



HAL
open science

Quelle énergie durable pour demain ?

Nicole Sardat, Lynda Aissani, Christine Argillier, Romain Roy, Jacques Granier, Laurence Fournaison, T. Bouchez, O. Chapleur, Laurent Mazéas, Charlotte Richard, et al.

► To cite this version:

Nicole Sardat, Lynda Aissani, Christine Argillier, Romain Roy, Jacques Granier, et al.. Quelle énergie durable pour demain ?. Irstea, pp.70, 2012. hal-02597378

HAL Id: hal-02597378

<https://hal.inrae.fr/hal-02597378v1>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Quelle **énergie**
durable
pour **demain ?**



Quelle **énergie**
durable
pour **demain ?**



■ Directeur de publication

Jean-Marc Bournigal, président d'Irstea

■ Responsable d'édition

*Sylvane Casademont, directrice de la communication
et des relations publiques*

■ Coordination

*Lucinda Aïssani, chargée de communication
Nicole Sardat, chargée de communication*

■ Conception et réalisation

Nicole Sardat, infographiste et chargée de communication

■ Secrétaire de rédaction

Catherine Sialino

■ Comité éditorial

*Pierrick Givone, directeur scientifique
Bernard Chastan, directeur du département Eaux
Philippe Duchène, directeur du département Écotechnologies
Marc Guérin, directeur du département Territoires
Lucinda Aïssani, chargée de communication
Sabine Arbeille, responsable pôle médiation scientifique
Nicole Sardat, infographiste et chargée de communication*

■ Comité de rédaction

*Lucinda Aïssani, chargée de communication
Élodie Francillette, chargée de communication
Pauline de Saboulin Bollena, chargée de communication
Nicole Sardat, chargée de communication*



Remerciements

Quelle **énergie**
durable
pour **demain ?**

Merci aux chercheurs, ingénieurs, techniciens et doctorants d'Irstea qui ont participé à la réalisation de cet ouvrage :

■ Aix-en-Provence

Hydrobiologie ■ Laboratoire d'essais et de recherche des matériels d'irrigation
Christine Argillier, Romain Roy ■ Jacques Granier

■ Antony

Technologies pour la sécurité et les performances des agroéquipements ■ Génie des procédés frigorifiques ■ Hydrosystèmes et bioprocédés
Laurence Fournaison ■ Théodore Bouchez, Olivier Chapleur, Laurent Mazéas, Charlotte Richard ■ Stéphanie Lacour

■ Bordeaux

Écosystèmes estuariens et poissons migrateurs amphihalins
Frédérique Bau, Hilaire Drouineau

■ Clermont-Ferrand

Mutations des activités, des espaces et des formes d'organisation dans les territoires ruraux ■ Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes
Laurence Amblard, Fabien Guerra, Marie Taverne ■ Jean-Christophe Baudez, Romain Girault

■ Grenoble

Écosystèmes montagnards ■ Services généraux
Christophe Chauvin, Sylvain Dupire, André Évette, Jean-Matthieu Monnet, Antoine Tabourdeau ■ Maryse Berlandis, Maud Grandhaye

■ Montpellier

Information-Technologies- Analyse environnementale - Procédés agricoles ■ Territoires, environnement, télédétection et information spatiale
Véronique Bellon-Maurel, Jean-Michel Roger ■ Michel Deshayes, Sylvie Durrieu, Kenji Osé

■ Nogent-sur-Vernisson

Écosystèmes forestiers
Christophe Bouget, Christian Ginisty, Frédéric Gosselin, Patrick Vallet

■ Rennes

Gestion environnementale et traitement biologique des déchets
Lynda Aissani, Fabrice Béline, Thierry Bioteau, Patrick Dabert, Pascal Peu, Anne Trémier

Merci aux chargées de communication des centres régionaux

Avant-propos

Une énergie facilement disponible et bon marché a permis l'amélioration de notre qualité de vie au cours des deux derniers siècles. Cette disponibilité constitue un pilier fondateur de notre société technologique actuelle.

Avec la croissance démographique mondiale qui portera à 9 milliards le nombre d'habitants sur la planète en 2050, comment faire face à l'augmentation mondiale des besoins en énergie alors que, dans le même temps, les énergies fossiles s'épuisent et que leurs usages intensifs augmentent la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère responsable en partie du réchauffement climatique ?

Les énergies renouvelables sont un complément indispensable, une alternative crédible, y compris au plan économique. Ne peuvent-elles permettre au moins une transition énergétique ? Il faut pour cela accentuer les efforts de recherche.

Pierrick Givone

Directeur général délégué à la recherche et à l'innovation



1

Méthanisation des déchets



Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux déchets organiques. Ce sont les résidus d'origine végétale ou animale qui peuvent être dégradés par les micro-organismes pour lesquels ils représentent une source d'alimentation. Ils incluent les végétaux, les déchets putrescibles de la cuisine et ceux collectés auprès des collectivités et des entreprises, les déchets agricoles, les papiers et cartons souillés sous certaines conditions.



Introduction :
la méthanisation en France

8-11

Caractérisation
des déchets organiques

12-13

Prédiction rapide du potentiel
méthane des déchets solides

14-15

Intégrer la méthanisation
dans une filière
de traitement préexistante

16-17

Territorialisation
de la méthanisation

18-19

Vers la méthanisation
des boues d'épuration !

20-21

Pour une meilleure gestion
des digestats

22-23

Nos déchets, une ressource
renouvelable ?

24-25

Optimiser les processus
microbiens de dégradation
des déchets

26-27

Analyse du cycle de vie
de la méthanisation

28-29



Introduction : la méthanisation en France

*Fabrice Béline
Patrick Dabert
Pascal Peu
Anne Trémier*

Qu'est-ce que la méthanisation ?

La méthanisation, également appelée digestion anaérobie, est un processus de dégradation microbienne au cours duquel la matière organique complexe est minéralisée partiellement en un biogaz composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone, et en un résidu solide ou liquide appelé digestat.

De nombreux procédés existent pour mettre en œuvre la méthanisation dans une dimension industrielle. Ils répondent tous à une même logique : assurer au mieux des conditions de milieu favorables aux microorganismes du réseau trophique, notamment les méthanogènes.

Des avantages environnementaux

La méthanisation affiche un bilan environnemental plus favorable que les autres filières de gestion des déchets organiques : mise en décharge ou compostage direct pour les déchets ménagers, stockage et épandage pour les effluents d'élevage.

Grâce aux réactions biologiques, la méthanisation entraîne une diminution considérable de la charge organique, donc de la charge polluante du déchet digéré. Cette charge polluante est transformée en biogaz qui constitue une source d'énergie renouvelable substituable à l'énergie fossile (pétrole, charbon, gaz naturel). La méthanisation représente donc une méthode de gestion durable des déchets sous réserve qu'elle soit couplée à un procédé de valorisation de l'azote et du phosphore lorsque c'est nécessaire.



La méthanisation, encore sous-utilisée aujourd'hui, apparaît comme une réponse à la double problématique de la gestion des boues et du développement des énergies renouvelables.

Boues déshydratées dans une station d'épuration
■ Stéphane Bons



Des contraintes à maîtriser

Les transformations biologiques réalisées pendant la méthanisation peuvent conduire à une forte production d'ammoniac ou d'hydrogène sulfuré lorsque les déchets sont riches en azote ou en soufre. Une gestion raisonnée des déchets entrant dans le méthaniseur et une épuration du biogaz produit sont alors nécessaires au bon fonctionnement de la filière.

Avec l'accroissement du nombre de méthaniseurs agricoles, il faut s'attendre à l'apparition de tensions à la fois sur la collecte des déchets industriels et urbains généralement utilisés comme co-substrats énergétiques dans les installations de méthanisation et sur les surfaces d'épandage capables de recevoir les digestats.



Unité de méthanisation des boues sur la STEU d'Aix-la-Pioline
■ Irstea

La France compte un peu plus de 200 sites de méthanisation pour une production de biogaz estimée à 310 ktep (kilo tonne équivalent pétrole), la moitié provenant des décharges, l'autre des stations d'épuration. Aujourd'hui, les chercheurs d'Irstea s'intéressent à la production de méthane à partir de plusieurs sources de déchets fermentescibles : biodéchets ménagers, déchets et co-produits organiques de l'agriculture, des agro-industries et boues issues des unités de traitement des eaux usées.

La méthanisation en Europe

10-11

L'Europe compte plus de 6-7000 installations de méthanisation traitant divers types de substrats. La production d'énergie primaire de biogaz de l'Europe des 27 s'élève à 8346 ktep (kilo tonne équivalent pétrole) dont plus de la moitié pour la seule Allemagne, leader européen.

Si tous les États sont favorables au développement de la méthanisation, celui-ci se décline de manière très différente d'un pays à un autre. Ainsi, Le Royaume-Uni, l'Italie et l'Espagne produisent plus de $\frac{3}{4}$ de leur biogaz dans les centres d'enfouissement, tandis que l'Allemagne et l'Autriche sont pionnières en matière de valorisation des déchets agricoles.

Des avantages économiques

La méthanisation permet d'abord de faire des économies quand les prix de l'énergie fossile sont au plus haut. Comment ? Le biogaz peut être utilisé pour produire de l'électricité, mais il peut aussi être utilisé en cogénération pour chauffer des bâtiments, produire de l'eau chaude ou encore chauffer de l'air. Après une étape d'épuration, il peut même être injecté dans le réseau de gaz naturel. Les avantages économiques peuvent se résumer ainsi : la méthanisation permet de garantir une relative indépendance énergétique en supprimant une partie des frais liés à l'énergie (électricité, chauffage) tout en valorisant un déchet et en délocalisant nos sites de production d'énergie sur le territoire.



Unité de méthanisation à la ferme ■ Evalor

Valoriser les déchets agricoles et les effluents d'élevage par la méthanisation permet de répondre au triple objectif de réduire l'impact sur l'environnement des exploitations agricoles, d'anticiper les évolutions réglementaires et de valoriser le potentiel énergétique et donc économique.

Des avantages agronomiques

Les digestats sont les résidus solides et liquides générés par les procédés de méthanisation des déchets. Leur composition diffère selon l'origine des substrats méthanisés et selon leur mode de gestion.

Cependant, ils contiennent généralement de la matière organique résiduelle et des éléments fertilisants valorisables par épandage agricole. Cette valorisation

peut nécessiter plusieurs étapes de post-traitement, telles que le compostage, le séchage, la séparation membranaire... Les digestats peuvent alors être utilisés sous la forme d'un amendement organique ou d'un fertilisant. De nombreux travaux de recherche sont en cours sur la valorisation agronomique des digestats et sur l'évolution de leur statut réglementaire

Quels sont les inconvénients ?

Même si l'État incite agriculteurs, collectivités, industriels à valoriser leurs déchets organiques via la méthanisation, des freins, surtout économiques, subsistent. Les coûts d'installation d'un méthaniseur, son temps d'amortissement sont lourds à supporter. Le coût d'une installation est très variable selon sa taille et sa configuration, mais des économies d'échelle peuvent être réalisées en regroupant plusieurs exploitations agricoles (3 ou 4 élevages pour un méthaniseur) ou en construisant des installations collectives traitant à la fois des déchets agricoles, des déchets industriels et des déchets urbains. La gestion de ce type d'installation demande alors des compétences et du temps qu'il ne faut pas sous-estimer.

