



## Biomass For the Future : filière miscanthus

### OBJET

Ce document reporte les principaux résultats de l'analyse du cycle de vie menée par Inovertis-A3i dans le cadre du projet Biomass For the Future (BFF), financé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du programme d'investissements d'avenir (11-BTBR-0006).

### CONTEXE

Dans un contexte de lutte contre le réchauffement climatique, de recentralisation de la production industrielle en France et de diversification de l'activité agricole, la culture de biomasse est une opportunité qui se développe largement.

Cependant, depuis le développement des agrocarburants de premières générations, nous savons aujourd'hui que la biomasse n'est pas systématiquement synonyme de meilleures performances environnementales aussi bien en ce qui concerne le changement climatique que d'autres catégories d'impact (p.ex., eutrophisation de l'eau, occupation du sol).

Le miscanthus est une plante lignocellulosique pérenne qui demande un faible investissement pour l'agriculteur tout en réduisant, voire en évitant totalement, l'utilisation de pesticides et d'engrais et, dans certain cas, en permettant un stockage de carbone dans le sol.

Outre les avantages économiques attendus, ce type de plante permet la mise en culture de terres qui ne sont pas en compétition avec l'alimentaire, comme les zones de captage, les terres polluées, les terres

non-exploitées pour des raisons pratiques ou économiques. Le miscanthus permet ainsi de s'affranchir des conséquences indirectes liées à un changement d'affectation du sol (CASI).

Le projet Biomass For the Future (BFF), financé par l'Agence Nationale de la Recherche (11-BTBR-0006), avait pour objectif d'optimiser la production de miscanthus et de sorgho tout en promouvant de nouvelles filières de production d'énergie (combustion, méthanisation) et de nouvelles filières de matériaux composites (composites pour le bâtiment et l'automobile).

BFF s'est appuyé sur des approches génétiques pour accélérer la création de nouvelles variétés pour ces espèces avec une attention particulière portée aux caractères liés au rendement, au développement de systèmes de culture durables ainsi qu'à une empreinte écologique réduite et à l'adéquation entre la biomasse produite et les processus industriels qui la valorisent.

Les performances environnementales des filières ont été calculées par la méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et avaient pour objectif de valider l'intérêt de l'utilisation de miscanthus par rapport à des alternatives conventionnelles et de déterminer les types d'utilisation possédant les meilleures performances environnementales.

Ce document de synthèse des résultats traite de la comparaison entre les miscanthus et les alternatives conventionnelles.

## RESUME

L'ACV a porté sur quatre filières miscanthus (renforcement plastique, composition béton, combustion, méthanisation) :

Bloc de résistance 6 MPa : en comparaison à un bloc 100% béton et un bloc allégé à la pierre ponce, le bloc à base de miscanthus révèle un impact délétère sur l'environnement ce quels que soient les scénarios de production du miscanthus. La filière doit donc passer par une importante phase d'écoconception pour devenir durable, par exemple en réduisant fortement la quantité de ciment utilisée. A noter que l'étude n'a pas pu prendre en compte les avantages ou inconvénients associés à une isolation acoustique et thermique intrinsèque différente entre chaque alternative ce qui, à priori, devrait être à l'avantage du miscanthus.

Bloc de résistance 4 MPa de résistance : en comparaison à la brique, le bloc miscanthus permet de réduire le changement climatique de 30 % à 40 % tout en ayant une empreinte environnementale globale équivalente à la brique. Il s'agit néanmoins de veiller à ce que la culture du miscanthus ne soit pas en compétition avec l'alimentaire. A noter que l'étude n'a pas pu prendre en compte les avantages ou inconvénients associés à une isolation acoustique et thermique intrinsèque différente entre chaque alternative.

Production de chaleur par combustion directe : le miscanthus permet de réduire le changement climatique de 75 % à 95 % en comparaison au gaz naturel pour une culture sur des terres peu productives (6,5 t MS/ha) et très productives (14,5 t MS/ha) qui ne seraient pas en compétition avec l'agriculture alimentaire. Ceci dit, ces bons résultats au regard du changement climatique et de la destruction de la couche d'ozone se traduisent par une augmentation de l'ensemble des autres impacts (13/15). D'un point de vue plus global, il semblerait néanmoins que si le miscanthus est cultivé sur une terre productive, le gain sur le changement climatique permet de compenser largement les pertes sur les autres classes d'impact. Cela n'est cependant pas vérifié pour la culture sur terre peu productive et/ou lorsqu'il est en compétition avec l'agriculture alimentaire.

