

Energetische Verwertung von Futtermitteln: Vergleich der drei Nutzungswege, Herausforderungen und Chancen

F. Ghysel(1,3), B. Godin(1,4), C. Flamin(5), P. Delfosse(6), J. Delcarte(1), D. Stilmant(2)

1 : Centre wallon de Recherches agronomiques - Unité Biomasse, bioproducts et énergies. Chaussée de Namur, 146. B-5030 Gembloux (Belgien). E-mail : f.ghysel@cra.wallonie.be

2 : Centre wallon de Recherches agronomiques - Unité Systèmes agraires, territoires et technologie de l'information. Rue de Serpont, 100. B-6800 Libramont (Belgien).).

3 : Université catholique de Louvain - Unité de Génétique - Unité de Génie biologique - Croix du Sud, 2/19. B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgien).).

4 : Université catholique de Louvain - Unité de Génie biologique - Croix du Sud, 2/19. B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgien).).

(5) Agria Lorraine - 2 avenue de la Forêt de Haye - BP 172 - 54505 Vandoeuvre-lès-Nancy (Frankreich).

(6) Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann - Département Environnement et Agrobiotechnologies - 41, rue du Brill - 4422 Belvaux (Luxemburg)

Zusammenfassung

Die EU-Richtlinie 2009/28/CE soll sicherstellen, dass bis 2020 20% des gesamten Energieverbrauchs und 10% der Energie, die nötig für den Transport ist, aus erneuerbarer Energie bestehen.

In diesem Zusammenhang kann sich die Landwirtschaft die Frage der energetischen Verwertung einer Produktion stellen, die vorher für die Tiernahrung benutzt wurde. Diese Entscheidung wird zum Teil beeinflusst durch die eingeführten oder ausgewählten Veränderungen der landwirtschaftlichen Nahrungsmittel- und Nichtnahrungsmittelsektoren, die das Energieerzeugungspotential verbessern oder umgekehrt begrenzen.

Nach der Beschreibung der drei wichtigsten Nutzungswege der energetischen Verwertung der Biomasse (Verbrennung, Biogas und Produktion von Bioethanol der zweiten Generation) analysieren wir die wichtigsten Merkmale, Schwächen und Erträge. Während die Energieleistungen in etwa verglichen werden können, müssen die Umweltrelevanz, die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Relevanzen der verschiedenen Verwertungen noch erforscht werden und analytische Instrumente müssen noch entwickelt werden, vor allem wegen der Unsicherheiten bei den Daten und der Dynamik des sozio-ökonomischen Hintergrunds.

Einleitung

Die exponentielle Zunahme der Bevölkerung, der industriellen Tätigkeit und die Wechselwirkungen zwischen den ökologischen und ökonomischen Aspekten, wie im Fall der globalen Erwärmung können erhebliche Folgen haben. Die Energieabhängigkeit unserer Gesellschaft ist in diesem Zusammenhang mit der Erschöpfung der fossilen Brennstoffe, ein

wichtiges Anliegen. Die EU-Richtlinie 2009/28/CE soll sicherstellen, dass bis 2020 20% des gesamten Energieverbrauchs und 10% der Energie, die nötig für den Transport ist, aus erneuerbarer Energie bestehen. Ziel der EU (Europäische Union, 2003) ist :

- Die Verringerung der Emissionen von Treibhausgasen;
- Die Gewährleistung der Sicherheit der Energieversorgung;
- nachhaltige, wettbewerbsfähige und vielfältige Energien produzieren;
- Die Schaffung von Arbeitsplätzen, innovieren und im Bereich der erneuerbaren Energien wettbewerbsfähig sein.

Es stellt sich die Frage der Herausforderungen und Chancen, die die Bauern ergreifen und erfüllen könnten indem sie zum Energie-Problem beitragen. **Wie soll die landwirtschaftliche Produktion aufgeteilt werden, vor allem beim Futter, zwischen der Nutzung als Lebensmittel oder Nichtlebensmittel? Mit welchen Ergebnissen und mit welchen Folgen?**

Das Projekt **ENERBIOM** (INTERREG IV-A), teilweise finanziert durch die Europäischen EFRE-Mittel, hat zum Ziel Anbauwege für die landwirtschaftlichen Erzeugung von Energie aus Biomasse zu identifizieren und zu verbreiten, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen agro-ökologischen Dimensionen, um eine nachhaltige Entwicklung der Nutzungswege angepasst an die Großregion zu ermöglichen. Das Projekt begann im Jahr 2009 und wird im Jahr 2011 abgeschlossen werden. Die Ergebnisse sollten zu einer Bestimmung des Produktionspotentials von pflanzlicher Biomasse für die Erzeugung von Bioenergie bezogen auf die drei Verwertungswegen Biokraftstoff, Biogas und Biobrennstoffe führen.

