



Rapport intermédiaire **INTERÊT ET POTENTIALITES DE LA PRODUCTION DE MISCANTHUS**

Faisabilité du développement des cultures énergétiques en Île de France

Novembre 2008

Ferme Expérimentale AgroParisTech
Projet Grignon Energie Positive
78850 THIVERVAL-GRIGNON
Tél : 01 30 54 37 34

grignonenergiepositive@agroparistech.fr <http://www.grignonenergiepositive.fr/>

Etude réalisée avec le soutien de l'ADEME
Délégation régionale d'Île de France
Convention N° 0731C0572 – Suivie par Dominique CRIMÉ



Sommaire général

I. Introduction	3
II. Etat de l'art	4
II.1. Objectif	4
II.2. Aspects techniques et technologiques	4
II.2.1 ... relatifs à la production	4
II.2.2 ... relatifs à la valorisation	12
II.3. Aspects économiques.....	16
II.3.1 Coût année 0	17
II.3.2 Coûts années 1 à 14.....	17
II.3.3 Coûts totaux.....	17
II.3.4 Aides à la production	17
II.3.5 Conditions générales de rentabilité et d'efficacité économique	18
II.3.6 Le miscanthus dans l'économie de l'exploitation.....	21
II.4. Aspects environnementaux	27
II.4.1 Bilan énergétique	27
II.4.2 Stockage de carbone dans la biomasse et dans le sol	28
II.4.3 Autres indicateurs environnementaux.....	29
II.5. Aperçu des dispositifs d'expérimentation et de démonstration en Europe	32
II.5.1 Bref historique du miscanthus en Europe	32
II.5.2 Situation actuelle du miscanthus en Europe	32
II.5.3 En France	32
III. Description du projet de plateforme miscanthus à Grignon.....	35
III.1. Les caractéristiques de la ferme de Grignon	35
III.2. Objectif	35
III.2.1 Diverses propositions de dimensionnement et d'objectif pour la plateforme miscanthus de Grignon	37
IV. Conclusion.....	40
V. Bibliographie :	42

Table des annexes

A.1 Annexe 1 : Coûts de production du miscanthus	46
A.2 Annexe 2 : Temps de travail pour la culture du miscanthus	47
A.3 Annexe 3 : Coûts de production du switchgrass	48
A.4 Annexe 4 : Coûts de production du phalaris	49
A.5 Annexe 5 : Coûts de production du TTCR de Saule.....	50
A.6 Annexe 6 : Article du code rural sur les aides à la production du miscanthus	51

I. Introduction

L'objet du présent document est de faire un état de l'art sur la production et la valorisation du miscanthus, et d'examiner l'opportunité de mener une étude pratique approfondie à la ferme expérimentale de Grignon.

La première partie de ce rapport est présentée en deux temps :

- une analyse de la faisabilité et de la portée économique du développement de la production à partir de différents résultats de recherches conduites en Europe et de travaux d'analyse conduits dans le contexte de Grignon
- un bref aperçu du dispositif d'expérimentation et de démonstration en Europe

Une deuxième partie est consacrée à une proposition pour la mise en place d'une plateforme miscanthus à Grignon, dans le cadre du projet Grignon Energie Positive.

Le projet Grignon Energie Positive consiste à installer sur la ferme expérimentale d'AgroParisTech à Grignon une plateforme d'expérimentation et de démonstration, à partir de laquelle il est possible :

- d'explorer et évaluer des solutions techniques innovantes qui concilient à l'échelle de l'exploitation agricole les enjeux de la production alimentaire, du réchauffement climatique et de la fin des énergies fossiles,
- de rassembler et diffuser, vers les professionnels et les institutionnels, les résultats obtenus sur la ferme et les informations disponibles, en France et à l'étranger, susceptibles d'apporter des réponses pertinentes face à ces trois défis,
- de communiquer vers le grand public, jeunes et adultes, pour les sensibiliser à ces défis et les préparer à les relever, sans perdre de vue l'objectif de nourrir les 9 milliards de terriens qui occuperont notre planète dans moins de 50 ans.

Ce projet a été lancé fin 2005 et suit depuis 2007 sa phase opérationnelle.

Une nouvelle voie d'expérimentation et de démonstration s'est ouverte pour le programme GE+ en 2008, dans le domaine de la production de références sur les possibilités de développement de cultures énergétiques, plus précisément du Miscanthus. L'enjeu est à la fois l'efficacité économique de ce choix de production, mais aussi et surtout la capacité à améliorer le bilan environnemental de ces cultures, à travers des itinéraires techniques minimisant le recours aux intrants. Les thématiques abordées épousent par ailleurs l'orientation significative du Conseil Régional d'Ile-de-France vers les problématiques énergétiques et environnementales dans le cadre du plan régional Energie 2006 - 2010, et l'intérêt de l'Ademe pour les cultures énergétiques.

Les objectifs poursuivis passent par une première phase d'évaluation (suivi rapproché) d'une culture pilote de Miscanthus, de taille relativement réduite, qui a été lancée au printemps 2008. La réalisation d'une véritable plateforme Miscanthus de référence sur la ferme nécessite la mise en oeuvre de cette culture à l'échelle de l'exploitation, associée à un protocole d'expérimentation et de suivi des cultures, et éventuellement par l'essai de différentes voies de valorisation, énergétique ou non.

II. Etat de l'art

II.1. Objectif

L'objet de cette première partie est de proposer un état des lieux de la production de miscanthus en Île-de-France, en France et en Europe, mis dans la perspective d'autres cultures énergétiques. L'objectif est de s'interroger sur la faisabilité de cette culture en Île-de-France et de repérer des points sensibles ou critiques qu'il pourrait être intéressant de tester dans un cadre scientifique et technique, compte tenu des problématiques actuelles.

II.2. Aspects techniques et technologiques ...

II.2.1 ... relatifs à la production

+ Le miscanthus en bref

Le miscanthus est une **graminée ligneuse et pérenne**, originaire d'Asie du Sud Est. Il y a 20 espèces du genre *Miscanthus*. En Europe continentale et au Royaume-Uni, la majorité des recherches s'est focalisée sur l'espèce *Miscanthus spp giganteus*¹. C'est un hybride naturel entre *M. sacchariflorus* et *M. sinensis* (DTI 2003). *M. spp giganteus* est constitué d'une gaine ligneuse cylindrique creuse sur laquelle des feuilles alternes coupantes et étroites sont insérées. Le miscanthus produit un rhizome sur lequel se développent des bourgeons constitués de feuilles rugueuses en forme d'écaille. Chaque bourgeon donne une tige. Le rhizome de *M. giganteus* est un organe de réserve qui stocke de l'énergie et des nutriments. Le système racinaire de la plante est constitué de racines fasciculées partant du rhizome et pouvant atteindre 2,5 mètres de profondeur (Neukirchen, 1999).



Figure 1. Miscanthus mature. Photo : INRA Lille.

¹ On retrouve également cette espèce sous d'autres noms : *Miscanthus x giganteus*, *Miscanthus sinensis giganteus* ou simplement *Miscanthus giganteus*

Dans son environnement naturel, la plante est utilisée à différentes fins, allant du pâturage du bétail jusqu'au matériau de construction d'habitations en passant par la production de papier (voir II.2.2 p.12). Une fois mise en place, une culture de miscanthus donne des tiges semblables à des roseaux, et pouvant mesurer jusqu'à trois voire même quatre mètres de haut en été (Baldos, 2006), avec un diamètre de 10 mm (DEFRA, 2001).

Le miscanthus, à l'instar du maïs et de la canne à sucre, est **une plante en C4**. En tant que telle, elle est particulièrement efficace pour l'utilisation de l'eau, de l'azote et la conversion de l'énergie lumineuse en matière organique.

Les systèmes végétaux en C4 diffèrent des systèmes en C3 (par exemple : blé, avoine, riz) par le déroulement de la phase non photochimique de la photosynthèse, où l'énergie solaire, préalablement convertie en énergie chimique, sert à transformer le dioxyde de carbone en sucres. Les enzymes des plantes en C4 travaillent en effet avec des pressions partielles en CO₂ plus faibles que celles nécessaires aux enzymes du cycle des plantes en C3. Ainsi les plantes en C4 ouvrent moins leurs stomates, mais fixent quand même du CO₂. Pour leur fonctionnement elles requièrent davantage d'énergie (lumière et chaleur) que les plantes en C3, mais elles ont une meilleure efficacité photosynthétique, et utilisent l'eau et l'azote plus efficacement.

En Grande-Bretagne, le rendement moyen des cultures matures (i.e. excluant les 3 premières années) est d'environ 13 tonnes de matière sèche (tMS) par hectare par an. Les rendements ont parfois excédé 16 tMS/ha/an sur les sites les plus productifs (sols argileux, argilo-limoneux, sols tourbeux) (DEFRA, 2001). Certaines sources avancent que le rendement peut atteindre plus de 20 tMS/ha/an selon la maturité de la plante, les conditions climatiques, et l'époque de récolte de la plante (Baldos, 2006). Dans de moins bons sols (par exemple dans des sols sableux drainants) les rendements sont de l'ordre de 9 tMS/ha et parfois moins (DEFRA, 2001).

Par comparaison, le saule en taillis à très courte rotation (TTCR), culture pérenne dédiée à la production de bois énergie et récoltée tous les 3-5 ans, produit des rendements de 5 à 12 tMS/ha/an. Le panic érigé (*switchgrass*), qui est également une herbacée rhizomateuse pérenne, a un rendement estimé de 8 à 20 tMS/ha/an. Sous nos latitudes, les rendements s'étaleraient plutôt entre 8 et 15 tMS/ha/an. Quant au blé, il produit en France des rendements d'environ 8 à 15 tMS/ha/an², tandis que l'orge produit environ 5 à 10 tMS/ha/an² (CTIFL, 2006).

Le miscanthus présente donc à première vue un potentiel intéressant, mais qu'il convient de tester dans les conditions de la ferme de Grignon pour déterminer si cette culture est adaptée au contexte pédoclimatique.

+ Avantages et contraintes liés à l'implantation

- Production, provenance et disponibilité des rhizomes

Le miscanthus cultivé en Europe est principalement l'espèce hybride et stérile *M. spp giganteus*. La stérilité des graines empêche la propagation de la plante par dispersion des graines. Néanmoins le miscanthus se multiplie par son système rhizomateux.

² Rendement plante entière, récoltée à 10 cm du sol

Deux méthodes de multiplication « non naturelle » sont utilisables : division des rhizomes et microbouturage ou micropropagation.

La technique de division des rhizomes est préférée parce qu'elle est moins chère et elle produit généralement des plants plus vigoureux (DEFRA, 2001). Afin de produire de nouvelles plantes, des rhizomes dormants de 2 ou 3 ans sont coupés en utilisant un cultivateur rotatif ou une herse rotative. Les pièces de rhizome produites sont récupérées pour être replantées. Une multiplication des plantes d'un facteur 30 à 40 peut être réalisée de cette manière sur une période de 2 à 3 ans, selon les conditions du sol. Pour un bon taux de réussite, les morceaux de rhizome produits par division doivent comporter au moins 2-3 "bourgeons" et doivent être gardés humides avant d'être replantés. Le mieux est de conserver les rhizomes dans des conditions fraîches (< 4°C, pour une durée de conservation jusqu'à 1 an), mais ils peuvent rester viables dans le champ pour une courte période, s'ils sont stockés sous un monticule et recouverts de terre humide (DEFRA, 2001).

La technique du microbouturage consiste à prélever un fragment de tissu végétal sur une plante mère, que l'on met en culture stérile sur un milieu nutritif approprié. Le massif cellulaire qui se développe est ensuite fragmenté et remis en culture. L'opération est renouvelée plusieurs fois. Une dernière mise en culture permet d'obtenir un grand nombre de plantules, obtenues par multiplication végétative. La micropropagation permet d'obtenir des taux de multiplication bien supérieurs (jusqu'à un facteur 2000) mais cette technique est bien plus onéreuse que la division mécanique des rhizomes (DEFRA, 2001).

A ce jour en Europe, seules une dizaine d'entreprises basées en Grande-Bretagne, en Allemagne, en Suisse, aux Pays-Bas, en Pologne et en Autriche vendent des rhizomes de miscanthus.

Le seul fournisseur à envergure internationale et déjà bien installé en France est la filiale française de Bical (Biomass Industrial Crops Ltd) : Bical Biomasse France (<http://www.bical.net/france/>).

ARGE Austrian Miscanthus (<http://www.miscanthus-rhizome.at/>) pourrait être un interlocuteur de taille intermédiaire.

Enfin, quelques interlocuteurs plus locaux en Allemagne, Suisse, Autriche et Pays-Bas sont répertoriés sur le site suivant : <http://www.miscanthus.de/pflanzgut.htm>.

- Caractéristiques pédoclimatiques régionales compatibles avec la plante

Les rendements du miscanthus ont été modélisés en Grande-Bretagne depuis les années 1990. Selon les résultats obtenus, les facteurs climatiques-cléf du rendement sont la **luminosité**, la **température** et la **disponibilité en eau**.

Le miscanthus s'adapte à tous types de sols, mais les préfère néanmoins riches en humus. Il supporte mal l'eau stagnante.

- Le miscanthus possède une **bonne efficacité d'utilisation de l'eau** (quantité d'eau requise par unité de biomasse produite). Les racines du miscanthus peuvent en outre pénétrer le sol et extraire l'eau jusqu'à une profondeur d'environ 2m. Cependant, les besoins en eau lors du cycle de végétation (juin-septembre) sont importants pour assurer un niveau de

production élevée (750 à 800 mm). Pour assurer cette haute productivité, le miscanthus est susceptible de nécessiter davantage d'eau que des cultures alternatives. En outre, la densité de la canopée implique que 20 à 30 % des précipitations sont interceptées par le couvert végétal, s'évaporent, et n'atteignent jamais le sol. Enfin, la disponibilité en eau est un paramètre important pour avoir un rendement élevé et uniforme sur la parcelle.

- D'après les recherches effectuées en Grande-Bretagne, le miscanthus est **assez tolérant vis-à-vis de la température**. Le miscanthus croît bien à une température de 8°C. Il est sensible aux basses températures lors de sa mise en place, du fait de la vulnérabilité des rhizomes (les gelées de printemps peuvent toucher les jeunes pousses issues des rhizomes). Ainsi, si la température du sol passe en-dessous de -3,5°C la première année, les rhizomes meurent. Une fois mise en place, la plante résiste très bien au froid hivernal. Elle ne croît pas lorsque la température est au-dessous de 6°C.
- Le miscanthus tolère une grande variété de pH, mais l'optimum se situe entre 5,5 et 7,5 (DEFRA, 2001).

Un certain nombre d'études en Europe ont permis d'établir que *M. giganteus* possédait un potentiel plus intéressant que le switchgrass, ou panic érigé, culture énergétique plus répandue sur ce territoire, car il est mieux adapté à cette zone tempérée (Lewandowski *et al.*, 2003).

En tout état de cause, les conditions optimales précises, notamment du point de vue du paramètre eau (pression de la culture sur les ressources en eau, et influence précise de la disponibilité en eau sur les rendements), sont à approfondir grâce à l'établissement de nouvelles références sur le comportement de la culture.

- *L'implantation du miscanthus : préparation, matériel et modalités*

- **La préparation du sol avant la plantation** est semblable à celle de la pomme de terre. Le miscanthus exige une préparation du sol soignée, d'autant que la culture est mise en place pour une durée de 15 ans environ, et qu'une mauvaise implantation serait donc préjudiciable aux productions des 14 années suivantes au minimum. Il faut donc :

- Assurer une bonne structure du sol pour que les plantes mettent en place leur système racinaire. Après un labour d'hiver, le sol doit être meuble, aéré, et travaillé sur 15 cm de profondeur environ.
- Eviter le développement d'adventices, car les jeunes pousses de miscanthus sont particulièrement sensibles à la compétition avec les adventices la première année. Pour ce faire il est recommandé d'épandre un herbicide de type glyphosate sur la parcelle l'automne avant l'implantation.

Par ailleurs, la taille optimale du rhizome pour l'implantation, selon les recherches européennes soumises au programme FAIR-CT96-1707, est de 20 cm, et il doit être planté à une profondeur de 5 à 10 cm (DEFRA, 2007).

Enfin, la clef pour un taux satisfaisant de réussite de l'implantation du rhizome est de s'assurer qu'il ne se dessèche pas durant la récolte, le transport et la plantation. Pour conserver l'humidité dans le sol, un roulage est conseillé.

- **La plantation est effectuée entre avril et juin**. Elle peut-être réalisée en utilisant une planteuse semi-automatique à pomme de terre ou à choux, un épandeur à fumier

ou une machine spécifiquement conçue pour le miscanthus, telle que le bespoke®, machine conçue par Hvidsted Energy au Danemark (ADAS, 2006). Il y a encore beaucoup d'incertitudes sur la meilleure méthode de plantation car les conditions du site interviennent en grande partie.

Avec une planteuse à pommes de terre ou une planteuse à choux semi-automatique, le rendement horaire de la plantation est bas (0,3 ha/h) mais le taux de réussite est élevé (95%) (DEFRA, 2001). Les planteuses à pommes de terre comportent des cuillères destinées à prendre les tubercules dans un réservoir et les poser à terre en rangs espacés. Or les rhizomes de miscanthus ont des excroissances qui empêchent une préhension optimale par les cuillères. Pour améliorer l'efficacité de la machine, il faut la faire avancer lentement avec une personne supplémentaire dans la planteuse, qui s'occupe de recharger les cuillères lorsqu'elles remontent vides du réservoir de rhizomes. En effet, il ne faut pas qu'il y ait de trous dans la plantation de miscanthus, car ces trous favorisent le salissement du champ. Avec une planteuse à choux à plusieurs rangs, chaque bras de la planteuse porte un soc qui creuse un sillon où les rhizomes sont déposés à la main tandis que 2 roues ramènent la terre par-dessus les rhizomes.