Le contexte français

En France, le développement de la méthanisation est beaucoup plus restreint qu'en Allemagne ou au Royaume-Uni, malgré un gisement de matière organique important : 15 millions de tonnes de déchets pour le secteur agroalimentaire, 50 millions de tonnes de déchets municipaux et environ 150 millions de tonnes de déjections animales dont 2/3 sous forme solide pour le secteur agricole.

En 2007, la France compte 200 sites de méthanisation pour une production de biogaz estimée à 310 ktep, la moitié provenant des décharges, l'autre des stations d'épuration.

Malgré les freins administratifs, le développement de la filière est en route. Le gouvernement français encourage l'accélération des projets afin d'atteindre son objectif de production de 20 % d'énergies renouvelables dans sa consommation énergétique en 2020, avec la mise en place de dispositifs de soutien renforcés :

- d'une part, le biogaz issu de la méthanisation peut être injecté sur les réseaux de gaz naturel depuis la parution des textes réglementaires de l'été 2011 ;
- d'autre part, le tarif de rachat de l'électricité produite à partir de biogaz a été réévalué en 2011, portant ce tarif de rachat à 20 c€/kWh dans le meilleur des cas (contre 15 c€/kWh en 2006).

Caractérisation des déchets organiques

Fabrice Béline
Romain Girault

La nécessité de bien connaître les intrants

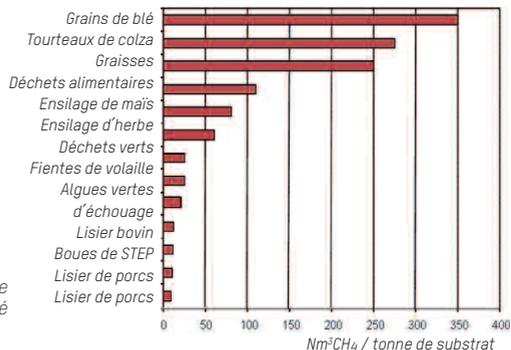
La caractérisation des déchets à valoriser par méthanisation est essentielle afin d'optimiser le dimensionnement et la gestion des méthaniseurs. Dans ce cadre, le potentiel méthanogène traduit la capacité d'un déchet à produire du méthane et permet d'évaluer l'intérêt de sa valorisation. Ainsi, de nombreuses méthodes ont été développées pour prédire le potentiel méthanogène d'un déchet à partir de sa composition biochimique. Cependant, les formules de prédiction semblent spécifiques à chaque type de substrat.

Des méthodes expérimentales de mesure du potentiel méthanogène (Biochemical Methanogenic Potential, BMP) ont également été développées. Ces tests sont basés sur la mesure de la production de biogaz dans un réacteur fermé contenant une quantité connue de déchet organique mise en présence d'une quantité connue de micro-organismes anaérobies (inoculum). Les incubations se déroulent en chambre thermostatée en absence d'oxygène.



Incubation des réacteurs
■ Romain Girault

Quantité de méthane produite
par tonne de substrat méthanisé



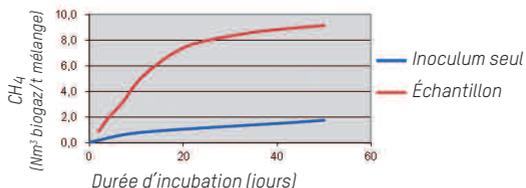
Substrat : paille (coupée à 4 cm)

Biogaz cumulé :

581,72 Nm³/t MO substrat

Potentiel méthanogène :

318,30 Nm³/t MO substrat



En lien avec le procédé

Cependant, l'estimation de la production de méthane lors des tests BMP est influencée par le protocole expérimental (choix de l'inoculum, mode de préparation et d'échantillonnage du déchet, ratio inoculum/substrat...) et les incertitudes liées aux erreurs de mesures sur la production et la composition du biogaz. Il est alors difficile d'utiliser ces données dans un objectif de dimensionnement et d'optimisation de la gestion du méthaniseur.

En direct d'Irstea Centres de Rennes et Clermont-Ferrand

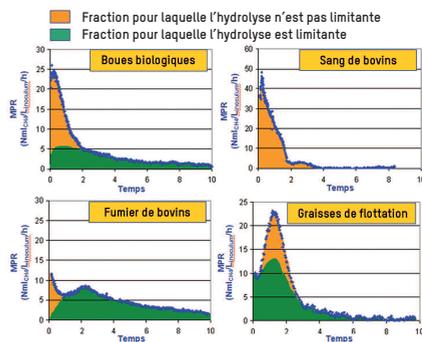
C'est pourquoi le centre Irstea de Rennes a développé une méthodologie, appelée « Respirométrie anaérobie », qui permet de prédire les rendements de dégradation des déchets dans un méthaniseur. Son principe consiste à injecter une quantité connue de substrat dans une grande quantité d'inoculum au sein d'un digesteur fermé mésophile sous agitation continue. L'évolution de la vitesse de production de méthane (Methane Production Rate) est alors suivie précisément au cours du temps et la cinétique de production de méthane observée est ensuite analysée à l'aide du modèle de digestion anaérobie (ADM1).



Respiromètre anaérobie
■ Romain Girault



Incubateur ■ Romain Girault



L'interprétation des courbes obtenues permet de déterminer, au sein d'un déchet, des fractions de matière organique dont les cinétiques de dégradation sont significativement différentes. Ces données permettent ensuite de modéliser finement la biodégradation du déchet et la production de méthane associée en fonction du dimensionnement et des paramètres de gestion du méthaniseur.



Deux minutes suffisent grâce à la spectrométrie proche infrarouge

La technologie spectrométrie proche infrarouge (SPIR) est déjà largement utilisée en contrôle qualité des procédés dans les secteurs de la pétrochimie, de l'agro-alimentaire et de la pharmacie... Pour son application à la méthanisation, elle présente l'avantage d'analyser globalement la matière organique, après une rapide préparation d'échantillon et de calculer le potentiel méthane en quelques minutes seulement. L'accès quasi-immédiat à la valeur du potentiel méthane permettra une optimisation des procédés de production de méthane. Le risque de méthaniser un déchet faiblement biodégradable sera diminué et les processus de co-digestion mieux maîtrisés.

Vers l'industrialisation du procédé

Après avoir proposé la technique de la spectrométrie proche infrarouge pour estimer le potentiel méthane de déchets organiques, les scientifiques d'Irstea, en collaboration avec l'INRA et l'EMA, ont étudié la faisabilité de cette technique pour estimer le potentiel méthane de déchets organiques¹. Ils se focalisent aujourd'hui sur un point critique de la mesure du potentiel méthane pour permettre l'industrialisation de la méthode : l'étalonnage. La réponse spectrale étant très sensible au type de déchet étudié, une série d'étalonnages doit être élaborée pour différents types de déchets rencontrés. Ce travail, fait en collaboration avec la société Ondalys², est destiné à apporter des solutions aux industriels de la méthanisation.



Installation
de méthanisation
■ Mathieu Lesteur

¹ Projet soutenu par la plate-forme régionale Écotech-LR, Écotecnologies pour les Agro-Bioprocédés, animée par Irstea

² Ondalys propose des services et formations en analyse de données multivariées aidant les industriels à mieux contrôler leurs produits et procédés

Intégrer la méthanisation dans une filière de traitement préexistante

Fabrice Béline
Patrick Dabert

► Traitement des effluents organiques en Bretagne

La Bretagne, première région agricole française, rassemble 60 % de la production nationale de porcs, 30 à 40 % de la production bovine et 34 % de la production de volailles. C'est une région classée en zone d'excédent structurel : pour protéger le milieu récepteur de l'eutrophisation, l'épandage des effluents organiques est limité à 170 Kg d'azote/ha/an.

Les éleveurs qui ne possèdent pas suffisamment de surfaces d'épandage sont contraints de traiter leurs effluents, le plus souvent dans des stations d'épuration. Le traitement est effectué par les processus biologiques de nitrification-dénitrification qui requièrent des étapes successives d'aération et non aération des effluents. Ce processus nécessite des contraintes particulières de charge polluante à traiter et de temps de séjour de la pollution dans chacune des étapes du procédé. Il permet de transformer une partie importante de l'azote contenu dans les déjections en azote moléculaire (N_2), principal constituant de l'atmosphère.



Traitement biologique de l'azote ■ Evalor



Intégrer la méthanisation grâce à la modélisation

L'intégration d'une étape de méthanisation, en amont d'une filière de traitement biologique des effluents, apporte de nouvelles contraintes d'exploitation qui doivent être gérées par une optimisation globale de la filière. Cette optimisation passe par l'étude de nombreuses combinaisons impliquant différentes charges polluantes, différents débits d'effluents, d'aération, la mise en place de circuits de recirculation différents... Si cette optimisation était réalisée de manière expérimentale, chaque essai nécessiterait la mise en œuvre et l'étude des procédés pendant plusieurs mois.

Les procédés de traitement biologique des lisiers par nitrification-dénitrification et le procédé de méthanisation des lisiers ont donc été modélisés séparément. Ces deux modèles ont été combinés pour simuler par ordinateur une quarantaine de combinaisons différentes de traitement des lisiers couplant la méthanisation et le traitement de l'azote. À partir de ces simulations, les six combinaisons présentant les meilleurs résultats ont été testées et validées sur des réacteurs pilotes d'une centaine de litres. L'ensemble de l'étude a nécessité trois ans de travail là où la validation des 40 scénarios sans la modélisation aurait demandé un peu plus de 13 ans. Grâce à ces résultats, la première installation industrielle du procédé a été inaugurée en 2011 par notre principal partenaire sur ce type de traitement : la PME Evalor.



Unité de méthanisation
■ Evalor



Pilote Irstea de méthanisation
et traitement de l'azote de lisier porcin
■ Pierre Rousseau

Territorialisation de la méthanisation

Thierry Bioteau
Fabrice Béline

Le monde agricole montre un intérêt croissant pour la valorisation par méthanisation des résidus organiques générés par l'élevage et les cultures. L'enjeu est double : le traitement des effluents d'élevage et la diversification du panel d'énergies renouvelables. Pour maximiser la production d'énergie, la méthanisation territoriale impliquant une mutualisation de déchets d'origines variées (agro-alimentaires, restauration, boues de stations d'épuration) apparaît comme une solution efficace. Afin de bien évaluer l'intérêt économique et environnemental d'un tel projet de développement territorial, il est nécessaire de réaliser une étude préalable des ressources disponibles et de leur accessibilité.

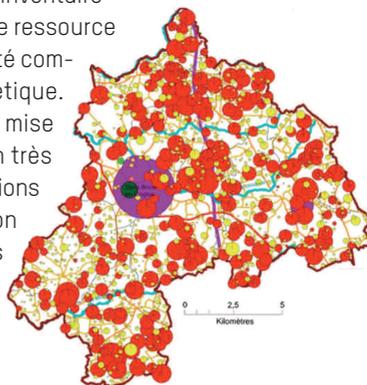
En direct d'Irstea Centre de Rennes

L'inventaire spatialisé des ressources

Nous avons développé une méthodologie d'inventaire spatialisé des substrats organiques. Chaque ressource est cartographiée en la rapportant à une unité commune représentant son potentiel énergétique. L'originalité de la démarche réside dans la mise en œuvre de techniques de géolocalisation très précises. Un inventaire complet des exploitations agricoles est réalisé par photo-interprétation d'imagerie aérienne et l'identification des résidus de récolte nécessite le recours à l'analyse d'images satellites.