Die erste Aktion des Projektes ist es, **das Produktionspotenzial** der wichtigsten Nutzpflanzen **unter verschiedenen Boden -und Klimabedingungen zu untersuchen und dies vom Lothringer Plateau bis zum Plateau der Ardennen und bis zur deutschen Eifel über das Lütticher Hespenland im zentralen Belgien**. Dieser Vergleich wird auch für **verschiedene Ebenen der Intensivierung** gemacht, um den Platz zu bestimmen, den diese Pflanzen in ökologisch sensiblen Zonen einnehmen können. Diese Untersuchung enthält auch die Definition des Verwendungswertes von Energiepflanzen in den verschiedenen Bereichen sei es als Biobrennstoff, methanogene Biomasse oder zur Förderung der Erzeugung von Bioethanol der zweiten Generation, das ausgehend von den Zellulose- und Hemizelluloseanteilen produziert wird .

Die ersten Ergebnisse des Konsortiums ENERBIOM werden hier vorgestellt sowie die der Projekte BIOETHA2 (CRA-W), LUXCYCLE (CRP-GL u.a.) AGRICOMETHANE (INTERREG III-A) und OPTIBIOGAZ (INTERREG IV-A) über das Nutzungspotenzial der Futtermittelbiomasse (Gras, Mais, Sorghum) zu energetischen Zwecken. Wenn die Möglichkeit besteht, wird ein Vergleich mit anderen Energiequellen wie beispielsweise energiespezifischen Kulturen wie Miscanthus und Switchgrass, die wir als Nicht-Futtermittel betrachten, erstellt.

1. Mögliche Wege zur Energiegewinnung aus Futtermitteln

- Ligninzellulosehaltige Biomasse und Futtermittel

Die Futterpflanzen wie Grassilage und Heu, aber auch Maissilage, unvollständig siliertes gereiftes Getreide, Futterrüben, Dinkel ... sind alles selbstproduzierte Lebensmittel. Im Energiebereich fallen diese Produktionen unter den Begriff "Biomasse", der organische, biologisch abbaubare und nicht fossile Stoffe aus Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen bezeichnet. Dieser Begriff beinhaltet Produkte, dazugehörige Produkte, Nebenprodukte und Abfälle aus der Landwirtschaft, wie die der Wälder und der dazugehörigen Industriezweige,

die festen organischen Abfälle der Stadt und Industrie, sowie die Gase und Flüssigkeiten, die aus dem Abbau von organischen biologisch abbaubaren und nicht-fossilen Materialien stammen (DEMIRBAS 2009). Drei große Kategorien sind in der Regel zu unterscheiden: die Biomasse aus Holz, aus der Landwirtschaft und aus Abfällen (ROSSILO-CALLE u.a.2007).

-Gleichgewicht zwischen der Verwertung der Biomasse als Futtermittel und als Energie

Die Entscheidung eine Produktion, die vorher zur Futtermittelproduktion benutzt wurde, energetisch zu verwerten kann durch die eingeführten oder ausgewählten Veränderungen der landwirtschaftlichen Nahrungsmittel- und Nichtnahrungsmittelsektoren entstehen. Diese Entwicklungen könnten das Bioenergieerzeugungspotential aus der landwirtschaftlichen Produktion verbessern oder umgekehrt begrenzen.