Production de chaleur par combustion du méthane après méthanisation du miscanthus récolté en sec : l'impact sur le changement climatique en comparaison avec le gaz naturel est très variable en fonction des scénarios (- 80 % à + 100 %). Par ailleurs, le miscanthus montre de meilleurs résultats pour deux catégories d'impact (changement climatique et destruction de la couche d'ozone) sur les 15 modélisés. D'un point de vue global, les gains environnementaux liés à la réduction de l'impact sur le changement climatique permettent de compenser les 13 autres impacts modélisés si le miscanthus est cultivé sur une terre productive (14,5 t MS/ha), sans compétition avec l'agriculture alimentaire, et qu'il a fait l'objet d'un traitement à la chaux avant la méthanisation de façon à accélérer la réaction et à augmenter la production de méthane.

Pièce plastique automobile : en comparaison à une pièce renforcée à la fibre de verre, le miscanthus permet une réduction de 14 impacts sur 15 (dont le changement climatique de 25 %) par rapport à un renforcement à la fibre de verre. Et ce, à peu près quels que soient les scénarios modélisés (terre productive ou non, en compétition avec l'agriculture alimentaire ou non, réduction de la consommation de carburant importante ou non, ...). Cette filière est donc une bonne alternative pour lutter contre le changement climatique tout en améliorant d'autres impacts environnementaux, et ce score est d'autant meilleur que le miscanthus est cultivé sur une terre productive et qui n'est pas en compétition avec l'agriculture alimentaire.



## 1 ETUDE

### 1.1 CONTEXTE, OBJECTIFS ET CHAMP DE L'ETUDE

L'ACV a été financée dans le cadre du projet BFF et a été réalisée par Inovertis-A3i avec le support des partenaires du projet pour les données d'entrées (culture, transformation et utilisation).

Les résultats de cette étude sont destinés à toutes personnes (industriels, chercheurs, institutionnels, etc.) souhaitant obtenir des informations sur les performances environnementales de la culture et de l'utilisation de Miscanthus.

Les objectifs de l'ACV sont (1) Comparer les différentes alternatives d'utilisation de miscanthus par rapport à leurs concurrents fossiles actuels et (2) Déterminer quelle est la chaîne de processus (culture, stockage, utilisation, fin de vie) la plus rentable d'un point de vue écologique afin de déterminer la meilleure utilisation du sol.

Il s'agit d'une Analyse du Cycle de vie de type A au sens de l'ILCD Handbook « micro-level decision support ». C'est-à-dire qu'elle est de type attributionnel pour la définition des données d'inventaire mais que les conséquences directement attribuables au système doivent être prises en compte. L'analyse de sensibilité a néanmoins investigué de façon simplifiée l'effet des conséquences indirectes liées au changement d'affectation du sol dans le cas d'une culture sur terre non-marginale (CASi).

Les multifonctionnalités qui n'ont pas pu être résolues par une division du système ont été résolues par l'extension des frontières du système et lorsque cela s'est avéré impossible, par une règle de coupure.

La production de la matière première, sa transformation et sa fin de vie a lieu en France. Les données de premiers-plan établies dans le cadre du projet sont considérées représentatives pour l'année 2020. Les données d'arrière-plan sont issues de la base de données Ecoinvent 3.3 et sont donc représentatives des conditions antérieures à 2016.

### 1.2 FONCTION, UNITE FONCTIONNELLE, FLUX DE REFERENCE ET SCENARIOS

Les unités fonctionnelles et flux de référence retenus en fonction des filières et des objectifs de l'étude sont reportés dans le tableau 1 ci-dessous.

