

Bilan environnemental et énergétique de la culture du miscanthus

Table des matières

Table des matières.....	1
Table des figures	1
Table des tableaux.....	1
1. Emissions de CO ₂ liées à différentes cultures	2
1.1. Culture de référence : le froment d'hiver	2
1.1.1. Émission de CO ₂ liée à la culture du froment d'hiver.....	2
1.1.2. Consommation d'énergie liée à la culture du froment d'hiver.....	4
1.1.3. Synthèse	4
1.1.4. Comparaison bibliographique.....	5
1.2. Le miscanthus	5
1.2.1. Emissions de CO ₂ liées à la culture du miscanthus	6
1.2.2. Consommation d'énergie liée à la culture du miscanthus.....	10
1.2.3. Synthèse :	10
1.2.4. Comparaison bibliographique.....	11
2. Stockage du carbone dans les sols.....	13
2.1. Introduction.....	13
2.1.1. Les matières organiques du sol	13
2.1.2. Les fonctions environnementales	13
2.1.3. Influence des types de sols et de leur occupation.....	13
2.1.4. Influence des changements d'usage de des pratiques agricoles	13
2.2. Estimation chiffrée par unité de surface du stockage de carbone dans le sol.....	14
2.2.1. Stock de carbone selon le mode d'occupation.....	15
2.2.2. Effets des pratiques agricoles	15
2.2.3. Changement d'usage des terres	16
3. Références bibliographiques	17
Sources bibliographiques	17
Sources Internet.....	18

Table des figures

<i>Figure 1-1: Emissions de CO₂ liées à la culture du miscanthus</i>	<i>6</i>
<i>Figure 1-2 : Emissions de CO₂ liées à la culture du miscanthus, en fonction des années.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 2-1 : stocks de carbone du sol en fonction du mode d'occupation des terres</i>	<i>15</i>

Table des tableaux

<i>Tableau 1-1: estimation de la consommation de carburant liée à la culture du froment d'hiver</i>	<i>2</i>
<i>Tableau 1-2: estimation des produits phytos entrant dans la culture du froment d'hiver</i>	<i>3</i>
<i>Tableau 1-3: engrais appliqués pour la culture du froment d'hiver.....</i>	<i>3</i>
<i>Tableau 1-4 : émissions de CO₂ liées à la culture du froment d'hiver.....</i>	<i>3</i>
<i>Tableau 1-5: consommation d'énergie liée à la culture du froment d'hiver.....</i>	<i>4</i>
<i>Tableau 1-6: bilan énergétique et environnemental de la production de froment d'hiver.....</i>	<i>4</i>
<i>Tableau 1-7: Estimation de la consommation de carburant pour la culture du miscanthus</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 1-8: Estimation des produits phytos utilisés en culture de miscanthus</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 1-9: Emissions de CO₂ liées à la culture du miscanthus.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 1-10: Consommation d'énergie liée à la culture du miscanthus.....</i>	<i>10</i>
<i>Tableau 1-11: Bilan énergétique et environnemental lié à la culture du miscanthus.....</i>	<i>10</i>
<i>Tableau 1-12: Valeurs de référence utilisées.....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 1-13: Comparaison des différentes valeurs unitaires d'émission de CO₂ et de consommation d'énergie utilisées</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 1-14: Consommation d'énergie et émission de CO₂ des différentes étapes de la culture.....</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 2-1: flux de stockage annuel en fonction des changements de pratiques agricoles</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 2-2: lux de carbone du sol lié à la culture du miscanthus dans différents pays.....</i>	<i>16</i>

Introduction

L'agriculture wallonne est responsable de 8,8 % des émissions de gaz à effet de serre (données de 2006). Nous pouvons diminuer les émissions dues à l'agriculture en privilégiant les cultures moins énergivores et moins polluantes sur les anciennes jachères par exemple.

La fabrication des produits phytos et des engrais nécessite beaucoup d'énergie et est polluante. Bien que leur utilisation se fasse de façon de plus en plus raisonnée pour les cultures conventionnelles, d'autres cultures comme le miscanthus par exemple, ont l'avantage de demander de moins grandes quantités d'intrants.

Un changement de l'usage des terres ainsi que la modification de certaines pratiques culturales peuvent également avoir une incidence sur les émissions de gaz à effet de serre liée au stockage du carbone dans les sols. Ainsi, la transformation de prairie en forêt va stocker une plus grande quantité de CO₂ dans le sol.

Nous parlerons également de ratio énergétique d'usage REU. Selon Jossart et al. (2005), le ratio énergétique est le rapport entre la production d'énergie renouvelable et la consommation d'énergie, considérée comme fossile, nécessaire tout au long de la filière de production. Lorsque le ratio est supérieur à 1, la production d'énergie renouvelable est supérieure à la consommation d'énergie fossile.

1. Emissions de CO₂ liées à différentes cultures

1.1. Culture de référence : le froment d'hiver

Nous allons utiliser, comme culture de référence le froment d'hiver, qui est la culture la plus répandue en Région Wallonne (près de 125 000¹ ha, soit plus de 15% de la SAU wallonne).

La quantité de CO₂ fossile ainsi que la quantité d'énergie nécessaire à la culture est imputable à la fois à la graine et à la paille. Ces deux valeurs seront donc réparties au prorata du contenu énergétique de la graine et de la paille. On considère un contenu énergétique de 17,1MJ/kg pour la graine et la paille. Le taux d'humidité est de 15% est les rendements sont estimés à 8480 kg/ha pour le grain et 4150kg/ha pour la paille².

1.1.1. Émission de CO₂ liée à la culture du froment d'hiver

Les 3 tableaux suivants reprennent la consommation de carburant liée aux opérations culturales ainsi que les quantités d'engrais et de produits de traitement appliqués sur la culture. Ils se basent sur un travail fait par P. Nijsskens.

Tableau 1-1: estimation de la consommation de carburant liée à la culture du froment d'hiver

Description			Durée (h/ha)		Consommation spécifique (l/h)	Consommation (l/ha)	
	Min	Max	Min	Max		Min	Max
Préparation du sol							
Préparation profonde	Pas de labour	labour (1 passage)	0	1	20	0	20
Préparation superficielle	Préparation simplifiée + semis direct (1 passage)	Herse rotative + rouleau + semoir (1 passage)	1	1	(30-20)	20	30
Fertilisation							
P2O5	0,25 passages *		0,1		15	0,9	0,9
K2O	0,25 passages *		0,1		15	0,9	0,9
N minéral	3 passages		0,8		15	11,3	11,3
Produits phytosanitaires+raccourcisseur	2 passages	3 passages	0,5	0,8	15	7,5	11,3
Récolte							

¹ Source : INS, 1999-2007, recensement agricole.

