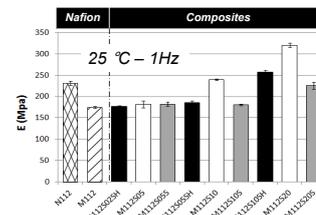


Modification de la sépiolite et préparation des membranes.

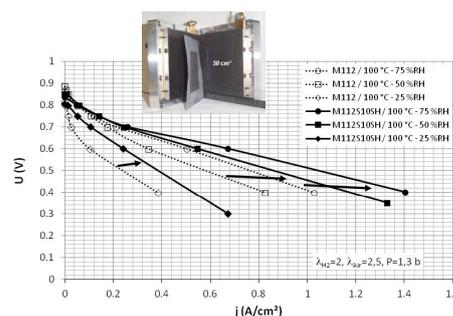
- La sépiolite est une argile fibreuse fortement hydrophile. Ajoutée au Nafion elle permet de retenir l'eau au sein de la membrane. Sa fonctionnalisation (sulfonation) est rendue inévitable par la nécessité de conserver une bonne conduction protonique assurée dans le Nafion par les groupements sulfoniques. 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 HOCHÉPIED
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⁻ & h⁺) créés sous illumination et (iii) de la réversibilité de la réaction de dissociation de l'eau.

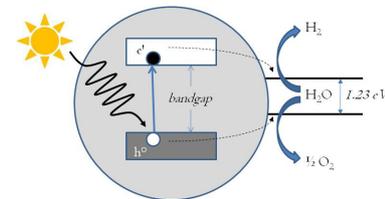
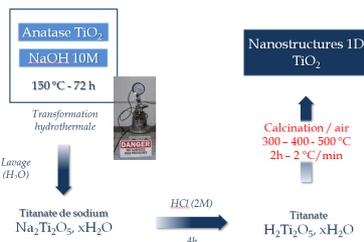


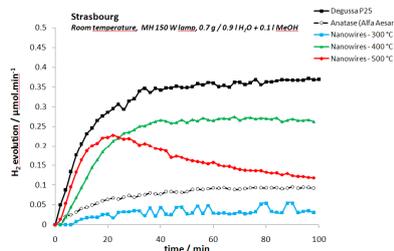
Schéma de principe illustrant la photolyse directe de l'eau sur une particule.

■ 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 TiO₂ (nanofils et aérogels) sur l'efficacité énergétique de la conversion de l'énergie solaire en hydrogène.

• Voie de synthèse des nanofils



• Génération d'H₂



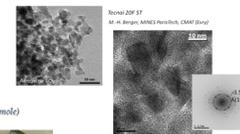
Nanofils de TiO₂

- Les conditions de synthèse utilisées permettent d'obtenir des nanotubes de TiO₂ dont la part de TiO₂(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'H₂ 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 TiO₂

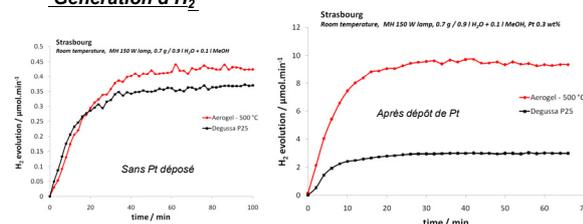
- Bien que séchés en conditions supercritiques, les gels préparés conduisent à des aérogels fragmentés, constitués de particules d'anatase après calcination, jusqu'à 500 °C. A 600 °C apparaît déjà la phase rutile, moins adaptée à la photolyse de l'eau.
- Après calcination à 500 °C, le matériau obtenu 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, H₂PtCl₆) qui se révèlent être trois fois plus actifs que le P25.

• Voie de synthèse des aérogels



Clichés MET des aérogels calcinés à 500 °C.

• Génération d'H₂



Contexte et objectifs

Parties prenantes



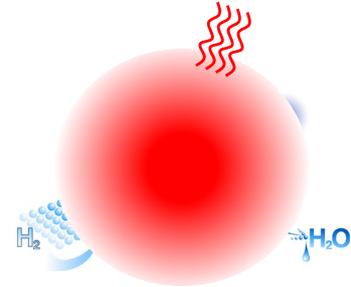
Auteurs

Christian BEAUGER
Patrick ACHARD
Rudolf METKEMEIJER

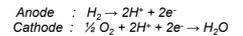
Partenaires



- 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)

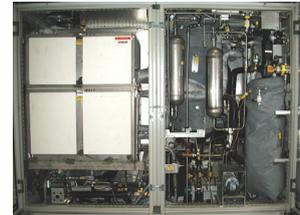
- **FEVER (FP5)** : étude *stack* (3*10kW) pour la traction automobile.
Thèse Luc ROUYEYRE, David PICOT
- **ECA-HELION** (*Thèse Ewan RAUGEL*), **PAC-SM1&2** (ANR) : PAC anaérobies confinées (sous-marin autonome).
- **APACHE (FUI)** : traction électrique d'avion léger.
Thèse Théophile HORDE
- **NEIGE(CIR)**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

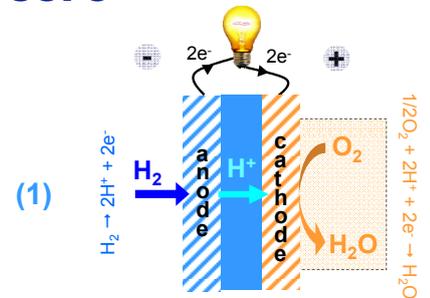
Etat de l'art : problématique des PCFC* et SOFC**

* Proton Conducting Fuel Cell (1)

- Développement en cours, performances faibles
- Atmosphère oxydante (O₂ / H₂O) corrosive côté cathodique

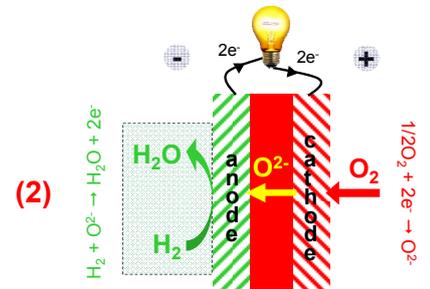
** Solid Oxide Fuel Cell (2)

- Système plus mature que (1) ; coût élevé, problème de vieillissement
- Température de fonctionnement très élevée (> 900 °C)
- Atmosphère réductrice (H₂ / H₂O) corrosive côté anodique



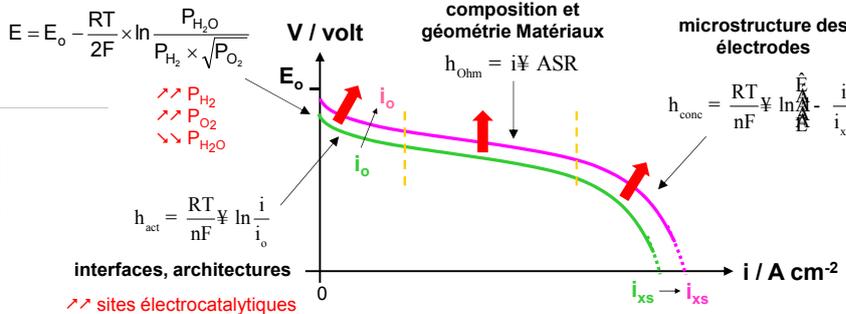
Dans les cas (1) et (2) :

