

Le LIGNOGUIDE : une aide aux choix des cultures biomasse

Besnard A.¹, Ferchaud F.², Levraut F.³, Nguyen E.⁴, Marsac S.⁵, Savouré M.L.⁶

¹ Service Agronomie-Economie-Environnement, ARVALIS Institut du végétal, Station expérimentale de la Jaillière, 44370 La-Chapelle-St-Sauveur

² INRA-Unité AgrolImpact, Centre de Lille, Pôle du Griffon - Site de Laon, 180 rue Pierre-Gilles de Gennes, 02000 Barenton-Bugny

³ Agricultures & Territoires - Chambre d'agriculture Poitou-Charentes, Agropole - B.P. 50002 86550 Mignaloux-Beauvoir.

⁴ Agricultures & Territoires - Chambre d'agriculture de Picardie, 19 bis rue Alexandre Dumas, 80096 Amiens cedex 3

⁵ Service Agronomie-Economie-Environnement, ARVALIS - Institut du végétal, Station Inter-Instituts, 6 chemin de la cote vieille, 31450 Baziège

⁶ Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2 chaussée Brunehaut, F-80200 Estrées-Mons

Correspondance : el.nguyen@picardie.chambagri.fr

Résumé

On dénombre à ce jour plus d'une douzaine d'espèces cultivées dédiées à la production de biomasse (dites cultures lignocellulosiques) pouvant être implantées en France. Cette diversité, souvent méconnue, offre pourtant un choix intéressant, permettant d'optimiser les projets d'utilisation de cette biomasse. En effet, cette palette d'espèces lignocellulosiques permet d'intégrer au mieux les contraintes locales de sol et de climat, les exigences des process de valorisation ou encore l'insertion de ces cultures dans les assolements.

Le projet a pour première ambition de bien faire connaître les atouts mais aussi limites de chacune des cultures lignocellulosiques disponibles. Il fournit également des éléments d'appréciation et de comparaison des cultures leur permettant d'orienter le choix de la culture lignocellulosique en fonction d'exigences spécifiques, notamment les émissions de gaz à effet de serre, le rendement énergétique et les impacts sur la ressource en eau.

Le projet Lignoguide (CasDAR 2010-2012), fort de son réseau expérimental, a abouti à la constitution d'un guide d'aide au choix multicritères (production, environnement, économie, technique) à destination des agriculteurs, des porteurs de projets et responsables institutionnels et politiques.

Mots-clés : biomasse, cultures lignocellulosiques, aide au choix, guide LIGNOGUIDE, production, valorisation

Abstract : LIGNOGUIDE: support to the choice of biomass crops

Today, more than a dozen species are dedicated to the agricultural biomass production being able to be planted in France. This diversity, often underestimated, offers nevertheless an interesting choice, making it possible to optimize biomass projects. Indeed, this set of agricultural biomass species makes it possible to meet at best local conditions of soil and climate, the requirements of the processes of valuation or the insertion of these crops in rotation systems.

The project has, as a first aim, to promote assets and limits of each of the available biomass crops. It also supplies elements of appreciation and comparison of the crops allowing them to orientate the choice of the crop according to specific requirements, in particular greenhouse gas emissions, energy efficiency and impacts on water resource.

The Lignoguide project (CasDAR on 2010-2012), with its experimental network, ended in the constitution of a guide to help the biomass crop choice multicriteria (agronomic, environmental, economic, technical) bound for farmers, project developers and institutions and policy makers.

Keywords: biomass, help biomass crop choice, guide LIGNOGUIDE, crop, valuation

Introduction

La lutte contre les émissions de gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique et la réduction de la dépendance aux ressources fossiles constituent les principales motivations du développement des énergies renouvelables. Dans ce contexte, le recours à la biomasse est encouragé par les politiques européennes et françaises, au-delà des actuels biocarburants de 1^{ère} génération. Malgré tout, le bois et les coproduits agricoles, agroalimentaires et forestiers ne suffiront pas à atteindre les objectifs de 23% d'énergies renouvelables en France en 2020. Les cultures lignocellulosiques sont donc amenées à se développer.

De plus, le choix de la biomasse utilisée et de sa localisation dans l'exploitation agricole et dans le territoire impacte fortement la durabilité des filières, notamment le bénéfice social et environnemental, et la sécurité de l'exploitant. Il apparaît aussi que ce choix est souvent peu réversible et basé sur les seuls critères technologiques et économiques

Le projet s'est reposé sur un partenariat entre 15 structures : l'INRA, la Chambre régionale d'agriculture de Poitou-Charentes, ARVALIS et AGRO-TRANSFERT Ressources et Territoires, la Chambre régionale d'agriculture de Picardie, pilote du projet et les sites expérimentaux conduits par les Chambres d'agriculture de l'Aisne, de l'Eure, du Haut-Rhin, du Loiret, de l'Oise, Arvalis - Institut du végétal, Axereal, Arterris, les Lycées agricoles du Chesnoy et d'Aix Valabre ainsi que le FCBA institut technologique et l'association AILE (association d'initiatives locales pour l'énergie et l'environnement) pour leur expertise sur les taillis. Il a largement bénéficié de l'expertise du Réseau Mixte Technologique (RMT) Biomasse Energie Ressource et Territoire¹ dont le partenariat associe les organismes de développement (chambres d'agriculture, instituts techniques, association de développement et de transfert, coopératives et établissements de l'enseignement agricoles) et la recherche agronomique pour optimiser la production sur le territoire.

Ce projet s'est articulé en trois objectifs :

1. acquérir des références sur les critères d'adaptation des nouvelles cultures dédiées à la production de biomasse et adapter la méthode de diagnostic agronomique,
2. fournir des éléments de comparaison des cultures lignocellulosiques (cultures annuelles, pluriannuelles, pérennes, et Taillis à (très) Courte Rotation),
3. élaborer sur ces bases un guide d'aide au choix des cultures lignocellulosiques au regard des contraintes locales.

1. Les cultures biomasse dans le défi énergétique français

Les partenaires du projet ont fait le point sur les objectifs en terme de production d'énergies renouvelables et sur une base cartographique, ont proposé un état des lieux des surfaces occupées par les cultures lignocellulosiques et des sites de valorisation en France en 2012.



¹ Un réseau national de 20 partenaires de la recherche et du développement dédié à la production durable de biomasse sur les territoires - www.rmtbiomasse.org

Sur la base des feuilles de route officielles, la place de la biomasse dans les énergies renouvelables à l'horizon 2020 a été analysée, puis une estimation a été faite du rôle que pourraient y tenir les cultures lignocellulosiques afin d'éclairer le potentiel de développement de ces productions. Le recensement des productions et des sites de valorisation vise à donner un ordre de grandeur de l'extension spatiale de ces cultures et de leur utilisation.

1.1 Quelle place des cultures biomasse dans le mix énergétique ?

Le développement possible de la biomasse en Europe découle notamment du « Paquet Energie Climat » (Directive européenne 2009/28/CE du 23 avril 2009) qui a fixé l'objectif dit des "3 fois 20" à l'horizon 2020.

En France, en application de la précédente directive, le plan national d'action en faveur des énergies renouvelables a rehaussé à 23 % la part des EnR (35,7 Mtep) dans la consommation finale d'énergie en 2020 (155,2 Mtep), à comparer aux 14 % réalisés en 2010 et aux 5% en 2006.

