

Adéquation, impact environnemental et bilan d'énergie de quelques cultures énergétiques en Belgique

François Goor, Xavier Dubuisson, Jean-Marc Jossart

L'utilisation de biomasse (produite à partir des cultures dites énergétiques) à la place des carburants traditionnels a un impact environnemental positif. Elle permet, entre autres, la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les gains en CO₂ dans le cas de l'utilisation énergétique de biodiesel de colza, bioéthanol de betterave ou bois de taillis à très courte rotation en remplacement des combustibles fossiles équivalents vont de 2,5 à 3,8 tonnes de CO₂ par tonne équivalent pétrole, soit de 59 à 90 % des émissions totales [1]. Dans certains cas, une conduite de culture plus respectueuse de l'environnement permet également de conserver la qualité des nappes phréatiques (*via* la réduction des intrants, notamment les engrais) et de lutter contre l'érosion quand il s'agit de cultures pérennes ou de cultures couvrant le sol longtemps. Par ailleurs, les productions agricoles traditionnelles étant pour la plupart excédentaires en Europe, des surfaces croissantes sont disponibles pour d'autres utilisations, par exemple dans le cadre de la recherche de nouvelles sources de revenus agricoles. D'où un intérêt grandissant pour le développement des cultures énergétiques et leur valorisation, en parallèle avec les autres

sources de biomasse, pour la production d'énergie [2].

Une revue bibliographique a été réalisée dans le cadre du projet européen RECOVER*, pour identifier les principales cultures énergétiques potentielles et comparer leur adaptation et leurs performances relatives, dans les conditions climatiques de la Belgique. Par « cultures énergétiques potentielles », nous entendons aussi bien les cultures non alimentaires dont la vocation première est de produire de la matière première énergétique que les cultures alimentaires pour lesquelles la production d'énergie n'est pas la voie traditionnelle de valorisation. Les différentes caractéristiques prises en compte pour le choix des cultures ont été leur importance relative dans le paysage agricole belge, leur résistance aux maladies et parasites, leur adaptabilité à différents sols et climats, leur possible utilisation comme cultures énergétiques ainsi que leur productivité potentielle, leur bilan énergétique et l'état de développement des voies de valorisation de la biomasse produite. Cinq cultures annuelles (betterave sucrière, blé, colza, topinambour et sorgho sucrier), une culture herbacée pérenne (*miscanthus*) et une culture pérenne lignocellulosique (taillis de saule à très courte rotation, TtCR) ont ainsi été comparées (tableau 1).

Dans chaque cas, nous avons collecté des données concernant l'écophysiologie de la culture, ses besoins en sol, en eau et en température et ses indicateurs phytotechniques (rotation, préparation du sol, semis ou plantation, fertilisation, désherbage et lutte contre les parasites, récolte et rendements). L'étude des utilisations alimentaires et/ou non alimentaires de la biomasse a permis d'établir un bilan énergétique en la matière.

Valorisation énergétique des cultures

Les jus sucrés provenant de la betterave, du blé, du topinambour et du sorgho peuvent être transformés par fermentation en éthanol qui, pur ou sous la forme d'ETBE (éthyl tertio butyl éther), peut être ajouté à l'essence sans plomb pour améliorer son indice d'octane [1, 3-5]. L'huile de colza peut être transformée par estérification en biodiesel et se substituer au diesel d'origine fossile [1, 6]. Les tiges de *miscanthus*, récoltées annuellement, ont une valeur énergétique proche de celle des pailles de céréales et peuvent être valorisées comme combustible pour la production de chaleur [7-9]. Le TtCR consiste à cultiver des saules (ou des peupliers) plantés à très haute densité, dont les tiges (rejets de souches) sont récoltées tous les 3 à 5 ans. Le bois de TtCR est utilisé comme combustible pour la production de chaleur

F. Goor, X. Dubuisson, J.-M. Jossart : UCL, Laboratoire d'écologie des grandes cultures, place Croix-du-Sud 2, bte 11 B-1348, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Tirés à part : F. Goor

* RElevancy of short rotation COppice VEgetation for the Remediation of contaminated areas. Project F14-CT95-002c (PL960386), co-funded by the Nuclear Fission Safety Programme of the European Commission.