Die wichtigsten **Elemente, die das Produktionspotenzial der Bioenergie bestimmen**, wurden in mehreren Studien (DOSS, 1999, BUSCH, 2006; SMEETS, 2007; ROWE, 2009) identifiziert. Die landwirtschaftlichen Produktionen sind das Ergebnis vieler komplexer Wechselwirkungen, die sich in das sozio-ökonomische System einfügen und sehr schwer zu quantifizieren sind. Für diese Autoren beinhaltet dieses System unter anderem die folgenden Elemente:

- Wachstum der Bevölkerung;
- Der quantitative und qualitative Pro-Kopf-Verbrauch an Lebensmitteln;
- Die Ernteerträge und die Effizienz der Systeme der tierischen Erzeugung;
- Territoriale Beschränkungen und Umweltschutz;
- Boden- und Klimabedingungen und Pflanzenschutz;
- Die Kosten der Arbeit und der landwirtschaftlichen Produktion;
- Politik und EU-Richtlinien.

Der Verzehr von Lebensmitteln und das qualitative Verhältnis Fleisch / Gemüse kann entweder Land freisetzen durch die Optimierung der Nahrungsmittelproduktion in Bezug auf den Brenn- und Nährwert oder umgekehrt, die Fläche der Futterkulturen erhöhen im Falle einer Entwicklung einer weniger effizienten tierischen Erzeugung.

Die Biotechnologie und die landwirtschaftlichen Fortschritte können eine Steigerung der Produktivität für bestimmte Lebensmittel ermöglichen und damit für den Landwirt den Anreiz geben sich zu spezialisieren und somit neue Spekulationen wie die Bioenergie bremsen. Im selben Sinne wird die Entwicklung von spezifischen ligninzellulosehaltigen Kulturen die Erzeugung von Biomasse begünstigen, aber sie kann auch eine Form des gesellschaftlichen Widerstands gegen die Entwicklung von Biokraftstoffen hervorrufen.

Die Umwelt im ökologischen Sinne des Wortes und die Herausforderungen der biologischen Vielfalt und der Landschaft, aber auch andere Faktoren wie Urbanisierung und wirtschaftliche Entwicklung werden die Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen ändern, die Schaffung von Verwertungseinrichtungen blockieren oder fördern, in dem sie zum Beispiel Absatzmöglichkeiten freigeben. Die pedoklimatischen Bedingungen werden auch eine Rolle spielen je nach ihren Wettbewerbsvorteilen für die verschiedenen Spekulationen.

Zum Schluss, in Funktion des gesellschaftlichen Willens werden die Agrar- und Handelspolitik und die EU-Richtlinien die Entwicklung der energetischen Verwertung der Biomasse erleichtern oder hemmen, selbst wenn sie gegenwärtig eher dafür sind.

Abschließend sei gesagt, dass wir dieses Gleichgewicht isoliert von dem gesamten System, dem es angehört, betrachtet haben, aber wir dürfen **nicht vergessen, dass Ereignisse, die außerhalb des Landwirtschaft-Systems geschehen eine Auswirkung haben können.** Wenn ein dritter Nutzungsweg sich entwickelt, ein anderer als Futter oder Energie, wie zum Beispiel "grüne" Chemie oder "hochwertige" und eine große Nachfrage an

Biomasse entsteht, könnte ein Ungleichgewicht entstehen. Dies würde zu einer erzwungenen Entwicklung der landwirtschaftlichen Variablen führen, um die ligninzellulosehaltigen Spekulation zu entwickeln oder, falls dies nicht der Fall ist, zu einer anderen "Ressource", wie die Forstwirtschaft.

- Biomasse, « biofuel » und Bioenergie

Welches Nutzungsart es auch ist, die Biomasse ist eine Form der chemischen Speicherung von Sonnenenergie. Die Photosynthese, deren Leistung weniger als 1% der zur Verfügung stehenden solaren Energie ist, verwandelt in der pflanzlichen Zelle CO₂ und Wasser in organischen Kohlenstoff. Sie kann als zyklisch angesehen werden, da das bei der energetischen Verwertung freigesetzte CO₂ wiederum für die Photosynthese mobilisiert werden kann (MCKENDRY, 2002a). Angesichts der Gefahr der globalen Erwärmung hat die Nutzung von Biomasse für energetische Zwecke im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen eine neutrale Rolle, da die Pflanzen teilweise den gespeicherten Kohlenstoff während ihres Wachstums wiedergeben. Schließlich, im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien wie Sonnen- oder Windkraft, **ermöglicht die Biomasse eine Energieproduktion "auf Anfrage"** und ist nicht vom Wetter abhängig, **da sie gelagert werden kann.**

