

Axe « INGENIERIE DE L'ENERGIE » Rapport d'activités au 30 juin 2015

Responsable : Michel HAVET

Composition de l'axe

Effectif permanent

L'axe est constitué de 18 enseignants chercheurs ou chercheurs dont 5 professeurs, 1 directeur de recherches et 2 MdC HDR. Il faut souligner que cet axe regroupe des personnes des quatre établissements (Université de Nantes, Ecole des Mines de Nantes, ONIRIS, CNRS) et, par convention avec l'EMN, une personne de l'Institut Catholique d'Arts et Métiers (ICAM).

Emna BERRICH	Maître de Conférences, Université de Nantes (depuis 01/09/2012)
Lionel BOILLEREAUX	Professeur, ONIRIS
Bernard BOURGES	Professeur, EMN
Sébastien CURET-PLOQUIN	Maître de Conférences, ONIRIS
Michel HAVET	Professeur, ONIRIS
Vanessa JURY	Maître de Conférences, ONIRIS
Bruno LACARRIERE	Maître-Assistant, EMN
Jean-François LARGEAU	Chercheur associé, ICAM (depuis 01/04/2014)
Olivier LE CORRE	Maître-Assistant, HdR, EMN
Patrick LEGENTILHOMME	Professeur, Université de Nantes
Khaled LOUBAR	Maître Assistant, EMN
Agnès MONTILLET	Professeur, Université de Nantes
Frédéric PAVIET	Maître-Assistant, EMN
Olivier ROUAUD	Maître de Conférences, ONIRIS
Mohand TAZEROUT	Professeur, EMN
Cyrille TOUBLANC	Maître de Conférences, ONIRIS (depuis 01/04/2015)
Audrey VILLOT	Maître-Assistant, EMN (depuis 01/09/2011)
Francis YGUEL	Directeur de recherche, CNRS (depuis 17/05/2013, à 20%)

Autres membres

Sary AWAD	Chargé de recherche contractuel, EMN
Edwin-Geo VARUVEL	Post-doctorant

L'axe bénéficie aussi de l'implication de personnels qui, bien que partagés entre différents axes, apportent une contribution significative aux activités de recherches.

Doctorants

- Fatma Zohra Aklouche** « Contribution à la réduction des effets des siloxanes sur la combustion du biogaz dans les moteurs à combustion interne. », début 1/10/2014. Financement allocation Mines Nantes et Algérie. Cotutelle avec Université Houari Boumediene, Alger (Algérie). Direction de thèse : M. Tazerout, co-encadrement : K. Loubar.
- Naim Akkouche** « Valorisation énergétique des gaz de pyrolyse des pneus hors d'usage », début 1/10/2014. Financement Ministère Algérien de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Co-encadrement avec Université de Boumerdès, Algérie. Direction de thèse : M. Tazerout.
- Rhiad Alloune** « Contribution à la mise au point d'un combustible innovant à base de culture locale non alimentaire pour les moteurs à combustion interne », début 1/10/2014. Financement Ministère Algérien de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Co-encadrement avec Université de Boumerdès, Algérie. Direction de thèse : M. Tazerout.
- Ivan Andric** « Impact of climate change on the next generation of district heating networks. », début 1/09/13. Programme Erasmus Mundus Joint Doctorate SELECT+ (en co-tutelle avec Instituto Superior Técnico de Lisbonne, Portugal. Direction de thèse : O. Le Corre, Co-encadrement : B. Lacarrière.
- Manel Ayadi** « Production du biodiesel à partir des huiles raffinées et brutes de grignons d'olive par voies catalytiques chimiques et enzymatiques », début 3/11/2014. Financement : allocation tunisienne Faculté de Bizerte (Tunisie). Direction de thèse : M. Tazerout, co-encadrement : S. Awad.

Zacharie Merlin Ayissi « Elaboration, étude expérimentale et modélisation numérique de la combustion d'un biocarburant alternatif au petrodiesel dans les moteurs à allumage par compression ». début 5/1/2015. Co-encadrement avec Université de Daoula et de Yaoundé (Cameroun). Directeur de thèse : M. Tazerout.

Stefano Coss « Multi-criteria analysis methodology combining energy analysis and environmental impact for optimal inter-modal energy services », début 15/2/2015. Financement programme Erasmus Mundus Joint Doctorate Select Doctorant Select+. Cotutelle avec Politecnico di Torino (Italy). Direction de thèse : O. Le Corre, Co-encadrement : B. Lacarrière.

Elias Daouk « Pyrolyse oxydante dans un procédé de gazéification étagée en lit fixe continu : Conversion de la biomasse et comportement des goudrons. », début 1/10/12. Directeur de thèse : C. Solliec. Co-encadrement : F. Paviet, L. Van De Steene (CIRAD), S. Salvador (Mines Albi)

Jose Fiacro Castro Flores, « Sustainable Thermal Energy Services for the Building Sector. » début 1/09/12. Programme Erasmus Mundus Joint Doctorate SELECT+ (en co-tutelle avec KTH Stockholm (Royal Institute of Technology), Sweden). Direction de thèse : O. Le Corre, Co-encadrement : B. Lacarrière.

Timothée Gally « Développement et modélisation d'un procédé de cuisson innovant à forte efficacité énergétique : le chauffage ohmique appliqué à la cuisson de matrices céréalières », début 3/11/2014. Financement Projet européen LEO et Région. Direction de thèse : A. Le Bail, Co-encadrement : O. Rouaud, V. Jury.