² Source : INS, 1994-2004, Estimations de la production des cultures agricoles.

moissonneuse-batteuse	1 passage	0,4	36,8	13,2
presse à grosses balles carées	1 passage	0,2	21,6	3,2
Transport vers le lieu de stockage		0,3	15	5,0
SOUS-TOTAL			Grain	39,5
			Paille	62,2
			Plante entière	22,6
				33,7
				62,1
				95,8
TOTAL			Grain	50,8
			Paille	28,1

Les engrais P_2O_5 et K_2O sont des engrais de fond appliqués sur la tête de rotation, on suppose qu'ils sont utilisés par toutes les cultures de la rotation. Ils sont cependant un peu moins utilisés par les autres cultures de la rotation que par la tête de rotation. (3 années de rotation).

Plusieurs produits sont appliqués en même temps, on doit donc répartir la durée du travail en fonction du nombre de produits épanchés.

Tableau 1-2: estimation des produits phytos entrant dans la culture du froment d'hiver

produits	Min	Max	Quantités de matière active						
			l/ha		kg/l		kg/ha		
			Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Traitement d'automne en préémergence stricte		Chlortoluron		3-3,25		0,5		1,56	
Traitement printanier lutte contre vulpin et dycot		Flupyr sulfuron-méthyl + thifensulfuron-méthyl					0,45	0,45	
Traitement anti-dicotylées (gaillet)	Amidosulfuron	dichlorprop-p		2-2,4		0,6	0,03	1,32	
Fongicide	azoxystrobine	azoxystrobine + fenpropimorphe	1	2	0,25	0,4	0,25	0,8	
Traitement anti-verse	Chloroméquat chlorure (CCC)	CCC + trinexapac-éthyl					0,68	0,73	
TOTAL								1,41	4,86

La quantité d'engrais à appliquer est calculée sur base de la quantité d'éléments exportés par la plante³.

Tableau 1-3: engrais appliqués pour la culture du froment d'hiver

Engrais	Quantité (kg/ha)
N minéral	185
P_2O_5	75
K_2O	135

Lorsque ces valeurs sont multipliées par leur coefficient d'émission spécifique, on obtient les émissions de gaz carbonique qui leur sont propres.

Tableau 1-4 : émissions de CO2 liées à la culture du froment d'hiver

Poste	Consommation (kg/ha)		Emission spécifique (kg CO2/kg)		Emissions (kg CO2/ha)		Emissions (kg CO2/t MS)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
carburants (densité gasoil: 0,835 kg/l)								
grains	33,2	52,2	3,64		120,8	190,1	16,9	26,5
paille	18,6	27,8	3,64		67,8	101,1	19,7	29,4
Plante entière	51,8	80,0	3,64		188,6	291,2	17,8	27,4
Phytos	1,4	4,8	15,45		21,8	74,5		
Engrais								
N minéral	185		2,4	2,7	447,7	493,2		
P2O5	75		0,7	1,5	50,0	111,0		
K2O	135		0,5	0,9	64,7	116,1		
			TOTAL	GRAINS	515,5	727,2	71,9	101,4
				PAILLE	257,2	358,8	74,8	104,3

³ Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, 2002 et 2005, Fumure et protection phytosanitaire des céréales.

		PL ENTIERE	772,7	1086,0	72,8	102,4
		GRAINS	621,4		86,7	
		PAILLE	308,0		89,5	
	MOYENNE	PL ENTIERE	929,4		87,6	

1.1.2. Consommation d'énergie liée à la culture du froment d'hiver

En utilisant la même procédure que précédemment, il est possible de calculer la consommation énergétique liée à la culture du froment d'hiver. Les valeurs d'énergie unitaire proviennent de Jossart et al, « Emissions de CO2 de diverses sources de biomasse pour le calcul des certificats verts » (2003).

Tableau 1-5: consommation d'énergie liée à la culture du froment d'hiver

Poste	Consommation (kg/ha)	Energie unitaire (MJ/Kg)	Energie totale (kWh/ha)	Energie totale (kWh/t MS)
carburants (densité gasoil: 0,835 kg/l)				
Grains	42,7	56	664,4	92,7
Paille	23,2	56	360,9	104,9
Plante entière	65,9	56	1025,3	96,6
Phytos	3,1	200	173,0	
Engrais				
N minéral	185	70	3597,2	
P2O5	75	12	250,0	
K2O	135	7,5	281,3	
		GRAINS	3571,3	498,1
		PAILLE	1755,5	510,3
	TOTAL	PL ENTIERE	5326,8	502,1

1.1.3. Synthèse

Tableau 1-6: bilan énergétique et environnemental de la production de froment d'hiver

	graine	paille	plante entière
rendements (t MS/ha)⁴	7,17	3,44	10,61
Energie			
Energie restituée par la plante			
PCI, MJ/Kg	17,1	17,1	
PCI, kWh/Kg	4,7	4,7	
kWh/ha	34037,6	16320,9	50358,5
kWh/t MS	4747,2	4744,4	
Energie primaire nécessaire à la croissance de la plante			
kWh/t		498,1	
kWh/ha	3571,3	1755,5	5326,8
REU	9,5	9,3	9,5
CO2			
CO ₂ fossile émis suite à la culture de la plante			
kg CO ₂ /t		86,7	
kg CO ₂ /ha	621,4	308,0	929,4

⁴ Calculé sur base des statistiques de l'INS pour les années 1999 à 2007 et sur base d'un taux d'humidité de 15%

1.1.4. Comparaison bibliographique

L'étude CONCAWE « Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European Report » nous donne une émission de CO₂ pour le froment d'hiver de 1066 kg de CO₂/ha. Cela reste assez proche du résultat que l'on a obtenu ici.

1.2. Le miscanthus

Le miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) est une culture pérenne de 3-4 m de hauteur. La durée de vie de la plantation est estimée à une vingtaine d'année mais nous ne disposons pas d'un recul suffisant pour l'estimer de façon précise.

La culture ne nécessite pas d'intrant. L'expérience Bical montre que l'apport d'azote même en petite quantité (70 unités d'azote) favorise la croissance des feuilles mais n'a aucune influence sur la production de biomasse, celle-ci étant récoltée après la chute des feuilles⁵. Des expériences doivent cependant encore être réalisées sur le sujet.

La plantation s'effectue à partir de plantules ou le plus souvent de rhizomes fragmentés lorsque la température du sol est supérieure à 10°C. Elle se réalise avec une planteuse adaptée (planteuse Bical) ou une ancienne planteuse à pommes de terre modifiée. La densité de plantation se situe entre 15 000 et 20 000 rhizomes par hectare.

Le miscanthus est sensible aux adventices les deux premières années. Le désherbage est obligatoire en première année et pourrait être évité en deuxième année si le mulch formé au sol est suffisant pour étouffer les mauvaises herbes.