1.2 Cultures biomasse : quelle place à terme en France ?

Si la place exacte de la biomasse agricole dans le mix énergétique français de 2020 ne peut être définie dès aujourd'hui avec certitude, on peut néanmoins dessiner quelques ordres de grandeur.

Biomasse toutes sources : Entre 2010 et 2020, les 35,7 Mtep issus d'EnR devraient provenir pour 67 % de la biomasse (24 Mtep), à comparer aux 59 % (13,2 Mtep) issus de la biomasse en 2010. Autrement dit, la mobilisation de la biomasse (toutes sources confondues) représente 80% des objectifs d'utilisation d'EnR en 10 ans.

Biomasse agricole : Si l'on considère stable d'ici 2020 la part de la biomasse agricole (20 %) dans les biocombustibles (biomasse moins agro-carburants), ce sont 3 à 4 Mtep qui pourraient être issues de la biomasse agricole.

La place relative des deux sources possibles de cette biomasse (résidus de culture et cultures lignocellulosiques) n'est pas définie à ce jour avec précision. Si la moitié (1,5 à 2 Mtep) en est issue des cultures lignocellulosiques, 375 000 à 500 000 hectares devraient être mis en culture, soit 4 000 à 5 000 hectares par département français avec une production de 10 t MS/ha/an (0.4 tep/tMS). Une telle surface correspond à la superficie consommée en 6 ans par l'artificialisation des terres agricoles en France (90 000 ha par an).

1.3 La situation actuelle des cultures biomasse en France

Le recensement exhaustif des surfaces actuellement occupées en France par les cultures lignocellulosiques est difficilement envisageable. Néanmoins, une enquête approfondie menée auprès des partenaires du RMT Biomasse, nous a permis d'en établir une évaluation complémentaire au recensement agricole (Figure 1), région par région.

Le développement de ces cultures est pour le moment nettement plus marqué dans la moitié nord du territoire, ceci en raison d'un contexte pédoclimatique plus favorable, renforcé par des entrepreneurs historiquement plus engagés sur cette filière. A ce jour, le cumul national des surfaces reste cependant très restreint : un peu moins de 3000 hectares pour l'ensemble "miscanthus + switchgrass", et un peu moins de 2200 hectares pour l'ensemble "TtCR + TCR", bien en dessous des objectifs de 2020 sous-tendus par le plan national de développement des EnR.

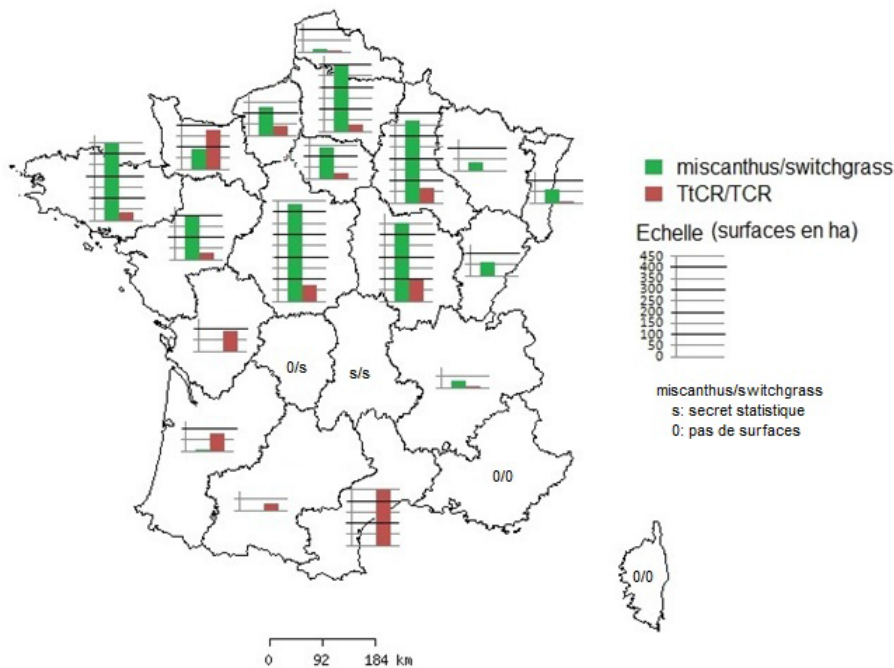


Figure 1 : Surfaces implantées en miscanthus/switchgrass et TCR/TtCR en France (données RGA 2010) implantations répertoriées au sein des exploitations uniquement.

2. Démarches utilisées, travaux mis en oeuvre dans le cadre du projet LIGNOGUIDE

2.1 Moyens mis en oeuvre pour l'acquisition de références agronomiques, techniques et économiques et l'analyse des potentialités et contraintes de sol et de climat dans les régions.

Pour illustrer la manière dont la localisation géographique au sein du territoire métropolitain affecte les productions des cultures lignocellulosiques et leur conduite culturale, les cas étudiés dans le projet sont distribués dans **six zones géographiques** constituées dans un souci de cohérence agricole et climatique (issues du projet CLIMATOR2).

- **Centre** : Nord : Centre / Champagne-Ardenne / Ile-de-France / Nord-Pas-de-Calais / Haute-Normandie / Picardie
- **Ouest** : Bretagne / Basse-Normandie / Pays-de-la-Loire
- **Nord-Est** : Alsace / Bourgogne / Franche-Comté / Lorraine
- **Centre-Est** : Auvergne / Limousin / Rhône-Alpes
- **Sud-Ouest** : Aquitaine / Midi-Pyrénées / Poitou-Charentes
- **Sud-Est** : Languedoc-Roussillon / Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Dans chacune de ces six zones, les résultats proposés correspondent à un site d'expérimentation mis en place dans le cadre du projet LIGNOGUIDE, à plusieurs stations météorologiques, ou encore à des moyennes départementales (rendements moyens). Les partenaires ont considéré que ces résultats devaient être considérés comme des situations locales, illustratives de la zone à laquelle ils sont rattachés.

² CLIMATOR : projet ANR/VMC 2007-2010, coordination INRA.

2.1.1 Le choix des espèces

Onze espèces, jugées porteuses d'enjeux, ont été sélectionnées : la fétuque, la luzerne, le miscanthus, le switchgrass, le maïs, le sorgho, le triticales, le saule (TtCR), l'eucalyptus (TCR), le peuplier (TCR) et la canne de Provence.

Ces espèces sont déjà présentes en France mais demandaient une consolidation des références. Les données étudiées sont issues du réseau expérimental déployé dans le cadre du projet LIGNOGUIDE, mais également de travaux antérieurs (en particuliers les projets LIDEA CasDAR 2006, Regix – PNRB 2005 et RMT Biomasse 2008/13).

Les données livrées par le projet ont été obtenues dans des conditions culturales précises. Leur utilisation dans des contextes de sol et de climat divers doit être assortie des précautions d'usage.

2.1.2 Les sites expérimentaux

Les travaux s'appuient sur un **réseau d'expérimentations national de 10 sites** implantés en sorgho, miscanthus et switchgrass depuis 2006-2008 donc déjà en production de références au démarrage du projet (Figure 2). Un réseau de suivi sur 5 grandes parcelles (miscanthus et switchgrass) a permis d'acquérir des références de rendement de biomasse et d'étudier la destruction des cultures pérennes pour une remise en culture.