Figure 2. Tracteur et planteuse à choux 2 rangs à Grignon. Photo : Grignon Energie Positive



Figure 3. Détail d'un bras de la planteuse à choux. Photo : Grignon Energie Positive.

Avec l'épandeur à fumier, le rendement horaire est élevé (3 ha/h) mais le taux de réussite est faible (22%). L'épandeur est rempli d'un mélange de rhizomes et de terre et l'ensemble est éparpillé à la densité voulue. Ensuite, les rhizomes sont enfouis à la herse et roulés.

Des recherches sont nécessaires pour la conception de machines de plantation de rhizome. Ces travaux sur les planteuses doivent se focaliser sur des machines combinant un taux de travail élevé pour réduire le coût d'établissement. A titre d'exemple, le bespoke® est une machine spécialement conçue au Danemark pour la plantation de miscanthus. Elle fonctionne en plantant 2 rangs à la fois dans un sillon pré-tracé. Ensuite, le sillon est rebouché puis roulé. Le rendement horaire est relativement bon (1,25 ha/h) et le taux de réussite est élevé (92%). Mais cette machine est très peu disponible (ADAS, 2006). Bical Biomasse France a par ailleurs développé sa propre machine à planter.

▪ **Les rhizomes de miscanthus sont plantés comme suit :**

- Densité : 10.000 (12.000 préconisés) à 20.000 plants/ha (selon le type de destination, respectivement broyage ou multiplication) (Agrice, 1998). La densité de plantation est un optimum économique entre le coût élevé de la plantation (voir II.3.1 p.17) et le manque à gagner dû à une production réduite par une densité plus faible.
- Distance : 1m sur la ligne x 1m sur l'interligne, ou 1,2m sur la ligne x 0,8m sur l'interligne

Les premières levées sont observées de environ 3 semaines à 2 mois après l'implantation (Bical Biomasse France).

Les conditions de plantation optimale, notamment profondeur et densité de plantation des rhizomes, sont des paramètres essentiels à tester et valider, compte tenu du caractère fondamental de cette étape-clef. Ceci pourrait justifier la formulation d'un projet collectif en Ile de France pour tester, perfectionner et diffuser diverses machines à planter.

+ Avantages / contraintes liés à la conduite de la culture

- La croissance

Après la période de plantation des rhizomes en avril-mai, de multiples pousses apparaissent une fois que la température moyenne diurne dépasse 10°C. La première année, à la sortie de l'été les pousses atteignent 1 à 2 mètres au maximum. Les années suivantes, les repousses apparaissent lorsque la somme des températures atteint 200 à 400 °C, c'est-à-dire en général entre mars et mai (ADAS, 2006). La période de croissance durant la période Mai, Juin et Juillet est extrêmement rapide. Lorsque la culture est bien installée, soit au bout de 2-3 ans, cette période de croissance intense produit des tiges semblables à des cannes qui peuvent atteindre 3m de hauteur.

Une fois que la période d'interception lumineuse est achevée, les feuilles des étages inférieurs de la plante commencent à tomber : c'est la période de sénescence. Durant cette période de nouvelles racines continuent à croître et ce, d'Août à Octobre. La pleine sénescence se déroule à partir des premiers froids de l'automne.

Puis les nutriments sont remobilisés à partir des tiges et surtout des feuilles et migrent jusqu'aux rhizomes. Les tiges sèchent graduellement pendant l'hiver.

M. giganteus donne rarement des fleurs, la floraison nécessitant une longue durée d'accumulation de lumière.

- Intrants et pesticides

▪ **La demande annuelle en fertilisants du miscanthus est faible.** En effet, la plante utilise très efficacement les nutriments, et elle est capable de remobiliser de grandes quantités de nutriments dans les rhizomes durant la dernière partie de sa période de croissance. Par conséquent, les exportations de nutriments du miscanthus sont faibles. Une récolte en automne (feuilles + tiges) sera cependant plus exportatrice en éléments fertilisants qu'une récolte au cours de l'hiver (tiges uniquement), les feuilles riches en éléments minéraux retombent en effet au sol et restituent une partie de ce qui a été prélevé durant la phase de croissance.

Selon Monti et ses collaborateurs (2008), la quantité d'azote présente dans les tiges et les feuilles du miscanthus est en effet plus faible que dans les autres cultures dédiées, d'après des analyses faites sur le miscanthus, le sorgho doux, le sorgho fibre, la canne de Provence (*Arundo Donax*), le cynara (*Cynara Cardunculus*) et le panic érigé (*Panicum Virgatum*) à la ferme expérimentale de l'Université de Bologne.

Les doses d'engrais préconisées sont actuellement variables selon les auteurs.

L'INRA (2008) estime qu'un apport d'azote de 60 à 100 kg/ha est optimal, mais que des apports en P et K ne sont pas nécessaires. En revanche Bullard et Metcalfe (2001) préconisent un apport de 80 kg/ha de P et 40 kg/ha de K en année 1. D'après eux, une analyse chimique est souhaitable pour vérifier le degré d'exportation et s'assurer de l'adéquation de ces recommandations avec les conditions de la parcelle. Par ailleurs, Bullard et Metcalfe (2001) assurent que le miscanthus répond faiblement au fertilisant azoté dans la plupart des situations observées en Grande-Bretagne, et l'épandage d'azote est seulement nécessaire dans les sols contenant très peu d'azote minéral. A partir de la deuxième année, les épandages requis de N, P et K sont minimes voir nuls en Grande-Bretagne (DEFRA, 2007).

Bical Biomasse France (2008) précise en revanche qu'un apport de potassium peut être nécessaire, et peut être satisfait par l'épandage des cendres de combustion, justement riches en K_2O , sur le champ.

Par ailleurs, du sulfate de manganèse peut être épandu annuellement en doses de 4 Litres par hectare selon Bullard et Metcalfe (2001).

Par conséquent, il semble intéressant d'enrichir les données disponibles sur les exportations de minéraux par le miscanthus à Grignon, de tester diverses applications d'engrais, et d'en déterminer les quantités optimales à appliquer dans le contexte de la ferme de Grignon.

▪ **Aucune intervention fongicide n'est recommandée dans l'état actuel des connaissances sur le miscanthus.**

Parmi les maladies de céréales répandues, la jaunisse nanisante de l'orge (barley yellow dwarf virus), peut atteindre le miscanthus et limiter les rendements. En outre, des maladies fongiques peuvent atteindre la base des tiges en automne ou en hiver, en réduisant la vigueur.

Aucune attaque d'insectes a significativement affecté la production de miscanthus en Europe. Cependant, deux papillons de nuit et leur larve ont été observés se nourrissant de miscanthus et pourraient causer des problèmes dans le futur. (DEFRA, 2001)

Le taupin est observé sur certaines cultures, particulièrement sur des sols précédemment en jachère, et ralentissent voire empêchent le développement de certains pieds. Enfin les lapins et les sangliers sont des ravageurs du miscanthus.

▪ **Il est vital pour le miscanthus que les sites de mise en culture soient débarrassés des adventices avant que la plantation n'ait lieu.**

En effet, pendant les deux premières années, le miscanthus encore immature n'est pas assez dense et sa vitesse de croissance aérienne est trop faible pour lutter contre les adventices. La maîtrise des adventices (surtout panic, sétaire et digitale) est par conséquent primordiale. Des traitements anti-dicotylédones avec des produits du type Prowl, Starane ou Allié semblent être efficaces. De nombreux herbicides différents ont été utilisés sur les cultures sans dommage apparent au Danemark et au Royaume-Uni.

Une solution commerciale, le Prowl 400 (pendiméthaline) de la Firme BASF, est autorisée sur le Miscanthus, d'après une homologation datant de 2007 (2 passages de Prowl 400 à 3-3,5L/ha après implantation la première année).

Il n'y a pas d'anti-graminée adaptée, bien que certaines pistes semblent être intéressantes. Il faut donc par ailleurs durant la première année réaliser un broyage des adventices qui dépassent le miscanthus en hauteur. Enfin, actuellement, seul le glyphosate appliqué à un stade de dormance de la plante permettrait de faire un nettoyage de la parcelle.

A partir de l'été de la deuxième année, il n'y a plus de compétition possible des adventices. Ceci est premièrement dû à la couche de feuilles tombées par sénescence sur la surface du sol, et ensuite à la fermeture de la canopée, qui empêche la lumière de pénétrer dans l'étage de végétation sous-jacent. Les adventices qui survivent imposent peu de compétition aux cultures (Ademe 1998 ; DEFRA 2001).

La production de références sur les pratiques de traitement à appliquer durant les premières années de l'implantation semble un objectif intéressant à étudier dans le cadre de la production qui serait mise en place à Grignon.

- *Dates et techniques de récolte*

▪ **En climat océanique, deux périodes de récolte sont possibles (Ademe, 1998) :**

- Fin de l'été/Automne : production autour de 20 tMS/ha, tiges et feuilles encore vertes. Qualité hétérogène.
- Fin hiver/printemps : production autour de 15 tMS/ha, seules les tiges sont récoltées car les feuilles sont déjà tombées.

Cependant, le miscanthus est récolté le plus couramment au début du printemps pour une valorisation en chaudière. En effet c'est à cette période que l'humidité serait la basse (DEFRA [2001], voir aussi le paragraphe sur les aspects techniques et technologiques liés à la valorisation II.2.2 p. 12).

▪ **La première année, un passage de broyeur est nécessaire.**

En effet, la production de matière sèche est trop faible pour que la récolte et la commercialisation soient rentables. Ainsi, la première récolte « commerciale » a lieu en 2ème année, et la productivité à ce stade équivaut à la moitié de la production maximum, atteinte en 4^{ème} ou en 5^{ème} année selon Bical.

Deux méthodes de récolte sont pratiquées :

- **Fauchage et hachage** avec une ensileuse (chips de 11 à 44 mm, de densité 95 à 70 kg/m³) avec un débit de chantier de 1ha/h (taux de perte entre 10 à 30%). Le miscanthus ensilé peut être stocké de la même manière que le maïs. (Ademe, 2008) Cette technique est pratiquée par les agriculteurs de Biomasse Energie Sud en Seine-et-Marne (voir également II.5.3, p.32).
- **Fauchage et bottelage** (balles de 140 à 300 kg/m³) avec un débit de chantier qui peut atteindre 2 ha/h (taux de perte de 10 à 30%) (Ademe, 1998). L'idéal est d'utiliser une faucheuse à chanvre (Venturi, 1999).

Une autre possibilité évoquée par les agriculteurs de Seine-et-Marne est encore de granuler le broyat, lui donnant ainsi une densité de 650 à 700 kg/m³. Sous cette forme, il est facilement commercialisable auprès des particuliers, entreprises et collectivités. (Jeunes Agriculteurs 77, 2007)

Pour un stockage à long terme l'humidité doit être inférieure à 15 %. Si elle est comprise entre 15 et 25 %, une ventilation est nécessaire (Lewandoski *et al.*, 2000).

Le problème d'une récolte en fin d'hiver est que la haute saison d'utilisation est passée, ce qui rend le stockage nécessaire, bien que coûteux. La comparaison des deux solutions de récolte : début ou fin d'hiver, des points de vue technique et économique, est donc un aspect important à étudier. Pour chaque type de solution envisagée, il conviendrait de réaliser une étude sur les conditions optimales de récolte, stockage et conditionnement.

- *Main d'œuvre et temps de travail*

D'après diverses données et estimations des débits de chantier et des machines utilisées pour la culture de miscanthus, on peut dresser le tableau suivant de la durée de travail consacrée à chaque intervention culturale.

Opérations culturales	Nombre d'heures / ha ⁽³⁾
Préparation du sol (2 déchaumages, 1 traitement herbicide total, 1 labour, 1 reprise de labour)	3,08
Plantation (3 UTH pour une planteuse à pommes de terre au rendement de 0,3 ha/h, 1 UTH pour le roulage)	9,5
Fertilisation (1 passage de N par an sauf la 1 ^{ère} année)	4,62
Protection phytosanitaire (2 passages d'herbicides)	0,66
Récolte (1) (fauchage + ensilage)	63
Récolte (2) (fauchage + bottelage)	73,5
	Récolte 1 : 5,39
	Récolte 2 : 6,09
Nombre d'heures/ha/an⁴	

Tableau 1 : Ratios horaires des différentes opérations culturales sur le miscanthus.
 Voir détail des calculs en Annexe 2 : Temps de travail pour la culture du miscanthus. 47.

La culture de miscanthus requiert peu d'interventions donc elle permet de dégager du temps de travail pour d'autres occupations. D'autre part, la principale intervention est la mise en place, qui nécessite 3 personnes lorsqu'elle est réalisée par l'exploitant lui-même.

II.2.2 ... relatifs à la valorisation

Dans le marché de la production d'énergie, la culture de miscanthus se trouve mise en concurrence avec des substrats de combustion qui sont des déchets d'autres filières, donc de faible coût voire gratuits (SAC 2000). Cependant la production d'énergie est le

³ C'est le nombre d'heures total passées sur la culture pendant toute la durée de son implantation (15 ans)

⁴ C'est la somme des heures passées sur la culture pendant toute la durée de son implantation divisée par le nombre d'années d'implantation (15 ans)

débouché potentiel principal du miscanthus. Il y a également d'autres types d'usage possibles, par exemple en production de papier et en tant que matériau de construction. L'entreprise Bical Biomasse France propose actuellement des contrats avec les agriculteurs garantissant le niveau du prix de rachat sur un certain nombre d'années. Cependant le circuit de valorisation reste encore à construire en France.

+ Transport et stockage

Compte tenu de la faible densité du produit, et malgré les techniques d'ensilage, de bottelage et de broyage mises au point, les volumes de stockage sont importants, donc le transport n'est viable économiquement que sur de courtes distances.

D'autre part, la préparation des biomasses lignocellulosiques en général nécessite plusieurs opérations : broyage, séchage, compactage, stockage, transport... A chaque étape, il se forme des nuages de poussières et des accumulations de charges électrostatiques qui engendrent des risques (inflammation de poussières ou explosion de nuages de poussières). Les risques d'explosion de poussières augmentent lorsque la biomasse est plus sèche et plus fine. Or, la conversion thermique est plus pratique et efficace pour des matières fines et sèches.

Les biomasses ont en outre des propriétés auto-échauffantes qui peuvent mener à l'autoinflammation en cours de stockage. Le risque d'incendie est encore renforcé par le développement de champignons et de micro-organismes. En effet, lorsque la chaleur produite au cours d'une réaction chimique, voulue ou non, ne peut plus être dissipée convenablement par l'installation dans laquelle elle est mise en œuvre, des conditions d'emballage thermiques peuvent être réunies, qui peuvent aboutir à une explosion thermique. Le miscanthus est particulièrement réactif, avec une température d'emballage de 228°C, contre une température d'emballage de 248°C pour le bois par exemple (Grammont, 2006).

En tout état de cause, il convient d'étudier quelles sont les meilleures conditions de stockage des biocombustibles, qui concilient à la fois les aspects coûts, sécurité, et préservation du contenu énergétique.

+ Valorisation énergétique

- Propriétés physico-chimiques

▪ **Les valeurs énergétiques des combustibles sont négativement corrélées à la composition en cendre.** Toute augmentation de 1% de la concentration en cendres diminue en effet la valeur énergétique de 0,2 MJ/kg (Cassida et al. 2005, cité dans Monti et al. 2008). Or les recherches sur le miscanthus ont déterminé que le contenu en cendres de la plante est faible comparé à d'autres espèces lignocellulosiques (Monti et al. 2008).

Plante (organe)	<i>miscanthus sinensis</i> (tige)	<i>miscanthus sinensis</i> (feuilles)	<i>Panicum virgatum</i> (tige)	<i>Panicum virgatum</i> (feuilles)	Phalaris (tige)	Phalaris (feuilles)
Cendres (g/kg)	19	62	26	76	32	113

Tableau 2 : Composition en cendres de différentes plantes énergétiques,
Source : Monti et al. 2008

▪ **Les cendres et les éléments inorganiques (par exemple alcalins) qui sont produits** durant la combustion d'un élément peuvent endommager les chaudières à cause des scories, de la corrosion, et des salissures qu'elles provoquent. Par conséquent, il est important d'examiner la composition minérale des cultures énergétiques afin d'évaluer leur adaptation à différents modes de conversion énergétique, et afin de comprendre quelles propriétés technologiques des unités de transformation doivent être optimisées. Il est connu que durant la combustion, les éléments volatiles tels que S et Cl peuvent former les particules microscopiques qui condensent en sels, et qui, en conditions de hautes températures et en présence de K et Si, peuvent provoquer des dépôts collants (Miles *et al.*, 1996, cité dans Monti *et al.* 2008).

Reumerman et Vand den Berg (2002, cité dans Monti *et al.* 2008) ont montré que le miscanthus possède des ratios élevés Si/K et Ca/K, ce qui contribue à diminuer la tendance à la production de scories.

Enfin, le ratio « fertilisants utiles / métaux lourds » dans les cendres du miscanthus est plus important que celui du bois, ce qui les rend plus appropriées pour un épandage sur les cultures à des fins de fertilisation (Hasler *et al.* 1998).