La récolte se fait annuellement, après la chute des feuilles, vers la fin de l'automne ou en hiver pour maximiser le taux de matière sèche. La coupe se fait à l'aide d'une ensileuse à maïs équipée d'un bec type « kemper ». La hauteur de coupe doit être la plus faible possible pour maximiser les rendements. En première année, la matière n'est pas récoltée et est directement étalée sur le sol. Cela permet, en plus d'étouffer les mauvaises herbes l'année suivante, d'assurer une certaine isolation du sol, les rhizomes étant sensibles au froid le premier hiver, si la température du sol descend en dessous de -3,5°C. On peut également faire le choix de ne pas récolter la matière en première année. En deuxième année, de nouvelles tiges vont émerger du rhizome et la quantité de matière récoltée en deuxième année sera supérieure à celle escomptée si la récolte avait été réalisée en première année. Sur le terrain, on remarque que les plants récoltés en première année sont plus petits que ceux qui n'ont pas été récoltés. Cela provient du fait que le cycle du miscanthus est plus court en première année, les autres années, le miscanthus a une période de croissance plus importante et a donc plus le temps de se dessécher et de stocker des nutriments dans ses organes de réserve.

Les rendements augmentent progressivement jusqu'à atteindre un plafond de 15-20 tMS/ha par an à partir de la troisième année.

La matière est le plus souvent stockée sous forme d'ensilage mais cela nécessite un volume important. D'autres modes de stockage devront probablement être envisagés : mise en ballots, fabrication de briquettes directement sur le site,...de façon à diminuer les frais dus au transport de la matière.

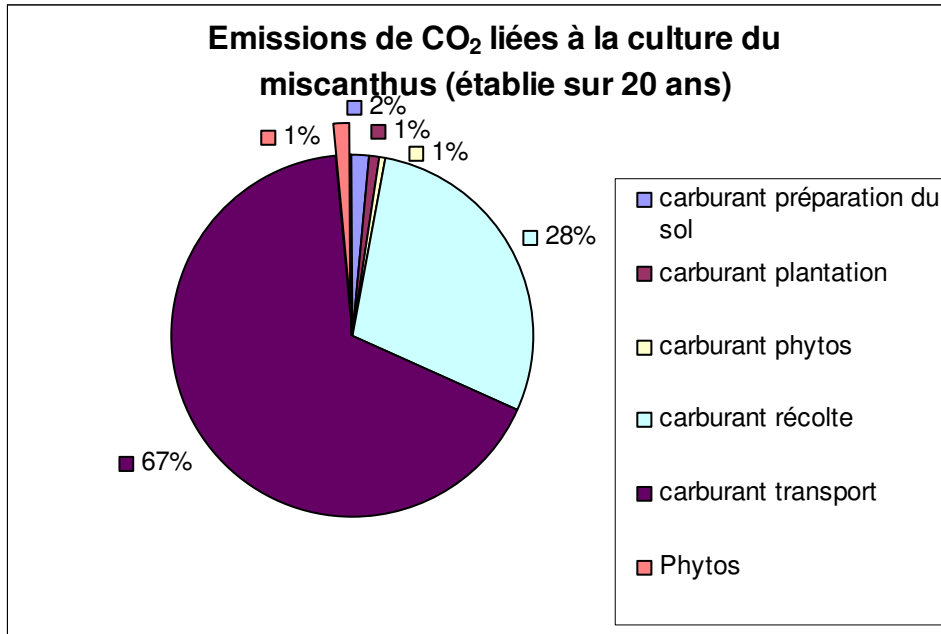
Le miscanthus possède différentes applications, notamment comme matériau de construction : isolation, bio-béton,... ainsi que comme combustible pour la production de chaleur. C'est cette dernière vocation qui sera étudiée ici.

⁵ Source : Jacques Hardy (*Promisc Bical Belux*), 2008, communication personnelle

1.2.1. Emissions de CO₂ liées à la culture du miscanthus

Les émissions de CO₂ proviennent principalement des carburants consommés pour la préparation du sol, la plantation, la récolte et le transport de la récolte vers le lieu de stockage. Elles représentent 99% du total des émissions liées à la culture du miscanthus. Le pourcent restant est propre à la fabrication des produits phytos (figure 1-1).

Figure 1-1: Emissions de CO₂ liées à la culture du miscanthus



La consommation de carburant liées aux diverses opérations de culture du miscanthus est évaluée au tableau 1-7

Tableau 1-7: Estimation de la consommation de carburant pour la culture du miscanthus⁶

Description			Durée (h/ha)		Consommation spécifique (l/h)		années	Consommation (l/ha)	
			Min	Max				Min	Max
Préparation du sol									
Préparation profonde	labour (1 passage)		0,88		12,5		1	11,0	
	cultivateur (1 passage)		0,75		12,5		1	9,4	
préparation superficielle	herse rotative		0,75		15		1	11,3	
Plantation	machine bical	planteuse pommes de terre	0,5	3	12	8	1	6,0	24,0
			rouleau		0,3		7		1
Produits phytosanitaires	2 passages	4 passages	0,2	0,8	9,9		1 et 2	4,0	15,8
Récolte									
ensileuse avec bec kemper	1 passage		0,88		31,8		1	28,0	
ensileuse avec bec kemper	1 passage		0,88		31,8		2 à 20	531,7	
Transport vers le lieu de stockage	10t MS/ha		2,5		15		2	37,5	
Transport vers le lieu de stockage	15tMS/ha		3,75		15		3	56,3	
Transport vers le lieu de stockage	17t MS/ha		4,67		15		4 à 20	1190,9	
TOTAL (sur 20 ans)								1860,0	1917,8
MOYENNE (sur 20 ans)								1889	
MOYENNE (par année)								94	

L'opération la plus gourmande en carburant est le transport du miscanthus du champ vers le lieu de stockage, d'où l'intérêt de densifier la matière pour de longs trajets. Le miscanthus étant relativement volumineux (130kg de matière fraîche/m³), sa récolte nécessite beaucoup de trajets jusqu'au lieu de stockage. Dans le calcul ci-dessus, la distance du champ au lieu de stockage est de 10 km aller-retour (1/2 heure) et les bennes utilisées ont une capacité de 20 m³.

Il est à remarquer que certaines bennes peuvent être rehaussées grâce à des « panneaux » amovibles. Ce système permet de diminuer le nombre de trajets lorsque la matière transportée est volumineuse (typiquement pour les ensilages). La capacité peut aller jusqu'à 45 m³.

La deuxième place la plus polluante est occupée par la récolte de la plantation avec l'ensileuse.

En première année, on a considéré que la matière était broyée sur le champ, suite au passage d'une ensileuse, afin de constituer le mulch pour la deuxième année.

Les opérations liées à la mise en place de la culture sont peu émettrices de CO₂ compte tenu de la pérennité de la culture.

