



ECOBIOM

**Une approche socio-économique et environnementale de l'offre de
biomasse ligno-cellulosique
Projet ANR-05-PNRB-BIOE-18**

Volet 1

**Analyse micro économique et environnementale de l'offre de
biomasse lignocellulosique agricole et forestière**

Livrable 11-1

Méthodologie et modèle génériques

Date : Mars 2009

Coordination du projet : Elisabeth Le Net – FCBA

Responsable Volet 1 : Laure Bamière - INRA Economie Publique

Rédacteur:

Laure Bamière

INRA

Diffusion externe

1 Introduction

Dans un contexte général de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'indépendance énergétique l'Union Européenne a fixé, entre autres, les objectifs suivants pour 2010 dans le Livre Blanc sur les énergies renouvelables (Com(97)599) : 12% de la consommation totale d'énergie devra provenir de sources d'énergie renouvelables, dont 150 Mtep/an de biomasse (issue de l'agriculture, de la forêt et des déchets). La biomasse a plusieurs avantages : elle est renouvelable, elle peut être cultivée dans toutes les régions, être convertie aussi bien en chaleur qu'en électricité ou en carburant, et enfin elle peut être stockée en grandes quantités. En 2007 et 2008, l'UE a revu ses objectifs et a fixé le taux d'incorporation des biocarburants et la part des énergies renouvelables respectivement à 10% et 20% d'ici 2020 (CEC(2008), [1], [14]).

Cependant, il apparaît maintenant clairement que les biocarburants de première génération ne constituent pas la solution idéale, notamment en ce qui concerne les surfaces qui pourraient être mobilisées pour des usages énergétiques, mais aussi à cause de la hausse des prix des cultures que de tels objectifs de production pourraient provoquer ([1], [9], [10]). Cela soulève aussi la question de la compétitivité des biocarburants comparé aux carburants fossiles et le besoin, sujet à polémique, de soutiens publics qui pourrait en découler ([1], [9], [10]). Enfin les biocarburants de première génération ne s'avèrent pas aussi prometteurs qu'ils le semblaient initialement en ce qui concerne leurs bénéfices environnementaux (voir [1] pour une courte revue et [16]).

La production de biocarburants de deuxième génération et de bioénergie à partir de biomasse lignocellulosique, agricole et forestière, en est maintenant au stade R&D voire pilote. Des unités de conversion pourraient voir le jour dans les dix années à venir ([1], [3]). La biomasse lignocellulosique a en général un contenu énergétique et des rendements plus élevés pour une consommation d'intrants plus faible. Les estimations de la contribution de la biomasse à l'offre mondiale d'énergie dans le futur varient beaucoup, en fonction des hypothèses qui sont faites sur la disponibilité des terres et du niveau des rendements (voir [2] pour une revue de 17 études). L'Université de Lund ([8]) et L'Agence Européenne de l'Environnement (EEA,[7]) ont réalisé deux études sur le potentiel de production de biomasse énergie en Europe d'ici 2030. La première montre que le potentiel européen (UE-15 et ACC-10) de d'offre de biomasse agricole et forestière varie de 97 Mtep à 409 Mtep. L'EEA a évalué la quantité de biomasse disponible pour des usages énergétiques sans accroître la pression sur l'environnement. Cette étude montre que le potentiel de biomasse techniquement disponible de l'UE-25 pourrait passer de 190 Mtep en 2010 à 295 Mtep en 2030. Mais aucune de ces deux études ne prend pleinement en compte la compétition avec l'alimentation pour l'usage des terres, ni les contraintes économiques et logistiques de mise en œuvre.

Des questions fondamentales, comme la compétitivité de la bioénergie produite à partir de biomasse lignocellulosique, sont toujours débattues. Cela comprend des interrogations sur impacts environnementaux de la production, de la fourniture et de la conversion de la biomasse (incluant les émissions de gaz à effet de serre), sur la pression sur les ressources naturelles et la biodiversité ([9]). Pour bien aborder ces questions, il convient de prendre en compte la compétition pour et la substitution entre les usages des sols, les contraintes issues des différentes politiques publiques, la répartition spatiale des cultures énergétiques et de la production de biomasse, et les contraintes logistiques ([12], [14]). La localisation des unités de conversion en lien avec la disponibilité de la ressource est un point clé, qui joue un rôle à la fois dans la compétitivité (via les coûts de transport) et les impacts environnementaux (via la consommation de carburant par exemple).

Jusqu'à présent les aspects spatiaux ont été traités à un niveau relativement agrégé ([6], [12], [10]). La prise en compte de la répartition spatiale de l'usage des sols se fait généralement par

une approche de type « top-down », qui consiste à désagréger les sorties du modèle ([4], [12]). Par exemple Hellmann et Verburg (2008), associent les modèles GTAP et IMAGE pour calculer les changements de surface de différentes classes d'occupation des sols (cultures, prairies, zone urbaine, etc.) au niveau national, puis utilisent Dyna-Clue pour désagréger ces changements d'usages des sols à une résolution de 1 km², en utilisant des cartes de probabilité de présence. Cette approche de type « top-down » ne permet toutefois pas d'évaluer les impacts des politiques locales et des projets d'implantation d'unités sur l'usage des sols. Graham et al (2000) ont développé une approche de modélisation basée sur les SIG au niveau régional et avec une maille de 1 km². Cependant, comme Hellmann et Verburg, ils font des hypothèses restrictives sur les terres arables potentiellement disponibles pour les cultures énergétiques et ne tiennent pas compte de la biomasse forestière.

L'objectif du projet ECOBIOM était de développer une méthodologie générique, pour pouvoir réaliser une optimisation multicritères de l'offre de biomasse agricole et forestière à l'échelle de la région, avec une maille cantonale, compte tenu des besoins des unités de transformation, des contraintes environnementales, des coûts logistiques, des coûts des ressources, de la concurrence entre usages des ressources et des comportements des producteurs.

Dans le cadre du projet, nous avons développé un modèle d'offre de biomasse lignocellulosique, agricole et forestière, spatialement explicite et à l'échelle régionale. Il maximise le revenu agricole et forestier de la région, compte tenu des distances et des coûts de transport de la biomasse des cantons aux usines de transformation, de la demande des usines, des contraintes imposées par les politiques publiques (agricoles, environnementales, etc.), des types de sol, des rendements et coûts de production des cultures associés à ces sols, des quantités de bois potentiellement mobilisables par catégorie et des coûts associés (bois sur pied, exploitation), et des différents usages possibles de la biomasse (alimentaire, énergétique, industriel ou bois d'œuvre). Il détermine de manière endogène la localisation optimale des usines dans la région et l'allocation des terres agricoles dans les cantons, ainsi que le type et la quantité de bois offert. Le modèle a été appliqué et testé sur la région Champagne-Ardenne.

Dans la première partie du rapport nous présentons le modèle et la méthodologie développés dans ECOBIOM. Dans le livrable L14 nous présentons quelques simulations pour illustrer les utilisations possibles du modèle. Enfin nous discutons les perspectives d'amélioration du modèle.