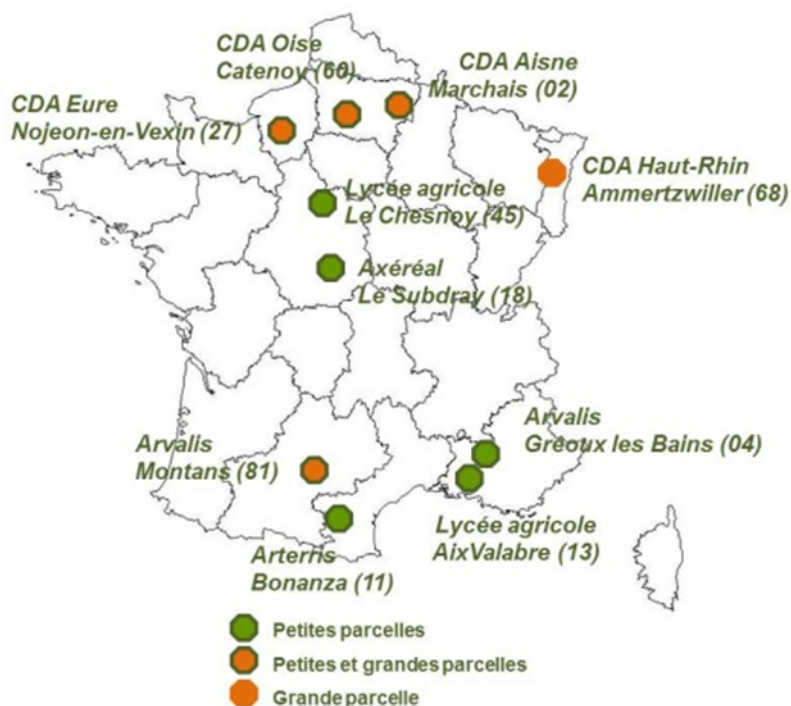


Figure 2 : Réseau expérimental LIGNOGUIDE

Ces sites expérimentaux couvrent quatre des six zones géographiques retenues dans le projet. Les déterminants et résultats (conditions climatiques, rendements, itinéraires techniques) des cultures mises en place ont été mis à plat pour chaque site. Un protocole expérimental commun a été appliqué pour une conduite de la culture identique pour tous les sites sur miscanthus, switchgrass et sorgho.

Les références acquises ont permis d'analyser les variations de performances des cultures entre sites et d'identifier les principaux facteurs limitants de la production de biomasse des cultures de miscanthus, switchgrass et sorgho. Cette démarche de diagnostic agronomique a pour objectif :

- de mieux appréhender les aires de production possibles et la productivité de ces cultures dans des conditions climatiques variées,
- de fournir une méthode de diagnostic agronomique éprouvée, à destination des conseillers agricoles, pour diagnostiquer les causes d'une baisse de rendement par rapport au potentiel de production des cultures et en conséquence d'ajuster les pratiques culturales.

Le diagnostic agronomique est défini comme une « méthode d'analyse réalisée sur un réseau de parcelles et destinée à expliquer les variations de rendement d'une culture en étudiant les facteurs qui jouent sur l'élaboration de ce rendement » (Doré et al., 1997). Il a permis d'analyser le rendement et ses composantes et de diagnostiquer un stress azoté et/ou hydrique sur chaque site expérimental.



Le Subdray (18) sorgho 21/10/2011 / Montans (81) miscanthus 16/08/2010 / Aix Valabre (13) switchgrass 25/07/2011

Figure 3 : Photos prises sur trois sites expérimentaux en 2010 et 2011

2.1.3 L'analyse des éléments climatiques déterminants

Les données de pluviométrie et d'évapotranspiration potentielle de 237 stations météorologiques réparties dans les six zones géographiques ont été analysées. Le déficit hydrique climatique (pluie – évapotranspiration potentielle) durant la saison de végétation (mai à septembre inclus) a été utilisé pour déterminer des classes de disponibilité hydrique climatique, sur la base desquelles une recommandation de réserve utile de sol est formulée conditionnant l'atteinte de rendements économiquement viables.

2.1.4 L'estimation de production moyenne

A partir des rendements moyens départementaux de cultures de référence (source Agreste) et de coefficients de conversion issus d'expérimentations de terrain, les rendements moyens départementaux (inférieurs aux maxima réalisables localement) de cultures lignocellulosiques ont été synthétisés sous forme de cartes.

2.1.5 Comparaison des cultures lignocellulosiques au regard de trois enjeux transversaux : énergétique, environnemental et économique.

Des simulations d'introduction des cultures biomasse dans les systèmes d'exploitation sous différentes contraintes pédoclimatiques ont abouti au calcul d'indicateurs techniques, économiques, énergétiques et environnementaux permettant de comparer les cultures.

Le projet examine le **rendement énergétique** des différentes cultures lignocellulosiques étudiées. Les cultures lignocellulosiques présentent en effet l'intérêt de produire (contenu énergétique de la biomasse) beaucoup plus d'énergie par unité de surface cultivée qu'elles n'en consomment pour la conduite de la culture (plantation, fertilisation, ...).

Il analyse l'**impact qualitatif des cultures lignocellulosiques sur l'eau, via le transfert de nitrate et de produits phytosanitaires**, avec des itinéraires techniques permettant d'assurer une production proche du potentiel pédoclimatique. La consommation en eau en régime pluvial est également étudiée. Ces impacts qualitatifs et quantitatifs sur l'eau sont chiffrés pour chacune des espèces étudiées ici, et mis en comparaison avec les impacts de quelques cultures à vocation alimentaire.

Le projet a également évalué l'effet des cultures lignocellulosiques en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de stockage/déstockage de carbone. Ces cultures constituent une contribution possible de l'agriculture à la lutte contre le changement climatique.

Le **prix d'intérêt de la biomasse**, comparativement au prix actuel et futur des énergies fossiles, est une composante essentielle de leur développement en France. Pour éclairer ce débat, les charges de production (poste par poste) des cultures lignocellulosiques ont été analysées dans différentes situations agricoles types.

En complément, trois indicateurs techniques ont été étudiés : la **Balance Globale Azotée, la consommation de carburant et le temps de travail**. Pour permettre la comparaison entre espèces annuelles (triticale, maïs, ...) et pérennes (miscanthus, TtCR, TCR, ...), ces résultats sont exprimés en valeurs moyennes par année de culture.

2.2 Moyens mis en œuvre pour faire état des surfaces implantées et sites de valorisation en France

Les cultures lignocellulosiques font depuis quelques années l'objet de développements opérationnels en France : surfaces mises en cultures, unités de conditionnement ou de transformation, structures de commercialisation ou de valorisation directe.

Les partenaires ont souhaité faire un point sur l'état opérationnel de la filière lignocellulosique en présentant quelques éléments concrets relatifs à la culture et aux utilisations de ces espèces.

2.2.1 Etat des lieux des surfaces cultivées et sites de valorisation en France.

Afin d'illustrer la dynamique autour de la filière biomasse en France, le projet a recensé sur une base cartographique les surfaces cultivées et sites de valorisation mis en place jusqu'en 2012. Non exhaustif, ce recensement vise néanmoins à donner un ordre de grandeur de l'extension spatiale de ces cultures et de leur utilisation.