Les produits phytos sont quant à eux, peu responsables des émissions de gaz carbonique étant donné qu'on ne les applique que la première et la deuxième année d'implantation de la culture. Après, le mulch formé par les feuilles tombées au sol en hiver, est suffisant pour étouffer les adventices.

La première année, le désherbage est très important car les mauvaises herbes peuvent être néfastes à l'implantation du rhizome. En deuxième année, il peut être évité si le mulch formé

⁶ Source : Molenhuis J.R. (MAAO), 2001 pour les valeurs de temps de travail par hectare et les consommations horaires & Vandeputte F. (CIPF), 2008, communication personnelle, pour les valeurs concernant la préparation du sol.

la première année étouffe les mauvaises herbes. Le tableau 1-8 évalue les quantités d'herbicides appliquées. Les produits de désherbage utilisés en deuxième année ne sont pas encore bien établis. En attendant, on considérera que l'on utilise les mêmes qu'en première année.

Tableau 1-8: Estimation des produits phytos utilisés en culture de miscanthus⁷

année	produits	Min	Max	Quantités de matière active					
				l/ha		kg/l		kg/ha	
				Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Traitement d'automne en préémergence stricte		glyphosate		5		0,36		1,8
	traitement avant plantation		glyphosate		5		0,36		1,8
	traitement pré-émergence		Gardo gold		2		0,5		1,0
			Aspect T		2,25		0,533		1,2
	traitement post émergence		Calaris		1,5		0,4		0,6
			Dualgold		0,75		0,96		0,7
TOTAL (pour 20 ans)								2,2	4,9
2	traitement pré-émergence		Round up		4		0,36		1,4
	traitement post émergence		Calaris		1,5		0,4		0,6
			Dualgold		0,75		0,96		0,7
TOTAL (pour 20 ans)								0,0	2,8
TOTAL CUMULE (pour 20 ans)								2,2	7,7
TOTAL CUMULE (par année)								0,1	0,4

Au niveau des intrants, ils sont à bannir les premières années car ils risqueraient de favoriser les mauvaises herbes au détriment du miscanthus. Par après, il semblerait qu'ils ne soient pas indispensables.

Les tableaux 1-9 et 1-10 reprennent les quantités de carburants et de produits phytos utilisés par année. En multipliant ces valeurs par leurs émissions spécifiques⁸ on obtient ainsi les émissions de CO₂ par hectare.

⁷ Source : Foucart G. (CIPF), 2008, communication personnelle

⁸ Source : CWAPE, 2003

Tableau 1-9: Emissions de CO₂ liées à la culture du miscanthus

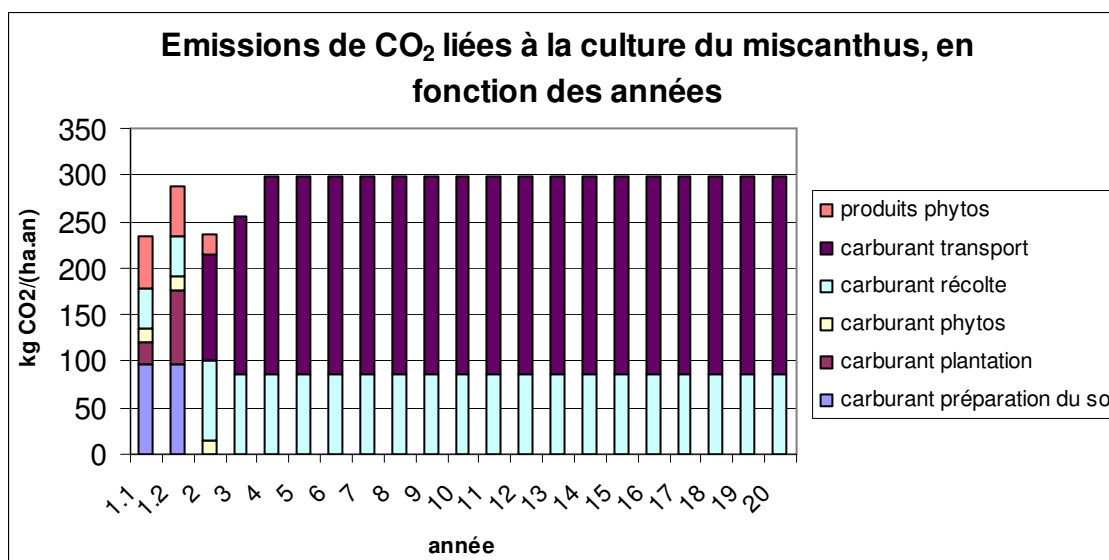
Poste	Consommation (kg/ha)		Emission spécifique (kg CO ₂ /kg)	année	Emissions (kg CO ₂ /ha)		Emissions (kg CO ₂ /t MS)
	Min	Max			Min	Max	
carburants (densité gasoil: 0,835 kg/l)							
année 1	36,5	78,2	3,64	1	132,8	284,6	12,3
année 2	58,0	61,3	3,64	1	211,1	223,1	12,8
année 3	70,3	70,3	3,64	1	256,0	256,0	15,1
année 4 à 20	81,9	81,9	3,64	17	5065,4	5065,4	298,0
TOTAL (pour 20 ans)					5665,3	5829,1	338,1
Phytos							
année 1	2,2	4,9	15,45	1	34,0	76,0	3,2
année 2	0,0	2,8	15,45	1	0,0	42,6	1,3
TOTAL (pour 20 ans)					34,0	118,7	4,5
TOTAL GENERAL (pour 20 ans)					5823,5		342,6
TOTAL GENERAL (par année)					291,2		17,1

Dans ce calcul, on ne tient pas compte des émissions de CO₂ provenant de la préparation des rhizomes, de leur acheminement jusqu'à la parcelle et celles liées à la fabrication des machines.

En général, les rhizomes sont stockés et préparés en Angleterre. Ils sont ensuite acheminés, par bateau, vers la France où ils sont dispatchés. Il est assez difficile d'en savoir plus...

Les émissions dues à l'acheminement des rhizomes jusqu'à la parcelle est bien entendu fonction de la distance. Le transport se fait par route (camion).

On néglige également l'entretien des abords de la parcelle ainsi que le stockage. Au niveau du stockage, le miscanthus ne nécessite pas de séchage, par opposition à beaucoup d'autres cultures ou à la sciure de bois.

 Figure 1-2 : Emissions de CO₂ liées à la culture du miscanthus, en fonction des années


On distingue les émissions liées à la culture du miscanthus lorsque la plantation se fait avec la planteuse spécialisée Bical (cas 1.1) ou avec une planteuse à pommes de terre modifiée (cas 1.2).