2 Méthodologie

Description du modèle

Le modèle développé dans le cadre du projet ECOBIOM est un modèle de programmation linéaire mixte avec des nombres entiers, qui prend en compte deux niveaux spatiaux : le canton et la région. Le canton a été choisi comme unité de base car c'est une subdivision administrative à l'échelle de laquelle des données sont disponibles (cf. ci-dessous) et il fournit un cadre pour localiser les points de départ et de livraison de la biomasse dans les chefs-lieux de canton. Le canton est caractérisé par les types de sol qui le composent, son altitude et la pente des parcelles forestières. Dans le modèle c'est le niveau auquel les décisions de production sont prises, en tenant compte des contraintes techniques et économiques. La région, quant à elle, est une échelle pertinente pour définir les contours d'un bassin d'approvisionnement en biomasse et étudier la compétition pour la ressource qui survient quand plusieurs unités de conversion sont implantées en même temps ou successivement.

Le modèle minimise la somme, pour tous les cantons, des coûts de production et de livraison de la biomasse des cantons à l'usine, moins la marge brute issue des usages non énergétiques des cultures et du bois. Ceci revient à maximiser le revenu agricole et forestier de la région,

moins les coûts d’approvisionnement (y compris le transport) des usines en biomasse. Le schéma du modèle, avec les données nécessaires en entrée et les sorties, est illustré dans la Figure 1. Les différentes composantes sont reprises dans les paragraphes suivants. Les équations décrivant le modèle, la définition des indices, des paramètres et des variables sont fournies après la Figure 1.

Le modèle a été développé en langage GAMS¹, et le solveur utilisé pour l’optimisation en nombres entiers est CPLEX². Entre l’importation des données, l’optimisation et l’exportation des résultats, une simulation prend moins de 5mn pour une région comme la Champagne-Ardenne.

¹ Toutes les informations sur l’environnement de programmation GAMS, ainsi qu’une version de démonstration gratuite, sont disponibles à l’adresse suivante : <http://www.gams.com/>

² Toutes les informations sur le solveur CPLEX sont disponibles à l’adresse suivante : <http://www.gams.com/solvers/solvers.htm#CPLEX>

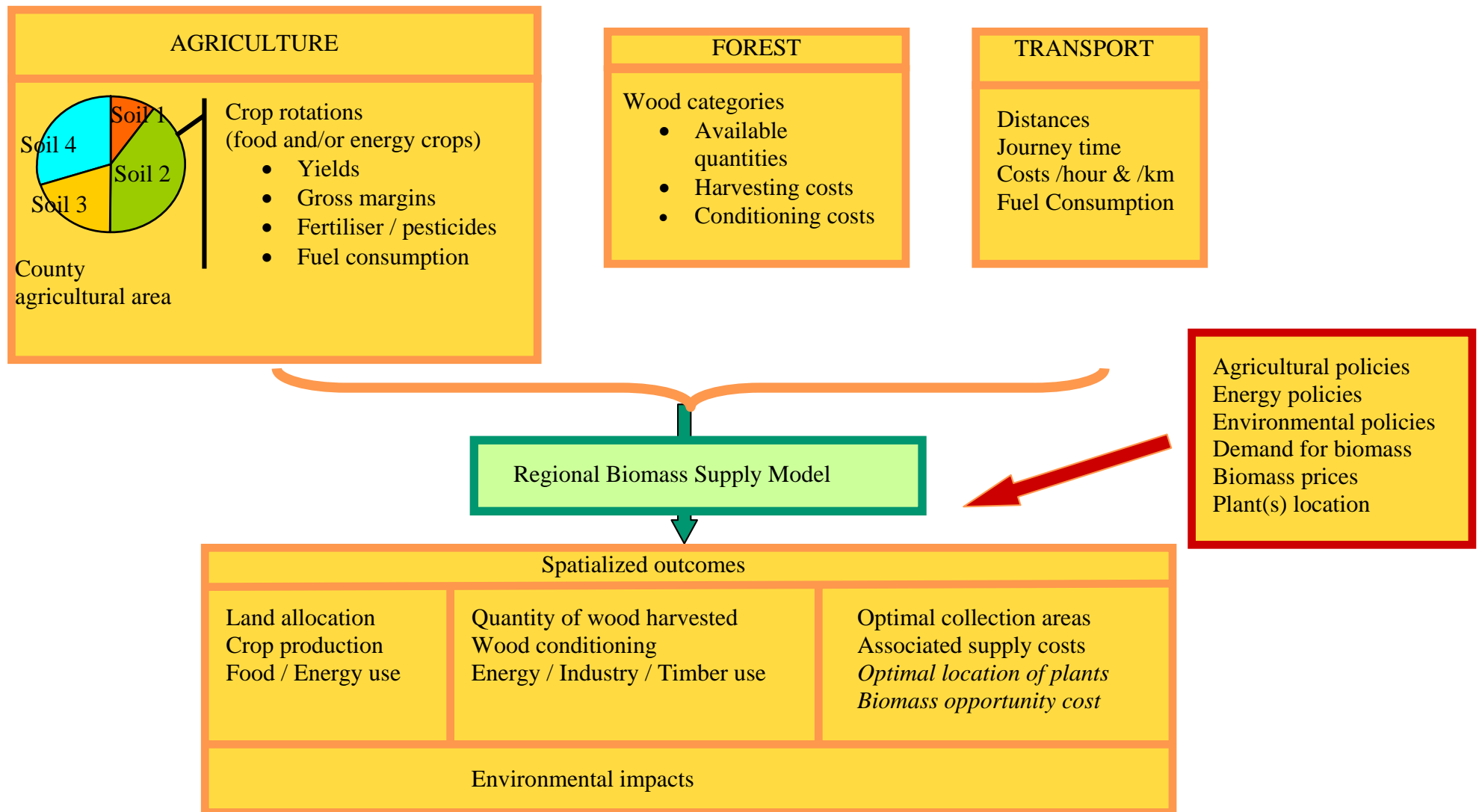


Figure 1 Schéma de fonctionnement du modèle, avec données d'entrée et sorties

Min

$$\begin{aligned}
& \sum_{crops,cond,vcl,s,i,j,u \sin e, cld} Livraison_{crops,cond,vcl,s,i,j,u \sin e}^{crops} * coûttrans_{crops,cond,vcl,cld}^{crops} (dist_{i,j}^{\min temps}) \\
& + \sum_{crop,r,s,i} SR_{r,s,i} * rotat_{crop,r} * c var_{crop,s}^{crop} + \sum_{crops,cond,vcl,s,i,j,u \sin e} Livraison_{crops,cond,vcl,s,i,j,u \sin e}^{crops} * cméca_{crops,cond}^{crops} \\
& - \sum_{crops,s,i} Vendu_{crops,s,i}^{crops} * prix_{crops}^{crops} \\
& + \sum_{es,cond,vcl,i,j,u \sin e} Livraison_{es,cond,vcl,i,j,u \sin e}^{forest} * coûttrans_{cond,vcl}^{forest} (dist_{i,j}^{\min temps}) \\
& + \sum_{i, ppté, ppmt, es, ta, dia, dif, cond} Coupé_{i, ppté, ppmt, es, ta, dia, dif, cond}^{diacond} * prix_{es, dia, cond}^{pptaire} \\
& + \sum_{i, es, ta, dia, dif, cond} (Vendu_{i, es, ta, dia, dif, cond}^{forest} + Livré_{i, es, ta, dia, dif, cond}^{forest}) * coût exploit_{es, ta, dia, dif, cond} \\
& - \sum_{i, es, ta, dia, dif, cond} Vendu_{i, es, ta, dia, dif, cond}^{forest} * prix_{es, cond}^{forest} \\
& + \sum_{tcr, cond, vcl, i, j, u \sin e} Livraison_{tcr, cond, vcl, i, j, u \sin e}^{tcr} * (c var_{tcr}^{tcr} + cméca_{tcr, cond}^{tcr}) \\
& + \sum_{tcr, cond, vcl, i, j, u \sin e} Livraison_{tcr, cond, vcl, i, j, u \sin e}^{tcr} * coûttrans_{cond, vcl}^{forest} (dist_{i,j}^{\min temps}) \\
& - \sum_{tcr, soltcr, i} Vendu_{tcr, soltcr, i}^{tcr} * prix_{tcr}^{tcr}
\end{aligned}$$