Pour cet état des lieux, le projet a valorisé les données du Recensement Général Agricole 2010 sur les surfaces implantées de 2009-2010 et chaufferies ; pour la méthanisation il s'est appuyé sur les données de l'ADEME 2011 et de Bioénergie International 2012. Ces données de départ ont été complétées par des enquêtes auprès des principaux acteurs de la filière dans chaque grande région.

2.2.2 Retour d'expérience de réalisations opérationnelles.

Six exemples concrets de valorisation de cultures lignocellulosiques ont ouvert leur porte pour témoigner de leur retour d'expériences en matière de production de cultures biomasse et de valorisation en chauffage collectif, litière, isolation thermique, méthanisation... Ils concernent le miscanthus, le sorgho, le TtCR de saule et le TCR d'eucalyptus. Les composantes économiques, techniques et environnementales de chacune de ces réalisations ont été rapportées.

2.3 Moyens mis en œuvre pour référencer les structures impliquées dans la filière biomasse et projets de recherche et développement

Bien que relativement nombreux, distribués dans les territoires et souvent organisés en réseaux, les acteurs de la filière lignocellulosique ne sont pas toujours connus à l'extérieur de leur périmètre professionnel d'action.

Le projet a donc listé de manière la plus exhaustive possible, et en les distribuant dans les six zones géographiques définies, les structures publiques, parapubliques et privées intervenant dans la filière lignocellulosique en France. Il recense également quelques projets de recherche et développement aboutis ou en cours sur le thème de la biomasse agricole.

3. Résultats du projet LIGNOGUIDE : aide au choix des cultures lignocellulosiques à produire

3.1 Productivité et performances des cultures

La production de cultures lignocellulosiques soulève de nombreuses questions de la part des agriculteurs et des conseillers agricoles : Quelles cultures sont adaptées au contexte de mon exploitation ? Quels rendements vais-je atteindre ? Quel est l'itinéraire technique de ces cultures ?... Le LIGNOGUIDE apporte des éléments de réponse.

3.1.1. Un guide pour estimer la production atteignable des cultures lignocellulosiques

Le rendement des cultures dédiées à la production de biomasse est un facteur de choix essentiel qui reste difficile à évaluer. Deux approches sont proposées afin d'estimer ces rendements :

Une estimation des rendements moyens départementaux récoltables en conditions agricoles. Ils sont obtenus en mettant en relation les rendements des cultures lignocellulosiques connus localement, avec les rendements de cultures dites « de référence » pour lesquelles des statistiques départementales annuelles existent. La Figure 4 présente les rendements récoltables départementaux du triticale plante entière ainsi estimés.

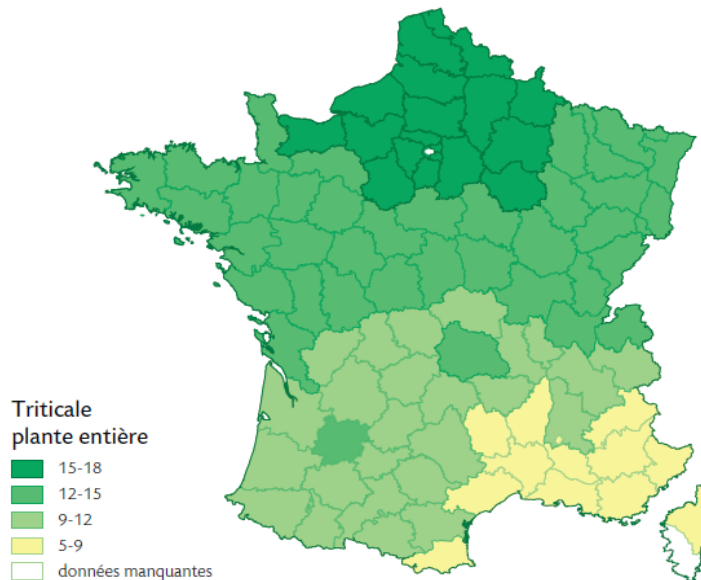


Figure 4 : Estimation des rendements moyens départementaux récoltables pour le triticale plante entière (t M.S./ha)

Une estimation des rendements atteints en petites parcelles expérimentales, mesurés sur le réseau de 9 sites d'essai suivis dans LIGNOGUIDE (Figure 5). Ces rendements permettent de comparer les performances de plusieurs cultures dans des conditions pédoclimatiques finement caractérisées et avec des pratiques culturales connues. Ce réseau d'essais a par ailleurs permis d'étudier les facteurs limitants de la production du sorgho, ainsi que du miscanthus et du switchgrass en pleine production.

3.1.2 Un guide pour mettre à disposition les références techniques sur les cultures lignocellulosiques

Le LIGNOGUIDE compile au sein de « fiches cultures » synthétiques des références sur 9 cultures lignocellulosiques. Ces fiches regroupent les principaux éléments de conduite culturale, des estimations de productivité et d'adaptation au milieu, des aspects économiques et qualitatifs de la biomasse produite, ainsi que les principaux impacts environnementaux.

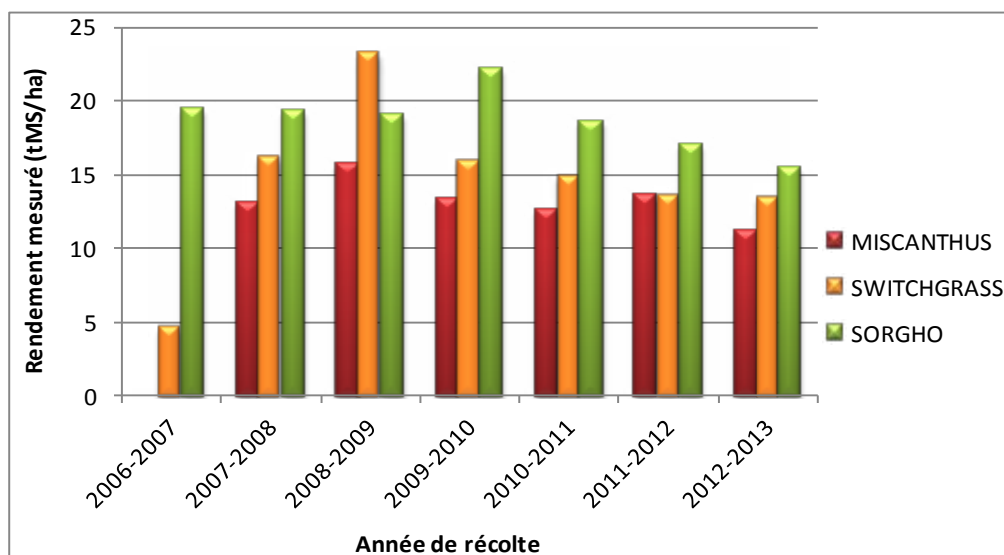


Figure 5: Exemple de rendements mesurés sur placettes en automne pour le sorgho et en fin d'hiver pour le miscanthus et le switchgrass, sur le site du Subdray (18)

3.1.3 Un guide pour comparer les cultures selon différents critères

Pour faciliter l'aide au choix, un tableau de comparaison des espèces a été élaboré, comportant 18 critères techniques, organisationnels, économiques et environnementaux.

Prenons l'exemple du choix d'une culture **utilisable en combustion**, à partir d'une sélection de 4 critères (Tableau 1). Mis à part les espèces ligneuses, le tableau indique une utilisation des espèces avec une récolte réalisée « en sec », c'est-à-dire à des teneurs en humidité faibles. La luzerne est peu adaptée pour cette valorisation en raison de sa richesse en azote et des risques d'émission d'oxydes d'azote.

