

A close-up photograph of Miscanthus grass seed heads, showing the intricate, feathery structure of the panicles. The grass is a warm, golden-brown color, and the background is a soft, out-of-focus green, suggesting a natural field setting.

# LE MISCANTHUS

## Une biomasse d'avenir

Synthèse et perspectives  
du programme  
*Biomass For the Future*

# Sommaire

## Introduction

### 4 L'association France Miscanthus

### 5 Les objectifs du programme Biomass For the Future (BFF)

par Herman Hofte, INRAE, coordinateur de BFF

### 6 L'histoire du miscanthus en France

### 7 La filière du miscanthus en plein développement depuis le lancement du programme Biomass For the Future en 2012 ?

### 8 Les caractéristiques de la culture

## Résultats BFF

### 10 Les aspects agronomique du miscanthus

10 Evaluation agronomique et environnementale de différents modes d'implantation du miscanthus  
*Chantal Loyce, INRAE Agronomie*

13 Compréhension de la gestion de l'azote du miscanthus  
*Marion Zapater, INRAE BioEcoAgro*

### 16 Les apports de la génétique

16 Analyse et modélisation écophysiological de la production de biomasse  
*Delphine Luquet, CIRAD AGAP*

18 Compréhension du rôle de la génétique dans l'élaboration des propriétés de la biomasse  
*Matthieu Reymond, INRAE IJPB*

20 Mise à profit des connaissances génétiques sur le maïs pour accélérer et optimiser les études sur le miscanthus  
*David Pot, CIRAD AGAP, Laetitia Virlovet, INRAE IJPB*

### 22 Des conséquences pour la sélection

22 Vers une amélioration génétique du miscanthus  
*Maryse Hulmel, INRAE BioEcoAgro*

### 24 La valorisation de la biomasse

24 Méthanisation du miscanthus  
*Hélène Carrère, INRAE LBE*

26 Importance des propriétés de la biomasse dans la conception de composites polymères et de béton chargés en miscanthus  
*Patrick Navard, Armines Mines Paris-Tech*

29 Développement d'un composite chargé en miscanthus pour la fabrication de pièces d'intérieur automobile  
*Guillaume Alès, ADDIPLAST*

30 Un outil d'aide à la décision pour la construction de filières performantes durables  
*Pierre Malvoisin, Aelred*

### 31 Des performances environnementales

31 Performances environnementales des filières miscanthus  
*Colin Jury, Inovertis A3i*

## Un programme à poursuivre

### 34 Les objectifs de BFF atteints

### 35 Une communauté d'intérêt créée autour de cette filière

### 35 Réponse à de nouvelles questions

36 Conclusion et perspectives de Christian Huygues, Directeur Scientifique de l'INRAE

### 40 Annexes



## Préface

# le Miscanthus, une production d'avenir

**L**e miscanthus, une culture en plein développement en France, nécessitait d'avoir son propre programme de recherche.

Ceci fut fait avec Biomasse For Future (BFF), un programme d'investissement d'avenir audacieux lancé en 2012, à un moment où la culture du miscanthus était encore peu connue. D'une durée de 8 ans, ce projet vient de s'achever. Il a permis à 26 partenaires de travailler de concert, chacun dans sa spécialité, pour faire avancer la connaissance sur cette culture dont l'étude scientifique est encore jeune.

France Miscanthus a saisi l'occasion de la finalisation de ce vaste programme de recherche pour rassembler dans cet ouvrage l'essentiel des résultats des travaux de recherche réalisés, et mettre en perspective le développement de la filière et les besoins de poursuite de la recherche scientifique dans le prolongement du programme BFF.

Comme on peut le constater dans la présentation de ces résultats, ce programme couvre aussi bien les aspects agronomiques du miscanthus que ses débouchés dans la méthanisation, les matériaux de construction ou les composites biopolymères, en passant par une meilleure connaissance de la génétique de la plante.

Depuis le début des années 2000, date d'arrivée du miscanthus dans les exploitations françaises, on constate un véritable engouement pour cette plante. Au début utilisé essentiellement pour la combustion, ce débouché ne représente plus aujourd'hui que 30% des utilisations de miscanthus. Même si le miscanthus reste intéressant pour alimenter des chaudières individuelles ou collectives, les débouchés litière animale et paillage horticole ont pris le pas sur la combustion. Reste les débouchés pour les matériaux biosourcés, certes encore à l'état de niche, mais qui vont bénéficier demain des recherches conduites dans le cadre du programme BFF.

Le miscanthus est maintenant reconnu pour ses avantages environnementaux en matière de stockage de carbone dans le sol, comme culture dont l'itinéraire technique n'utilise ni engrais, ni produit phytosanitaire, comme moyen de protéger la ressource en eau et de lutter contre l'érosion, comme réserve de biodiversité, comme facteur de réhabilitation des terres pollués et plus généralement de lutte contre le changement climatique.

Le miscanthus répond également à des scénarios d'économie circulaire en rendant autonome des éleveurs qui ainsi produisent sur quelques hectares leur propre litière, économisent en temps de travail et écoulent la litière souillée soit dans les champs ou soit dans un méthaniseur. A noter également que cette litière contribue au bien-être animal, une préoccupation sociétale de plus en plus marquée.

Le Miscanthus est une culture tout bonus pour l'environnement et qui donne aux exploitations agricoles une nouvelle possibilité de diversification.

France Miscanthus mettra tout en œuvre pour poursuivre la recherche initiée par le programme BFF, car c'est indispensable au développement de la filière miscanthus de par l'amélioration de ses pratiques culturales et de par la meilleure compréhension de ses externalités écologiques. Merci à tous les chercheurs qui ont contribué à ces travaux ; ils sont des pionniers et contribuent activement au développement de cette nouvelle filière.

Et je remercie particulièrement Monsieur Christian Huyghe d'avoir bien voulu dans la conclusion de cet ouvrage nous ouvrir des perspectives et préciser les enjeux de notre filière miscanthus pour demain.



**Alain Jeanroy,**  
Pdt de France Miscanthus

« Le Miscanthus est une culture tout bonus pour l'environnement et qui donne aux exploitations agricoles une nouvelle possibilité de diversification. »

# Introduction

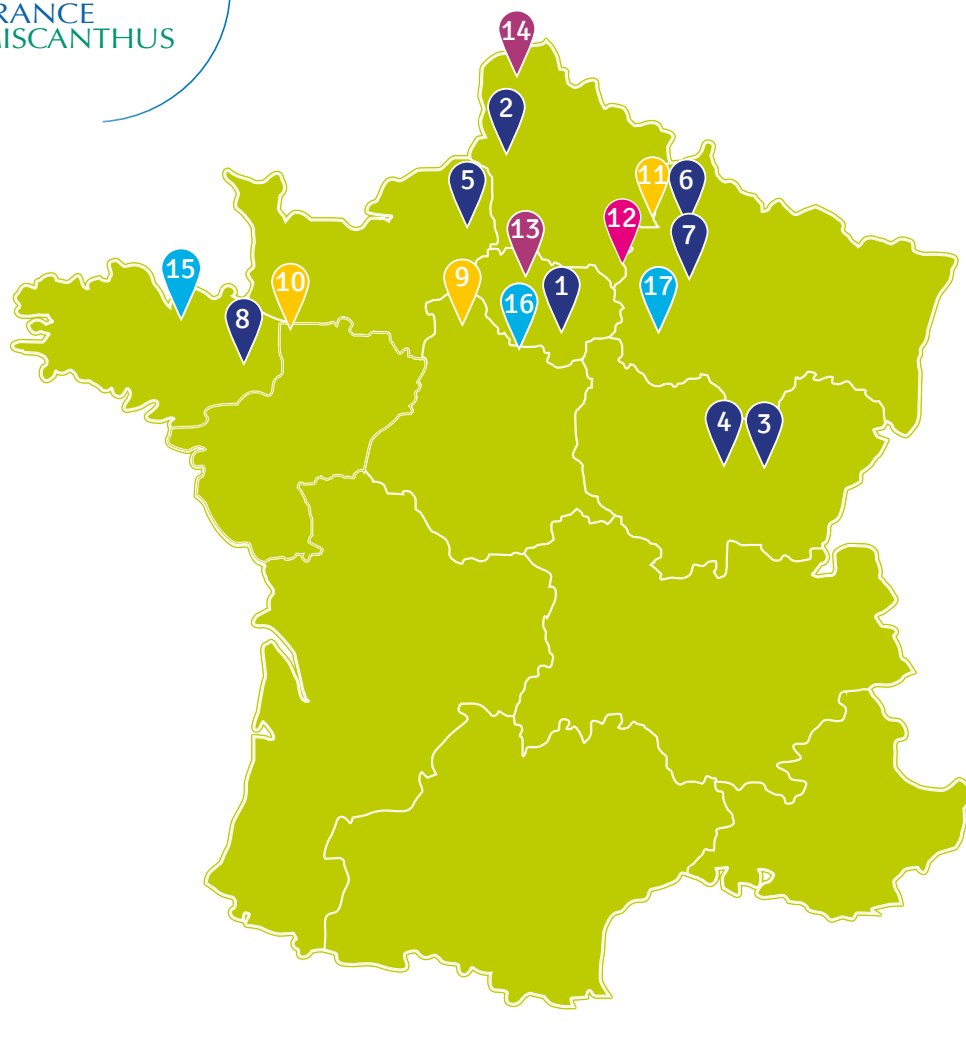
## L'association France Miscanthus

**E**n 2009, l'association France Miscanthus est créée, offrant ainsi un lieu de partage et d'échange d'informations et d'expériences et fédérant les principaux acteurs de cette filière naissante. Elle participe également à la représentation et à la promotion de la culture du *Miscanthus x giganteus*.

Grâce à toutes ces actions et au concours de 17

adhérents, l'association souhaite contribuer à la création et à l'organisation de filières locales performantes et durables, tant sur le plan économique qu'environnemental.

À ce titre, France Miscanthus a été associée au suivi des travaux du programme *Biomass For the Future* et a réalisé cette synthèse des résultats de ce programme de recherche, tout en se projetant sur la suite à donner à ceux-ci.



### ◆ Producteurs et metteurs en marché de miscanthus

1. BES 77
2. Lamont Colin Energies
3. SCEA Gueldry Terre et Soleil
4. Bourgogne Pellets
5. UCDV
6. Luzéal
7. SunDeshy
8. DeshyOuest

### ◆ Producteurs et metteurs en marché de miscanthus et de rhizomes

9. Novabiom
10. Miscampagne
11. Rhizosfer

### ◆ Distributeurs

12. Invivo Agrosolutions

### ◆ OPA

13. CGB
14. Chambre d'Agri NPDC

### ◆ Coopérative

15. Cooperl
16. Cristal Union - Sidesup
17. CapDea



## Les objectifs du programme *Biomass For the Future (BFF)*

**L**e programme Biomass For the Future est né en 2012 de la volonté d'apporter un soutien au développement de filières de biomasse non alimentaire, en réponse aux enjeux de diminution de l'usage de ressources fossiles et des émissions de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, le programme BFF a choisi d'étudier deux espèces végétales pour la production de biomasse cellulosique. Ces productions semblent être des alternatives très intéressantes pour remplacer des ressources fossiles, et ce pour une grande diversité d'usages tels que la production de chaleur, la méthanisation, la production de biocarburants de deuxième génération, ou encore l'élaboration de molécules chimiques, de composites polymères ou de matériaux de construction.

Les deux espèces étudiées ont été le sorgho, cultivé principalement dans le sud de la France, et le miscanthus cultivé en

majorité dans le nord de la France. L'étude de ces deux espèces cibles en relation avec une espèce modèle – le maïs, mieux connu de la communauté scientifique et très proche génétiquement du miscanthus et du sorgho – a permis de faciliter les avancées scientifiques concernant ces deux plantes d'intérêt.

Pour les deux filières d'intérêt, l'objectif du programme BFF est alors de développer de nouvelles variétés et de nouveaux systèmes de culture qui permettront d'optimiser l'itinéraire cultural, tout en assurant une production de biomasse durable avec un impact environnemental faible, et dont les caractéristiques seront adaptées à des applications industrielles. Le programme se fixe également pour objectif de contribuer à la formation de chaînes de valeur qui favorisent une organisation locale des filières.

Le programme BFF est piloté par l'Institut Jean-Pierre Bourgin (IJPB) du centre INRAE de Versailles-Grignon, un des plus grands centres de recherche européens dans le domaine de la biologie des plantes, avec l'aide administrative de Laure Trannoy (INRAE Transfert) et rassemble l'ensemble des compétences et expertises de 26 partenaires qui ont été essentiels au déroulement de ce programme. Un grand nombre de disciplines scientifiques ont été mobilisées, telles que l'agronomie, la génétique, la modélisation, la science des matériaux, la logistique, ou encore l'analyse de cycle de vie, afin de répondre aux différents objectifs fixés.



**Herman Hofte,**  
INRAE, coordinateur de BFF

### EN QUELQUES CHIFFRES, BFF C'EST :

8 années de projet, de 2012 à 2020  
26 partenaires : 9 publics, 15 privés,  
2 collectivités territoriales  
27 M € de budget, dont 10 M € d'aides  
publiques  
50 collaborateurs impliqués,  
65 publications scientifiques.



## Histoire du miscanthus en France et en Europe

**L**e miscanthus fait référence au genre *Miscanthus*, qui appartient lui-même à la famille des graminées – ou Poacées. Le miscanthus appartient donc à la tribu des Andropogoneae, aux côtés du maïs, du sorgho, et de la canne à sucre.

L'unique variété cultivée en France est le *Miscanthus x giganteus*, un hybride naturel interspécifique issu du croisement spontané entre l'espèce *Miscanthus sacchariflorus* et l'espèce *Miscanthus sinensis*. La plante d'origine avait été collectée dans une île du sud du Japon (Tamura et al., 2016). On doit l'introduction du *Miscanthus x giganteus* en Europe au botaniste danois Aksel Olsen qui le rapporta du Japon vers le Danemark en 1935 (Linde-Laursen, 1993).

**Les premiers projets de recherche sur le miscanthus en Europe datent des années 90.** Les cultures se sont alors développées au même moment, dans un premier temps en Suisse, en Angleterre et en Allemagne. En Angleterre, le développement de cette culture a été très rapide, encouragé par la nécessité d'approvisionner les centrales électriques en biomasse agricole et par la création des cultures sous contrat pour cet usage avec des aides gouvernementales dans le cadre de l'« Energy Crops Scheme ». En 2010, l'Angleterre compte alors déjà près de 20 000 ha.

**L'apparition du miscanthus dans le paysage agricole français date du début des années 2000**, et a bénéficié du Programme de Restructuration Nationale (PRN) mis en place après la réforme du Règlement sucre de 2006 et doté de fonds pour accompagner les 5000 agriculteurs qui abandonnent la betterave et les inciter à se tourner vers d'autres cultures telles que le miscanthus ; l'implantation d'une nouvelle production dans le parcellaire agricole répondant aussi aux objectifs de diversification du PRN.

La filière betterave devait également réduire ses émissions de gaz à effet de serre dues à la déshydratation de la pulpe de betterave et, pour ce faire, elle eut l'idée de remplacer le combustible fossile par un combustible renouvelable : le miscanthus.

C'est dans ce contexte que se développent les premiers débouchés du miscanthus comme combustible. On retrouve ainsi parmi les premiers utilisateurs de miscanthus les chaudières individuelles ou collectives, ainsi que certains déshydrateurs de pulpe de betterave ou de luzerne. Le miscanthus est un biocombustible très intéressant, avec un pouvoir calorifique comparable à celui du bois. Pour un rendement compris entre 12 et 15 tonnes de matière sèche par hectare (tMS/ha), on estime qu'un hectare de miscanthus peut se substituer à 5000 à 7500 litres de fioul domestique. Cette solution de chauffage se présente sous forme de copeaux ou de granulés, en vrac, en big-bag ou en balles compressées.

Pour les collectivités, on peut noter la naissance de projets d'agro-combustibles locaux, qui représentent des surfaces cultivées limitées mais une forte valeur ajoutée à l'échelle du territoire.

# La filière du miscanthus en plein développement depuis le lancement du programme *Biomass For the Future* en 2012 ?

Si le miscanthus a historiquement été cultivé en France pour la combustion, dans des outils de chaufferie urbaine ou des usines de déshydratation comme dans des chaufferies individuelles ou des collectivités locales, la filière se développe désormais principalement autour de deux nouveaux débouchés majeurs que sont le paillage horticole et la litière animale.

**L**e premier débouché du miscanthus aujourd'hui est celui de la litière animale pour les animaux d'élevage et domestiques. Il offre une capacité d'absorption bien meilleure que celle de la paille, et a l'avantage de pouvoir sécher au cours de son utilisation, puis réabsorber les déjections animales. Ainsi, le miscanthus n'a pas besoin d'être renouvelé aussi souvent qu'une litière de paille, il suffit de remuer la litière pour faciliter son aération.

Cela réduit ainsi la quantité de fumier produit ainsi que la charge de travail nécessaire. Cette capacité à sécher permet également de garantir un milieu plus sain pour les animaux, et de réduire certaines pathologies d'élevage. Les vétérinaires recommandent donc le miscanthus pour de nombreux animaux d'élevage (volailles, bovins, équins) et domestiques (chats, hamsters, lapins, oiseaux, NAC).

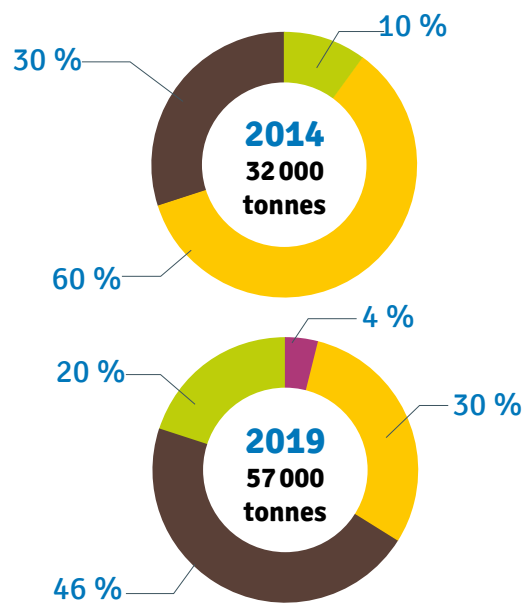
**Le deuxième usage du miscanthus est le paillage horticole, dans les massifs ornementaux, les vergers ou les vignes.**

Le paillis de miscanthus limite la pousse de mauvaises herbes sans avoir recours à des produits phytosanitaires, ce qui répond aux exigences de la Loi Zéro Phyto. De plus, le miscanthus présente plusieurs avantages par rapport à d'autres paillages : il n'acidifie pas les sols, il est 100 % biodégradable et compostable, et

il protège les cultures contre le gel et contre la sécheresse. De nombreuses villes ont choisi de se tourner vers le miscanthus, telles que Amiens, Rouen et Compiègne.

En plus de ces trois débouchés majeurs, **il a également été observé que le miscanthus pouvait être un additif très intéressant dans l'alimentation des ruminants, et notamment**

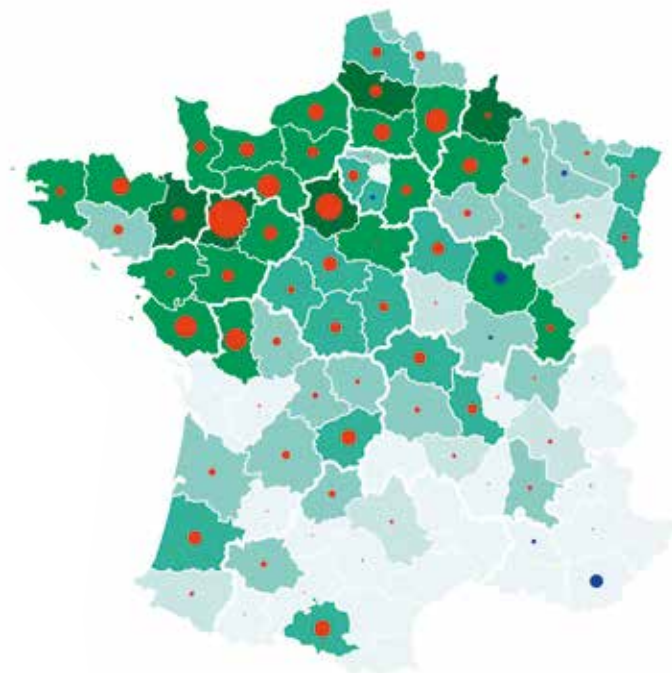
Évolution des débouchés principaux dans la production totale de miscanthus



**des bovins laitiers.** En effet, des éleveurs ont complété la ration de leurs vaches laitières avec du miscanthus pour avoir un apport en fibres, ce qui a eu pour effet d'améliorer la rumination et donc de diminuer les risques d'acidose, et même d'améliorer la qualité du lait. La communauté vétérinaire constate des effets très bénéfiques du miscanthus sur la santé des animaux.