Tableau 1

Description de quelques cultures énergétiques en Belgique

Topinambour



Famille : Astéracées. Plante annuelle (culture pérenne possible à partir des rejets).

Description : les parties souterraines contiennent des racines fibreuses et des stolons qui produisent des tubercules (poids : 20 à 200 g), plus ou moins bulbeux et ramifiés. La production des stolons démarre en juin (de 9-10 jours à 2 mois après l'émergence) et peut se prolonger jusqu'en septembre. Quand les stolons existants ont atteint leur croissance potentielle, d'autres peuvent s'initier et commencer à accumuler du sucre. La tige cylindrique robuste, haute de 2 à 4 mètres, peut produire des ramifications. Le limbe foliaire est de forme ovale. La pollinisation n'est pas croisée (allogamie). Le fruit est un akène (longueur : 5-6 mm ; poids : 10 mg). Selon la variété, le cycle de croissance dure de 100 jours à 9 mois [27, 28].

Remarques : comme culture, le topinambour a presque complètement disparu. Néanmoins, récemment, sa réintroduction a été étudiée, notamment à cause de sa résistance aux maladies et aux parasites, et de son faible coût de production.

Sorgho sucrier



Famille : Poacées (monocotylédones). Espèce présentant une photosynthèse en C₄.

Description : les racines sont fasciculées, bien développées et s'étalent parfois sur 2-3 mètres de profondeur et 0,6-1,5 mètre de largeur. La tige creuse est haute de 0,5 à 4 mètres, l'apparition de talles étant fonction de la variété. Durant la phase du tallage, des tiges secondaires latérales se forment à partir des primordia de tige. L'élongation de la tige s'arrête à la floraison. Les feuilles sont larges et ondulées avec une grosse nervure centrale. Douze jours après l'émergence, la plante peut déjà avoir formé 5 feuilles. La pollinisation est croisée. L'inflorescence est un panicule ramifié. Les épillets sont placés par paires : l'un est large, sessile et hermaphrodite ; l'autre est long et étroit, mâle et pédonculé. Chaque épillet sessile contient 2 fleurs : l'une est stérile, et l'autre contient la graine. La graine est un caryopse dont le diamètre varie entre 4 et 8 mm. La croissance des parties aériennes commence lentement, en parallèle avec le développement d'un système racinaire profond composé de racines fibreuses et de racines adventives ramifiées [28, 29].

Remarques : principalement utilisé pour l'alimentation humaine et animale (sorgho grain), le sorgho peut aussi produire des fibres (sorgho fibre, industrie papetière), du jus sucré (sorgho sucrier ou doux) ou du fourrage (sorgho fourrager) en fonction des variétés choisies.

Miscanthus



Famille : Poacées (monocotylédones). Plante pérenne rhizomateuse pourvue d'une photosynthèse en C₄. La longueur du cycle de rotation est de 10 ans.

Description : la racine rhizomateuse est formée d'une masse compacte, de 30 à 40 cm de diamètre, qui peut s'enfoncer de plus de 2 mètres dans le sol. Les bourgeons, points de départ des tiges, sont placés sur les rhizomes. Chaque tige est annuelle, démarre durant le mois de mai et croît jusque fin octobre. Il y a environ 20 à 30 tiges par plante, qui se lignifient progressivement et finissent par montrer une cavité centrale. Une fois la canopée fermée, la densité de tiges vivantes est d'environ 80-100.m⁻². Durant la troisième ou quatrième année de production, les tiges peuvent atteindre une hauteur de 3 mètres. Les feuilles, longues et élancées, forment une gaine foliaire autour de la tige. Les limbes foliaires sont en dents de scie. Les inflorescences sont constituées de panicules dans lesquels les fleurs mâles et femelles sont arrangées en épillets [28, 30].

Remarques : le miscanthus est sensible à la verse en cas de vent fort.

Taillis de saule à très courte rotation



Famille : Salicacées.

Description : le saule est un arbuste ou un petit arbre dont les bourgeons sont protégés par une seule écaïlle. Les feuilles sont alternes, dentées ou non, et présentent souvent un petit pédoncule. C'est une espèce dioïque ; les chatons mâles et femelles sont cylindriques ou ovoïdes et apparaissent avant, pendant ou après les feuilles. Le bois est tendre, légèrement coloré, parfois plus sombre au centre des tiges, et de faible densité [31].