▪ **Un autre facteur critique pour une culture énergétique est la teneur en humidité à la récolte.** Plus la plante est sèche, plus le rendement énergétique est important. En conditionnant et en laissant le miscanthus sécher dans les champs, l'humidité de la tige peut être réduite de moitié, dans les cas de forts taux d'humidité de 50 % qui peuvent être relevés au Royaume-Uni. (DEFRA, 2001)

▪ **Le pouvoir calorifique du miscanthus est plus élevé que la plaquette de bois.** Son PCI (pouvoir calorifique inférieur) est en effet d'environ 4700 kWh par tonne de matière sèche (tMS)⁵, contre 3300 pour la plaquette, ce qui le rend très rentable (Jeunes agriculteurs 77, 2007).

Par conséquent, d'après Michel et collaborateurs (2006), le rendement énergétique net (c'est-à-dire en tenant compte des pertes lors de la récolte) de la culture de Miscanthus est compris entre 150 et 300 GJ/ha/an. Bullard et Metcalfe (2001) trouvent un rendement énergétique similaire : entre 128 et 290 GJ/ha/an. Bullard et Metcalfe trouvent par ailleurs que « l'investissement énergétique » pour la culture de miscanthus est de :

Année 0 (implantation)	Année 2	Années 3 à 19	Année 20 (retournement)
26 291 MJ	4 115 MJ	6 485 MJ / an	8 482 MJ

Tableau 3. Consommation énergétique nécessaire pour la production de miscanthus. Source : d'après Bullard et Metcalfe (2001)

Le ratio énergétique⁶ est de 7,7 à 15,4 d'après Michel et collaborateurs (2006), et de 31 à 45 (selon l'âge de la culture) d'après Bullard et Metcalfe (2001). D'après ces derniers, en année 20 (au retournement de la culture), le ratio énergétique total de la culture (c'est-à-dire tenant compte de toutes les consommations énergétiques et de toute l'énergie produite au cours des 20 ans de culture) est de 35,86.

⁵ 4700 kWh/tMS est équivalent à 16 920 MJ/tMS (1 MJ = 3,6 kWh). Avec un rendement de 14 tMS/ha, une culture de 1 hectare de miscanthus a donc un contenu énergétique de 236 880 MJ.

⁶ Ratio énergétique du miscanthus : rapport entre l'énergie qui serait produite par la combustion totale du miscanthus et l'énergie consommée pour l'ensemble des opérations culturales et post-culturales nécessaires à la production du combustible jusqu'à l'entrée en chaudière.

Cependant, à cause de l'importance des coûts de transport et de stockage, et d'un point de vue strictement économique, le ratio contenu énergétique / volume doit également être optimisé. La pyrolyse de la biomasse, qui produit des liquides (huiles), solides et gaz, ou la gazification, pourrait être utilisée pour contourner ce problème (Michel *et al.*, 2006).

- Valorisation énergétique par combustion et perspectives pour la méthanisation et la production de biocarburant de seconde génération

▪ **Le miscanthus peut être brûlé pour produire de la chaleur seule ou de la chaleur et de l'électricité par cogénération**, comme toutes les cultures lignocellulosiques dédiées. Les cultures énergétiques s'adressent à une grande variété de clients, depuis les centrales électriques à combustion spécifique de biomasse, jusqu'aux centrales mixtes de charbon et biomasse.

Le miscanthus peut ainsi remplacer jusqu'à 50% du charbon dans une centrale électrique ou une chaudière industrielle, sans modification technique. Il peut aussi être utilisé à plus petite échelle : brûlé directement sur l'exploitation agricole pour produire de la chaleur, ou converti en pellets énergétiques destinés aux chaudières biomasse utilisées dans les habitations ou les entreprises. Les chaudières individuelles sont souvent alimentées par une vis sans fin qui exige une finesse du hachage de la biomasse, réalisé par une ensileuse par exemple. En ce qui concerne les chaudières industrielles, l'alimentation se faisant par des tapis, le hachage n'est pas une contrainte.

▪ **A l'heure actuelle, le miscanthus est ainsi surtout destiné à brûler en chaudière pour fournir de la chaleur.** Mais certains envisagent sa méthanisation (Aficar, 2007), ou son utilisation comme régulateur dans un méthaniseur (Kratz, 2005), pour fournir du biogaz.

▪ **A long terme, la possibilité d'utiliser le miscanthus comme matière première de biocarburants de deuxième génération est encore à étudier.** Le miscanthus présente des intérêts notoires du fait de sa richesse en cellulose et hémicellulose.

Composition	Teneur en % (erreur standard)
Cellulose	38,2 (3,2)
Hémicellulose	24,3 (1,4)

Tableau 4. Teneur du miscanthus en cellulose et hémicellulose. Source : de Vrije *et al.* (2002)

En effet, les carburants de deuxième génération produits à partir de la biomasse plante entière issus d'espèces dites "dédiées" sont présentés comme une voie d'avenir. Cette synthèse de carburants est plus complexe que celle à partir d'huile, d'amidon ou de saccharose et reste encore au stade expérimental (Aficar, 2007). Des unités de fabrication pilote sont en cours de développement en France, notamment dans le cadre du projet Futurol sur le site agro-industriel de Pomacle-Bazancourt (Marne).

Deux voies se dessinent pour transformer ces ressources en biocarburants (Grammont, 2006) :

- La voie biochimique, qui produit essentiellement de l'éthanol par hydrolyse puis fermentation de la lignocellulose.

- La voie thermochimique qui permet la liquéfaction ou la gazéification de la biomasse, puis de convertir les intermédiaires en produits valorisables (combustibles liquides, carburants, produits chimiques)

Ces filières utilisent des procédés connus et maîtrisés séparément, mais qu'il faut combiner et adapter. Plusieurs centres de recherche et des sociétés privées se sont lancés dans le développement de ces filières, avec l'encouragement financier des gouvernements. On compte aujourd'hui quelques unités de démonstration (production d'éthanol à partir de diverses sources celluloses par Iogen et Petro-Canada au Canada [Green Car Congress, 2007], BTL par Choren en Allemagne). L'éthanol de cellulose est par ailleurs en production dans quelques raffineries pilote aux Etats-Unis (Mailhes, 2007).

Alors qu'un hectare de colza ne permet de produire que 1100 à 1600 litres d'huile végétale et que le maïs et la betterave produisent respectivement 3300 et 6100 litres d'éthanol par hectare, des producteurs de miscanthus de l'Illinois, encadrés par des chercheurs de l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, sont parvenus à extraire 14 000 litres de bioéthanol par hectare et pensent pouvoir atteindre 30 000 litres par hectare, en peaufinant les différentes étapes de transformation de la cellulose en éthanol (Aficar, 2007).

Il faut cependant noter que la combustion directe du miscanthus pourrait bien rester encore un moment le marché immédiat majeur pour cette culture, car la conversion reste très chère (Mailhes, 2007).

+ Valorisation en biomatériaux

Le miscanthus se prête à la fabrication de divers matériaux de construction. Il peut servir de remplissage des murs dans les habitations, à la fabrication de chapes, à la production de tuiles et de panneaux isolants (ARGE Austrian Miscanthus, 2008).

+ Valorisation en litière

Le miscanthus découpé possède un taux de poussière très faible, il est faiblement odorant, il a un grand pouvoir absorbant (3 fois supérieur à celui de la paille de blé), et une longue durée d'efficacité. Il est utilisé pour ces raisons pour la fabrication de litières destinées au marché du cheval, du bétail et des volailles. Il est alors vendu sous forme de matériau haché et dépoussiéré en bottes compactées (Bical, 2008).

II.3. Aspects économiques

Le calcul des coûts de production du miscanthus présenté brièvement ci-après prend en compte les salaires, l'entretien des outils, les assurances, les frais des gestions, les frais financiers, les frais de fermage etc. Il s'agit d'une estimation grossière mais dont les résultats restent cohérents avec ceux de la littérature (notamment Styles et al. 2007). Les calculs réalisés sont basés sur une durée de culture de 15 ans :

implantation au printemps de l'année 0 et retournement de la culture au printemps de l'année 15. Tous les détails des calculs sont consultables en Annexe 1 : Coûts de production du miscanthus p.46.

II.3.1 Coût année 0

La préparation du sol avant l'implantation (voir opérations culturales p.12) coûte environ 230 €/ha.

L'implantation du miscanthus, plants, plantation, roulage, désherbage, fermage et main d'oeuvre compris coûtent de 3200 (implantation par l'exploitant) à 3600 €/ha (implantation par un prestataire).

Le coût total en année 0 se situe donc entre 3400 et 3900 €/ha⁷.

II.3.2 Coûts années 1 à 14

Les coûts mis en œuvre les années suivant l'implantation correspondent à la fertilisation éventuelle (0 à 100 unités d'azote par hectare selon la composition du sol), le fermage et la récolte.

Ils s'élèvent environ à 800 €/ha/an, dont environ 550 € consacrés à la récolte.

Les coûts de récolte correspondent aux coûts de fauchage et d'ensilage ou coûts de fauchage et bottelage et aux bennes pour le transport.

II.3.3 Coûts totaux

L'installation est certes coûteuse, mais les coûts de production étalés sur quinze ans sont trois fois moins importants que ceux du blé, du fait du nombre très réduit d'interventions.

Au total, le coût de la production de miscanthus peut être évalué à environ 60 €/t.

Selon Bical France, les marges brutes atteignent 900 à 1100 €/ha pour un excédent brut d'exploitation de 500 à 700 €/ha. Compte tenu des coûts calculés pour l'exploitation de Grignon, avec des rendements moyens annuels de 14 t/ha et un prix de vente du miscanthus de 100 €/t, la marge brute atteint 1400 €/ha et l'excédent brut d'exploitation 560 €/t.

La rentabilité économique de la culture de Miscanthus en comparaison de celle d'autres cultures est un aspect essentiel. La plateforme de Grignon devrait permettre d'apporter des éléments de réponse à cette question.

II.3.4 Aides à la production

Afin de bénéficier d'aides, une culture de miscanthus doit absolument être déclarée en jachère industrielle⁸ (**cas 1**) ou en culture énergétique (**cas 2**). Sinon, elle ne peut pas

⁷ Pour comparaison, voir Styles et al. 2007, Bical 2008, Roupnel 2008.

⁸ Historiquement et étymologiquement, la jachère désigne une terre labourable que l'on laisse temporairement reposer en ne lui faisant pas porter de récolte. Avec la réforme de la PAC de 1992, apparaît la notion de « jachère aidée » (dite aussi « jachère institutionnelle » ou « gel ») : pour avoir droit aux aides sur les COP (céréales, oléagineux et protéagineux), les agriculteurs ayant une production annuelle théorique de plus de 92 tonnes de COP doivent mettre en jachère une partie de leurs terres ; les surfaces ainsi gelées donnent droit à une aide à l'hectare. Cette jachère aidée peut ne pas porter de récolte mais elle peut également recevoir des

activer des DPU⁹ (jachère ou normaux), ni bénéficier de l'aide couplée aux grandes cultures. En effet, il s'agit d'une culture considérée comme permanente, donc théoriquement non admissible pour l'activation de DPU (Article D615-32 du Code Rural – voir Annexe 6 : Article du code rural sur les aides à la production du miscanthus p.51).

Cas 1 : Le miscanthus est déclaré en jachère industrielle.

Cette déclaration ne nécessite pas de signer un contrat avec un transformateur. Cependant pour bénéficier d'aides, il faut s'engager par écrit à ce que, en cas d'utilisation dans l'exploitation ou de vente à un transformateur, le miscanthus soit affecté aux utilisations prévues par la réglementation PAC (utilisations énergétiques comme les combustibles, les biocarburants, etc.).

Si le miscanthus est déclaré en jachère industrielle et qu'il est sur une parcelle éligible (éligibilité au 15 mai 2003), alors il permet d'activer des DPU jachère. La surface excédentaire par rapport au nombre de DPU jachère, si elle est placée en terre éligible, peut bénéficier de l'aide aux grandes cultures au titre du gel industriel volontaire.

Cas 2 : Le miscanthus est déclaré en culture énergétique.

Cette déclaration donne droit à des DPU normaux (pas de DPU jachère) et à l'aide aux cultures énergétiques (45€/ha). Pour ce faire il y a deux possibilités : la signature d'un contrat avec un transformateur ou la transformation à la ferme.

Dans le cadre d'un contrat avec un premier transformateur (ou collecteur délégué), la condition expresse est que la destination finale doit être la production de biocarburant, d'énergie électrique ou d'énergie thermique.

Dans le cadre de la transformation à la ferme, le miscanthus peut faire l'objet d'une déclaration de cultures énergétiques uniquement pour la fabrication de biogaz dans l'exploitation.

Aides en fonction du statut du miscanthus	
Gel industriel	DPU jachère
Gel industriel volontaire	Aide couplée aux grandes cultures Aucun DPU (ni normal, ni jachère)
Culture énergétique (ACE) (vente à un transformateur)	DPU normal + 45 €/ha d'ACE
Culture énergétique autoconsommée (hors biogaz)	Aucune aide PAC

Tableau 5 . Aides à la production pour la culture de miscanthus. Source : Pavard, 2007

II.3.5 Conditions générales de rentabilité et d'efficacité économique

Comme pour toute culture énergétique, l'intérêt économique du miscanthus est dépendant du prix de la culture alternative adaptée à la parcelle, par exemple le blé (coût d'opportunité) et du prix du baril de pétrole.

cultures destinées à des fins non alimentaires. Elle est alors appelée « jachère industrielle » ou « jachère non alimentaire » (Source : www.agreste.agriculture.gouv.fr).

⁹ DPU : droit à paiement unique. Il s'agit d'une aide découplée de la production. Le nombre de DPU et leur valeur sont établis pour chaque exploitation sur la base des surfaces et des aides directes perçues au cours de la période 2000, 2001, 2002, dite période de référence. (source : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche)

Il est également judicieux de comparer les coûts de production du miscanthus à ceux des matières premières ayant la même destination : des combustibles.

Culture énergétique	Rendement moyen envisageable en tonnes de MS/ha	Pouvoir calorifique moyen PCI (kWh/tonne)	Coût en euros/t	Coût en euros/MWh
Miscanthus	14	4700 à 15% d'humidité (source : Arvalis, Ademe)	60 à 62	12,8 à 13
Panic érigé	12	4600 à 15% d'humidité (Ademe, Arvalis)	53	11,5
Phalaris	7	4600 à 15% d'humidité (Arvalis)	86	18,7
TTCR de Saule	7	3600 à 25% d'humidité (association Aile, Ademe)	66 à 70	18,2 à 19,4

Tableau 6 : Simulation des coûts de production en €/t et en €/MWh sur la Ferme de Grignon.

Type d'énergie	Prix en euros/MWh (en 2006)
Fioul	60
Gaz naturel	45
Charbon	70
Bois (bûche de 30cm)	33
Plaquette forestière	30

Tableau 7 : Prix des principaux types de combustibles disponibles en France en 2006.
 Source : www.industrie.gouv.fr/energie

Néanmoins, dans le calcul des coûts pour Grignon, il faut ajouter 2 à 8 €/t (en fonction du type de stockage choisi), soit un surplus de 1,5 à 4 euros par MWh. Ce coût correspond à l'investissement d'un bâtiment de stockage dimensionné pour combler les besoins énergétiques du campus de Grignon. Ce coût supplémentaire n'entrave pas la comparaison avec les énergies fossiles ou biomasse plaquette forestière. Ainsi, il apparaît intéressant d'investir dans les cultures énergétiques à des fins de production de chaleur.

Pour juger de l'intérêt économique de la production de Miscanthus pour l'agriculteur, il convient de procéder à une analyse comparative. Les résultats suivants sont issus d'une telle analyse appliquée au contexte de la ferme de Grignon.

On paramètre un prix du blé entre 120 et 250 €/t. Pour un prix du blé de 120 €/t, 150 €/t, 200 €/t et 250 €/t, et un coût de production à Grignon de 135 €/t, on calcule la marge brute du blé correspondante, en euros par hectare. On détermine ensuite le prix de vente de la culture énergétique qui permet d'atteindre la même marge brute que le blé, connaissant le coût de production des cultures énergétiques. En tenant compte d'un PCI de 4,7 MWh/t pour le miscanthus, 4,6 MWh/t pour le panic et le phalaris, et de 3,6 MWh/t pour le TTCR de Saule, on déduit le coût du MWh équivalent à la tonne de matière sèche de culture énergétique (voir aussi Tableau 6 : Simulation des coûts de production en €/t et en €/MWh sur la Ferme de Grignon.).

Cette simulation permet de prévoir l'évolution de la production des cultures énergétiques en fonction des fluctuations des prix des cultures alimentaires. En effet, les producteurs ne vont décider de mettre en place des cultures énergétiques que si elles leur assurent un revenu au moins égal à celui d'une culture plus classique.

On fait l'hypothèse qu'un MWh issu de cultures énergétiques est équivalent à un MWh de combustible classique, et que le choix d'un consommateur se fait uniquement par rapport au prix. Les cultures énergétiques pourront alors être considérées comme compétitives par rapport aux combustibles fossiles si le consommateur peut se procurer du MWh de culture énergétique coûtant au maximum le prix d'un combustible classique.

Le tableau ci-après confronte les différentes situations de prix, et permet de déterminer si la culture énergétique reste rentable vis-à-vis du combustible fossile ou forestier. Trois situations sont possibles :

- **En blanc** : les cultures énergétiques offrent une alternative avantageuse face à tous les autres types de combustibles.
- **En jaune** : les cultures énergétiques restent des alternatives avantageuses face aux combustibles fossiles mais n'ont pas d'avantages face aux plaquettes forestières ou autres ressources bois.
- **En rouge** : les cultures énergétiques n'offrent plus d'avantage face aux autres type de combustibles.