Die FAO unterscheidet die Biomasse in der Form Ressource ("Biomass") von der Handelsform ("Biofuel") und ist der Auffassung, dass der Begriff „Bioenergie“ für die Energieumwandlung dieser steht (FAO, 2004). In der Tat **wird die Biomasse zunächst in feste** (z.B. Holzpellets oder Heuballen), **gasförmige** (Methan) **oder flüssige Biobrennstoffe** (Bioethanol und Biodiesel, ...) **umgewandelt, bevor sie in thermische, mechanische oder elektrische Energie umgewandelt wird.** Im Falle der Bioverbrennung könnten wir der Auffassung sein, dass die Biomasse direkt als Energie (Wärme) verwertet wird, während im Falle der Vergärung und des Bioethanols der Energieinhalt der Biomasse eine chemische Zwischenform annimmt. Aber die Umwandlung einer Art von Energie in eine andere wird immer durch irreversible Verluste begleitet und dies umgekehrt proportional zu der Leistung der einzelnen Technologien.

- Die energetische Verwertung der Biomasse

Es gibt verschiedene Verfahren zur Herstellung von Bioenergie, sie gehen von der herkömmlichen Verwendung der Biomasse, wie zum Beispiel die Verbrennung von Holz, über moderne Verfahren der Produktion wie die Umwandlung von Zucker und Stärke in Ethanol, bis hin zu fortgeschrittenen Technologien wie die Vergasung von Holzspänen für die Herstellung von Kraftstoffen (SCHENKEL und BENABDALLAH, 2005)

Wir betrachten hier drei energetische Nutzungswege der Biomasse, die drei Hauptnutzungswege (Abbildung 1): **Verbrennung, Biogas** und **Biokraftstoffe**. Diese Nutzungswege mobilisieren zwei gegensätzlichen Verfahren:

- Thermochemische Verfahren: direkte Verbrennung von Biomasse mit möglichen KWK-Verfahren, Pyrolyse oder Vergasung durch die Verbesserung der Biobrennstoffe
- Die biochemischen Verfahren: Gärung (Alkohol) oder Biomethanisation (Biogas).