Alexandru Ciocan « Contribution aux systèmes de stockage d'énergie en utilisant des systèmes hybrides à partir de sources d'énergie alternatives », début 2/01/13. Directeur de thèse : M. Tazerout.

Sébastien Guibert « Couplage texture, moelleux, de spécialités pâtisseries, optimisation du couple procédé/formulation », début 14/01/13. Contrat CIFRE Galettes Saint-Michel. Directeur de thèse : A. Le Bail Co-encadrant : V. Jury.

Ali Hedayati, « Efficient energy systems for efficient energy buildings », début 1/09/12. Programme Erasmus Mundus Joint Doctorate SELECT+ (parcours européen de doctorat sur le thème des services énergétiques, financement : Europe, industriels). Direction de thèse : O. Le Corre, Co-encadrement : B. Lacarrière.

Moaine Jebara « Optimisation et contrôle thermique des outillages dans la mise en oeuvre des polymères », début 1/10/2014. Financement projet ECOTHER. Direction de thèse : L. Boillereaux, co-direction : M. Havet, co-encadrement : S. Belhabib.

Emre Karaoglan « Optimization of Fluid Bed Coating Process », début 1/10/11. Financement : Bourse Marie Curie. Directeur de thèse : D. Poncelet, Co-encadrement : O. Rouaud, S. Curet-Ploquin.

Karim H. Khiari « Contribution à l'étude des propriétés thermo-physiques des biocarburants de 2^{ème} génération et leur influence sur le comportement des moteurs », début 1/11/2013. Co-tutelle EMN/Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie. Direction de thèse : M. Tazerout

Khatir Naima « Caractérisation et formulation de carburant innovant à partir de résidus d'hydrocarbures pour une utilisation en moteurs à combustion interne », début 15/10/12. Directeur de thèse : M. Tazerout.

Subodh Paudel, « Improvement of energy modelling tools in a context of low energy buildings/districts. ». début 1/09/12. Programme Erasmus Mundus Joint Doctorate SELECT+ Direction de thèse : O. Le Corre, Co-encadrement : B. Lacarrière.

Maxime Piton « Intensification des transferts d'énergie et de chaleur en centrale d'enrobage », début 1/10/12. Directeur de thèse : O. Le Corre, B. Cazacliu (IFSTTAR) et F. Huchet (IFSTTAR)

Asma Rzigue « Influence de l'usure des revêtements des moules de cuisson sur les propriétés du pain de mie », début 14/10/12. Projet ANR SATIN. Directeur de thèse : A. LeBail Co-encadrement : J-Y Monteau, V. Jury.

Mouloud Tizzaoui « Caractérisation et formulation de carburant innovant à partir de résidus d'hydrocarbures pour une utilisation en moteurs à combustion interne. », début 1/03/13 ; co-tutelle EMN/ENSET Oran. Directeur de thèse : M. Tazerout.

Mouvements au cours du quinquennal

Départs :

- Féthi Aloui (Professeur à Valenciennes)
- Jacques Comiti (retraite).

Arrivées :

- | | |
|-------------------------|---|
| - Audrey Villot | Maître-Assistant, EMN (depuis 01/09/2011) |
| - Sary Awad | Chargé de Recherches, EMN (depuis 01/09/2012) |
| - Emna Berrich | Maître de Conférences, Université de Nantes (depuis 01/09/2012) |
| - Francis Yguel | Directeur de Recherches, CNRS (depuis 17/05/2013, à 20%) |
| - Jean-François Largeau | Chercheur associé, ICAM (depuis le 01/04/2014) |
| - Cyril Toubanc | Maître de Conférences, ONIRIS (depuis 01/03/2015) |

Problématique scientifique

L'axe de recherche Ingénierie de l'Énergie porte sur l'optimisation des systèmes énergétiques en interaction avec leur environnement tant sur le plan de la maîtrise de la consommation que de la maîtrise des effluents. Il permet de combiner plusieurs aspects importants de la production, de la consommation et de la gestion de l'énergie. Différentes échelles sont associées pour combiner des solutions centralisées et des solutions décentralisées (locales, sur un territoire, voire individuelles) portant à la fois sur la demande d'énergie, l'efficacité de sa conversion finale et l'intégration de nouvelles sources d'énergie. Cet axe de recherche se décline en 2 thématiques principales :

- la valorisation énergétique des résidus,
- les stratégies d'utilisation de l'énergie.

De plus, associé à ces thématiques, nous développons des outils et méthodes :

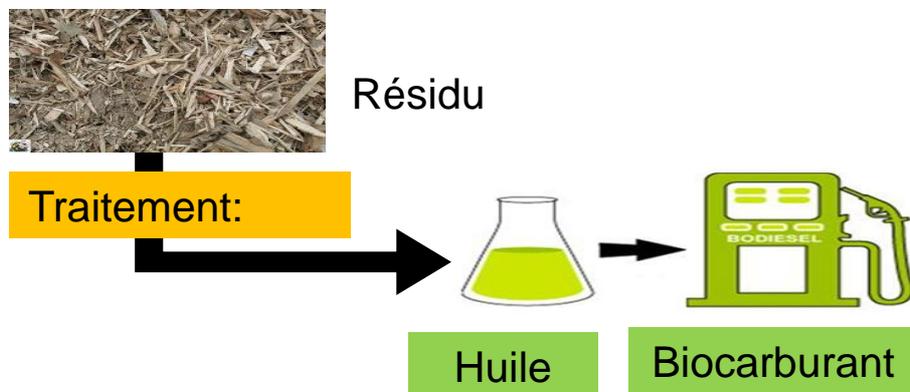
- d'intensification des transferts dans les procédés,
- d'analyse énergétique et/ou environnementale des systèmes.