- 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

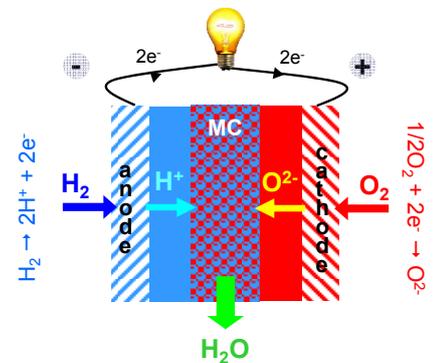


Un nouveau concept minimisant les surtensions aux électrodes

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



$$E = E_0 - i \times R_T - \frac{RT}{F} \times \ln \left[\frac{1}{2} \times \left[\left(\frac{i}{i_o} \right) + \sqrt{\left(\frac{i}{i_o} \right)^2 + 4} \right] \right] + \frac{RT}{4F} \times \ln \left(1 - \frac{i}{i_{cs}} \right) + \frac{RT}{2F} \times \ln \left(1 - \frac{i}{i_{as}} \right) - \frac{RT}{2F} \times \ln \left(1 + \frac{P_{H_2O}^o \times i}{P_{H_2}^o \times i_{as}} \right)$$



Partenaires



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



Parties prenantes



Auteurs

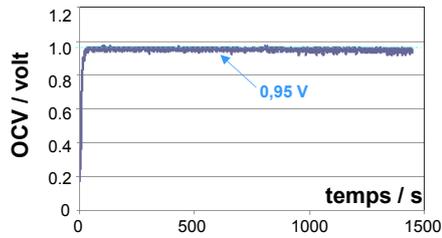
Alain THOREL
Anthony CHESNAUD
João ABREU

Partenaires

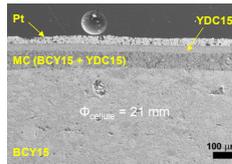


Preuve du concept : 5 critères (I à V) (électrolyte BCY15 support)

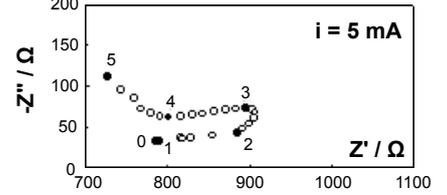
(I) une OCV stable sous H₂ à 600 °C



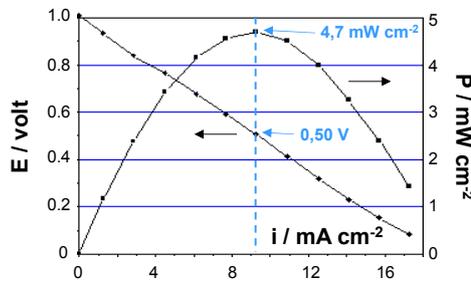
Prototype (électrolyte support)



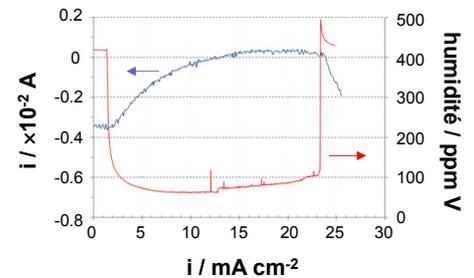
(III) une signature de la formation d'eau par spectrométrie d'impédance



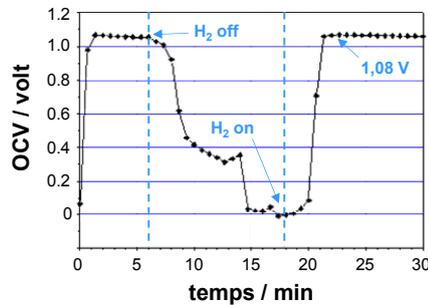
(II) une courbe i/E stable à 600 °C



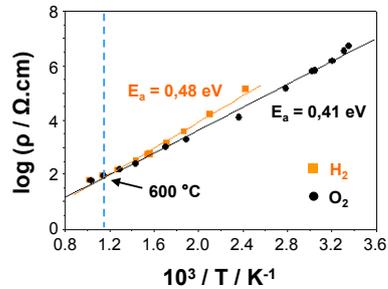
(IV) mesure de la quantité d'eau en fonction du courant débité



(V) cycles H₂ "on" / H₂ "off" à 600 °C

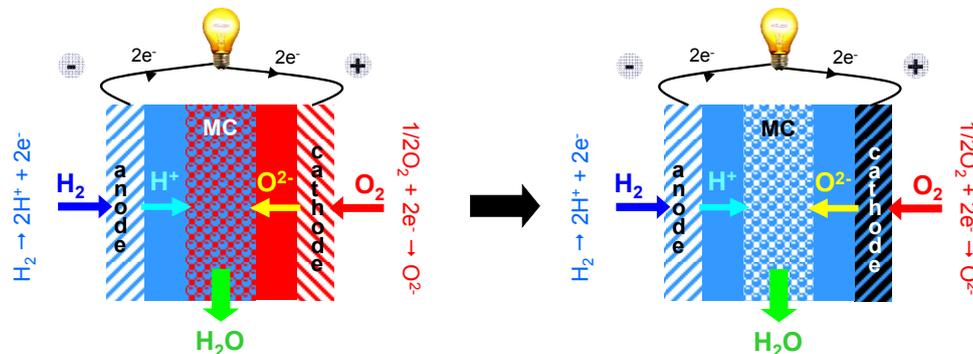


BCY15 : conducteur mixte (H⁺/O²⁻)



σ_{H^+} (BCY15) sous H₂
= $\sigma_{O^{2-}}$ (BCY15) sous O₂
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

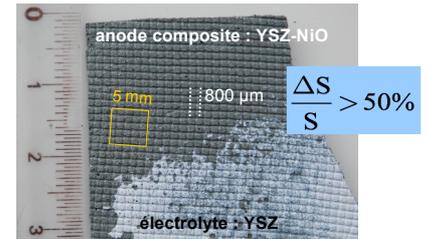
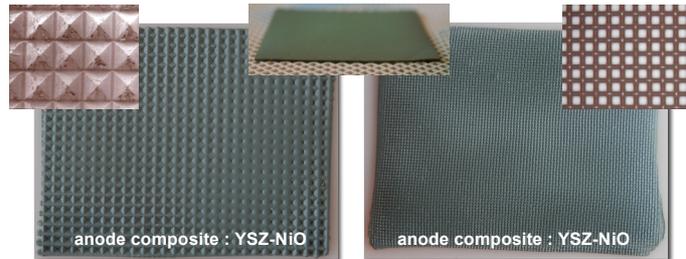
Parties prenantes