1.2.2. Consommation d'énergie liée à la culture du miscanthus

En reprenant les valeurs données aux tableaux 1-6 à 1-8 et en se basant sur les valeurs unitaires du carburant et des produits phytos, on obtient la consommation d'énergie nécessaire, par tonne de matière sèche, liée à la culture du miscanthus.

Tableau 1-10: Consommation d'énergie liée à la culture du miscanthus

Poste	Consommation (kg/ha)	Energie unitaire (MJ/Kg)	année	Energie totale (kWh/ha)	Energie totale (kWh/t MS)
carburants (densité gasoil: 0,835 kg/l)					
année 1	57,3	56	1	891,8	52,5
année 2	59,6	56	1	927,7	54,6
année 3	70,3	56	1	1094,1	64,4
année 4 à 20	81,9	56	17	21647,0	1273,4
TOTAL (pour 20 ans)				24560,6	1444,7
Phytos					
année 1	3,6	200	1	197,8	11,6
année 2	1,4	200	1	76,7	4,5
TOTAL (pour 20 ans)				274,4	16,1
TOTAL GENERAL (pour 20 ans)				24835,0	1460,9
TOTAL GENERAL (par an)				1241,8	73,0

1.2.3. Synthèse :

Tableau 1-11: Bilan énergétique et environnemental lié à la culture du miscanthus

		Plante entière
rendements (t MS/(ha*an))		17,0
Energie		
Energie produite par la plante		
PCI (MJ/kg MS)		18,0
PCI (kWh/kg MS)		5,0
kWh/(ha*an)		85000,0
kWh/t MS		5000,0
Energie primaire, nécessaire à la croissance de la plante		
kWh/t MS		73,0
kWh/(ha*an)		1241,8
REU		68,5
CO2		
CO2 émis tout au long de la culture		
kg CO2/t MS		17,1
kg CO2/(ha*an)		291,2

Dans les calculs, n'ont pas été pris en compte :

- la fabrication des rhizomes,
- l'acheminement des rhizomes jusqu'à la parcelle,
- éventuellement l'entretien des abords,
- les émissions de CO₂ et la consommation énergétique nécessaire à la fabrication des machines, des bâtiments,...

On a considéré ici l'itinéraire cultural type, qui pourra évidemment encore évoluer au fur et à mesure de la maîtrise de la culture. Le transport de la récolte du champ à la ferme est considéré de 10 km aller-retour.

A l'avenir, il faut chercher à diminuer les émissions dues aux transports. Pour cela, il faut chercher à densifier la matière directement sur la parcelle. Des essais de ballotage de la matière ensilée ont été réalisés avec succès. Il faut, dans ce cas tenir compte du broyage du ballot avant son utilisation, dans une usine de pelletisation par exemple. La fabrication de bûchettes devra également être envisagée.

1.2.4. Comparaison bibliographique

Dans « CO₂-balance for the cultivation and combustion of *Miscanthus* », Lewandowski *et al.* considèrent que la récolte se fait seulement à partir de la troisième année. Dans l'analyse précédente, on récolte la première année mais on laisse la matière au sol, la deuxième année, les rendements sont de 10t de MS/ha, 15t MS/ha la troisième année et 17t MS à partir de la quatrième année.

Lewandowski mentionne que le taux de matière sèche peut atteindre les 80%. Les valeurs obtenues précédemment tiennent compte d'un taux d'humidité de 30%, limite à partir de laquelle on décide ou non d'un séchage.

Dans les 2 cas, l'énergie nécessaire à la fabrication des machines, des bâtiments,... est considérée comme négligeable.

Le PCI utilisé par Lewandowski pour le mazout est de 42,7 MJ/kg et les émissions de CO₂ qui y sont associées sont de 3,45 kg CO₂/kg, pour l'électricité, elles sont de 171,8 kg CO₂/GJ. Nous allons quant à nous considérer un PCI de 44,4 MJ/kg qui est le PCI minimum indiqué par la norme ASTM D4868 et des émissions de 306 kg de CO₂/MWh_p⁹ pour le mazout soit 3,774 kg CO₂/kg. Pour l'électricité, les émissions sont de 456 kgCO₂/MWh_{él} soit 126,67 kg CO₂/GJ.

Tableau 1-12: Valeurs de référence utilisées

	Mazout		Electricité
	PCI	émission de CO ₂	
	MJ/kg	kg CO ₂ /kg	kg CO ₂ /GJ
Lewandowski et al.	42,7	3,45	171,8
ValBiom	44,4	3,774	126,67

Au niveau de l'itinéraire cultural, voici un tableau schématique des différentes opérations. La plantation de miscanthus se fait par la mise en terre de plantule, grâce à une planteuse forestière ou horticole à 2 rangs, et non de rhizomes comme on a plus l'habitude de le faire en Belgique. Le désherbage est effectué uniquement en première année, les parcelles sont irriguées et au niveau des engrais, ils se sont basés sur des apports de :

- 50 kg N, 200 kg K₂O et 50 kg P₂O₅ par hectare la première année,
- 70 kg N, 200 kg K₂O et 50 kg P₂O₅ par hectare la deuxième année,
- 100 kg N, 200 kg K₂O et 50 kg P₂O₅ par hectare à partir de la troisième année.

Les valeurs spécifiques d'émission de CO₂ et de consommation d'énergie sont également différentes de celles que l'on a utilisées.

⁹ Source : CWAPE, 2003

Tableau 1-13: Comparaison des différentes valeurs unitaires d'émission de CO₂ et de consommation d'énergie utilisées

	Emission spécifique			consommation d'énergie		
	kg CO ₂ /kg			MJ/kg		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Lewandowski et al.	2,6	1,48	0,86	45	17,4	10,5
ValBiom	2,42	0,666	0,479	70	12	7,5

Lewandowski tient également compte du N₂O et du CO₂ émis par le sol, le N₂O étant un gaz à effet de serre 150 fois plus important que le CO₂, et de la remise en état du sol après la culture.

Tableau 1-14: Consommation d'énergie et émission de CO₂ des différentes étapes de la culture¹⁰

	consommation d'énergie	émission de CO ₂	consommation de diesel	temps de travail	consommation totale
	KWh/t MS	kg CO ₂ /t MS	l/h	h/ha	l/ha
Préparation de la terre	1,4	0,4	7 - 10	2	14 - 20
Multiplication des plants	42,3	12,3			
Transport des plants	1,0	0,3			
Plantation	1,7	0,5	35	4 - 6	140 - 210
Production des engrais	103,8	25,3			
Transport des engrais	14,9	4,3			
Application des engrais	4,8	1,4	4,9	0,7	3,43
Produits phytos	1,3	0,4			
Irrigation	4,7	1,4			
émission de N ₂ O du sol		22,5			
récolte	29,8	8,6			
Transport de la récolte	49,6	14,4			
Préparation pour la combustion	90,1	19,5			
Remise en état de la parcelle	2,1	0,6	10 & 7	3 & 5	65
TOTAL	347,4	111,9			

Dans l'analyse ValBiom, par opposition à celle de Lewandowski (1995),

- la préparation des rhizomes ainsi que leur transport vers le lieu de plantation n'est pas pris en compte,
- on n'applique pas d'engrais ; pour le moment, l'épandage d'engrais ne fait pas partie de l'itinéraire cultural du miscanthus,
- les parcelles ne sont pas irriguées,
- on ne tient pas compte du protoxyde d'azote N₂O rejeté par le sol,
- la préparation du miscanthus pour sa combustion est considérée au point suivant,
- la remise en état de la parcelle est ignorée ici car des expériences doivent être réalisées prochainement à ce sujet.