De nombreux sous-scénarios ont été modélisés de façon à évaluer la sensibilité des résultats par rapport à des critères incertains et/ou variables :

**+ Culture** : Les sous-scénarios de production sont communs à l'ensemble des filières et concernent :

➔ La productivité du sol et les pratiques agricoles :

○ TerProd = Scénario de culture sur terre productive (12,5 t MS/ha) avec apport de P et K seulement

○ TerPEUProd = Scénario de culture sur terre peu productive (6,4 t MS/ha) avec apport de N, P et K

➔ L'âge de la culture de miscanthus

○ Pas de CAS = Le miscanthus est cultivé depuis plus de 20 ans sur la même parcelle. Il est donc considéré que la culture et son utilisation sont établies. Il n'y a donc pas de conséquences directes ni indirectes liées aux changements d'affectation du sol (CASd et CASi)

○ CAS = Le miscanthus est cultivé depuis moins de 20 ans sur la parcelle. Il y a donc lieu de considérer les conséquences directes et, si la culture a lieu sur une terre non-marginale, les conséquences indirectes liées au changement d'affectation du sol.

➔ Le caractère marginal ou non du sol

○ Marginal = Le sol n'est pas en compétition avec l'agriculture alimentaire. Seules les CASd sont prises en compte. Il s'agit de la variation du stock de carbone dans le sol. Dans ces conditions, il est considéré que le miscanthus vient remplacer une prairie. Le miscanthus ne permet pas alors un apport de carbone et une augmentation du stock. Au contraire, le sol émettra plus de carbone sous forme de CO<sub>2</sub> que ce qu'il en stocke.

- Non-marginal = Le sol est en compétition avec l'agriculture alimentaire. En plus des CASd, les CASi peuvent être prises en compte si la surface est suffisante pour affecter les marchés ou s'il est considéré que la surface s'intègre dans une demande plus globale qui, in fine, affecte les marchés. Dans cette situation il est considéré que le miscanthus vient en remplacement d'une culture intensive conventionnelle. Il permet alors une augmentation du stock de carbone dans le sol (CASd). Les émissions indirectes de carbone ainsi que la transformation et l'occupation de sols tropicaux (CASi) sont estimés grossièrement de façon à évaluer en première approximation son influence sur les résultats.

**+ Production de chaleur par combustion du méthane** après co-digestion du miscanthus récolté en sec :  
Les sous-scénarios sont :

- ➔ Pas de prétraitement = Le miscanthus est envoyé en co-digestion sans prétraitement
- ➔ Prétraitement à la chaux = Le miscanthus fait l'objet d'un prétraitement de façon à améliorer son pouvoir méthanogène ainsi que la vitesse de méthanisation

**+ Pièce plastique automobile** : Les sous-scénarios concernent le calcul du bénéfice associé à l'allègement de la pièce automobile grâce au renforcement avec des fibres de miscanthus. Les deux paramètres étudiés sont :

- ➔ La valeur de référence pour calculer la réduction de carburant (Fuel Reduction Value) = La FRV varie si le véhicule sur lequel la pièce allégée fait l'objet d'une démarche de réduction de la consommation de carburant ou non. Les deux conditions ont été considérées
- ➔ Le type de carburant économisé = Le bénéfice associé va être différent si le véhicule sur lequel la pièce allégée utilise de l'essence ou du diesel comme carburant. Les deux conditions ont été considérées.

## 1.3 FRONTIÈRES DU SYSTÈME

Quel que soit l'objectif considéré, l'analyse a été menée sur l'ensemble des étapes du cycle de vie (culture, utilisation et fin de vie) ainsi que la majeure partie des flux entrant et sortant de chaque étape. Les bases de données Agribalyse v1.1 et Ecoinvent 3.3 ont été utilisées pour convertir les flux en émissions de polluants associés à leur production, leur acheminement et leur fin de vie.

## 1.4 INVENTAIRE ET MODELISATION

### 1.4.1 Général

Les données de premiers-plan (quantité de matière première, d'énergie, production de déchets, émissions directes, etc.) ont été préférentiellement collectées auprès des partenaires. Le cas échéant, les données ont été complétées à l'aide de la bibliographie, de bases de données commerciales, libres d'accès ou propre à Inovertis-A3i. Les données ont été intégrées dans le logiciel d'ACV Gabi® et connectées aux bases de données Agribalyse 1.1 et Ecoinvent 3.3 pour convertir les données de premier-plan en émissions de polluants associées aux entrants et sortants de chaque étape.