Remarques : la culture de saule en taillis à très courte rotation consiste à cultiver des saules à une densité élevée (10 000 à 20 000 plantes.ha⁻¹), avec des rotations de 2 à 5 ans. La durée de vie totale de la plantation est de 20-25 ans, après quoi les rendements en biomasse décroissent. D'autres espèces que le saule sont également étudiées, qui montrent des caractéristiques de résistance qui peuvent s'avérer intéressantes dans certains cas [22].

Description of some energy crops in Belgium

et/ou d'électricité par combustion directe ou *via* gazéification [1, 10, 11].

Comparaison des cultures

Le *tableau 2* synthétise les avantages et inconvénients des différentes cultures, sur la base de leur adaptabilité à différents

sols et climats, de leur impact environnemental (pollution des nappes et érosion) ainsi que de leur bilan énergétique, exprimé sous forme d'un rapport extrants sur intrants (appelé efficacité énergétique). Ce dernier point pose problème pour les cultures où se côtoient différents co-produits, car il n'est pas toujours possible de dissocier les consommations d'énergie associées au produit principal de celles associées aux co-produits. Deux approches ont été retenues :

– l'efficacité énergétique réduite (rapport du produit principal sur tous les intrants) ;

– l'efficacité énergétique complète (rapport de tous les extrants du produit principal et des co-produits sur tous les intrants, en attribuant, dans la mesure du possible, leur valeur calorifique aux co-produits).

• Les trois cultures classiques (betterave, blé et colza) montrent des caractéristiques semblables. Elles supportent diffi-

Tableau 2

Paramètres de comparaison des cultures énergétiques en Belgique

	Betterave	Blé	Colza	Topinambour	Sorgho sucrier	Miscanthus	TtCR de saule
Importance relative de la culture	+++	+++	+	-	+	-	+
Cycle de vie de la culture	annuelle	annuelle	annuelle	annuelle	annuelle	pérenne (10 ans)	pérenne (20-25 ans)
Sol optimum	limon	limon	limon sableux	peu exigeant	peu exigeant	limon sableux	peu exigeant
pH optimum	6,8-7,2 (> 5,0)	7,0-8,5	7,0 (3,8-7,8)	peu exigeant	peu exigeant (6,0-7,0)	5,5-7,5	5,5-7,0 (4,5-8,5)
Apport optimum en eau (mm.an ⁻¹)	600-700	450	380-460	peu exigeant	400	500-1 000	400-600
Efficacité d'utilisation de l'eau (1 kg ⁻¹ MS)	100-476	500	700	élevée	200-300	327	non disponible
T° min. pour la germination (base) (°C)	3-5	0	0	0	10-12	10	5,6
ΣT° requise pour le cycle (°C)	2 400-2 800	2 500	2 900	2 000-3 000 ⁴	1 600-1 900	non disponible	> 875
T° de croissance optimum (°C)	24	20-22	< 25	non disponible	30	≥ 25	non disponible
Date de semis ou de plantation	20/03-20/04	01/10-01/11	< 15/09	15/04	15/05 (15/04-01/07)	15/05-01/08	01/04-31/05 (< 01/07)
Date de récolte	01/10-01/12	20/07-10/08	20/06-10/07	hiver	01/10-15/10	01/03-15/05	hiver
Fréquence des récoltes	annuelle	annuelle	annuelle	annuelle	annuelle	annuelle	annuelle
Apports conseillés en N (kg.ha ⁻¹)	150-200	120-200	120-200	40-100	120 (80-200)	100-150 ⁶	60-80 ¹
Apports conseillés en P ₂ O ₅ (kg.ha ⁻¹)	80-100	50-80	80-100	60-80	60-100	150-200	14,10 ¹
Apports conseillés en K ₂ O (kg.ha ⁻¹)	150-200	50-80	90-180	125-150	60-200	150	72,35 ¹
Rendement ⁵ (*10 ³ kg.ha ⁻¹)	10-17,5 (tubercules)	6,4-6,8 (graines)	2,7-3,7 (graines)	12-20 (tubercules)	25-45 (tiges et feuilles)	20-25 (tiges) ²	10-12 (tiges) ³
Produit énergétique principal	bioéthanol	bioéthanol	biodiesel	bioéthanol	bioéthanol + bagasses	lignocellulose	lignocellulose
Efficacité énergétique <i>réduite</i> ⁷	0,86-0,92	1,07	1,49	4,63	3,63		
Efficacité énergétique <i>complète</i>	1,8-2,4	2,9	2,5 (5,0)	10,9	10,2-12,4	10,6	20-30

Avantage = gras. Inconvénient = vert.