Le critère « adaptation à différents milieux » met en avant l'aptitude de la plante à être cultivée dans des milieux pédoclimatiques variés. C'est le cas de la fétuque élevée et du triticale. A l'opposé, d'autres espèces ont des aires de cultures limitées en raison d'exigences fortes vis à vis du climat (eucalyptus) ou vis-à-vis du sol (sol très bien alimenté en eau pour le saule, non hydromorphe pour le miscanthus).

Le « critère besoin en main d'œuvre » exprime le temps nécessaire à la réalisation des opérations culturales et de récolte d'une culture, moyenné sur la durée de vie de la culture.

Le miscanthus par exemple nécessite moins de 4 heures/ha/an : le temps de plantation est amorti sur la durée de vie de la culture (15 ans), il y a une seule récolte par an et peu d'interventions en année de production hormis de la fertilisation. A l'inverse, la luzerne demande plus de 6 heures de main d'œuvre/ha/an : la durée de la culture est limitée à 5 ans avec 3 récoltes par an.

Le critère « niveau de charges » comptabilise les charges qui font décaisser de la trésorerie annuellement. Les espèces sont classées en trois groupes : moins de 700 €/ha/an, entre 700 et 900 €/ha/an et plus de 900 €/ha/an. Le niveau d'intrant, en particulier la fertilisation azotée, dégrade la position de la fétuque.

Ceci est une illustration de la lecture du tableau de synthèse où chaque critère est analysé de manière indépendante. In fine l'utilisateur retiendra les critères qu'il jugera les plus pertinents, quitte à apporter une pondération qui lui est propre.

	Espèces annuelles	Espèces pérennes					Espèces ligneuses		
	Triticale	Fétuque élevée	Association fétuque / luzerne	Luzerne	Miscanthus	Switchgrass	T.T.C.R. saule	T.C.R. peuplier	T.C.R. eucalyptus
Utilisation : combustion	Récolte en sec	Récolte en sec	Récolte en sec	Récolte en sec	Récolte en sec	Récolte en sec			
Adaptation à différents milieux									
Besoin en main d'œuvre									
Niveau de charges									

Légende du tableau :

	Point fort de la culture
	Point intermédiaire
	Point faible de la culture

Tableau 1 : Extrait du tableau de comparaison du LIGNOGUIDE : classement selon quatre critères sur une pré-sélection de cultures biomasse valorisable en combustion

3.2 Critères techniques économiques et environnementaux pour l'aide au choix de cultures

3.2.1. Comparaison des cultures quant à leurs impacts environnementaux

La production d'énergie potentielle permise par chacune des productions lignocellulosiques est largement supérieure à la consommation d'énergie primaire (directe et indirecte) engagée pour leur conduite.

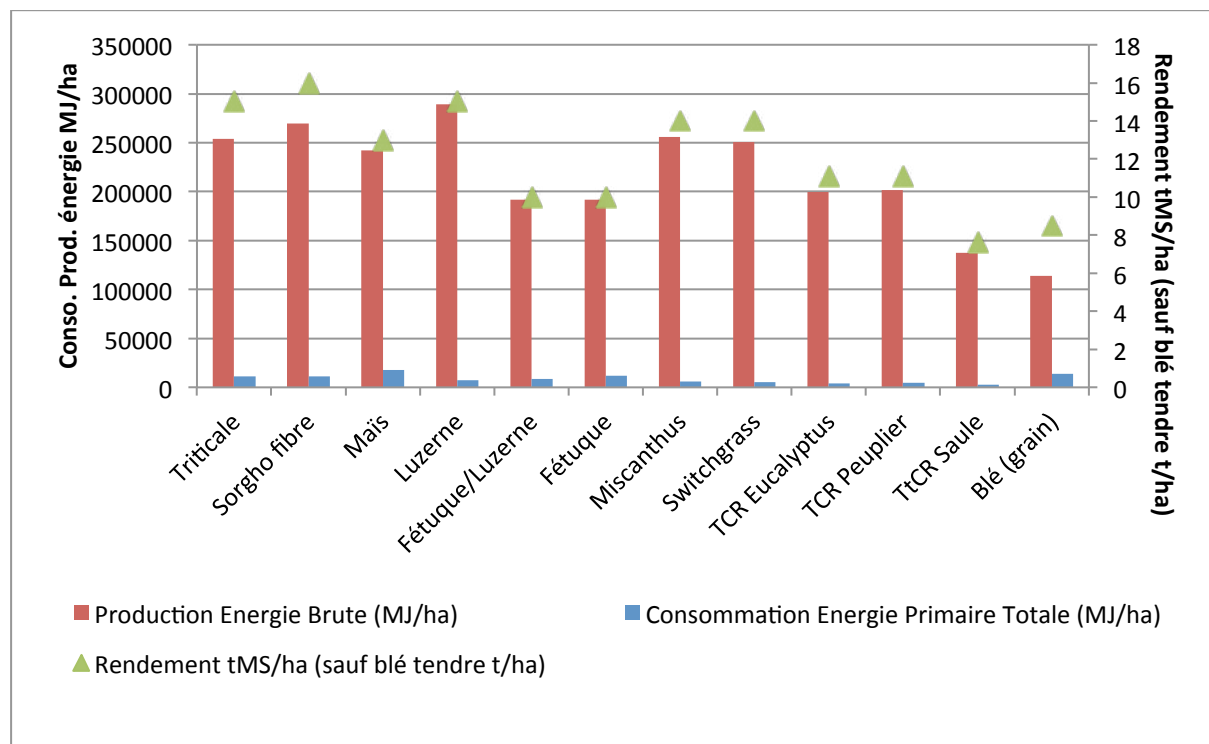


Figure 6 : Exemple de production et consommation d'énergie de différentes cultures lignocellulosiques à rendement fixé et de la culture de référence (blé) dans le Nord-Est.

Les cultures pérennes ont les niveaux les plus bas en raison d'une moindre fertilisation, de l'absence de travail du sol annuel et de l'amortissement d'opérations lourdes sur l'ensemble de la durée de vie de la culture. Sur les cultures pérennes, les consommations en carburant représentent près de 50% des consommations d'énergie (essentiellement récolte).