Auteurs

Anthony CHESNAUD
Alain THOREL
Maya GEAGEA
David MASSON
Francesco DELLORO

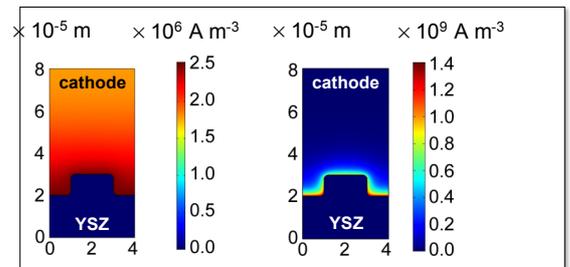
Architecturation des interfaces électrode/électrolyte



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)

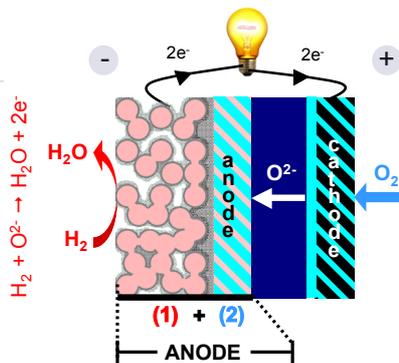
Modélisation (éléments finis) :



Un concept à anode support innovante architecturée



Partenaires



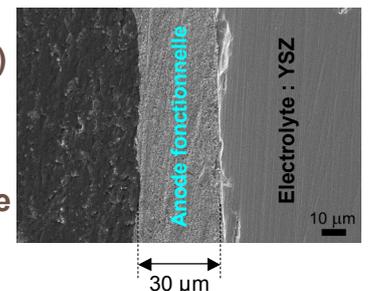
1ère G	2ème G	3ème G	4ème G
« ESC »	« ASC »	« MSC »	« ??? »
(-) puissance (+) flexibilité (+) robustesse	(+) puissance (-) flexibilité (-) sensibilité (S) (-) cycle thermique (-) cycle rédox	(+) puissance (-) flexibilité (-) sensibilité (S) (+) cycle thermique (+) cycle rédox	(+) puissance (+) flexibilité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

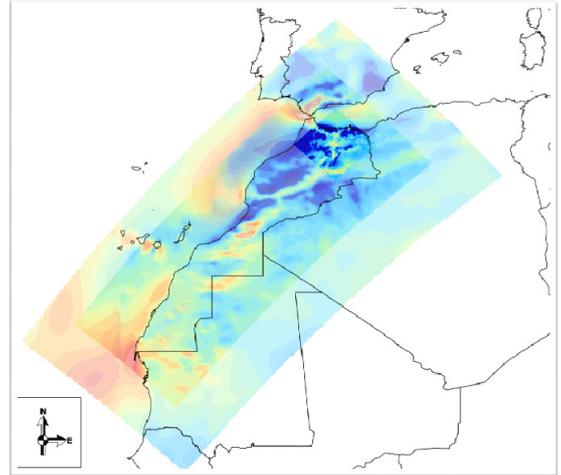
Partenaires



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.

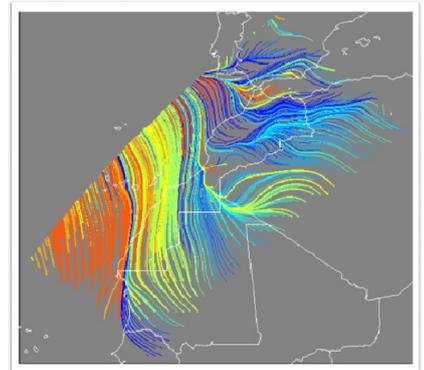


Superposition de la moyenne annuelle de l'intensité du vent (m/s) à 100 m au-dessus du sol pour 25 km, 8 km et 2.5 km de résolution. L'intensité du vent est faible pour les couleurs froides et augmente vers les couleurs chaudes.

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.

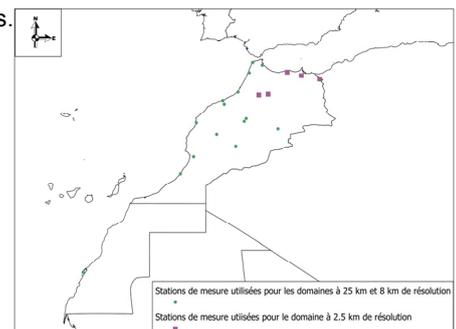


Représentation de l'atlas sous forme de lignes de courant.

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

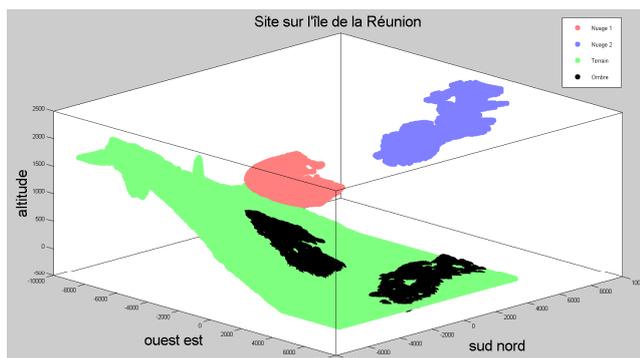
- Calibration des caméras pour lier chaque pixel à une direction de visée en azimut et élévation.
- Segmentations permettant de détecter les nuages dans chacune des images.
- Mise en correspondance de pixels entre les images à l'aide de techniques de corrélation ou de SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*).
- 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

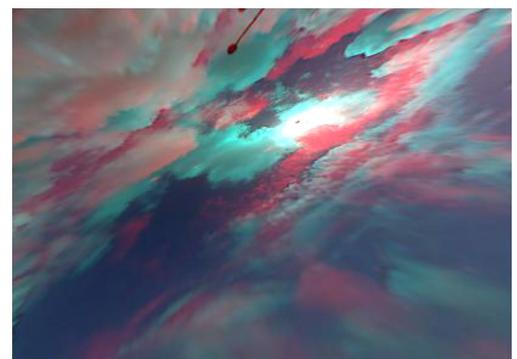


Image anaglyphe à regarder avec les lunettes 3D

- 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



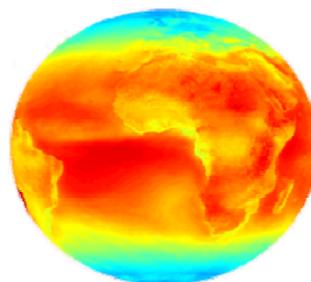
Evaluation du rayonnement solaire à partir des images satellitaires