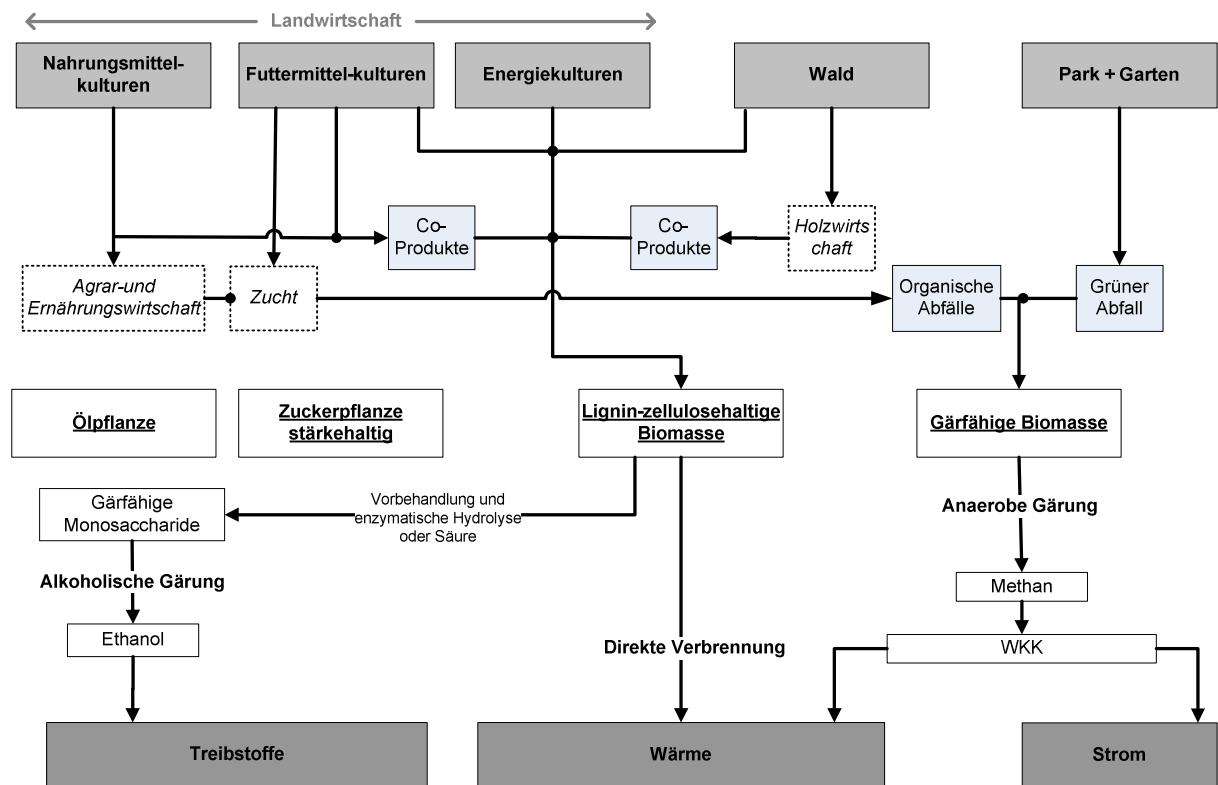


ABB. 1 - UNTERSCHIEDLICHE RESSOURCEN UND VERWERTUNG DER BIOMASSE (Abbildung nicht vollständig).

Die Qualität der produzierten Bioenergie kann genauso wichtig sein wie die Menge, unter anderem hinsichtlich der Art des Konsums. In der Tat kann die Biomasse die Energie in verschiedenen Formen durch die drei genannten Arten von Technologien bereitstellen: Wärme, Strom, Brennstoff und / oder gasförmige, flüssige und feste Kraftstoffe (MCKENDRY, 2002b)

Um die drei Nutzungswege vergleichen zu können, betrachten wir hier immer die **endgültige Energienutzung in der Form von Wärme**. Die Erträge werden durch den Heizwert des erhaltenen Produktes ausgedrückt. Der Heizwert ist die Menge Energie, die in einer Einheit Masse des Brennstoffs enthalten ist. Wir unterscheiden zwischen dem oberen Heizwert (H_o) und dem unteren Heizwert (H_u). Der letztere ist der Energieinhalt eines Brennstoffes (in Joule) pro Masse (in kg) von Brennstoff, der nach der vollständigen Verbrennung frei wird, dabei wird die Verdampfungswärme des Wassers abgezogen

Zum Vergleich, werden die potentiellen Energien (in J) der Produktion von Bioethanol und Methan durch die Multiplikation mit dem jeweiligen einheitlichen H_o erhalten. Beachten Sie, dass im Fall der Nutzung für Bioethanol das in den Gärresten enthaltene Lignin als fester Biokraftstoff benutzt werden kann, es hat in der Tat einen hohen H_o etwa 25 GJ / t und es ist die dritthäufigste Substanz in den Futtermitteln (HAMELINCK u. a., 2005b).

2. Methode der 3 energetischen Verwertungen

- Die Bioverbrennung

Die Verbrennung ist eine exotherme chemische Reaktion der Oxidation, die den Brennstoff vollständig zersetzt. Die energetische Verwertung von verschiedenen Biomassen

benötigt eine Stabilität und die Kenntnis deren Eigenschaften. In der Tat, sei es in der vollständigen oder unvollständigen Verbrennung, können viele Probleme entstehen wenn der Brennstoff nicht angepasst ist. Daher ist es wichtig, die physikalischen und chemischen Eigenschaften der landwirtschaftlichen Produktion zu kennen, um potenzielle Risiken bei der Verbrennung zu identifizieren. Im Falle von Gefahr können nur Versuche in reeller Größe auf Testheizkesseln die Qualität des Brennstoffes bestätigen oder nicht. Die ersten Eigenschaften, welche es zu kennen gilt sind die relative Feuchtigkeit des Brennstoffs, die elementare chemische Zusammensetzung, der Heizwert, der Aschegehalt und eine Schätzung der Produktion von Schlacke und saurem Rauch.