Inventaire des ressources
■ Oleksandr Tretyakov

- Déchets d'élevage (66 %)
- Résidus des cultures (28 %)
- Déchets verts (1 %)
- Boues de STEP (1 %)
- Déchets IAA (4 %)

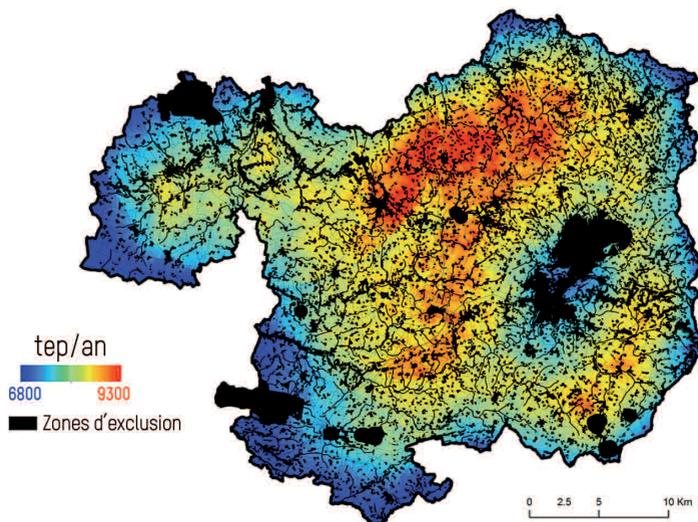


L'application de cette démarche en Ille et Vilaine a mis en évidence l'importance majeure des ressources agricoles qui se caractérisent par une forte dispersion géographique. Les autres substrats, industriels et issus des collectivités, constituent un potentiel global plus faible mais représentent parfois un fort potentiel énergétique localement.

Cartographie des zones préférentielles d'implantation

La géolocalisation des ressources et leur conversion en tonne équivalent pétrole (tep) rend possible l'obtention d'une carte qui tient compte d'une distance de collecte réaliste pour chaque ressource et qui prend également en considération les contraintes réglementaires (zones naturelles, distances aux habitations, etc.).

Cette approche initie la construction d'un outil de simulation spatialisé pour localiser précisément les ressources et déterminer les zones préférentielles d'implantation d'un méthaniseur. Les possibilités offertes par les systèmes d'information géographique (SIG) répondent bien à une demande d'aide à la décision dans le cadre des plans climat-énergie territoriaux (PCET) pour appréhender les potentialités du territoire à la méthanisation. Ainsi, grâce au SIG mis en place, la modélisation de plusieurs installations simultanées avec accès concurrentiel aux ressources est possible. D'autres aspects spatiaux tels que la sensibilité des sols à l'épandage des digestats de méthanisation ou la faisabilité d'injecter le biogaz produit dans le réseau de distribution en gaz naturel sont également modélisables.



Zones préférentielles d'implantation

■ Florian Borel

Cette carte représente, du bleu au rouge, un gradient croissant du potentiel énergétique global des ressources mobilisables. Ainsi, si le potentiel global du territoire étudié est ici de 37 000 tep, il est possible localement de ne valoriser que 9 300 tep au maximum pour répondre aux contraintes d'accessibilité aux ressources.

À la demande du ministère de l'Écologie, les scientifiques d'Irstea ont réalisé un état des lieux de la méthanisation des boues en France. Seules 68 stations de traitement des eaux usées, sur les 15 000 que compte le territoire, sont équipées d'un méthaniseur. Les freins au développement de la méthanisation des boues sont principalement d'ordre économique avec un investissement initial de 9 à 28€HT/Équivalent Habitant et une valeur moyenne de 15€HT/EH selon la capacité de la station d'épuration.

Pour améliorer le bilan économique de la digestion anaérobie des boues, il est possible d'ajouter dans les digesteurs des déchets organiques de plus fort potentiel énergétique comme les graisses d'origine agro-alimentaire qui peuvent augmenter significativement la production de méthane du digesteur. En collaboration avec l'entreprise Saur, les scientifiques d'Irstea ont cherché à optimiser cette filière de co-digestion, notamment au niveau des ratios de mélange. Ils ont pu montrer qu'une telle filière permet d'augmenter de près de 65 % la production de méthane d'un digesteur en comparaison de filières digérant uniquement des boues. L'intégration et les impacts de tels procédés dans les filières de traitement des eaux est également au programme des chercheurs d'Irstea.



Unité de méthanisation des boues sur la STEU d'Aix-la Pioline ■ Irstea



Pour une meilleure gestion des digestats

Patrick Dabert
Anne Trémier

Valoriser les digestats

Face au développement accru de la méthanisation, de nombreuses questions restent posées sur la gestion et la valorisation des résidus issus de ce procédé, les digestats. Leur composition diffère selon l'origine des substrats méthanisés et selon le post-traitement qu'ils subissent.

Plusieurs travaux ont été réalisés pour caractériser les digestats de boues urbaines et leurs techniques de post-traitement. Cependant, l'élargissement des domaines d'application de la méthanisation (aux déchets agricoles et aux déchets ménagers notamment), et le développement de nouvelles technologies conduisent à la production de digestats encore non caractérisés.

Quelles que soient leur origine et leur filière de post-traitement, la valorisation finale des digestats est aujourd'hui, et probablement pour encore de nombreuses années, majoritairement agronomique. Il existe donc une demande importante pour, d'une part, caractériser tous les types de digestats produits actuellement en France, et d'autre part, développer des méthodes de transformation permettant de mieux tirer parti de leur valeur agronomique.



Unité de méthanisation territoriale Géotexia ■ Patrick Dabert

Du statut de déchet à celui de produit

Dans ce contexte, le projet coordonné par Irstea Rennes, conduit en collaboration avec Irstea Montoldre, Solagro, Armines, Université de Montpellier II, INRA Grignon, Géotexia et Suez Environnement a pour objectifs majeurs :

- d'inventorier et de caractériser les différents types de digestats et les filières de gestion actuellement utilisées en France ;
- de caractériser la composition et la variabilité des digestats produits par les principales filières de méthanisation : biodéchets, ordures ménagères résiduelles, déchets territoriaux et agricoles ;
- d'évaluer la capacité de ces digestats à être utilisés en valorisation agronomique directe ou à être transformés via des post-traitements tels que le compostage ou le séchage pour les solides et le traitement biologique ou la filtration membranaire pour les liquides ;
- d'effectuer un bilan technico-économique et environnemental, notamment vis-à-vis des émissions de gaz à effet de serre, des filières de post-traitement des digestats en comparaison avec l'épandage direct.

Les résultats acquis participent à la démarche nationale mise en place pour l'établissement d'un cadre réglementaire permettant une évolution des digestats d'un statut de « déchet » vers celui de « produit », via la normalisation, l'homologation ou l'autorisation provisoire de vente.



Post digesteur permettant le stockage des digestats après méthanisation ■ Patrick Dabert

Digesteur anaérobie de déchets ■ Patrick Dabert

Extraction des molécules d'intérêt

Lors de la dégradation des déchets à partir d'une biomasse complexe, les scientifiques d'Irstea ont démontré qu'ils pouvaient imiter certaines fermentations naturelles comme la fermentation alcoolique en dirigeant l'activité microbienne vers une voie métabolique spécifique. La quantité d'éthanol produite est certes moins importante que sur des procédés dédiés, mais elle n'est somme toute pas négligeable. Principale limite : la molécule produite n'est pas dissociée des déchets et se pose alors le problème de son extraction. C'est ce qui a motivé la mise en place du projet Biorare.

Dans le cadre de ce projet, les chercheurs utilisent une technologie de rupture, l'électrosynthèse microbienne, pour découpler le traitement des déchets de la synthèse des molécules d'intérêt. Biorare s'inspire du concept de bioélectrolyseur. Comme dans un électrolyseur, l'anode et la cathode sont le siège de réactions d'oxydoréduction catalysées par des bactéries. À l'anode, la dégradation des déchets organiques génère des électrons qui migrent vers la cathode, compartiment dans lequel s'opère en présence de CO_2 , la synthèse des molécules d'intérêt.



Les déchets organiques représentent près de la moitié des déchets produits par nos sociétés

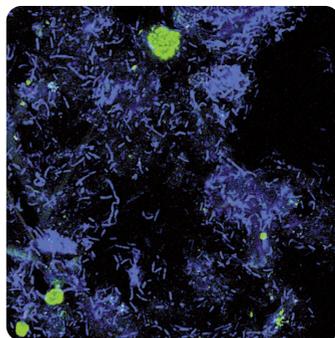
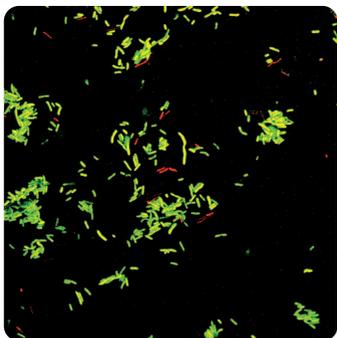
■ Photographies

Vers une ingénierie écologique des écosystèmes microbiens

Pour évaluer la possibilité de mettre en place une ingénierie écologique appliquée aux écosystèmes microbiens de la méthanisation, les scientifiques d'Irstea s'intéressent à la cellulose. De par sa forte représentativité (elle et ses dérivés sont présents dans près de la moitié des ordures ménagères et sont responsables de 80 % du biogaz issu de la digestion anaérobie des déchets), la cellulose permet de simplifier l'étude de la dégradation de la matrice déchets, mais aussi d'activer les différentes étapes de la digestion anaérobie ainsi qu'une importante variété de microorganismes.

Concrètement, les scientifiques appliquent des perturbations, température, apport de biomasse exogène, préadaptation des microorganismes par exemple, appelés leviers environnementaux, à des digesteurs de cellulose qui simulent en laboratoire les digesteurs de déchets industriels.

L'objectif est d'observer les répercussions sur l'écosystème à la fois à l'échelle des microorganismes et sur les performances de dégradation : meilleure dégradation, plus forte production de biogaz, stabilité des digesteurs. Ces recherches permettent de mieux comprendre le fonctionnement de l'activité microbienne de la digestion anaérobie, afin d'évaluer les possibilités d'orienter les étapes de la dégradation des déchets par telle ou telle voie métabolique en vue de son optimisation. Et à terme, d'appliquer les principes de l'ingénierie écologique à des procédés industriels.