1. Procédés de valorisation énergétique des résidus

Cette thématique a pour objectif, d'une part, la formulation ou la production de biocarburants/biocombustibles et, d'autre part, l'optimisation des rendements des installations productrices et/ou consommatrices d'énergie. Elle est centrée sur la valorisation énergétique des résidus solides ou liquides. Les technologies mises en œuvre peuvent avoir un impact très important sur le secteur du traitement et de la destruction de certains déchets industriels et organiques. Sont particulièrement concernés :

- les déchets de l'industrie agroalimentaire,
- les déchets de bois,
- les déchets des matériaux composites,
- les boues de stations d'épuration d'eau,
- les résidus de l'industrie pétrolière,
- les biogaz.

Selon le résidu à valoriser, les technologies explorées sont la pyrolyse, la gazéification ou la solvolysse.



Du traitement du résidu à la formulation du biocarburant

Pyrolyse

La pyrolyse est un procédé de conversion thermo-chimique qui permet de dégrader la matière carbonée en trois phases dont l'importance relative dépend des conditions opératoires et de la nature du déchet traité : une fraction gazeuse non condensable (le syngas), une fraction condensable (l'huile pyrolytique) et un résidu solide (le char). Une approche prometteuse est la production d'un produit liquide qui peut être utilisé dans les installations énergétiques existantes. D'autres gaz issus de la pyrolyse peuvent servir de combustible pour alimenter en énergie le système, ou fabriquer de la vapeur pour la production d'électricité. Les déchets huileux sont valorisables en combustibles pouvant alimenter les moteurs stationnaires. Les études menées portent sur l'optimisation des conditions opératoires de pyrolyse au regard de la composition des matériaux précurseurs (déchets), de la composition des gaz émis et des résidus solides de la pyrolyse.

Nous caractérisons et formulons les carburants innovants à partir de résidus pour une utilisation en moteurs à combustion interne. Le travail de recherche consiste à lever les verrous techniques et scientifiques à travers les étapes suivantes :

- Caractérisation physico-chimique des résidus,
- Mise en place d'un procédé pour la formulation d'un carburant et caractérisation,
- Adaptation du carburant au moteur, étude des performances énergétique et environnementales,
- Modélisation « thermodynamique » de la combustion du nouveau carburant dans le moteur.

En ce qui concerne les déchets solides, nous étudions le procédé de pyrolyse pour le recyclage de matériaux composites à matrice organique modèle. L'enjeu scientifique de ce travail porte principalement sur l'étude des mécanismes et des cinétiques de dégradation en fonction : des conditions thermodynamiques et chimiques (pression, température, réactifs additionnels, nature du solvant, ...), des paramètres liés aux procédés de pyrolyse (facteur d'échelle, dimension caractéristique des granulats de matériau) et de la composition du matériau précurseur.

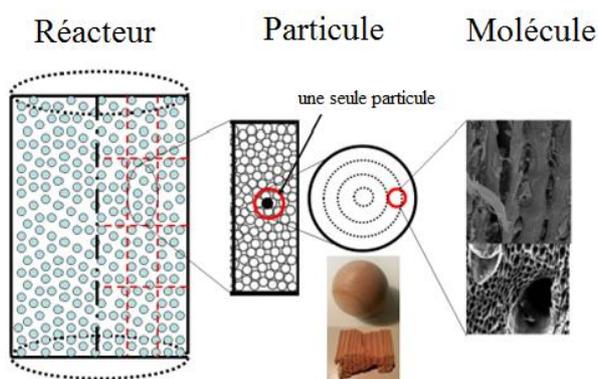
Le traitement des pneus hors d'usage représente un exemple de notre méthodologie. Ceux-ci constituent un problème environnemental majeur avec un gisement estimé à 2,5 millions de tonnes par an dans la communauté européenne. La matière organique constituant le pneu, notamment les caoutchoucs, se convertit essentiellement en huile pyrolytique, gaz incondensable et fibres de carbone, avec des rendements de conversion qui dépendent de la composition du pneu et des conditions opératoires (Thèse Alkhatib 2014). Nous savons que la décomposition thermique s'effectue en plusieurs étapes avec la décomposition du caoutchouc naturel à moins de 400°C, puis des caoutchoucs synthétiques au delà. Nous pouvons schématiser les cinétiques de dégradation des différents types de

caoutchoucs par deux ou trois réactions en parallèle. Par des analyses thermogravimétriques (ATG/DTG) du pneu et de ses constituants, nous estimons les paramètres cinétiques de ces réactions chimiques. A partir de ces informations, il est ainsi possible de proposer, selon la composition du pneu hors d'usage, les conditions opératoires les plus adaptées (Thèse Akkouche).