sous contraintes :

$$\begin{aligned}
\sum_r SR_{r,s,i} & \leq sol_{s,i} * SAU_i & \forall (s,i) \\
STCR_{tcr, soltcr, i} & \leq \overline{STCR}_{tcr, soltcr, i} & \forall (tcr, soltcr, i) \\
\sum_{r,s} SR_{r,s,i} + \sum_{tcr, soltcr} STCR_{tcr, soltcr, i} & \leq SAU_i & \forall i \\
Vendu_{crop,s,i}^{crop} + Livré_{crop,s,i}^{crop} & \leq \sum_r SR_{r,s,i} * rotat_{crop,r} * Y_{crop,s}^{crop} & \forall crop, s, i \\
Vendu_{straw,s,i}^{straw} + Livré_{straw,s,i}^{straw} & \leq \sum_{r, crop} SR_{r,s,i} * rotat_{crop,r} * Y_{crop,i}^{straw} * export_i^{straw} & \forall straw, s, i \\
Vendu_{tcr, soltcr, i}^{tcr} + Livré_{tcr, soltcr, i}^{tcr} & \leq \sum_r STCR_{tcr, soltcr, i} * Y_{tcr}^{tcr} & \forall tcr, soltcr, i \\
Vendu_{i, es, ta, dia, dif, cond}^{forest} + Livré_{i, es, ta, dia, dif, cond}^{forest} & \leq \sum_{ppté, ppmt} Coupé_{i, ppmt, ppté, es, ta, dia, dif, cond}^{diacond} & \forall i, es, ta, dia, dif, cond
\end{aligned}$$

$$\sum_{cond} Coupé^{diacond}_{i,ppmt,ppte,es,ta,dia,dif,cond} = Coupé^{arbre}_{i,ppté,ppmt,es,ta,dif} * diamètre_{i,ppté,ppmt,es,ta,dia,dif} \quad \forall i, ppté, ppmt, es, ta, dia, dif$$

$$Coupé^{arbre}_{i,ppté,ppmt,es,ta,dif} \leq stockbois_{i,ppté,ppmt,es,ta,dif} \quad \forall i, ppté, ppmt, es, ta, dif$$

$$\sum_{cond,vcl,j,u \sin e} Livraison^{crops}_{crops,cond,vcl,s,i,j,u \sin e} \leq Livré^{crops}_{crops,s,i} \quad \forall crops, s, i$$

$$\sum_{vcl,j,u \sin e} Livraison^{forest}_{es,cond,vcl,i,j,u \sin e} \leq \sum_{ta,dia,dif} Livré^{forest}_{i,es,ta,dia,dif,cond} \quad \forall i, es, cond$$

$$\sum_{cond,vcl,j,u \sin e} Livraison^{tcr}_{tcr,cond,vcl,i,j,u \sin e} \leq \sum_{soltcr} Livré^{tcr}_{tcr,soltcr,i} \quad \forall tcr, i$$

$$\sum_{cond,vcl,s,i} Livraison^{crops}_{crops,cond,vcl,s,i,j,u \sin e} \geq demande^{crops}_{u \sin e,crops} * Locus_{u \sin e,j} \quad \forall crops, j, u \sin e$$

$$\sum_{vcl,i} Livraison^{forest}_{es,cond,vcl,i,j,u \sin e} \geq demande^{forest}_{u \sin e,es,cond} * Locus_{u \sin e,j} \quad \forall es, cond, j, u \sin e$$

$$\sum_{tcr,vcl,i} Livraison^{tcr}_{tcr,cond,vcl,i,j,u \sin e} \geq demande^{tcr}_{u \sin e,cond} * Locus_{u \sin e,j} \quad \forall cond, j, u \sin e$$

$$\sum_{crops,cond,vcl,s,i} Livraison^{crops}_{crops,cond,vcl,s,i,j,u \sin e} * pci^{crops}_{crops} + \sum_{es,cond,vcl,i} Livraison^{forest}_{es,cond,vcl,i,j,u \sin e} * pci^{forest}_{es} + \sum_{tcr,cond,vcl,i} Livraison^{tcr}_{tcr,cond,vcl,i,j,u \sin e} * pci^{tcr}_{tcr} \geq demande^{MWh}_{u \sin e} * Locus_{u \sin e,j} \quad \forall j, u \sin e$$

$$\sum_j Locus_{u \sin e,j} = 1 \quad \forall j$$

Variables

$Locus_{u \sin e, j}$ variable binaire égale à 1 si l'usine est dans le canton et 0 sinon

$SR_{r, s, i}$ surface de la rotation r sur le sol s dans le canton i

$STCR_{tcr, soltcr, i}$ surface en tcr sur le sol soltcr dans le canton i

$Livré_{crops, s, i}^{crops}$ quantité de culture ou de paille destinée à la livraison par type de sol et de canton

$Livré_{i, es, ta, dia, dif, cond}^{forest}$ quantité de bois destinée à la livraison par catégorie et par canton

$Livré_{tcr, soltcr, i}^{tcr}$ quantité de tcr destinée à la livraison par catégorie, type de sol et canton

$Vendu_{crops, s, i}^{crops}$ quantité de culture ou de paille destinée à la vente par type de sol et de canton

$Vendu_{i, es, ta, dia, dif, cond}^{forest}$ quantité de bois destinée à la vente par catégorie et par canton

$Vendu_{tcr, soltcr, i}^{tcr}$ quantité de tcr destinée à la vente par catégorie, type de sol et canton

$Livraison_{crops, cond, vcl, s, i, j, u \sin e}^{crops}$ quantité de culture ou paille livrée du canton i à l'usine dans le canton j par catégorie et type de véhicule

$Livraison_{tcr, cond, vcl, i, j, u \sin e}^{tcr}$ quantité de tcr livrée du canton i à l'usine dans le canton j par catégorie et type de véhicule

$Livraison_{es, cond, vcl, i, j, u \sin e}^{forest}$ quantité de bois livrée du canton i à l'usine dans le canton j par catégorie et type de véhicule

$Coupé_{i, ppté, ppm t, es, ta, dia, dif, cond}^{diacond}$ quantité de bois issue des arbres coupés, décomposée en diamètre et conditionnement

$Coupé_{i, ppté, ppm t, es, ta, dif}^{arbre}$ quantité d'arbres coupés par catégorie