Microorganismes marqués par des sondes fluorescentes et observés au microscope confocal à balayage laser ■ Olivier Chapleur



Analyse du cycle de vie de la méthanisation

28-29

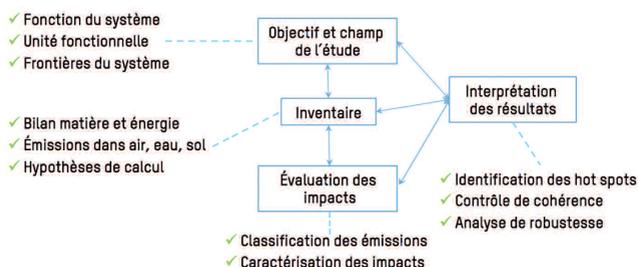
Lynda Aissani

Gérer et valoriser des déchets organiques

Une augmentation de la production de déchets organiques en France et dans les pays les plus développés est observée en raison de l'augmentation des sources de production et de la mise en place de la collecte des déchets organiques. La gestion de ces flux de déchets est un véritable défi en ce qui concerne la limitation des pollutions pouvant être générées par leur traitement, mais aussi et de façon paradoxale en ce qui concerne la valorisation de cette ressource énergétique potentielle et renouvelable.

Évaluer les impacts de la méthanisation

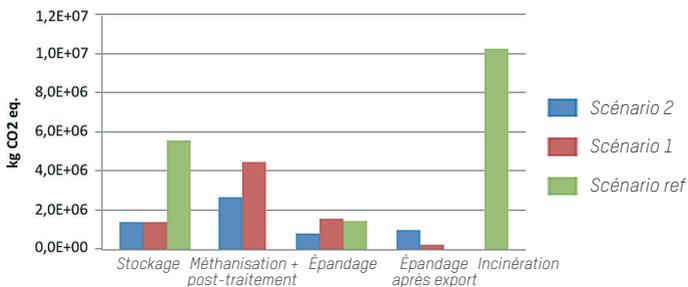
C'est dans ce contexte que la méthanisation présente deux avantages environnementaux certains : la valorisation énergétique du biogaz et la valorisation de la matière du digestat se substituant respectivement à des combustibles fossiles et à l'utilisation d'engrais minéraux (issus de l'industrie pétrochimique). Malgré ces avantages, il apparaît que la pertinence environnementale de cette technologie et de sa mise en œuvre au sein d'un territoire dépend fortement des caractéristiques du territoire dans lequel elle s'inscrit au regard des débouchés possibles et judicieux pour la valorisation de la chaleur et du digestat. Cette pertinence reste difficile à évaluer et doit être examinée au cas par cas, ce qui limite son acceptation sociale. C'est pourquoi une approche objective de ses performances environnementales est nécessaire.



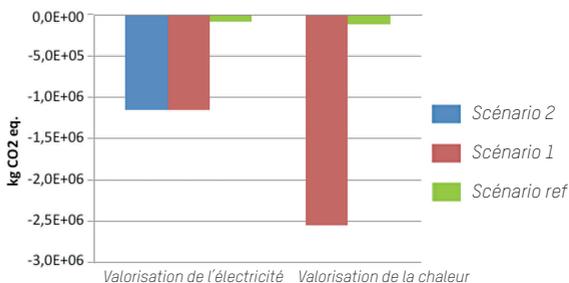
Description de la méthodologie ACV ■ Lynda Aissani



Une Analyse du Cycle de Vie (ACV) est un outil d'évaluation environnementale pour différents impacts tels que l'acidification, l'eutrophisation ou encore le changement climatique, sur l'ensemble du cycle de vie d'un système (du berceau à la tombe). Un tel outil peut être déployé pour évaluer les impacts environnementaux potentiels de l'insertion, au sein d'un territoire, d'une unité de méthanisation collective accompagnée d'un post-traitement pour l'export de digestat hors du territoire. Différents scénarios prospectifs peuvent être élaborés pour le traitement et l'épandage des effluents d'élevage et des déchets d'industries agroalimentaires du territoire en question et sont évalués au regard d'un scénario de référence (pratiques actuelles). La contribution de chacune des étapes de ces scénarios aux différents impacts environnementaux est évaluée. Ainsi, ces éléments de réponse sur les performances environnementales permettent aux décideurs de les mettre en perspective au regard des enjeux multiples d'un territoire (acceptabilité sociétale, mutualisation du traitement et directive Nitrates).



Comparaison de la contribution des étapes du cycle de vie de chacun des trois scénarios pour l'impact « changement climatique » ■ Lynda Aïssani

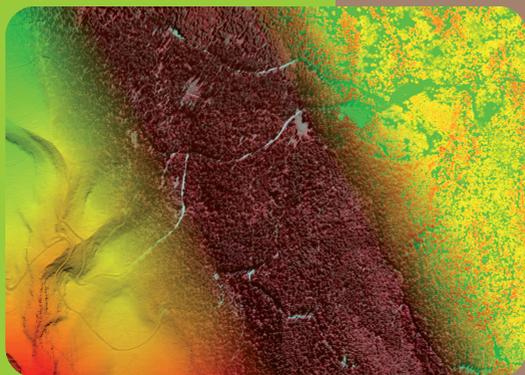


Comparaison des impacts évités sur le « changement climatique » grâce à la valorisation du biogaz en électricité et chaleur de chacun des trois scénarios ■ Lynda Aïssani

2

Utilisation du bois-énergie





Introduction :
le bois-énergie

32-33

Quelle quantité de bois
disponible pour la bioénergie ?

34-35

Cartographie de la biomasse
forestière par télédétection

36-37

Cartographie de l'exploitabilité
des forêts de montagne

38-39

Organisation d'une filière
d'approvisionnement
en bois-énergie en Auvergne

40-41

Cartographie des coupes rases

42-43

Impacts des récoltes de
bois-énergie sur les insectes

44-45

Produire plus de bois tout en
préservant mieux la biodiversité

46-47

Gouvernance du bois-énergie

48-49



Un ancrage forestier fort

L'utilisation du bois-énergie renvoie à l'ensemble de la gestion durable des forêts et des services écosystémiques associés. Elle doit assurer la bonne conservation des écosystèmes par des prélèvements mesurés. Inversement, elle peut être l'occasion d'entretenir et d'améliorer les services fournis par la forêt (production de bois, maintien de la biodiversité, paysager, gestion de l'eau et des risques) par un prélèvement judicieux des tiges.

Une utilisation énergétique appropriée du bois engendre un bon fonctionnement de la filière, qui doit développer son efficacité technique et logistique pour valoriser ses coproduits transformables en énergie, tout en optimisant l'usage global de la ressource bois. Elle doit aussi limiter ses impacts sur l'environnement, depuis la coupe jusqu'à la combustion finale. En matière de bilan carbone, un débat subsiste : faut-il stocker le carbone dans les arbres maintenus sur pied, dans des bâtiments économes en énergie ou l'utiliser à la place des combustibles fossiles ?

Quelle politique pour le bois-énergie ?

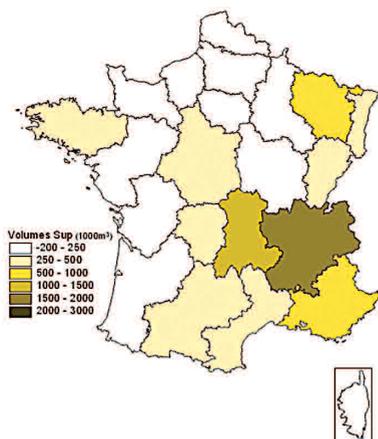
Pendant des siècles, le bois a représenté l'essentiel de l'énergie pour les habitants et les activités locales et il pourrait redevenir une ressource significative dans les zones rurales. La politique du bois-énergie passe donc par les territoires, détenteurs et utilisateurs actuels de la ressource, défenseurs de leur cadre de vie, souvent fédérés autour de projets de chaufferies collectives. Des unités de taille industrielle n'en ont pas moins leur place, tant dans les régions de forte production forestière, qui dépasse les besoins locaux, que dans les zones péri-urbaines, où de grosses unités tirent parti de déchets industriels et ménagers avec les technologies de dépollution adaptées.



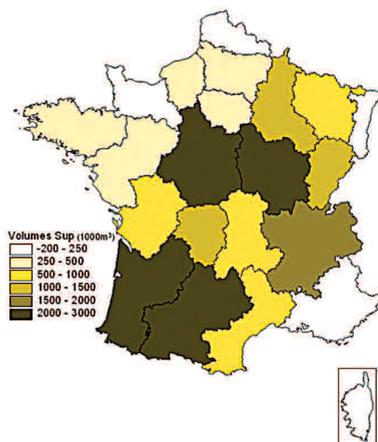
Plaquettes de scierie, Arlanc dans le Puy-de-Dôme ■ Antoine Tabourdeau

Dans le cadre d'une convention avec le Ministère de l'Agriculture, Irstea Nogent-sur-Vernisson mène des études pour évaluer les quantités de bois supplémentaires qui pourraient être mobilisées tout en restant dans le cadre d'une gestion durable des forêts. Ces études utilisent les données de l'Inventaire forestier national, à partir desquelles sont simulées les sylvicultures à l'horizon 2020, et dont sont déduits les volumes de bois mobilisables. Ensuite, les données des statistiques nationales sur l'exploitation forestière pour l'industrie ou pour la consommation de bois de feu par les ménages sont utilisées pour évaluer les volumes supplémentaires physiquement disponibles. Des approches socio-économiques ont complété les études pour prendre en compte le souhait ou non des propriétaires forestiers à exploiter leur forêt, en fonction des conditions du marché (notion d'élasticité du marché).

Nos résultats montrent une disponibilité physique supplémentaire annuelle (i.e. hors décision de coupe des propriétaires) de l'ordre de 14 millions de mètres cubes de bois d'œuvre, et de 28 millions de mètres cubes de bois pour la trituration ou l'énergie, essentiellement avec des essences feuillues. Ces 28 millions de mètres cubes annuels représentent environ 7,3 millions de tonne équivalent pétrole par an.



Volumes de bois de résineux physiquement disponibles pour la bioénergie par an

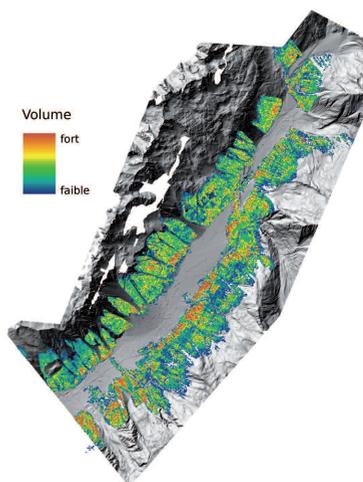


Volumes de bois feuillus physiquement disponibles pour la bioénergie par an



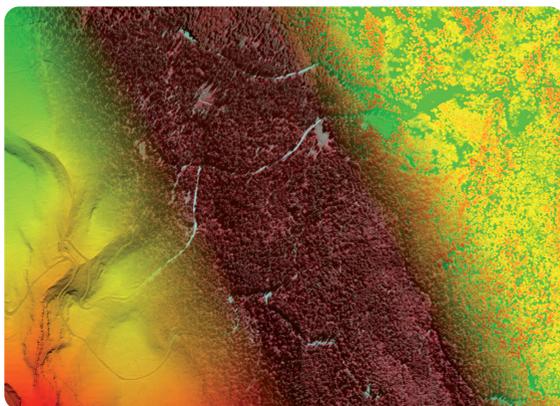
Des méthodes de cartographie de la ressource forestière sont développées pour répondre aux besoins des gestionnaires et des services d'inventaire. Des techniques d'extraction de l'information Lidar sont élaborées à l'échelle de l'arbre (segmentation et caractérisation des houppiers) et du peuplement. En parallèle sont mis au point des protocoles d'inventaire de terrain adaptés à l'analyse et à la qualification des données Lidar, incluant l'acquisition et le traitement de données « laser terrestre ».