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
➔

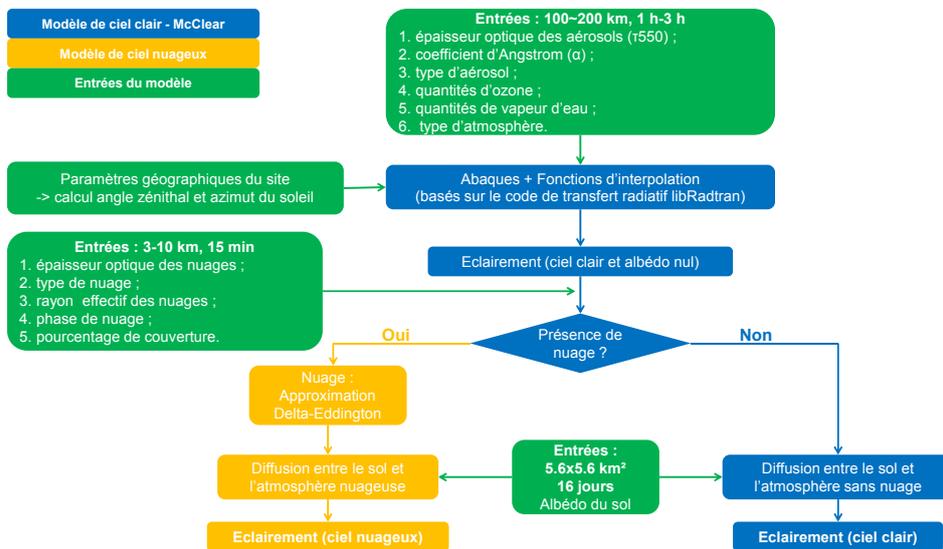
Une nouvelle méthode : Heliosat-4

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>

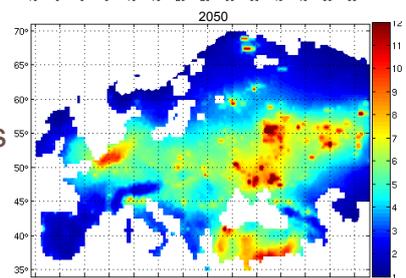
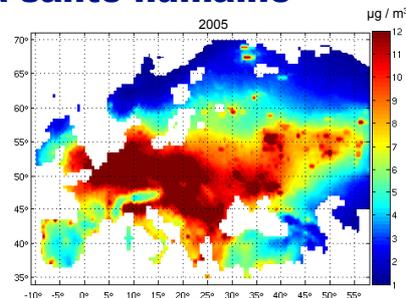


L'espérance de vie : un indicateur clé pour comparer les impacts des scénarios énergétiques

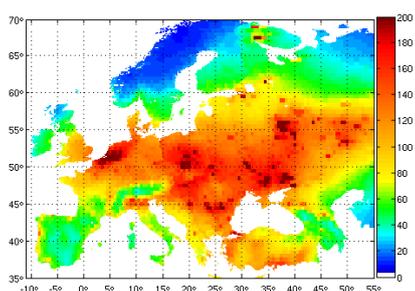
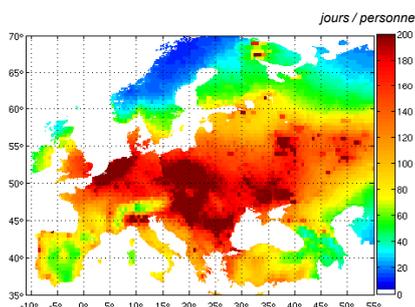
- Scénario de référence : législation européenne actuelle avec son objectif de réduction de certains polluants dont les $PM_{2.5}$, particules fines de taille 2.5 μm .
- Evaluation d'autres scénarios pour différents bouquets électriques par rapport à cette référence, à l'égard des impacts sur l'espérance 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^[1] 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^[2] 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^[3] pour les cartes de densité de population en 2005, 2010 et 2015.
- Pope (2002)^[4] 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 »^[5] et IIASA^[1] : 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



[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

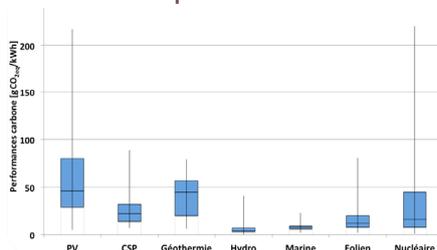


L'approche cycle de vie, « du berceau à la tombe », source : ADEME



Auteurs

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



Variabilité des performances carbone des filières de production [1]

- Agrégation des performances carbone (g CO₂ 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?

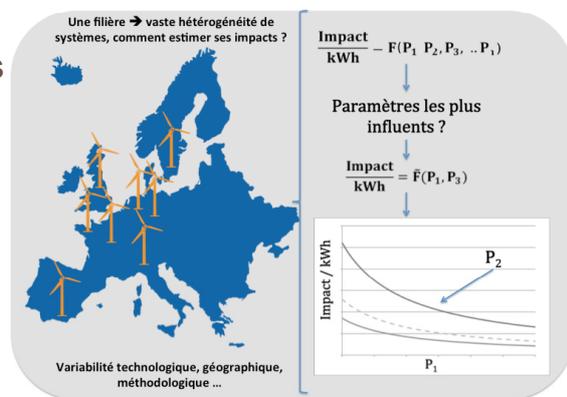
Partenaires

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

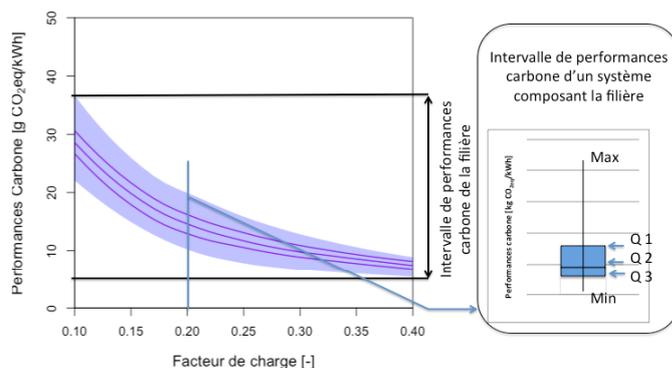
- 4 - Identification des sources principales de variabilité par analyse de sensibilité globale
- 5 - Définition d'un modèle simplifié d'estimation des performances environnementales des systèmes