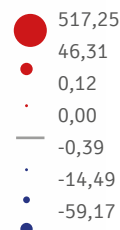
**Les trois débouchés principaux sont donc la combustion, la litière animale et le paillage horticole, et sont en pleine évolution.** En effet, sur la production totale de miscanthus, on comptait 60 % de combustion, 30 % de litière animale et 10 % de paillage horticole en 2014, tandis qu'on se situe à



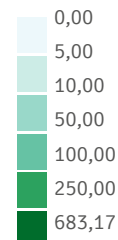


Carte de France des surfaces de miscanthus et évolutions par département entre 2015 et 2020

Évolution des surfaces en ha entre 2015 et 2020



Surface cultivée en miscanthus (ha)



30 % de combustion, 46 % de litière animale, 20 % de paillage horticole et 4 % de rumination bovine en 2019.

L'évolution se poursuit avec le développement de nouveaux débouchés en voie de concrétisation, comme la conception de matériaux de construction biosourcés, ou la conception de biopolymères.

Géographiquement, les cultures de miscanthus se concentrent particulièrement dans la moitié Nord de la France, et commencent à se développer dans le Sud-Ouest. Au cours des cinq dernières années, on constate une croissance de 13 %

par an des surfaces cultivées en miscanthus qui témoigne du dynamisme de la filière. Nous sommes donc passés de 4 032 hectares et 949 exploitations en 2015, à 7 175 hectares et 1 768 exploitations en 2020. La totalité du miscanthus cultivé en France est de l'espèce *Miscanthus x giganteus*.

**La France fait partie des cinq pays qui représentent la majorité des surfaces de miscanthus en Europe.** En effet, le Royaume-Uni, l'Allemagne, la France, la Suisse et la Pologne présentent des conditions climatiques favorables avec des précipitations et des températures assez fraîches, et constituent donc les surfaces les plus importantes.

## Les caractéristiques de la culture

### Une culture pérenne et sans intrants

Le miscanthus, et plus précisément le *Miscanthus x giganteus* cultivé en France, est une plante particulièrement respectueuse de l'environnement. C'est une plante autonome et pérenne qui peut être cultivée pendant 15 à 25 ans. Grâce à son organe de réserve souterrain, le rhizome, la plante peut stocker des nutriments durant l'hiver, et les remobiliser à la sortie de l'hiver pour reprendre sa croissance sans avoir besoin de fertilisants. De plus, du fait d'un processus de sénescence de la plante à l'automne, ses feuilles viennent se déposer chaque année sur le sol pour former le mulch, ce qui empêche les adventices de pousser et de concurrencer la croissance du miscanthus, il n'y a donc pas besoin de désherbants, et aucun traitement phytopharmaceutique n'est à prévoir.

### Une plante non invasive et facile à détruire

**Non invasivité :** contrairement à certaines de ses cousines, le *Miscanthus x giganteus*, seule espèce cultivée en France, n'est pas une plante invasive.

En effet, c'est une espèce triploïde donc stérile, et dont le rhizome reste compact, c'est-à-dire non traçant. Ces deux caractères font que cette plante ne présente pas de risque d'invasivité.

**Facilité de destruction :** la culture de miscanthus se détruit facilement en cas de besoin. En mettant les rhizomes à l'air libre et en procédant à un broyage mécanique des rhizomes en été, ceux-ci se dessèchent et meurent. On peut alors semer une nouvelle culture à l'automne.

## Un itinéraire cultural optimisé

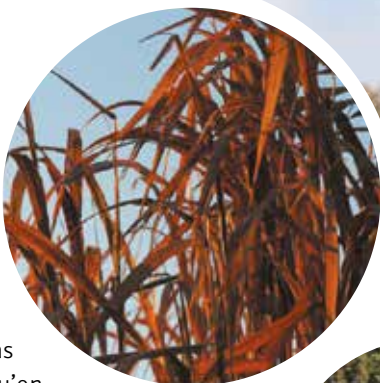
Le miscanthus se plaît dans des terres pas trop argileuses et à bonne réserve utile en eau. De par sa pérennité, le miscanthus a la capacité, contrairement au maïs, à valoriser les précipitations dès le mois de mars et ce jusqu'en octobre. L'implantation se fait à la sortie de l'hiver entre avril et juin. La première année, on réalise un désherbage, mécanique ou chimique, pour laisser la culture se développer convenablement et sans concurrence. Après cette première année, il n'est plus nécessaire de réaliser d'opération de désherbage phytosanitaire ou mécanique. On peut alors récolter le miscanthus à partir de la deuxième année grâce à une ensileuse, en mars/avril, lorsque les nutriments sont redescendus dans le rhizome et que la tige est bien sèche. Le respect du taux d'humidité à la récolte – maximum 15 % - est important pour garantir la stabilité du produit pendant le stockage. Les rendements espérés sont alors de 10 à 20 tMS/ha.

## Une production qui contribue à la protection de l'environnement

La culture du miscanthus contribue fortement à la préservation de l'environnement sur plusieurs aspects :

**CONSERVATION DE LA BIODIVERSITE.** Les cultures de miscanthus constituent un réservoir de biodiversité où insectes, petits rongeurs et oiseaux peuvent venir s'abriter. Une étude réalisée par la Chambre d'Agriculture d'Indre-et-Loire en 2012 a d'ailleurs montré que la culture de miscanthus présente des populations importantes et diversifiées de carabes, qui sont les marqueurs d'un bon fonctionnement de la biocénose. D'autre part, on constate que cette culture favorise l'établissement de communautés microbiennes stables dans le sol, telles que les Mycorhizes, qui sont favorables à l'assimilation des nutriments et à la protection de la plante contre les pathogènes.

**LUTTE CONTRE L'EROSION.** Le miscanthus forme un couvert végétal présent toute l'année grâce au mulch, et avec ses racelles profondes, il améliore l'infiltration de l'eau dans le sol et lutte ainsi contre l'érosion. En effet, une étude menée en 2012-2013 en Haute-Normandie sur l'efficacité des haies herbacées pour la lutte contre l'érosion des sols a montré que le *Miscanthus x giganteus* était l'espèce la plus intéressante parmi un panel de plusieurs dizaines d'espèces de graminées.



## LUTTE CONTRE LA POLLUTION DES EAUX.

En plus de ne pas avoir besoin de fertilisation azotée, les cultures de miscanthus constituent un barrage contre les effluents agricoles, tels que les nitrates qui viendraient de parcelles voisines. Il y a donc un fort intérêt à planter du miscanthus à proximité des cours d'eau et dans les aires de protection des captages d'eau, pour protéger ceux-ci de la pollution aux nitrates et de l'eutrophisation.

**REHABILITATION DES TERRES POLLUEES.** Culture non alimentaire, le miscanthus peut être cultivé sur des terres polluées, dans le cadre de leur réhabilitation. La culture du miscanthus y est possible pour faire de la phytostabilisation, le miscanthus produit peut alors être utilisé comme combustible. N'accumulant pas les métaux dans ses parties aériennes, les gaz et cendres issus de la combustion ne présentent pas d'émanation des agents polluants.

**LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE.** Le miscanthus contribue au stockage de carbone dans le sol, grâce à son rhizome souterrain. De plus, le fait que le sol soit couvert toute l'année et l'absence de travail du sol évitent que le carbone soit minéralisé et relâché dans l'atmosphère. Il participe ainsi à la lutte contre le dérèglement climatique. On peut également mentionner que l'itinéraire cultural lui-même contribue au bilan carbone favorable. En effet, le faible besoin d'entretien des cultures entraîne une consommation réduite de carburants, et ses faibles besoins en azote évitent donc l'émission de N<sub>2</sub>O lié à l'apport d'engrais.

**Toutes ces caractéristiques permettent à cette production d'être éligible aux aires de protection de captage d'eaux, aux Surfaces d'Intérêt Ecologique (SIE) et aux Zones de Non Traitement (ZNT).**



# Les résultats BFF

## Les aspects agronomique du miscanthus

**Le miscanthus n'étant cultivé en France que depuis les années 2000-2005, les connaissances scientifiques et les retours d'expérience restent encore très limités au moment du lancement du programme BFF en 2012. Pour enrichir ces connaissances, nous avons choisi d'étudier deux aspects clés de cette culture.**

**Premièrement**, l'implantation des rhizomes de miscanthus est une opération coûteuse puisqu'elle nécessite une main d'oeuvre importante, tant pour préparer les rhizomes que pour les planter. Cet investissement initial peut être un frein pour certains agriculteurs, même si l'implantation ne se fait qu'une fois pour une culture d'une longévité d'environ 15-20 ans. D'autres méthodes d'implantation ont donc été étudiées, dans la perspective de pouvoir proposer des méthodes moins

coûteuses à l'avenir.

**Deuxièmement**, une caractéristique d'intérêt de la culture du miscanthus est l'absence de besoin d'une fertilisation azotée, ce qui améliore grandement l'impact environnemental de cette culture. Pour mieux comprendre cette caractéristique de la plante et s'assurer de la conserver lors des phases de sélection futures, le programme BFF a mené une étude sur le fonctionnement azoté de la plante.

### Évaluation agronomique et environnementale de différents modes d'implantation du miscanthus

#### Contexte et objectifs

En plus du coût d'implantation élevé des rhizomes, *Miscanthus x giganteus* présente une certaine sensibilité au stress hydrique, et une absence de diversité génétique. Ces deux

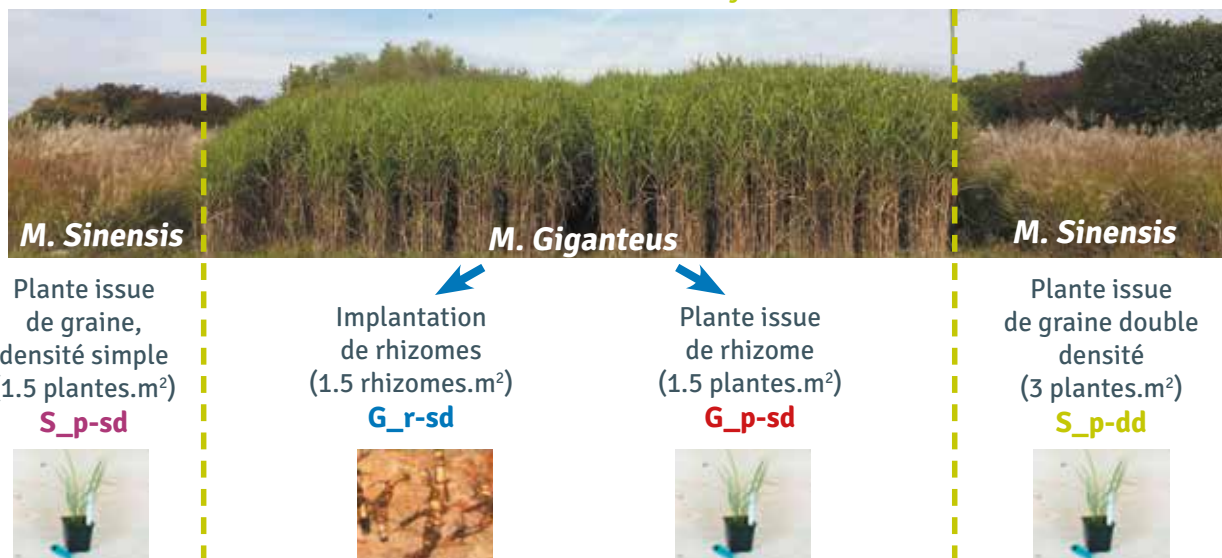
aspects représentent les faiblesses principales de cette culture face à l'évolution incertaine du climat et au risque de développement de bioagresseurs du miscanthus.

L'étude réalisée a estimé et comparé sur un réseau d'essais



**Chantal Loyce**,  
INRAE Agronomie, Grignon

Plan de l'essai d'Evry



multilocal et pluriannuel les rendements de *Miscanthus × giganteus* et de *Miscanthus sinensis* à partir de différentes méthodes d'implantation, et de densité, en considérant le *Miscanthus sinensis* comme une source de diversité génétique qui pourra permettre de concevoir de nouvelles variétés à cultiver. Elle vise également à identifier les principaux facteurs qui peuvent expliquer les variations intersites et interannuelles des rendements des deux espèces. Enfin, cette étude a permis d'évaluer l'effet de ces différentes espèces et modes d'implantation sur l'évolution du stock de carbone dans le sol.

## Résultats

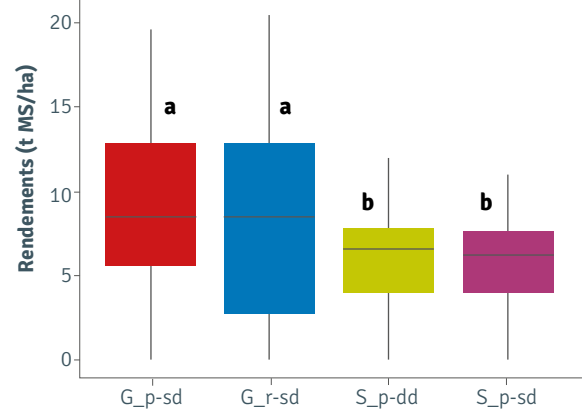
Les essais ont été réalisés sur 8 sites différents répartis entre l'Île-de-France et la région Centre, entre 2013 et 2019. Les types de sols rencontrés sont très divers, allant de sols argilo-calcaires superficiels à des limons sablo-argileux profonds. Les modes d'implantation testés ont été l'implantation de rhizomes ou de plants issus de rhizomes pour *Miscanthus × giganteus*, et l'implantation de plants issus de graines à densité simple ou double pour *Miscanthus sinensis*.

Plusieurs indicateurs pourraient expliquer la variabilité des rendements observés entre sites et entre années : la production de mulch en première année, l'âge de la culture, la somme de degrés-jours de l'année précédente, l'indicateur de gel, et enfin l'indicateur de stress hydrique.

Pour déterminer lesquels de ces indicateurs expliquent le mieux les variations de rendement, toutes les combinaisons possibles de relation entre ces indicateurs et le rendement ont été testées. Pour chaque indicateur, on calcule son poids d'Akaike [1].

[1] Le critère d'Akaike – ou poids d'Akaike – permet d'évaluer des indicateurs selon leur importance dans la variabilité d'un paramètre, ici le rendement. Plus ce poids d'Akaike est proche de 1, plus l'indicateur a de chances d'être déterminant dans la construction du rendement.

## Effet des traitements sur le rendement (en t de MS/ha)



Traitements ■ G\_r-sd ■ S\_p-sd ■ S\_r-dd ■ G\_p-sd

G\_p-sd : *Miscanthus × giganteus* issu de plant

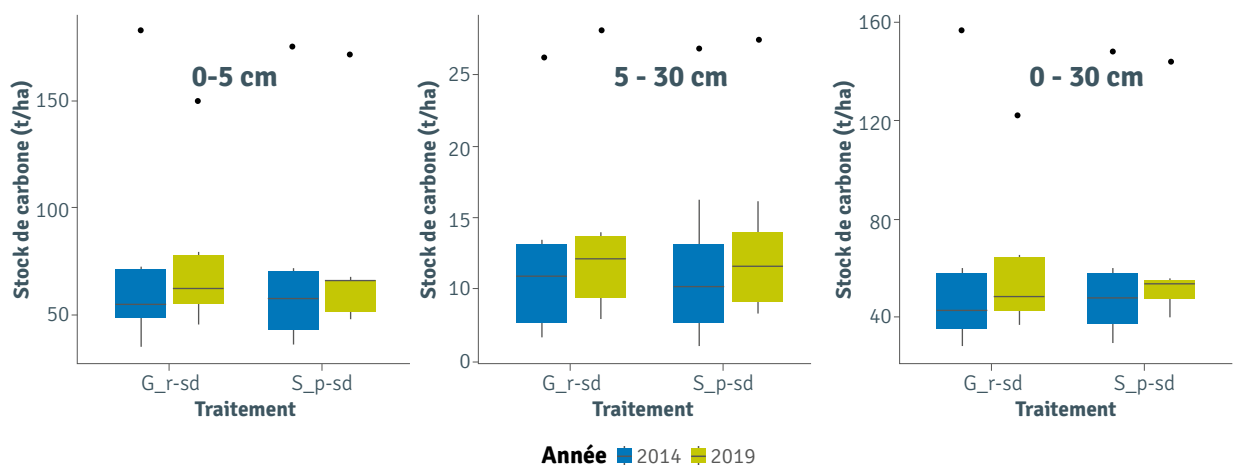
G\_r-sd : *Miscanthus × giganteus* issu de rhizome

S\_p-dd : *Miscanthus sinensis* issu de plant en densité double

S\_p-sd : *Miscanthus sinensis* issu de plant en densité simple

Il ressort que les variations de rendement du *Miscanthus × giganteus* entre sites-années s'expliquent principalement par l'âge de la culture – pendant les cinq premières années de cultures – et par le stress hydrique. Le rendement de *Miscanthus sinensis* est aussi impacté par ces deux facteurs ainsi que par l'« effet mémoire », c'est-à-dire la somme de degrés-jours de l'année précédente.

## Évolution du stock de carbone entre 2014 et 2019 sur l'horizon de sol cultivé en *Miscanthus × giganteus* (Gr) et *Miscanthus sinensis* (Sp)





Avant de s'intéresser strictement au rendement des cultures, il convient d'observer le taux d'implantation ainsi que le taux de reprise des différents modes d'implantation testés. On observe que l'implantation est 10 à 15 % meilleure dans le cas de *Miscanthus x giganteus* implanté à partir de plants repiqués que dans le cas d'une implantation à partir de rhizomes, qui est le mode d'implantation largement utilisé en agriculture.

#### Concernant les rendements, plusieurs effets intéressants ont été observés :

- Il n'y a pas de différence significative de rendement entre les modes d'implantation au sein d'une même espèce ;
- Les rendements de *Miscanthus x giganteus* sont plus élevés, mais plus variables, que ceux de *Miscanthus sinensis* ;
- *Miscanthus x giganteus* fait preuve d'une meilleure efficacité

photosynthétique, puisqu'il présente un meilleur rendement à indice foliaire égal ;

- Pour *Miscanthus sinensis*, le fait de doubler la densité de l'implantation n'a pas augmenté significativement le rendement.

Il faut noter que les implantations ont ici été faites dans des conditions expérimentales, manuellement. Une étude précédente (Lesur *et al.* 2018) avait montré qu'en conditions agricoles, l'implantation des rhizomes présentait des taux d'implantation et de reprise moins satisfaisants, allant même jusqu'à peser sur le rendement.

Comme énoncé plus haut, les facteurs influençant le rendement chez le miscanthus sont principalement l'âge et le stress hydrique, ainsi que l'effet mémoire. Plus précisément :

- Pour le *Miscanthus x giganteus*, les rendements augmentent avec l'âge de la plante sur les cinq premières années, et ils diminuent avec le stress hydrique.
- Pour le *Miscanthus sinensis*, les rendements augmentent avec l'âge de la plante sur les cinq premières années, ils augmentent avec l'effet mémoire, et ils diminuent avec le stress hydrique.

Une augmentation significative du stock de carbone dans le sol a été observée dans le sol au cours des cinq années d'étude sur l'horizon très superficiel (de 0 à 5 cm de profondeur). Nous n'avons pas observé d'évolution significative de ce stock sur l'horizon 0-30 cm.

## Conclusion

Cette étude a permis de mettre en lumière les facteurs expliquant les variations des rendements entre site-années (âge de la plante, stress hydrique, « effet mémoire ») et de tester l'effet du type d'implantation et de l'espèce sur la qualité de l'implantation et les rendements associés.

Elle a également fourni des indications sur les performances de différents modes d'implantation,

qu'il conviendrait d'étudier plus en profondeur, notamment sur leur faisabilité. En effet, même si l'implantation par repiquage de plants semble permettre un meilleur taux d'implantation et de reprise, cette méthode nécessite plus d'étapes et pourrait s'avérer plus coûteuse. Il faudrait donc réaliser une analyse qui étudie la faisabilité et le rapport coût-bénéfice de cette nouvelle méthode par rapport à la méthode utilisée

actuellement. En attendant cette étude, l'implantation à partir de rhizomes reste, à ce jour, la seule méthode appliquée.

Enfin, le miscanthus confirme sa capacité à stocker du carbone sur les horizons les plus superficiels du sol, point important dans la lutte contre le changement climatique. Une étude plus longue permettrait de statuer sur sa capacité à stocker du carbone plus en profondeur.

# Compréhension de la gestion de l'azote du miscanthus



**Marion Zapater,**  
INRAE  
BioEcoAgro,  
Estrées-Mons

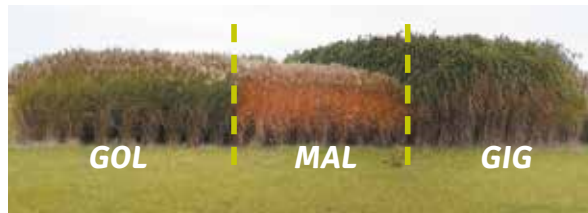
## Contexte et objectifs

Pour être durables, les cultures dédiées doivent concilier haut rendement et impact environnemental limité. La fertilisation étant un des tous premiers postes de pollution de l'agriculture, un des enjeux est de produire de la biomasse sans avoir recours à une fertilisation azotée. Le *Miscanthus x giganteus* est une culture qui répond à ce critère, puisqu'elle est capable de produire beaucoup de biomasse sans recours à une fertilisation azotée et de recycler l'azote via ses rhizomes. Cette étude a donc cherché à analyser et comprendre les flux d'azote du *Miscanthus x giganteus*. Comme pour l'étude précédente, les études de gestion de l'azote ont également été réalisées sur le *Miscanthus sinensis*, qui apparaît plus tolérant aux stress abiotiques et qui constitue un réservoir de diversité génétique.