Les travaux d'Irstea visent aussi à spécifier les configurations d'acquisition de données par capteur Lidar aéroporté ou satellitaire adaptées aux applications forestières. Il s'agit d'optimiser les paramètres techniques du capteur (longueur d'onde, fréquence d'échantillonnage du signal retour) et les caractéristiques de l'échantillonnage spatial des mesures (taille de l'empreinte, espacement) pour estimer les hauteurs et les biomasses en forêt.



Estimation du volume de bois
en vallée de Chamonix

■ Jean-Matthieu Monnet



Modélisation du terrain,
orthophotographie
et modélisation de la canopée

■ Jean-Matthieu Monnet

Pour en savoir plus

Projet de recherche FORESEE
sur la caractérisation
de la disponibilité
de la biomasse forestière

www.fcba.fr/foresee



Cartographie de l'exploitabilité des forêts de montagne

Jean-Matthieu Monnet
Sylvain Dupire

En forêt, l'exploitation des bois est conditionnée par la desserte forestière, mais aussi par les contraintes liées au sol et à la topographie. En zone de montagne, la pente et la densité de la voirie sont ainsi les principaux facteurs limitant l'exploitation des forêts.

Les arbres, une fois coupés, doivent être sortis de la forêt pour ensuite être acheminés vers les entreprises de transformation : c'est la mobilisation des bois, dont la première étape est le débardage (transport depuis le lieu de coupe vers la route la plus proche). Il peut se faire par voie terrestre (principalement tracteur forestier dans les montagnes françaises) ou aérienne (techniques par câble).

De nouveaux enjeux

Les objectifs de mobilisation accrue de la ressource ligneuse supposent d'une part une meilleure connaissance de la localisation de la biomasse forestière, mais également la caractérisation des conditions de mobilisation. Car, avant toute exploitation, il faut savoir si les zones forestières ayant un intérêt de production sont desservies et débardables par le tracteur forestier ou si d'autres techniques de débardage sont envisageables. Il est donc primordial de posséder une cartographie des zones forestières, de la desserte et de l'exploitabilité des bois.



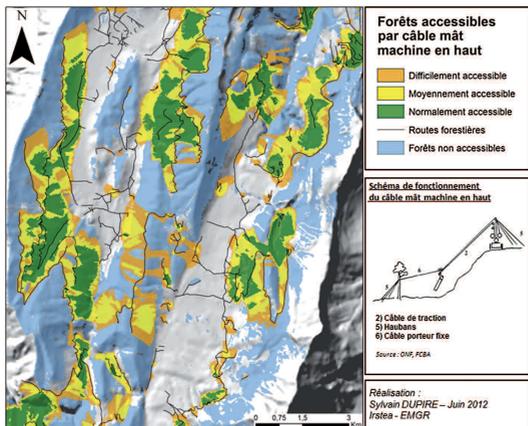
Débardage par câble ■ Nicolas Clouet



Les chercheurs travaillent sur la mise au point d'outils basés sur les Systèmes d'information géographique (SIG). Le modèle CARTUVI a été mis au point en collaboration avec l'Office national des forêts. Il permet, à partir des données sur la desserte forestière et du modèle numérique de terrain, de localiser les surfaces accessibles par le tracteur forestier et de recenser tous les points de blocage nécessitant une intervention sur la desserte forestière, ou le recours à d'autres techniques de débardage.

Un outil similaire est aujourd'hui en développement pour les techniques par câble. L'étude de ce mode de débardage nécessite cependant l'utilisation de données d'entrées plus fines, notamment en ce qui concerne le modèle numérique de terrain comme par exemple l'utilisation de données LIDAR. Le modèle permet d'isoler à grande échelle les zones théoriquement exploitables par câble et d'évaluer les principaux paramètres influençant le coût d'exploitation (nombre de supports intermédiaires, volume prélevé par ligne, longueur de la ligne, sens de débardage, etc). Un modèle pour une utilisation à l'échelle du chantier forestier est en cours de validation avec pour principal objectif l'optimisation de l'implantation des lignes de câble en un point donné.

En croisant la cartographie de l'exploitabilité avec celle de la quantité de biomasse, obtenue par exemple par des méthodes de télédétection, on peut au final caractériser précisément la disponibilité réelle en biomasse ligneuse et son coût d'extraction, que ce soit au niveau du chantier d'exploitation ou du massif forestier.



Cartographie de l'exploitabilité par câble ■ Sylvain Dupire

Pour en savoir plus

Projet de recherche NEWFOR sur l'amélioration de la valorisation de la ressource forestière en montagne

www.newfor.fr

Organisation d'une filière d'approvisionnement en bois-énergie en Auvergne

Laurence Amblard

Marie Taverner

Fabien Guerra

Quelle organisation de l'approvisionnement en bois-énergie ?

Le bois-énergie constitue une opportunité économique pour les acteurs du territoire, se traduisant par le développement de nouvelles activités. Par ailleurs, le recours au bois-énergie implique pour les usagers des installations de chauffage, un approvisionnement qui soit durablement performant. Or, cette performance dépend de la coordination entre les différents acteurs impliqués dans l'offre de combustible.

Quels sont les opérateurs participant à cette filière en émergence et quelle est la logique de leur activité ? Quelles sont les contraintes pesant sur la coordination entre ces acteurs ? Une analyse fine de l'organisation de l'approvisionnement en bois-énergie est nécessaire pour répondre à ces questions.



Chaufferie au bois-énergie

■ Pauline Merz

Silo ■ Marie Taverner



Caractérisation des types de chaînes d'approvisionnement

Une typologie des chaînes d'approvisionnement en bois-énergie a été réalisée sur le territoire auvergnat. Elle est définie par le croisement entre :

- le type d'utilisateur (particulier, collectivité, entreprise),
- la nature du combustible (granulés, bois déchiqueté),
- le type d'opérateurs (coopérative forestière, entrepreneur de travaux agricoles ou forestiers, scierie, négociant en bois, usine de granulation...),
- le type d'approvisionnement (fournisseur unique ou groupement, fournisseurs indépendants, filière intégrée).

Ces critères peuvent être appliqués à d'autres contextes régionaux.

Organisation de l'approvisionnement : acteurs et coordination

On peut identifier trois logiques quant à l'activité bois-énergie :

- nouveau débouché d'un produit ou d'un service dans l'entreprise,
- nouveau produit ou service, adossé néanmoins aux activités, savoir-faire et ressources préexistantes,
- activité spécialisée de nouvelles entreprises.

Les coûts associés aux transactions (coûts de recherche, négociation et contrôle) au sein des chaînes d'approvisionnement apparaissent élevés, au niveau de l'achat-vente de bois à destination énergétique et de l'approvisionnement en combustible des particuliers. De ce fait, les transactions entre les opérateurs s'établissent souvent dans le cadre de réseaux relationnels préexistants, qui ne peuvent cependant pas soutenir un développement important de la filière. Le renforcement des politiques d'information et la mise en œuvre de mesures incitant les propriétaires forestiers privés à se regrouper pourraient concourir à la diminution de la fragmentation de l'offre forestière. Le développement d'un système de certification réduirait les coûts de contrôle de la qualité du combustible, supportés par les consommateurs.



Scierie ■ Pauline Merz

Cartographie des coupes rases



Michel Deshayes

Kenji Ose

Annie Desbrosse¹

Audrey Jolivot¹

Nicolas Stach²

► Aide à la gestion de la forêt française

La forêt française couvre aujourd'hui environ 15 millions d'hectares et elle s'accroît d'environ 40 000 ha par an. Elle apporte de nombreux bénéfices à la société française : production de bois, protection des sols, lieux de biodiversité, stockage de carbone...

Suite au Grenelle de l'environnement, qui a conçu la formule « produire plus tout en préservant mieux », il apparaît qu'une meilleure connaissance de la ressource forestière et de sa mobilisation devient prioritaire.

L'UMR Tetis a développé, depuis le début des années 90, des méthodes de suivi de la forêt à partir de l'imagerie satellitaire (suivi des coupes, inventaire des dégâts de tempête, cartographie des défoliations...) et met en œuvre avec ses partenaires le projet GEOSUD, qui vise à développer l'utilisation de l'imagerie satellitaire en mettant à disposition des acteurs publics, chaque année jusqu'en 2015, une couverture satellitaire annuelle haute résolution du territoire national.

Pour en savoir plus

<http://geosud.teledetection.fr/>

¹ CIRAD, UMR Tetis, Maison de la Télédétection, Montpellier

² Pôle biomasse et énergies renouvelables, SERFOB, DREAL Rhône-Alpes, Lyon

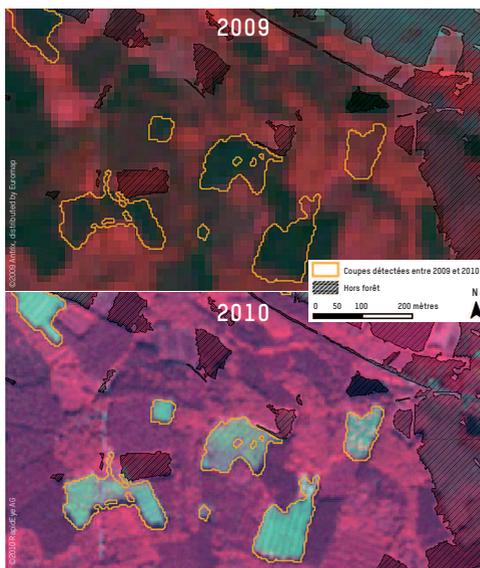


Dans ce contexte, les chercheurs réalisent une étude visant à développer une méthode simple de cartographie annuelle des coupes rases. Cette étude est menée pour le compte des deux DREAL (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement) de Rhône-Alpes et de Bourgogne et comprend la mise en œuvre de la méthode sur deux sous-régions :

- Beaujolais en Rhône-Alpes (suivi des défrichements),
- Morvan et Autunois en Bourgogne (utilisation des informations sur les surfaces de coupe pour préciser le niveau de mobilisation de la ressource dans le modèle régional de connaissance de la ressource forestière).

L'étude couvre la période 2006 – 2011, et utilise les couvertures satellitaires GEOSUD 2010 et 2011 et les couvertures satellitaires 2006 et 2009 de la Commission et de l'Agence spatiale européennes.

Elle est basée sur la détection des changements entre deux couvertures satellitaires prises à une ou plusieurs années d'intervalle. Elle doit prendre en compte l'hétérogénéité des capteurs satellitaires (SPOT, IRS, RapidEye) et les différences de transparence atmosphérique entre les deux images utilisées. La détection des changements comporte ainsi deux étapes : une quantification des changements radiométriques, suivie d'une classification de ceux-ci afin d'identifier les changements radiométriques thématiquement intéressants, en l'occurrence les coupes rases.