	Prix de vente du blé en €/t	120	150	200	250					
		Marge brute du blé en €/t								
Blé à 8 t/ha (soit 80 q/ha)	Marge brute du blé en €/ha	-15	15	65	115					
	Marge brute du blé en €/ha	-120	120	520	920					
	Coût de production en €/ha	Prix de vente ¹⁰ €/ha (€/t)	Coût du MWh en €	Prix de vente €/ha (€/t)	Coût du MWh en €	Prix de vente €/ha (€/t)	Coût du MWh en €	Prix de vente €/ha (€/t)	Coût du MWh en €	
Miscanthus - 14tMS /ha - 4,7MWh/tMS	842 à 865	722 à 734 (51,6 à 52,4)	11 à 11,2	962 - 985 €/ha (68,7-70,4 €/t)	14,6	1362 à 1385 (97,3 à 98,9)	20,7 à 21,04	1762 à 1785 (125,9 à 127,5)	26,8 à 27,1	
Panic érigé - 12tMS/ha - 4,6 MWh/tMS	631,5	511,4 (43)	9,35	751,5 €/ha (63 €/t)	13,6	1151,5 (96)	20,9	1551,5 (129,3)	28,1	
Phalaris - 7 tMS/ha - 4,6 MWh/tMS	602,8	482,8 (69)	15	723 €/ha (103 €/t)	22,5	1122,8 (160,4)	34,9	1522,8 (217,5)	47,3	
TTCR de saule - 7 tMS/ha - 3,6 MWh/tMS	473,2	353,2 (50,5)	14	593 €/ha (85 €/t)	23,6	993,2 (141,9)	39,4	1393,2 (199)	55,3	

Tableau 8 : Matrice de prix de vente des cultures énergétiques en fonction d'un prix du blé hypothétique (sans coût de stockage).

¹⁰ Prix de vente tel que la marge à l'hectare obtenue est égal à celle du blé

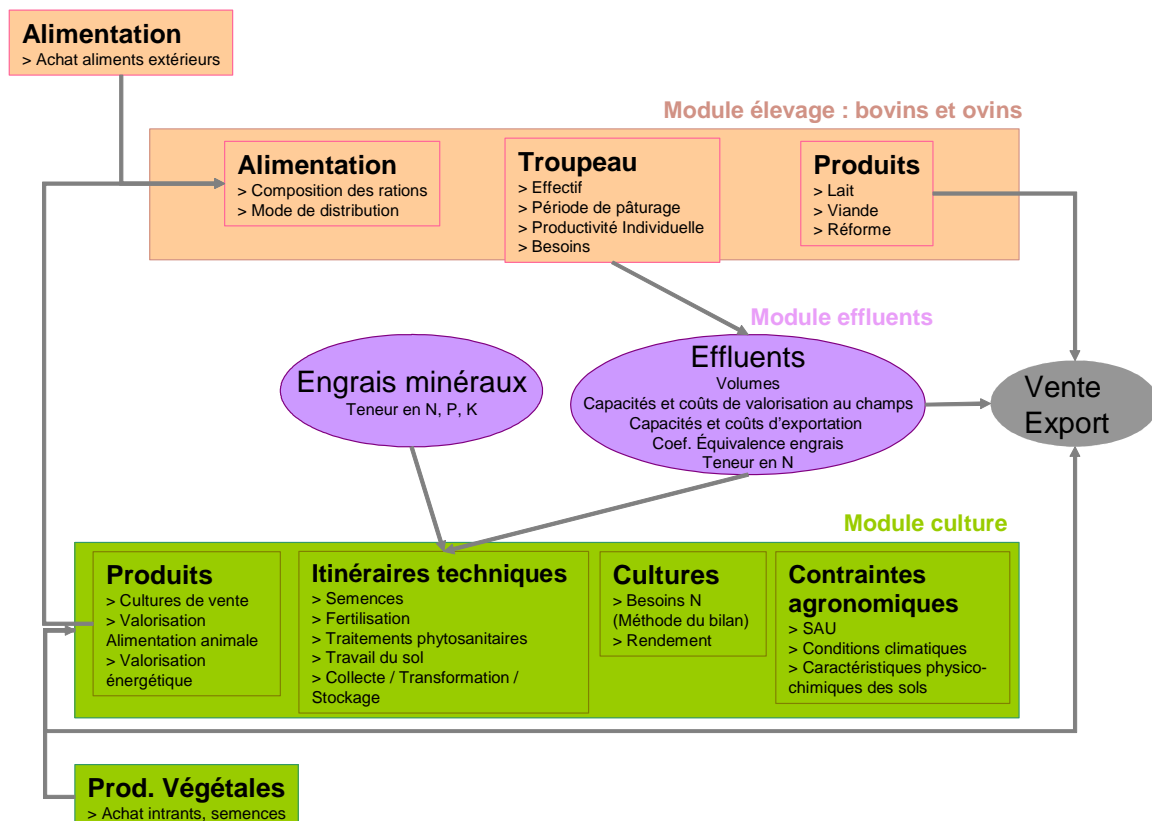
D'après le Tableau 7 et le Tableau 8, les cultures énergétiques sont dans la plupart des cas compétitives par rapport aux combustibles fossiles. En effet, le coût de production du MWh issu de cultures énergétiques est dans la majorité des situations inférieur au coût de production du MWh d'énergie fossile. Ainsi, en première analyse, les cultures énergétiques peuvent se classer par ordre d'intérêt économique décroissant : graminées en C4, graminées en C3 et enfin TTCR de saule. Dans tous les cas de figure, le miscanthus apparaît plus intéressant que le fioul et le gaz, et plus compétitif que d'autres cultures énergétiques telles que le TTCR de saule, le Phalaris et le Panic érigé. Néanmoins, les conclusions de cette analyse devraient être nuancées par la prise en compte des surcoûts qu'impliqueraient l'aménagement et l'exploitation d'un réseau de chaleur à biomasse.

II.3.6 Le miscanthus dans l'économie de l'exploitation

Cette partie est consacrée à l'analyse des résultats d'optimisation des performances économiques et environnementales de la ferme de Grignon par l'outil PerfAgro®. Le logiciel PerfAgro® d'optimisation linéaire de la performance globale des systèmes de production, développé par le CEREOPA, permet de « calculer » des solutions optimales au sein d'un système où coexistent des activités de production végétale et des activités d'élevage.

PerfAgro® est utilisé à la ferme, dans le cadre du projet Grignon Energie Positive, pour l'analyse des avantages économiques et environnementaux respectifs de différentes options techniques possibles. Il a été utilisé dans le cadre de ce travail pour explorer différentes options de production dans une optique de maximisation de la performance énergétique et sous contrainte de réalisation d'une performance économique minimale. Les résultats obtenus permettent de repérer des stratégies de production optimales et de les caractériser en termes d'assolement et de systèmes d'alimentation des cheptels présents sur la ferme.

PerfAgro® fait le lien entre les ateliers schématisés sur la figure suivante :



Dans le cadre de l'étude de la place de la production de miscanthus dans l'exploitation, on utilise PerfAgro® pour optimiser le système schématisé ci-dessus dans l'optique d'une réduction des consommations énergétiques de l'exploitation. On affecte, pour ce faire, chaque activité d'une valeur énergétique qui correspond au solde de la quantité d'énergie obtenue lors de sa valorisation duquel on a déduit le coût énergétique (direct et indirect) de sa production.

[Énergie valorisée] – [énergie consommée]

Seule, la valorisation énergétique du Miscanthus lui permet de bénéficier d'un bilan énergétique positif. Tous les autres produits de l'exploitation n'étant considérés que pour leur valorisation alimentaire (alimentation humaine et/ou animale) sont pris en compte avec un bilan énergétique négatif.

Dans le cadre de notre étude, nous réalisons la phase d'optimisation en deux temps :

(1) optimisation sur la performance économique : il s'agit, en maximisant la marge PerfAgro®, de repérer les conditions de la compétitivité relative du Miscanthus. Il s'agit également de disposer de repères sur les niveaux de performance économiques qui seront utilisées comme limites dans l'étape d'optimisation énergétique.

(2) optimisation sur la performance énergétique : il s'agit d'étudier l'adaptation du système de production et de vérifier l'intérêt de la production du Miscanthus dans cette perspective.

1^{ère} analyse : étude de la sensibilité de la rentabilité économique de la production de Miscanthus

On choisit donc tout d'abord de réaliser plusieurs maximisations successives du résultat économique de l'exploitation, avec des paramètres évoluant dans les fourchettes de valeurs suivantes :

- Le prix du miscanthus bottelé en sortie de ferme de 60 à 140 €/tMS¹¹.
- Les charges d'implantation du miscanthus de 150 à 450 €/ha/an
- Le rendement du miscanthus de 14 à 20 tMS/ha¹²
- Le prix du blé de 100 à 200 €/tonne.

PerfAgro® est programmé de sorte que le miscanthus ne peut apparaître que sur une surface limitée des terres de l'exploitation. Cette surface de 250 ha couvre les terres de l'exploitation qui se situent à proximité des lieux de valorisation potentiels. Elle représente la moitié des surfaces cultivables de la ferme de Grignon.

Avec des charges d'implantation de 240 €/ha/an (niveau de charges attendue pour une culture de miscanthus à Grignon), et un rendement de 14 tMS/ha, les solutions optimales calculées intègrent des surfaces de miscanthus supérieures à 10 % de l'assolement (i.e. supérieures à 50 ha) avec les paramètres suivants :

¹¹ Le prix en sortie de ferme du miscanthus ensilé est évalué à un prix inférieur de 10 €/tMS à celui du miscanthus bottelé

¹² Ces rendements sont en fait des moyennes de rendement annuel, qui prennent donc en compte la première année de culture où le rendement est nul, et les 2-3 années suivantes où le rendement reste sub-optimal. C'est pourquoi ils sont globalement plus bas que les données de rendement habituelles pour le miscanthus qui sont des rendements observés lors des années de maturité du miscanthus.

Prix du miscanthus bottelé	Prix du blé
> ou = 60 €/tonne	100 €/tonne
> ou = 100 €/tonne	150 €/tonne
> ou = 120 €/tonne	200 €/tonne

Tableau 9. Prix du miscanthus bottelé et du blé pour lesquels la surface de miscanthus dépasse 10% de l'assolement dans le cadre d'une optimisation économique

Ces quelques exemples montrent que le prix du miscanthus en sortie de ferme et le prix du blé sont susceptibles d'avoir un effet sur l'intégration de surfaces de miscanthus dans l'assolement de l'exploitation, dans l'optique d'une optimisation des performances économiques. Ceci reste une intuition que nous allons approfondir avec des outils appropriés.

En effet, dans un deuxième temps, une analyse de sensibilité est réalisée sur les résultats des 39 simulations d'optimisation économique de la ferme. La variable de sortie considérée est l'assolement en miscanthus exprimé en pourcentage de la surface cultivable (500 hectares). Les variables d'entrée considérées sont :

- Le rendement estimé du miscanthus
- Le coût de la récolte
- Le prix d'achat du miscanthus
- Les charges de culture du miscanthus
- Le prix de vente du blé

Les paramètres d'entrée considérés sont *a priori* tous susceptibles d'avoir un effet significatif sur l'assolement en miscanthus. Cependant, dans le but de guider une étude des pratiques-clef dans la culture de miscanthus il paraît utile de détecter les paramètres les plus sensibles, c'est-à-dire ceux pour lesquels une simple variation peut entraîner des changements considérables de la surface cultivée en miscanthus.

L'analyse de sensibilité a ainsi montré que, dans le cadre d'une optimisation des performances économiques de l'exploitation, la surface en miscanthus est significativement influencée par les prix de vente du miscanthus et du blé et le rendement du miscanthus.

- En effet, lorsque les conditions économiques d'implantation du miscanthus sont réunies une augmentation du prix de vente du miscanthus de 10 €/tMS fait augmenter la surface implantée en miscanthus de 2,7 % de la surface cultivable (soit 13 ha).
- Quant au prix du blé, son augmentation de 50 €/tMS fait diminuer la surface implantée en miscanthus de 6 % de la surface cultivable (soit 30 ha).
- Enfin une augmentation du rendement du miscanthus de 2 tMS/ha fait augmenter la surface de miscanthus de presque 3 % de la surface cultivable (soit une quinzaine d'hectares).
- En revanche, les charges de culture du miscanthus n'ont pas d'effet significatif d'après l'analyse de sensibilité.

Le fait que les coûts engagés à l'initiation de la culture ne semblent pas affecter le résultat pourrait conduire à préconiser de ne pas hésiter à mobiliser des moyens suffisants pour « garantir » un rendement important.

Assurer des valeurs élevées pour les paramètres rendement et prix de vente du miscanthus peut donc se faire au prix d'un niveau important de charges d'implantation, car celles-ci ont peu d'influence sur la mise en culture de miscanthus.

Il est donc important d'être attentif à assurer une bonne qualité de la récolte. Cela passe par une grande attention portée aux conditions d'implantation, par exemple en utilisant du bon matériel (rhizomes, machines), qui peut être très coûteux mais qui détermine le bon déroulement de la suite de la culture, et donc le rendement et le prix d'achat.

2nde analyse : étude de l'intérêt du Miscanthus pour la performance énergétique de l'exploitation agricole.

PerfAgro est ensuite utilisé pour faire diverses simulations avec les paramètres suivants :

Prix du blé	150 €/t
Prix du miscanthus	80 €/t (soit 17 €/MWh ¹³)
Coût d'implantation du miscanthus	240 €/ha ¹⁴
Rendement du miscanthus	14 tMS/ha
Valeur énergétique du miscanthus	4700 kWh/tMS

Ces valeurs sont plausibles dans les conditions actuelles (novembre 2008) du marché.

▪ **Nous avons d'abord procédé à la maximisation du résultat économique de la ferme.** Le résultat économique obtenu est de 204 895 € et le bilan énergétique annuel est de -3 606 030¹⁵ MJ. La consommation d'énergie annuelle est de 10 641 700 MJ, la production d'énergie annuelle est de 7 035 650 MJ. La répartition des cultures est présentée dans le schéma ci-après (cas 1) et comprend du miscanthus. La culture de miscanthus est donc compatible avec la maximisation du résultat économique dans les conditions précitées. L'exploitation est ainsi capable de nourrir 7200 personnes environ alors qu'elle consomme de l'énergie comme 19 personnes (bilan net).

▪ **Une succession de minimisations de la consommation énergétique a ensuite été réalisée avec des contraintes de résultat économique plus faible que l'optimum économique.** Les résultats de ces minimisations indiquent une augmentation des surfaces en jachère, en prairie et en miscanthus (+13 ha de miscanthus, +20 ha de prairie, +86 ha de jachère pour une contrainte de 160 000 €, voir schéma cas 2), et ce principalement aux dépens des cultures de vente (céréales à paille), dont la surface diminue (- 91 ha dans le cas exposé).

Par conséquent, les économies de consommation énergétique sont principalement réalisées grâce à la substitution de surfaces à faibles besoins à des cultures de vente plus énergivores. La consommation de fertilisation minérale et organique diminue. Par ailleurs, le nombre d'animaux et donc la production de lait diminuent également, occasionnant ainsi des économies d'énergie. On définit l'élasticité de la consommation énergétique comme le rapport :

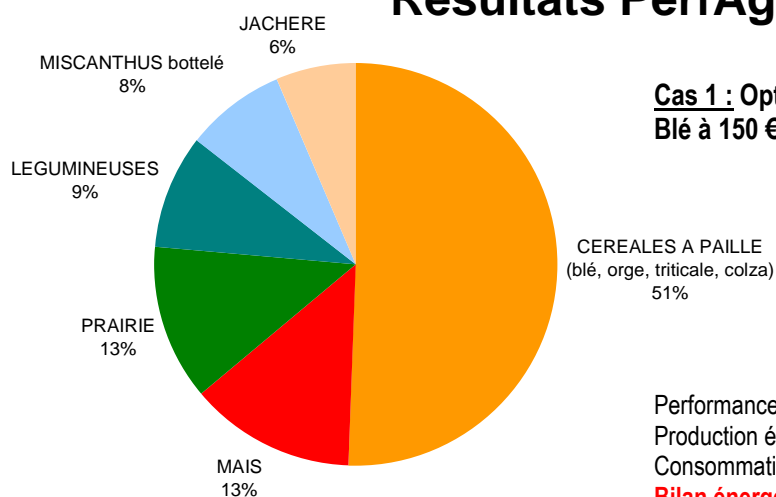
$$[\text{variation de consommation énergétique}] / [\text{variation de résultat économique}]$$

¹³ Prix de rachat proposé par Bical Biomasse France. Pour comparaison, le fioul est acheté actuellement à environ 60 €/MWh. Voir aussi Tableau 7 : Prix des principaux types de combustibles disponibles en France en 2006.p.19.