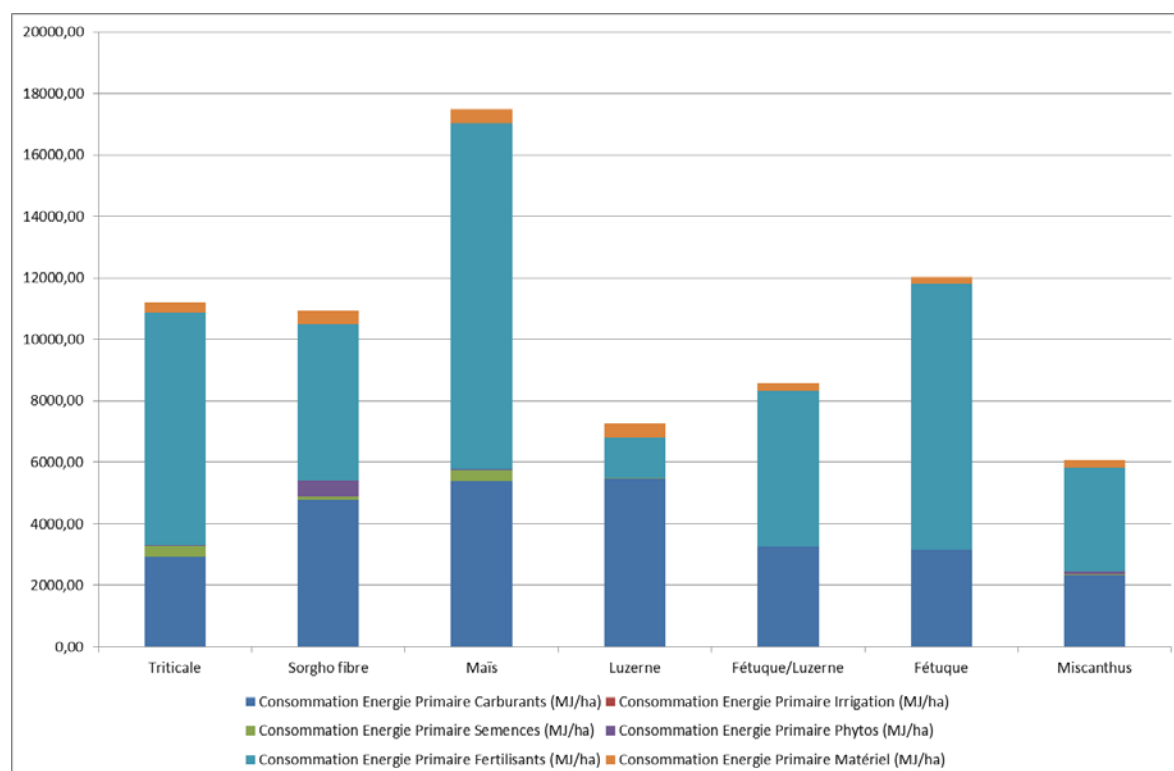


Figure 7 : Exemple de répartition de la consommation d'énergie par poste de charge pour différentes cultures lignocellulosique et pour la culture de référence

Les apports de fertilisants (cultures annuelles) et le nombre de récoltes (cultures pluriannuelles fourragères) expliquent majoritairement les écarts entre cultures. Pour les cultures annuelles, conformément aux références, la fertilisation reste le principal poste de consommation. Les opérations lourdes de récolte et l'absence ou très faible fertilisation sont les facteurs d'explication majeurs des consommations d'énergie sur cultures ligneuses (TCR).

L'utilisation d'engrais (en particulier les engrais azotés dont la fabrication est très émettrice de GES car consommatrice d'énergie fossile) et la consommation de carburants au cours des opérations culturales (semis, travail du sol, passages de traitements phytosanitaires, opérations de récolte) sont les principales sources d'émissions de GES liées aux consommations de ressources fossiles (Gac *et al.*, 2010). Ces émissions vont donc varier en fonction de l'itinéraire technique.

LIGNOGUIDE montre en effet que les facteurs de variation pour les émissions de GES sont les mêmes que pour les consommations énergétiques, mais avec un poids prépondérant pour la fertilisation azotée. Cette réduction peut être relativement importante, par exemple d'un facteur 3 à 5 dans le cas du switchgrass en comparaison avec une rotation de cultures annuelles (Adler *et al.*, 2007). Les cultures ayant les besoins en azote les plus réduits (luzerne, T(t)CR et cultures pérennes) présentent donc les plus faibles niveaux d'émission (Figure 8).

Concernant les impacts sur l'eau (quantité et qualité), différents indicateurs et/ou références expérimentales ont été utilisés. Par exemple, l'IFT (Indice de Fréquence de Traitement), qui mesure l'importance des traitements phytosanitaires, montre une pression faible pour les cultures lignocellulosiques, et particulièrement pour les cultures pérennes et les T(t)CR.

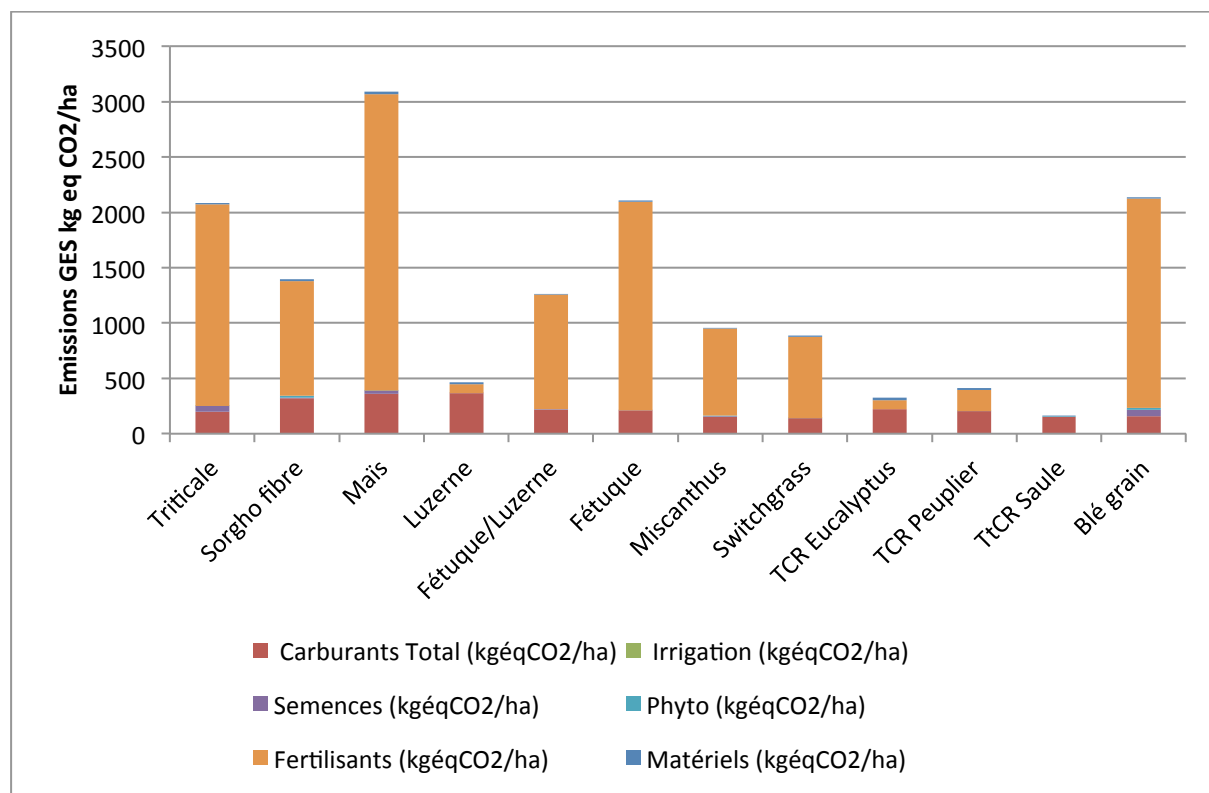


Figure 8 : Exemple de répartition des émissions de GES par poste de charge pour différentes cultures lignocellulosique et la culture de référence (blé) en région Nord