## Résultats

L'étude a été réalisée sur trois génotypes contrastés : le *Miscanthus x giganteus*, le *Miscanthus sinensis Goliath*, et le *Miscanthus sinensis Malepartus*. La production de biomasse, la croissance et la dynamique des flux d'azote entre les différents compartiments de la plante ont été étudiés chez ces trois génotypes. Ces essais ont été réalisés en conditions non limitantes d'azote et d'eau, et avec des prélèvements tous les dix jours pendant la saison de végétation.

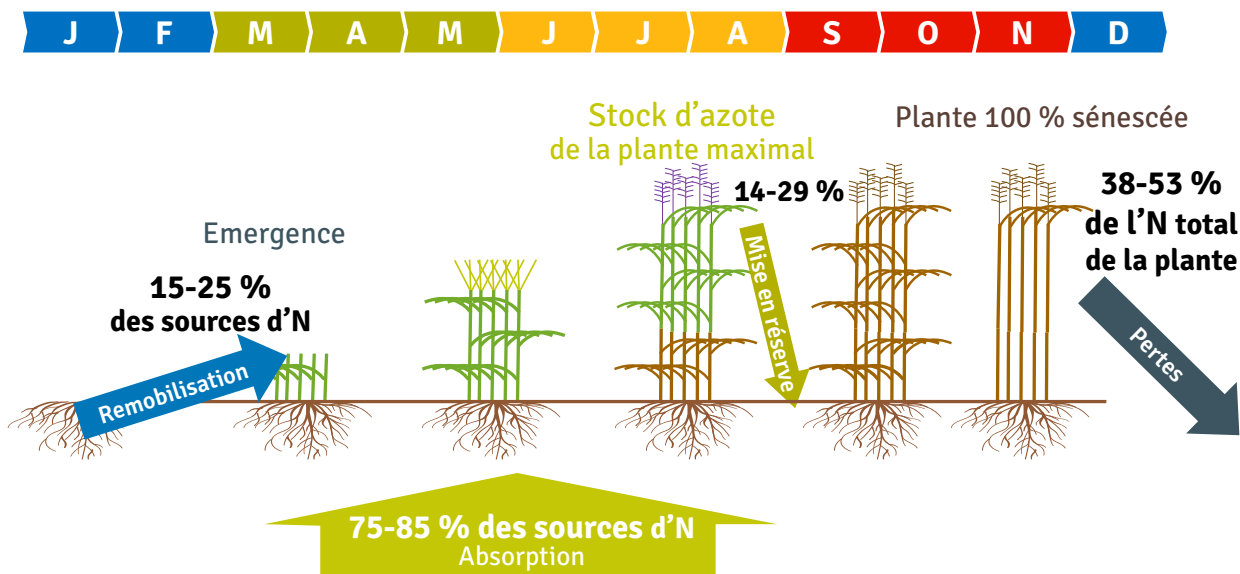
## Photographie du dispositif expérimental



Il a été observé que le *Miscanthus x giganteus* produit plus de biomasse aérienne et souterraine que les deux génotypes *Miscanthus sinensis Goliath* et *Malepartus*, avec cependant une même dynamique saisonnière entre les trois génotypes.

Néanmoins, la croissance et le développement des plantes diffèrent entre les deux espèces : chez le *Miscanthus x giganteus*, en été-automne, les biomasses des très jeunes tiges et des bourgeons augmentent tandis que le nombre de tiges matures n'augmente pas, ce phénomène correspond à la préparation des bourgeons de l'année suivante en automne qui restent dans le sol. En revanche, chez le *Miscanthus sinensis* à la même période, on observe une augmentation de la biomasse des jeunes tiges ainsi que du nombre de tiges, ce qui traduit l'émission de nouvelles tiges qui sortent tout au long de l'année.

## Récapitulatif des efficacités des mécanismes impliqués dans la gestion de l'azote chez les 3 génotypes



On observe également des profils de sénescence différents entre les trois géotypes. En effet, le Miscanthus × giganteus débute sa sénescence plus précocement que les deux géotypes de *Miscanthus sinensis*, mais le phénomène de sénescence est plus rapide chez ces derniers.

Les flux d'azote ont été étudiés et caractérisés au cours des différentes périodes clés de la vie et croissance de la plante. On observe :

- Des flux apparents d'azote plus importants chez le Miscanthus × giganteus que chez Goliath et Malepartus
- Pour les trois géotypes, la source majoritaire d'azote est l'absorption, avec 75 à 85 % du stock d'azote maximal de la plante qui est issu du sol ou de la fertilisation, et non de la remobilisation printanière de l'azote du rhizome. Celle-ci représente 15 à 25 % du stock d'azote maximal de la plante. Il est cependant à noter que le mécanisme est globalement aussi efficace chez le miscanthus que ce qui est décrit dans la littérature chez d'autres espèces pérennes. Le bilan de ces flux à l'échelle de la plante entière montre des « pertes » ou « transferts » d'azote conséquents dans le système.
- L'ordre de grandeur de ces « pertes » (38 à 53 % de l'azote

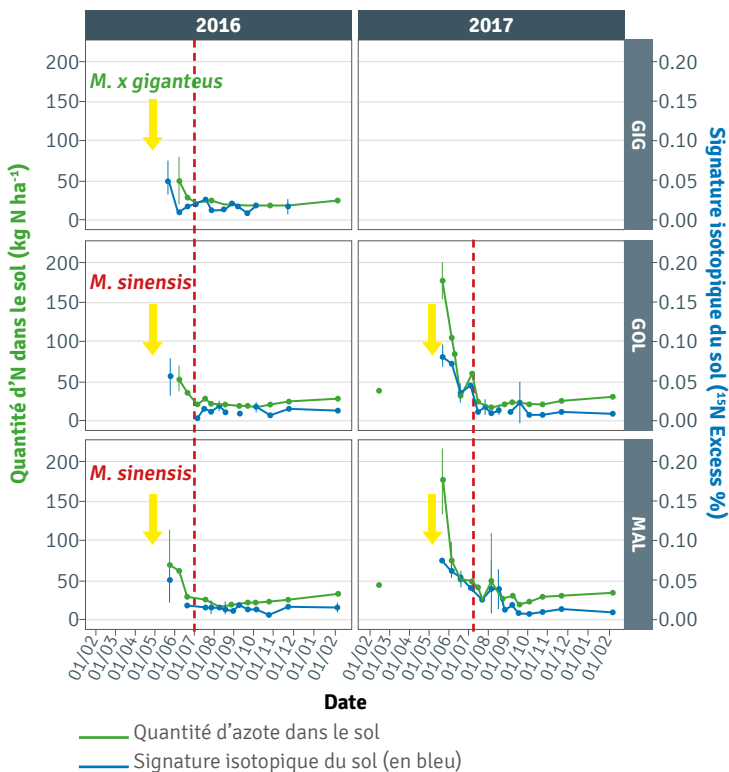
maximal de la plante) est comparable à ce qui est observé dans d'autres études chez le *Miscanthus × giganteus*, ainsi que chez d'autres espèces en conditions fertilisées ou non. L'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE) a aussi été étudiée, de deux manières différentes :

Production de biomasse en février / Azote absorbé et Production de biomasse en février / Azote absorbé et azote remobilisé

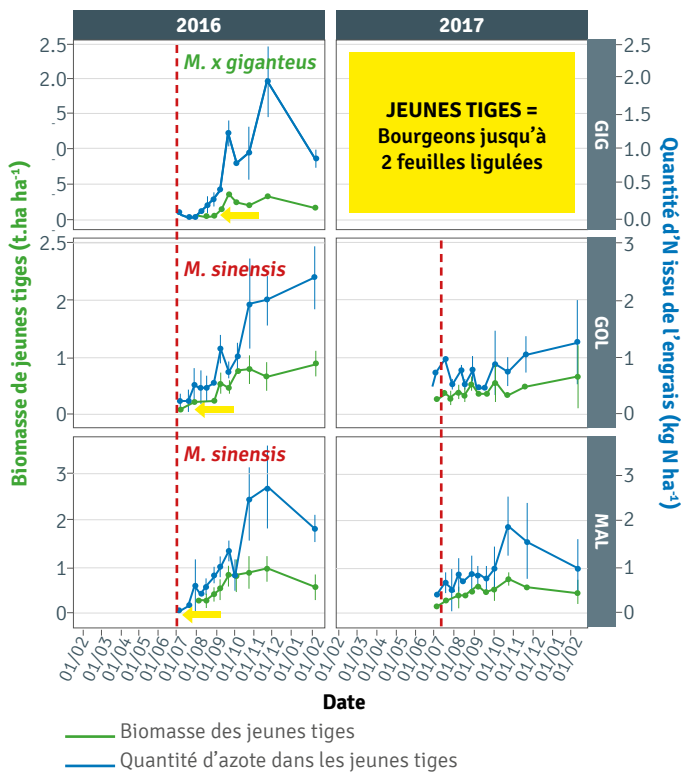
Ces résultats présentent une très grande hétérogénéité au sein des géotypes et des années étudiées. Il est à noter qu'il existe de nombreuses manières de calculer la NUE, en la calculant pour nos géotypes selon d'autres méthodes présentées dans la littérature, mais qui nous paraissent moins intégrées que celles que nous proposons, la quantité de biomasse produite par unité d'azote apparaît comparable voire plus importante que celle d'autres cultures biomasse telle que le switchgrass (Leroy *et al*, in prep)

Pour mieux caractériser la gestion de l'azote et les sources d'azote utilisées par les plantes durant leur croissance, la quantité d'azote et la signature isotopique après marquage

### Évolution de la quantité d'azote et de la signature isotopique du sol



### Biomasse et quantité d'azote issus du fertilisant dans les jeunes tiges





à l'azote 15 ont été suivies dans l'horizon 0-30 cm ainsi que dans les plantes. On observe que l'azote issu de la fertilisation n'est plus visible dès le mois de juillet.

Parallèlement, la biomasse et l'azote marqué, donc issu de l'engrais, ont été suivis dans les jeunes tiges. On remarque une différence entre le *Miscanthus × giganteus* et le *Miscanthus sinensis*. En effet, chez le *Miscanthus × giganteus*, la préparation des bourgeons ne se fait qu'à partir de septembre, et l'azote utilisé pour cela est issu de la sénescence de la partie aérienne, à cette période, la plante en est à 50 % de sa sénescence. En revanche, pour les deux géotypes de

*Miscanthus sinensis*, la préparation des bourgeons se fait dès le mois de juillet et ces bourgeons de l'été grandissent et se transforment en tiges matures.

La présence d'azote marqué dans les jeunes tissus et le fait que la remobilisation automnale liée à la sénescence n'a pas débuté semblent indiquer un phénomène de translocation directe de l'azote des tiges matures vers les jeunes tiges chez le *Miscanthus sinensis*, avec un possible stockage transitoire dans le rhizome et une remobilisation directe. D'autres variables, telles que la dynamique des protéines et de l'amidon, semblent concorder avec cette voie.

## Conclusion

Finalement, cette étude a mis en évidence plusieurs faits importants concernant les flux d'azote du miscanthus :

- Le *Miscanthus × giganteus* produit beaucoup de biomasse et présente des flux d'azote apparents plus importants que le *Miscanthus sinensis* ;
- Contrairement au *Miscanthus × giganteus*, le *Miscanthus sinensis* a la capacité d'émettre des bourgeons tout au long de l'année, ce qui peut lui conférer un avantage compétitif puisqu'il serait plus réactif sur certains types de sols que le *Miscanthus × giganteus*.

Dans la continuité directe de ces travaux, il serait intéressant d'ef-

fectuer des études sur un plus grand nombre d'individus pour conforter ces résultats, et même de modéliser ces flux.

D'autre part, on note que cette étude a été effectuée dans des conditions non limitantes d'azote et d'eau, c'est-à-dire sur des cultures complémentées en azote et irriguées, pour pouvoir caractériser le fonctionnement de ces géotypes en conditions optimales. Or, ces pratiques sont très rares, voire inexistantes, dans les pratiques agricoles courantes pour la culture de miscanthus. Il est nécessaire de compléter ces travaux avec une étude sans apport d'azote correspondant à la pratique habituelle. Enfin, il apparaît important de comprendre l'origine des pertes

en azote en hiver. Plusieurs hypothèses sont envisagées et devront être examinées dans des études ultérieures :

- Vérifier si la plante perd de l'azote ;
- Ou si la plante transfère de l'azote à la rhizosphère (exsudat racinaire), selon le principe de la rhizodéposition. Dans ce cas, l'azote n'est plus directement dans la plante, mais pourrait servir à celle-ci plus tard ou à favoriser les échanges avec la rhizosphère que l'on sait très importants pour de nombreuses espèces.

Sur ces deux hypothèses, la seconde semble la plus probable.

# Les apports de la génétique

[1] Le génotype d'un individu est la composition allélique (allèle = version d'un gène) de tous les gènes de l'organisme de cet individu.

[2] Le phénotype est l'ensemble des traits observables d'un individu. Il peut être observé à plusieurs échelles : organisme, organe, tissu, cellule, molécule.

**L'absence de diversité génétique au sein du miscanthus cultivé en France est une faiblesse pour l'avenir de cette culture. En effet, cette absence de variabilité génétique pose de nombreuses questions quant à la capacité du miscanthus à résister à des futurs potentiels bio agresseurs ou maladies, mais également à s'adapter à une diversité de conditions pédoclimatiques.**

Il est donc nécessaire de travailler à une diversification de l'offre variétale, qui nécessite en amont une étude approfondie du génotype [1] de la plante, et des liens entre ce génotype et le phénotype [2], en s'attardant sur des caractères d'intérêt tels la quantité et la qualité de la biomasse produite au regard

des utilisations industrielles dans des produits biosourcés, objets de ce programme.

Les travaux du programme BFF ont permis d'avancer sur cette question.

## Analyse et modélisation écophysologique de la production de biomasse

### Contexte et objectifs

Pour améliorer la performance industrielle de la biomasse, l'étude de la composition biochimique et histochimique de la biomasse est très importante. Si l'on souhaite pouvoir développer des nouvelles variétés dédiées à des usages industriels ciblés, il faut être en mesure de comprendre comment les caractéristiques de la biomasse sont variables en fonction de la diversité génétique et des environnements de culture.

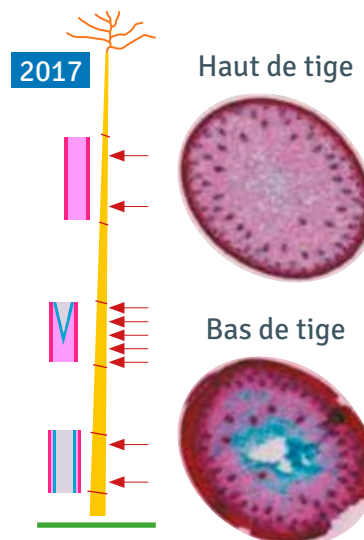
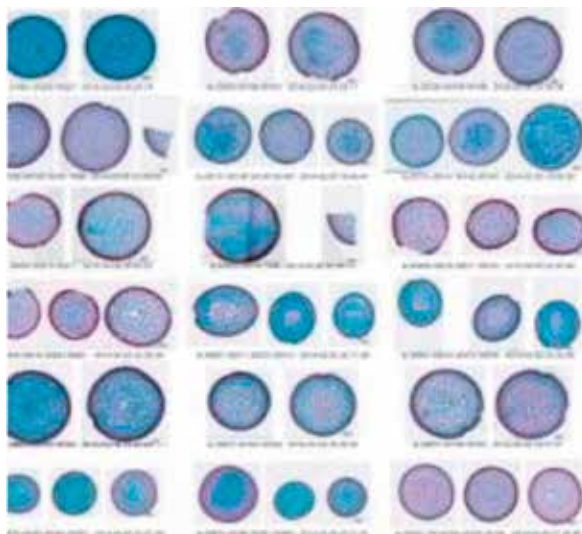
### Résultats

La biomasse est un système biologique complexe du point de vue physiologique et génétique, l'élaboration de la quantité

et de la qualité de la biomasse dépend d'un grand nombre de facteurs, dont la génétique de l'individu, l'environnement dans lequel il se développe, et les interactions entre génétique et environnement. Il est donc intéressant d'explorer la diversité génétique des caractéristiques de la biomasse grâce à un phénotypage haut débit [1], pour ensuite la mettre à profit dans une démarche d'amélioration variétale.

A partir du recueil de toutes ces données et des informations sur l'environnement, il est par ailleurs possible de modéliser de façon intégrée les processus (représentés sous forme d'équations mathématiques) qui contrôlent la dynamique de construction de la quantité et qualité de la biomasse et

### Images en vue transversale de tiges de miscanthus



**AgroImpact**

Stéphanie Arnoult  
Marion Zapater  
Marion Forest

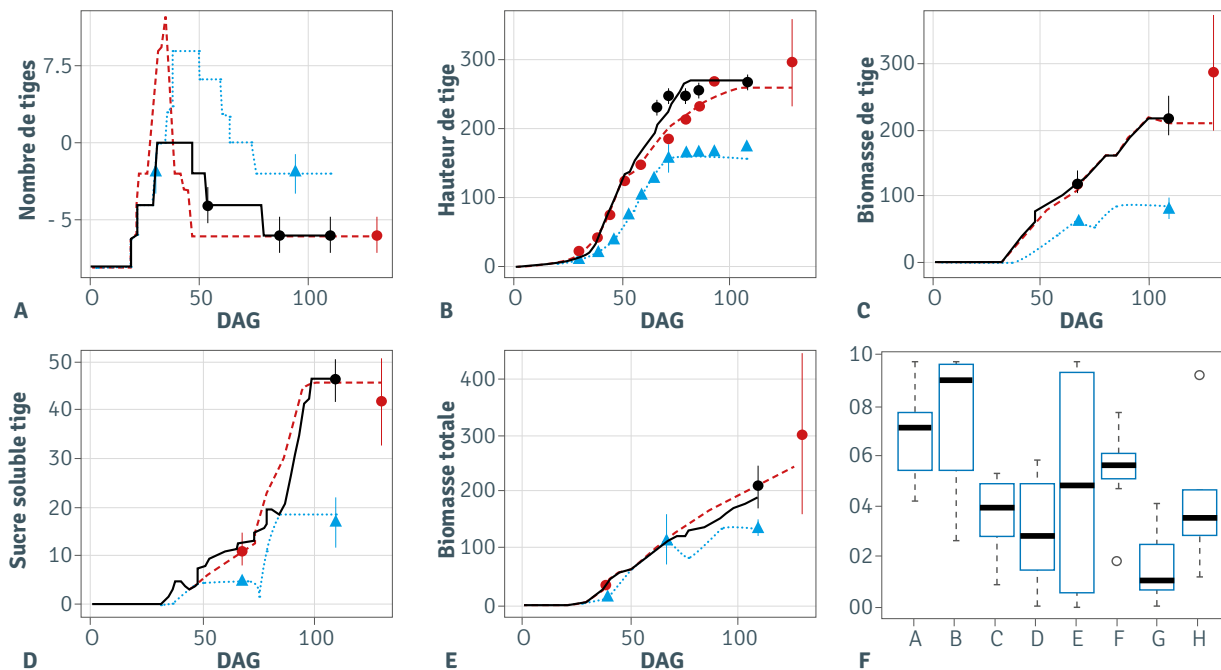


Matthieu Reymond  
Valérie Méchin  
Joan Onate Narciso  
Marie-Pierre Jacquemot  
Fadi EL Hage



Sylvie Jaffuel

## Croissance observée (points) et simulée (courbe) chez différents génotypes de sorgho



[1] Le phénotypage haut débit (Near-InfraRed Spectroscopy ou NIRS) est une technique d'imagerie qui permet d'étudier les caractéristiques structurales et fonctionnelles d'une plante sans avoir à la détruire, et qui permet un gain de temps considérable.

[2] Une étude *in silico* désigne une étude qui a été réalisée au moyen de modèles informatiques, « *in silico* » fait référence au Silicium, composant essentiel des transistors d'ordinateurs.

[3] La spectroscopie proche infra-rouge (NIRS) est une technique de mesure et d'analyse des spectres de réflexion dans la gamme du proche infra-rouge. Elle permet notamment d'analyser les liaisons chimiques C-H, O-H et N-H, elle est donc largement utilisée en chimie de l'alimentation et de l'agriculture.

leur réponse à l'environnement en fonction de paramètres génotypiques.

Cette modélisation s'avère un outil assez unique pour analyser *in silico* [2] un système biologique très complexe, multicritère, et ainsi définir des combinaisons optimales de processus, autrement dit des 'idéotypes' variétaux pour un environnement et un usage ciblés de la biomasse.