¹⁴ Coût d'implantation annuel qui correspond au coût total moyen en année d'implantation (voir Annexe 1 : Coûts de production du miscanthus p.46) et réparti sur 15 ans

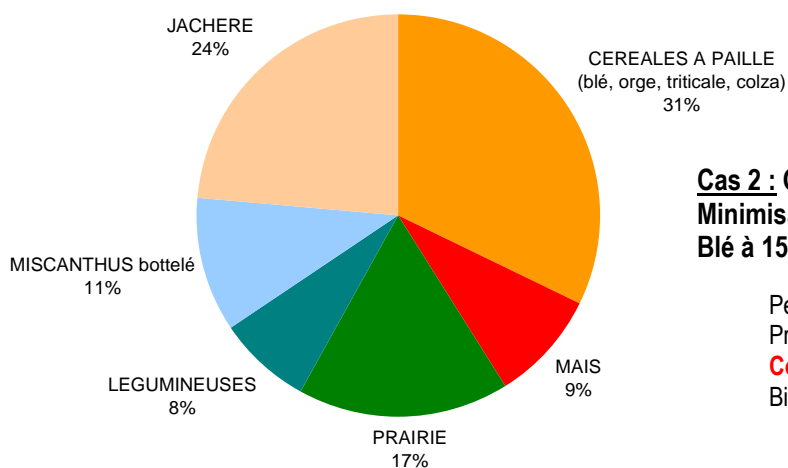
¹⁵ Cette valeur ne tient compte que des activités de production agricole. Elle ne prend pas en compte les autres activités intégrées au bilan réalisé en 2006 : la laiterie, les bureaux et les logements des personnels.

Résultats PerfAgro



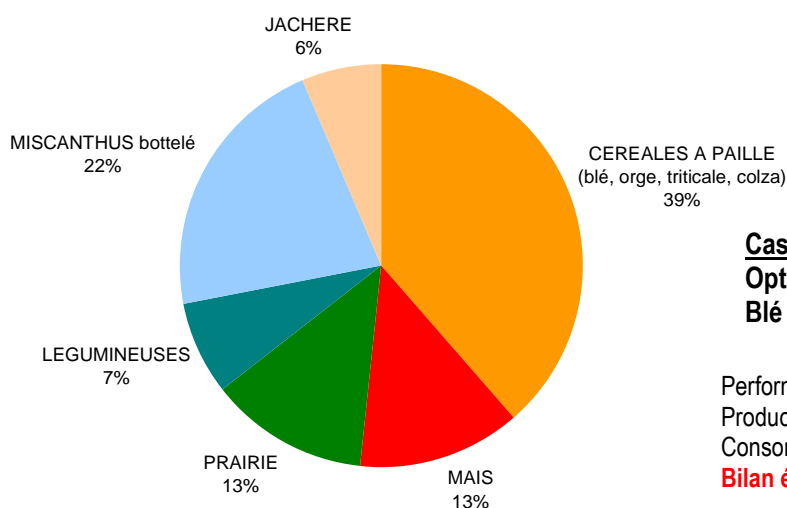
Cas 1 : Optimisation économique Blé à 150 €/t

Performance économique : 204 895 €
 Production énergétique : 7 035 650 MJ
 Consommation énergétique : 10 641 700 MJ
Bilan énergétique : - 3 606 030 MJ



Cas 2 : Optimisation énergétique Minimisation de la consommation énergétique Blé à 150 €/t

Performance économique : 160 000 €
 Production énergétique : 10 614 400 MJ
Consommation énergétique : 8 273 980 MJ
 Bilan énergétique : 2 340 370



Cas 3 : Optimisation énergétique Optimisation du bilan énergétique Blé à 150 €/t

Performance économique : 200 000€
 Production énergétique : 24 232 700MJ
 Consommation énergétique : 10 594 000 MJ
Bilan énergétique : 13 638 700 MJ

On obtient les résultats suivants en calculant l'élasticité énergétique entre la situation de l'optimum économique et la situation de contrainte à 200 000 €, entre la situation de contrainte à 200 000 € et la situation de contrainte à 190 000 €, et entre la situation de contrainte à 190 000 € et la situation de contrainte à 180 000 € :

Optimum – résultat économique	0	4895	14 895	24 895
Elasticité de la consommation énergétique		2,18	1,21	0,84

Tableau 10. Elasticité de la consommation énergétique selon l'écartement par rapport à l'optimum économique

On trouve donc que l'élasticité de la consommation énergétique est décroissante. C'est-à-dire que le premier euros consenti pour diminuer la consommation énergétique est le plus efficace. Chaque euro supplémentaire consenti occasionne un gain énergétique moindre.

▪ **Par la suite, une succession de maximisation du bilan énergétique est effectuée.** Avec l'outil PerfAgro, on parvient à calculer des solutions optimales du point de vue du bilan énergétique, en fixant le résultat économique à des valeurs plus faibles que l'optimum de 204 895 €.

Avec une diminution du résultat de 2,4 % (contrainte de résultat à 200 000 €), la solution optimale proposée présente déjà un bilan énergétique positif : le bénéfice net énergétique est de 13 638 700 MJ. C'est équivalent aux besoins annuels en énergie primaire de 71 personnes. L'amélioration du bilan énergétique par rapport à l'optimum est de 480 % et l'élasticité du bilan énergétique de 200.

L'assolement comprend 109 hectares de miscanthus, soit 1/5 de la surface cultivable (augmentation de 168 % de la surface de miscanthus par rapport à la situation initiale). On obtient alors une diminution nette des surfaces de céréales à paille (voir cas 3 page précédente). En revanche la production laitière est entièrement maintenue. La capacité nourricière de l'exploitation chute quant à elle de 37 % (presque 2700 personnes nourries de moins qu'à l'optimum).

Devenir une ferme à énergie positive est donc réalisable sans diminution importante du résultat économique. L'amélioration du bilan énergétique peut alors être réalisée grâce à une augmentation conséquente de la surface en culture énergétique. Ceci se fait au prix d'une diminution importante de la capacité nourricière de l'exploitation.

Les optimisations successives avec une borne de résultat économique décroissante donnent les résultats suivants :

	Résultat économique	Bilan énergétique	Surface de miscanthus
A	204 895 € (optimum)	- 3 606 030 MJ	40,54 ha
B	200 000 €	13 638 700 MJ	108,86 ha
C	190 000 €	17 269 500 MJ	122,93 ha
D	180 000 €	18 090 600 MJ	123,60 ha

Tableau 11. Evolution des surfaces de miscanthus en fonction de la contrainte de résultat économique

Entre les situations B et C la surface de miscanthus n'augmente que de 13 %. Cette progression tombe à 0,5 % entre C et D. Par ailleurs, plus on baisse les exigences de

résultat, plus l'amélioration du bilan énergétique est faible par rapport à la perte de résultat (l'élasticité tombe à 5 entre les situations de contrainte à 200 000 € et 190 000 €, puis en-dessous de 1 avec des diminutions de résultat plus importantes). Enfin, le nombre de personnes nourries continue de diminuer : entre les cas B et C, il y a environ 500 personnes nourries en moins, pour seulement 20 personnes de plus alimentées en énergie.

Cette « stagnation » relative du bilan énergétique se décompose en 2 phénomènes visibles dans le Tableau 12 ci-après :

- La production d'énergie augmente moins vite
- Mais la consommation d'énergie diminue de manière accélérée

Optimum – résultat économique	0 (A)	4895 (B)	14 895 (C)	24 895 (D)
Elasticité de la production d'énergie	102,31	2,59		0,10
Elasticité de la consommation d'énergie	0,19	0,94		1,26

Tableau 12. Elasticités énergétiques selon l'écartement par rapport à l'optimum économique

L'assolement ne change pas beaucoup, en revanche le nombre d'animaux diminue (-11 % entre les cas B et C).

Ainsi entre les cas A et B, la diminution de résultat est, en quelques sortes, entièrement consacrée à la production d'énergie par la culture de miscanthus. Les diminutions supplémentaires de résultat dans le but d'améliorer le bilan énergétique sont réalisées par la diminution de la capacité productive de l'exploitation.

Ainsi, le miscanthus est tout à fait compatible avec une logique de maximisation des performances économiques de l'exploitation. Le bénéfice d'un point de vue énergétique est extrêmement important pour les 100 premiers hectares implantés, surtout comparé au bénéfice apporté par une minimisation des consommations énergétiques. Cependant il faut nuancer ce propos à la lumière du fait que les autres cultures ne sont pas affectées d'une valeur énergétique. Le gain énergétique apporté par le miscanthus serait sans doute moindre si on affectait une valeur énergétique au colza (ce qui serait assez concevable, étant donné que le colza est utilisé comme agrocarburant à l'heure actuelle).

II.4. Aspects environnementaux

II.4.1 Bilan énergétique

Le bénéfice-clef du miscanthus semble être que l'énergie dépensée pour sa culture (plantation, produits chimiques, récolte, séchage etc.) serait très inférieure à l'énergie produite quand il est utilisé comme combustible. Ce ratio énergie (défini comme l'énergie « sortie » par rapport à l'énergie « entrée ») a été calculé par ADAS Consultancy Ltd pour le Miscanthus et d'autres cultures. Cette étude montre que planter du Miscanthus à la place des cultures annuelles peut réduire drastiquement les intrants énergétiques, tout en augmentant la production d'énergie sous la forme de matériel cellulosique, qui est un bon combustible. Des chiffres similaires calculés par Bullard et Metcalfe (2001) ont été présentés pour le miscanthus seul dans II.2.2 page 12 sur les aspects relatifs à la valorisation énergétique du miscanthus.

Culture	Energie « entrée » (MJ/ha/an)	Energie « Sortie » (MJ/ha/an)	Ratio
Miscanthus	9.224	300.000	32,53
Saule	6003	180.000	29,99
Chanvre	13.298	112.500	8,46
Blé	21.465	189.338	8,82
Huile de colza	19.390	72.000	3,76

Tableau 13 : Comparaison des ratios d'énergie entrées/sorties.
 Source : ADAS 2001

II.4.2 Stockage de carbone dans la biomasse et dans le sol

- **Le miscanthus fixe davantage de carbone dans sa biomasse qu'il n'en consomme pour sa culture.** En effet, des calculs publiés par le DTI¹⁶ (ADAS, 2001) ont estimé le ratio de carbone du Miscanthus à 53 pour 1. Cela signifie que pour chaque unité de carbone issu d'intrants anthropiques nécessaires à la culture et la récolte de Miscanthus, 53 unités de carbone sont récupérées par la plante dans l'environnement pour constituer sa propre biomasse.

La biomasse du Miscanthus contient 47 % de carbone, par conséquent une culture qui produit 15 tonnes de matière sèche par hectare peut fixer dans sa matière organique en un an 7 tonnes de carbone, soit l'équivalent de 25,7 tonnes de CO₂.

Ainsi la production d'énergie à partir du miscanthus est potentiellement neutre en carbone, parce que seul le carbone fixé par photosynthèse sur la tige lors de la saison de croissance précédente est relâché quand la plante est brûlée, économisant ainsi une quantité équivalente de combustible fossile issu du carbone. Une quantité significative d'émissions peut donc être évitée.

Le DTI a calculé que la co-combustion de pellets de Miscanthus provenant d'une culture à haut rendement pouvait économiser 16,4 tonnes d'équivalent CO₂ de gaz à effet de serre par hectare et par an (Harvey J., 2007). Le bilan CO₂ indique une réduction de 90 % des émissions, comparé à la combustion du charbon, à production énergétique identique (DEFRA, 2001).

- **Le miscanthus fixe également du carbone dans le sol.** En effet, la canne de miscanthus est récoltée annuellement, mais aucune extraction du sol n'est pratiquée après la première année, de telle sorte que le miscanthus peut séquestrer du carbone dans le sol au niveau de ses rhizomes. Ainsi, on estime que 5 à 7 tonnes de carbone peuvent être séquestrées par hectare durant les 4 premières années de la culture. Par contraste, les cultures annuelles tendent à réduire la quantité de carbone du sol. Comparé au saule en TTCR et à la forêt, le miscanthus est la plante qui a le taux de séquestration de carbone le plus élevé, de 0,93 tonnes de carbone/ha/an (Harvey J, 2007).

Cependant, très peu de cultures ont été menées jusqu'à leur terme. On a donc très peu de recul sur la quantité de CO₂ restituée à l'atmosphère lors du retournement de la terre. Il se peut que la restitution réduise considérablement tous les bénéfices issus de l'accumulation de carbone durant les années de culture.

¹⁶ DTI : Department of Trade and Industry (Grande-Bretagne)

- **Le miscanthus requiert en théorie peu de fertilisant**, par conséquent la quantité de N₂O émise par le sol devrait chuter, comparé aux cultures arables. D'autre part, une diminution des émissions de NO_x devrait se produire du fait de l'augmentation présumée de l'efficacité d'utilisation de l'azote minéral du sol, d'une saison de croissance et de couverture du sol plus longue, et d'une plus grande aire d'extension du système racinaire, qui mène à une meilleure efficacité d'extraction de l'azote du sol.
- **Les systèmes de bioénergie émettent moins de dioxyde de soufre et d'oxydes d'azote** que l'énergie équivalente dérivée de combustibles fossiles. Par conséquent, une utilisation accrue de bioénergie devrait théoriquement réduire les niveaux de SO₂ dans l'atmosphère, et réduire ses effets négatifs. (IPCC, 1992).
- **Il existe cependant quelques impacts potentiellement négatifs.**
 - La culture de miscanthus pourrait provoquer une augmentation de la teneur en bactéries oxydant la matière organique du sol. En effet, le travail cultural et la fertilisation azotée sont les deux facteurs responsables de la suppression de ces bactéries. L'implantation de cultures telles que le miscanthus, qui nécessitent peu d'interventions, pourrait donc restaurer ce type de bactéries et provoquer une augmentation des émissions de méthane dans les champs (Mosier et al., 1997; Weier et al., 1998). Cependant un relevé des émissions sur les cultures reste à effectuer afin de quantifier l'impact sur les émissions de méthane.
 - Il faut noter par ailleurs que la combustion mal contrôlée de biomasse (combustion incomplète due à l'humidité des bûches des cheminées par exemple) est une importante source de pollution atmosphérique particulaire. La biomasse a en effet un certain nombre de caractéristiques liées à sa composition en constituants minéraux qui la rendent plus difficile à manipuler et brûler que les combustibles fossiles. Certains types de biomasse utilisés contiennent des quantités significatives de chlore, de soufre et de potassium. Les sels, KCl et K₂SO₄, sont assez volatils, et l'émission de ces composants peut provoquer des dépôts sur les surfaces d'échanges de chaleur, d'où une réduction des échanges thermiques et un taux de corrosion accru. Le relargage de métaux alcalins, de chlore et de soufre à la phase gazeuse peut également être à l'origine d'émissions significatives d'aérosols (particules très fines), associés à des émissions d'HCl et de SO₂. La nature et la sévérité des problèmes opérationnels liés à la biomasse dépendent du choix de la technique de combustion (voir aussi p.13) (Ademe 2007 ; Lewandowski *et al.* 2003).

Beaucoup des données sur les émissions de gaz à effet de serre sont incertaines ou non chiffrées. Par conséquent, il paraît important de mettre en place un suivi précis des émissions de GES, notamment de N₂O, par la culture de miscanthus. Il convient en outre de tester les effets de la récolte et du retournement des terres sur le bilan carbone de la culture de miscanthus. Enfin, la composition des fumées de combustion sera à surveiller de près sur la plateforme miscanthus à Grignon.

II.4.3 Autres indicateurs environnementaux

+ Matière organique du sol

Les cultures de miscanthus peuvent restaurer le niveau de matière organique dans les sols par rapport aux cultures annuelles. En effet, le renouvellement du carbone se fait

par les racines et par la production de phytolithe, qui est un composant carboné majeur retrouvé dans les sols supportant ce type de culture (très résistant à la décomposition) (Liebig *et al.* 2005). La matière organique peut atténuer l'acidité ou l'alkalinité des sols. Elle permet également de retenir davantage les fertilisants et les pesticides, et ainsi diminue le lessivage.

+ Nitrates et pesticides

Les cultures pérennes énergétiques devraient également réduire la quantité d'azote lessivé du sol, grâce à la réduction de l'utilisation d'intrants et du travail du sol, l'augmentation de la couverture végétale et de la saison de croissance et l'agrandissement du système racinaire.

En outre, un emplacement bien réfléchi de plantations énergétiques pérennes peut assurer une certaine protection de la qualité de l'eau vis-à-vis de l'azote. Les plantations lignocellulosiques pérennes ont en effet une forte capacité de rétention de l'azote, comparé aux cultures annuelles. L'azote retenu par ces plantations n'est pas transporté vers les cours d'eau. Le lessivage de nutriments du sol pourrait dans certaines conditions fournir suffisamment d'azote pour la culture de biomasse, tout en atténuant l'effet de nitrification excessive dans le cours d'eau.

L'utilisation des pesticides peut être réduite de 90% par rapport aux cultures annuelles, du fait de la résistance naturelle des cultures pérennes (Hohenstein et Wright, 1994).

+ Biodiversité et paysage

Une culture de miscanthus constitue un abri intéressant pour les animaux car la récolte du miscanthus est décalée avec la période de nidification des oiseaux (Vimond, 2006).

Des cultures expérimentales en Grande-Bretagne ont par ailleurs constitué un habitat pour une variété d'animaux. Des lièvres, des lapins et des renards ont pu être observés, bien que la taille des cultures empêche de voir à plus de quelques mètres dans la culture. Des perdrix et des faisants ont également été repérés dans les champs de miscanthus. Leur présence démontre que cette culture pourrait constituer un abri satisfaisant pour le gibier à plumes, mis à part la difficulté de se frayer un chemin à travers la culture, lorsqu'elle est dense. De plus, une trop forte densité de la culture pourrait empêcher les oiseaux de s'installer à cause du manque d'espace pour s'envoler. Cependant de l'espace pourrait être créé soit au sein de la culture, par l'aménagement de bandes vierges, ou à sa périphérie. De petits oiseaux et des papillons ont été observés en grand nombre. Les animaux ont causé peu de dommages sur les cultures : des lapins et des lièvres ont parfois été observés se nourrissant de jeunes pousses, mais dès que la tige s'allonge en été cette pratique cesse (Newman, 2003).