Paramètres

$coût \text{ exploit}_{es, ta, dia, dif, cond}$ coûts d'exploitation du bois

$coûttrans_{crops, cond, vcl, cl d}^{crops} \left(dist_{i, j} \right)$ coût de transport de la biomasse agricole en fonction du conditionnement, du véhicule et de la classe de diamètre

$coûttrans_{cond, vcl}^{forest} \left(dist_{i, j} \right)$ fonction de coût de transport de la biomasse forestière en fonction du conditionnement et du véhicule

$c \text{ var}_{crop, s}^{crop}$ charges variables des cultures par type de sol

$c \text{ var}_{tcr}^{tcr}$ charges variables pour la production des TCR

$cméca_{crops}^{crops}$ charges de mécanisation spécifiques pour les cultures dédiées et la paille

$cméca_{tcr}^{tcr}$ charges de mécanisation spécifiques pour les TCR

$demande_{u \sin e, es, cond}^{forest}$ demande de l'usine en bois en fonction de l'essence et du conditionnement

$demande_{u \sin e, crops}^{crops}$ demande en culture ou paille de l'usine

$demande_{u \sin e, tcr}^{tcr}$ demande en TCR de l'usine en fonction du conditionnement

$demande_{u \sin e}^{MWh}$ demande en MWh de l'usine

$diamètre_{i, ppté, ppm t, es, ta, dia, dif}$ proportion des différents diamètres de bois par type d'arbre

$dist_{i, j}^{\min \text{ temps}}$ distance minimisant le temps de trajet entre les cantons i et j

$export_{i}^{\text{straw}}$ taux d'exportabilité de la paille par canton

pci_{crops}^{crops} PCI des cultures et de la paille

pci_{es}^{forest} PCI du bois en fonction de l'essence

pci_{tcr}^{tcr} PCI du TCR

$prix_{crops}^{crops}$ prix de vente des cultures ou de la paille

$prix_{tcr}^{tcr}$ prix de vente des taillis à courte rotation
 $prix_{es,cond}^{forest}$ prix de vente du bois en fonction de l'essence et du conditionnement
 $prix_{ptair}^{es,dia,cond}$ prix du bois sur pied payé au propriétaire par l'exploitant
 $rotat_{crop,r}$ proportion de la culture dans la rotation
 $sol_{s,i}$ proportion du sols dans le canton i
 SAU_i surface agricole du canton i
 $\overline{STCR}_{tcr,soltcr,i}$ surface potentiellement cultivable par type de tcr et de sol dans le canton i
 $stockbois_{i,ppté,ppmt,es,ta,dif}$ quantité de bois sur pied par catégorie et par canton
 $Y_{crop,s}^{crop}$ rendement des cultures par type de sol
 $Y_{crop,i}^{straw}$ rendement en paille des céréales à paille par canton
 Y_{tcr}^{tcr} rendement des TCR

Indices

i, j ensemble des cantons de la région
 s types de sols (ou unités agropédoclimatiques)
 $soltcr$ types de sols compatibles avec les TCR
 $crops = \{crop, straw\}$ ensemble des cultures et de leurs coproduits
 $crop = \{blé, orgeP, colza, \dots, triticalePE, miscanthus, \dots\}$ sous-ensemble des cultures alimentaires et énergétiques
 $straw = \{paille, \dots\}$ sous-ensemble des coproduits des cultures, dont la paille
 $r = \{rotation1, \dots\}$ ensemble des rotations agricoles
 $tcr = \{TCRpeuplier8tMS / ha, \dots\}$ types de TCR
 $ppté = \{domanial, communal, privé\}$ type de propriété forestière
 $ppmt = \{mélangesousfutaie, \dots\}$ type de peuplement forestier
 $es = \{feuillus, résineux, peuplier\}$ type d'essence
 $ta = \{grandarbre, petitarbre\}$ type d'arbre en fonction de l'âge
 $dia = \{grosbois, boismoyen, petitbois\}$ classes de diamètre du bois
 $dif = \{trèsfacile, facile, difficile, trèsdifficile\}$ difficultés d'exploitation de la forêt
 $cond = \{grume, billonlong, billoncourt, fagot, plaquette, balle, ensilage\}$ ensemble des conditionnements possibles de la biomasse
 $vcl = \{semiremorque6essieuxgrue, polybenne, \dots, camionremorque5essieux\}$ type de véhicule pour le transport de la biomasse
 $cld = \{0-25km, 25-50km, \dots\}$ classes de distance
 $usine = \{u1, u2, \dots\}$ identifiants des usines utilisant la biomasse

Le maillage

Nous avons choisi les cantons comme maille de base, car il s'agit d'un niveau administratif auquel des données sont disponibles notamment pour l'agriculture. Pour des raisons de confidentialité des données il est en général impossible de descendre à un niveau plus fin. Il est toutefois possible de changer le maillage du modèle sans toucher à sa structure. En effet les cantons sont indexés par un numéro (leur code INSEE) et localisables sur une couche SIG. On peut donc remplacer le canton par un autre niveau administratif ou une case d'une grille, du moment qu'on leur donne un numéro, qu'on peut les localiser sur une carte et calculer des distances.

Les sols

Les modèles tiennent rarement compte des types de sol pour optimiser l'allocation des terres, ou s'ils le font c'est de manière moins fine au niveau régional (nuts2) ([4], [6], [13]). La composition des sols, leur réserve utile et le climat ont, entre autres, une influence sur le type de culture praticable, les rendements de ces cultures et leurs impacts environnementaux. Ils servent aussi à discriminer les zones où les TCR sont potentiellement cultivables. Au niveau de la forêt ils permettent d'évaluer les impacts environnementaux des différents modes d'exploitation. Dans ECOBIOM nous déterminons dans un premier temps les principaux types de sol de la région d'étude, puis nous calculons la part de chacun de ces types dans chaque canton. En croisant les couches sol et canton, on peut localiser de manière plus précise les activités agricoles et forestières. Il est possible d'utiliser une autre « unité » agropédoclimatique homogène que les seuls sols, en fonction des régions. L'altitude et le climat peuvent être des facteurs déterminants et donc être combinés aux types de sols. L'essentiel est de pouvoir obtenir les données associées nécessaires au fonctionnement du modèle. Pour plus de détails sur les sols on peut se reporter à la fiche paramètre n°3.

Les activités agricoles

.11 Cultures et rotations

De nombreux modèles optimisent la surface allouée à chaque culture. Le modèle ECOBIOM optimise la surface des rotations, potentiellement cultivables ou existantes, sur chaque type de sol et dans chaque canton, plutôt que la surface de chaque culture. La raison de ce choix est que les rotations rendent mieux compte des effets « précédent » et « suivant » sur les rendements des cultures, la consommation d'intrants (bilan azoté par exemple) et les impacts environnementaux en découlant. De plus cela facilite la comparaison entre les rotations composées de cultures annuelles et les cultures pérennes pluri-annuelles telles que le miscanthus ou les taillis à courte rotation. Nous supposons que les agriculteurs vont substituer les cultures pérennes aux rotations de cultures annuelles, tandis que les cultures dédiées annuelles telles que le triticale plante entière et le sorgho fibre vont probablement se substituer aux cultures annuelles équivalentes dans les rotations.