¹ : pas durant l'année d'établissement. Les années suivantes, le calcul de la fertilisation doit prendre en compte le fait que les feuilles retournent au sol chaque automne, fournissant des nutriments.

² : à partir de l'année 3.

³ : valeur moyenne sur 4 ans.

⁴ : valeur pour *Helianthus annuus*.

⁵ : poids exprimé en matière sèche.

⁶ : difficile à évaluer (le miscanthus est capable de redistribuer de l'azote provenant des parties aériennes vers les rhizomes avant la période hivernale, pour l'utiliser dans les périodes de croissance suivantes).

⁷ : ne tient compte que du produit énergétique principal (bioéthanol ou biodiesel).

Parameters for the comparison of energy crops in Belgium

Summary

Suitability, environmental impact and energy balance of some energy crops in Belgium

F. Goor, X. Dubuisson, J.-M. Jossart

In Europe, due to increasing surpluses of agricultural products, a growing area of farm land may become available for other purposes and more and more farmers are looking for new income sources. As a result, there is a growing interest for the use of energy crops and various biomass sources for energy. A literature study was conducted to identify the main potential energy crops and to compare their relative suitability and sustainability when cultivated under Belgian soil and climate conditions. The characteristics taken into account for crop choice were their relative expansion in Belgium, their hardiness, their adaptability to various soils and climates, their potential use as energy crops, their productivity level, and the development of their use for biomass. Five annual crops (sugar beet, wheat, oilseed rape, Jerusalem artichoke and sweet sorghum), one perennial crop (miscanthus) and one perennial lignocellulosic crop (willow short rotation coppice SRC) were compared (Table 1). We collected information about crop eco-physiology, soil, water and temperature requirements, phytotechnical indicators (rotation, soil preparation, sowing or planting, fertilisation, weeds, pests and parasites, harvest and yields). Food and non-food potentials, together with biomass energy balance were also detailed (Table 2).

Sugar beet, winter wheat and oilseed rape show more or less the same characteristics. They hardly cope with acid soils and require temperatures around 20-25°C for optimum growth. Their required nitrogen fertilisation is quite high to reach acceptable yields. Their energy efficiency is around 2.5-3, when the by-products, usually metabolisable by livestock, are taken into account, but goes down close to 1 when considering only the main products (bioethanol or biodiesel), because of the high energy consuming transformation cycle required to produce liquid biofuels. To compare various forms of energy, it would be useful to evaluate their relative added-value. In the present case, liquid biofuels have a larger added value than lignocellulose (higher energy content per volume unit, easier substitution to liquid fossil fuels), but this added value is difficult to quantify. Comparing all crops on the basis of the same valorisation path (for example, production of heat and electricity by biomass combustion) is theoretical and unrealistic and does not allow to evaluate an added value for the biofuels. The interest of such crops for biofuels is clearly depending on food crops overproduction and political will.

Jerusalem artichoke is an interesting hardy crop, little demanding in terms of soil and water, able to grow under a wide range of weather conditions. The tubers can stand in soil during winter, allowing to harvest when time and workforce are available. Potential yields permit to reach a good energy efficiency, but cropping still encounters some problems, while the lack of experimentation makes yield prospect uncertain.

The main problem of sweet sorghum and miscanthus is temperature requirements. The minimum germination temperature is round 10-12°C (sometimes observed late in the growing season), while the optimum growing temperature is about 25 to 30°C. These crops are very sensitive to frost and not well adapted to Belgian climate. Under appropriate conditions, their energy efficiencies are satisfactory, comparable to Jerusalem artichoke.