La construction de la biomasse a été étudiée pour plusieurs génotypes, en fonction de l'apport d'eau chez le sorgho et le maïs, et en fonction des flux d'azote chez le miscanthus. Pour ce qui est de la relation entre production de biomasse et gestion de l'azote par le miscanthus au cours du cycle de croissance, des différences génotypiques en termes de gestion d'azote ont été observées, mais difficilement mises en relation avec des variations de production de la biomasse, du fait de résultats trop hétérogènes. Les méthodologies très originales qui ont été développées pour caractériser ces flux en azote devront être mobilisées dans des situations culturales

d'apport en azote plus contrastées pour mieux quantifier les relations avec la production et des stratégies génotypiques intéressantes. En vue de dégager les caractères d'intérêt sur de grands nombres de génotypes, différents outils de phénotypage ont été développés et appliqués aux trois espèces étudiées, notamment deux plateformes d'histologie et des équations de prédiction de composants biochimiques au travers de la spectroscopie proche infra-rouge [3] (NIRS). Sur la base des connaissances acquises, un travail de modélisation et de prédiction des performances des idéotypes a été effectué, avec le sorgho comme modèle. Un modèle de croissance de la plante en peuplement a été développé simulant la variation du nombre de tiges, la hauteur de tiges, la biomasse de tige, la quantité de sucre soluble dans la tige, et la biomasse totale, et leur variation en fonction du génotype et de l'environnement. Les courbes ainsi obtenues ont été comparées à des données de croissance observées pour vérifier la validité du modèle. Ce modèle est alors disponible pour explorer *in silico* des optima variétaux en vue d'orienter la sélection variétale.

## Conclusion

Cet ensemble de travaux a permis d'engranger des connaissances et de mettre au point des outils qui pourront appuyer l'analyse génétique et la sélection variétale pour des espèces dédiées à la production de biomasse telles que le miscanthus. Les outils mis au point pourront

également être utiles pour des futures applications et recherches en dehors du cadre du programme BFF : étude de la résistance des plantes à la verse, au déficit hydrique, contribution à la séquestration de carbone, et plus généralement adaptation au changement climatique.

**Matthieu  
Reymond,**  
INRAE IJPB,  
Versailles

# Compréhension du rôle de la génétique dans l'élaboration des propriétés de la biomasse

## Contexte et objectifs

Dans la continuité du travail effectué dans le cadre de l'étude précédente, cette étude avait pour but d'utiliser la variabilité génétique chez le miscanthus, le sorgho et le maïs pour explorer les variations de production et de composition de la biomasse.

De plus, l'objectif est d'identifier les régions du génome impliquées dans les variations de caractères liées à la quantité et la qualité de la biomasse produite, afin de fournir des éléments qui seraient utiles pour accéder à une meilleure compréhension de la mise en place de la biomasse lignocellulosique et pour guider la sélection de plantes produisant des biomasses adéquates aux différents usages.

## Résultats

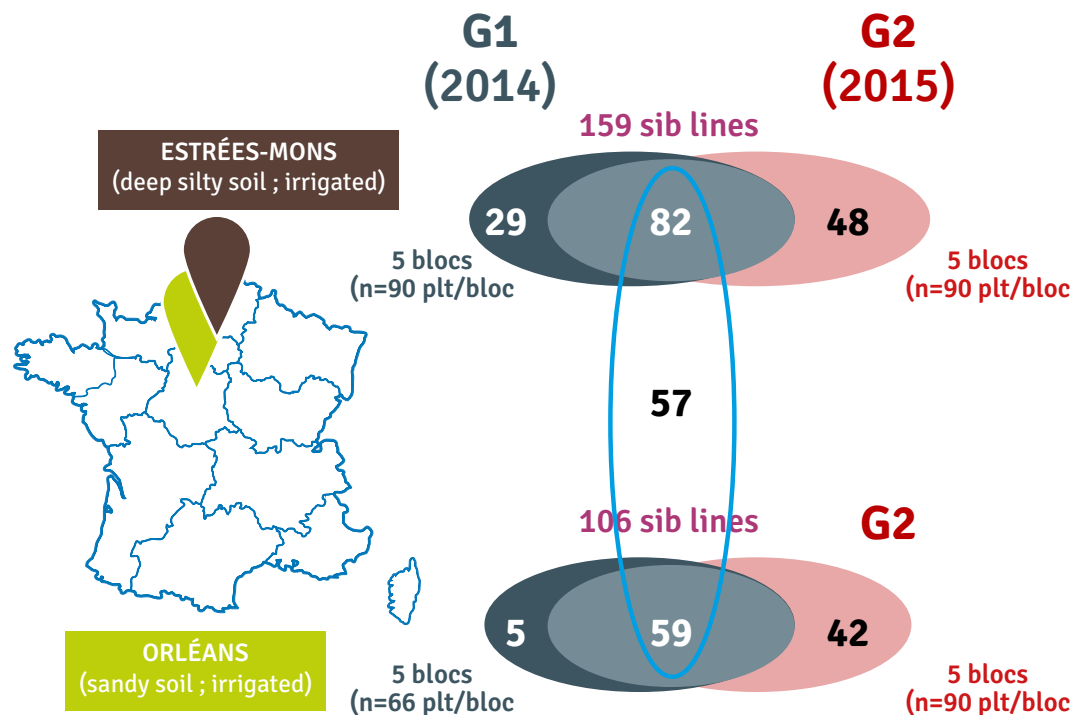
Pour ce faire, des populations de cartographie issues de croisements ou des panels de diversité ont été analysés chez le maïs et le sorgho. Pour chacune des lignées de ces populations/panels, un génotypage dense a été réalisé. De plus, au

niveau phénotypique, la caractérisation de chacune de ces lignées a été réalisée sur la digestibilité et la composition de la biomasse par l'utilisation de prédiction NIRS, et sur le profil histologique d'entre-nœuds par l'utilisation d'un plugin d'analyse d'images de coupes transversales colorées au FASGA [1]. La variation génotypique et la variation phénotypique ont été analysées conjointement pour identifier des régions du génome - QTL pour Quantitative Trait Loci [2] - impliquées dans les variations des caractères quantifiés.

Pour le miscanthus, une population SiA a été créée in vitro par croisement entre *Miscanthus sinensis* Silberspinne et *Miscanthus sinensis* Malepartus. Les lignées issues de ce croisement (génération F1 – SibLines) ont été implantées sur deux sites à Orléans et à Estrée-Mons en 2014 et 2015 en suivant un Staggered Start Design [3], et les biomasses produites par ces lignées ont été récoltées chaque année de 2015 à 2019.

L'ensemble des individus de la population ont été génotypés par GBS (Genotyping By Sequencing [4]) permettant d'élaborer

## Dispositif expérimental staggered start design



[4] Le GBS - ou Genotyping By Sequencing - est une méthode qui permet de découvrir les Single Nucleotide Polymorphism (SNP) de manière à faire des études de génotypage. Le GBS réduit la complexité du génome grâce à une enzyme de restriction pour découper l'ADN. En utilisant les enzymes appropriées, le GBS fournit une grande couverture des SNP avec un très bon rapport coût-efficacité.

[5] Un Single Nucleotide Polymorphism - Polymorphisme d'un Seul Nucléotide en français - est une variation d'un seul nucléotide du génome entre des individus de la même espèce qui apparaît dans une région spécifique du génome, et est présente chez plus d'1 % de la population. Les SNP sont utilisés en génétique afin de repérer et identifier des génotypes à partir d'échantillons.

une carte génétique intégrée de la population, en intégrant les SNP (Single Nucleotide Polymorphism [5]) ponts qui sont polymorphes et communs aux parents Silberspine et Malepartus. Le phénotypage de la population a été réalisé pour des caractères liés à la production de biomasse, à la précocité et à la composition de la biomasse produite en utilisant des prédictions NIRS. Les effets de l'âge des plantes et des conditions climatiques annuelles ont été analysés en tirant parti du stargerred-start design.

L'analyse conjointe des variations des phénotypes de production de biomasse et de composition de biomasse et des variations génotypiques a abouti à l'identification de 57 régions chromosomiques (QTL) sur le génome de miscanthus. La détection des QTL a permis d'identifier des régions spécifiquement impliquées dans les variations de rendement de la biomasse, ainsi que dans les variations de la composition de la biomasse et des régions impliquées dans les deux types de caractères.

**Création de la population SiA**  
**SILBERSPINNE**                      **MALEPARTUS**



## Conclusion

L'identification des régions chromosomiques impliquées dans les caractères d'intérêt (rendement de biomasse, composition de la biomasse) est une étape essentielle dans le processus d'amélioration et de diversification génétiques du miscanthus. En effet, c'est la base nécessaire à la compréhension fine du déterminisme génétique de ces caractères d'intérêt, elle-même essentielle pour prendre en compte les mécanismes génétiques dans le processus de sélection. Ainsi, on pourra réaliser la sélection de manière plus efficace, et en prenant en compte les caractéristiques de la biomasse adaptées aux différents usages.





**Laetitia Virlouvét,**  
INRAE IJPB,  
Versailles



**David Pot,**  
CIRAD AGAP,  
Montpellier

# Mise à profit des connaissances génétiques sur le maïs pour accélérer et optimiser les études sur le miscanthus

## Contexte et objectifs

A partir de l'identification des zones du génome impliquées dans la variabilité des caractéristiques de la biomasse, l'objectif de cette étude est l'identification de gènes et la compréhension fine du déterminisme génétique et moléculaire des caractères cibles de la sélection, afin d'optimiser l'efficacité de la sélection. Les caractères ciblés pour cette étude sont principalement la composition de la biomasse, et en particulier la teneur en lignine qui a une forte influence sur les intérêts du miscanthus pour des applications industrielles qui seront développées plus loin.

## Résultats

Dans un premier temps, les analyses des informations trouvées dans la littérature ont permis d'identifier des régions impliquées dans la composition des parois cellulaires chez le maïs et le sorgho. Dans ces régions, 2471 gènes pour le maïs et 2143 gènes pour le sorgho ont été détectés comme potentiellement intéressants pour la composition de la paroi. Ces gènes constituent donc la liste de gènes trouvés grâce à la littérature.

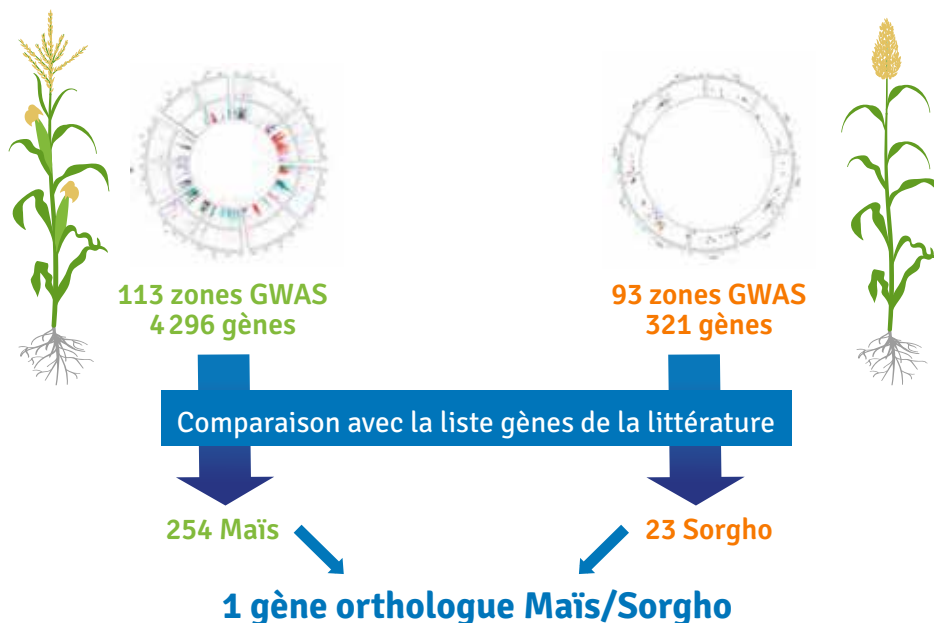
Dans un second temps, des études au champ ont permis d'identifier des zones du génome impliquées dans la teneur en lignine de la paroi. Les études statistiques de la mesure de la teneur en lignine dans la paroi des individus et du génotype de ces individus ont permis d'identifier 113 zones chromosomiques chez le maïs et 93 zones chez le sorgho, contenant respectivement 4296 et 321 gènes. Ces gènes constituent la liste de gènes détectés par les études au champ.

Les deux listes de gènes ont été recoupées pour voir si certains gènes détectés au champ figurent également sur la liste connue par la littérature. Il en ressort 254 gènes pour le maïs et 23 gènes pour le sorgho. Compte tenu de la proximité génétique entre maïs et sorgho, ces gènes ont été comparés pour voir s'il existait des gènes orthologues [1] entre les deux espèces, il en est ressorti un seul gène orthologue intéressant pour la composition des parois. Ainsi, malgré le nombre de gènes détectés, on n'a pour le moment qu'une compréhension limitée de la mise en place des parois.

Dans un troisième temps, des analyses transcriptomiques [2] ont été réalisées sur un seul génotype de maïs et un seul génotype de sorgho. L'étude qui a été faite visait à détecter

[1] Des gènes orthologues sont deux séquences génétiques chez deux espèces différentes descendant d'une séquence unique qui était présente chez le dernier ancêtre commun à ces deux espèces. Dans le cas de maïs, sorgho et miscanthus, leur proximité génétique rend probable la présence de gènes orthologues.

## Comparaison des gènes identifiés lors de l'analyse au champ avec les gènes connus par la littérature



[2] Une analyse transcriptomique est l'analyse de l'ensemble des ARNs présents dans la cellule à un instant t, permet d'identifier les gènes actifs à cet instant et les mécanismes de régulation de l'expression des gènes et de définir les réseaux d'expression des gènes.

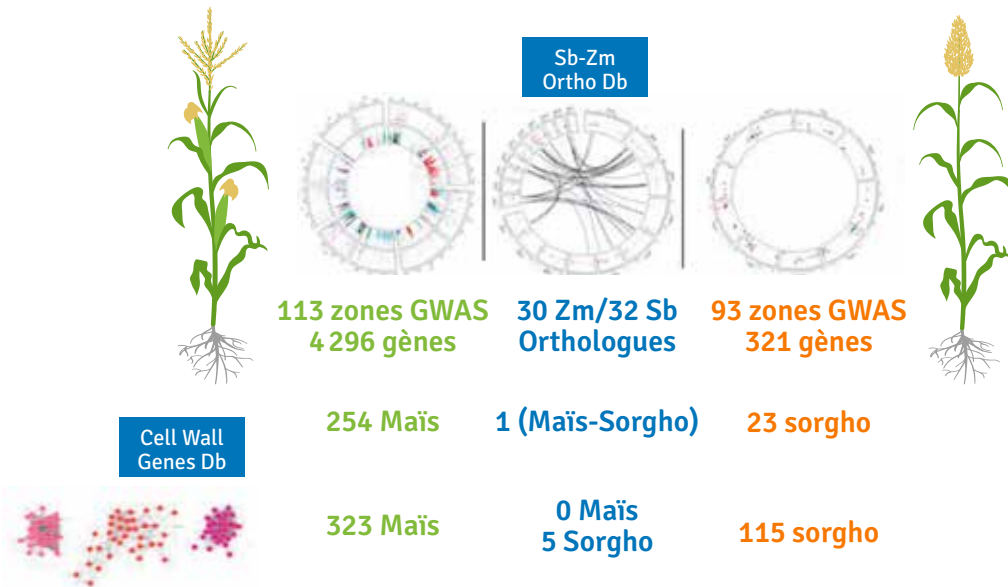
quels gènes sont activés au moment où l'on observe une augmentation de la teneur en lignine dans la paroi, afin d'identifier les gènes impliqués dans la mise en place des parois au niveau moléculaire. Cette étude a mis en évidence des groupes de gènes (i.e. des gènes qui fonctionnent selon la même mécanique d'activation/ de régulation) – 6 chez le sorgho et 5 chez le maïs. Parmi ces groupes de gènes, certains mécanismes communs de régulation de la mise en place des parois ont été retrouvés chez le maïs et le sorgho.

L'étude de ces groupes de gènes a permis d'identifier 323 gènes chez le maïs et 115 gènes chez le sorgho qui seraient impliqués dans la mise en place des parois, et qui viennent donc enrichir la connaissance génétique de la composition des parois végétales.

Dans un quatrième et dernier temps, certains des gènes détectés ont pu être validés comme impactant la composition des parois. Par exemple, un des gènes détectés sur le sorgho avait déjà fait l'objet d'une étude fonctionnelle, qui avait montré l'influence de ce gène dans la capacité de saccharification chez le riz. D'autres outils ont été développés et utilisés pour valider le rôle de ces gènes dans la composition de la paroi.

L'étude du maïs et du sorgho a été privilégiée pour la facilité et la rapidité de culture chez ces deux espèces. Cette étude a alors permis d'identifier des gènes impliqués dans la mise en place et la composition des parois cellulaires, caractère d'intérêt pour les applications industrielles de la biomasse.

### Bilan des gènes trouvés par l'analyse au champ (en haut), de ceux recoupés avec les informations de la littérature (au milieu), et de ceux trouvés par l'analyse du transcriptome (en bas)



## Conclusion

Finalement, l'étude combinée des analyses au champ, des analyses transcriptomiques et des connaissances de la littérature auront permis d'avancer dans la connaissance des mécanismes génétiques entrant en jeu dans la composition de la biomasse, et

en particulier dans sa teneur en lignine. Ces études, réalisées sur le maïs et le sorgho, participent à l'élargissement des connaissances génétiques sur les graminées de manière générale, et pourront être remobilisées pour le miscanthus. En effet, la proximité de ces deux

plantes avec le miscanthus amène à penser que nombre des connaissances acquises dans le cadre de cette étude pourront être utilisées lors du processus d'élargissement de l'offre variétale du miscanthus, et permettront alors d'accélérer la sélection variétale.

# Des conséquences pour la sélection

**Contrairement au *Miscanthus x giganteus*, le *Miscanthus sinensis* détient un important réservoir de diversité génétique, ainsi qu'une bonne adaptabilité aux conditions pédoclimatiques. Cette partie du programme BFF a donc travaillé à l'enrichissement de l'offre variétale en s'appuyant sur le réservoir génétique du *Miscanthus sinensis*.**

Si cette espèce présente un intérêt génétique fort, il faut néanmoins veiller à ce que les futurs génotypes produits à partir de cette espèce ne présentent aucun risque d'invasivité,

comme c'est le cas pour le *Miscanthus sinensis*. Cet aspect est une exigence absolue concernant cette culture.

## Vers une amélioration génétique du miscanthus

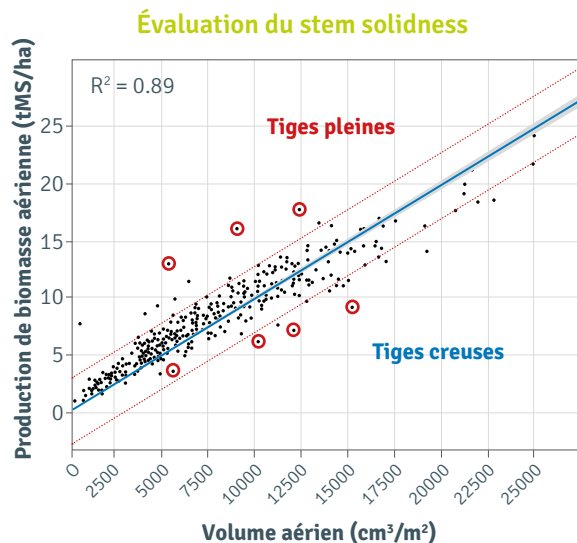
### Contexte et objectifs

L'objectif de cette étude est de définir une stratégie de sélection du miscanthus pour contribuer à élargir son offre variétale, en réponse aux nouveaux débouchés créés, tout en assurant sa non-invasivité. Pour limiter tout risque d'invasivité, des chercheurs Gallois ont choisi d'orienter la sélection vers une floraison tardive. Toutefois, compte tenu des fortes variations dans les dates de floraison observées en fonction des conditions pédoclimatiques et des incertitudes sur le climat français, cette option semble dangereuse d'un point de vue des risques d'invasivité. Par ailleurs, une floraison tardive peut également empêcher une sénescence complète, avec comme résultat un taux d'humidité trop important dans la biomasse récoltée et une réutilisation de l'azote inefficace. Le programme BFF a donc écarté cette option et a plutôt choisi de favoriser la stérilité des espèces.

### Résultats

Deux nouveaux débouchés pour le miscanthus ont été mis en lumière par le programme BFF : le débouché composite et la méthanisation. La méthanisation du miscanthus étant moins intéressante que celle du sorgho, ce débouché n'a pas été pris en compte dans le processus de sélection. En revanche, le débouché composite a été pris en compte, notamment pour améliorer les propriétés industrielles de la biomasse, et les propriétés mécaniques des composites créés.

Dans un second temps, il a fallu définir les caractères et les outils de phénotypage qui entreraient dans le schéma de sélection. Le caractère qui a été principalement étudié est la rigidité de la tige (stem solidness) qui influence les propriétés mécaniques des composites chargés en miscanthus.



Concernant la composition de la biomasse, l'utilisation de courbes de prédiction par spectroscopie NIRS développées par le programme BFF a permis une réduction drastique des coûts de phénotypage et de les appliquer ainsi à l'évaluation du matériel en cours de sélection.