Les impacts environnementaux potentiels ont été modélisés à l'aide de la méthode recommandée par la commission européenne dans le cadre de l'ILCD (version 1.09 dans l'outil Gabi®). Le calcul du score unique a été fait à l'aide de la méthode ReCiPe HA dans des conditions européennes et sans prendre en compte le stockage et les émissions de carbone biogénique.

### 1.4.2 Suivi du carbone biogénique

Pour les alternatives renforcement plastique et bloc béton, il est considéré un bénéfice sur le changement climatique du fait du stockage de carbone biogénique pendant 10 ans dans le premier cas et 100 ans dans le second. Il est également compté un bénéfice dans le cas de la méthanisation car il est considéré qu'une fraction du carbone est stockée dans le sol après épandage des digestats.

Tableau 1 : Unités fonctionnelles et flux de référence pour la comparaison au conventionnel

Fonction	Scénario	Unité fonctionnelle	Flux de référence
Bloc léger de résistance 6 MPa	Bloc 12% MS Miscanthus	1 m <sup>2</sup> de mur porteur	44 blocs de 150/150/150 mm l*L*e (150 kg)
	Bloc béton pierre ponce	1 m <sup>2</sup> de mur porteur	8 blocs de 500/250/200 l*L*e (112 kg)
Bloc non allégé de résistance 6 MPa	Bloc 5% MS Miscanthus	1 m <sup>2</sup> de mur porteur	44 blocs de 150/150/150 l*L*e (221 kg)
	Bloc béton	1 m <sup>2</sup> de mur porteur	8 blocs de 500/250/200 mm l*L*e (178 kg)
Bloc de résistance 4 MPa	Bloc 9% MS Miscanthus	1 m <sup>2</sup> de mur non-porteur	44 blocs de 150/150/40 mm l*L*e (52 kg)
	Brique creuse	1 m <sup>2</sup> de mur non-porteur	10 blocs de 500/200/40 mm l*L*e (34 kg)
Production de chaleur	Miscanthus combustion directe	1 MJ de chaleur industrielle	6,85 E <sup>-2</sup> kg miscanthus sec
	Gaz naturel	1 MJ de chaleur industrielle	2,56 E <sup>-2</sup> Nm <sup>3</sup>
Production de chaleur	Miscanthus méthanisé	1 MJ de chaleur industrielle	2,64 E <sup>-1</sup> kg miscanthus sec (3,06 E <sup>-2</sup> Nm <sup>3</sup> )
	Gaz naturel	1 MJ de chaleur industrielle	2,56 E <sup>-2</sup> Nm <sup>3</sup>
Renforcement de plastique	Composite PP/miscanthus (70/30)	1 insert de planche de bord	3,89 kg de composite (1,04 kg de miscanthus sec)
	Composite PP/fibre de verre (80/20)	1 insert de planche de bord	4 kg de composite

Lorsque le carbone de la plante est réémis il a été considéré un impact neutre sur le changement climatique pour les émissions de CO<sub>2</sub> et un impact réduit pour les émissions de CH<sub>4</sub> du fait du stockage de carbone issu du CO<sub>2</sub> atmosphérique lors de la croissance de la plante.

## 1.5 AMELIORATION DE L'ETUDE

Les principales perspectives d'amélioration de la qualité de l'étude identifiées et susceptibles d'affecter les conclusions sont :

**+Bloc béton** : la performance acoustique et thermique des blocs n'a pas été prise en compte. La comparaison avec les scénarios conventionnels s'est donc faite sur la résistance mécanique seule et non pas à iso fonctionnalité stricte. Par ailleurs, aucune étude d'éco-conception n'a été menée sur le design des blocs miscanthus ce qui pourrait contribuer à améliorer leurs performances.

**+Production de chaleur par combustion directe en chaufferie** : Il apparaît que les émissions liées à la combustion représentent une part importante de l'impact, or les émissions reportées dans cette étude proviennent de données laboratoires pour un seul essai. Une étude ultérieure pour affiner cette source d'impact devrait être menée sur une plus longue durée et en conditions réelles.