Les plantations d'herbacées énergétiques peuvent même présenter davantage de biodiversité que d'autres types de végétaux, surtout si ces plantations sont mises en place sur des terres dégradées ou anciennement en culture annuelle. En revanche, remplacer des forêts indigènes ou des habitats naturels par des cultures énergétiques risque fort d'altérer la biodiversité.

Par ailleurs, étant donné que le miscanthus est implanté sur un site pour au moins 15 ou 20 ans, et que sa taille peut atteindre 3,5 m de hauteur, son impact sur le paysage est à prendre en compte très sérieusement.

Au-delà de l'acceptabilité, on a encore peu de maîtrise de la culture de miscanthus. Cette culture présente notamment toutes les caractéristiques d'une adventice : elle est

non native et parvient à survivre avec un minimum d'intervention humaine. Elle se démarque typiquement pour sa résistance et sa grande tolérance environnementale. Contrairement à d'autres plantes, le miscanthus ne produit pas de propagules facilement dispersables, mais il a un rhizome bourgeonnant, et produit des tiges à grande rapidité de croissance. Ces caractéristiques créent un risque assez imprédictible d'invasion (DiTomaso *et al.*, 2007).

+ Erosion

Grâce à l'extension du système racinaire qui retient l'eau, l'importante couverture végétale et le faible travail du sol, les problèmes d'érosion peuvent diminuer jusqu'à 95% par rapport à des cultures annuelles.

Plante	Erosion (tonne/ha/an)
Maïs	21,8
Soja	40,9
Cultures énergétiques	0,2
Taillis à courte rotation	2,0

Figure 4 : Niveaux d'érosion typiques associés avec une sélection de cultures alimentaires et énergétiques.
Source : US Congress, 1993

Par conséquent les pertes de certains minéraux pourraient être réduites.

+ Réhabilitation de terrains pollués

Plusieurs études ont mis en évidence la capacité du miscanthus à croître en terrains agricoles ou industriels pollués. Il a par exemple poussé avec succès sur des terres polluées par des métaux lourds à cause de l'exploitation de mines d'étain. La croissance et le captage de métal par le miscanthus cultivé sur des déchets miniers et des sols pollués par du cuivre, du zinc et de l'arsenic ont été étudiés pendant deux ans par Visser et ses collaborateurs (2001). Les résultats ont montré que le cuivre, l'arsenic et le zinc contenus dans la biomasse aérienne était légèrement inférieure dans le miscanthus cultivé sur des sols non pollués par rapport au miscanthus cultivé sur des sols pollués. Cependant les observations n'ont pas montré d'extraction significative de métaux par le miscanthus cultivé sur des déchets miniers.

L'INRA consacre également des recherches sur la reconversion des anciens champs d'épandage de l'agglomération parisienne vers des filières agricoles (voir aussi II.5.3 p.32).

Si le miscanthus ne semble pas pouvoir épurer tous types de sols, il peut en tout cas participer au relancement de l'activité agricole dans des territoires où les cultures pour l'alimentation humaine ou animale ne sont pas envisageables du fait d'une pollution trop importante.

Ainsi, la culture de miscanthus pourrait prendre tout son sens dans la valorisation économique de zones à faible potentiel agricole ou des zones polluées.

II.5. Aperçu des dispositifs d'expérimentation et de démonstration en Europe

II.5.1 Bref historique du miscanthus en Europe

Les premières cultures de Miscanthus en Europe datent des années 1930, aux fins d'utilisation en tant que plante d'ornement. Des études du potentiel de rendement du miscanthus pour la production de fibre cellulosique au Danemark ont été réalisées à la fin des années 1960. Les essais sur la production de bioénergie ont commencé au Danemark en 1983, en Allemagne en 1987 puis le mouvement s'est étendu à travers l'Europe. Le développement de méthodes d'établissement de la culture à moindre coût, et amélioration de la capacité de résistance à l'hiver, est en cours d'étude depuis le milieu des années 1990 (Scurlock, 1999).

La plupart des essais se sont faits sur les clones de Miscanthus x giganteus, hybride de M. sinensis et M. sacchariflorus provenant du Japon.

Le programme EMI (European Miscanthus Improvement project) a pour objectif d'élargir la base génétique du miscanthus, en maximisant sa productivité et capacité d'adaptation, et de développer des méthodes qui atteignent ces objectifs (Scurlock, 1999).

En 1997, des essais ont été amorcés en 5 emplacements en Europe, de la Suède au Portugal. Le European miscanthus Productivity Network a été créé vers 1993, avec 18 sites de 10 pays différents. Les résultats de ces essais ont été synthétisés dans une publication de la Commission Européenne, The Miscanthus Handbook (Walsh et McCarthy 1998) en 1997.

La surface totale des essais de miscanthus en Europe en 1995/1996 était de 170 ha.

II.5.2 Situation actuelle du miscanthus en Europe

Le miscanthus est présent dans divers pays d'Europe (Grande-Bretagne, Allemagne, Danemark, Pays-Bas, etc.), et également au Japon et aux Etats-Unis. Il est souvent cultivé à des fins expérimentales, rarement à des fins commerciales. Une recherche sur Scirus¹⁷ avec la mention "miscanthus" donne 15 592 résultats (contre 85 942 pour "rapeseed", et 943 972 pour "biomass"). Parmi les 100 premiers résultats de la recherche "miscanthus" classés par ordre de pertinence, un seul article est affilié à un laboratoire de recherche Français.

Par ailleurs, alors que 15 000 hectares ont été plantés depuis la fin des années 1990 en Grande-Bretagne - dont 7 000 pour alimenter en combustible la centrale thermique de Drax, la plus importante du pays -, la France n'en comptait encore que 800 hectares en août 2007, essentiellement au nord de la Loire (AFP 12/08/07).

II.5.3 En France

Jusqu'à 2006, la France pratiquait seulement des essais en plein champ (INRA, société Kalys à Roubaix). Ces essais visaient à l'étude de la compatibilité de la culture de miscanthus avec les objectifs d'économie agricole. Des études de l'INRA ont également porté sur la capacité de croître en milieux pollués. Le miscanthus a été

¹⁷ Moteur de recherche scientifique de référence sur internet

trouvé apte à être utilisé pour la reconversion des anciens champs d'épandage de l'agglomération parisienne vers des filières agricoles.

Le passage du stade expérimental au stade « industriel » de la culture de miscanthus s'est produit au printemps 2006 en Bretagne, avec la mise en culture d'une surface de 40 ha plantée par Bical France. 55 hectares ont été implantés en Ile-et-Villaine au sein d'une coopérative de déshydratation en 2007. Une dizaine d'hectares a été plantée sur les terres polluées par l'ex-fonderie Metaleurop Nord à Noyelles-Godault (Pas-de-Calais). Une dizaine d'hectares de miscanthus ont été mis en place en Seine-et-Marne en avril 2007 et une centaine d'hectares supplémentaires en 2008 dans le cadre de l'association Biomasse Energie Sud 77 (BES 77). Au total 600 hectares ont été plantés en 2007 (Roupnel 2007).

Il y a également quelques hectares en Moselle et en Alsace sous l'inspiration allemande.

Des projets de recherche sur le miscanthus et les bioénergies en général sont toutefois toujours en cours.

+ Projet REGIX

REGIX est un programme de recherche initié dans le cadre du programme Bioénergie, financé par l'ANR et piloté par l'ADEME. La recherche menée dans le cadre de ce projet est structurée en types de ressources, modes de conversion (enzymatique, thermo-chimique), et approches transversales (environnementale, technique, socio-économique). Concernant le pôle de recherche par types de ressources, trois programmes sont en cours, dont le plus important est REGIX (Référentiel unifié, méthodes et expérimentations en vue d'une meilleure évaluation du gisement potentiel en ressources lignocellulosiques agricole et forestière pour la bioénergie en France). Ce projet, initié en 2005 pour une période de 3 ans, a pour objectif d'appréhender dans une approche unifiée (portail unique forêt/agriculture) les savoirs, les méthodes et les techniques concernant les ressources lignocellulosiques nécessaires à la filière biocarburant. Il est piloté par ONIDOL et Arvalis. Dans le cadre de REGIX, un réseau de sites expérimentaux s'est mis en place, dans l'optique de constituer un référentiel français technique et économique sur la biomasse lignocellulosique. Ce réseau est constitué de trois types de sites : des sites de recherche/expérimentation, des sites de démonstration, et des sites mixtes.

Le réseau REGIX a pour objectif de favoriser le partage de retours d'expérience sur les cultures énergétiques. Les sites de ce réseau ont mis en place des protocoles d'expérimentation communs, afin d'étudier les aspects agronomiques des cultures et de faire des modélisations économiques, agronomiques et environnementales.

Ce réseau est constitué de deux sites très instrumentés où sont développés des modèles : Mons et Toulouse, et de 31 sites plus ou moins grands, répartis sur toute la France, qui servent à valider les modèles élaborés en station de recherche dans différentes conditions pédo-climatiques.

A Mons, un suivi précis a été réalisé par l'INRA (Stéphane Cadoux) pour sept cultures énergétiques différentes, dont le miscanthus, sur la quantité de matière sèche produite, la composition de la production, l'azote dans le sol et la plante, la dynamique du carbone du sol, les gaz à effet de serre émis (N_2O et CO_2).

+ Projet Picardie espèce ligno-cellulosique

Dans le contexte de la mise en place de nouvelles filières, le projet "Picardie Espèces Ligno-cellulosiques" mené par l'INRA Estrées-Mons/Lille se structure autour d'un partenariat pluridisciplinaire de recherche régional ayant pour objectif :

- de contribuer à combler les lacunes scientifiques concernant les filières ligno- cellulosiques en fournissant des connaissances nouvelles au niveau inter et intra- spécifique en termes de productivité et d'impacts environnementaux ;
- d'intégrer ces informations pour comparer ces espèces dédiées aux espèces habituellement cultivées en Picardie (blé, betterave, colza) en vue d'identifier celles qui sont les plus intéressantes et de dégager des pistes pour leur amélioration génétique.

Ces recherches sont basées sur les sites expérimentaux d'Estrées-Mons.

+ **Projet Paroifroid**

Ce projet, également basé à l'INRA Estrées-Mons/Lille, vise à évaluer les changements des caractéristiques pariétales du miscanthus et du pois au cours de l'acclimatation au froid pour deux objectifs :

- identifier les caractères les plus révélateurs de l'adaptation de la paroi au stress froid
- étudier leur déterminisme génétique.

Des résultats sont attendus au plan scientifique et au plan technique pour améliorer les connaissances au niveau multidisciplinaire (chimie, biologie moléculaire, cytologie, génétique quantitative). Il s'agit, entre autres, de disposer de bonnes connaissances sur la résistance au gel (miscanthus et pois d'hiver), d'identifier les caractères les plus révélateurs de l'adaptation de la paroi au stress froid (miscanthus et pois), d'évaluer la variabilité entre espèces (miscanthus) ou au sein des espèces (pois et miscanthus) et d'étudier leur déterminisme génétique (pois), de disposer de données de référence en Picardie (miscanthus) et contribuer à élargir le choix variétal pour la résistance au gel (miscanthus et pois).

+ **Projet bioénergie et sols pollués**

La chambre interdépartementale d'agriculture d'Ile-de-France mène des projets de biomasse, sur la thématique bioénergie et sols pollués, financés par le Conseil Régional d'île de France, dans le contexte de la zone de Pierrelaye contaminée par des boues industrielles. Ces projets consistent en essais de miscanthus et d'autres types de végétaux (seigle, taillis à rotation rapide ...) sur petites parcelles et suivis par l'INRA de Versailles. L'opération doit durer cinq ans, de 2006 à 2011.

+ **Projet INRA EGC Grignon**

Une culture de miscanthus d'environ 200 m² a été implantée il y a environ 20 ans, sur le site de l'INRA Environnement Grande Culture à Grignon. La culture a été faite d'un seul tenant, et différents paramètres (rendements, émissions de GES) ont été suivis.

Ainsi, dans le paysage actuel du miscanthus en France, il semble y avoir une place pour la plateforme miscanthus du projet Grignon Energie Positive. Cette plateforme, entourée d'un environnement scientifique d'exception (INRA, AgroParisTech), sera consacrée au développement de données objectives sur les techniques culturales, l'intérêt économique de la production et la valorisation, les débouchés potentiels, et l'impact environnemental, de la culture de miscanthus en région Parisienne.

III. Description du projet de plateforme miscanthus à Grignon

III.1. Les caractéristiques de la ferme de Grignon

La ferme de Grignon couvre une surface de 815 hectares avec près de 600 ha de Surface Agricole Utile (répartis sur 3 sites : Grignon, Palaiseau et St Quentin en Yvelines). Le corps de ferme se situe à Grignon.

Les différentes analyses physiques et chimiques pratiquées sur les parcelles de la ferme ont établi qu'elles se composent principalement de limons argileux (60%), qui présentent une bonne capacité en eau, et d'argilo-calcaires superficiels (18%), qui ont un pouvoir de rétention moindre.

Ce bon potentiel agronomique est renforcé par les conditions climatiques propices au miscanthus, puisque la pluviométrie de 600mm par an est idéalement répartie : 50mm par mois. Ce schéma de précipitations a l'avantage de ne pas provoquer de stress hydrique pénalisant fortement le rendement du miscanthus.

Ainsi, les références pédoclimatiques de certaines parcelles de la Ferme de Grignon sont à première vue favorables à la mise en place de cultures énergétiques.

III.2. Objectif

L'objectif de cette partie est de présenter précisément ce en quoi la plateforme miscanthus pourra consister à Grignon, d'un point de vue technique, économique et environnemental, et comment elle s'intégrera dans le contexte régional de production de cultures énergétiques et de production industrielle, et d'environnement urbain.

Nous présentons pour ce faire dans le tableau page suivante tous les aspects de la culture de miscanthus qui ont été repérés tout au long de ce rapport comme dignes d'être testés sur une plateforme à Grignon.

A partir de ces différents points de questionnement, nous définissons trois formats de plateforme possible, avec des vocations légèrement différentes mais se rejoignant sur un objectif commun : alimenter des références techniques et méthodologiques au niveau régional, afin de les diffuser au plus grand nombre.

	Production		Valorisation	
Aspects techniques	production de rhizomes	modes de récolte	transformation post récolte	technique d'ensilage, bottelage, granulation
		techniques de tri et calibrage		
		techniques de conservation	valorisation en biomatériau ou litière	test de différentes machines de pressage, granulation...
		technique de microbouturage		
	études variétales, génétiques (productivité, résistance aux parasites, qualité de conservation, taille et forme des rhizomes,...)	étude des différents matériaux susceptibles d'être produits		
	implantation	profondeur : test de différentes profondeurs d'implantation	valorisation énergétique	test de différentes chaudières à biomasse
		période : identification de la période la plus adaptée pour l'implantation		
		mécanisation : test, développement et perfectionnement de machines à planter	Suivi environnemental des différents types de valorisation	suivi de la consommation d'énergie et des émissions de GES des différents procédés de valorisation
		densité : test de différentes densités de plantation		
		Traitements : recherche de solutions de traitement favorables à l'implantation		
	fertilisation	fréquence : test de différentes fréquences de fertilisation (pour déterminer le nombre de passages utiles)		
		type : quels minéraux apporter (Mn?)		
	eau	réserve utile : test de sols avec différentes réserves utiles, irrigation différenciée		
précipitations : suivi de la précipitation et lien avec la productivité				
Sol	qualité : suivi de la qualité du sol (texture, structure) et lien avec le comportement de la culture			
	interactions culture-sol : étude de la capacité de dépollution du miscanthus en sol pollué ?			
Air (GES)	prélèvements gazeux : développement et perfectionnement de la technique de prélèvement des GES des cultures de miscanthus			
Energie	suivi énergétique : développement et perfectionnement des techniques de suivi énergétique			
Récolte	période : comparaison de la récolte en automne, fin d'hiver, autre période			

Tableau 14. Aspects techniques de la production et de la valorisation du miscanthus susceptibles d'être testés à Grignon

	Production		Valorisation	
Aspects économiques	production de rhizomes	Comparaison de différents modes de production	Production de rhizomes	étude des débouchés en IDF pour une activité de pépinière
				étude économique de la filière (coûts, bénéfices)
	Production / récolte	Comparaison des coûts énergétiques et GES des différents choix d'itinéraires techniques	Production de biomatériaux	étude des débouchés chez maraîchers, jardineries, etc.
				étude économique de la filière (coûts, bénéfices)
		Comparaison des coûts économiques des différents choix d'itinéraires techniques, selon la densité de plantation, méthode de plantation, fertilisation, période et technique de récolte	Production de litière	recherche de débouchés dans les centres hippiques etc.
				étude économique de la filière (coûts, bénéfices)
Production de biocombustibles	Recherche des débouchés (marchés des particuliers et des collectivités)			
	Etude économique de la filière et approches d'écologie industrielle			

Tableau 15. Aspects économiques de la production et de la valorisation du miscanthus susceptibles d'être testés à Grignon

III.2.1 Diverses propositions de dimensionnement et d'objectif pour la plateforme miscanthus de Grignon¹⁸

+ Une plateforme pépinière

Ce modèle de plateforme s'appuie sur le besoin de références concernant la production de rhizomes. En outre, la production de rhizomes a sa place dans le contexte économique de l'île-de-France du fait du manque de disponibilité des rhizomes (peu de fournisseurs), et dans l'optique d'un développement de la filière miscanthus dans la région.