Carte des coupes rases entre 2009 et 2010 sur la zone-test du Beaujolais. L'extrait présente une zone forestière mixte avec feuillus (en rouge vif), résineux (en noir) et peuplements mixtes (en teinte intermédiaire)

Le contour des coupes détectées est affichée sur les 2 images satellitaires :

- en haut image IRS-LISS3 (résolution 23,5m)
- en bas image RapidEye (résolution 5m)

Les chercheurs d'Irstea ont montré que les petits bois morts au sol, traditionnellement laissés sur les coupes comme rémanents d'exploitation, hébergent des espèces spécifiques, absentes des pièces de bois plus grosses. Par ailleurs, davantage d'espèces rares vivent dans les petits bois morts de feuillus (chêne et charme, plutôt que hêtre) que de résineux (épicéa, pin).

Enfin, les préconisations de récolte différée des rémanents d'exploitation, après la chute des feuilles et la restitution locale d'éléments minéraux essentiels pour la fertilité du sol, ont des effets délétères sur la biodiversité : effet « piège » des xylophages pionniers exportés avec les rémanents, absence de rémanents décomposés et donc des espèces sapro-xylophages caractéristiques associées.



Tas de bûches et de rémanents d'exploitation. Exemples de coléoptère xylophage et de champignon saprolygnicole se développant aux dépens de ce substrat d'origine anthropique ■ Christophe Bouget



Échantillonnage des insectes saproxyliques émergeant des souches au moyen d'une nasse d'émergence dédiée ■ Christophe Bouget



Échantillonnage des insectes circulant autour des tas de rémanents d'exploitation dans un parterre de coupe de taillis en chênaie, au moyen de piège d'interception à vitre. Les insectes collectés sont majoritairement des espèces émergeant du substrat ou le colonisant ■ Christophe Bouget

Un groupe de 21 chercheurs de différents instituts, dont 7 chercheurs Irstea, a participé à une expertise collective en 2007, coordonnée par le GIP Ecofor. Leur but : apporter un éclairage scientifique quant aux effets d'une augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière sur la biodiversité et les ressources naturelles (sols, eaux), en France métropolitaine. En 2009, les résultats ont principalement montré les impacts négatifs avérés ou potentiels à prendre en compte et qu'il faut annuler ou atténuer par des préconisations, comme réfléchir à une intensification de la gestion qui serait moindre dans les zones à enjeu de biodiversité forestière fort, comme les forêts anciennes. Elle insiste également sur la nécessité de concevoir et de mettre en place un suivi des impacts écologiques et économiques des politiques publiques dans une optique de gestion adaptative pour concilier des enjeux forestiers actuels qui peuvent se trouver en contradiction les uns avec les autres : production de bois, énergie renouvelable, matériau de construction, ou matière première de l'industrie papetière, stockage de carbone et régulation du cycle de l'eau, réservoir de biodiversité, patrimoine et lieu de loisirs.



Taillis vieilli de tilleul-bouleau en forêt domaniale de Crécy (Seine-et-Marne) ■ Frédéric Gosselin



Bois mort - Réserve Biologique Intégrale à Fontainebleau ■ Frédéric Gosselin



Gouvernance du bois-énergie

*Christophe Chauvin
Antoine Tabourdeau*

En direct d'Irstea *Centre de Grenoble*

Deux approches à concilier

Schématiquement, deux modes de développement de la filière bois-énergie coexistent.

Le premier est directement hérité du processus qui s'est imposé en France depuis l'après-guerre pour assurer l'essor des énergies classiques : un modèle centralisé, articulé sur quelques grands groupes misant sur les économies d'échelle tirées de la grande taille des installations. Ce modèle, malgré certains avantages, peine à intégrer la gestion de l'incertitude pesant sur l'approvisionnement.

Résolument décentralisé, le second modèle mise sur des unités de petite et moyenne taille. Il s'appuie sur la proximité géographique pour favoriser la minimisation des coûts de transport et les dynamiques sociales locales susceptibles de faciliter la gestion de l'approvisionnement et l'ajustement entre les ressources localisées et l'évolution de la consommation énergétique qu'il cherche à infléchir. Ce modèle, qui pour l'instant prévaut dans la structuration de la filière bois-énergie, en dépit de ses atouts notamment celui d'une plus forte flexibilité, pose le problème du manque d'économie d'échelle, du financement des investissements et de la coordination entre les multiples projets.

Pour l'instant, les avantages et les inconvénients de chacun de ces modes de développement méritent d'être documentés de manière plus précise par des recherches pluridisciplinaires qui doivent également s'interroger sur la possibilité de leur coexistence et sur ses conditions.



Trois contraintes à satisfaire

De manière générale, le développement du bois-énergie dépend de l'ensemble du système formé par la forêt, la filière-bois, et les territoires. Il nécessite un équilibrage à réajuster en permanence entre trois contraintes :

- Responsabilité des forestiers, la gestion durable de la ressource naturelle, limitée et fragile, passe par une bonne connaissance des volumes sur pied et de leur accroissement. Elle doit s'appuyer à l'avenir sur des cartographies affinées des peuplements et de leurs conditions d'accès.
- L'efficacité économique et énergétique, qui passe par la bonne organisation des chaînes d'approvisionnement et la taille des unités de combustion, est l'affaire des acteurs de la filière-bois et de l'énergie. Elle amène dès à présent le développement de moyens de traçabilité pour des analyses détaillées de cycle de vie, sous l'angle énergétique, économique et environnemental.
- L'utilité sociale de l'ensemble, en termes de services écosystémiques et d'emploi, est enfin le souci des responsables politiques. Elle relève de décisions collectives, du niveau local (paysages, pollutions locales, protection des sols), au niveau global (gestion du carbone, emploi à toutes échelles). Rappelons que selon l'ADEME, en 2006, la filière bois-énergie représentait 59 400 emplois (production de biocombustibles, stockage en plates-formes, fabrication, installation d'équipement et distribution).



Grumier déversant des plaquettes, Livradois-Forez
■ Florian Le Meur



Rémanents en forêt du Livradois-Forez
■ Antoine Tabourdeau

Vers une gestion concertée

Au carrefour de ces différentes approches et contraintes, l'élaboration concertée de plans d'approvisionnement réalistes est un gage de rentabilité et de coexistence entre les différents circuits et procédés de valorisation énergétique de la biomasse forestière. Cette coordination sur les flux de bois-énergie nécessite en amont d'améliorer celle de la gestion forestière à l'échelle des territoires.

3

Énergie : économies et impacts





Introduction :
énergie, économies
et impacts 52-53

Optimisation énergétique
des engins agricoles 54-55

Irrigation
et économie d'énergie 56-57

Des économies
grâce au stockage d'énergie 58-59

La brumisation appliquée
aux équipements frigorifiques 60-61

La haute inertie thermique
appliquée aux réfrigérateurs
domestiques 62-63

Ouvrages et comportement
de dévalaison de l'anguille 64-65

Gestion hydraulique
des retenues et dynamique
des populations de poissons 66-67

Réduire l'empreinte
environnementale au travail 68-69



Introduction : énergie, économies et impacts

Lucinda Aïssani
Nicole Sardat

La meilleure énergie est celle qu'on ne consomme pas !

► Efficacité énergétique des agroéquipements

Pour nourrir les 9 milliards d'habitants attendus en 2050, l'augmentation de la productivité agricole est une nécessité, mais cela passe inévitablement par une croissance des besoins en énergie. Pour plus de sobriété, les recherches Irstea se focalisent sur l'efficacité énergétique des agroéquipements et des systèmes d'irrigation. Des données terrain servent à étudier différentes stratégies d'optimisation de ces machines en termes de performance énergétique et de rendement de chantier.



Canon enrouleur ■ Jacques Granier

► Limiter l'impact des équipements frigorifiques

Le froid englobe près de 10 % de la consommation électrique en France. Pour limiter son impact sur l'effet de serre et sur l'environnement, les scientifiques d'Irstea conçoivent et développent des procédés et des équipements frigorifiques innovants, performants. Cela passe par des recherches sur la maîtrise des écoulements, des transferts dans les équipements frigorifiques et vers l'efficacité énergétique des systèmes de production du froid pour réduire à terme l'empreinte écologique de ces équipements.

▶ Limiter les impacts de la production d'énergies renouvelables

Devant la triple conjoncture de réchauffement climatique, d'épuisement des hydrocarbures, et d'une demande croissante en énergie, un changement de système énergétique des sociétés s'impose. Les énergies renouvelables deviennent une priorité majeure pour enclencher cette transition énergétique. Paradoxalement, elles peuvent aussi avoir des répercussions environnementales négatives.

L'hydroélectricité représente la 3^{ème} source d'électricité en Europe. Cette énergie renouvelable n'émet que peu de gaz à effet de serre. Elle présente toutefois des inconvénients environnementaux en modifiant par exemple les écosystèmes aquatiques. Les retenues artificielles soumises à des variations du niveau d'eau exercent de fortes contraintes sur les poissons et leurs habitats. Quant aux barrages, ils représentent de réels obstacles à libre circulation des espèces jusqu'à engendrer une forte mortalité lors des passages dans les turbines. Les recherches menées à Irstea apportent des connaissances sur le comportement de la faune face à ces impacts pour envisager une adaptation des modes d'exploitation.

▶ Réduire notre empreinte environnementale

Chacun se doit de limiter son bilan carbone et particulièrement, dans un institut œuvrant pour l'environnement. Un diagnostic de nos impacts et des actions concrètes pour les limiter sont en cours d'expérimentation.



Optimisation énergétique des engins agricoles

Stéphanie Lacour

Maîtriser la consommation

Une part importante des dépenses directes d'énergie pour produire des denrées alimentaires vient notamment des carburants utilisés par les engins agricoles et de transport. La maîtrise de la consommation de carburant est un enjeu financier et environnemental important tant pour les exploitants que pour les équipementiers. Choix de motorisation, automatisation de la conduite, stockage et déstockage d'énergie à bord, carburant utilisé, nombreuses sont les options technologiques proposées pour accroître l'efficacité des machines et réduire leur consommation d'énergie fossile.

Évaluer l'efficacité des composants

Chaque point de rendement gagné sur les agroéquipements correspond à une énergie équivalente à tout le biogaz produit dans les exploitations françaises. L'optimisation énergétique de ces engins passe par la conception et l'utilisation de composants économes. Ces derniers permettent de réaliser des économies qui sont souvent diffuses, dispersées dans le temps et étroitement liées aux conditions d'utilisation de la machine. Évaluer l'efficacité réelle de ces composants nécessite de mesurer des variations parfois faibles dans le fonctionnement de l'équipement et de retranscrire ces gains dans l'utilisation globale de la machine.

*Tracteur équipé
d'un dispositif d'enregistrement
des paramètres thermiques*
■ Christophe Burgun

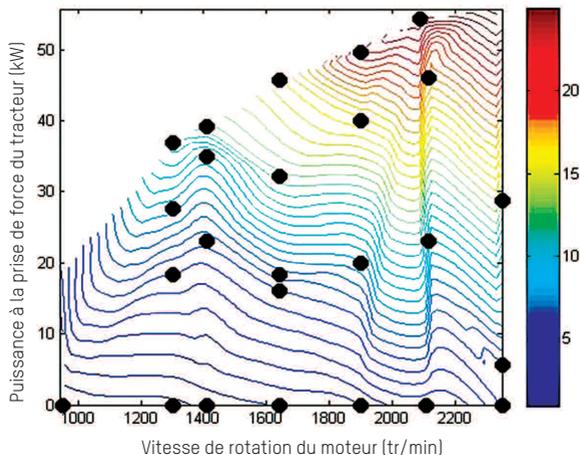


Les scientifiques d'Irstea ont étudié les relations entre consommation de carburant de la machine et rendement de chantier. Résultat ? Une augmentation de puissance n'entraîne pas nécessairement une augmentation de la consommation ou du rendement.