Dans la méthodologie ECOBIOM, la prise en compte de la biomasse agricole se fait en trois étapes. Tout d'abord nous déterminons les rotations et les cultures dédiées qui peuvent être cultivées sur chaque type de sol (cf. fiche paramètre n°4). Ensuite nous créons de nouvelles rotations incluant les cultures dédiées annuelles. Enfin nous collectons les données disponibles sur les itinéraires techniques, pratiques agricoles, rendements et coûts de production pour chaque type de sol (cf. fiches paramètre 5, 7, 8 et 9).

Afin d'aborder au mieux les impacts environnementaux, il est très intéressant de connaître à la fois les itinéraires techniques couramment pratiqués dans la région, les itinéraires « optimisés » du point de vue des intrants (sans surfertilisation, etc.) et les itinéraires extensifs.

.21 Coproduits

Concernant la paille, qui est un coproduit des céréales à paille telles que le blé et l'orge, on introduit son rendement par hectare de culture qui dépend du type de variété utilisé et donc, en général, de l'activité dominante : céréaliculture ou élevage (cf. fiche n°12). Il est d'autre part utile de connaître la fraction de la paille produite qui est exportable sans nuire à la fertilité du sol, c'est-à-dire qui ne diminue pas le taux de matière organique. On peut soit limiter les exportations de paille à cette fraction, soit les laisser libre et les comparer à ce qui aurait été raisonnable d'un point de vue environnemental. Dans tous les cas, c'est le modèle qui détermine l'importance du prélèvement en paille dans la fourchette impartie. Les autres

coproduits des cultures (rafles, etc.) peuvent être introduits de la même façon dans le modèle. La question de la satisfaction des besoins de l'élevage se pose pour la paille. Il y a trois approches possibles : soit on satisfait d'abord les besoins de l'élevage en paille avant d'envisager d'autres usages, soit on met l'élevage en concurrence avec les usages énergétiques, soit on ignore l'élevage et dans ce cas on enlève la surface fourragère principale (SFP) des surfaces cultivables.

Enfin il est préférable d'introduire un « consentement à offrir » de la paille des céréaliculteurs, qui correspond aux conditions minimales auxquelles ils seraient prêts à sortir de la paille de leurs champs et à la vendre pour des usages énergétiques. Dans le modèle ce consentement à offrir peut prendre la forme d'un prix minimal ou d'une courbe d'offre (quantité en fonction du prix). Mais de façon plus qualitative, il s'agit aussi par exemple de savoir si les céréaliers préfèrent vendre la paille « sur pied » dans le champ (la récolte et le transport étant à la charge de l'acheteur) ou s'ils sont prêts à la récolter eux même.

.31 Marges brutes

La marge brute hectare d'une culture est calculée comme suit :

$$MB_{culture} = \text{prix} * \text{rendement} - (Charges_{engrais} + Charges_{phyto} + Charges_{semences} + Charges_{m\u00e9caniquesp\u00e9cifiques})$$

On ajoute des charges m\u00e9caniques sp\u00e9cifiques pour les cultures qui n\u00e9cessitent un mat\u00e9riel qui n'est pas couramment pr\u00e9sent sur une exploitation (de grande culture). Ces charges peuvent correspondre au co\u00fbt d'une prestation de service. Dans le mod\u00e8le, 1 hectare de rotation Bl\u00e9/Bl\u00e9/Orge/Colza revient \u00e0 cultiver une ann\u00e9e donn\u00e9e 1/2 hectare de bl\u00e9, 1/4 d'hectare d'orge et 1/4 d'hectare de colza. La marge brute d'une rotation est calcul\u00e9e sur la base des marges brutes des cultures qui la composent, pond\u00e9r\u00e9es par le nombre d'occurrence des dites cultures. Par exemple pour une rotation Bl\u00e9/Bl\u00e9/Orge/Colza :

$$MB_{BBOC} = \frac{2MB_{Bl\u00e9} + 1MB_{Orge} + MB_{Colza}}{4}$$

Les cultures pluriannuelles constituent une rotation \u00e0 elles seules et leur marge brute devrait \u00eatre actualis\u00e9e pour \u00eatre comparable aux rotations « annuelles ». Soit une culture p\u00e9renne d'une dur\u00e9e de vie de T ann\u00e9es. La marge brute d'une ann\u00e9e t est :

$$MB_t = \text{prix} * \text{rendement}_t - (Charges_{engrais} + Charges_{phyto} + Charges_{semences} + Charges_{m\u00e9caniquesp\u00e9cifiques}_t)$$

La marge brute actualis\u00e9e sur la dur\u00e9e de vie T de la culture avec un taux d'actualisation i est :

$$MB_T = \sum_1^T \frac{MB_t}{(1+i)^t}$$

On peut se servir du taux d'actualisation comme indicateur de l'aversion au risque des agriculteurs : plus l'agriculteur craint le risque, plus il est \u00e9lev\u00e9. Sinon il convient de prendre le taux auquel les banques pr\u00eatent de l'argent aux agriculteurs pour une dur\u00e9e similaire.

Les activit\u00e9s foresti\u00e8res

Les mod\u00e8les sur la for\u00eat peuvent par exemple optimiser les esp\u00e8ces \u00e0 planter, simuler la croissance de la biomasse ou g\u00e9rer l'\u00e9volution \u00e0 la hausse ou \u00e0 la baisse de la surface foresti\u00e8re. Dans le cadre d'ECOBIO nous consid\u00e9rons la for\u00eat existante et ses caract\u00e9ristiques telles que la surface, la localisation, le type de propri\u00e9t\u00e9, le type de peuplement, les essences, l'\u00e2ge des arbres (jeunes ou « petits arbres », vieux ou « gros arbres »), les classes de diam\u00e8tre (gros, moyen, petit bois) et la pente des parcelles (ou la difficult\u00e9 d'exploitation) (cf. fiche param\u00e8tre n\u00b018). Les jeunes arbres ont du bois de petit et moyen diam\u00e8tre, tandis que les arbres plus \u00e2g\u00e9s ont du bois dans les trois classes de diam\u00e8tre. En connaissant l'\u00e2ge et la composition des parcelles foresti\u00e8res, il est possible d'estimer la quantit\u00e9 de bois disponible par cat\u00e9gorie de diam\u00e8tre (cf. fiche n\u00b021). En fonction du diam\u00e8tre, le bois peut \u00eatre conditionn\u00e9 en grumes, billons longs ou courts, fagots ou plaquettes

forestières (cf. Tableau 1). Les usages possibles de chaque mode de conditionnement (bois d'œuvre, trituration, énergie) sont détaillés dans le Tableau 2.

	Grume	Billon long	Billon court	Fagot	Plaquette
Petit Bois				X	X
Bois Moyen		X	X		X
Gros Bois	X	X	X		X

Tableau 1 Conditionnements compatibles avec les différentes catégories de diamètre

	Grume	Billon long	Billon court	Fagot	Plaquette
Bois d'œuvre	X	X	X		
Trituration	X	X	X	X	X
Energie	X	X	X	X	X

Tableau 2 Usage possible du bois en fonction du conditionnement

Dans ECOBIOM la prise en compte de la biomasse forestière se fait en trois étapes. On détermine d'abord les caractéristiques de la forêt existante dans la région, puis on estime les quantités de bois disponibles par catégorie de diamètre, et enfin on collecte les données correspondantes concernant les coûts d'exploitation et de conditionnement, le prix du bois sur pied (assimilé à un coût) et le prix de vente (cf. fiches n°19, 20 et 22).