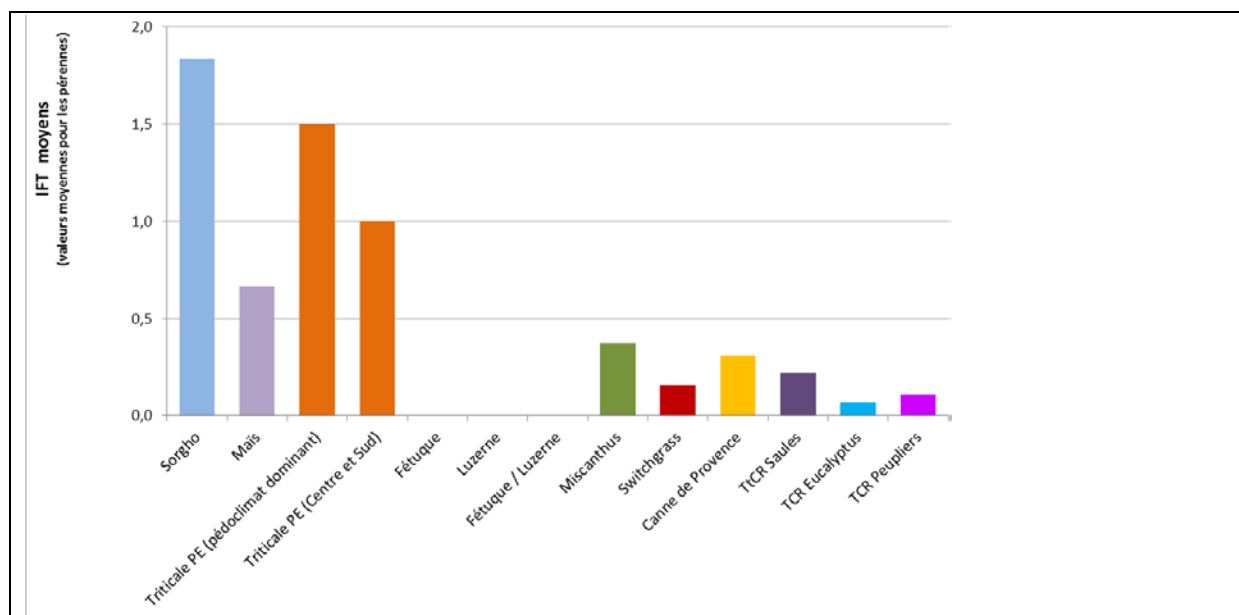


Figure 9 : Comparaison des IFT moyens des cultures lignocellulosiques, tous produits phytosanitaires confondus.

Pour les cultures pérennes, la valeur présentée est une moyenne sur 15 années (cas du miscanthus, switchgrass et canne de Provence), 20 années (cas des TtCR de saules), ou 22 années (cas des TCR de peupliers et eucalyptus). Les IFT obtenus, compris entre 0 et 2, s'avèrent faibles en comparaison des IFT des cultures alimentaires conventionnelles (par exemple : IFT de 4.5 pour du blé tendre en Picardie, IFT de 3.9 pour du colza dans la Plaine de Lyon).

Les itinéraires techniques des cultures lignocellulosiques comportent peu d'intrants phytosanitaires et impliquent une pression sur la ressource en eau relativement faible. L'IFT et le potentiel de transfert des matières actives vers les eaux de profondeur mettent en avant une pression particulièrement faible pour les cultures pérennes, après la phase d'implantation.

Néanmoins, le risque de pollution des eaux de profondeur par les molécules phytosanitaires n'est pas directement lié à la pression des pratiques. La sensibilité du milieu doit être prise en compte. Les facteurs à l'origine d'une forte sensibilité du milieu sont par exemple la présence d'un aquifère à faible profondeur, des précipitations hivernales excédentaires (P-ETP élevé), un sol filtrant et/ou peu profond et/ou avec peu de matière organique,... (Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2011).

Les risques de pollution des eaux par les nitrates ont également été évalués, en particulier sur les parcelles du réseau expérimental. La mesure de reliquat d'azote faite à l'automne est un indicateur intéressant pour comparer les différents systèmes de culture vis-à-vis des pertes de nitrate (Mary *et al.*, 1996). Ce dernier a donc été utilisé comme un indicateur du risque potentiel de perte en nitrate par lixiviation pendant l'hiver. Il permet de comparer les espèces entre elles sur chaque site et en moyenne sur le réseau expérimental, dans le cadre des pratiques de fertilisation azotée mises en œuvre sur le réseau (doses d'azote "modérées" fixées pour compenser les exportations).

	Stock d'azote minéral mesuré en automne (kg N ha ⁻¹)*		
	Miscanthus	Switchgrass	Sorgho
Marchais	26.9	37.1	25.7
Catenoy	31.3	12.4	
Nojeon	65.9	56.4	120.2
Le Subdray	10.8	12.1	11.2
Le Chesnoy	18.8	23.1	
Montans	8.5	7.3	
Gréoux	18.7	18.2	
Aix Valabre	35.3	68.2	112.2
Bonanza		15.0	74.5
<i>Moyenne</i>	27.0	27.8	68.8

Tableau 2 : Stocks d'azote minéral mesurés en automne sur le réseau LIGNOGUIDE (moyennes des années 2010 et 2011).

* Les stocks d'azote minéral (nitrate et ammonium) sont calculés sur la profondeur de prélèvement (entre 25 et 90 cm selon les sites) à partir des mesures de teneur en azote par horizon et d'une estimation de la densité apparente du sol.

Ces mesures montrent un faible risque de pertes de nitrate pour les cultures pérennes (miscanthus et switchgrass) en phase de production, ce qui est cohérent avec les données disponibles dans la littérature scientifique (Aronsson et Bergstrom, 2001 ; Christian et Riche, 1998 ; Goodlass *et al.*, 2007 ; Mclsaac *et al.*, 2010 ; Mortensen *et al.*, 1998 ; Schmidt-Walter et Lamersdorf, 2012).

3.2.2 Comparaison des cultures sur le plan économique

Des coûts de production en sortie de parcelle ont été calculés à partir de ces mêmes itinéraires techniques et structures d'exploitation de référence. Deux méthodes d'évaluation ont été appliquées : un calcul de coûts complets intégrant l'ensemble des facteurs de production (intrants, mécanisation, main d'œuvre, foncier et autres charges de structure) et un calcul de coûts « cash ». Les coûts complets permettent de se comparer à un prix de vente et d'évaluer la compétitivité de la culture à moyen terme. Les coûts « cash » ou « trésorerie » intègrent uniquement les charges décaissant de la trésorerie. Il s'agit d'un indicateur utilisable sur une campagne de production.

Le coût des cultures pérennes est calculé sur la durée de production avec un amortissement des charges spécifiques aux phases d'implantation et de destruction. Un « manque à gagner » pour des années sans production est également intégré.

Les variations de coût observées (50 à 165 €/t M.S. en coûts complets sur toutes les régions étudiées) sont majoritairement dues à la productivité de chaque espèce. Les charges générées par la récolte (une part de la mécanisation) sont également un facteur qui pèse sur ces coûts, que ce soit par le nombre de récoltes pour les fourragères ou par les matériels et opérations nécessaires (TCR...). Les charges d'implantation des cultures pérennes, même amorties, peuvent générer un élément de coût important (miscanthus).