**+Production de chaleur après méthanisation** : L'analyse de contribution montre une influence importante de l'infrastructure de purification/injection dans de nombreuses classes d'impact. Or, cette infrastructure a été approximée à partir d'une chaufferie bois d'un processus

Ecoinvent. De fait, même si cette contribution n'est pas apparente dans le calcul en score unique, une étude ultérieure pourrait s'attacher à préciser l'infrastructure liée à cette étape ainsi que les pertes de méthane associées. Enfin, les émissions d'éléments traces métalliques n'ont pas été prises en compte lors de l'épandage des digestats.

**+Renforcement plastique** : L'incinération en fin de vie s'avère être un facteur d'impact et de bénéfice environnemental notable dans de nombreuses catégories d'impact ainsi qu'en score unique. Il serait donc intéressant d'approfondir l'étude de la fin de vie en considérant la possibilité de recycler ou non la pièce renforcée avec du miscanthus ou de la fibre de verre.

**+Toutes les filières** :

➔ **Culture** : L'estimation des émissions (érosion, PO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>) liée à la culture du miscanthus a été faite en appliquant la méthode utilisée dans la base de données Agribalyse® qui n'est pas adaptée à une culture comme le miscanthus. Le développement et l'application d'une méthodologie plus représentative du miscanthus devrait permettre d'améliorer la robustesse de l'étude.

➔ L'étude n'a pas fait l'objet d'une revue critique externe

## 2 RESULTATS

### 2.1 RENFORCEMENT BLOC BETON

Bloc de résistance 6 MPa de résistance : En comparaison à un bloc 100% béton (Figure 2) et un bloc allégé à la pierre ponce, le bloc à base de miscanthus ne permet pas de réduire le changement climatique ni aucun autre impact environnemental. La filière doit donc passer par une importante phase d'écoconception pour devenir durable, par exemple en réduisant fortement la quantité de ciment utilisée. A noter que l'étude n'a pas pu prendre en compte les avantages ou inconvénients associés à une isolation acoustique et thermique intrinsèque différente entre chaque alternative ce qui, à priori, devrait être à l'avantage du miscanthus.

Bloc de résistance 4 MPa de résistance : En comparaison à la brique, le bloc miscanthus permet de réduire le changement climatique de 30 % à 40 % (Figure 3) tout en ayant une empreinte environnementale globale équivalente. Cependant, il faut veiller à ne pas être en compétition avec l'alimentation. A noter que l'étude n'a pas pu prendre en compte les avantages ou inconvénients associés à une isolation acoustique et thermique intrinsèque différente entre chaque alternative.

### 2.2 PRODUCTION DE CHALEUR PAR COMBUSTION DIRECTE

Le miscanthus permet de réduire le changement climatique de 75 % à 95 % en comparaison au gaz naturel pour une culture sur des terres peu productives (6,5 t MS/ha) et très productives (14,5 t MS/ha) qui ne seraient pas en compétition avec l'agriculture alimentaire (Figure 4). Ceci dit, ces bons résultats au regard du changement climatique et de la destruction de la couche d'ozone se traduisent par une augmentation de l'ensemble des treize autres impacts. D'un point de vue plus global (score unique, Figure 5), il semblerait que si le miscanthus est cultivé sur une terre productive, le gain sur le changement climatique permet de compenser les pertes sur les autres classes d'impact. Cela n'est cependant pas vérifié pour la culture sur terre peu productive et/ou lorsqu'il est en compétition avec l'agriculture alimentaire.

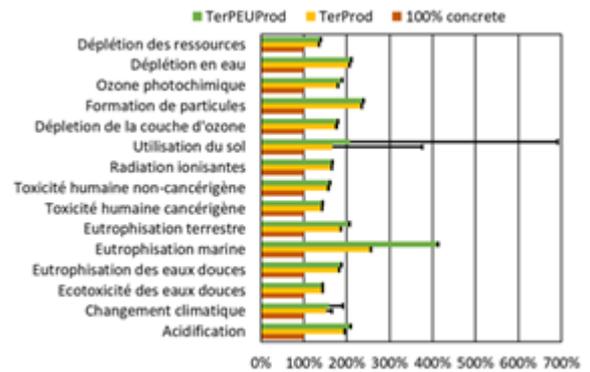


Figure 2 : Comparaison d'un bloc béton renforcé au miscanthus et d'un bloc 100% béton (6 MPa)