Le prix payé au propriétaire par l'exploitant pour acheter le bois sur pied dépend de l'essence, du diamètre, de la difficulté d'exploitation et de l'usage qui peut être fait du bois (la « qualité » de l'arbre). Dans le modèle Champagne-Ardenne il est fonction de l'essence, du diamètre et du conditionnement. Dans l'idéal il faudrait remplacer le conditionnement par une notion de qualité du bois, ou simplement supprimer cette indexation, car cela suppose qu'on sache à l'avance ce qu'on va faire de toutes les parties de l'arbre. D'autre part, toujours dans l'idéal, il devrait correspondre soit au prix observé, soit au prix minimum auquel le propriétaire serait prêt à vendre. Il ne devrait pas être calculé à partir du prix de vente, des coûts d'exploitations et de la marge de l'exploitant, la répartition du surplus entre exploitant et propriétaire ne devrait pas être fixée à l'avance. Les coûts d'exploitation dépendent des essences, du type d'arbre, du diamètre, de la pente de la parcelle et de la distance à la route la plus proche (résumés sous la forme d'un indice « difficulté d'exploitation »). Dans le modèle Champagne-Ardenne ils intègrent aussi le conditionnement. La difficulté consiste à répercuter le coût d'exploitation entre les différentes parties de l'arbre (gros, moyen et petit bois). Comme il n'est pas concevable dans la réalité de couper uniquement la partie de l'arbre qui nous intéresse, il faudrait disposer d'une part du coût d'abattage de l'arbre dans son entité, et d'autre part du coût de conditionnement de chaque partie. Pour l'instant dans le modèle on a supposé que le « prix propriétaire » correspondant à la totalité de l'arbre était dû, qu'on en utilise tout ou partie, puis que seuls étaient facturés les coûts d'exploitations correspondant aux fractions de l'arbre réellement utilisées et vendues.

Taillis à courte rotation

Les taillis à courte rotation (TCR) sont implantés sur les terres agricoles dans ECOBIOM, mais sont des produits de type forestier. Ils sont conditionnés sous forme de plaquettes, empruntent donc le même type de véhicule et ont les mêmes coûts de transport que les plaquettes forestières.

Dans un premier temps on détermine et localise les zones (type de sol, climat, etc.) qui sont propices à leur culture, selon qu'il s'agit de peuplier, de saule ou d'eucalyptus par exemple.

Ces couches sont croisées avec la couche canton pour obtenir les surfaces potentielles en TCR par canton. Les données sur les itinéraires techniques (intensif, extensif, etc.), les charges et les rendements associés sont ensuite collectés. La méthode est détaillée dans les fiches paramètre n°28, 29 et 30).

Transports

Dans ECOBIOM, le transport de la biomasse est modélisé en deux étapes. Dans un premier temps le coût total d'approvisionnement en biomasse (y compris livraison) est minimisé en se basant sur des coûts de transport simplifiés à la tonne et au kilomètre. Cela nous permet de déterminer les cantons qui vont produire et livrer la biomasse aux usines, ainsi que la localisation de ces dernières si elle n'était pas déjà fixée. A cette étape la localisation du déchetage des plaquettes est fixée (bord de route pour Champagne-Ardenne). Dans un deuxième temps, on modélise de manière plus détaillée les coûts de transport et les aspects logistiques. Une fois les points de départ et d'arrivée de la biomasse connus, de même que le type et la quantité de biomasse à livrer, il est possible d'optimiser les seuls coûts de transport. On peut alors prendre en compte les rotations et le coût du fret retour, il est aussi possible d'inclure ou de tester des sites de stockage intermédiaire et d'optimiser la localisation du déchetage (bord de route, sur plateforme ou à l'usine).

Le coût de transport simplifié à la tonne et au kilomètre a été calculé en utilisant la formule du trinôme du Centre National Routier (cf. fiches paramètres n°14 à 17 et 23). Le choix du véhicule dépend lui-même de la nature de la biomasse, de son conditionnement, du relief du canton et de la distance à parcourir. Par exemple un camion remorque 5 essieux transporte des balles de pailles sur de longues distances, tandis qu'on utilise un tracteur pour transporter la paille du champ au stock sur de courtes distances. En pratique le coût varie aussi en fonction de la distance, car pour de courtes distances le fret retour est à la charge du client, alors que pour de longues distances il est à celle du transporteur routier. Dans le modèle on peut utiliser au choix une fonction de coût de transport (coût total = f(distance)), ou des coûts de transport à la tonne au kilomètre par intervalle de distance (par exemple $0.15 \text{ €t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ entre 0 et 25 km et $0.1 \text{ €t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ entre 25 et 50 km).

Pour des raisons de simplicité et de temps de calcul, nous supposons que les usines ne peuvent être localisées qu'au chef lieu de canton. De même nous supposons que toute la biomasse est rendue disponible au chef-lieu de canton. Il est toutefois possible de sélectionner plusieurs points de départ / arrivée par canton, notamment si l'on souhaite tester une implantation particulière. Pour éviter un mauvais comportement du modèle, quand la source de biomasse et l'usine sont situées dans le même canton (distance nulle), on considère que le coût de transport n'est pas nul mais égal à une somme forfaitaire, inférieure au coût de transport entre les deux plus proches chefs lieux de canton de la région.

Pour les distances entre chefs-lieux, nous avons utilisé le distancier intercommunal Route 500 fourni par l'UMR 1041 CESAER de l'INRA de Dijon (cf. fiche n°13). Il contient les distances et les temps de trajet entre villes, en tenant compte du réseau routier, de la topographie (plaine ou montagne) et des heures de pointes. On peut de plus utiliser la distance la plus courte entre 2 points ou celle qui minimise le temps de parcours, ce que les transporteurs font en général. Le distancier a été adapté aux poids-lourds, qui ne roulent pas aux mêmes vitesses que les voitures, dans le cadre du projet.

Impacts environnementaux

Il est possible soit de calculer les impacts environnementaux à partir des sorties du modèles (surfaces dédiées aux rotations, ITK choisis, etc.) et de paramètres de référence issus par exemple d'ACV (cf. fiche paramètre n°6), soit de les intégrer sous forme de contraintes comme par exemple une quantité limitée de lessivage de nitrates ou d'émissions de gaz à effet

de serre. Il est aussi possible, dans le cadre d'une optimisation multicritères, de les intégrer à la fonction objectif. Mais pour cela il faut être capable de pondérer le poids accordé par le régulateur à chaque critère (économique, environnement), voire de monétariser les impacts environnementaux. Dans tous les cas les impacts environnementaux doivent idéalement être estimés en tenant compte des sols et itinéraires techniques utilisés dans la partie agricole, et de la place des cultures dans les rotations.

La demande

Une des utilisations possible est de tester des scénarios de demande de biomasse pour une d'implantation d'usine. La demande peut être exprimée sous différentes formes dans le modèle :

- Demande d'une quantité de culture (ex : 10 000 t de miscanthus)
- Demande d'une quantité de coproduit agricole (ex : 100 000 t de paille)
- Demande d'une quantité d'essence sous tel conditionnement (ex : 50 000 t de plaquettes de feuillus)
- Demande d'une quantité de TCR sous tel conditionnement (ex : 20 000 t de plaquettes de peuplier)
- Demande d'une quantité d'énergie (ex : 500 000 MWh)

On peut combiner plusieurs types de biomasse pour une même usine (ex : 10 000 t de miscanthus + 20 000 t de plaquettes), ou limiter la liste des produits agricoles et forestiers pouvant alimenter l'usine dans le cas d'une demande en MWh (ex : 500 000 MWh issus uniquement de produits forestiers).