Lorsqu'on néglige tous ces points, on arrive à un résultat assez proche de celui donné par Lewandowski : 73,0 kWh/t MS contre 83,8 et 17,1 kg CO₂/tMS (ValBiom), contre 24,3 pour Lewandowski.

¹⁰ Lewandowski et al., 1995.

2. Stockage du carbone dans les sols

2.1. Introduction

Les matières organiques du sol assurent de nombreuses fonctions environnementales. Elles constituent notamment un réservoir temporaire de carbone organique, pouvant agir comme source ou comme puits de carbone vis-à-vis de l'atmosphère. Les changements d'usage du sol et des pratiques agricoles influent sur l'évolution du stock de carbone des sols.

2.1.1. Les matières organiques du sol

Les matières organiques du sol proviennent de la transformation des débris végétaux par les organismes vivants, essentiellement les micro-organismes. Elles représentent sur terre, une masse de 2000 à 3500 Gt. En se décomposant, elles émettent du dioxyde de carbone (CO₂) et produisent des composés organiques plus ou moins stables, sous l'influence des conditions climatiques, températures et précipitations, et des conditions ambiantes du sol. Leur temps moyen de décomposition et de minéralisation est estimé à 15 ans mais leur temps de résidence dans le sol est extrêmement variable selon les types de composés organiques.

L'évolution du stock de carbone organique dans les sols résulte de l'équilibre entre le volume des apports végétaux au sol et la vitesse de minéralisation.

Fortement dépendant du type de couverture végétale, ce stock est en moyenne 1,6 fois plus élevé dans les sols à végétation permanente et sous forêt que dans les sols cultivés. Le type d'occupation du sol représente donc un enjeu important quant aux services écosystémiques rendus par les matières organiques du sol.

2.1.2. Les fonctions environnementales

Les matières organiques participent à la fertilité du sol, en libérant des éléments nutritifs (azote, phosphore, soufre, potassium) lors de leur minéralisation. Elles augmentent la résistance du sol au compactage, son aération et sa réserve en eau, favorisant la biodiversité du sol. Elles protègent le sol en limitant notamment l'érosion hydrique. Elles permettent de piéger les pollutions par rétention des métaux toxiques (cadmium, mercure, plomb) ou de micropolluants organiques. Leur présence renforce ainsi le rôle de tampon assuré par le sol vis-à-vis des autres compartiments environnementaux : biosphère, eaux superficielles, substrat géologique et aquifères profonds. Enfin, leur dynamique est une composante du cycle des gaz à effet de serre.

La quantité de carbone organique séquestrée dans les sols du monde est évaluée entre 1200 et 2000 Gt de carbone dans le premier mètre du sol (700 Gt dans les 30 premiers cm du sol).

2.1.3. Influence des types de sols et de leur occupation

Le stock de carbone organique des sols dépend des types de sols et de leur occupation. En zone tempérée, les valeurs s'échelonnent en moyenne entre 40t/ha sous sols cultivés, 65t/ha sous prairie et 70t/ha sous forêt dans les premiers cm du sol. Le stock de carbone est dépendant des types de sol.

2.1.4. Influence des changements d'usage de des pratiques agricoles

Certains changements d'usage ou de pratiques agricoles modifient le stock de carbone dans les sols. La conversion des cultures en prairies ou en forêt, par exemple, favorise le stockage du carbone. Au contraire, la mise en culture des prairies ou des forêts entraîne une diminution du stock de carbone.

Les vitesses d'évolution du carbone organique dans les sols ne sont toutefois pas symétriques. Ainsi, en 20 ans, le déstockage induit par la mise en culture est deux fois plus rapide que le stockage résultant de l'abandon de la culture au profit de prairies ou de forêts

Certaines pratiques agricoles favorisent le stockage de carbone dans les sols, mais il faut également considérer leur impact environnemental. Ainsi, l'intensification des cultures génère un faible stockage complémentaire de carbone mais augmente les risques de pollution

par les nitrates et les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) dans le bilan des gaz à effet de serre.

Les stockages induits dans le sol par les cultures intermédiaires (engrais verts,...), l'enherbement des inter-rangs dans les vignes et vergers et l'implantation de haies sont respectivement de l'ordre de 0,15 ,0,40 et 0,10 tC/ha/an.

L'instauration de végétation herbacée pérenne sur les jachères longues permettrait un stockage de carbone équivalent à celui d'une prairie permanente.

Enfin, les techniques culturales sans labour (travail du sol superficiel, semis direct, ...) génèrent un gain de stockage pouvant aller jusqu'à 0,20 tC/ha/an. Elles peuvent cependant avoir des effets négatifs, comme le compactage du sol ou la prolifération d'adventices ou de ravageurs qui peut induire l'usage accru de pesticides.

2.2. Estimation chiffrée par unité de surface du stockage de carbone dans le sol

Les stocks de carbone dans les sols sont en constante évolution sous l'effet de facteurs naturels (climat, végétation, teneur en argile et caractérisation hydrique du sol...) et anthropiques (impacts locaux des usages des sols,...). De cette combinaison de facteurs résulte une forte variabilité spatiale de ces stocks.

Les stocks de carbone sont exprimés en tC/ha et les flux en tC/(ha.an)

Le flux de stockage associé à une pratique ne peut être défini que par comparaison avec une autre pratique. On exprime donc de façon générale un flux de stockage net moyen annuel, positif ou négatif, associé à la pratique B succédant à la pratique A pendant une période donnée, et comparée à l'activité A si elle était continuée.

On définit ce flux comme : $F(A, B) = [C(B) - C(A)]/t$ où, à partir du même état initial, C(B) est le stock de carbone du sol sous B au temps t et C(A) est le stock de carbone du sol sous A au temps t.

Profondeur prise en compte

La quantité de sol prise en compte est typiquement la masse de sol comprise dans la couche 0-30 cm des systèmes labourés. Dans les comparaisons de pratiques où la densité de sol diffère, la comparaison concerne des masses de sol identiques. En général, sous forêt ou prairie, cette profondeur est supérieure à celle des systèmes labourés.