- Das Bioethanol der zweiten Generation

Die Biokraftstoffe der zweiten Generation können aus Kohlenstoffsubstraten hergestellt werden wie Ligninzellulosehaltige Kulturen. Diese Biokraftstoffe versuchen die Energieeffizienz und die wirtschaftliche Effizienz zu erhöhen durch die Nutzung der gesamten Pflanze (Zellulose und Hemizellulose). Zwei Wege sind zu identifizieren: der thermochemische Weg (Struktur "Biomass to Liquid" oder BTL), der Diesel und Synthesekerosin produziert und der biologische Weg, der Ethanol herstellt und hier analysiert wird. **Das Bioethanol entsteht bei der Vergärung der Monosacchariden, die aus der Hydrolyse der Zellulose und Hemizellulose stammen; Hydrolyse, die negativ durch das im Zellulose-Hemizellulose- Netzwerk imprägnierten Lignin beeinflusst wird.** Das Lignin hat ebenfalls eine hemmende Wirkung auf die Mikroorganismen, die verantwortlich für die Gärung sind (CARPITA u.a. 2000, HOUGHTON u.a., 2006). Die Energieeffizienz der Produktion des Bioethanols der zweiten Generation hängt auch von der Art der Biomasse ab sowie deren Gehalt an wesentlichen Bestandteilen (Zellulose, Hemizellulose und Lignin).

- Die Biomethanisation

Die Biogasproduktion aus Biomasse ist nicht neu, aber der Wille diesen Energienutzungsweg besser zu kontrollieren ist in den letzten Jahren zu einem internationalen Problem geworden. Zu den **Vorteilen der Biogasproduktion aus organischer Substanz** gehören unter anderem:

- Die Energie-Umwandlung von Energiepflanzen, Dünger der Tierproduktion und organische Rückstände der Landwirtschaft und Industrie;
- Der Beitrag zur Verminderung der Produktion von schädlichen CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen durch den Gebrauch von direkten oder indirekten Produkten aus der Photosynthese;
- Die Sanierung von Abwasser der Tierproduktion und aus menschlichen Ausscheidungen;
- Die Verringerung der Energieabhängigkeit für die Produktion von Düngemitteln, da sich alle Nährstoffe N, P und K und Mikronährstoffe im Gärgut befinden

3. Zusammensetzung der Biomasse aus Futtermitteln und Einfluss auf die energetischen Verwertungen

- Elementare chemische Zusammensetzung und anorganische Verbindungen, Einfluss auf die Schlackeproduktion und auf die Rauchproduktion während der Verbrennung

Die elementare Zusammensetzung entspricht dem in der Pflanze vorhandenen Anteil an Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Schwefel (S), Chlor (Cl) und Sauerstoff (O) (durch die Differenz). Diese Zusammensetzung ist nützlich, um bestimmte Eigenschaften der Verbrennung zu schätzen, wie zum Beispiel die Möglichkeit des Brennstoffs Energie zu liefern (Anteil C und H) oder das Risiko des Ausstoßens von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden, ätzenden und gefährlichen Partikeln (NO_x, HCl, PAK, VOC, Dioxine ...). Die verschiedenen landwirtschaftlichen ligninzellulosehaltigen Biomassen haben meistens einen **höheren Gehalt an Chlor und Stickstoff als Holz** (Tabelle 1). Die Verbrennung der Futtermittel, die reich an diesen Elementen sind, bringt daher **mehr Risiken der Korrosion und der Emission von umweltschädlichen Gasen** mit sich. In der Tat, Stickstoff und Chlor bilden Stickoxide (NO_x) und Salzsäure (HCl) bei der Verbrennung. Diese verschiedenen Säuren werden durch den Rauch entlassen. Wenn der Säuretaupunkt dieser Dämpfe während des Wärmeaustauschs oder im Kamin erreicht wird provoziert die Kondensation dieser Säure Korrosion.

TABELLE 1 – ELEMENTARE ZUSAMMENSETZUNG DES HOLZ UND DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN LIGNINZELLULOSEHALTIGEN BIOMASSE (BIOBIB 2010)