Willow (cultivated as short rotation coppice) shows many advantages, although it is water demanding. It can be grown on slightly acid soils, is harvested in the winter (when farm operations are reduced, and when all leaves have fallen on the soil, providing nutrients for the following growing seasons, so that fertilisation can be reduced). As a perennial crop, it helps to control erosion and nitrate leaching, while its yields (10 to 12 tons of oven-dry matter) allow to reach a high energy efficiency (20 to 30, depending on the chosen valorisation path). Willow seems to be a promising crop, adapted to various soil and climate conditions, less demanding for fertilisation, and highly efficient from an energy point of view. It can be burned in various heat and/or power plants, alone or combined with existing wood waste.

Cahiers Agricultures 2000 ; 9 : 59-64.

cilement les sols acides et nécessitent des températures proches de 20-25 °C pour une production optimale [12-14]. La fertilisation azotée requise est relativement élevée. La fumure azotée optimale est un compromis entre un profit maximal pour l'agriculteur est un minimum de reliquats dans le sol à la récolte. De plus, la fumure doit être raisonnée sur la totalité de la rotation et non sur une seule culture, car les reliquats peuvent être utilisés par la culture suivante [1, 15-18]. L'efficacité énergétique est d'environ 2,5-3 quand les sous-produits, généralement métabolisables par le bétail, sont pris en

compte. Cette valeur descend à 1 pour les produits énergétiques principaux (bioéthanol ou biodiesel) [3]. Cette faible efficacité énergétique (comparée aux produits lignocellulosiques) découle du fait que le cycle de transformation en biocarburants de la betterave, du blé et du colza consomme une grande quantité d'énergie. Pour comparer de façon pertinente différentes formes d'énergie, il faut tenir compte de leur valeur ajoutée relative. Dans le cas présent, les biocarburants liquides ont une valeur ajoutée élevée par rapport aux produits lignocellulosiques (contenu énergétique supé-

rieur par unité de volume, substitution plus facile aux carburants fossiles liquides), mais cette valeur ajoutée est difficile à quantifier.

• Le topinambour est intéressant de par sa rusticité (tableau 1). Peu exigeant en ce qui concerne le sol et l'eau disponible, il est apte à croître dans une large gamme de conditions climatiques. Les tubercules peuvent séjourner dans le sol durant l'hiver, ce qui permet de les récolter lorsque le temps et la main-d'œuvre sont disponibles. Les besoins en fertilisants sont comparativement faibles pour un rendement équivalent [19]. La

production élevée de matière sèche dans les tubercules conduit à un bilan énergétique très favorable [20, 21]. Néanmoins, la culture du topinambour se heurte à l'apparition de repousses dans la culture suivante, tandis que le manque d'expérimentation rend incertaines les prévisions de rendement.

Le principal problème du sorgho sucrier et du miscanthus concerne leurs besoins thermiques (tableau 1). La température minimale de germination est d'environ 10-12 °C (valeur qui peut n'être atteinte qu'assez tard dans la saison en Belgique), tandis que la température de croissance optimale est supérieure à 25-30 °C [22]. Ces cultures sont très sensibles au froid et mieux adaptées aux basses latitudes où elles peuvent atteindre des rendements très élevés. La culture pluriannuelle de miscanthus limite les périodes de sol nu et donc le risque de pollution des nappes aquifères ; elle a une action anti-érosive en stabilisant le sol *via* son système racinaire. En fin de croissance, le miscanthus délocalise l'azote des parties aériennes et le stocke dans les tubercules, réduisant d'autant la fertilisation azotée des années suivantes. En année favorable et dans de bonnes conditions, le bilan énergétique du sorgho sucrier et du miscanthus est satisfaisant et comparable à celui de topinambour [3].

La culture de taillis de saule à très courte rotation présente plusieurs avantages mais avec des besoins importants en eau (tableau 1). Le saule peut être cultivé sur des sols légèrement acides [23] et récolté durant l'hiver, quand la main-d'œuvre agricole est disponible et quand les feuilles sont tombées, ce qui fournit au sol des nutriments qui seront récupérés par le système racinaire dès la reprise de la végétation, de sorte que la fertilisation peut être réduite [24]. Les traitements herbicides sont limités aux deux premières années des vingt-cinq que dure en moyenne une plantation. Une fois le taillis établi, il exerce une compétition très forte vis-à-vis des adventices [25] et, tout comme le miscanthus, il constitue donc une barrière efficace contre la pollution des nappes aquifères et l'érosion. Les rendements très élevés (10 à 12 tonnes de matière sèche.ha⁻¹.an⁻¹) permettent d'atteindre l'efficacité énergétique la plus élevée (20 à 30) parmi les cultures présentées. Cependant, le bois produit par le TtCR est une source d'énergie moins élaborée que les biocarburants liquides qui peu-

vent répondre à des exigences d'utilisation plus strictes.