S'il est demandé de quantifier le potentiel de stockage dans l'épaisseur totale du sol, l'INRA propose de multiplier le stockage de la couche de référence 0-30 cm par 1,2. Ce chiffre correspond à une quantité de matières organiques jeunes (susceptibles d'évoluer en quelques décennies) trouvée en-dessous de 30 cm dans des systèmes céréaliers ou forestiers, égale à 17% des matières organiques jeunes totales du sol.

Carbone considéré

Est considéré comme carbone du sol, le carbone organique :

- dans ou posé sur le sol, mulchs, litières forestières et amas racinaires prairiaux compris,
- des organes végétaux souterrains non récoltés, à l'exclusion des parties racinaires des espèces arborescentes, comptabilisées par ailleurs dans la biomasse ligneuse.

Les parties aériennes vivantes ou sur pied de la végétation ne sont pas comptabilisées comme carbone organique du sol.

Les litières ne doivent pas être exclues du bilan. En effet, elles peuvent représenter en forêt 30% du carbone des horizons A. Le temps moyen de résidence du carbone peut y être de plusieurs décennies.

Moyenne temporelle

Le stockage moyen annuel du carbone dans les sols diminue avec le temps. Le flux moyen annuel F peut être calculé pour une durée de scénario T choisie :

$$F = \Delta \cdot [1 - \exp(-kT)]/T \quad \text{où : } \Delta = \text{différence de stock à l'équilibre} \\ C_{\text{éqB}} - C_{\text{éqA}}$$

k : constante de vitesse du stockage

L'expérience indique que la constante de vitesse dépend en général de l'usage B dans un changement d'usage A->B

Combinaison de pratiques

Afin de ne pas traiter toutes les combinaisons possibles de changements d'activité 2 à 2, les pratiques sont comparées dans la mesure du possible à une même référence, et si possible, le stockage associé à des pratiques combinées est calculé par sommation si leurs stockages sont additifs.

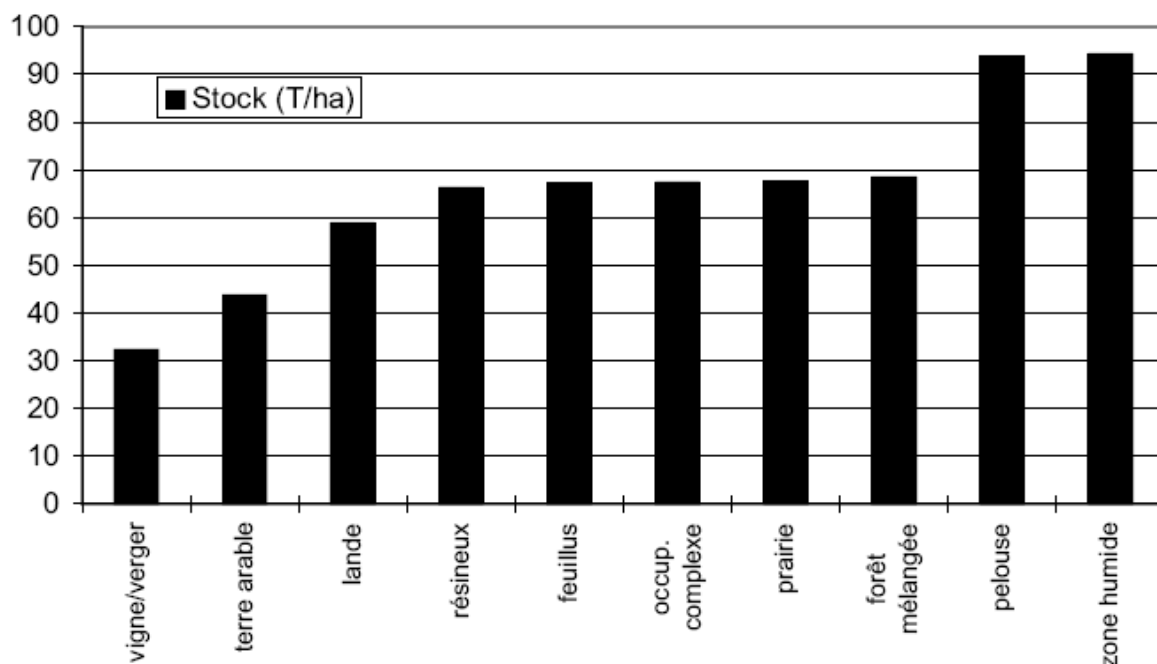
On dira qu'il y a ADDITIVITE si $F(A, B) + F(B, C) = F(A, C)$

On peut montrer qu'il y a additivité des flux si les constantes de vitesses des changements à combiner sont identiques.

2.2.1. Stock de carbone selon le mode d'occupation

Figure 2-1 : stocks de carbone du sol en fonction du mode d'occupation des terres

Occupations et stocks de carbone organique des sols (0-30 cm)



Les vignes et les vergers se distinguent par des stocks très faibles : ces cultures sont caractérisées par des restitutions organiques très faibles et parfois par un désherbage généralisé.

Les terres arables sont également caractérisées par des stocks relativement faibles : 40 – 43 tC/ha.

Les prairies et les forêts présentent des stocks extrêmement voisins, proche de 70 tC/ha pour les forêts, sans distinction entre les forêts de feuillus et de résineux, et 60 – 67,5 pour les prairies.

Il est à noter que le stock de carbone varie également en fonction du type de sol.

2.2.2. Effets des pratiques agricoles

Les pratiques agricoles jouent un rôle dans le stockage du carbone dans le sol, aussi bien pour les cultures que pour les prairies.

Voici quelques exemples :

Tableau 2-1: flux de stockage annuel en fonction des changements de pratiques agricoles

pratique	variation du stock tC/ha	flux annuel de stockage	
		sur 1 an	sur 20 ans
		tC/(ha.an)	
travail réduit du sol	12	0,24	0,2
la mise en place d'un engrais vert	8	0,2	0,16
diminution de la fertilisation azotée de façon à avoir un rendement 20% plus faible	-6	-0,24	-0,17

2.2.3. *Changement d'usage des terres*

En sachant que le stock moyen à l'équilibre de carbone du sol est de :

- 40 t/ha pour une terre de culture,
- 70 tC/ha pour une surface boisée et
- 65 tC/ha pour une prairie permanente pâturée,

Le miscanthus

Pour ce qui concerne le miscanthus, Clifton-Brown et al. (2007) sont arrivés à une augmentation de 8.9 +/- 2.4tC/ha pour une durée de 15 ans soit 0,6tC/(ha.an) pour le sud de l'Irlande. D'après le modèle de Matthews et Grogan (2001), on arrive à une augmentation de 0,86 tC/(ha.an) (Clifton-Brown et al., 2004). Hansen et al. (2004) obtiennent quant à eux une augmentation de 0.78 à 1.12 tC/(ha.an).