En ce qui concerne le char, qui peut représenter entre 15 et 30 % en masse du déchet initial et 25 % de l'énergie exploitable, nous visons à le valoriser au travers d'un panel d'usages tels que combustible, adsorbant ou adjuvant pour sol. Il peut être utilisé comme combustible uniquement si son potentiel polluant (teneur en éléments inorganiques, présence de métaux lourds, etc.) est faible et si sa fraction de cendres est limitée. Nous étudions avec les collègues de l'axe Ingénierie de l'Environnement les propriétés physico-chimiques des chars de pyrolyse obtenus pour différentes biomasses et des conditions expérimentales variables afin d'en déterminer les spécificités. Suivant les caractéristiques physico-chimiques des chars obtenus, les voies de valorisation seront explorées (Thèse Missaoui).

Gazéification

La gazéification est une alternative intéressante à l'utilisation de l'énergie fossile. Elle permet la transformation thermo-chimique de la biomasse solide directement en gaz combustible valorisable dans les moteurs à combustion interne. L'installation de petites unités locales et même déplaçables pour valoriser le résidu à l'endroit où il est produit permet l'optimisation du bilan énergétique. Le résidu est une ressource dont le contenu énergétique est faible. Il ne faut donc pas envisager de le transporter. Il doit être valorisé localement par des installations de faibles puissances pour lesquelles le gazogène couplé à un moteur se prête bien. L'activité scientifique consiste en une connaissance fine des caractéristiques thermiques du procédé de gazéification et en une meilleure compréhension du processus thermo-chimique. Les résidus secs combustibles (déchets de scieries, paille, ...) représentent un potentiel énergétique intéressant. Les procédés de gazéification étagés à lit fixe sont bien adaptés aux petites puissances, de part leur simplicité ou leur performance. Dans le cadre d'un partenariat avec le CIRAD (Centre de coopération International de Recherche Agronomique et de Développement) on s'intéresse à la pyrolyse oxydante à l'échelle de la particule et à l'échelle du réacteur. L'objectif est une meilleure connaissance des mécanismes de transferts de masse et de chaleur au sein d'un lit fixe réactif de solides divisés (Thèse Daouk).



Echelles d'étude du procédé de gazéification en lit fixe. (Thèse Daouk).

Solvolyse

La solvolyse est un procédé de liquéfaction du résidu permettant d'obtenir un liquide riche en hydrocarbures, pour qu'il soit valorisable comme carburant. Le procédé permet une dissolution complète de la matière organique dans un solvant organique, dans des conditions de température et de pression déterminées. L'huile obtenue doit être traitée dans une seconde étape dite de raffinage afin d'en améliorer les propriétés.

Nous avons exploré cette voie pour la valorisation énergétique de bois traités aux sels de CCB (cuivre-chrome-bore) qui représentent un gisement de près de 9 millions de tonnes/an en France (poteaux électriques, traverses de chemin de fer). Un chemin de valorisation énergétique étudié est l'hydroliquéfaction directe du bois traité pour le convertir en bio-huile et, dans le même temps, concentrer les métaux dans une seule phase. L'étude paramétrique a montré que la nature du solvant, le ratio massique bois/solvant, l'utilisation de l'hydrogène comme gaz réducteur et la température finale de la réaction influencent le rendement des produits, leurs caractéristiques chimiques ainsi que leur concentration en cuivre, chrome et bore. D'un point de vue bilan énergétique, nous avons montré que pour 1 kg de bois traité, le procédé consomme 15 MJ et produit 22 MJ. Ce bilan positif peut encore être amélioré par d'autres voies thermo-chimiques comme l'hydroliquéfaction catalytique du charbon de pyrolyse du bois en présence d'alumine (Thèse Kinata 2013).

Notre expertise dans ce domaine nous conduit à explorer avec nos collègues du projet Algoroute (axe BSMM et IFSTTAR), la liquéfaction hydrothermale pour produire un liant viscoélastique à partir de résidus de microalgues, issus d'une première valorisation. Un intérêt dans la fabrication d'un bitume alternatif par ce type de procédé réside dans le fait qu'il ne nécessite aucun séchage préalable de la biomasse (étape très énergivore).

2. Stratégie d'utilisation de l'énergie

L'efficacité énergétique constitue aujourd'hui un des enjeux prioritaires pour différents secteurs industriels comme l'agroalimentaire ou encore le bâtiment. C'est une opportunité pour proposer des solutions de rupture technologique. Dans ce contexte, nos objectifs sont de :

- développer de nouveaux procédés multiénergies,
- élaborer de nouvelles stratégies pour adapter les sources aux besoins.

Stratégie d'utilisation de l'énergie à l'échelle des procédés

A l'échelle des procédés, la majeure partie de nos travaux concernent les traitements thermiques et frigorifiques de produits alimentaires. Par des stratégies innovantes et des procédés multi-physiques, il s'agit de minimiser la consommation énergétique tout en garantissant des qualités de produits égales ou supérieures à celles obtenues avec des techniques conventionnelles. Un des challenges des procédés multi-énergies réside dans la gestion des sources énergétiques au cours du temps.