Conclusion

Le TtCR de saule semble une culture énergétique prometteuse, adaptée à des sols et climats variés, peu exigeante en éléments fertilisants et permettant de lutter efficacement contre l'érosion. Le TtCR de saule présente un bilan énergétique très favorable et le bois produit peut être valorisé dans des unités de production d'électricité et/ou de chaleur, soit seul, soit combiné à des déchets de bois existants [10]. Le développement des cultures traditionnellement alimentaires (betterave, blé et colza) dans l'optique de la production de biocarburants est lié à un cycle de transformation assez lourd, avec pour conséquence un bilan énergétique proche de zéro. Dans l'avenir, l'intérêt de cette option dépendra, entre autres, de la structure du marché de l'énergie, de l'existence d'une surproduction agricole (en ce qui concerne la valorisation alimentaire) et d'une volonté politique. Enfin, au vu des problèmes de conduite de culture qu'ils posent et des incertitudes à leur propos, il est peu probable que le topinambour, le sorgho ou le miscanthus connaissent une extension importante dans un futur proche [26] ■

Références

- Jossart JM, Vanhemelryck JL, Ledent JF. Impact environnemental de trois cultures énergétiques et bilan d'énergie. *Cahiers Agricultures* 1995 ; 4 : 377-82.
- Biewinga EE, van der Bijl G. *Sustainability of energy crops in Europe. A methodology developed and applied*. Utrecht : Centre for Agriculture & Environment, 1996.
- Janssens M, Meekers E, Chapelle J, Jacquemin JC. *Production de bio-éthanol à partir du sorgho sucrier et de la betterave sucrière en Wallonie : étude de faisabilité : rapport final*. Huy : Sorghal, 1992.
- Martin J, Vanhemelryck JL. *Les combustibles et carburants d'origine agricole*. Louvain-la-Neuve : Unité thermodynamique et turbomachines, Faculté des sciences appliquées, Université catholique de Louvain, 1992.
- Wéron JP, Thyron FC. Production d'alcool éthylique à partir de topinambour. *Annales de sciences économiques appliquées* 1982 ; 38 : 29-53.
- Anonyme. *Colza : physiologie et élaboration du rendement*. Paris : Cetiom, 1988.
- Anonyme. *Journée d'information sur le sorgho et le miscanthus*. Huy : Institut supérieur industriel de la Communauté française, 1994.