En 2007, les chiffres de Clifton-Brown et al. permettent d'obtenir la variation du stock de carbone stocké dans le sol liée à la culture du miscanthus pour différents pays d'Europe.

Tableau 2-2: lux de carbone du sol lié à la culture du miscanthus dans différents pays

	S de terrains potentiels	variation du stock de carbone du sol	
	10 ³ ha	10 ⁶ .tC/an	tCO ₂ /(ha.an)
Belgique	209	0,27	4.73
EU15	11644	12	3.78

3. Références bibliographiques

Sources bibliographiques

- ADEME, 2007, « Bilan Carbone : entreprises et collectivités », guide des facteurs d'émissions, version 5.0, France.
- Clifton-Brown J. C., Stampfl P. F. and Jones M. B., 2004, "Miscanthus biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions", *Global Change Biology*, n°10, pages 509-518.
- Clifton-Brown J. C., Breuer J. and Jones M. B., 2007, "Carbon mitigation by the energy crop, Miscanthus", *Global Change Biology*, n°13, pages 2296-2307.
- Clifton-Brown J. C., Neilson B. M., Lewandowski I, Jones M.B., 2000, "The modelled productivity of Miscanthus x giganteus (GREEF et DEU) in Ireland", *Industrial Crops and Products*, n°12, pages 97-109
- CWAPE, 2003, « Le régime des certificats verts dans le cadre de l'ouverture du Marché de l'Electricité en Wallonie », Belgique, 12p.
- Dubuisson X. et Sintzoff I. (UCL-BELBIOM), 1998, « Energy and CO2 Balances in Different Power Generation Routes Using Wood Fuel from Short Rotation Coppice », *Biomass and Bioenergy Vol.15*, n°4/5, p. 379-390.
- Dufey I. (UCL-ECAV), 1999, « Impact environnemental global de la filière de production d'électricité à partir de taillis de saule à très courte rotation », Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Agronomique, laboratoire ECAV, Belgique.
- Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, 2002 et 2005, « Fumure et protection phytosanitaire des céréales », éditeurs responsables : Falisse A. et Meeus P.
- Gogan P. and Matthews R. ?, "Review of the potential for soil carbon sequestration under bioenergy crops in the U.K.", scientific report, Cranfield University, Silsoe
- Goor F., Dubuisson X. et Jossart J.-M., 2000, « Adéquation, impact environnemental et bilan d'énergie de quelques cultures énergétiques en Belgique », *Cahiers Agricultures 2000*, n°9, p. 59-64.
- Grogan P. and Matthews R., 2002, "A modelling analysis of the potential for soil carbon sequestration under short rotation coppice willow bioenergy plantations", *Soil Use and Management*, n°18, pages 175-183
- Hansen E. M., Christensen B.T., Jensen L.S., Kristensen K., 2004, "Carbon sequestration in soil beneath long term Miscanthus plantations as determined by C-13 abundance", *Biomass and Bioenergy*, n°26, pages 97-105
- INS, 1994-2004, « Estimation de la production des cultures agricoles »
- Jannasch R., Quan Y. et Samson R. (REAP-Canada), « A Process and Energy Analysis of Pelletizing Switchgrass », Final Report, Canada.
- Jossart J.-M., 2003, « Emission de CO₂ de diverses sources de biomasse pour le calcul des certificats verts », ValBiom, Belgique, 15p
- Jossart J.M., Nijskens P., Remacle M.S., 2005, "Les biocarburants en Wallonie, 2ième édition » UCL - ValBiom
- Joye P., 2004, "Transformation et valorisation du colza à la ferme, Rapport final du projet TRICOF", FUSAGx, février 2004
- Lewandowski I., Kicherer A. et Vonier P., 1995, „CO₂-Balance for the cultivation and combustion of Miscanthus“, *Biomass and Bioenergy Vol. 8*, n°2, p. 81-90

- Marchal D., Ryckmans Y. et Jossart J.-M., 2003, "Emissions de CO2 fossile pour la fabrication et le transport des granules de bois – première évaluation", ValBiom, Belgique, 11p.
- Miserque O., Tissot S., Bruart J. (CRA-Génie Rural), « Indicateurs des performances et des coûts d'utilisation des machines agricoles », Belgique.
- Molenhuis J.R. (MAAO), 2001, « Comment calculer les coûts des machines agricoles », fiches techniques du Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des affaires rurales de l'Ontario, Canada, www.omafra.gov.on.ca/french/busdev/facts/01-076.htm (le 30/07/2008).
- Nijskens P. (UCL-ECAV), "Bilan énergie et CO2 de la culture de TtCR de saule dans le cadre du projet WILWATER, Projet WILWATER, Belgique, 29 p.
- Nijskens P., 2001, « Guide pratique de la culture du miscanthus », ValBiom, Belgique
- Nijskens P., 2006, « Comparaison des cultures énergétiques utilisées en transformation thermo-chimique », ValBiom, Belgique, 51p.
- Nijskens P., Spies J., 2006, « Projet de démonstration AGRICOL : Production optimale d'une huile carburant de qualité », UCL-ECAV, octobre 2006
- NTB-nett, 2003, "Eubionet – Liquid Biofuels Network, Final report", Avril 2003, projet Altener, ADEME, Paris, France
- Scharmer K., 2001, "Biodiesel: Energy and environmental evaluation – Rapeseed oil methylester", UFOP, November 2001, 61p.
- Services Fédéraux Des Affaires Scientifiques Techniques et culturelles, 2000, « Le transport fluvial et son développement durable », rapport final, ANAST, Belgique
- Smith, P., D. S. Powlson, et al. (1997). "Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments." *Global Change Biology* 3(1) pages 67-79.
- Spies J., 2006, « Conditions de trituration optimales pour la production d'une huile de colza carburant en filière courte », mémoire de fin d'étude, UCL.

Sources Internet

- fr.wikipedia.org/wiki/Port_en_lourd (le 04/09/2008)
- <http://www.agriculteur-normand.com/actualites/machinisme-ensilage-consommation-a-l-ensilage-de-mais-vous-pouvez-reduire-la-facture&fldSearch=:2V1O82HM.html> (le 02/10/2008)
- www.belspo.be/belsop/home/publ/pub_ostc/mobil/rMD17_fr.pdf (le 04/09/2008)
- www.ifen.fr/actualites/presse/detail-d-un-communique-ou-dossier/article/placeholder-ws1-11.htm (le 08/09/2008)
- www.mazout.be/groupe.php3.
- www.mobilit.fgov.be/data/aqua/GE_Belgium.pdf (le 08/09/2008)
- www.techno-science.net (le 04/09/2008)
- www.thermobois.fr/