Pour avancer sur l'optimisation énergétique, Irstea a conçu un dispositif d'observation et d'enregistrement permettant de réaliser le bilan énergétique d'un tracteur en fonctionnement réel. Mesurant l'énergie mécanique délivrée et les énergies dissipées dans différents circuits fluides, il permet l'étude de la consommation d'énergie et des rendements, en fonction du type de machine, de la surface de la parcelle, de la nature du travail à effectuer...

Ce tracteur instrumenté permet actuellement aux chercheurs Irstea d'identifier les périodes et les travaux pour lesquels les caractéristiques d'un lubrifiant seront déterminantes sur les pertes d'énergie par friction.

Acquérir des connaissances sur les conditions thermiques, notamment dans le circuit des gaz d'échappement, c'est avancer sur l'élaboration de solutions pour transformer ces pertes de chaleur à travers un système de conversion secondaire. Pour développer des solutions de tracteurs hybrides, l'un des points clés réside en la capacité à mettre au point des échangeurs plus efficaces et pourquoi pas, proactifs.



Énergie mécanique maximale (kW) récupérable dans l'échappement d'un moteur de tracteur en fonction des conditions de fonctionnement ■ Stéphanie Lacour

Irrigation et économies d'énergie

Jacques Granier
Jean-Marc Deumier¹

Une agriculture grande consommatrice d'énergie

Répondant à un besoin mondial croissant, l'augmentation de la productivité agricole est devenue une nécessité. Les techniques de cultures ont évolué en conséquence, et l'agriculture est devenue grosse consommatrice d'énergie. Dans la conjoncture actuelle, la question se pose de limiter, voire de réduire ces consommations : l'accroissement des coûts de l'énergie inquiète les agriculteurs et dans un contexte de promotion d'un développement durable, c'est la raréfaction de la ressource qui impose la recherche de solutions pour maintenir une production agricole intensive en consommant moins d'énergie.

Sur les exploitations irriguées, les postes les plus consommateurs d'énergie sont ceux consacrés à l'irrigation.

Vers une irrigation respectueuse de la durabilité

L'amélioration de la performance énergétique en irrigation est un enjeu majeur. Des marges de progrès significatives sont possibles, à condition de sensibiliser les irrigants à différents niveaux :

- le choix du matériel et la conception des installations : les consommations d'énergie primaire peuvent varier entre 0,4 kWh et 2 kWh pour chaque mètre cube d'eau apporté en fonction des systèmes ;
- la conduite de l'irrigation : des apports d'eau mal raisonnés induisent une productivité de l'eau médiocre, et par là-même une mauvaise productivité de l'énergie consommée ;
- l'efficacité hydraulique : les fuites dans le système d'irrigation, l'évaporation directe ou la dérive liée au vent constituent non seulement des pertes d'eau, mais aussi des pertes d'énergie.



La pression au canon est de 5 à 6 bars pour les plus gros modèles ■ Laurent Huet

En 2012, des chercheurs d'Irstea ont initié, aux côtés d'Arvalis et des chambres d'agriculture de la Haute-Garonne et du Lot-et-Garonne, un projet de recherche dont l'objectif est de mettre en place et de fiabiliser des systèmes pour collecter et analyser les consommations énergétiques d'exploitations agricoles. Il s'agit également de sensibiliser les agriculteurs par rapport à l'énergie que consomme leur système d'irrigation et de mettre au point des outils de suivi en temps réel du bilan énergétique de leurs installations en fonction de l'utilisation qui en est faite. À terme, cette étude permettra de suggérer des améliorations technologiques afin d'obtenir une efficacité énergétique maximale.

Une autre voie consiste à promouvoir des opérations de diagnostic énergétique sur les systèmes existants. Une méthode de diagnostic simple et rapide a été proposée par nos chercheurs afin d'identifier les points faibles en matière d'efficacité énergétique en irrigation.

Enfin, les approches d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) utilisées par nos équipes intègrent le coût énergétique lié à la fabrication et à la mise en place des systèmes d'irrigation. Cette approche permet de relativiser l'avantage de certains systèmes dits « à basse consommation d'énergie » : par exemple, l'avantage énergétique de la microirrigation est bien réel si l'on s'intéresse au coût de fonctionnement, mais il faut le nuancer en tenant compte du coût énergétique lié à l'équipement.



Le système de traction d'un canon enrouleur a un rendement énergétique très faible (2 % à 6 %)
■ Laurent Huet



L'irrigation par pivot, quand elle est possible, permet de concilier qualité de l'apport d'eau et performance énergétique ■ Jacques Granier

➤ Nous menons un ensemble de travaux sur le stockage du froid et l'inertie thermique (capacité d'un matériau à accumuler, puis à restituer un flux thermique) en vue d'augmenter l'efficacité énergétique des procédés. Ces études demandent de s'intéresser aux Matériaux à Changement de Phase (PCM), pour coupler les phénomènes de changement d'état au fonctionnement de la machine frigorifique. Un prototype de réfrigérateur à haute inertie thermique a été développé. Cette technologie a permis une réduction de la consommation d'énergie de 25 %. Nous avons également réalisé des études industrielles pour des PME, des centres techniques (Cetim) et préparé des programmes de recherches avec de grands groupes comme EDF ou au niveau européen.

➤ Le partenariat avec une autre équipe d'Irstea, qui s'intéresse au transfert de froid autour et dans les produits, est une complémentarité valorisante auprès des acteurs socio-économiques. L'équipe se positionne ainsi comme intégrateur des systèmes frigorifiques, ce qui représente une position unique en France.

Réfrigérateur domestique
■ Laurent Guyonneau



Les travaux menés sur la brumisation des condenseurs ont montré l'intérêt énergétique du procédé : une injection contrôlée de gouttelettes d'eau en amont du condenseur permet d'abaisser la température de l'air. Cela a pour conséquence d'intensifier les échanges thermiques locaux : le fluide frigorigène cède sa chaleur à l'air ambiant plus facilement. Des travaux de thèses ont été menés pour définir quels paramètres de brumisation (taille des gouttelettes, débit d'eau, sens d'injection, etc.) utiliser en fonction des conditions climatiques. Grâce à ces travaux, les solutions permettant le meilleur refroidissement ont pu être couplées au fonctionnement de la machine frigorifique. Les résultats montrent une efficacité accrue de 50 % dans les meilleures conditions.

Les recherches à venir

Plus les gouttes sont petites, meilleur est le refroidissement et plus l'énergie nécessaire à leur dispersion est importante. Les travaux de recherches à venir cherchent à déterminer un compromis entre la taille des gouttes d'eau et leur impact sur la consommation énergétique du système.

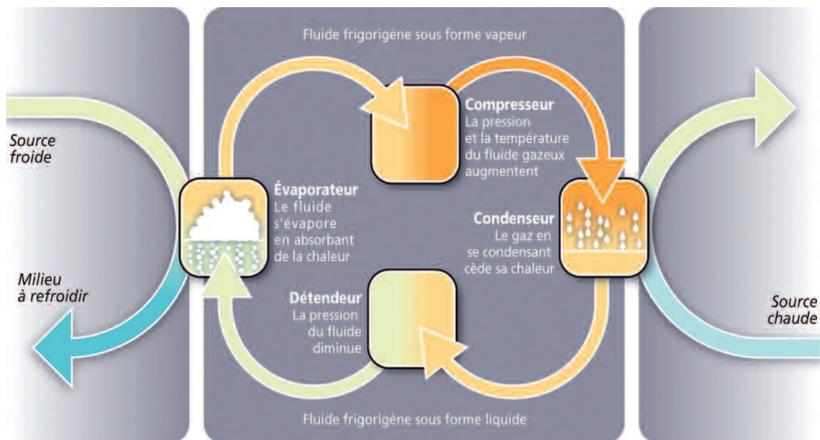
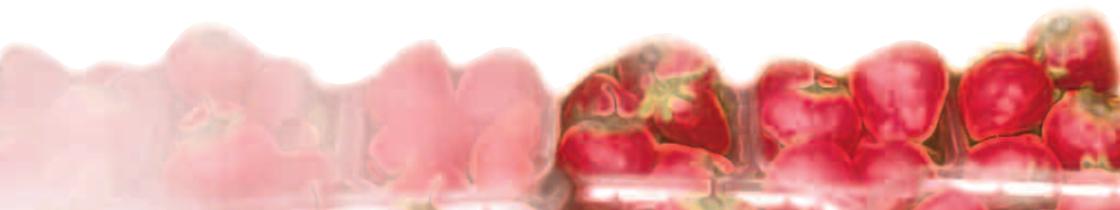


Schéma du phénomène de brumisation ■ Graphies



Les spécialistes du génie frigorifique d'Irstea travaillent sur un réfrigérateur-congélateur à haute inertie thermique. Il s'agit d'un appareil capable de maintenir sa température constante avec des cycles de fonctionnement beaucoup plus longs que les réfrigérateurs classiques. Cela est rendu possible grâce à l'utilisation des matériaux à changement de phase (PCM). Comme on utilise un glaçon qui va refroidir une boisson en passant de la phase solide à la phase liquide, ce réfrigérateur utiliserait l'énergie du changement d'état du PCM pour accumuler ou libérer du froid.

Équipé de 10 litres de ce matériau incorporé dans ses parois, un réfrigérateur domestique peut accumuler suffisamment d'énergie pour maintenir sa température constante pendant plus de 14 heures sans redémarrage du groupe froid. Dès lors, il est possible de privilégier certaines heures de fonctionnement et ainsi de réaliser des économies en bénéficiant des tarifs plus avantageux. Par ailleurs, en cas de coupure de courant électrique, l'appareil bénéficie d'une autonomie de plusieurs heures de fonctionnement.

À Irstea, les premières simulations ont montré qu'il était possible d'atteindre une réduction de consommation d'énergie de 25 % par rapport aux réfrigérateurs classiques. Un avantage du procédé concerne la mise en place du matériau PCM qui nécessite très peu de modification des appareils classiques.



Prototypé réfrigérateur haute inertie ■ Madeleine Carrouée

Ouvrage et comportement de dévalaison de l'anguille

Hilaire Drouineau
Frédérique Bau
Philippe Baran¹

Une situation critique

En France comme en Europe, l'anguille européenne (*Anguilla anguilla* L.) est une espèce menacée. De nombreux facteurs (pêche, pollutions, barrages, etc.) sont à l'origine de cette situation. Afin de réduire significativement les pressions exercées sur l'espèce, il est essentiel d'intervenir sur les obstacles à sa libre circulation. En effet, ils constituent l'un des principaux facteurs limitant son aire de répartition dans les eaux douces, tant au niveau des blocages à la montaison des jeunes stades (civelles), qu'aux dommages lors de la dévalaison des géniteurs (mortalités suite au passage dans les turbines de centrales hydroélectriques).