Notre démarche scientifique s'appuie sur

- la modélisation des phénomènes multi-physiques avec les transferts couplés de masse et de chaleur, les changements de phase, la dynamique des fluides, voire l'électrostatique ou l'électromagnétisme. L'optimisation des transferts au sein des procédés est une thématique sous jacente qui vise à apporter une meilleure compréhension des phénomènes à l'échelle locale. Dans le cadre du Projet régional Perle2, nous avons ainsi analysé les écoulements et transferts dans des configurations très spécifiques en recherchant une intensification des transferts dans des applications en microfluidique (Thèse Belkadi 2015) et en électrohydrodynamique (Thèse Hamdi 2014).
- L'analyse de la dynamique du système et le développement de modèles réduits pour élaborer des lois de commandes. Il est nécessaire de mettre en place des algorithmes d'optimisation, puis d'utiliser des lois de commande non linéaires multivariées pour envisager un contrôle optimal de ces procédés. Les procédés étudiés mettent ainsi en œuvre plusieurs variables d'entrée et doivent répondre à des objectifs multicritères basés sur les efficacités énergétiques, exergetiques et éventuellement sur des impacts environnementaux ou des indicateurs de qualité.
- La conception de bancs expérimentaux, de démonstrateurs et le développement de simulateurs validant nos stratégies.

Nous avons par exemple mis en œuvre cette démarche pour mener des actions sur l'efficacité énergétique de la cuisson du pain par l'utilisation et le couplage de plusieurs sources d'énergie (Infrarouge-convection-jets en impact, ...). Un modèle cinétique complet de cuisson a été développé pour simuler les températures, teneurs en eau, pressions et modification du volume au cours de la cuisson. Ce modèle permet d'étudier les différentes sources de cuisson, les effets de la sole ou encore de l'influence de l'humidité dans le four (Thèse Nicolas 2012). Le temps de calcul lié à un tel modèle interdit toutefois son intégration dans une procédure d'optimisation multicritères de la cuisson. Un modèle mécanistique réduit a alors été développé pour prédire en quelques millisecondes l'évolution des températures et teneurs en eau lors d'un cycle de cuisson. Couplé à un algorithme de commande, ce modèle permet une poursuite de trajectoire de cuisson tout en optimisant l'énergie consommée par les différentes sources. Ce type d'approche a également été mis en œuvre sur le procédé de séchage de granulés (projet ADEME Opsera) avec une visée très applicative dans le cadre du Réseau Mixte de Technologies 'Gestion Durables des Fluides-Energie, Froid, Eau'.



Four à jet impactant à faible consommation d'énergie

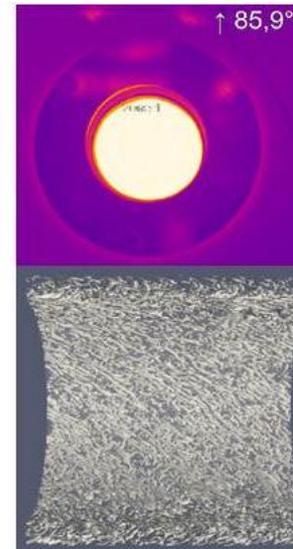
Nous nous intéressons également depuis de longues années aux traitements thermiques par micro-ondes. Dans le cas du procédé de décongélation, le verrou technologique réside dans la maîtrise des températures à cœur et en surface du produit, il faut décongeler au centre du produit tout en évitant les surchauffes locales. D'un point de vue scientifique, nous avons modélisé le changement d'état et lié les propriétés thermophysiques par une fonction taux de glace originale. Les interactions avec le champ électromagnétique interne ont été considérées par différentes approches (Loi de Lambert, équations de Maxwell).

L'optimisation énergétique en ligne de ce procédé de décongélation micro-ondes se base sur un contrôle prédictif à partir de modèles non linéaires. Cette approche permet de gérer simultanément la durée du procédé, la température maximale autorisée et le coût énergétique. Le contrôle est réalisé par une prédiction de futures sorties du système pour le calcul de l'action de commande en cours. Cette approche de commande prédictive est actuellement exploitée dans le projet Ecother (Thèse Jebara).

L'expérience dans ces domaines nous a incités à élargir le champ aux procédés de pasteurisation de produits solides avec prise en compte de la destruction microbienne (Thèse Hamoud-Agha 2013) ou encore à la cristallisation du sucre.

Les approches de modélisation seront également exploitées dans le cadre du projet FreezeWave qui s'intéresse à la congélation assistée par micro-ondes (Thèse Sadot).

Notre méthodologie basée sur la modélisation des phénomènes de transferts et l'optimisation énergétique s'applique à d'autres secteurs d'activité. Ainsi, dans le cadre de l'équipe commune avec l'IFSTTAR, nous nous intéressons à la récupération de l'énergie fatale sur des fours tournants utilisés pour fabriquer des enrobés bitumineux. Un modèle thermodynamique global a été développé, un équipement pilote a été construit avec un échangeur de chaleur annulaire permettant le contrôle thermique du milieu divisé (grain/gaz/paroi). Des simulations numériques internes de l'équipement sont également réalisées pour dresser une cartographie locale de l'écoulement, notamment dans la zone annulaire (Thèse Piton).