Biomasse	Elementare Zusammenstellung							Zusammensetzung der Asche									
	C	H	N	S	Cl	O (Dif)	Asche	SO ₃	Cl	P ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
	(% Masse Trockenstoff)							(% Masse)									
Holz	49,00	5,70	0,40	0,10	0,10	41,80	2,90	–	–	4,50	16,90	10,70	7,30	31,00	5,20	0,80	9,50
Hanf	45,70	6,30	0,60	0,00	0,10	44,10	3,20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Weizen (Stroh)	44,33	5,32	0,57	0,14	0,50	42,93	6,21	3,65	3,27	2,13	51,51	0,40	0,79	6,57	1,73	0,56	17,07
Weizen (Pflanze)	46,71	5,50	1,23	0,09	0,33	41,20	4,94	1,33	2,79	5,53	45,23	0,24	0,38	4,10	1,80	0,10	13,98
Gras (intensiv)	45,11	4,90	2,01	0,15	1,09	36,81	9,93	3,85	7,30	8,70	29,35	0,24	0,24	8,60	2,60	0,99	35,20
Gras (Wiese)	46,31	5,20	3,37	0,20	0,75	34,82	9,35	3,46	6,06	7,57	29,50	0,56	0,97	9,97	2,77	0,36	28,00
Mais (Kolben)	44,62	5,37	0,41	0,05	1,48	39,57	8,50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Mais (Pflanze)	46,91	5,47	0,56	0,04	0,25	42,78	3,99	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Mais (Stiel)	47,09	5,97	0,74	–	0,05	44,42	1,73	1,92	4,04	5,69	33,80	0,58	0,45	6,70	3,63	0,41	30,25
Miscanthus (3 Jahre)	48,49	5,42	0,56	0,05	0,21	41,81	3,46	3,16	2,88	2,78	52,76	0,30	0,18	5,62	3,11	0,16	19,41
Sommergerste (Stroh)	46,79	5,53	0,41	0,06	0,41	41,94	4,86	4,43	11,90	2,73	33,80	0,28	0,28	8,30	2,22	4,11	26,10
Wintergerste (Stroh)	46,86	5,31	0,73	0,12	0,98	40,12	5,88	0,91	2,25	1,22	59,40	0,22	0,38	5,10	0,77	0,26	5,60
Switchgrass (Sommer)	41,21	5,03	0,31	0,04	0,01	51,07	2,33	–	–	0,07	1,43	0,04	0,25	0,12	0,01	0,19	0,40
Switchgrass (Winter)	42,40	–	1,34	0,11	0,47	48,68	7,00	–	–	0,07	1,43	0,03	0,04	0,25	0,12	0,01	0,19
Roggen (Stroh)	47,57	5,89	0,42	0,09	0,23	42,40	3,40	2,37	3,64	2,75	45,55	0,20	0,25	6,33	1,44	0,08	15,50
Sorghum (Fasern)	42,80	–	0,84	0,10	0,37	47,79	8,10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Sonnenblume	50,50	5,90	1,30	0,10	0,40	34,90	6,90	8,36	–	3,64	20,46	1,20	–	10,84	6,10	0,91	30,01

Die Asche ist der Rückstand am Ende der Verbrennung. Es gibt zwei Arten von Asche: die "Hausasche", die eine Restablagerung aus der Verbrennung von anorganischen Brennstoffen am Brennpunkt bildet und die "fliegende Asche", die aus feinen unverbrannten festen Teilchen, Mineralien oder flüchtigen Komplexen besteht, die am Ausgang des Kamins durch den Rauch verursacht werden. Diese Aschen können sich an den kalten Wänden der Wärmetauscher verfestigen oder mit den Wänden reagieren und Korrosion bilden.

Die anorganischen Verbindungen, die in der landwirtschaftlichen Biomasse vorhanden sind, sind weitgehend Alkalin und Metalle. Mit Ausnahme des Chlor und des Schwefels werden diese Elemente am Ende der Verbrennung in der Hausasche in der Form von Oxiden (resp.. SO₃, P₂O₅, SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂) wieder eingefangen (Tabelle 1).

Die meisten mineralischen Bestandteile haben Schmelztemperaturen über 1 500 ° C (Tabelle 2). Ein hoher Gehalt an K₂O und P₂O₅ bei niedrigen Schmelztemperaturen kann zur **Schlacke**produktion beitragen. Kalium (K), häufig als wichtigster Katalysator angesehen in der

Schlackeproduktion, ist in großen Mengen in den Futterkulturen enthalten (Tabelle 1).

Die Schlacke besteht aus Siliziumblöcken und aus kompakten Mineralien, sie erstickt die Verbrennung und verstopft den Ascheausgang. Die verschiedenen anorganischen Verbindungen können sich durch eine Teilfusion verbinden und eutektische Mischungen bilden, die per Definition niedrigere Schmelztemperaturen haben als die jeweiligen Bestandteile, dies verschärft das Problem.