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

Résultats

- 1^{ère} 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

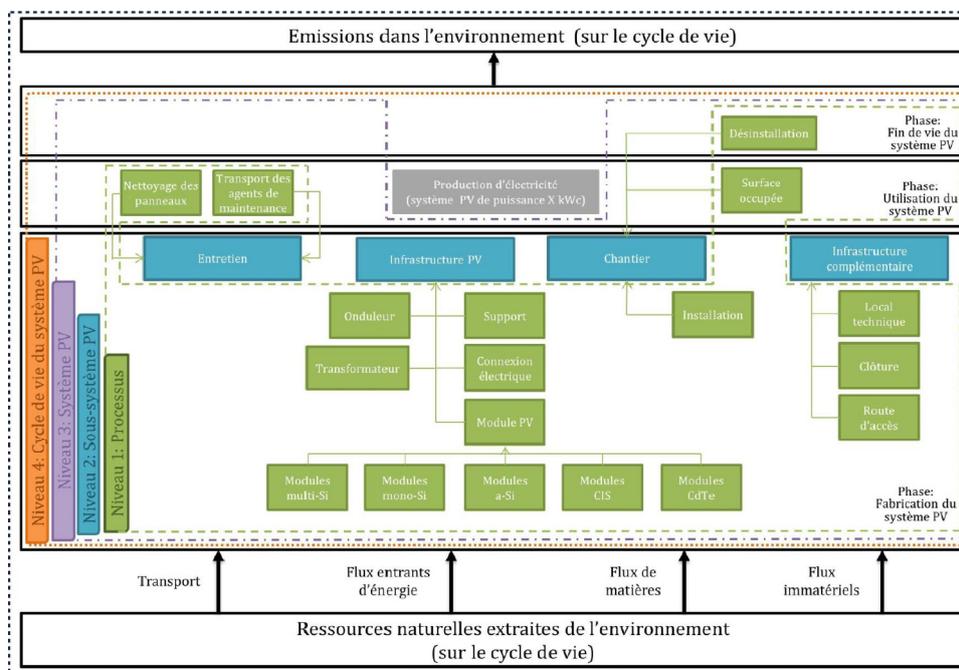
- apporter aux instances décisionnaires responsables de la conception, de la prescription et de l'exploitation des systèmes PV une information relative aux impacts environnementaux générés par le système PV tout au long de son cycle de vie, afin qu'ils l'intègrent comme critère de décision dans leur 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

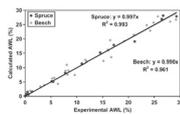
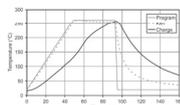
Partenaires



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

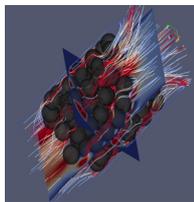
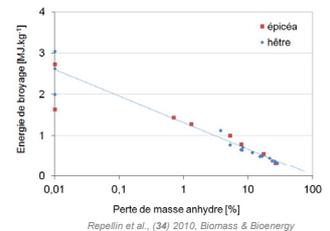
Un procédé - clé

- 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 (cm³ et dm³). Extension future au m³.
- 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 CO₂ 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 CO₂ 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).

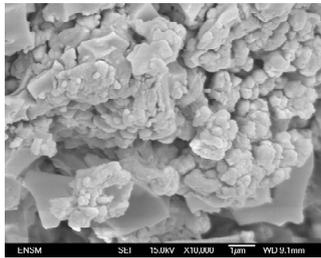
■ Trois absorbants ont été testés : un calcaire naturel (carrières de Tamuin au Mexique), un absorbant commercial (développé pour des applications AER et WGS) et un absorbant issu des travaux de formulation menés par l'EMSE, préparé à partir d'un mélange de CaCO₃ et de Ti(OC₂H₅)₄.



Auteurs

Laetitia VIEILLE^a
Alexandre GOVIN^a
Philippe GROSSEAU^a
Bruno ADAM^b
Gérard MARTIN^b
John ROESLER^c

Partenaires



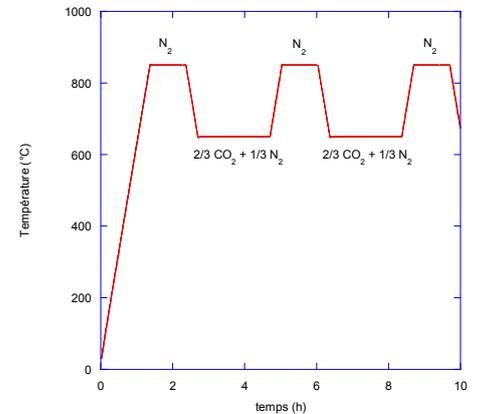
Cliché MEB de la chaux dopée à l'éthoxyde de titane

■ Particules fines de CaO dispersées dans des blocs denses de TiO₂, ceci permet de stabiliser la microstructure de CaO et éviter le frittage des particules entre elles.

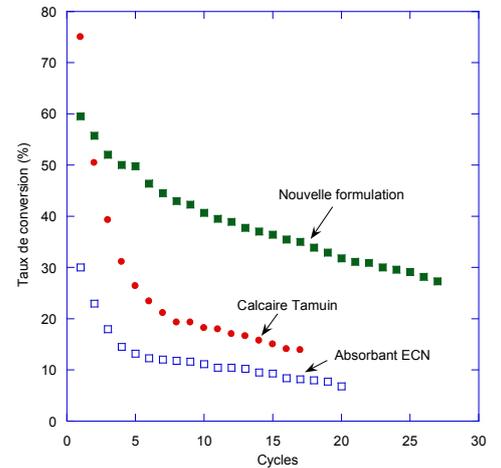
$$\text{Taux de conversion (\%)} = (\text{mol de CO}_2 \text{ absorbé} / \text{mol de CaO}) \times 100$$

■ 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 CO₂ 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

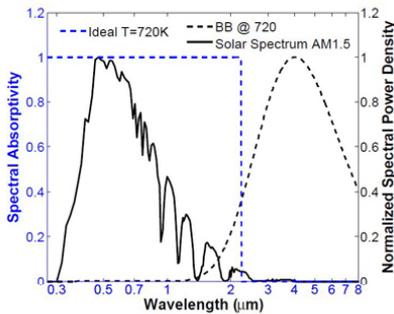
- Le rayonnement réfléchi concentré dans un seul tube absorbteur
- Températures atteintes (600-650°C) supérieures que dans les centrales paraboliques linéaires → **rendement plus élevé** *mais*
- Utilisation de tubes doubles évacués problématique
- Durabilité des matériaux ?
- Comment assurer une faible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



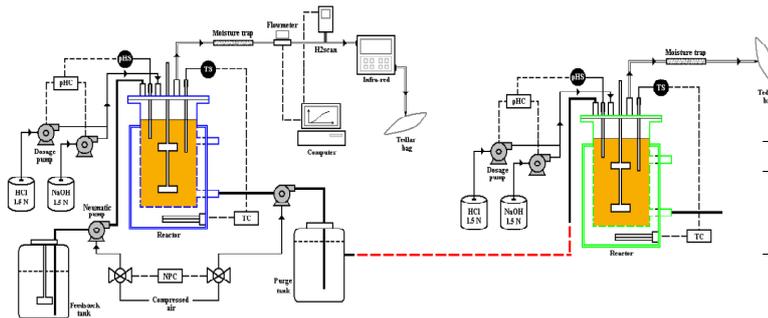
Substrate	Nutrients	Carbohydrates	Alkalinity	Microorganisms	Availability
	↓ Mg, Zn and Fe	↓ Soluble	↑ Buffer	↑ <i>Bacillus and Clostridium</i>	↑ Continuous
	↑	↑	↓	↓	↓