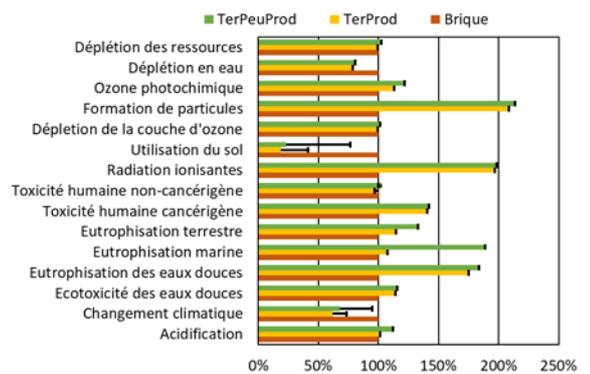


Figure 3 : Comparaison d'un bloc béton renforcé au miscanthus et d'une brique (4 MPa) (barre d'incertitude = CASi)

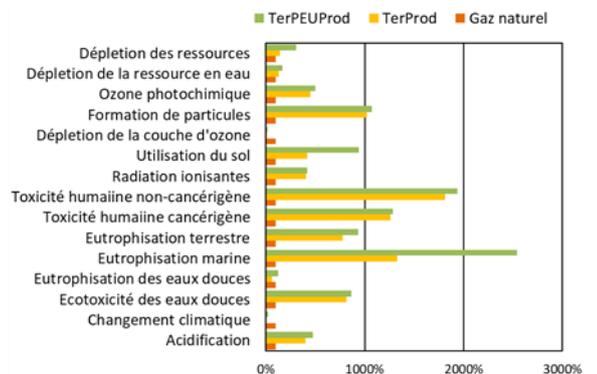


Figure 4 : Comparaison de la production de chaleur par combustion directe du miscanthus ou de gaz

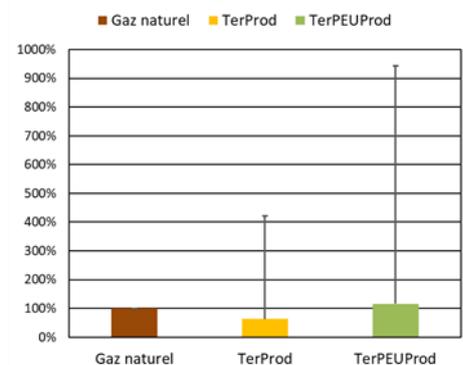


Figure 5 : Comparaison en score unique de la production de chaleur par combustion directe du miscanthus (barre d'incertitude = CASi)

## 2.3 PRODUCTION DE CHALEUR PAR COMBUSTION DU METHANE ISSU DE LA CO-DIGESTION DU MISCANTHUS

En comparaison avec le gaz naturel (Figure 6), la filière miscanthus montre toujours une valeur ajoutée sur la destruction de la couche d'ozone et un résultat très variable sur le changement climatique en (- 80 % à + 100 %). Le calcul du score unique révèle que la réduction de l'impact sur le changement climatique, lorsque c'est le cas, permet de compenser les 13 autres impacts en faveur du gaz naturel seulement si le miscanthus est cultivé sur une terre productive (14,5 t MS/ha), sans compétition avec l'agriculture alimentaire, et qu'il a fait l'objet d'un traitement à la chaux avant la méthanisation de façon à accélérer la réaction et à augmenter la production de méthane.

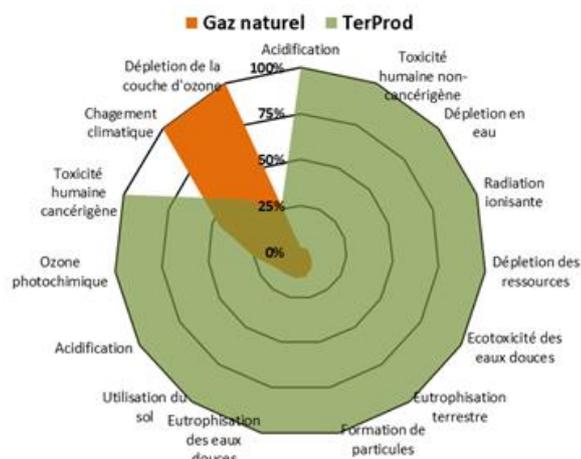


Figure 6 : Comparaison de la production de chaleur par combustion du méthane issu de la co-digestion et du gaz naturel