Banc d'essai semi-industriel représentatif d'un procédé de récupération de chaleur sur un système de type rotator-hublots (ZnSe) pour les mesures Infrarouges de la partie rotor - Simulations aux grandes échelles de l'écoulement dans la zone annulaire (Thèse Piton)

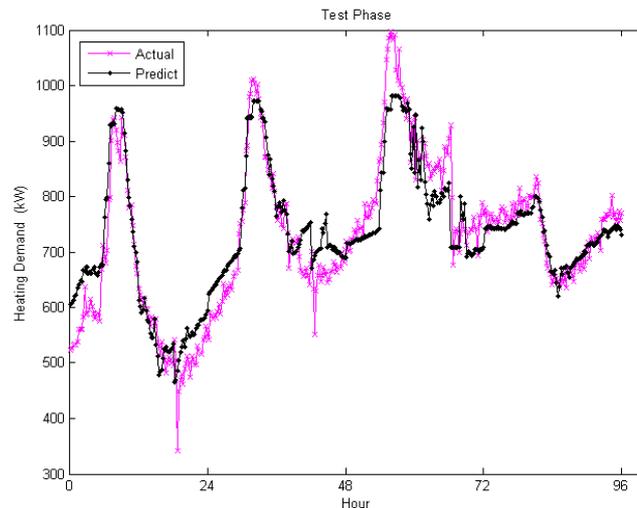
Stratégie d'utilisation de l'énergie à l'échelle du territoire

L'optimisation à l'échelle du procédé n'est pas toujours le seul angle d'attaque, il est également nécessaire de réfléchir à la stratégie d'utilisation de l'énergie à des échelles plus larges tels un atelier, un site industriel, un bâtiment ou encore une ville. La thématique SEDET (Systèmes Energétiques Durables et Territoires) est ainsi consacrée à l'étude et à la modélisation des systèmes énergétiques aux échelles territoriale et urbaine. Les composants majeurs des systèmes énergétiques locaux sont étudiés : demande d'énergie finale, actions sur la demande, moyens de production et réseaux énergétiques locaux. Les systèmes sont analysés selon différentes dimensions technico-économiques (bilans énergétiques, coûts, impacts environnementaux), en intégrant dans certains cas les interactions avec les jeux d'acteurs. A côté d'approches classiques par modélisation, d'autres approches sont développées pour l'évaluation « *a posteriori* ».

Par ailleurs, les systèmes de production et de distribution d'énergie à l'échelle territoriale, sont également traités (réseaux de chaleur multi-énergies ; valorisation énergétique d'effluents agricoles) sous l'angle de la modélisation système essentiellement, en explorant des modèles supportés par un système d'information géographique, en relation avec d'autres équipes du laboratoire plus portées sur l'analyse fine des procédés, au sein de l'axe Ingénierie de l'énergie et de l'axe Ingénierie de l'environnement.

Une partie des travaux autour de cette thématique, de par leur dimension pluridisciplinaire, est le support de collaborations avec d'autres laboratoires dans le cadre de l'IRSTV (Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, FR CNRS 2488), sur l'évaluation interdisciplinaire des impacts environnementaux des actions sur la mobilité urbaine et de leurs conséquences socio-économiques.

Le programme SELECT+ démarré en 2012 porte sur les bâtiments basse consommation. Ainsi, on s'intéresse notamment à la prédiction du besoin de chaleur de ces bâtiments en utilisant une description à base de réseaux neuronaux (Thèse Paudel), la mobilité du doctorant s'organise entre TU/e (Pays-Bas), VERI (centre de recherche de VEOLIA).



Besoin de chaleur mesuré (en rose) et prédit (en noir) pour le bâtiment Mines Nantes à l'aide d'un réseau de neurones avec une pseudo-dynamique. (Thèse Paudel)

Analyse énergétique et/ou environnementale des systèmes

Les thématiques ci-dessus nécessitent le développement de méthodologies génériques pour analyser la pertinence des solutions envisagées du point de vue énergétique mais également environnemental. Selon le thème, nous intégrons également des critères liés à la qualité des produits ou des services et des critères prenant en compte les aspects environnementaux. Le développement de procédés innovants doit en effet être complété par une analyse environnementale (et pas uniquement une analyse énergétique) afin de s'assurer qu'il n'y a pas de transferts de pollution d'une catégorie d'impact à une autre (consommation énergétique, gaz à effet de serre, consommation d'eau, ...). Un des domaines d'application concerne par exemple la technologie haute pression sur les produits carnés. Elle est présentée comme étant moins énergivore que les procédés classiques. Cette technologie ne conduit cependant pas au même produit final (ex : DLC plus ou moins longue, propriétés organoleptiques différentes). En collaboration avec l'axe MAPS², une étude sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) a été réalisée (Thèse Villamonte 2014). Parmi les outils transversaux, nous explorons d'autres concepts comme l'analyse émergétique. L'empreinte énergétique, connue sous le néologisme éMergie, connaît un essor scientifique de plus en plus important. Cette approche fait partie des méthodologies quantifiant l'impact d'un produit ou d'un service sur l'environnement (à l'instar de l'analyse du cycle de vie). La thèse de Jamali-Zghal (2014) a porté notamment sur une passerelle originale entre l'approche exergetique des minéraux, définie par le Professeur Szargut (Gliwice, Pologne) et le Professeur Valero (Zaragoza, Espagne) et l'éMergie, définie par le Professeur Odum (Université de Floride, USA), ceci pour prendre en compte l'épuisement mondial des minéraux. Un travail additionnel sur l'impact de cet épuisement sur la pertinence du recyclage est aussi abordé.