Pour savoir si une amélioration génétique est possible, l'héritabilité [1] a été étudiée pour les différents caractères d'intérêt. Les caractères illustrés étaient la hauteur, le nombre de tiges, la circonférence de la plante, et le rendement de biomasse. Cette étude a permis de montrer qu'une amélioration génétique était possible, mais qu'elle n'est observable qu'à partir de la 3<sup>e</sup> voire 4<sup>e</sup> année, ce qui implique un allongement du cycle de sélection.

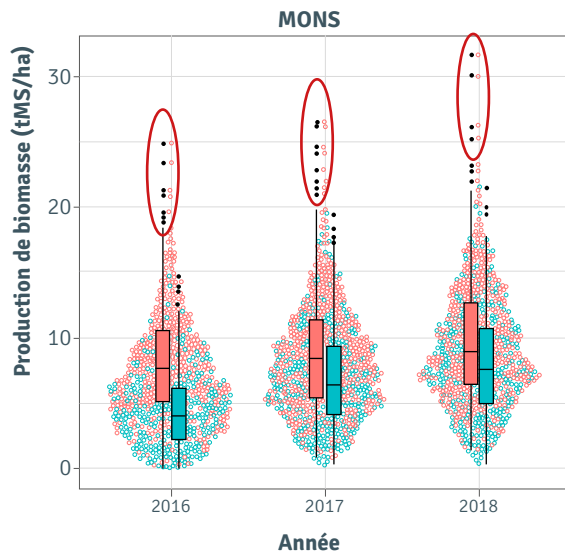


**Maryse Hulmel,**  
INRAE  
BioEcoAgro,  
Estrées-Mons

[1] L'héritabilité est la probabilité que des facteurs génétiques influencent un caractère, elle est comprise entre 0 et 1. Plus elle est proche de 1, plus un caractère est influencé par des facteurs génétiques, et donc, plus la sélection génétique a de chances de modifier (améliorer) ce caractère dans la population d'intérêt.

[2] La ploïdie désigne le nombre d'exemplaires de jeux complets de chromosomes au sein des cellules d'un organisme. Un organisme diploïde en possède donc deux, un triploïde trois, un tétraploïde quatre, et ainsi de suite. Pour être fertile, un organisme doit posséder un nombre pair de jeux de chromosomes, les organismes triploïdes sont donc stériles.

Entourés en rouge, les géniteurs très productifs choisis pour la sélection



Groupe ■ G1 ■ G2 - Source : Raverdy et al., en prép.)

[3] Crispr/Cas9, autrement appelé ciseau moléculaire, est une technique d'édition de génome qui permet d'introduire des modifications locales de la séquence du génome au sein d'un organisme. Emmanuelle Carpentier et Jennifer Doudna – chercheuses respectivement française et américaine – ont obtenu le Prix Nobel de Chimie 2020 pour l'invention de cet outil génétique.

Pour faire une innovation variétale, des fonds génétiques améliorés de diploïdes [2] ont été obtenus par croisement. Les géniteurs diploïdes avec les meilleures caractéristiques de production ont été croisés avec des géniteurs tétraploïdes afin d'obtenir de nouveaux clones triploïdes, donc stériles. Ces clones sont testés au champ depuis 2019, à raison de 150 nouveaux numéros par an.

Une autre voie a été explorée en édition de génome, pour produire des triploïdes à graines stériles, grâce à l'usage de la technique d'édition du génome Crispr/Cas9 [3]. Cette

technique suppose d'arriver à créer des modifications stables dans le génome, c'est-à-dire non transitoires, et de parvenir à la régénération des plantes transformées. La faisabilité de la technique a été démontrée pour un gène de biosynthèse de la lignine. Le taux de régénération étant beaucoup trop faible, une nouvelle technique est actuellement en développement afin d'augmenter le taux de régénération des mutants. Toutefois, l'utilisation de Crispr/cas9 en amélioration des plantes dépendra de l'acceptation sociétale de la technique



## Conclusion

Pour continuer le travail d'amélioration génétique de manière la plus efficace possible, il serait intéressant d'envisager de nouvelles possibilités. En effet, en précisant certaines informations sur les caractéristiques de la biomasse adaptées à chaque débouché, on pourrait orienter la sélection vers ces caractéristiques de manière plus fine. Il serait également inté-

ressant de prendre en compte la gestion de l'azote de la plante dans la sélection génétique pour assurer que les nouvelles variétés seront autant, voire plus performantes dans leur gestion de l'azote que la variété actuelle, en leur conférant par exemple une meilleure stabilité des performances. D'autre part, les travaux ont montré qu'il faudrait travailler au raccourcissement du

cycle de sélection, notamment grâce à la sélection appuyée par la génomique. De plus, les nouveaux clones triploïdes créés sont en phase de test, qu'il convient de poursuivre, pour évaluer la qualité des clones créés. Enfin, il serait intéressant de poursuivre l'investigation vers de nouvelles voies pour garantir la stérilité des hybrides créés.

# La valorisation de la biomasse

**Outre les usages classiques et déjà bien connus du miscanthus que sont la combustion, le paillage et la litière animale, cette plante est prometteuse pour de nombreuses autres utilisations, telles que la conception de composites polymères ou de matériaux de construction, et éventuellement la méthanisation. Dans ces usages, le miscanthus se substitue à des ressources fossiles (gaz naturel, matériaux pétro-sourcés) ou minérales (granulats).**

Bien que prometteuses, les alternatives à base de miscanthus n'existaient pas au lancement du programme BFF ; dont un des objectifs était donc de participer à l'élaboration technique de ces nouveaux débouchés. Pour répondre à cet objectif, on a donc étudié le potentiel de méthanisation du miscanthus, la conception de composites polymères et de béton chargés en

miscanthus, ainsi que l'influence des caractéristiques de la biomasse sur les propriétés techniques des matériaux conçus. Enfin, un travail important de modélisation économique a été fait sur les chaînes de production et de transformation, dans le but de construire des filières économiquement performantes et durables.



**Hélène Carrère,**  
INRAE LBE

## Méthanisation du miscanthus

### Rappel sur la méthanisation

A partir d'une biomasse végétale que l'on met dans un méthaniseur, on obtient un digestat liquide/solide qui peut être utilisé comme fertilisant ainsi qu'un biogaz composé de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de méthane (CH<sub>4</sub>). Ce biogaz peut soit être utilisé directement en cogénération, soit être épuré pour ne conserver que le méthane, puis être injecté directement dans le réseau de gaz naturel, ou bien être liquéfié en BioGNL pour servir de carburant par exemple.

### Contexte et objectifs

Dans le cas de la biomasse lignocellulosique, ce sont les sucres, les hémicelluloses, la cellulose et les protéines qui sont méthanisés et fournissent du biogaz. Les lignines, au contraire, ne sont pas biodégradables. Elles limitent en plus l'accès des microorganismes aux celluloses, et diminuent

ainsi le potentiel méthanogène de la biomasse introduite dans le méthaniseur. Il est donc intéressant, pour le sorgho et le miscanthus qui sont des biomasses lignocellulosiques, d'étudier l'effet de prétraitements de délignification sur le potentiel méthanogène.

Le but de cette étude est donc d'évaluer le potentiel méthanogène du miscanthus et du sorgho, et d'étudier l'impact des prétraitements sur ce potentiel. Enfin, a été étudiée la possibilité de prédire le potentiel méthanogène à partir d'une analyse par spectroscopie proche infra-rouge NIRS.

### Résultats

Dans un premier temps, les potentiels méthanogènes (BMP) du miscanthus ont été étudiés sur 8 géotypes différents de miscanthus : 3 de *Miscanthus x giganteus*, 4 de *Miscanthus*

**BMP mesurés sur les 8 géotypes de miscanthus testés**

Espèce	Clone	Rendement (tMS/ha)	BMP NmL CH <sub>4</sub> /gTS)	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ha
<b>M. x giganteus</b>	M. floridulus	40,6	162 ± 10	6546
	Gid	36,6	166 ± 7	6037
	H8	23	190 ± 6	4383
<b>M. Sinensis</b>	Goliath	20,5	169 ± 10	3440
	Malepartus	11	193 ± 9	2128
	Augustfeder	9,2	183 ± 12	1672
	H6	22,5	190 ± 6	4179
<b>M. sacchariflorus</b>	H5	31	193 ± 11	5963

**Images au microscope de coupes transversales de tiges de miscanthus observées au microscope, avec coloration en rouge rosé pour la lignine S, et en brun orangé pour la lignine G**



*sinensis*, et 1 de *Miscanthus sacchariflorus*, récoltés à la fin de leurs cycles en février - donc après la sénescence et la mise en réserve - au cours de la 8<sup>ème</sup> année de culture. Si l'on observe des différences de BMP entre les géotypes, on remarque toutefois que tous se situent dans une fourchette entre 160 et 190 NmL CH<sub>4</sub> par gMS.

Chez le sorgho, il y a eu la possibilité d'effectuer les mesures de BMP de 190 échantillons, les tests ont notamment confirmé le fait que le BMP diminue avec la présence de lignines dans la biomasse, et est corrélé à la digestibilité de la biomasse. Il a également été observé que la biomasse irriguée présente un moins bon BMP que la biomasse non irriguée. En effet, le déficit hydrique réduit la hauteur des tiges, mais réduit également la teneur en lignines, et améliore donc le BMP. Si cette étude a été effectuée sur le sorgho, la relation entre le BMP et le taux de lignine dans la biomasse est également attendue chez le miscanthus. A titre de comparaison, le BMP du sorgho varie entre 230 et 280 NmL CH<sub>4</sub> par gMS, contre 160 à 190 NmL CH<sub>4</sub> par gMS pour le miscanthus. Pour résoudre ce problème de blocage de l'accès des celluloses par les lignines, deux prétraitements alcalins ont été testés avec la chaux et la soude. On a ensuite observé à l'échelle cellulaire l'impact de ce prétraitement sur les lignines S et G, pour le miscanthus et le sorgho. Il a été remarqué que le prétraitement a mieux dégradé les lignines G plus présentes chez le miscanthus que chez le sorgho.

La production de méthane a été observée sur les échantillons de sorgho, avec différents prétraitements, chaux ou soude, et pour plusieurs temps de traitement, 1 jour ou 5 jours. Deux traitements (soude pendant 1 jour et chaux pendant 5 jours) ont ensuite été appliqués au sorgho et au miscanthus en amont de leur codigestion avec du fumier bovin en réacteur batch à forte teneur en matière sèche et à recirculation de lixiviat. Dans le cas du sorgho, ils ont permis une amélioration de la production de méthane de 19 % pour la soude 1 jour et 8 % pour la chaux 5 jours par rapport au réacteur codigérant le sorgho non prétraité. Même si le prétraitement à la soude est plus rapide et obtient de meilleurs résultats, il est conseillé de favoriser le prétraitement à la chaux. En effet, le prétraitement à la soude peut augmenter la quantité de sel dans le digestat qui est ensuite épandu sur les terres agricoles, ce qui n'est pas souhaitable pour la santé et la qualité des sols agricoles. Pour le miscanthus, les observations ont montré les mêmes effets du prétraitement sur la lignine. En revanche, les essais en réacteur ont été moins performants que pour le sorgho, mais le miscanthus reste intéressant en mélange avec d'autres matières premières.

Le troisième objectif de l'étude était de pouvoir prédire le BMP par spectroscopie proche infra-rouge. Deux calibrations ont été effectuées, à partir des 157 échantillons de sorgho d'une part, et à partir des 157 échantillons de sorgho et des 14 de miscanthus d'autre part, et ont abouti à la création d'un outil de prédiction des BMP à partir de spectres NIRS.

## Conclusion

Le miscanthus présente un potentiel méthanogène intéressant même récolté en sec, bien que nettement inférieur à celui du sorgho. Un pré-traitement peut s'avérer vraiment intéressant pour rendre la biomasse plus accessible à la méthanisation, il faut alors privilégier un prétraitement à la chaux.



**Patrick Navard,**  
Armines  
Mines-ParisTech

# Importance des propriétés de la biomasse dans la conception de composites polymères chargés en miscanthus

## Contexte et objectifs

Dans le cadre du programme BFF, cette étude a pour but de pouvoir identifier et quantifier l'impact des caractéristiques de la biomasse sur les propriétés mécaniques des polymères, pour être capable d'optimiser la conception de ces matériaux biosourcés.

## Résultats

Dans un premier temps, c'est la relation entre propriétés de la biomasse et propriétés des composites polymères qui a été étudiée. Pour cela, une méthodologie stricte a été mise en place. On a commencé par sélectionner des génotypes très variés de sorgho, de miscanthus et de maïs, qui sert ici de plante de référence. Des zones d'échantillonnage variant le génotype (21 ont été utilisés), la zone le long de la tige, l'année de culture, le lieu de culture, et le moment de la récolte et parfois des tissus individuels, ont été choisies, et ont fait l'objet d'analyses biochimiques et histologiques. Des composites polymères à base de polypropylène et polyéthylène, comprenant entre 20 et 35% en masse de fragments de tiges de miscanthus ont ensuite été préparés à partir de ces échantillons, en suivant un protocole très rigoureux afin de s'assurer que toute variation des propriétés des composites soit due aux caractéristiques de la biomasse et non à la préparation des fragments de tiges, au mélangeage ou à la mise en forme. Les principales propriétés mécaniques ont été mesurées et corrélées aux propriétés biochimiques et histologiques de la biomasse.

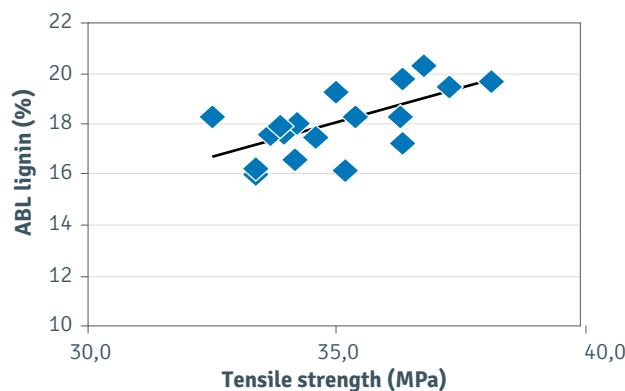
Les paramètres mécaniques testés sur les composites étaient notamment la résistance à la tension, le module de Young ou module d'élasticité, et la résistance aux impacts. Les différences entre les valeurs de ces paramètres ont été corrélées au génotype, et plus particulièrement à la teneur en lignine, en acide para-coumarique et en acide férulique de la biomasse. Les résultats ont mis en lumière certaines contradictions qui rendent l'analyse des corrélations complexes.

Une étude a été effectuée sur le développement d'un composite de polypropylène renforcé à 30% de fragments de miscanthus. Dans cette étude, 13 génotypes différents de miscanthus ont été étudiés : 2 variétés de *Miscanthus giganteus* (FLO, GIGB), 9 variétés de *Miscanthus sinensis* (FER, FLA, GOL, GRZ, MAL, PUR, ROT, SIL, YAY), et 2 variétés de *Miscanthus sacchariflorus* (H5, SAC). Toutes ces variétés ont été implantées en 2007 en Picardie, et l'étude qui suit porte sur des tests effectués sur la récolte de février 2013.

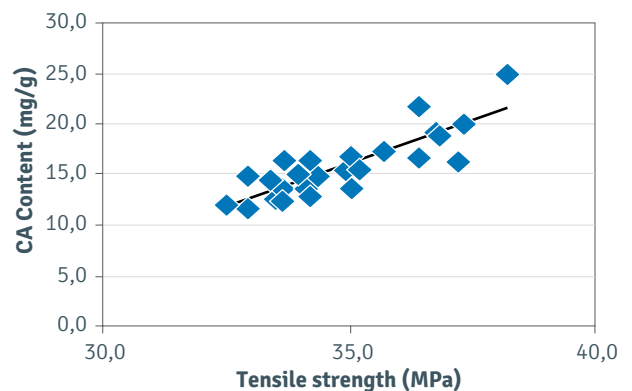
Les propriétés mécaniques des composites renforcés, et plus particulièrement la résistance à la traction et le module de Young, ont été mesurées en fonction de la taille des fragments de miscanthus introduits.

Lorsqu'aucun agent de couplage n'est ajouté pour l'interface fragments-matrice, on remarque que les fragments de miscanthus n'améliorent pas significativement les propriétés mécaniques du composite. En revanche, lorsqu'on utilise un agent de couplage, les fragments de miscanthus renforcent considérablement la résistance du composite, de l'ordre de 30 à 40 % pour la résistance à la traction par rapport à la

**Corrélations effectuées entre la résistance à la traction et la teneur en lignine**

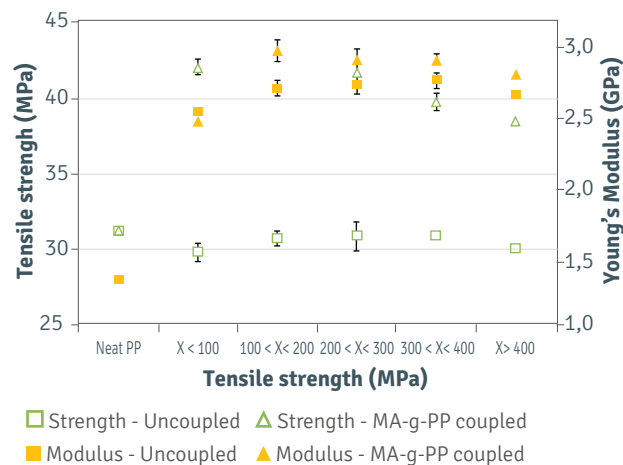


**Corrélations effectuées entre la résistance à la traction et la teneur en acide para-coumarique**



matrice seule. De plus, la résistance à la traction est d'autant plus importante que la taille des fragments incorporés est faible, puisque cela augmente la surface de contact entre les fragments et la matrice, et donc la cohésion du composite. Les différents génotypes ont ensuite été comparés et classifiés selon leur capacité à renforcer la matrice, et ce pour différentes tailles de fragments et différentes matrices.

### Résistance à la traction et module de Young en fonction de la taille des fragments de miscanthus introduits dans le composite



## Conclusion

En conclusion, le miscanthus s'avère très intéressant pour le renforcement de composites polymères. Le faible impact de la culture de miscanthus en elle-même ainsi que le fait de ne pas devoir effectuer de prétraitement chimique sur les fragments de miscanthus rendent cette solution de renforcement tout à fait attractive.

Il est prévu d'approfondir la compréhension de l'influence des caractéristiques physico-chimiques de la biomasse sur les propriétés mécaniques des composites conçus. De plus, il serait intéressant d'étudier l'impact de la qualité des sols et des conditions climatiques sur les propriétés mécaniques des composites renforcés. En effet, la production industrielle de composites polymères nécessite une certaine régularité dans le produit final obtenu, il est donc important de savoir si on peut parvenir à cette régularité en utilisant de la biomasse, dont les caractéristiques et la production dépendent des conditions pédoclimatiques.

## Importance des propriétés de la biomasse dans la conception de béton chargé en miscanthus

### Contexte et objectifs

Dans le cadre du programme BFF, cette étude a pour but de pouvoir identifier et quantifier l'impact des caractéristiques de la biomasse sur les propriétés mécaniques des bétons chargés en miscanthus, pour être capable d'optimiser la conception de ces matériaux biosourcés.

### Résultats

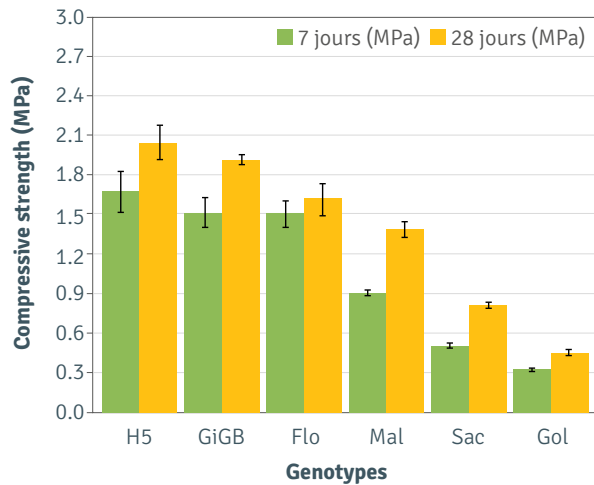
L'étude a porté sur la relation entre propriétés de la biomasse et propriétés mécaniques du béton produit. Tout d'abord, des tests ont été effectués pour étudier l'effet des sucres qui peuvent être extraits de la biomasse lors du contact avec le milieu alcalin ciment-eau sur les caractéristiques du béton,

sachant que ces sucres peuvent avoir un effet majeur sur la tenue du béton.

Différents traitements de surface ont été effectués sur des échantillons de miscanthus pour modifier le relargage des sucres dans le béton. Les bétons ainsi obtenus ont été testés sur leur densité, leurs propriétés mécaniques et la quantité de sucre relarguée dans le milieu cimentaire. On a alors remarqué que les molécules de glucose et de xylose ont tendance à être absorbées sur les particules de ciment, ce qui inhibe la prise du ciment. De plus, d'autres sucres ou extraits favorisent l'hydratation du ciment.