## 2.4 PIÈCE PLASTIQUE AUTOMOBILE

En comparaison à une pièce renforcée à la fibre de verre (Figure 7), le miscanthus permet une réduction de 14 impacts sur 15 (dont le changement climatique de 25 %). Cela est vérifié à peu près quels que soient les scénarios modélisés (terre productive ou non, en compétition avec l'agriculture alimentaire ou non, réduction de la consommation de carburant importante ou non, résolution des co-fonction par impact évité ou coupure, ...). Cette filière est donc une bonne alternative pour lutter contre le changement climatique tout en améliorant d'autres impacts environnementaux. Le score environnemental globale (Figure 8) est également à l'avantage du miscanthus. Ce score est d'autant meilleur que le miscanthus est cultivé sur une terre productive qui n'est pas en compétition avec l'agriculture alimentaire.

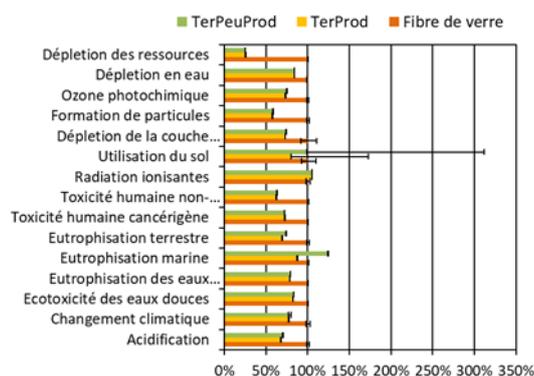


Figure 7 : Comparaison d'une pièce plastique automobile renforcée avec du miscanthus ou de la fibre de verre (barre d'incertitude = CASi + FRV)

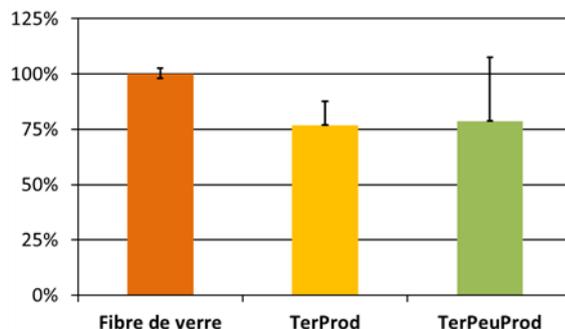


Figure 8 : Comparaison en score unique d'une pièce plastique automobile renforcée avec du miscanthus ou de la fibre de verre (barre d'incertitude = CASi + FRV)

## Carte d'identité du projet de R&D



Type de projet : Projet ANR11-BTBR-0006

Porteur du projet : INRA Versailles - Institut Jean-Pierre Bourgin

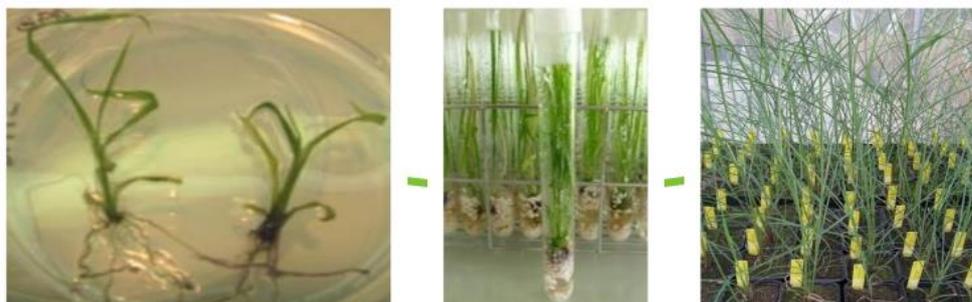
Partenaires : 9 instituts de recherche publics, 11 partenaires privés, 2 collectivités locales

Budget : 28 M€

Financier : Agence Nationale de la Recherche

Durée : 9 ans

Chefs de file de Labellisation : Gis Biotechnologies Vertes, Advancity, Move'o et le Pôle IAR



*Différentes étapes de culture in vitro du miscanthus*



*Premier bloc de béton développé à base de Miscanthus*