Les marges brutes disponibles pour les cultures alimentaires sur les mêmes fermes de référence ont permis de calculer des prix de vente des cultures lignocellulosiques. Connaissant le niveau de charges opérationnelles et le rendement des cultures lignocellulosiques, le prix de vente alors calculé permet d'atteindre une marge brute équivalente à la culture alimentaire de référence sur la zone (blé ou maïs selon les régions). Trois prix de biomasse ont été calculés pour intégrer une variabilité du cours des productions alimentaires : prix haut, bas, médian. Ces prix de vente de biomasse en scénario médian varient de 45 à 150 €/t M.S. (toutes zones confondues) avec une moyenne proche de 100 €/t M.S.

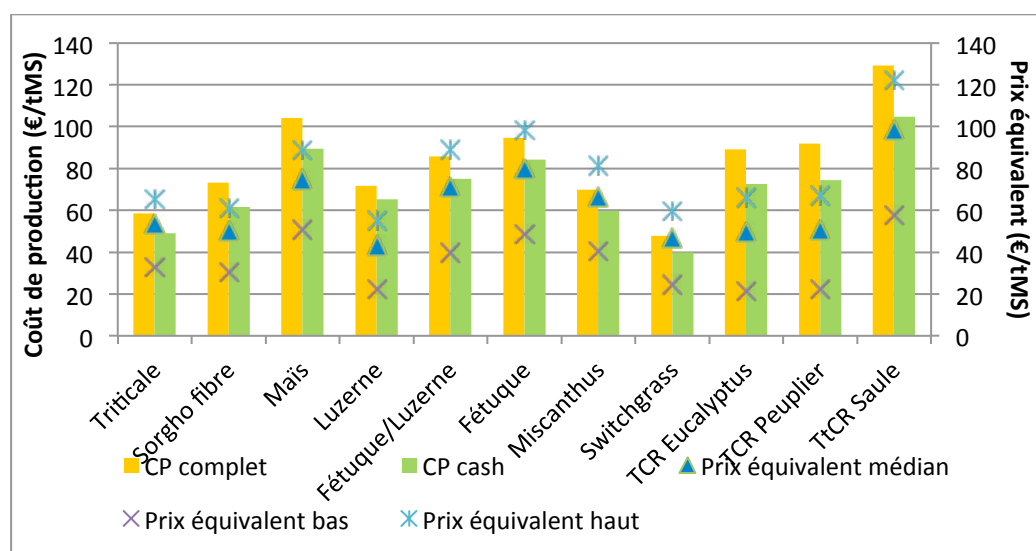


Figure 10 : Exemple de coûts de production et prix équivalents (€/t M.S.) en zone géographique Centre-Nord – Région Centre.

Les résultats obtenus ci-dessus sur les plans techniques, économiques et environnementaux ont été repris pour chacune des grandes régions de production étudiées.

L'ensemble de ces indicateurs techniques, économiques et environnementaux constitue autant de facteurs de choix pour la mise en œuvre des cultures, selon les objectifs de chaque acteur de projets de valorisation. Ces premiers indicateurs d'aide au choix devront être précisés avec des observations de ces cultures sur du plus long terme mais également avec l'intégration d'autres paramètres comme le stockage de carbone, les facteurs de changement d'affectation des sols, ou des indicateurs sur la biodiversité.

En conclusion

Pour transférer les dernières connaissances sur les cultures ligno-cellulosiques et faciliter leur appropriation, le projet Lignoguide (CasDAR 2010-2012), fort de son réseau expérimental, a abouti à la constitution d'un guide d'aide au choix multicritères (production, environnement, économie, technique) à destination des agriculteurs, des porteurs de projets et responsables institutionnels et politiques.

Il s'agit d'apporter à ces acteurs des éléments de connaissance et de comparaison des cultures lignocellulosiques, afin d'optimiser le choix des cultures en fonction des exigences locales, en limitant la concurrence sur l'usage des terres et en optimisant les bilans environnementaux.

Les publics, visés par cet ouvrage sont par conséquent variés, des plus spécialisés aux plus généralistes, chacun ayant ses propres centres d'intérêt. Pour répondre à cette diversité, le livrable du projet propose une lecture à la carte qui permettra à chacun :

- d'acquérir une connaissance d'ensemble sur espèce donnée (ex : fiches cultures) ;
- de comparer entre elles deux espèces pour un critère donné (ex : émissions de GES entre un switchgrass et un TCR de saule) ;
- d'avoir une vision des potentialités dans une région donnée (ex : indicateurs par zone géographique).



Une centaine d'acteurs du monde agricole et rural ont fait le point sur ces défis lors du colloque du 11 avril 2013 (producteurs, porteurs de projet, instituts techniques, instituts de recherche, organismes de développement, enseignement, association, organismes institutionnels et financiers ...). L'occasion de présenter et de discuter des résultats du projet LIGNOGUIDE et plus largement des livrables du Réseau Mixte Technologie (RMT) Biomasse, Energie, Environnement et Territoire, travaux soutenus par le Ministère de l'agriculture au travers du fond de développement agricole et rural.

Références bibliographiques

Adler P.R., Del Grosso S.J., Parton W.J., 2007. Life-cycle assessment of net greenhouse-gas flux for bioenergy cropping systems. *Ecological Applications* 17, 675-691.

Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2011. Méthode de calcul des indicateurs DAE-G. 178 pages

Aronsson P.G., Bergstrom L.F., 2001. Nitrate leaching from lysimeter-grown short-rotation willow coppice in relation to N-application, irrigation and soil type. *Biomass & Bioenergy* 21, 155-164.

Christian D.G., Riche A.B., 1998. Nitrate leaching losses under *Miscanthus* grass planted on a silty clay loam soil. *Soil Use and Management* 14, 131-135.

Czernichowski -Lauriol I., Caudron M., 1999. « Pollution des eaux souterraines et superficielles par des produits phytosanitaires dans un même bassin hydrogéologique. Application dans le bassin de la Serre, département de l'Aisne ». Rapport BRGM R 40615, 71 pages.

Doré T., Sebillotte M., Meynard J.M., 1997. A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield, *Agr. Syst.* 54, 169-188.

Gac A., Deltour L., Cariolle M., Dolle J.B., Espagnol S., Flenet F., Guingand N., Lagadec S., Le Gall A., Lellahi A., Malaval C., Ponchant P., Tailleux A. GES'TIM. Guide méthodologique pour l'estimation des impacts des activités agricoles sur l'effet de serre. Juin 2010, 156 p.

Goodlass G., Green M., Hilton B., McDonough S., 2007. Nitrate leaching from shortrotation coppice. *Soil Use and Management* 23, 178-184.

Mary B., Beaudoin N., Benoit M., 1996. Prevention de la pollution nitrique a l'échelle du bassin d'alimentation en eau. In : Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, G. Lemaire , B. Nicolardot (Eds.), INRA Editions, Paris, p. 289-312

Mclsaac G.F., David M.B., Mitchell C.A., 2010. *Miscanthus* and switchgrass production in Central Illinois: impacts on hydrology and inorganic nitrogen leaching. *Journal of Environmental Quality* 39, 1790-1799.

Mortensen J., Nielsen K.H., Jorgensen U., 1998. Nitrate leaching during establishment of willow (*Salix viminalis*) on two soil types and at two fertilization levels. *Biomass & Bioenergy* 15, 457-466.

Schmidt -Walter P., Lamersdorf N., 2012. Biomass Production with Willow and Poplar Short Rotation Coppices on Sensitive Areas—the Impact on Nitrate Leaching and Groundwater Recharge in a Drinking Water Catchment near Hanover, Germany. *BioEnergy Research* 5, 546-562.