Ensuite, on s'est intéressé à l'impact de la composition de la biomasse sur le béton. Dans un test effectué sur plusieurs

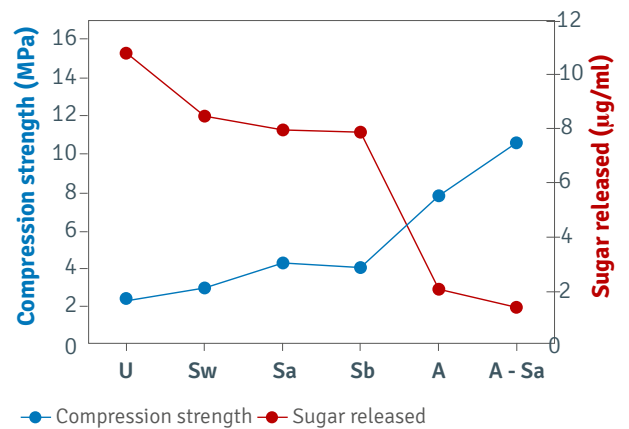
### Résistance à la compression sur des bétons enrichis en fonction du génotype de miscanthus introduit



génotypes de miscanthus, il a été révélé que la résistance à la compression est meilleure pour des génotypes ayant une forte proportion de cellulose et de lignine, et une faible proportion d'hémicellulose et de composés solubles.

Des mesures ont également été effectuées dans la perspective d'obtenir des caractéristiques mécaniques compatibles avec la conception d'un bloc-béton porteur. Avec certains additifs et un mode de préparation qui sont gardés confidentiels, des

### Résistance à la compression et sucres relargués dans un béton avec fragments de miscanthus, en fonction des prétraitements réalisés



- U : untreated miscanthus pieces
- Sw : silanization in water
- Sa : silanization in acid conditions
- Sb : silanization in basic conditions
- A : with only the alkali treatment
- A-Sa : Alkali + silanization in acid conditions

bétons-miscanthus à 12-15% de miscanthus, dont la résistance à la compression est compatible avec les valeurs nécessaires pour produire des blocs porteurs, ont été préparés.

## Conclusion

L'utilisation du miscanthus pour la conception de bétons est très prometteuse et positive pour l'environnement pour les blocs de

béton non porteurs, et semble possible, mais pas performante environnementalement, pour les blocs de béton porteurs. Un pré-

traitement du miscanthus peut s'avérer utile pour améliorer les propriétés mécaniques du béton obtenu.

# Développement d'un composite chargé en miscanthus dans des applications intérieur automobile



Guillaume Alès,  
ADDIPLAST

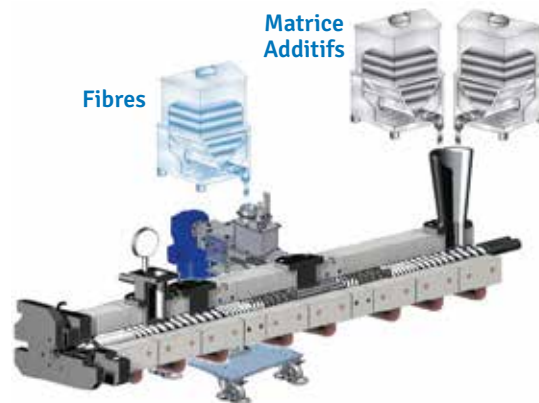
## Contexte et objectifs

La particularité de ces travaux est qu'ils ont été menés en étroite collaboration avec plusieurs partenaires industriels : Addiplast, Faurecia et PSA Peugeot Citroën. Par ce travail conjoint, l'objectif était alors le développement d'un composite chargé en miscanthus qui corresponde à la fabrication industrielle de pièces d'intérieur automobile. L'introduction du miscanthus dans ces pièces en remplacement de la fibre de verre présente plusieurs avantages. Premièrement, cela permet une diminution directe de l'impact environnemental par le remplacement d'une ressource minérale par une ressource végétale durable. De plus, le miscanthus étant plus léger que les fibres de verre, cela permet l'allègement des pièces automobiles, et donc la diminution de la consommation de carburant des véhicules conçus, défi majeur posé au secteur automobile aujourd'hui.

## Résultats

Le procédé utilisé a été celui du compoundage grâce à une extrudeuse bi-vis dans laquelle les polymères et additifs sont introduits en trémie principale et les charges naturelles de miscanthus sont introduites latéralement. Si ce procédé présente de nombreux intérêts pour les applications industrielles, il y a toutefois quelques points de vigilance pour l'utilisation de fibres naturelles, notamment sur l'uniformité de la taille et de la forme des fibres. Après les premiers essais, les formulations testées présentent plusieurs avantages. En effet, avec un taux d'incorporation de miscanthus variant entre 15 et 40 % - généralement 30 % - on note un allègement des composites et une amélioration des propriétés mécaniques, notamment la flexibilité. Contrairement à d'autres espèces végétales testées, le miscanthus ne dégage pas d'odeur particulière lors de l'extrusion et a un bon comportement lors de l'injection. Plusieurs limitations techniques ont toutefois été observées. Premièrement, l'interface entre la matrice polymère et les fibres de miscanthus est faible, même avec ajout d'un agent de

## Procédé de compoundage avec une extrudeuse bi-vis



couplage. On observe alors de faibles propriétés mécaniques pour la ductilité et la résistance au choc, la diversité de géotypes testés n'a pas apporté d'amélioration sur ces propriétés mécaniques. De plus, le procédé de broyage, micronisation puis tamisage des fibres doit être optimisé et fiabilisé. La densité de la fibre broyée étant faible, le coût de transport au kilogramme s'avère important. Enfin, le taux d'incorporation du miscanthus a un fort impact sur la fluidité du compound. Par rapport à d'autres fibres naturelles (bois, lin), le miscanthus offre une meilleure capacité de flexion, mais une moins bonne résistance au choc. Il faudra donc développer des formulations spécifiques en fonction des propriétés recherchées pour chaque pièce. En lien avec le cahier des charges PSA, il en ressort que ce composite pourra être utilisé pour des pièces intérieures sans contrainte de choc et non visibles. A titre d'exemple, cela correspondrait aux pièces des sièges, à la boîte à gants, aux inserts de la planche de bord, du coffre et du toit intérieur. Pour le cahier des charges de Faurecia, cela pourrait correspondre à la fabrication de pièces visibles de portières et de planches de bord. PSA a choisi de poursuivre et de finaliser le développement de sa formulation.

## Conclusion

Finalement, cette étude a permis de développer un composite chargé au miscanthus compatible avec une utilisation industrielle dans le secteur automobile, qui permet de réduire l'impact environ-

nemental des voitures, tant pour leur fabrication avec l'utilisation de composés d'origine végétale que pour leur utilisation avec la diminution du poids des voitures et donc la diminution de consommation

en carburant. Les travaux effectués ont également permis de concevoir des composites chargés en miscanthus qui pourront être utilisés dans d'autres secteurs tels que la cosmétique (emballages).

Pierre  
Malvoisin,  
Aelred

## Un outil d'aide à la décision pour la construction de filières performantes durables

### Contexte et objectifs

Après la culture, puis la récolte et le stockage de la matière végétale brute, vient l'étape de première transformation qui peut comprendre, en partie ou en totalité selon le type de valorisation envisagé, dépoussiérage, tri, broyage léger, tri densimétrique, micronisation, tamisage, compression, conditionnement et stockage. A la suite de cela, la matière première végétale ainsi fractionnée et préparée, respectant le cahier des charges ou les normes demandées, peut entrer dans un processus de fabrication industrielle.

La faible densité du miscanthus pèse sur les coûts de transport et de stockage. Elle est un facteur limitant clef de la rentabilité ;

il est donc nécessaire que le site de première transformation soit à proximité des zones de production. De plus, du point de vue de l'opérateur de première transformation, il est important de pouvoir valoriser toutes les fractions de matières végétales obtenues à partir de la matière brute récoltée.

Une des ambitions du programme BFF est d'apporter une contribution effective à la mise en place de filières de production et de transformation industrielle des matières premières végétales issues du miscanthus. Par ce travail, le programme BFF souhaite encourager un développement durable, local et performant de la filière.

### Résultats et conclusion

Un logiciel de calcul économique et environnemental a été construit à cet effet, qui permet d'estimer le coût de production (via un calcul du prix de revient) et de l'impact environnemental (via un calcul du bilan carbone), à chaque étape et maillon des chaînes de production, du champ à la livraison à la porte du site de l'industriel valorisateur. Cet outil d'aide à la décision est utilisable quelles que soient les valorisations envisagées ; il permet de cartographier plusieurs chaînes de production d'une même unité de première transformation, de calculer les coûts pour chacune d'entre elles, puis d'agglomérer les résultats pour une estimation globale de rentabilité de cette unité. On peut utiliser cet outil en faisant varier tous les paramètres, et comparer ainsi les performances économiques des filières en fonction des hypothèses retenues, toutes choses étant égales par ailleurs. Un manuel d'utilisation de l'outil a également été rédigé pour guider les utilisateurs. L'outil fournit, en parallèle des coûts, un calcul de l'impact carbone à chaque étape, ce qui permet à l'utilisateur d'intégrer la dimension environnementale dans sa décision.

# Des performances environnementales

L'objectif même de l'utilisation de la biomasse non alimentaire pour le remplacement de ressources fossiles et minérales est de réduire l'impact environnemental des filières concernées. Il est donc essentiel de s'assurer que ce remplacement conduit effectivement à des externalités environnementales bénéfiques, mais également de comprendre quelles méthodes de production et de transformation permettent d'optimiser ces performances environnementales. Le programme BFF a donc travaillé dans cette partie à la caractérisation des performances environnementales des différentes filières envisagées pour le miscanthus.

## Performances environnementales des filières miscanthus

### Rappel sur l'évaluation environnementale

Pour réaliser l'évaluation environnementale d'une filière, la méthodologie répondant à la norme ISO 14040/44 correspond à la méthode de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Lors de la réalisation d'une ACV, toutes les étapes de la production à la fin de vie en passant par l'utilisation, ainsi que tous les flux d'énergie, de matière première et de déchets, doivent être pris en compte.

Il est important de prendre conscience qu'un seul résultat ne peut pas être représentatif pour une filière du miscanthus, mais qu'il faut au contraire réaliser une ACV pour chaque scénario envisageable de déroulement de la filière.

### Contexte et objectifs

S'il semble évident que le remplacement d'une ressource fossile par une ressource renouvelable – la biomasse – a un impact positif sur l'environnement, il est néanmoins indispensable de réaliser des ACV sur les filières de la bioéconomie ainsi créées pour vérifier et quantifier le bénéfice apporté à l'environnement par la filière.

### Résultats

Pour répondre à la diversité de possibilités au sein d'une filière, plusieurs scénarios ont été élaborés, en faisant varier un grand nombre de paramètres : la culture a-t-elle été faite sur des terres en compétition avec l'agriculture alimentaire ou pas ? Quels sont les rendements ? Y a-t-il eu une fertilisation ? Dans le cadre d'une méthanisation, y a-t-il eu des prétraitements ou pas, à la chaux ou à la soude ? Dans le cadre de pièce intérieur automobile, ces pièces ont-elles été placées

dans une voiture diesel ou essence ?

Un très grand nombre de scénarios a donc été envisagé, le but étant de voir si on peut observer des tendances communes entre tous ces scénarios qui tendraient à indiquer les conditions les plus favorables à la diminution de l'impact environnemental de la filière.

Pour chaque utilisation du miscanthus, il convient de choisir quel est le concurrent auquel le miscanthus se substitue : fibre de verre pour les pièces automobiles renforcées, gaz naturel pour la méthanisation, etc.

On effectue ensuite une analyse en classes d'impacts et en score environnemental unique pour étudier l'impact de cet usage sur différents indicateurs environnementaux. Pour l'analyse en classes d'impacts, on étudie l'impact du miscanthus sur 15 paramètres environnementaux :

- Acidification
- Changement climatique
- Ecotoxicité des eaux douces
- Eutrophisation des eaux douces
- Eutrophisation marine
- Eutrophisation terrestre
- Toxicité humaine cancérigène
- Toxicité humaine non-cancérigène
- Emissions de radiations ionisantes
- Utilisation du sol
- Destruction de la couche d'ozone
- Formation de particules
- Formation d'ozone photochimique
- Utilisation de la ressource en eau
- Utilisation des ressources minérales, fossiles et renouvelables



Colin Jury,  
Inovertis-A3i

Pour l'usage du miscanthus en renforcement de pièces d'intérieur automobile, par rapport à l'usage de fibres de verre, on observe peu de variations entre les sous-scénarios. Globalement, cet usage du miscanthus permet de diminuer l'impact sur le changement climatique de 20 % à 25 %, et a également un effet bénéfique sur l'environnement en général pour presque tous les scénarios.

Pour l'usage du miscanthus en bloc béton, on note une forte variabilité entre les différents sous-scénarios.

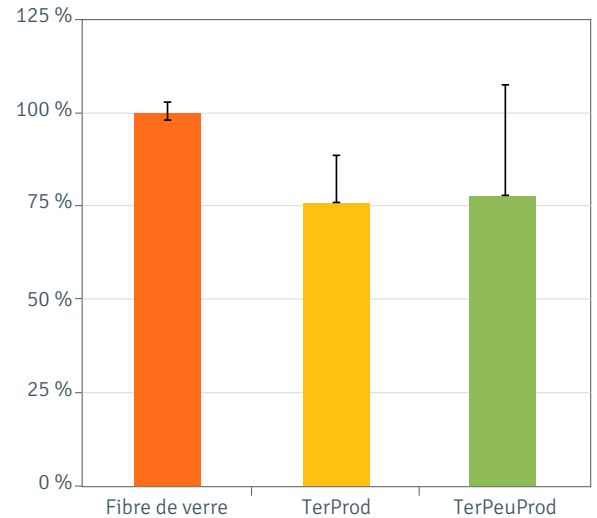
Pour ce qui est du bloc porteur (allégé ou non), l'étude révèle un impact délétère sur l'environnement car l'utilisation du miscanthus rend nécessaire une quantité supérieure de ciment. La filière doit donc passer par une phase d'écoconception si elle veut devenir durable (augmentation de la quantité de miscanthus dans les blocs et/ou réduction de la quantité de ciment employée).

Pour ce qui est du bloc non porteur, on remarque que le miscanthus peut réduire l'impact sur le changement climatique de 30 % à 40 %.

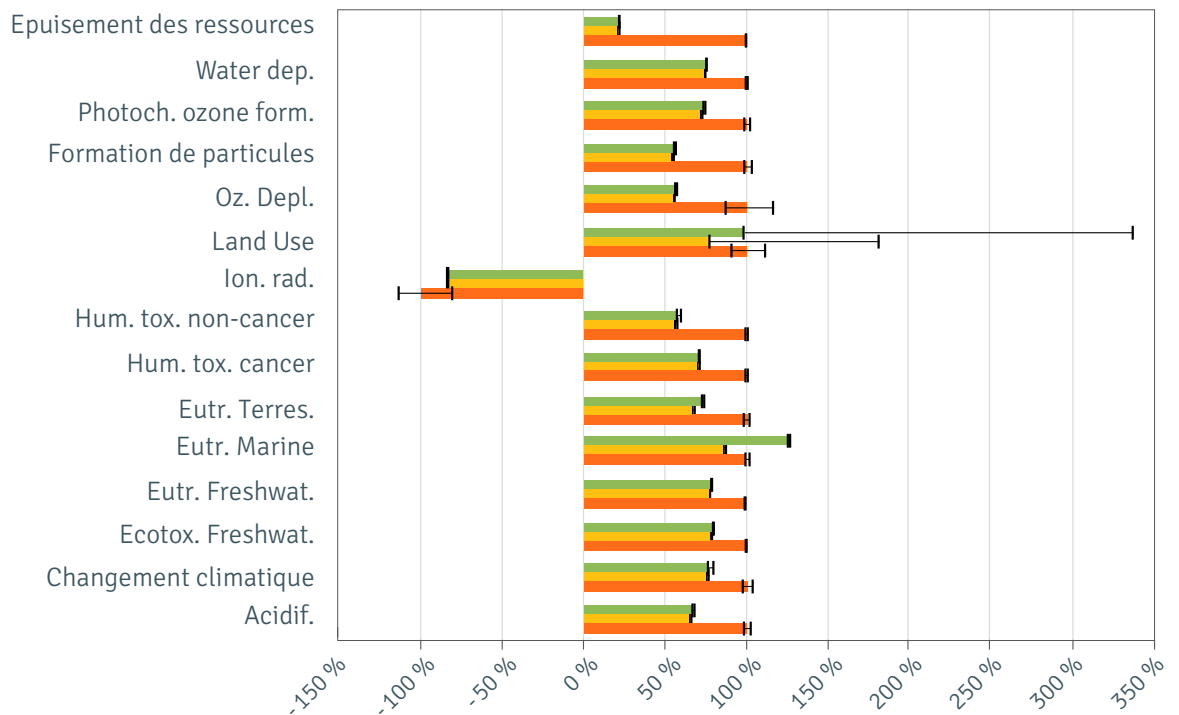
Pour l'usage du miscanthus en production de chaleur en chaufferie par rapport à l'usage de gaz naturel, on remarque que ce n'est favorable que pour la déplétion

de la couche d'ozone et le changement climatique. En revanche, lorsqu'on évalue le score environnemental global, on remarque que le miscanthus peut être favorable

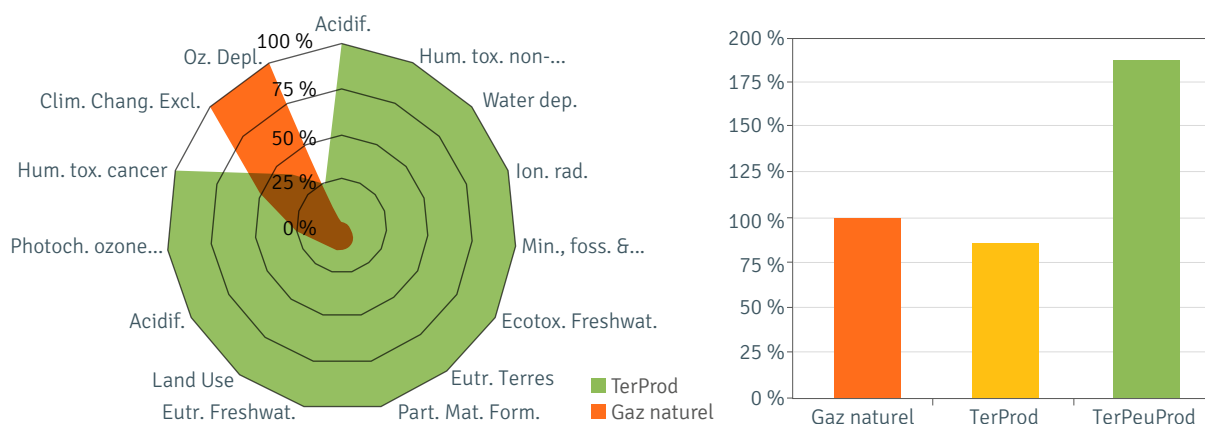
### Analyse en score unique pour l'usage du miscanthus en renforcement plastique à la place de la fibre de verre



### Analyse en classes d'impacts pour l'usage du miscanthus en renforcement plastique à la place de la fibre de verre



## Analyse en classes d'impacts (à gauche) et en score unique (à droite) pour l'usage du miscanthus en production de biométhane injecté dans les réseaux de gaz



s'il est cultivé sur des terres marginales et productives (14,5 t MS/ha). Les gains associés à la réduction du changement climatique (-93 %) et la réduction de la destruction de la couche d'ozone (-89 %) compensent les pertes sur les autres classes d'impact. Le miscanthus est donc intéressant si on privilégie ces impacts et à condition d'imposer la restriction de le cultiver sur des terres marginales et productives. Une écoconception de la filière qui viserait à réduire les émissions en chaufferie permettrait peut-être d'élargir les scénarios à l'avantage du miscanthus.

De la même manière, pour la méthanisation du miscanthus et la combustion du biométhane injecté dans le réseau de gaz, on

observe que l'analyse par classe d'impact n'est pas en faveur du miscanthus, sauf pour la culture sur terres productives (14,5 tMS/ha) marginales et à condition de se focaliser sur les problématiques de la destruction de la couche d'ozone (-75 %) et du changement climatique (-60 %). L'évaluation en score unique restreint cette conclusion en ajoutant que le miscanthus doit de plus faire l'objet d'un prétraitement à la chaux avant méthanisation afin d'augmenter son potentiel méthanogène, sans quoi le score global est en faveur du gaz naturel. Une écoconception visant à augmenter le rendement méthanogène et/ou à réduire les impacts de la purification/injection permettrait peut-être d'élargir le nombre de scénarios en faveur du miscanthus.

## Conclusion

Finalement, le miscanthus est particulièrement intéressant pour remplacer la fibre de verre dans les composites polymères puisqu'il permet une réduction des effets sur le changement climatique sans transférer d'impacts dans d'autres aspects des problématiques environnementales. Pour les filières chaufferie, bloc non porteur et

méthanisation, le miscanthus permet une réduction des effets sur le changement climatique mais génère des transferts d'impact. Il est donc intéressant dans le cas où on priorise le changement climatique sur les autres problématiques environnementales, et sous certaines conditions de production et de transformation. Enfin, pour la

filière bloc porteur, le miscanthus ne semble pas pouvoir apporter une valeur ajoutée environnementale, à moins d'effectuer une éco-conception approfondie de la filière visant à diminuer la quantité de ciment utilisée. Il est à noter que, du point de vue du changement climatique, le miscanthus valide son intérêt pour la quasi-totalité des filières.