Il est tout a fait possible de modifier l'indexation de la demande dans le modèle, comme par exemple indiquer uniquement l'essence, ou préciser le conditionnement des cultures. Il suffit de modifier les contraintes « demande » en fonction. Pour Champagne-Ardenne nous avons utilisé la structure ci-dessus, qui correspond à celle des prix. Quand on fixe une demande on laisse les prix de la biomasse lignocellulosique à 0 € et le modèle fournit en sorti le coût d'opportunité de la biomasse demandée rendue usine, c'est-à-dire le prix qu'il faudrait payer (au moins) pour obtenir la quantité désirée rendue usine. Dans le cadre d'une demande en quantité on peut fixer la localisation des usines, ou laisser au modèle le soin d'optimiser la localisation.

Il est aussi possible de ne pas fixer une quantité de biomasse ou de MWh demandée, mais de donner un prix auquel une usine serait prête à acheter la biomasse ou le MWh et déterminer avec le modèle la quantité et le type de biomasse fournie, ainsi que le lieu de production. En faisant varier le prix dans un intervalle donné on peut construire une courbe d'offre de la biomasse ou du MWh.

Calibrage, validation et analyse de sensibilité

Il n'est pas possible de calibrer le modèle sur une série de données réelles pour la production et l'offre de biomasse énergie, puisqu'il n'existe pas encore de marché pour nombre de cultures dédiées. Nous en sommes encore au stade expérimental, y compris pour les références techniques. Par contre il serait utile de valider la partie cultures alimentaires du modèle, ainsi que la partie forêt, soit sur des données existantes, soit en montrant des résultats aux experts. De même il faut essayer de valider les résultats du modèle sur la biomasse énergie, au moins en termes de tendances et ordres de grandeur, sur ce qui commence à être observé dans le cadre des premières installations de bioénergie. Les enquêtes réalisées sur le comportement et le consentement à offrir des agriculteurs, propriétaires et exploitants forestiers, concernant les nouvelles cultures, les coproduits, les TCR et le bois énergie permettent aussi de commenter les résultats.

Enfin il ne faut pas perdre de vue que les résultats du modèle sont dépendants des hypothèses faites, notamment concernant les données sur les rendements, les charges, et les scénarios de prix. Il convient de tester la sensibilité des résultats à ces données, particulièrement aux prix des différents usages.

3 Exemples de simulations

Voir livrable L14.

4 Discussion

Données sur les cultures et rotations par type de sol

L'INRA a mis en œuvre une méthode nommée PERSYST pour obtenir des données expertes sur les cultures pratiquées dans la région par type de sol (cf. fiche paramètre n°5). PERSYST a été créé par Laurence Guichard, de l'UMR Environnement Agronomie de l'INRA de Grignon, et l'outil est déjà paramétré pour la région Poitou-Charentes³. Le paramétrage pour la région Champagne-Ardenne est quasiment terminé, il ne manque plus qu'une dernière réunion de validation par les experts locaux. La principale difficulté maintenant consiste à établir le lien entre la base de données sol qui a servi à déterminer les principaux sols de la région et leur surface et localisation par canton d'une part, et le nom vernaculaire et les caractéristiques principales des sols renseignés par les experts d'autre part.

Il n'existe pas a priori, à l'heure actuelle et au niveau national, une base de données regroupant les rendements et charges des cultures par type de sol. Le RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole) n'est représentatif qu'à l'échelle de la région et ne fournit pas de renseignements sur les types de sols. Les résultats des enquêtes sur les pratiques culturales AGRESTE ne sont disponibles à tous qu'au niveau de la région et ne distinguent pas les types de sols. A l'heure actuelle on ne dispose d'informations détaillées par type de sol que sur le département de la Meuse. Il faudrait essayer de construire un modèle permettant de déduire des informations par type de sol en fonction des données « statistiques » disponibles au niveau national, puis le tester sur ce département pour voir si la méthode peut s'adapter ailleurs.

Rotations

Le choix du panel de rotations parmi lesquelles le modèle peut piocher pour affecter les surfaces agricoles est important. En effet, tel qu'il est construit, le modèle va choisir pour chaque type de sol présent dans chaque canton la rotation qui a la meilleure marge brute. Si un canton ne possède qu'un type de sol alors une seule rotation sera pratiquée dans le canton. Il faut donc que les rotations respectent un minimum de contraintes agronomiques. Par exemple, si le délai de retour de la betterave sucrière est de 4 ans dans la région sur ce sol, toute rotation contenant une betterave devra être composée en plus de 3 autres cultures au moins. On peut aussi envisager de travailler avec des rotations et d'intégrer en plus, dans le modèle, des contraintes agronomiques. Dans ce cas on obtiendrait probablement une combinaison de rotations par type de sol et par canton. La construction des rotations est aussi importante pour les cultures énergétiques annuelles, insérées dans des rotations alimentaires, comme le triticale récolté plante entière. La marge brute de la rotation dans laquelle il est inséré jouera sur le fait qu'il soit ou non produit.

Enfin il existe un très grand nombre de combinaisons possibles des cultures sous forme de rotations, et elles ne peuvent pas toutes être introduites dans le modèle. Il faut faire des choix,

³ Cet outil a été développé et utilisé dans le cadre du projet ADD PRAITERRE, financé par l'ANR. Il a alimenté en données le modèle OUTOPIE, développé par l'UMR Economie Publique dans le cadre de ce projet.

mais sur quels critères ? Schönart et al (2009) ont fait une revue des « modèles de rotations » qui ont été développés pour palier au manque de données empiriques. L'outil ROTAT (Dogliotti et al, 2003) génère toutes les rotations possibles à partir d'un ensemble de cultures et en respectant des contraintes agronomiques, mais le nombre de rotations reste très conséquent. D'autres outils génèrent des rotations optimales d'un point de vue économique, mais ils n'intègrent pas les contraintes agronomiques et ils limitent la marge de liberté du modèle économique qui les utilise. Enfin les rotations sont un schéma que les agriculteurs ont en tête, mais qui ne correspondent pas forcément à leurs pratiques. Ceci a déjà été démontré en confrontant les dires des agriculteurs ou des conseillers de Chambre avec les données sur les assolements. Il est souvent impossible de retomber sur l'assolement par une combinaison linéaire des rotations citées. Schönart et al ([15]) ont donc mis au point un modèle qui permet de recréer des rotations qui intègrent les contraintes agronomiques et l'historique des assolements à l'échelle de l'exploitation ou de la région. Il serait apparemment possible d'utiliser les paramètres de Persyst pour faire tourner l'outil CropRota, mais cela dépasse actuellement le cadre de la « généralité » souhaitée dans ECOBIOM.