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 ³ 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 ₂ reactor kJ/Lw	CH ₄ reactor kJ/Lw	H ₂ 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



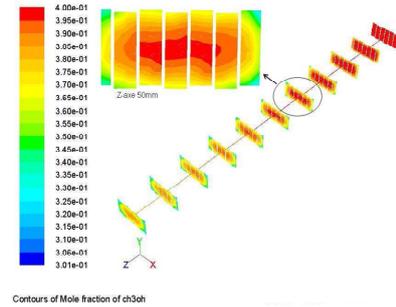
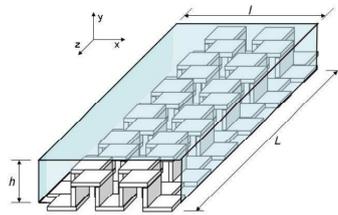
Auteurs

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

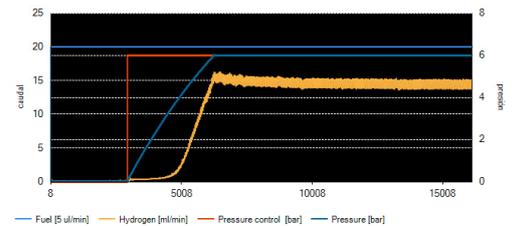
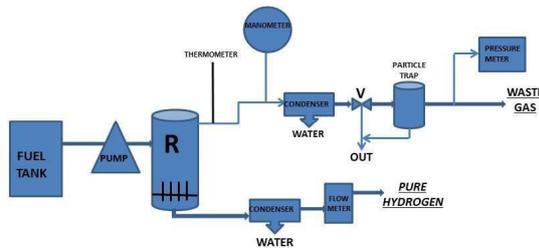
- Echangeur multi-fonctionnel catalytique.
- Modélisation 1D, 2D et 3D en stationnaire.
- Modèle réactionnel de Peppley à .
- Ailettes décalées de type OSF.



Vapo-reformage de l'éthanol

Catalyseur Pd-Rh/CeO₂ avec purification

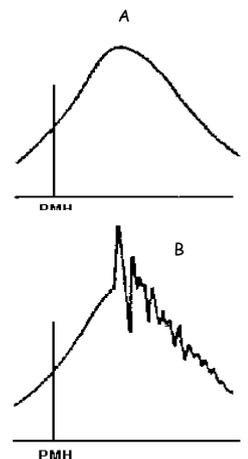
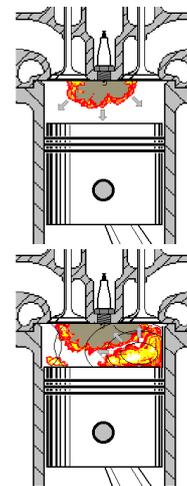
- Caractérisation du catalyseur.
- Contrôle de la production H₂ en fonction de la puissance électrique en sortie de PAC.



Cliquetis dans les moteurs à gaz

Protection préventive de la qualité du gaz

- Combustion anormale.
- Caractérisation par l'indice de méthane, mélange H₂/CH₄.
- Approche expérimentale, haute fréquence.
- Proposition d'une courbe enveloppe du signal filtré.
- Création d'un dispositif breveté de protection.
- WO2008035014



Parties prenantes



Auteurs

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

OBJECTIFS DES RECHERCHES

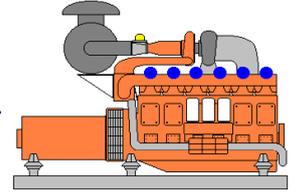


Raréfaction des énergies fossiles

Utilisation de carburants alternatifs (Biogaz)

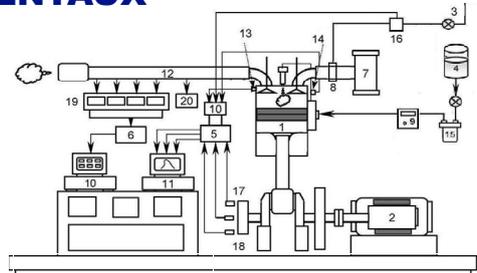
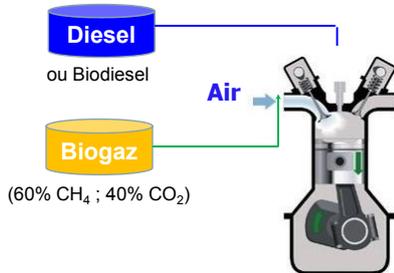
Etude du mode de combustion Dual-fuel (DF)

Essais banc moteur & Modélisation thermodynamique



Performances ?
Emissions polluantes ?

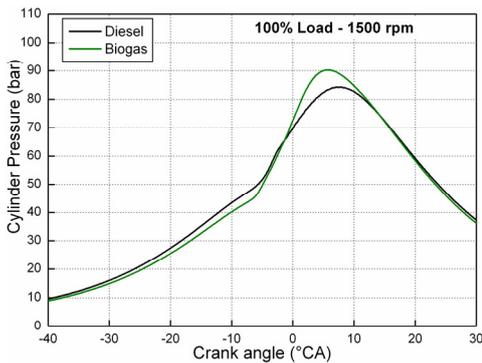
METHODE & MOYENS EXPERIMENTAUX



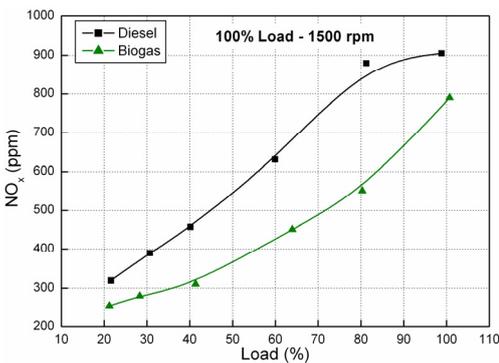
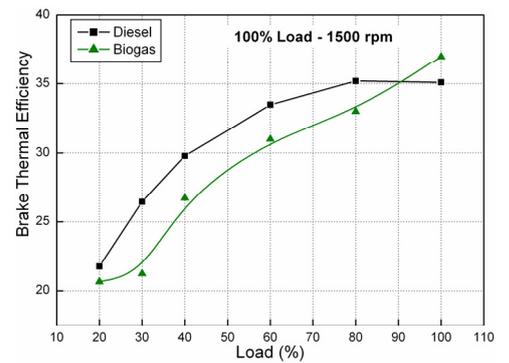
1. Test engine	11. Fast data acquisition system
2. Dynamometer	12. Slow data acquisition system
3. Gaseous fuel supply	13. Cylinder pressure sensor
4. Gasoil tank	14. Injection pressure sensor
5. A/D card for pressure	15. Diesel fuel filter
6. A/D card for Analyzer	16. Gaseous fuel flow meter
7. Air 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

- ❖ 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).