La production de rhizomes est à étudier à la fois du point de vue technique et du point de vue économique.

En effet, la plateforme pépinière pourrait contribuer à développer les compétences techniques et méthodologiques en matière de multiplication voire de microbouturage (voir 0 p.5) des rhizomes. Elle pourrait également s'accompagner d'études concernant l'implantation des rhizomes, puisqu'une pépinière est destinée à être retournée tous les trois ans pour la récolte des rhizomes. Une étude variétale peut également s'insérer dans ce dispositif, destinée à déterminer quelles variétés sont les plus faciles à reproduire, quelles sont les plus résistantes au stockage et au transport (variations d'humidité et de température), et quelles sont les plus productives lors de la réimplantation.

Une pépinière de 10 hectares par exemple pourrait ainsi servir à tester :

- 2 ou 3 variétés de miscanthus

¹⁸ Pour plus de détails, voir Tableau 14 et Tableau 15

- 2 techniques de multiplication (bouturage et division) éventuellement déclinées en diverses modalités
- 2 ou 3 profondeurs d'implantation
- Plusieurs machines à planter

Ceci représenterait donc entre 8 et 12 parcelles de tests d'environ 1 hectare.

Une plateforme pépinière pourrait s'accompagner de la comparaison économique et environnementale (bilan carbone, bilan de consommations énergétiques) entre les différents modes de production de rhizomes. En outre, les techniques de tri, de calibrage et de conservation des rhizomes sont à tester. Par ailleurs, des études de la filière miscanthus dans son ensemble, et ses potentialités de développement en Ile-de-France, seraient également envisageables. Enfin, le développement d'une pépinière de miscanthus pourrait accompagner efficacement un effort de développement de la filière miscanthus en Ile-de-France, en supposant qu'une production locale de rhizomes pourrait encourager les agriculteurs locaux à se lancer dans la production de miscanthus.

Une telle pépinière de 10 hectares pourrait fournir au bout de 3 ans suffisamment de rhizomes pour couvrir environ 300 hectares de miscanthus. Le coût de mise en place de cette plateforme comprendrait l'investissement en rhizomes initiaux et en matériel de calibrage et de stockage (chambre froide). Les coûts de fonctionnement seraient principalement ceux des suivis qui y seraient réalisés.

+ Une plateforme de production de miscanthus pour la valorisation économique

Ce modèle de plateforme s'appuie sur les besoins de références sur le potentiel régional pour produire du miscanthus destiné à être valorisé soit énergétiquement, soit pour constituer du biomatériau, soit pour constituer des litières. Il s'agit donc d'une plateforme visant à optimiser la productivité et le potentiel de valorisation du miscanthus, ainsi que les méthodes de valorisation.

Les aspects techniques de la production de miscanthus (de la plantation à la récolte, en passant par la fertilisation) sont donc à examiner de près dans ce type de plateforme, de manière à les optimiser et à en assurer la maîtrise : outre différents paramètres liés à l'implantation et à la variété, des aspects liés à la fertilisation, à l'irrigation, et au mode de récolte pourraient donc être testés. Pour cela, une dizaine d'hectares, divisés en parcelles d'un demi-hectare ou moins, permettraient de réaliser un nombre intéressant de tests différents.

En parallèle, un suivi environnemental (énergie, gaz à effet de serre, sol) est utile pour déterminer l'intérêt en terme d'énergie, d'effet de serre, et de qualité des sols et de l'eau de la culture dans son contexte de production. Pour les dépenses énergétiques liées aux opérations culturales, le suivi mis en place consistera au relevé systématique des consommations de carburant par les machines utilisées, et leur consignation dans des carnets de suivi. Un suivi précis des consommations d'engrais et de pesticides devra également être réalisé. Concernant les émissions de gaz à effet de serre de la culture, une batterie d'outils de prélèvement et d'analyse déjà mis en place à la ferme de Grignon sera utilisée pour le suivi du miscanthus. Il conviendra de faire des prélèvements de gaz surtout sur les parcelles subissant des apports d'intrants différents, à raison de 3 chambres statiques (ou enceintes de prélèvement) par parcelle, car les apports d'intrants et la récolte sont susceptibles d'être les périodes du cycle cultural les plus impactantes en terme d'émissions de gaz à effet de serre. Enfin il conviendra de faire une analyse du sol avant plantation, après la récolte, et après le retournement de la parcelle, pour vérifier entre autres le pouvoir de captage du carbone par le miscanthus, et le pouvoir de rétention des minéraux.

Un suivi de la biodiversité pourra également être réalisé sur les parcelles de miscanthus.

La plateforme de production pourra également être un lieu d'expérimentation de plusieurs techniques ou technologies de conditionnement et de valorisation : pressage, ensilage, granulation du miscanthus, essai de diverses chaudières, essai de différentes techniques de fabrication de biomatériaux.

Les débouchés de la culture de miscanthus dans la région peuvent être nombreux et divers. La proximité de nombreux centres hippiques pourrait garantir une valorisation des copeaux de miscanthus comme litières. Les nombreux petits maraîchers et horticulteurs des environs de la ferme pourraient être intéressés par le miscanthus comme biomatériau pour des pots par exemple. Enfin, la proximité des centres urbains pourrait constituer une clientèle intéressante pour valoriser le miscanthus à des fins énergétiques : immeubles de bureaux, entreprises et administrations à Plaisir, Saint-Quentin-en-Yvelines ... Des études économiques des débouchés possibles dans la région doivent donc être examinées de près.

Le coût de la plateforme comprendra l'investissement initial en rhizomes, les coûts des machines de récolte, de conditionnement, de stockage et de valorisation. Les coûts de fonctionnement seraient principalement ceux des suivis qui y seraient réalisés.

+ Une plateforme de valorisation des sols pauvres ou pollués

Ce modèle de plateforme s'appuie sur les besoins de référence en matière de valorisation économique des sols pauvres ou pollués par les cultures énergétiques. En effet, un des enjeux de la contribution de l'agriculture à la production d'énergie est la minimisation de la concurrence des terres employées pour la production d'énergie avec les terres employées pour la production alimentaire. Une des manières de contourner le problème est d'utiliser pour la production d'énergie les terres les moins fertiles ou les terres polluées qui ne peuvent plus être utilisées pour la production d'alimentation animale ou humaine pour des raisons sanitaires.

Une telle plateforme serait constituée de parcelles de diverses cultures énergétiques (miscanthus, switchgrass, phalaris, TTCR de saule), qui seraient comparées sur des critères de productivité, d'impact environnemental, de débouchés dans la région. Cette plateforme se placerait sur des terres pauvres, ou difficiles à exploiter, à cause de la distance par rapport au corps de ferme par exemple. Des tests sur les itinéraires techniques, les modes de récolte, les technologies de valorisation etc. pourraient également être conduits. La surface nécessaire à cette plateforme serait a priori réduite, l'objectif étant de valoriser uniquement les moins bonnes terres. Il serait également envisageable d'installer la plateforme sur des mauvaises terres appartenant à des agriculteurs voisins.

Le coût de la plateforme comprendra l'investissement initial en rhizomes, les coûts des machines de récolte, de conditionnement, de stockage et de valorisation. Les coûts de fonctionnement seraient principalement ceux des suivis qui y seraient réalisés.

+ Un dispositif pour l'étude technique de la valorisation énergétique

Dans l'optique d'une valorisation énergétique du Miscanthus produit sur la plateforme, l'installation d'une chaudière à biomasse devrait être installée sur la ferme de Grignon. L'étude des performances de combustion pourraient alors être intégrée au programme de la plateforme. Ne relevant pas spécifiquement des compétences d'AgroParisTech, ces questions pourraient être abordées dans le cadre d'un partenariat. Les relations développées depuis plusieurs années avec des équipes compétentes à l'Ecole Centrale de Paris et à l'Ecole de Mines de Paris pourraient être valorisées dans ce cadre.

IV. Conclusion

Les connaissances actuelles sur la culture de miscanthus qui ont été exposées tout au long de ce rapport et qui sont issues de nombreuses années d'expérience de la culture à l'étranger et notamment en Grande-Bretagne, sont résumées dans le tableau suivant :

Variétés cultivées en Europe	<i>M. sacchariflorus</i> , <i>M. sinensis</i> et <i>M. spp giganteus</i>
Période d'implantation	avril-mai
Technique d'implantation	Avec planteuse à pommes de terre ou planteuse à choux
Densité d'implantation	10 000 à 20 000 rhizomes / hectare
Coût d'implantation	3000-3500 €/ha
Fertilisation	0 à 100 kg N/ha, P et K souvent inutile
Herbicide	- 1 passage glyphosate 3L/ha avant implantation - 2 passages Prowl 400 3-3,5 L/ha en 1 ^{ère} année - 0 les années suivantes
Fongicide	0
Nuisibles	Taupins, lapins, sangliers
Période de récolte	Mars à mai. 1 ^{ère} année : broyage et mulch. 2 ^{ème} année et suivantes : récolte.
Technique de récolte	Fauchage et ensilage ou fauchage et bottelage
Coût de la récolte	40-45 €/tMS
Rendement	2 ^{ème} année : 5-10 tMS/ha Années suivantes : 12-20 tMS/ha
Coût total de production	60 €/tMS ou 13 €/MWh = 3,6 €/GJ
Pouvoir calorifique	4700 kWh/tMS = 16,9 GJ/t
Rendement énergétique net	130 à 300 GJ/ha/an
Opération clef de la culture	Implantation
Durée de la culture	15 à 20 ans
Valorisation	Combustion, biomatériau, litière

Cependant, dans ce rapport sont apparus quelques points d'achoppement majeurs pour le développement de la culture en France qu'il semble particulièrement essentiel d'approfondir :

- Les techniques et les modalités optimales d'implantation restent encore à définir plus précisément : profondeur, densité, matériel. En effet le matériel le plus facile à utiliser (planteuse à pommes de terre / à choux) ne donne pas des résultats satisfaisants en terme de temps de travail. L'implantation étant ressentie comme une intervention-clef de la culture du miscanthus, il semble essentiel de faire un effort important pour définir plus exactement les conditions optimales de cette étape dans différents contextes géographiques et climatiques en France.
- L'intérêt environnemental de la culture présente quelques zones d'ombre. Les bénéfices environnementaux gagnés tout au long de la culture ne sont-ils pas complètement remis en cause au retournement de la parcelle au bout de 15 ans ?
- Des efforts restent à faire sur les techniques optimales de stockage et de conditionnement de la récolte, ce qui pourrait faciliter sa valorisation. Les filières de valorisation elles-mêmes restent encore à construire en France. Enfin le miscanthus a un potentiel de valorisation énergétique encore insuffisamment maîtrisé (biocarburant de 2^{ème} génération notamment).

Il existe actuellement en France des structures de recherche académique qui continuent sans cesse d'approfondir les connaissances scientifiques sur le miscanthus et d'apporter des références françaises sur la culture. Il existe par ailleurs des structures agricoles ou commerciales qui contribuent au développement des connaissances techniques de la culture. Il semble qu'il reste de la place pour une structure de recherche appliquée ou de développement qui pourrait faire le lien entre le monde de la recherche et le monde agricole et enrichir de part et d'autre les connaissances sur le miscanthus de nouvelles références.

Les conditions agronomiques, climatiques, économiques, géographiques de la ferme de Grignon rendent la mise en place de miscanthus a priori particulièrement intéressante et faisable. Sa situation, au cœur d'un réseau scientifique d'excellence, est garante de la rigueur et la qualité des protocoles qui vont être suivis. Cette plateforme permettra également d'ouvrir de nouvelles perspectives à l'agriculture en Ile-de-France et plus particulièrement dans la plaine de Versailles.

Ainsi, une plateforme miscanthus de la ferme expérimentale de Grignon trouve sa place en Ile-de-France comme un dispositif unique et original d'expérimentation, de développement et de démonstration sur les cultures énergétiques, qui permettra d'anticiper sur le développement prochain de cette culture et se mettre au niveau d'autres pays en ce domaine.

V. Bibliographie :

- ADAS. 2006. Reducing establishment cost and increasing establishment success in Miscanthus. Contract Number: B/CR/00803. URN Number: 07/580. ADAS Boxworth. Cambridge CB23 4NN. November 2006. <http://www.dti.gov.uk/files/file37692.pdf>.
- ADEME et ITCF. 1998. Etude AGRICE. Fiche technique. <http://www.ademe.fr/htdocs/publications/publipdf/miscanthus.pdf> (consulté le 10/03/2007)
- ADEME. 2007. Les émissions atmosphériques de la combustion de biomasse (19/07/2007)
- Aficar. 2007. L'herbe à éléphants déploie ses nombreuses ressources. (14/06/2007) <http://www.toutelagriculture.fr/le-portail-de-lagriculture/zoom-sur-agriculture/detail-zoom/l-herbe-a-elephants-deploie-ses-nombreuses-ressources/> (consulté le 16/03/2008)
- Baldos R. 2006. Le miscanthus, combustible biomasse prometteur. In *novethic.fr*. (10/08/2006) <http://www.novethic.fr/novethic/site/article/imprimer.jsp?id=102117>
- Bical 2005a. Miscanthus general information. Biomass Industrial Crops Ltd 2005.
- Bical 2005b. Miscanthus environmental profile. Biomass Industrial Crops Ltd 2005.
- Bullard M., Metcalfe P. 2001. ADAS. Estimating the energy requirements and CO₂ emissions from production of the perennial grasses Miscanthus, Switchgrass and Reed canary. First published 2001. Crown copyright 2001. <http://www.berr.gov.uk/files/file14941.pdf>.
- Cassida KA, Muir JP, Hussey MA, Read JC, Venuto BC, Ocumpaugh WR. 2005. Biofuel component concentrations and yields of switchgrass in South central US environments. *Crop Science* 45:682–92.
- CTIFL. 2006. Les combustibles issus des céréales, coproduits : grains et paille.
- DEFRA. 2001. Planting and growing *Miscanthus*: Best practice guidelines. *Publication No. 5424*. Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra).
- Dénès P. 2007. Essais de miscanthus à Plaintel – De réels espoirs fondés sur une plante peu exigeante en intrants. In *Paysan Breton*. Article n°7617 du 7 au 14 septembre 2007.
- DiTomaso J. M., Barney J. N., Fox A. M. 2007. Biofuel Feedstocks: The Risk of Future Invasions. The Council for Agricultural Science and Technology (CAST). CAST Commentary QTA 2007-1. CAST, Ames, Iowa.
- FAIR-CT96-1707. 2001. Concerted action on Miscanthus. Final report (2001) also as Miscanthus - For Energy and Fibre. Eds Walsh, M., and Jones, M.B. James & James (2001).
- Grammont V. 2006. Les biocarburants à partir de ressources lignocellulosiques : Présentation des filières et identification des risques. Rapport d'étude intermédiaire. Laboratoire d'évaluation des matières dangereuses. INERIS Direction de la Certification. (27/07/2006)
- Green Car Congress. 2007. Iogen Receives C\$7.7 Million from Canadian Government for Cellulosic Ethanol Project. (7/02/2007)
- Guibout F. 2007a. Intérêt des cultures énergétiques sur la ferme expérimentale AgroParisTech de Grignon. Mémoire de fin d'études ingénieur. ENITA de Clermont-Ferrand.

Guibout F. 2007b. Créer un réseau de chaleur à Grignon – Allier les forces de la ferme expérimentale et les besoins du campus d'AgroParisTech. Rapport de stage ingénieur. ENITA de Clermont-Ferrand.

Harvey J. 2007. A versatile solution? Growing Miscanthus for bioenergy, *Renewable Energy World*. (01/2007) http://www.renewable-energyworld.com/articles/article_display.cfm?ARTICLE_ID=284688&p=121

Hasler, P., T. Candinas, and T. Nussbaumer. 1998. Utilization of ashes from the combustion of hay, miscanthus, hemp, straw and wood as fertilizer. pp. 192-195. In *Biomass for Energy and Industry*, Proceedings of the 10th European Biomass Conference, Würzburg, Germany, June 1998. C.A.R.M.E.N. Publishers, Rimpfing, Germany.

Hohenstein, W. and Wright, L.L. 1994. Biomass energy production in the United States: an overview. *Biomass and Bioenergy* 6:161-173.

IPCC 1992

Jeunes agriculteurs 77. 2007. Le miscanthus s'implante en Seine et Marne ! Des débouchés variés! In *Pleinchamp.com* (22/02/07) http://www.pleinchamp.com/article/detail.aspx?id=26732&page=1&local=false&pub_id=41972&menu_id=25

Kerr, J., Pulford, I., Duncan, H. & Wheeler, C. 1998. Phytoremediation of heavy metal contaminated sites by potential fiber crops. In *Contaminated Soil '98, Proceedings of the 6th International FZK/TNO Conference* (pp. 1119–1120). London: Telford.

Kratz B. 2006. La valorisation énergétique du miscanthus giganteus. In *Le Républicain Lorrain*. 29/12/2006.

Kratz B. 2005. 24 février 2005 en Lorraine : L'association Florbio parie sur le miscanthus giganteus. In *Le Républicain Lorrain*. (24/02/2005)

Lewandowski I., Clifton-Brown J. C., Andersson B., Basch G., Christian D. G., Jørgensen U., Jones M. B., Riche A. B., Schwarz K. U., Tayebi K., Teixeira F. 2003. Biofuels: Environment and Harvest time affects the Combustion Qualities of *Miscanthus* Genotypes. *Agronomy Journal* Vol. 95:1274-1280.