Publications significatives sur la période 2010-2015 (l'ensemble de la production scientifique de l'axe est donné en annexe 6)

- Varuvel E.G., Mrad N., Tazerout M., Aloui F., 2012, Experimental analysis of biofuel as an alternative fuel for diesel engines, Applied Energy, 94, 224-231 (5-Year Impact Factor: 5.261).
- Kinata, S. E., Loubar, K., Paraschiv M., Belloncle C., Tazerout M., 2012 Combination of pyrolysis and hydroliquefaction of CCB-treated wood for energy recovery: optimization and products characterization, Bioresource Technology, 118, 315-322. (5-Year Impact Factor: 5.330).
- Damour C., Hamdi M., Josset C., Auvity B., Boillereaux L., 2012. Energetic analysis and optimization of a food defrosting system, C., Energy, 37(1), 562-570. (5-Year Impact Factor: 5.153).
- Ait Mouheb N., Malsch D., Montillet A., Sollic C., Henkel T., 2012. Numerical and experimental investigations of mixing in T-shaped and cross shaped micromixers. Chemical Engineering Science, 68(1), 278-289. (5-Year Impact Factor: 2.674).
- Montillet A., Nedjar S., Tazerout M., 2013. Continuous production of water-in-oil emulsion using micromixers. Fuel, 106, 410-416. (5-Year Impact Factor: 4.091).
- Lamarche P., Tazerout M., Gelix F., Köhler S., Mati K., Paviet F., 2013. Modelling of an indirectly heated fixed bed pyrolysis reactor of wood: Transition from batch to continuous staged gasification. Fuel, 106, 118-128. (5-Year Impact Factor: 4.091).
- Jamali-Zghal N., Amponsah N.Y., Lacarriere B., Le Corre O., Feidt M., 2013. Carbon footprint and emergy combination for eco-environmental assessment of cleaner heat production. Journal of Cleaner Production. 47, 446-456. (5-Year Impact Factor: 4.167).
- Alamir M., Witrant E., Della Valle G., Rouaud O., Boillereaux L., 2013. Estimation of energy saving thanks to a reduced-model-based approach: Example of bread baking by jet impingement. Energy, 53, 74-82. (5-Year Impact Factor: 5.153).

- Subodh P., Elmtiri M., Kling W.L., Le Corre O., Lacarrière B., 2014. Pseudo dynamic transitional modeling of building heating energy demand using artificial neural network. *Energy and Buildings*, 70, 81-93. (5-Year Impact Factor: 3.617).
- Bardy E., Hamdi M., Havet M., Rouaud O. 2015. Transient Exergetic Efficiency and Moisture Loss Analysis of Forced Convection Drying With and Without Electrohydrodynamic Enhancement. *Energy*, Volume 89, September 2015, Pages 519-527. (5-Year Impact Factor: 5.153).

Rayonnement et attractivité académiques

- Plateforme PREVER

Cette plateforme (700 m²) pour la recherche et l'étude pour la valorisation énergétique des résidus (PREVER) a été inaugurée en 2014. Elle accueille les équipements nécessaires au développement de solutions de valorisation de déchets (liquides graisseux, plastiques, bois) par des procédés de gazéification, de pyrolyse ou de solvolysé, pour alimenter localement des installations fixes.

- Equipe de recherche commune avec IFSTTAR

Pour l'axe « Ingénierie de l'énergie », une thèse est en cours sur la récupération de chaleur fatale dans des fours tournants et d'autres projets sont envisagés (chauffage micro-ondes de matériaux granulaires).

- Création du réseau ACV Ouest en 2011 avec Vanessa JURY, Bruno LACARRIERE et Jean-Sébastien BROCC.

Projets nationaux, européens, internationaux

- Projets européens :
 - LEO (MAPS²) : Fours basse consommation d'énergie (2013-2016).
 - ERANET SUSFOOD «FREEZE WAVE» (Axes Ingénierie de l'Energie et MAPS²) : congélation assistée par micro ondes. (2015-2018).
 - Projet européen SELECT + « Avenir des systèmes énergétiques durables »:

L'union européenne soutient la coopération d'universités européennes au niveau doctoral dans un programme générique intitulé Erasmus Mundus Joint Doctorate. Coordonné par KTH (Suède), 8 institutions académiques (pour la France, Ecole des Mines de Nantes) et 3 partenaires industriels se sont réunis autour d'un thème « avenir des systèmes énergétiques durables » et forment le premier cercle du programme, intitulé SELECT+. De nombreuses originalités ont permis d'obtenir le financement européen, notamment le "project of the year" correspondant à 9 thèses portant autour d'un même thème. B. Lacarrière est membre du comité de direction de SELECT+ et O. Le Corre est membre du comité en charge du suivi de la qualité des thèses.

- Projets ANR :
 - Blanc CLPP : Capteurs Logiciels Plug & Play (2008-2011) (axes BSMM et Ingénierie Energie).
 - Blanc CPARTOUT : Cisaillement pariétal et tourbillons en écoulement de Taylor-Couette (2008-2011).
 - Villes durables Eval-PDU : Evaluation des impacts environnementaux des plans de déplacements urbains et de leurs effets socio-économiques (2009-2011).
 - ALIA : BRAISE, Boulangerie raisonnée et efficacité énergétique (2009-2012).
 - PNRA CleanAirNet : Conception hygiénique des réseaux de ventilation (2010-2013).
 - ALID : SATIN, Systèmes Alimentaires Durables (2012-2014 : 'Cuisson en moule des pains et biscottes; Maîtrise des risques chimiques et enjeux énergétiques'. Coordinateur : A. Le Bail (axes Ingénierie Energie et MAPS²).
 - BLAC HP analyse de cycle de vie (2015-2017) (axes Ingénierie Energie et MAPS²).
- Projet d'Innovation Stratégique Industrielle BPI ECOTHER : Optimisation énergétique des procédés de mise en œuvre des matériaux. (2014-2017) (axe Ingénierie Energie et MAPS²)
- Projets ADEME
 - sur la Base Carbone : 'Développement et amélioration de méthodes d'évaluation de l'empreinte carbone et de leurs données d'entrée' (2012).
 - Réseau scientifique d'expertise BASE CARBONE® et Empreinte GES (2013-2014)
 - OPSERA : Optimisation Sécheur Refroidisseur Alimentation Animale (2012-15).
 - Cortea F3 : Fonctionnalisation de Filtres Frittés pour le traitement des fumées de combustion (2014-17), en inter-axe avec l'axe Ingénierie de l'Environnement.
- Projets FUI :
 - IWEST : Integrated Waste to Energy Shipboard Technology (2010-2013)
 - AERDECO : Aéronautique déchets composites (2009-2012)