Validation et échelle

Comme nous l'avons dit dans la première partie, même s'il n'est pas possible de calibrer le modèle à proprement parler faute de données sur le marché de la biomasse énergie, il faudrait du moins essayer de le valider pour la partie non énergétique. Cela peut se faire notamment en effectuant des simulations avec les partenaires du projet et en confrontant les résultats à l'avis d'experts de l'agriculture et de la forêt en Champagne-Ardenne, ou à des études de cas qui ont pu être réalisées dans la région ou ailleurs, sur les cultures énergétiques.

D'autre part, au vu des résultats des premières simulations, on peut se demander si l'échelle du modèle est adaptée à la question de l'approvisionnement d'une unité de conversion. Par exemple dans S3, avec une demande de 365 000 tMS de miscanthus pour une unité qui consommerait 1000 tMs de biomasse par jour, le modèle concentre la production de sur 80% de la surface (hors élevage) d'un canton, ce qui n'est pas très réaliste. Cela renvoie certes au problème des rotations. Mais cela signifie aussi qu'il existe d'autres contraintes qui devraient être prises en compte. Il faudrait notamment simuler les contrats d'approvisionnement existant pour la pomme de terre, la betterave à sucre, ou pour le bois avec les scieries et industries papetières. Mais surtout il faudrait tenir compte de l'aversion au risque des producteurs, et des conditions auxquelles ils seraient prêts à introduire de nouvelles cultures et fournir de la biomasse énergie. Le livrable L8 devrait permettre d'améliorer le modèle dans ce sens

5 Conclusion et perspectives

Il faut toujours garder à l'esprit que les résultats dépendent des données techniques et économiques entrées dans le modèle et des hypothèses faites lors de sa construction. Ce n'est pas parce qu'un type de biomasse est le plus performant en coût du MWh rendu usine dans une région une année qu'il le sera toujours, ou qu'il le sera aussi dans une autre région.

Comme nous l'avons vu tout au long de ce rapport, il reste à faire un travail important de validation du modèle et d'analyse de sensibilité aux différents paramètres. Il n'a pas encore été possible de réaliser une analyse multicritères de l'offre de biomasse. Pour cela il reste à incorporer les données sur les impacts environnementaux fournis par l'INRA EGC, mais aussi à tirer des informations quantitatives et qualitatives sur le comportement et le « consentement à offrir » de la biomasse des agriculteurs et exploitants forestiers, à partir des enquêtes réalisées par les partenaires. Enfin il reste à développer un module « transport », qui optimise la logistique de la biomasse lignocellulosique une fois les quantités, points de départ et de livraison connus, de manière à tester des implantations de plateformes de stockage. Ces trois

points n'ont pas pu être réalisés dans le temps imparti au projet ECOBIOM, mais le seront par la suite dans le cadre soit de collaborations entre les partenaires, soit de futurs projets.

A moyen terme, il serait intéressant de coupler les sorties du modèle concernant la répartition spatiale des cultures avec des indicateurs de paysage et de répartition spatiale, afin de i) caractériser le paysage obtenu (par exemple en termes de connectivité, agrégation, dispersion); ii) d'obtenir les informations nécessaires à l'évaluation des impacts du changement d'usage des sols sur la biodiversité.

Nous nous sommes efforcés de développer une méthodologie générique, qui puisse être mise en oeuvre dans d'autres régions pour modéliser l'offre de biomasse lignocellulosique. Elle est plus adaptée à l'aide à la décision au niveau régional, ou à une première approche des possibilités d'une région compte tenu des conditions agro-pédo-climatiques, de la compétition entre les usages et des impacts environnementaux, qu'au développement d'un plan d'approvisionnement chiffré et exact d'un projet industriel.

Comme on l'a vu, la méthodologie repose en bonne partie sur des données expertes à collecter, et non uniquement sur des bases de données nationales avec un maillage cantonal. Le modèle, n'est donc pas extensible à l'échelle nationale sous sa forme actuelle, détaillée et avec une maille cantonale, compte tenu du manque de bases de données pertinentes. Par contre, il serait envisageable de simplifier un peu l'approche et de coupler le modèle à la cartographie dynamique du gisement développée dans le livrable L9, à l'échelle départementale.

6 Bibliographie

1. Bamière, L., Bureau, J.C., Guindé, L., Guyomard, H., Jacquet, F., Treguer, D. (2007). Prospects for EU Biofuels Production and Trade. Working Paper 07/12. TRADEAG specific targeted research project. 6th Framework Programme. www.tradeag.eu.
2. Berndes, G., Hoogwojk, M., van den Broek, R. (2003). The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy* 25: 1-28.
3. Bioenergy NoE (2006), Bioenergy in Europe: opportunities and barriers. Network of Excellence, DG Research project, European Commission.
4. Cantelaube, P., Jayet, P.A. (2008). Geographical downscaling of outputs provided by the AROPAj economic farming model. Congress of the European Agricultural Economists Association, August 2008, Ghent, Belgium.
5. CEC(2008). Proposal for a directive of the European Parliament and of the council on the promotion of the use of energy from renewable sources. COM (2008) 19 final. European Commission, Brussels.
6. De La Torre Ugarte, D.G., Ray, D.E (2000). Biomass and bioenergy application of the POLYSYS modelling framework. *Biomass and Bioenergy* 18 : 291-308.
7. European Environment Agency (2006). How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? EEA Report n°7/2006.
8. Ericsson, K., Nilsson, L.J. (2006). Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach. *Biomass and Bioenergy* 30: 1-15.
9. Gohin (2007). Impacts of the European bio-fuel policy on the farm sector : a general equilibrium assessment. Paper presented at the conference “Bio-Fuels, Food and Feed Tradeoffs” sponsored by Farm Foundation and USDA, April 12-13, 2007, St Louis, Missouri.
10. Guinde, L., Jacquet, F., Millet, G. (2007). Impact du développement des biocarburants sur la production française de grandes cultures. Paper presented at « Journées INRA-SFER », Decembre 2007, Lille, France.
11. Graham, R.L., English, B.C., Noon, C.E. (2000). A Geographic Information System-based modelling system for evaluating the cost of delivered energy crop feedstock. *Biomass and Bioenergy* 18: 309-329.
12. Hellmann, F., Verburg, P.H. (2008). Spatially explicit modelling of biofuel crops in Europe. *Biomass and Bioenergy* (in press) doi: 10.1016/j.biombioe.2008.09.003.
13. Louhichi, K., Blanco Fonseca, M., Flichman, G., Janssen, S., Hengsdijk, H. (2005). A generic template for FSSIM, SEAMLESS Report n°4, SEAMLESS integrated project, EU 6th Framework Programme, contract n°010036-2, www.SEAMLESS-IP.org, 39 pp, ISBN n° 90-8585-032-0.
14. Petersen, J.E. (2008). Energy production with agricultural biomass: environmental implications and analytical challenges. *European Review of Agricultural Economics* 35: 385-408.
15. Schönart M. Schmid E., Schneider U., Liebhard P. (2009). Crop rotation modelling for integrated environmental assessment: case study results and empirical evidence. Proceedings of AgSAP conference, “Integrated Assessment of Agriculture and Sustainable Development : Setting the Agenda for Science and Policy”, 10-12 Mars 2009, Pays-Bas.
16. Sourie J-C, Tréguer D., Rozakis S. (2005). L'ambivalence des filières biocarburants INRA Sciences Sociales N°2 Décembre 2005.