De nouveaux enjeux

Les ministères concernés ont instauré un plan de gestion national pour la reconstitution des stocks d'anguilles. Ce plan a été élaboré avec l'aide d'un comité national constitué de plusieurs groupes de travail thématiques, dont un groupe « Ouvrages ». Ce dernier a initié un programme de Recherche & Développement ayant pour objectif la mise en œuvre d'actions destinées à améliorer le franchissement des ouvrages par l'anguille, en particulier durant la migration de dévalaison des géniteurs.



Biométrie d'une anguille argentée avant implantation d'un émetteur radio dans sa cavité abdominale ■ Pôle Écohydraulique

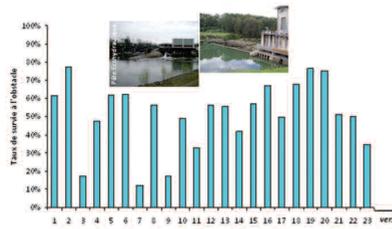
¹Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

Le pôle Écohydraulique (ONEMA/Irstea/IMFT), en collaboration avec EDF R&D, a engagé des études, visant notamment à estimer l'impact des aménagements hydroélectriques à la dévalaison.

Celles-ci sont réalisées sur plusieurs années et consistent à suivre les déplacements d'anguilles argentées, équipées d'émetteurs radio miniaturisés et de transpondeurs RFID¹, en phase de dévalaison. Grâce à des réseaux denses de récepteurs et d'antennes placés sur des axes de rivière à proximité d'ouvrages de configurations différentes, il est possible :

- d'identifier des voies de franchissement ;
- de définir très précisément les comportements d'approche aux obstacles ;
- de caractériser l'effet des paramètres du milieu (en particulier celui du débit fluvial) sur le déterminisme de la dévalaison et les modalités de franchissement des obstacles ;
- de construire un outil opérationnel d'estimation des taux de mortalité pour chaque ouvrage étudié.

En parallèle, d'autres opérations ont été engagées pour minimiser les effets des ouvrages hydroélectriques, notamment le développement de dispositifs visant à réduire le passage dans les turbines, ou encore l'évaluation de nouveaux types de turbines (turbines ichtyophiles).



Exemple d'évaluation des taux de survie aux obstacles sur un axe de rivière : le Gave de Pau
■ Pôle Écohydraulique



Un exemple de prise d'eau équipée d'un plan de grilles à faible espacement libre entre barreaux : l'ouvrage de Chamberlane testé sur la Dronne
■ Pôle Écohydraulique

¹ Étiquette contenant de l'information inscrite sur un circuit intégré. Un lecteur envoie un signal radio via une antenne, qui active le transpondeur. À son tour, le transpondeur renvoie un signal contenant son information

Gestion hydraulique des retenues et dynamique des populations de poissons

Christine Argillier
Romain Roy

Une forte contrainte hydrologique

En France, plus de 80 % des masses d'eau de type lacustre de plus de 50 ha sont des retenues artificielles construites pour un usage principal (hydroélectricité et/ou irrigation en particulier). De ce fait, elles sont soumises à des variations de niveaux d'eau. Ces marnages constituent une contrainte hydrologique forte pour la plupart des organismes aquatiques. Les retenues artificielles sont généralement aussi le siège d'autres activités (loisir, pêche, nautisme...) qui se traduisent par d'autres pressions directes ou indirectes sur les communautés biologiques.

Atteindre le bon potentiel¹

Parallèlement, la Directive Cadre européenne sur l'Eau conduit les états membres à une politique ambitieuse en termes de définition d'objectifs environnementaux. Sur les retenues, il s'agit d'atteindre le bon potentiel dès 2015, sans remettre en cause la satisfaction des usages principaux. La prise en considération de ces objectifs environnementaux et socio-économiques liés à des usages multiples se traduit par un besoin flagrant de connaissances sur l'impact de la gestion hydraulique sur les communautés biologiques. Cela représente un préalable indispensable à la réalisation des diagnostics écologiques et à la définition des mesures de restauration destinées à l'atteinte du bon potentiel.

¹ Le bon potentiel écologique d'une masse d'eau artificielle correspond au bon état de la masse d'eau naturelle de laquelle elle se rapproche le plus



Fin 2010, Irstea Aix-en-Provence en partenariat avec EDF R&D ont lancé une thèse concernant l'étude de l'impact de la gestion hydraulique sur les populations de poissons.

La première étape de cette étude a permis de mesurer l'impact des modes de gestion hydraulique sur le cadre physique, la disponibilité, la qualité et la diversité des habitats décrits par des variables hydrologiques, physico-chimiques et morphologiques.

La seconde étape a pour objectif de mesurer les conséquences des modifications de ce cadre physique sur l'accomplissement de fonctions vitales. Cette expérimentation repose sur la réalisation d'inventaires piscicoles dans les différents habitats et le suivi en continu de poissons équipés d'émetteurs acoustiques. Les préférences d'habitat des différentes espèces, la variabilité temporelle de ces préférences et le comportement des poissons face aux variations de niveaux d'eau seront étudiés.

Ces données seront ensuite confrontées à la cartographie des habitats disponibles pour inférer des hypothèses quant aux facteurs de régulation des populations ou peuplements en place.

La dernière étape du projet consistera à mobiliser l'ensemble de ces connaissances dans des modèles prédictifs de dynamique de populations permettant de simuler les conséquences de différents scénarii de gestion hydraulique des retenues.



*Retenue des Bariousses en 2011
en période estivale*

■ Romain Roy



*Retenue des Bariousses en 2011
en période hivernale*

■ Romain Roy

Réduire l'empreinte environnementale au travail



Maryse Berlandis

André Evette

Maud Grandhaye

En direct d'Irstea *Centre de Grenoble*

En 2008 s'est tenu à Grenoble un séminaire interne sur le changement climatique. À l'issue de ce colloque, partant du constat que nous devons aussi traiter de l'impact de nos habitudes de travail sur le changement climatique, un chercheur a monté un groupe, composé d'une quinzaine de volontaires, œuvrant à la diminution de l'empreinte environnementale du Centre. Le principe est de s'inspirer de la démarche qualité dans un objectif d'amélioration continue.

Il s'agit de réaliser un diagnostic de nos impacts, de fixer un programme d'actions concrètes, avec des priorités et des indicateurs de suivi. Le projet vise une approche globale et prend en compte l'ensemble des impacts du centre, qu'il s'agisse des déplacements (professionnels, domicile travail), des bâtiments, du papier, du parc informatique...

Rénovation et construction

La rénovation des bâtiments a nécessité un fort investissement pour améliorer l'isolation et le système de chauffage : isolation des toitures, pose de double vitrage, mise en place d'une régulation avec optimisation du système de chauffage. Les nouveaux stores sont programmables pour s'abaisser très tôt en été. Résultat : une baisse de 10 % des consommations globales de gaz et un meilleur confort thermique pour les agents.

Consommation et choix des équipements

Un travail particulier a été mené pour inclure des critères environnementaux dans les cahiers des charges relatifs aux appels d'offre de fournitures. Ce travail sur la consommation de papier a permis une diminution de 30 % du nombre de ramettes consommées.

Les imprimantes sont programmées pour un tirage recto-verso par défaut.

Déplacements professionnels et personnels

Exemples d'actions engagées sur les déplacements professionnels :

- amélioration et étiquetage environnemental des véhicules, stage d'éco-conduite
- installation de 3 salles visio-conférence pour éviter des trajets longue distance
- achat d'un vélo électrique pour les trajets courts...

Exemples d'actions engagées sur les déplacements domicile-travail :

- mise en place d'un PDE (plan de déplacement d'établissement), qui fait bénéficier les agents de tarifs réduits pour les transports en commun
- journées challenge mobilité pour tester d'autres pratiques
- ateliers mensuels de réparation des vélos, augmentation des places de parking
- cartes de localisation des agents pour favoriser le covoiturage...

Résultat : une baisse de 10 % de la voiture solo !

Bilan et perspectives

L'accompagnement du changement de comportement nécessite un porteur du projet, du temps disponible et des moyens sur le long terme. Cela est possible à Irstea Grenoble grâce à l'appui de la Direction (recrutement d'un CDD à mi temps sur 3 ans) et d'une équipe de volontaires motivés.

De nombreuses actions de sensibilisation avec des moyens de communication divers (mails, affiches, logo, posters, expositions, séminaires...) ont été menées. Les journées de sensibilisation ont fait recette et ces moments de convivialité ont permis de participer au développement du lien social au sein du centre.

Les chantiers en perspective portent sur le télétravail, la construction des nouveaux laboratoires selon le référentiel HQE, la mise en place d'un PDIE (plan de déplacement inter-entreprises), un guide déontologique sur le déplacement des chercheurs, un audit énergétique...



Création d'un logo



Isolation du toit ■ Gwénola Rey



Vélo électrique ■ Nicole Sardat

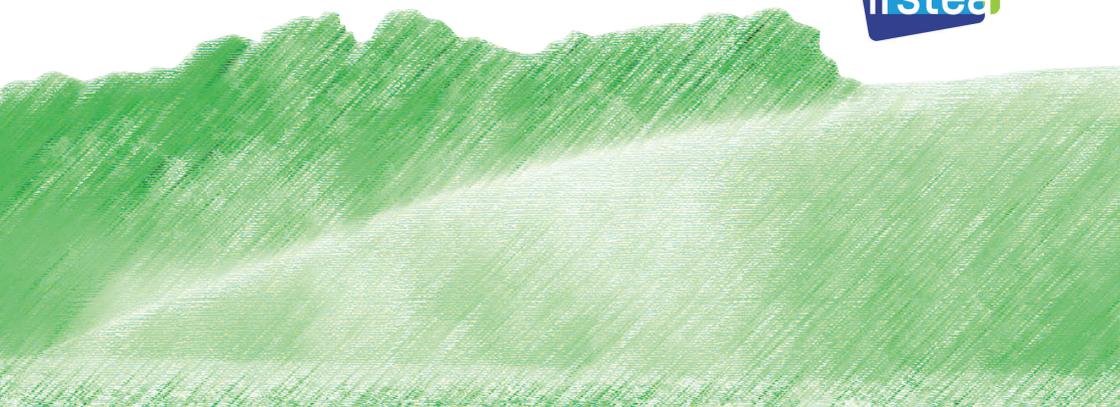


Challenge mobilité ■ Nicole Sardat



Atelier mensuel de réparation vélos ■ Nicole Sardat

Quelle **énergie**
durable
pour **demain ?**



L'année 2012, placée par l'ONU sous le signe de l'énergie durable pour tous, met en lumière tous les enjeux, souvent polémiques, liés à l'énergie : l'humanité est de plus en plus dépendante des ressources qui ne cessent de s'épuiser, l'énergie est souvent source d'inégalités et de conflits, la transition énergétique est une nécessité pour réduire significativement les rejets de gaz à effet de serre... Mais sans consensus mondial, aucun point d'équilibre ne peut être envisagé.

L'idée a germé de réunir dans cet ouvrage les recherches menées à Irstea. Irstea vous propose au fil des chapitres de mieux comprendre les enjeux liés à l'énergie. D'abord en étudiant les filières de production d'énergies renouvelables pour les optimiser et limiter leurs impacts sur les milieux. Puis en se consacrant à l'efficacité énergétique dans le secteur agricole et industriel afin de réduire les contraintes sur l'environnement.



www.irstea.fr