Accueil de chercheurs étrangers

Chercheur, institution	Thème	Période
Pr. Gilberto JANNUZZI, Université de Campinas, Brésil.	Planification intégrée des ressources et évaluation des actions d'efficacité énergétique	2 mois octobre - novembre 2011.
Pr. Tuan PHAM, Université de New South Wales, Sydney, Australie.	Modélisation de procédés : optimisation énergétique du procédé de congélation cryogénique	8 mois juin 2011 - janvier 2012.
Yahia LASBET, enseignant-chercheur à l'Université de Djelfa, Algérie,	Etude du mélange air/biogaz dans les moteurs à dual fuel par advection chaotique	1 mois mars 2012
Ammar BEN BRAHIM, professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès, Tunisie,		1 mois octobre 2012
Cristina CIOBANU, enseignant-chercheur à l'Ecole Polytechnique de Bucarest, Roumanie,	Biocarburants et les moteurs à combustion interne	3 mois octobre - décembre 2012
Pr Abdelkrim LIAZID, Directeur du laboratoire LTE à l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, Oran, Algérie.	Masters ME3/PM3E	< 1 mois 3-7 décembre 2012
Pr Mukesh KHARE, Indian Institute of Technology, New Delhi (Inde).	Masters ME3/PM3E	< 1 mois 27-31 mai 2013.
Pr Otto STEIN, Montana State University (USA)	Masters ME3/PM3E	< 1 mois 27 mai-7 juin 2013
Gabriela DOTRO, Cranfield University, Cranfield (UK),	Masters ME3/PM3E	< 1 mois 28-31 mai 2013
Pr Babu ALAPPAT, Indian Institute of Technology, New Delhi (Inde),	Masters ME3/PM3E	< 1 mois 14-21 juin 2013.
Erik BARDY, associate professor, Grove City College (USA)	Analyse exergetique du procédé de séchage électro-convectif	6 mois + 2 mois Janvier-juin 2014 Juin-Juillet 2015
Atef LAKOUD, Ecole Supérieure des Industries Alimentaires de Tunis (ESIAT),	Optimisation des procédés d'hydratation et de séchage des dattes.	3 mois janvier à avril 2015
Ahmed-Lamine BOUKHALKHAL, enseignant-chercheur à l'Université de Djelfa, Algérie	Modélisation du mélange carburant / air dans les moteurs dual-fuel.	1 mois + 1 mois octobre 2013 mars 2014

Organisations de colloques de portée nationale/internationale

- CIGR Section VI International Symposium on Towards a Sustainable Food Chain Food Process, Bioprocessing and Food Quality Management, Nantes, FRANCE - April 18-20, 2011. (Organisation A. Le Bail, V. Jury, M. Havet, O. Rouaud, ...).
- Séminaire annuel du Laboratoire International Associé (LIA) Franco-Chinois "Laboratoire pour l'Energie Durable". Nantes, 18-20 juin 2012. Organisation (L. Le Coq, J. Legrand, D. Briand).
- Séminaire final de restitution du programme ANR Eval-PDU : Évaluation environnementale des plans de déplacements urbains. Nantes, 26-27-28 juin 2012. Organisation (L.Fouillé, B.Bourges).

Interaction avec l'environnement social, économique et culturel

Partenariats industriels

- Projet Cryomass 1, SOL Company (Italy), 2011 : « Efficacité énergétique d'un procédé de congélation cryogénique »
- Projet Cryomass 2, SOL Company (Italy), 2012 : « Transferts de matière lors de la congélation cryogénique »
- Projet Angèle, Bureau national Interprofessionnel du Pruneau, 2012 : « Efficacité énergétique des procédés de séchage de prunes d'Ente »
- Collaboration avec LAITA, 2012-2015 : « Elaboration d'un plan de réduction de l'empreinte énergétique d'une laiterie : détermination de la quantité d'énergie minimale requise à différents procédés de fabrication de produits »

- Projet Enteromic, Coopérative agricole TERRENA 2015 : « Traitement micro-ondes de farines de céréales crues destinées à l'alimentation animale »
- Projet Dattes : société Boudjebel SA VACPA (Tunisie), 2015 « Optimisation des procédés d'hydratation et de séchage des dattes »
- Projet Production de carburant par transestherification à partir de déchets gras et valorisation en moteur à combustion interne, entreprise CTMA, 2008-2011.
- Projet Evaluation ex-post de l'efficacité de solutions de rénovation énergétique en résidentiel, entreprise EDF, 2011-2014.