- McCarthy S, Mooney M. European Miscanthus Network. In : Chartier P, Beenackers AACM, Grassi G, eds. *Proceedings of the 8th European Biomass Conference* (vol. 1), Vienna, Austria, 1994.
- Ségaud L. *État de l'art de la culture du miscanthus et de ses débouchés potentiels*. Paris : Institut national agronomique de Paris-Grignon, 1994.
- Towers W, Morrice J, Aspinall R, Birnie D, Dagnal S. *Assessing the potential for Short Rotation Coppice in Scotland*. Oxfordshire : ETSU, Didcot, 1996.
- Willebrand E. *Growth dynamics of willow coppice systems in relation to management measures. Comprehensive summary of thesis*. Uppsala : Swedish University of Agricultural Sciences, 1993.
- Ledent JF. *Points de repère en phytotechnie spéciale*. Louvain-la-Neuve : Faculté des sciences agronomiques, Université catholique de Louvain, 1996.
- Moule C. *Plantes sarclées et diverses*. Paris : Phytotechnie spéciale, La Maison rustique, 1972.
- Simon H, Codaccioni P, Lecœur X. *Produire des céréales à paille*. Paris : Agriculture d'aujourd'hui (Sciences, techniques, applications), Éditions Technique et Documentation, Lavoisier, 1989.
- Alexander JT, Hawkes GR, Johnson RT, Rush GE. *Advances in Sugarbeet Production : principles and practices*. Ames : The Iowa State University Press, 1971.
- Chapman SR, Carter LP. *Crop production : principles and practices*. San Francisco : W.H. Freeman and Company, 1976.
- Cooke DA, Scott RK. *The Sugar Beet Crop (Science into practice)*. London : Chapman & Hall, 1993.
- Eddowes M. *Crop production in Europe*. London : Oxford University Press, 1976.
- Barloy J. Techniques of cultivation and production of the Jerusalem Artichoke. In : Grassi G, Gosse GI, eds. *Proceedings of the First EEC Workshop on Jerusalem Artichoke* (Madrid, 30 September-01 October 1987). Luxembourg : ECC Report EUR 11855, 1988.
- Barloy J. Yield Elaboration of Jerusalem Artichoke. In : Grassi G, Gosse GI, eds. *Proceedings of the First EEC Workshop on Jerusalem Artichoke* (Madrid, 30 September-01 October 1987). Luxembourg : ECC Report EUR 11855, 1988.
- Spitters CJT. Modelling crop growth and tuber yield in *Helianthus tuberosus*. In : Grassi G, Gosse GI, eds. *Proceedings of the First EEC Workshop on Jerusalem Artichoke* (Madrid, 30 September-01 October 1987). Luxembourg : ECC Report EUR 11855, 1988.
- Bezpalý I. *Les plantes cultivées en Afrique orientale*. Moscou : Éditions Mir, 1984.
- Blake TJ, Tschaplinski TJ. Water relations. In : Mitchell CP et al., eds. *Ecophysiology of short rotation forest crops*. London : Elsevier Science Publishers Ltd, 1992 : 66-94.
- Ericsson T, Rytter L, Linder S. Nutritional dynamics and requirements of short rotation forests. In : Mitchell CP et al., eds. *Ecophysiology of short rotation forest crops*. London : Elsevier Science Publishers Ltd, 1992 : 35-65.
- Christersson L, Ramstedt M, Forsberg J. Pests, diseases and other injuries in short rotation forestry. In : IEA Bioenergy (task VIII & XII). *Handbook on how to grow short rotation forests*. Uppsala : Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Short Rotation Forestry, 1995.
- Jossart JM. *Agriculture et productions non alimentaires*. Louvain-la-Neuve : Laboratoire d'écologie des grandes cultures, Faculté des sciences agronomiques, Université catholique de Louvain, 1993.
- Denoroy P. The crop physiology of *Helianthus tuberosus* L. : a model orientated view. *Biomass and Bioenergy* 1996 ; 11 : 11-32.

28. Le Clech B. *Références : Productions végétales (grandes cultures)*. Bordeaux. Édition Synthèse agricole, 1993.
29. Grassi G, Gosse G. *Sweet sorghum*. Luxembourg Commission of the European Communities (Directorate General, Science, Research and Development), 1990.
30. Jonkanski F. Miscanthus. The Future Biomass Crop for Energy and Industry. In : Chartier P, Beenackers AACM, Grassi G, eds. *Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry*. Vienna : Proceedings of the 8th European Biomass Conference (vol. 1), 1994.
31. Ledin S. Cultivation method. In : *The Swedish Energy Forestry Programme*. Uppsala : Swedish University of Agricultural Sciences, 1991.

Résumé

L'utilisation de biomasse pour produire de l'énergie a un impact positif sur l'environnement et permet la diversification des exploitations agricoles en Belgique. Les valorisations énergétiques de cultures traditionnellement alimentaires (betterave, blé, colza) ou de cultures moins répandues ou plus novatrices (topinambour, sorgho, miscanthus, taillis de saule à très courte rotation) ont été comparées à cet égard sur la base de leur adaptation aux conditions pédo-climatiques, de leur impact environnemental ainsi que de leur bilan énergétique.

Le taillis de saule semble le plus prometteur : il est adapté à des sols et climats variés (en particulier aux conditions belges), est peu exigeant en éléments fertilisants, permet de lutter efficacement contre l'érosion et présente un bilan énergétique très favorable. Les cultures alimentaires (betterave, blé et colza) sont désavantagées en tant que producteurs de biocarburants par un cycle de transformation lourd et fort dépendant des facteurs économique-politiques, tandis que le topinambour, le sorgho ou le miscanthus ne sont pas adaptés aux conditions belges.