# Un programme à poursuivre

## Les objectifs du programme BFF atteints

**Par rapport aux objectifs d'apports de connaissances - agronomiques, génétiques, techniques, économiques et environnementales – sur le miscanthus énoncés au commencement du programme BFF, nombre de ces objectifs ont été atteints. En effet, les aspects agronomiques clés de la culture que sont la gestion de l'azote et le mode d'implantation sont désormais mieux compris, et les études génétiques ont permis de faire un grand pas en avant dans la voie de la diversification de l'offre variétale. Des techniques industrielles ont été mises au point pour l'élaboration de nouveaux matériaux à partir de la biomasse, et les caractéristiques économiques et environnementales des filières ainsi ouvertes ont été étudiées en profondeur.**

Ces avancées permettent de fournir un socle de connaissances et de compétences aux acteurs de la filière du miscanthus, en particulier les producteurs et les industriels, et ainsi d'accompagner le développement de cette culture au sein de la bioéconomie.

Tous ces apports fournissent également des éclairages sur la question du changement d'affectation des sols pour la culture du miscanthus, et de son impact sur l'environnement. Du point de vue du bilan carbone, la culture du miscanthus permet le stockage de carbone dans le sol et en limite les émissions, tandis que la biomasse produite propose une alternative aux ressources fossiles pour de nombreuses applications. La plante confirme donc son intérêt pour cet enjeu, comme le montre l'Analyse de Cycle de Vie qui a été effectuée. Cet atout, en plus du fait que la plante favorise la biodiversité, permet au miscanthus d'être éligible aux SIE, aux ZNT et aux aires de protection de captage d'eau.

Ces surfaces représentent un potentiel de développement

largement suffisant pour l'avenir du miscanthus. Avec une croissance d'environ 13% par an au cours des 5 dernières années, qui totalise aujourd'hui 7 175 ha en France, et en fonction de la disponibilité en rhizomes, le développement devrait suivre un rythme comparable dans les années à venir. Ce développement est pensé pour assurer un avenir durable à cette filière et ne cause donc aucune inquiétude majeure concernant d'éventuels effets indirects de changements d'affectation des sols.

Le programme BFF a également permis la conception d'outils et de méthodes qui pourront être utilisés plus largement et participeront au rayonnement de ce programme. Notons par exemple :

- La nouvelle méthode de suivi de l'azote dans la plante ;
- Les nouveaux outils de génotypage et phénotypage ;
- L'étude des prétraitements de la biomasse ;
- L'outil d'aide à la décision.



# Une communauté d'intérêt créée autour du miscanthus

En huit années de collaboration, des liens forts ont été créés entre les différents partenaires publics et privés du programme BFF. L'ensemble des collaborateurs de ce programme forme désormais une communauté d'intérêt opérationnelle sur les filières miscanthus et sorgho. Cette communauté d'intérêt pourra s'avérer fort utile pour la poursuite du développement

de ces filières, et de la bioéconomie en général. Il apparaît donc essentiel de s'assurer que les liens créés au cours de ces huit années soient entretenus et préservés, la communauté d'intérêt pourra alors être remobilisée facilement pour de futurs projets.

## Encore des thèmes à approfondir

**Au-delà de répondre aux objectifs premiers qui lui étaient posés, le programme BFF a également permis de soulever de nouveaux points de questionnement qui mériteront d'être abordés dans des études ultérieures. Agronomiquement, il serait intéressant de poursuivre les études sur la faisabilité des modes d'implantation, sur le stockage de carbone dans le sol, sur la modélisation des flux d'azote de la plante, sur la gestion de l'azote en conditions limitantes et enfin, sur la compréhension des « pertes » d'azote détectées. Sur le plan génétique, les avancées réalisées devront être utilisées comme base de travail pour mener à l'élargissement concret de l'offre variétale, qui répondra aux enjeux techniques, agronomiques et environnementaux de cette culture.**

Comme on le soulève ici, la clôture du programme BFF ne doit pas aboutir à l'abandon de tous ses sujets d'étude, mais au contraire, à la poursuite des études sur les sujets qui méritent d'être davantage approfondis.

Premièrement, la volonté des acteurs de la filière est de donner la priorité à l'élargissement de l'offre variétale. Cet élargissement doit répondre à la demande de variétés adaptées aux nouveaux usages, à de nouvelles aires de cultures, et à un plus grand panel de conditions pédoclimatiques, et notamment en orientant la sélection vers des variétés plus résistantes au stress hydrique, de façon à prendre en compte le changement climatique. Enfin, il ne faut pas oublier que certains bio-agresseurs se manifestent, comme le fusarium qui touche les rhizomes au moment de leur implantation au champ et qui doit faire l'objet de recherches scientifiques. Ensuite, pour compléter et confirmer les ACV réalisées dans le cadre du programme BFF, il faudrait continuer à documenter les externalités positives de la culture du miscanthus pour l'environnement.

Une utilisation bien précise du miscanthus fait l'objet de beaucoup d'intérêts et de questionnements : l'implantation du miscanthus sur les aires d'alimentation et de protection de captages d'eau prioritaires et son utilisation comme litière animale. Débouché principal de cette culture, la litière souillée peut ensuite être valorisée en fertilisation des sols. L'évaluation du miscanthus ainsi implanté et utilisé permettrait de statuer sur l'impact de cet usage et de soutenir le développement de ce type de système de bioéconomie circulaire et locale. La protection des aires d'alimentation et de captage d'eau est une question brûlante pour de nombreuses collectivités locales sur tout le territoire français, qui sont en recherche de solutions éprouvées et démontrées scientifiquement. Concernant les débouchés en élevage, et tout particulièrement la complémentation des rations bovines pour la rumination, les pratiques ne sont pour le moment pas guidées par des études scientifiques. Il serait plus que nécessaire de fournir une base d'informations solides sur cette utilisation pour garantir la réalisation des bonnes pratiques.



## Conclusion et perspectives

**Au moment d'écrire la conclusion de cet ouvrage et de faire en quelque sorte un retour d'expériences sur le chemin parcouru par le projet BFF et les avancées scientifiques et techniques, il est essentiel de prendre en compte les évolutions majeures du contexte dans lequel s'inscrit d'une part la recherche sur le miscanthus et d'autre part les utilisations possibles de la biomasse récoltée. Tandis que les surfaces cultivées et les volumes produits ont rapidement augmenté, les usages se sont diversifiés.**

**I**l est une évidence claire que la façon dont on considère cette culture et cette production a fortement évolué entre 2012, année où le projet BFF a été lauréat du programme Biotech-Bioressources du PIA1 et aujourd'hui début 2021. Le changement de regard sur la culture et l'utilisation est visible. Il est le fruit des travaux de l'ensemble des équipes mobilisées, des discussions qui se développent au sein de la communauté scientifique et technique que des projets longs favorisent. Ce changement est aussi alimenté par l'évolution des réflexions dans le domaine de la bioéconomie.

En effet, depuis le lancement de BFF, les travaux et les dispositifs à l'échelle européenne et mondiale ont été légion. Il me semble particulièrement important de souligner les quatre points suivants.

**Je voudrais d'abord souligner le caractère fondateur de la prospective du SCAR** (Standing Committee for Agricultural Research sur la bioéconomie (Sustainable Agriculture, Forestry and Fisheries in the Bioeconomy - A

Challenge for Europe, édité par B. Kovacs et coordonné par E. Mathijs, publié en 2015<sup>1</sup>). Ce rapport est fondateur, car il pose les principes de la bioéconomie, en évitant de la limiter à la seule production de produits à usages non-alimentaires et propose une articulation des usages alimentaires et non-alimentaires en interrogeant les possibilités de valorisation en cascade de la biomasse agricole et le développement de la circularité. L'analyse prospective souligne d'ailleurs rapidement les questions de concurrence entre les usages, les incidences sur l'usage des sols et l'importance de prendre en compte la fertilité et les potentiels de production des milieux.

**La question sur l'usage des terres lié au développement de la bioéconomie a conduit au développement de nombreux travaux sur les changements d'usage des sols, changements directs et indirects, induits par l'émergence des usages non-alimentaires.** En France, cette question avait fait l'objet de nombreuses discussions lors des premiers développements de production à destination énergétique.

1. [https://scar-europe.org/images/SCAR-Documents/4th\\_SCAR\\_Foresight\\_Exercise.pdf](https://scar-europe.org/images/SCAR-Documents/4th_SCAR_Foresight_Exercise.pdf)

2. T. Searchinger, R. Edwards, D. Mulligan, R. Heimlich, R. Plevin, 2015. Do biofuel policies seek to cut emissions by cutting food? *Science* 27, 347, 1420-1422  
DOI: 10.1126/science.1261221



Au niveau mondial, parmi les nombreux écrits sur le sujet, les travaux de T. Searchinger ont posé de façon claire les termes du débat, notamment dans Science en 2015<sup>2</sup>. Ils soulignent l'importance dans les démarches de modélisation de prendre en compte tous les changements induits dans l'usage des sols, y compris les changements d'usage indirects, liés par exemple à des changements induits dans d'autres régions. Ceci est particulièrement important quand il s'agit d'estimer des bilans en termes d'émission de gaz à effet de serre. Ces approches sont maintenant généralisées et utilisées dans tous les secteurs de production, comme par exemple l'élevage. Cette question sur l'usage des sols peut par ailleurs être étendue à la vision sous-jacente aux différents modèles de développement et notamment à l'hypothèse selon laquelle il vaut mieux utiliser durablement l'ensemble des terres agricoles disponibles (land-sharing), ce qui est l'hypothèse sous-jacente au Green Deal de la Commission Européenne ou à la transition agroécologique. A l'opposé, il y a le land-sparing qui consiste à retirer certaines surfaces de la production agricole pour en faire des lieux de préservation environnementale. Même si ce débat peut sembler éloigné de la production du miscanthus, il ne l'est pas car il deviendra prégnant au moment de réfléchir la répartition géographique de cette production dans ses usages nouveaux.

### **Les réflexions sur la bioéconomie et les usages non-alimentaires ont connu de grands développements en Europe et se sont traduits dans des dispositifs très structurants.**

Le plus significatif d'entre eux est sans aucun doute le Bio-Based Industries – Joint Undertaking<sup>3</sup>, où le consortium des industries (BIC – Bio Industries Consortium) et la Commission Européenne ont co-investi fortement dans des projets de recherche, des démonstrateurs et des développements industriels. Parmi les projets soutenus, un seul intègre le Miscanthus, à savoir le projet GRACE (GRowing Advanced industrial Crops on marginal lands for bioRefineries) qui réunit Allemagne, Autriche, Croatie, France, Italie, Pays-Bas, Royaume-Uni. L'ensemble des projets financés par la BBI-JU a permis l'émergence d'un nombre considérable d'entreprises et d'initiatives dans le domaine et la consolidation de nombre de nouvelles chaînes de valeur, bien au-delà de celles des bioénergies

initialement envisagées. Et ceci est un peu à l'image de ce que le projet BFF a permis de mettre en avant.

**Enfin, certains pays ont consolidé le développement de la bioéconomie dans des dispositifs universitaires tournés vers l'innovation.** La France a mis en place de dispositifs comme TWB (Toulouse White Biotechnology). En Irlande, BiOrbic (Bioeconomy SFI Research Centre) est un centre national de recherche en bioéconomie créé pour promouvoir et développer la bioéconomie de l'Irlande par la recherche et l'innovation. Ces dispositifs s'inscrivent dans les feuilles de route pour la bioéconomie préparées par les différents pays de l'Union Européenne.

On peut dès lors resituer les avancées en recherche et en innovation obtenues sur le Miscanthus dans le cadre du projet BFF dans ce cadre d'analyse de la bioéconomie et des extensions mentionnées ci-dessus.

Le Miscanthus, et les différents usages de la biomasse produites constituent une réponse aux besoins en substituts des produits basés sur le carbone fossile, dont l'utilisation est une source des impacts et dérèglements environnementaux que nous connaissons et qu'il s'agit aujourd'hui de corriger. Au-delà de cette substitution, les recherches de BFF se sont aussi traduites en conception de produits nouveaux, comme par exemple les usages en production de béton, en paillage de sols pour limiter ou éviter les usages d'herbicides, ou en litière pour les animaux.

Au travers de ces usages nouveaux, et notamment les deux derniers cités ci-dessus, c'est bien la notion de circularité qui peut être mobilisée, composante majeure de la durabilité, puisqu'elle est à la base de l'atténuation du changement climatique en favorisant la restitution de C et son stockage dans les sols agricoles.

Pour mieux consolider le rôle du Miscanthus et plus largement des nouvelles espèces destinées à la production de biomasse non-alimentaire, il est nécessaire d'analyser la conduite de ces cultures, leur capacité productive et la possibilité de création de valeur selon la relation entre Production et performance économique d'une part et impacts environnementaux d'autre part, telle que nous la proposons Green et al (2005)<sup>4</sup>. En introduisant une culture nouvelle à faibles intrants (voir ci-dessous), susceptible de générer une diversification, d'héberger une flore et une faune nouvelle, en générant une hétérogénéité des paysages, la culture de Miscanthus est de nature à contribuer à une relation convexe entre production et biodiversité des ter-

3. <https://www.bbi-europe.eu>

4. Green, RE; Cornell, SJ; Scharlemann, JPW; et al., 2005. Farming and the fate of wild nature. Science 307, 5709, 550-555.



5. Geels F.W., 2002. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research policy*, 31, 1257-1274

6. W. Brian Arthur, 1994. *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*. Series: Economics, Cognition, And Society. University of Michigan Press Doi.org/10.3998/mpub.10029

7. Turnheim B., Asquith M., Geels F., 2020. Making sustainability transitions research policy-relevant: challenges at the science-policy interface. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 34, 116-120 <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.12.009>

ritoires. Ceci interroge par la suite la densité optimale de cultures de Miscanthus dans un territoire agricole et leur localisation.

L'ouverture de marchés nouveaux, que le projet BFF a permis de nourrir et de documenter, conduit à une interrogation d'une part sur les objectifs de sélection et d'autre part sur de nouveaux partenariats à construire.

Les travaux conduits au long de BFF ont aussi permis de mieux maîtriser cette culture et ses itinéraires. Consolidés par les résultats de projets parallèles, ils ont montré à quel point la culture de Miscanthus contribuait à la réduction d'usages des phytosanitaires dans les rotations où cette culture est introduite. Une fiche-action CEPP sur le Miscanthus vient d'ailleurs d'être publiée en ce sens.

L'analyse croisée de l'évolution du contexte et des travaux de BFF montre à quel point, pour des cultures et des filières émergentes comme le Miscanthus, l'agilité est essentielle. Les travaux de réflexion prospective sont majeurs pour imaginer les développements possibles, les futurs désirables. Pour réussir cela, la co-construction est une démarche riche, mobilisant l'ensemble des acteurs des chaînes de valeurs, mais aussi les bénéficiaires directs et indirects (les citoyens). Pour pouvoir réussir cela, il

est indispensable de créer un espace commun comme l'évoquent AF Schmid et M. Mambrini-Doudet en 2019 dans leur ouvrage 'Épistémologie générique – Manuel pour les sciences futures'.

Pour ce faire, France Miscanthus constitue un espace privilégié à la fois pour rassembler l'ensemble des entreprises, élaborer des stratégies de développement des filières, mais aussi les partager avec un large public.

Ceci sera rendu possible et pertinent grâce aux avancées scientifiques importantes réalisées au long du projet BFF. Comme ces avancées sont décrites avec pédagogie au long de l'ouvrage, je ne vais pas y revenir en détail, mais uniquement me permettre d'en souligner quelques-unes. La première concerne la génétique et les possibilités offertes par la génétique translationnelle. Le lien au maïs en particulier offre une base pour des progrès rapides dans la connaissance des génomes et de la diversité génétique disponibles pour la sélection du Miscanthus. Le second point à souligner concerne les progrès en matière de méthodes de sélection pour prendre en compte les particularités génétiques au sein du genre Miscanthus, la structure des génomes mais aussi la diversité des modes de multiplication puisque multiplication sexuée et multiplication végétative co-existent dans les schémas de sélection et de production.

Enfin, la connaissance sur les propriétés physico-chimiques des tissus végétaux est à la base de l'extension des champs possibles des utilisations du Miscanthus.

Ceci offre dès lors la possibilité de construire des scénarios de développement de la culture, pour imaginer et évaluer les apports du miscanthus à la durabilité des systèmes de production et des produits transformés. Le colloque final portait tous les ingrédients de la co-construction et l'élaboration de scénarios de développement. Une question centrale dans la question des scénarios concerne leur évaluation. Elle ne peut être simplement économique car la durabilité est bien plus complexe. L'analyse de cycle de vie (ACV) est une option intéressante en raison de la diversité des usages possibles, dont certains avec des durées de vie longues des produits, mais elle pose la question du périmètre.

Comme on le voit le travail conduit au long de BFF a produit toutes les briques pour le développement d'une filière solide. Les cadres théoriques des sciences de gestion permettent de réfléchir aux conditions de son développement. On n'est pas ici dans le cadre d'une filière confrontée à une situation de verrouillage (lock-in) (voir les travaux de Geels, 2002<sup>5</sup>)



mais plutôt dans une configuration où le Miscanthus et ses produits sont la ressource en niches et où il convient d'identifier les conditions nécessaires à son insertion dans un régime socio-technique stable.

Les composantes pour une chaîne de valeur existent. L'amont de la filière existe avec la fourniture de matériels biologiques de reproduction, avec toutefois très peu, voire trop peu, d'acteurs. En effet, il n'y a pas à ce jour d'innovation variétale organisée au sein d'entreprises. Dès lors la question se pose de savoir si un relais pourrait être pris par une création variétale 'collective', impliquant la recherche publique. Cette question aura d'autant plus de sens que la culture et la transformation du Miscanthus s'inséreront dans la transition agroécologique des systèmes agricoles et alimentaires.

Par ailleurs comme cette culture consomme très peu d'intrants, il y a donc très peu d'acteurs mobilisés, susceptibles d'être des relais de connaissances et de conseil.

L'aval de la filière reste largement à élaborer. Comme évoqué ci-dessus, plusieurs options d'utilisation existent, qu'il convient d'articuler pour éviter la concurrence et favoriser les synergies. Ceci offrira alors plus d'options de développement et plus de marchés. Il y a vraisemblablement un défi important pour la logistique. En effet, avant traitement, la biomasse constitue un matériau peu pondéreux, qu'il conviendra de relever en fonction de la répartition géographique de la production. On peut dès lors se retrouver confronté à un paradoxe, à savoir que les services environnementaux rendus par le Miscanthus seront vraisemblablement plus forts si les cultures sont largement réparties sur le territoire pour favoriser l'hétérogénéité des paysages, mais que des économies d'échelle pourraient être obtenues au niveau de la transformation si des investissements sont importants pour créer de la valeur ajoutée par transformation de cette matière première ligno-cellulosique, comme via la production de biocarburants.

Un déficit majeur réside dans la construction de relais sur le terrain. L'organisation du conseil est un élément essentiel

au développement de cette filière, puisqu'il est seul capable de favoriser des rendements croissants d'adoption de cette culture, comme le propose B. Arthur (1994<sup>6</sup>). Ceci doit être une priorité pour demain, car il est indispensable de prendre en compte les freins à l'adoption. Il faut par exemple s'interroger sur la place qu'il convient de donner au Miscanthus dans la formation des jeunes apprenants et dans l'apport d'informations aux conseillers. Un relais doit sans doute être pris par les acteurs économiques pour un accompagnement des agriculteurs, ce qui pourrait se faire au travers de démarches contractuelles.