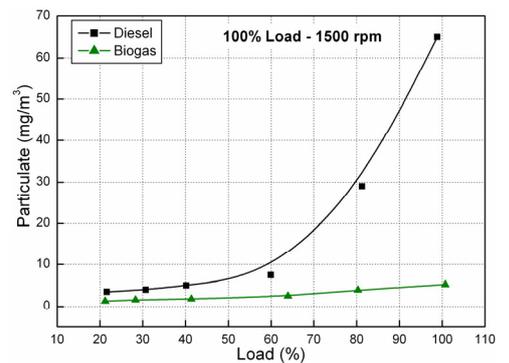
EXEMPLES DE RESULTATS



- ❖ 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



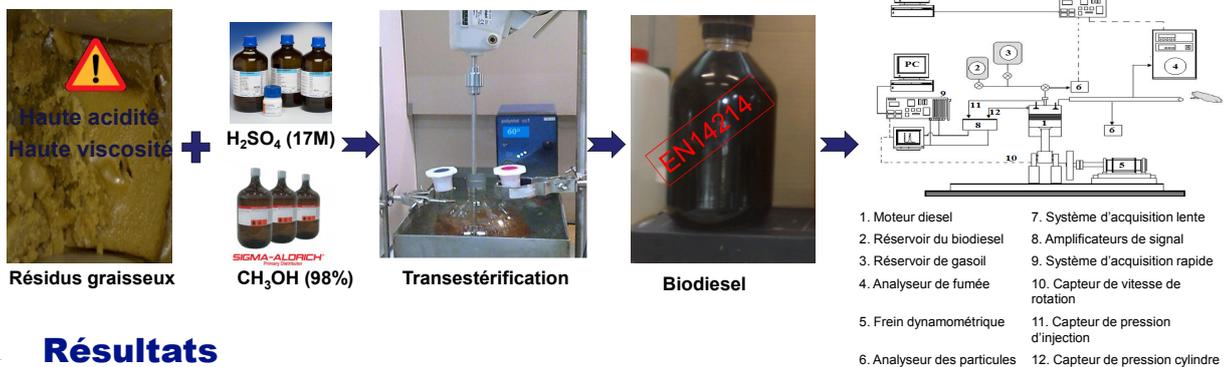
Parties prenantes



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



Auteurs

Nom des auteurs
Sary AWAD
Maria PARASCHIV
Khaled LOUBAR
Mohand TAZEROUT

Partenaires



Résultats

Production du biodiesel

Les conditions optimales de production du biodiesel

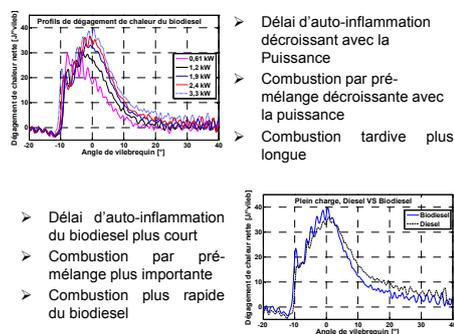
	*Méthanol [%]	*H ₂ SO ₄ [%]	Durée [h]	**Acidité du produit [mg _{KOH} /g _{gr}]
1 ^{ère} étape	30	3,6	3	
Lavage	*20% (volume) d'eau			
séparation	Production de 100g de résidus solides			
Séchage	*5% (masse) CaCl ₂			
2 ^{ème} étape	30	1,8	3	8,4
Lavage	*20% (volume) d'eau			
Séchage	*5% (masse) CaCl ₂			
Rendement				0,3
98%				

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

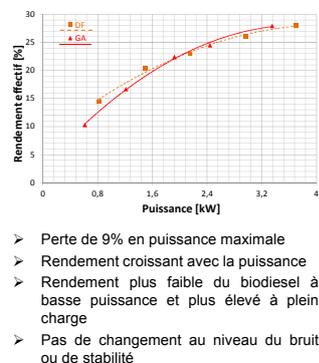
Propriétés du biodiesel élaboré, comparées à la norme Européenne EN14214

Propriété	Unité	EN14214	1 ^{ère} étape	2 ^{ème} 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 ² /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

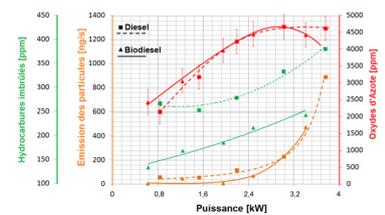


Performances



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

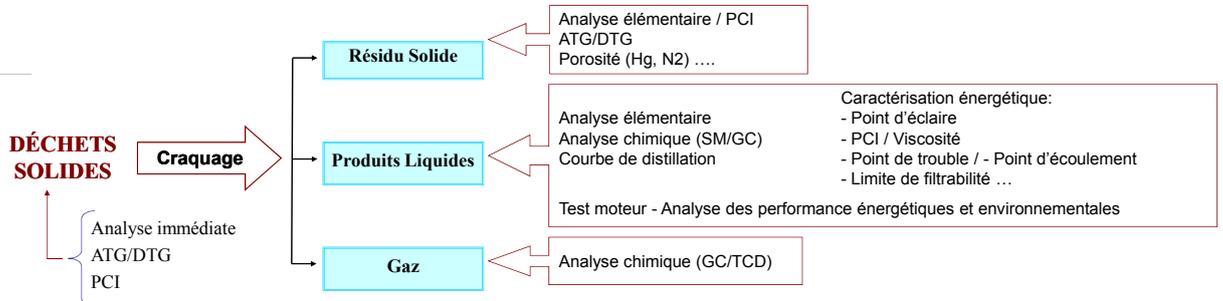


Conclusions

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.

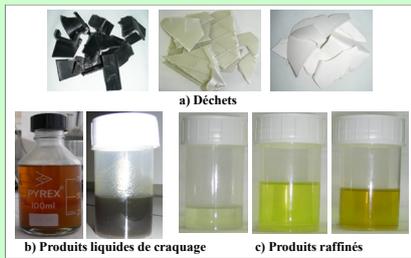
DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