Lewandowski, I., J.C. Clifton-Brown, J.M.O. Scurlock, and W. Huisman. 2000. Miscanthus: European experience with a novel energy crop. *Biomass Bioenergy* 19:209–227.

Lewandowski I. 1998. Switchgrass (*Panicum virgatum*) as a biomass crop in southern Germany compared to *Miscanthus x giganteus*. *European Energy Crops Internetwork BioBase*. <http://www.eeci.net/archive/biobase/B10432.html>

Liebig M.A., Johnson H. A., Hanson J. D., Frank A. B. 2005. Soil carbon under switchgrass stands and cultivated cropland. *Biomass & Bioenergy* 25:347-354.

Mailhes L. 2007. La recherche sur les biocarburants prend ses quartiers à Berkeley. In *Les Echos*. P.20. 21/12/2007.

Michel R., Mischler N., Azambre B., Fingueneisel G., Machnikowski J., Rutkowski P., Zimny T., Weber J. V. 2006. *Miscanthus x Giganteus* straw and pellets as sustainable fuel and raw material for activated carbon. *Environmental Chemistry Letter* 4: 185-189.

Miles TR, Miles JTR, Baxter LL, Bryers RW, Jenkins BM, Oden LL. 1996. Boiler deposits from firing biomass fuels. *Biomass & Bioenergy* 10:125–38.

- Monti A., N. Di Virgilio, G. Venturi. 2008. Mineral composition and ash content of six major energy crops. *Biomass and Bioenergy*. 32:216 – 223.
- Mosier, A.R., J.A. Delgado, V.L. Cochran, D.W. Valentine, W.J. Parton. 1997. Impact of agriculture on soil consumption of atmospheric CH₄ and a comparison of CH₄ and N₂O flux in subarctic, temperate and tropical grasslands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49(1-3):71-83.
- Neukirchen D., Himken M., Lammel J., Czypionka-Krause U., Olf H.W. , 1999. Spatial and temporal distribution of the root system and root nutrient content of an established Miscanthus crop. *European Journal of Agronomy* 11 (3/4) : 301-309 1999
- Newman R. 2003. Miscanthus practical aspects of biofuel development. ETSU: B/W2/00618/REP. URN: 03/1568. DTI New and Renewable Energy Programme. Crown copyright 2003
- Nicolas J-Y. 2007. Reportage : l'énergie de l'espoir. Agrisalon.com. (20 décembre 2007) <http://www.agrisalon.net/plus/print.php?print=article&idart=19683>
- Pavard P. 2007. Miscanthus, switchgrass, TCR : comment toucher les DPU ? in *La France Agricole* n°3184. (11 mai 2007)
- Préfecture de Seine et Marne. 2007. Note d'information – Déclaration de Miscanthus à la PAC. (21 novembre 2007)
- Reumerman PJ, Van den Berg D. 2002. Reduction of fouling, slagging and corrosion characteristics of miscanthus (the BIOMIS project) report. EC contract FAIR-98-3571.
- Roy H. 2007. Le miscanthus, une culture sans entretien. In *La France Agricole* n°3179. page 28. (6 avril 2007)
- Roupnel S. 2008. Le miscanthus, un investissement à long terme. In *Réussir Lait Elevage* Mars 2008. (31/03/08)
- SAC Agro industrial research services. 2000. The potential contribution of alternative sectors to a sustainable agricultural industry and rural economy in Wales. A comparative assessment.
- Scurlock J. 1999. Miscanthus: A review of European Experience with a Novel Energy Crop. Publication No. 4845. Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory. (February 1999)
- Styles D., Thorne F., Jones MB. 2007. Energy crops in Ireland : An economic comparison of willow and *Miscanthus* production with conventional farming systems. *Biomass and Bioenergy*, doi:10.1016/j.biombioe.2007.2007.10.012
- US Congress, 1993
- Venturi, Gigler and Huisman. 1999. Economical and technical comparison between herbaceous (*Miscanthus x giganteus*) and woody energy crops (*Salix viminalis*). *Renewable Energy* 16, 1023-1026.
- Vimond, L. 2006. Un nouvel élu : miscanthus ! In *Campagne et Environnement*. (19/09/2006) <http://www.campagnesetenvironnement.fr/un-nouvel-elu-8201-miscanthus-8201-746.html>
- Visser, P. & Pignatelli, V., with contributions from Jørgensen, U. & Santos Oliveira, J.F. 2001. Utilisation of Miscanthus. In M.B. Jones & M. Walsh, *Miscanthus for energy and fibre* (p. 150). London: James and James.

Sites internet :

www.bical.net/france/
www.miscanthus-rhizome.at
www.agreste.agriculture.gouv.fr

www.miscanthus.de
www.industrie.gouv.fr/energie
www.lille.inra.fr

A.1 Annexe 1 : Coûts de production du miscanthus

Préparation avant implantation année N		
opération culturale	détails des coûts	total
Déchaumage (2 passages de chisel ou carrier)	2 x30 €/ha (chisel) ou 2x40 €/ha (carrier)	70
Traitement au glyphosate 360	glyphosate : 3L/ha, 15€/L, 10€/ha pour le passage	55
Labour	50 €/ha	50
Herse rotative	55€/ha	55
Total (€/ha)		230

Implantation année N		
matériel ou opération culturale	détails des coûts	total
plants	15 000 unités/ha et 0,1688 €/unité	2532
Implantation par un prestataire	3200 € /ha prestation tout compris	3200
Implantation par l'exploitant (avec une planteuse à pommes de terre)	100€/ha (planteuse) + 3UTH x 3h/ha x 25€/h	325
roulage	20€/ha	20
2 Désherbages 3,5L/ha de Prowl 400	Prowl à 20€/L, 10€/ha pour le passage	160
coût de fermage pour l'année N	150 €/ha en moyenne	150
total implantation prestataire (€/ha)		3530
total implantation exploitant (€/ha)		3187

coût total année N	avec prestataire (€/ha)	3760
	exploitant seul (€/ha)	3417

Années N+1 à N+14		
opération culturale	détails des coûts	total
Fertilisation (0 à 100 kg de N/ha selon terrain)	0 à 100 kg de N/ha, 1€/kg d'azote, 10€/ha pour le passage	100
Récolte fauchage + ensilage ou bottelage	Fauchage + ensilage : 220 €/ha Bottelage : 200 €/ha Transport : entre 120 (bottes) et 320 €/ha	550
coût du fermage	<i>coût payé moyen par la ferme en fonction de la classification foncière</i>	150
total des coûts annuels (€/ha/an)		800

on suppose un taux d'actualisation de 2,70%

calcul du coût total de production par hectare sur 15 ans	<i>investissement + somme des coûts annuels actualisés</i>	avec prestataire (€/ha)	12984
		exploitant seul (€/ha)	12641
calcul du coût annuel de production par hectare		avec prestataire (€/ha)	865,63
		exploitant seul (€/ha)	842,76
calcul du coût à la tonne (rendement moyen sur 15 ans de 14 t.MS /ha)		avec prestataire (€/tMS)	61,831
		exploitant seul (€/tMS)	60,197
calcul du coût au MWh (pouvoir calorifique 4700 kWh/tonne)		avec prestataire (€/MJ)	13,155
		exploitant seul (€/MJ)	12,808

A.2 Annexe 2 : Temps de travail pour la culture du miscanthus				
Opérations	Matériel utilisé	Nombre de passages x UTH	Taux horaire (h/ha)	Nombre d'heures
Préparation du sol				
2 Déchaumages	Carrier en 5m sur fendt 180cv	2	0,5	1
Traitement herbicide total	Autoporté 24m	1	0,33	0,33
Labour	Charrue Huard 5 corps sur valmet 125cv	1	1	1
Reprise de labour	Herse rotative 4m sur Valmet 160cv	1	0,75	0,75
				3,08
Plantation				
Plantation (3 U.T.H)	Planteuse à pdt semi-auto (4rgs)	3	3	9
Roulage	Rouleau 9m sur Valmet 160cv	1	0,5	0,5
				9,5
Fertilisation				
Azote	Epandeur à engrais 24m sur Renault 100cv	14	0,33	4,62
Phytoprotecteur				
Herbicide	Autoporté 24m	2	0,33	0,66
Récolte (1)				
Ensileuse	ETA	14	1	14
Pressage	ETA ou presse haute densité	14	0,9	12,6
Chargement	Télescopique Manitou	14	0,6	8,4
Transport	4 bennes	14	1,5	21
Déchargement	Télescopique Manitou	14	0,5	7
				4,5
				63
Récolte (2)				
Fauchage	Faucheuse conditionneuse (achat)	14	0,75	10,5
Andainage	Andaineur 7m (achat)	14	1	14
Bottelage	Presse haute densité (ETA)	14	0,9	12,6
Chargement	Télescopique Manitou	14	0,6	8,4
Transport	Remorque 12 m et 10m	14	1,5	21
Déchargement	Télescopique Manitou	14	0,5	7
				73,5
Rendement horaire (h par ha et par an)		Type récolte 1		5,39
		Type récolte 2		6,09

A.3 Annexe 3 : Coûts de production du switchgrass

Préparation avant implantation année N		
opération culturale	détails des coûts	total
Déchaumage (2 passages de chisel ou carrier)	2 x30 €/ha (chisel) ou 2x40 €/ha (carrier)	70
Traitement au glyphosate 360	glyphosate : 3L/ha, 15€/L 10€/ha pour le passage	55
Labour	50 €/ha	50
passage de rouleaux	20€/ha	20
Total (€/ha)		195

Semis année N		
matériel ou opération culturale	détails des coûts	total
Semences	20kg de semences/ha et 20€/kg	400
Semis avec semoir céréales à rotative)	85€/ha	85
Passage de rouleaux après semis	20€/ha	20
Désherbage post-levée type Basagran, Emblem	100€/ha + passage 10€/ha	110
Broyage des mauvaises herbes	55€/ha	55
total implantation (€/ha)		670

coût total année N (€/ha)	865
----------------------------------	-----

Années N+1 à N+14		
opération culturale	détails des coûts	total
Fertilisation	60 kg de N/ha, 1€/kg d'azote, 10€/ha pour le passage	70
Traitement au glyphosate 360	1,5L/ha, 15€/L, 10€/ha pour le passage	32,5
Fauchage et andainage	fauchage 60€/ha et andainage 30€/ha	90
Pressage (5000 bottes par an en 120 * 70 * 240)	5€/botte ; 48 bottes/hectare	240
Ramassage (transport < 30km) : 2 plateaux de 12 m ; 35 balles chargées / plateau ; 1h30 / plateau)	coût du ramassage 3€/t ; tracteurs : 3€/t ; main d'œuvre 4€/t ; amortissement des plateaux : 0,66€/t ; déchargement : 3€/t ; rendement : 12 tMS/ha	164
coût du fermage	coût payé moyen par la ferme en fonction de la classification foncière	150
total des coûts annuels (€/ha)		746,5

on suppose un taux d'actualisation de 2,70%

calcul du coût total de production par hectare sur 15 ans	Investissement + somme des coûts annuels actualisés	9472,58287
calcul du coût annuel de production par hectare		631,505525
calcul du coût à la tonne (rendement moyen sur 15 ans de 12 t.MS /ha)		52,6254604
calcul du coût au MWh (PCI de 4600 kWh/t)		11,4403175

A.4 Annexe 4 : Coûts de production du phalaris

Préparation avant implantation année N		
opération culturale	détails des coûts	total
Déchaumage (2 passages de chisel ou carrier)	2 x30 €/ha (chisel) ou 2x40 €/ha (carrier)	70
Traitement au glyphosate 360	glyphosate : 3L/ha, 15€/L 10€/ha pour le passage	55
Labour	50 €/ha	50
Herse rotative	55€/ha	55
Total (€/ha)		230

Semis année N		
matériel ou opération culturale	détails des coûts	total
semences	20kg de semences/ha et 35€/kg	700
Semis avec semoir céréales à rotative	80€/ha	80
Passage de rouleaux après semis	20€/ha	20
Désherbage post-levée stade 3 feuilles	40€/ha + passage 10€/ha	50
Fertilisation	azote 0 à 60 kg/ha, Phosphore 60kg/ha, Potassium 150 unités	160
total implantation (€/ha)		1010

coût total année N (€/ha)	1240
----------------------------------	-------------

Années N+1 à N+14		
opération culturale	détails des coûts	total
Fertilisation	N=60, P=60, K=40, 10€/ha pour le passage	160
Fauchage et andainage	fauchage 60€/ha et andainage 30€/ha	90
Pressage	80€/ha	80
Ramassage (transport < 30km)		50
coût du fermage	<i>coût payé moyen par la ferme en fonction de la classification foncière</i>	150
total des coûts annuels (€/ha)		530

on suppose un taux d'actualisation de 2,70%

calcul du coût total de production par hectare sur 9 ans	<i>Investissement + somme des coûts annuels actualisés</i>	5424,97813
----------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------	------------

calcul du coût annuel de production par hectare (culture implantée pour 9 ans en moyenne)		602,775348
-------------------------------------------------------------------------------------------	--	------------

calcul du coût à la tonne (rendement moyen sur 9 ans de 7 t.MS /ha)		86,110764
---------------------------------------------------------------------	--	-----------

calcul du coût au MWh (PCI de 4600 kWh/t)		18,7197313
-------------------------------------------	--	------------

A.5 Annexe 5 : Coûts de production du TTCR de Saule

Préparation avant implantation année N		
opération culturale	détails des coûts	total
Déchaumage (2 passages de chisel ou carrier)	2 x30 €/ha (chisel) ou 2x40 €/ha (carrier)	70
Traitement au glyphosate 360	glyphosate : 3L/ha, 15€/L 10€/ha pour le passage	55
Labour	50 €/ha	50
Herse rotative	55€/ha	55
Total (€/ha)		230

Semis année N		
matériel ou opération culturale	détails des coûts	total
boutures	15000 boutures/ha	1500
plantation	500€/ha	500
Passage de rouleaux après semis	20€/ha	20
Désherbage post-levée stade 3 feuilles	160€/ha + passage 10€/ha	170
2 passages de herse étrille ou cultivateur	30 €/ha par passage	60
Recépage	60€/ha	60
total implantation (€/ha)		2310

coût total année N (€/ha)	2540
----------------------------------	-------------

Années N+3, N+6, N+9, N+12, N+15, N+18, N+21		
opération culturale	détails des coûts	total
Fertilisation (im passe de P et K compte tenu de la situation de la ferme) (sauf en N+21)	60 à 80 kg d'azote/ha ; 10€/ha pour le passage	80
Récolte 1 : avec récolteuse traînée type Bender	récolte 4 h/ha 150 €/h ;	600
Récolte 1 : ramassage	4h/ha : traction 18 €/h ; bennes 4h 18 €/h; main d'œuvre 25€/h	244
Récolte 2 : ensilage	ensilage 2h/ha 250 €/ha	250
Récolte 2 : tête de récolte	590 €/ha	590
Récolte 2 : ramassage	2h/ha : traction 18 €/h ; bennes 18 €/h ; main d'œuvre 25 €/h	122
total des coûts récolte 1 (€/ha)		924
total des coûts récolte 2 (€/ha)		1042

Années N+1 à N+24		
coût du fermage	coût payé moyen par la ferme en fonction de la classification foncière	150

on suppose un taux d'actualisation de 2,70%

calcul du coût total de production par hectare sur 21 ans	investissement + somme des coûts annuels actualisés	récolte 1	9633,17743
		récolte 2	10240,8487

calcul du coût annuel de production par hectare (culture implantée pour 21 ans en moyenne)	récolte 1	458,722735
	récolte 2	487,659461

calcul du coût à la tonne (rendement moyen sur 10 ans de 7 t.MS /ha)	65,5318192
	69,6656373

calcul du coût au MWh (PCI de 3600 kWh/t)	18,2032831
	19,3515659

A.6 Annexe 6 : Article du code rural sur les aides à la production du miscanthus



Code rural (nouveau)

- ▶ Partie réglementaire
- ▶ Livre VI : Production et marchés
- ▶ Titre Ier : Dispositions générales
- ▶ Chapitre V : Régimes de soutien direct dans le cadre de la politique agricole commune
- ▶ Section 2 : Régimes de soutien aux productions végétales
- ▶ Sous-section 6 : Aide aux cultures énergétiques.

Article D615-32

Modifié par Décret n°2008-470 du 20 mai 2008 - art. 2

Pour l'application du 1 de l'article 33 du règlement (CE) n° 1973/2004 de la Commission du 29 octobre 2004 susmentionné, le demandeur d'une aide aux cultures énergétiques mentionné au a de l'article 23 de ce règlement peut :

- utiliser les essences forestières à rotation courte, les céréales ou oléagineux mentionnés au a du 1 de l'article 33 de ce règlement pour l'un des usages prévus à ce même article ;
- transformer, dans son exploitation agricole, toute la matière première récoltée en biogaz relevant de la catégorie mentionnée au b du 1 de l'article 33 de ce règlement.

En application du 2 de l'article 33 du règlement (CE) n° 1973 / 2004 susmentionné, le demandeur s'engage à utiliser ou à transformer directement la matière première couverte par sa déclaration écrite, au plus tard le 31 juillet de la deuxième année suivant l'année de la récolte.

Un arrêté du ministre chargé de l'agriculture fixe les conditions et les modalités d'application du présent article et détermine les matières premières agricoles autres que celles mentionnées au a du 1 de l'article 33 du règlement (CE) n° 1973 / 2004 susmentionné dont l'utilisation est également autorisée.

Cité par:

Arrêté du 22 mai 2008 - art. 10 (V)