**En poursuivant la déclinaison du cadre théorique de Geels à la situation du Miscanthus, il apparaît également que la question du paysage socio-technique optimal doit être posée. Ceci concerne en particulier la question des politiques publiques et de la réglementation. En effet, le Miscanthus se positionne en tant que nouveauté dans un régime socio-technique dominant dont le contexte (paysage socio-technique) lui est peu favorable dans le domaine des agrocarburants, ou neutre dans le domaine de la construction. La situation est sans doute meilleure quand il s'agit de paillage ou de litière, mais les valeurs ajoutées y sont également plus faibles. Il convient d'instruire ces questions des politiques publiques et de la réglementation qui permettraient de maximiser les services économiques et environnementaux de cette production émergente. Les travaux de Turnheim et al (20207) proposent un cadre pour utiliser des acquis de la recherche, tels que ceux du projet BFF comme appui à l'élaboration de politiques publiques. L'activité de France Miscanthus s'inscrit dans cette perspective.**

**Christian Huyghe**

**Directeur Scientifique Agriculture chez Inrae - Institut national de la recherche agronomique (France)**

# ANNEXES

## Liste des publications

### Publications

- C.H. HAIGLER, M.J. GRIMSON, J. GERVAIS, N. LE MOIGNE, H. HOFTE, B. MONASSE et P. NAVARD «Molecular modelling and imaging of initial stages of cellulose fibril assembly: evidence for a disordered intermediate stage», *PlosOne*, 9(4) e93981
- Valérie Méchin, Aurélie Laluc, Frédéric Legée, Laurent Cézard, Dominique Denoue, Yves Barrière, and Catherine Lapierre, Impact of the Brown-Midrib bm5 Mutation on Maize Lignins, *J. Agric. Food Chem.*, Article ASAP, American Chemical Society May 13, 2014. DOI : 10.1021/jf5019998
- Arnout S., A. Obeuf, L. Béthencourt, M. Brancourt-Hulmel. 2015. Biomass of miscanthus clones for 2nd-generation bioethanol production: Relationships between biomass production, biomass production components, and biomass composition. *Industrial crops and products*. 63:316-328
- Arnout S., M. Brancourt-Hulmel. Early prediction of the miscanthus biomass production and composition based on the first six years of cultivation. *Crop sci* 55 :1104-1116
- L. VO et P. NAVARD, «Treatments of plant biomass for cementitious building materials – A review», *Construction and Building Materials*, 121, 161–176 (2016)
- E. BOIX, F. GEORGI et P. NAVARD, «Influence of alkali and Si-based treatments on the physical and chemical characteristics of miscanthus stem fragments», *Industrial Crops and Products*, 91, 6–14 (2016)
- J. GIRONES, L VO, S. ARNOULT, M. BRANCOURT-HULMEL et P. NAVARD, «Miscanthus stem fragment - reinforced polypropylene composites: development of an optimized preparation procedure at small scale and its validation for differentiating genotypes», *Polymer Testing*, 55, 166–172 (2016) DOI: 10.1016/j.polymeresting.2016.08.023
- Thomas, H.L., Pot, D., Latrille, E., Trouche, G., Bonnal, L., Bastianelli, D., Carrère, H., 2017. Sorghum Biomethane Potential Varies with the Genotype and the Cultivation Site. *Waste Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0099-3>
- L. CHUPIN, D. de RIEDER, S. JAFFUEL, A CLEMENT VIDAL, A. SOUTIRAS, E. GINEAU, G. MOUILLE, S. ARNOULT, M. BRANCOURT-HULMEL, C. LAPIERRE, D. POT, L. VINCENT, A. MIJA et P. NAVARD «Influence of the radial stem composition on the thermal behavior of miscanthus and sorghum genotypes for composite end-use», *Carbohydrate Polymers*, 167, 12-19 (2017)
- J. GIRONES, J-M HAUDIN, L. FREIRE et P. NAVARD «Crystallization of polypropylene in the presence of biomass-based fillers of different compositions», *Polymer* 127, 220-231 (2017)
- L. CHUPIN, S. ARNOULT, M. BRANCOURT-HULMEL, C. LAPIERRE, E. GINEAU, et P. NAVARD «Polyethylene composites made from below-ground miscanthus biomass», *Industrial Crops & Products*, 109, 523–528 (2017)
- J. GIRONES, L. VO, E. di GIUSEPPE and P. NAVARD «Natural filler-reinforced composites: comparison of the reinforcing potential between technical fibers, stem fragments and industrial by-products», *Cellulose Chemistry and Technology*. 51, 839-855 (2017)
- Perrier L., Rouan L., Jaffuel S., Clément-Vidal A., Roques S., Soutiras A., Baptiste C., Bastianelli D., Fabre D., Dubois C., Pot D., Luquet D. 2017. Plasticity of sorghum stem biomass accumulation in response to water deficit: A multiscale analysis from internode tissue to plant level. *Frontiers in Plant Science*, 8 (1516) : 14 p. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01516>
- Legland D., El Hage, F., Méchin, V., Reymond, M., 2017. Histological quantification of maize stem sections from fasga stained images. *Plant Methods*, 13, 84.
- El Hage F., Legland D., Jacquemot MP., Griveau Y., Borrega N., Dubreucq B., Méchin V., Reymond M., 2017. Maize cell wall degradability and its response to water availability : strong impacts of biochemical and histological traits. *JAFc*, submitted.
- Vo, L., Girones, J., Beloli, C., Chupin, L., Di Giuseppe, E., Clément Vidal, A., Soutiras, A., Pot, D., Bastianelli, D., Bonnal, L., Navard, P., 2017. Processing and properties of sorghum stem fragment-polyethylene composites - *ScienceDirect*. *Ind. Crops Prod.* 107, 386–398.
- Brancourt-Hulmel M., Ferchaud F., Hofte H., Bastien J.-C., Pilate G. 2016. Intérêt des ressources agricoles et forestières pour la bioénergie. *Innovations Agronomiques* 54, 1-12.
- Thomas HL, Seira J, Escudié R, Carrère H Lime pretreatment of miscanthus: impact on BMP and batch dry co-digestion with manure, *Molecules* (2018) 23, 1608; doi:10.3390/molecules23071608
- Thomas H.L., Arnould-Carrier S., Brancourt-Humal M., Carrere H, Methane production variability according to miscanthus genotype and alkaline pretreatments at high solid content» *BioEnergy Research*, 10.1007/s12155-018-9957-5
- El-Hage F, Legland D, Borrega N, Jacquemot MP, Griveau Y, Coursol S, Méchin V, Reymond M (2018). Tissues lignification, cell wall p-coumaroylation and degradability of maize stems depend on water status. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 66 : 4800-4808 IF5 = 3.504.
- Méchin V, Reymond M, Legland D, El Hage F, Schaefer E, Baldy A, Griveau Y, Jacquemot M-P, Coursol S, Devaux M-F, Rogniaux H, Guillon F (2018). L'imagerie pour étudier la répartition des tissus et améliorer la qualité de la biomasse - Exemple du maïs, une biomasse consommée de façon bioraffineries. *Chimie Verte et IAA*. Editeur Baumberger S. Edition Lavoisier.
- Laetitia Virloouv L, Elhage F, Coursol S, Griveau Y, Jacquemot M-P, Méchin V, Baldy A, Legay S, Reymond M. (2018) Identification de marqueurs génétiques impliqués dans le rendement et la composition de la biomasse lignocellulosique. *Chimie Verte et IAA*. Editeur Baumberger S. Edition Lavoisier.
- Thomas H.L., Arnould-Carrier S., Brancourt-Humal M., Carrere H, Methane production variability according to miscanthus genotype and alkaline pretreatments at high solid content” *BioEnergy Research*, 12, (2019), 325-33, DOI 10.1007/s12155-018-9957-5
- Thomas HL, Pot D, Latrille E, Trouche D, Bonnal L, Bastianelli D., Carrere H, Sorghum biomethane potential varies with the genotype and the cultivation site, *Waste and Biomass valorization*, 10 (2019) : 783-788 DOI 10.1007/s12649-017-0099-3
- Virloouv L, El Hage F, Griveau Y, Jacquemot MP, Gineau E, Baldy A, Legay S, Horlow C, Combes V, Bauland C, Palafre C, Falque M, Moreau L, Coursol S, Méchin V, Reymond M (2019) Water Deficit-Responsive QTLs for Cell Wall Degradability and Composition in Maize at Silage Stage. *Frontiers in Plant Science*, 10: 488.

Zhang Y, Legland D, El Hage F, Devaux M-F, Guillon F, Reymond M, et al. (2019) Changes in cell walls lignification, feruloylation and p-coumaroylation throughout maize internode development. *PLoS ONE* 14(7): e0219923 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219923>

Cuello C, Baldy A, Brunaud V, Joets J, Delannoy E, Jacquemot MP, Botran L, Griveau Y, Guichard C, Soubigou-Taconnat L, Martin-Magniette ML, Leroy P, Méchin V, Reymond M, Coursol S (2019) A systems biology approach uncovers a gene co-expression network associated with cell wall degradability in maize. *PLoS One*, 14: e0227011.

Luquet, D., L. Perrier, A. Clément-Vidal, S. Jaffuel, J.-L. Verdeil, S. Roques, A. Soutiras, C. Baptiste, D. Fabre, D. Bastianelli, L. Bonnal, P. Sartre, L. Rouan and D. Pot 2018 «Genotypic covariations of traits underlying sorghum stem biomass production and quality and their regulations by water availability: Insight from studies at organ and tissue levels.» *GCB Bioenergy* 0(0): 1-19.

Ouattara M.S, Laurent A, Ferchaud F, Berthou M, Borujerdi E, Butier A, Malvoisin P, Romelot D, Loyce C, 2020b. Evolution of soil carbon stocks under *Miscanthus x giganteus* and *Miscanthus sinensis* across contrasting environmental conditions. *Global Change Biology Bioenergy*. <http://dx.doi.org/10.1111/gcbb.12760>.

L. CHUPIN, L. SOCCALINGAME, D. DE RIDDER, E. GINEAU, G. MOUILLE, S. ARNOULT, M. BRANCOURT-HULMEL, C. LAPIERRE, L. VINCENT, A. MIJA, S. CORN, N. LE MOIGNE et P. NAVARD Thermal and dynamic mechanical characterization of miscanthus stem fragments: effects of genotypes, positions along the stem and their relation with biochemical and structural characteristics, *Industrial Crops & Products* 156 (2020) 112863 <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112863>

Larue, F.; Fumey, D.; Rouan, L.; Soulié, J. C.; Roques, S.; Beurier, G. ; Luquet, D. (2019). Modelling tiller growth and mortality as a sink-driven process using Ecomeristem: implications for biomass sorghum ideotyping. *Annals of Botany*, 124(4), 675-690

Claire BRAMI, Christopher Nathan LOWE, Safya MENASSERI, Thierry JACQUET, Guénola PERES. 2020. Multi-parameter assessment of soil quality under *Miscanthus x giganteus* crop at marginal sites in Île-de-France. *Biomass & Bioenergy*. 142,105793. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105793>

Ouattara M.S, Laurent A, Barbu C, Berthou M, Borujerdi E, Butier A, Malvoisin P, Romelot D, Loyce C, 2020a. Effects of several establishment modes of miscanthus x giganteus and *miscanthus sinensis* on yields and yield trends. *Global Change Biology Bioenergy*. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12692>.

Céline Chauvergne, Laurent Bonnal, Denis Bastianelli, Hélène Carrère, Yves Griveau, Marie-Pierre Jacquemot , Matthieu Reymond, Valérie Méchin , Virginie Rossard, Éric Latrielle, (2020) Dataset of organic sample near infrared spectra acquired on different spectrometers. Data in Brief, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106264> <https://hal.inrae.fr/hal-02934745>

L. T. T. VO, J. GIRONES, M-P. JACQUEMOT, F. LEGEE, L. CEZARD, C. LAPIERRE, F. EL HAGE, V. MECHEIN, M. REYMOND et P. NAVARD Correlations between genotype biochemical characteristics and mechanical properties of maize stem - polyethylene composites, *Industrial Crops & Products* 143, 111925 (2020) <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111925>

E. DI GIUSEPPE, J. GIRONES, L.T.T. VO, E. GINEAU, C. LAPIERRE, M. BRANCOURT-HULMEL, S. ARNOULT-CARRIER et P. NAVARD Polysaccharides and phenolics of miscanthus below-ground cell walls and their influence on polyethylene composites, *Carbohydrate Polymers*, 251, 117086 (2021) <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117086>

Brami, C., Pérès, G., Menasseri, S., Byers-Woods, J.D., Jacquet, T., Lowe, C. N. (in press) Effect of *Miscanthus x giganteus* ash on survival, biomass, reproduction and avoidance behaviour of the endogeic earthworm *Aporrectodea caliginosa*. *Ecotoxicology*.

---

## Publications en cours

S. A. E. BOYER, J-M. HAUDIN, V. SONG, V. BOURASSIER, P. NAVARD et C. BARRON Transcrystallinity in maize tissues/polypropylene composites: first focus of the heterogeneous nucleation and growth stages versus tissue type, *Polymer Crystallization*, accepté

M. BRANCOURT-HULMEL, R. RAVERDY, J. GIRONES, E. MIGNOT, Y. GRIVEAUX et P. NAVARD Variability of stem solidness among miscanthus genotypes and its role on mechanical properties of polypropylene composites, *Industrial Crops & Products*, en cours de révision

Loan T. T. Vo, Jordi Girones, Calypso Beloli, Sylvie Jaffuel, Jean-Luc Verdeil, Anne Clément Vidal, Armelle Soutiras, Pot David, Denis Bastianelli, Laurent Bonnal and Patrick Navard. Correlations between genotype biochemical characteristics and mechanical properties of sorghum-polyethylene composites. Manuscript to submit to *Industrial Crops and Products*

Maryse Brancourt-Hulmel, Raphaël Raverdy, Jordi Girones, Emilie Mignot, Yves Griveaux, Patrick Navard. Mechanical properties of miscanthus composites vary according to stem anatomy and composition. Manuscript submitted to *Global Change of Bioenergy*

Lata Soccalingame, Lucie Chupin, Nicolas Le Moigne, Stéphane Corn, David Pot, Patrick Navard. Evidence of a genotypic effect on the thermal and mechanical properties of sorghum fragments and relation with biochemical and structural characterization/features. To be submitted to *Frontiers in Plant Science*

Hélène Laurence Thomas, David Pot, Laurent Bonnal, Gilles Trouche, Denis Bastianelli, Christelle Baptiste, Jean-Luc, Verdeil, Sylvie Jaffuel, Céline Chauvergne, Hélène Carrère.. Designing sorghum methane production ideotypes: insights from stem biochemistry and histology analyses. To be submitted to *Industrial Crops and Products*

David Pot, Hélène Laurence Thomas, Patrice Jeanson, Joël Alcouffe, Laurent Bonnal, Denis Bastianelli, Céline Chauvergne, Hélène Carrère. Impacts of harvest stage on biomethane production in sorghum. To be submitted to *Biomass Energy*.

Brancourt-Hulmel M., S. Arnoult, L. Cézard, F. El Hage, E. Gineau, J. Girones, Y. Griveau, M.-P. Jacquemont, S. Jaffuel, E. Mignot, G. Mouille, C. Lapierre, F. Legée, V. Méchin, P. Navard, L. Vo, M. Reymond. A comparative study of maize and miscanthus regarding cell-wall composition and stem anatomy for conversion into bioethanol and polymer composites. Under review. Special issue of *Bioenergy Research* for BFF results.:

Raverdy R., E. Mignot, S. Arnoult, G. Bodineau, Y. Griveau, M. Brancourt-Hulmel. Identification of QTLs related to genotype x climate interaction effects in a *Miscanthus sinensis* population. In preparation for Special issue of *Bioenergy Research* for BFF results.

Pot et al : Genome wide association mapping of biomass production and quality relation traits based on two sorghum panels. To submit to

Pot et al. Development of a Back cross Nested association mapping for biomass sorghum: insights regarding the genetic determinism of biomass production and quality related traits. To submit to

Berger A Calatayud C; Richaud F; Rios M; Pot D; Terrier N.. Rapid and efficient transient co-transfection protocol in sorghum protoplasts. To submit to Frontiers in Plant Science section Methods

Fadi El Hage, Laetitia Virlovet, Paul-Louis Lopez-Marnet, Yves Griveau, Marie-Pierre Jacquemot, Sylvie Coursol, Valérie Méchin and Matthieu Reymond. Responses of maize internode to water deficit are different at the biochemical and histological levels. to Submit to Frontiers in Plant Science.

R. Raverdy, E. Mignot, S. Arnoult, L. Fingar, G. Bodineau, Y. Griveau, S. Volant, M. Brancourt-Hulmel. Estimation of genetic parameters of biomass production and composition traits in *Miscanthus sinensis* using a staggered-start design. In preparation for Special issue of Bioenergy Research for BFF results.

Raverdy R., K. Lourgant, E. Mignot, S. Arnoult, G. Bodineau, C.H. Taniguti, Y. Griveau, M. Brancourt-Hulmel. Linkage mapping of biomass production and composition traits in a *Miscanthus sinensis* population. In preparation for Special issue of Bioenergy Research for BFF results.

Hou W., R. Raverdy, E. Mignot, S. Arnoult, C. Giauffret, M. Brancourt-Hulmel. Estimating the genetic parameters of flowering-time related traits in a *Miscanthus sinensis* population tested with a staggered-start design. Submitted to Special issue of Bioenergy Research for BFF results.

Virlovet Laetitia, Terrier Nancy, Coursol Sylvie, Dufayard Jean-François, Griveau Yves, Jacquemot Marie-Pierre, Nicolas Stéphane, Giauffret Catherine, Reymond Matthieu\*, Pot David\*. Combined co-expression network and GWAS analysis reveal a genetic network for the secondary cell wall in two grass species. To submit to Plant Biotechnology Journal

Hou W., R. Raverdy, K. Lourgant, E. Mignot, S. Arnoult, C. Giauffret, M. Brancourt-Hulmel. QTL detection for flowering-time related traits in *Miscanthus sinensis* using a staggered-start design. In preparation for Special issue of Bioenergy Research for BFF results.

Hou W., K. Lourgant, E. Mignot, S. Arnoult, M. Brancourt-Hulmel, C. Giauffret. RNA sequencing to explore the genes underlying floral transition in *Miscanthus sinensis*. In preparation for Special issue of Bioenergy Research for BFF results.

Pot D, Maurin G, Trouche G, Jeanson P, Alcouffe, Calatayud C, Rami J-F. Development of a Back cross Nested association mapping for biomass sorghum: insights regarding the genetic determinism of biomass production and quality related traits. To submit to Theoretical and Applied Genetics

Devaud et al. A multiparental mapping population of the elite female and male pools targeting biomass production and composition. To submit to

Devaud Q, Alcouffe J, Rami J-F, Jeanson P, Roldan D, Valente F, Trouche G., Pot D. A multiparental mapping population of the elite female and male pools targeting biomass production and composition. To submit to G3

Gilles Trouche, Tuong Vi-Cao, Jeanson Patrice, Joël Alcouffe, Quentin Devaud, De Bellis Fabien, Aline Rocher, David Pot. Combining abilities and heterosis for biomass quality related traits and their relationships with biomass yield components. To submit to Field Crop Research-

Brancourt-Hulmel M., S. Arnoult, L. Cézard, F. El Hage, E. Gineau, J. Girones, Y. Griveau, M.-P. Jacquemont, S. Jaffuel, E. Mignot, G. Mouille, C. Lapiere, F. Legée, V. Méchin, P. Navard, L. Vo, M. Reymond. A comparative study of maize and miscanthus regarding cell-wall composition and stem anatomy for conversion into bioethanol and polymer composites. Under review. Special issue of Bioenergy Research for BFF results.

Brancourt-Hulmel M., R. Raverdy, J. Girones, E. Mignot, Y. Griveaux, P. Navard. Mechanical properties of miscanthus composites vary according to stem anatomy and composition. Manuscript submitted to Global Change of Bioenergy.

Raverdy R., E. Mignot, S. Arnoult, L. Fingar, G. Bodineau, Y. Griveau, S. Volant, M. Brancourt-Hulmel. Estimation of genetic parameters of biomass production and composition traits in *Miscanthus sinensis* using a staggered-start design. In preparation. Special issue of Bioenergy Research for BFF results.

Hou W., R. Raverdy, E. Mignot, S. Arnoult, C. Giauffret, M. Brancourt-Hulmel. Estimating the genetic parameters of flowering-time related traits in a *Miscanthus sinensis* population tested with a staggered-start design. In preparation. Special issue of Bioenergy Research for BFF results.

Influence of parameter estimation step on the contribution of crop modelling to the genomic prediction of complex traits: case study of sorghum biomass growth. Florian Larue, Grégory Beurier, David Pot, Jean-François Rami, Eric Gozé, Lauriane Rouan, Delphine Luquet. Submitted to In Silico Plant.

Claire BRAMI, Guénola PERES, Safya MENAS-SERI-AUBRY, Jane Darcy BYERS-WOODS, Thierry JACQUET, Christopher Nathan LOWE. In press. Effect of *Miscanthus* × *giganteus* ash on survival, biomass, reproduction and avoidance behaviour of the endogeic earthworm *Aporrectodea caliginosa*. Ecotoxicology.

Hélène Laurence Thomas, Helga Felix P. Nolasco, Hélène Carrère, Marc Lartaud, Tuong-Vi Cao, Christelle Baptiste, Jean-Luc Verdeil, Alkaline pretreatments for sorghum and miscanthus anaerobic digestion: impacts at cell wall and tissue scales.

Hélène Laurence Thomas, David Pot., Laurent Bonnal, Gilles Trouche, Denis Bastianelli, Christelle Baptiste, Jean-Luc, Verdeil, Sylvie Jaffuel, Céline Chauvergne, Hélène Carrère Designing sorghum methane production ideotypes: insights from stem biochemistry and histology analyses.

Colin Jury Jordi Girones, Loan T. T. Vo, Erika Di Giuseppe, Grégory Mouille, Stéphanie Arnoult, Maryse Hulmel et Patrick Navard Compressive strength and Environmental performances and mechanical properties of miscanthus-reinforced concretes prepared in one step.

**France Miscanthus**  
29 rue du Général Foy  
75008 PARIS  
contact@france-miscanthus.org

**Alain Jeanroy**  
Président France Miscanthus  
ajeanroy@france-miscanthus.org

Rédaction : **Louise Mariani**  
Chargée de mission  
lmariani@france-miscanthus.org

Mise en page : **Audrey Zeller**  
zeller.audrey@orange.fr



[contact@france-miscanthus.org](mailto:contact@france-miscanthus.org)