Parties prenantes

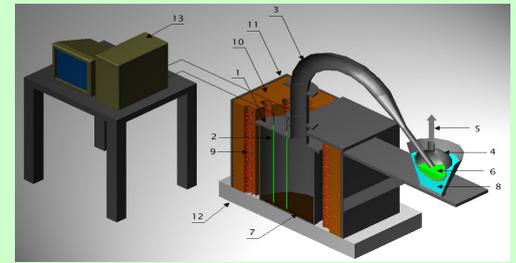


Matières premières & Produits de craquage

- 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

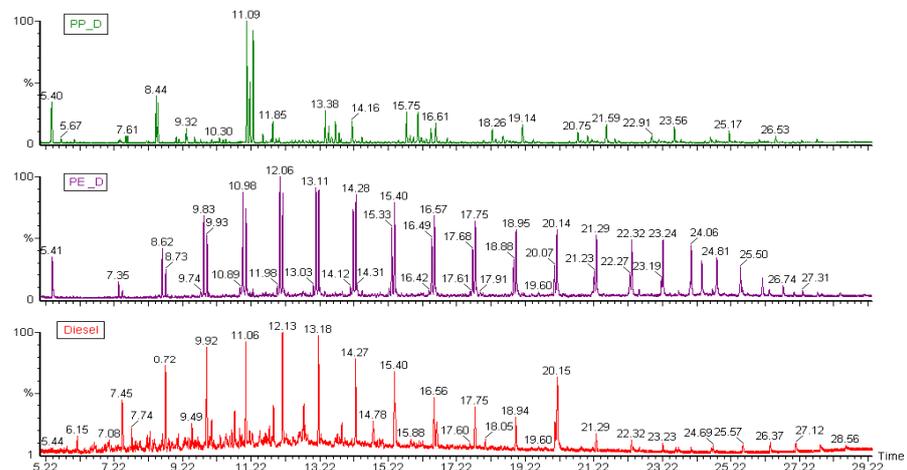
CARACTÉRISATIONS CHIMIQUE ET ÉNERGÉTIQUE DES CARBURANTS

Composition chimique de gaz (%vol)

Déchet	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₃ H ₆	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
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



Les chromatogrammes comparatifs: Diesel - fractions « Diesel »

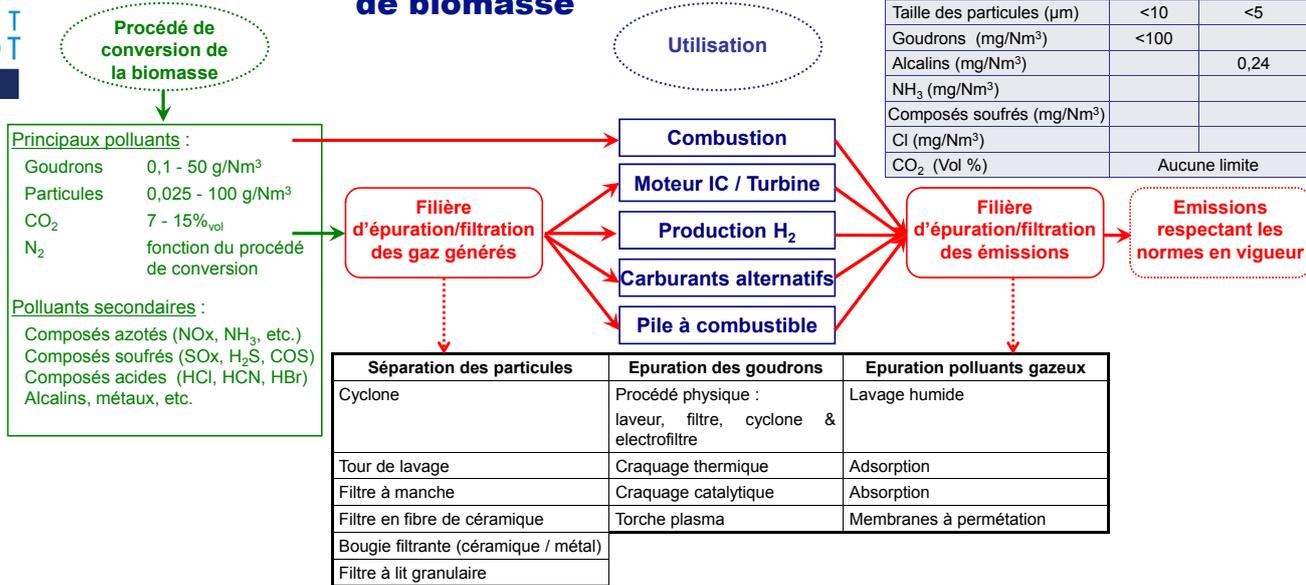
Parties prenantes



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_2 , H_2S , NH_3 , 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.

Filière de valorisation énergétique de biomasse

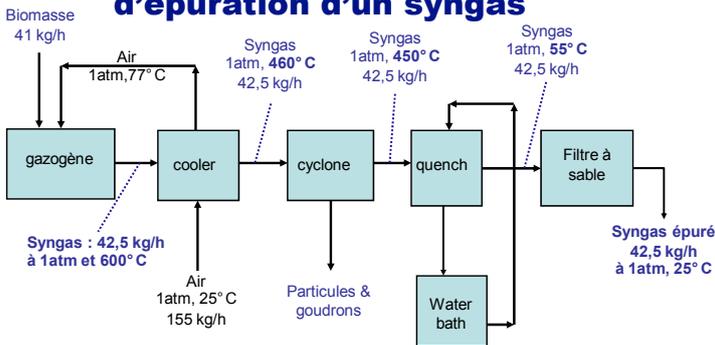


Auteurs

Audrey VILLOT,
Laurence LE COQ

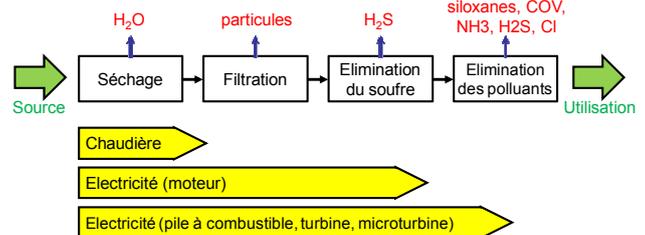
GEPEA, Mines de Nantes, DSEE
4 rue Alfred Kastler, BP 20722
44307 Nantes Cedex 3

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

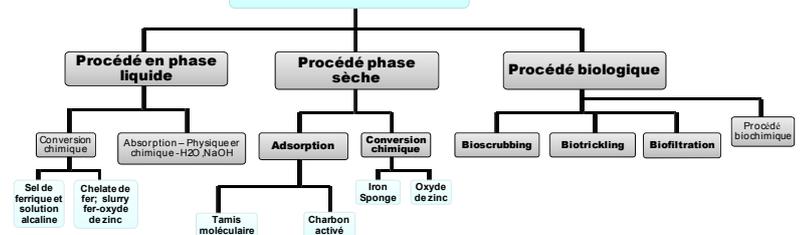


Séparation des particules	T (°C)	Efficacité de filtration	ΔP (kPa)
Cyclone	100-900	> 5µm; 80%	< 10
Filtre à manche	60-250	> 0,3µm; 99-99,8%	1-2,5
Wet scrubber (venturi)	20-100	0,1-1µm; 85-95% autrement 90-99%	5-20
Filtre en fibre de céramique	200-800	> 0,3µm; 99-99,8%	1-2,5
Bougie filtrante (céramique)	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 H₂S



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.