TABELLE 2 - Schmelztemperaturen für die wichtigsten Oxide aus der Verbrennung von landwirtschaftlicher Biomasse (Bardeau, 2009).

Oxyde	SiO ₂	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅
Schmelzpunkt (°C)	1715	350	2521	2800	1565	1650	2040	563

- Charakterisierung der wichtigsten strukturellen Bestandteile und Produktionspotential der zweiten Generation von Bioethanol

Die Tabelle 3a (GODIN u.a., 2010) zeigt, durch eine Literaturrecherche, **die Unterschiede** die bei einem durchschnittlichen **Gehalt an Zellulose, Hemizellulose und Lignin** beobachtet werden können und dies nach der Methode von VAN SOEST u.a. (1985), entweder innerhalb einer Art oder zwischen den Arten für die verschiedene Quellen von Biomasse: Futter, Holz Die ersten Ergebnisse der durchgeführten Versuche im Rahmen der Anbautechnik in Libramont zwischen 2007 und 2009 zeigen auch diese Vielfalt (Tabelle 3b). Es sollten allerdings die Unterschiede zwischen diesen beiden Teilen der Tabelle unterstrichen werden und die Wichtigkeit der Bedingungen der Kultur um den qualitativen Aspekt dieser Produktionen zu betrachten.

Das **Verfahren zur Herstellung von Bioethanol** umfasst fünf Schritte:

- Die Vorbehandlung der ligninzellulosehaltigen Biomasse ermöglicht die Befreiung der strukturellen Polysaccharide (Zellulose und Hemizellulose) vom Lignin, das sie abdeckt (OGIER u.a. 1999; HENDRIKS u.a., 2009).
- Die Hydrolyse der strukturellen Polysacchariden (Zellulose und Hemizellulose) in gärfähige Monosaccharide durch die enzymatische Hydrolyse (durch Zellaasen und Hemizellulasen) oder mit verdünnter Säure (H₂SO₄) (OGIER u.a. 1999, HOUGHTON u.a., 2006).
- Neutralisierung und Entgiftung von Gärungshemmern (PALMQVIST u.a. 2000; HUANG u.a., 2008).
- Vergärung von Hexosen (hauptsächlich Glucose) und / oder Pentosen (vor allem Xylose und Arabinose), stammend aus den strukturellen Polysaccharide in Ethanol. Die Erträge der Gärung der Monosacchariden, die aus den strukturellen Polysacchariden stammen, können als 92,5% für die Ethanolgärung der Glukose und 86% für Ethanolgärung der anderen Monosaccharide angesehen werden (HAMELINCK u.a., 2005a).
- Die Konzentration des produzierten Ethanols (HUANG u.a., 2008, HENDRIKS u.a., 2009).

TABELLE 3 – Chemische Hauptbestandteile und Produktionspotential des Bioethanols der zweiten Generation aus verschiedenen ligninzellulosehaltigen Biomasse (angepasst nach GODIN u.a., 2010)

Chemische Zusammenstellung (% TS)						
Ligninzellulosehaltige Biomasse	Wertzahl 1	Zellulose	Hemi- zellulose	Lignin	Produktions potential für Bioethanol (Liter/100 kg TS)	Ho des potentiel produzierten Bioethanols (GJ/100 kg TS)
a – Wissenschaftliche Litteratur (Van Soest Methode)						
Zuckerrohr Bagasse (<i>Saccharum officinarum</i> L.)	10	40,1 ± 6,7	26,3±6,3	17,9 ± 6,8	35,2 ± 6,0	0,82 ± 0,14
Rohrschwengel (<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.)	5	33,3 ± 2,7	30,4 ± 1,8	6,5 ± 2,2	32,8 ± 1,4	0,76 ± 0,03
Fasermis (Zea mays L.)	6	38,0 ± 3,8	27,4 ± 1,2	7,3 ± 1,6	34,3 ± 2,2	0,80 ± 0,05
Miscanthus (<i>Miscanthus</i> sp.)	4	44,0 ± 4,8	25,4 ± 2,2	20,4 ± 4,8	37,2 ± 3,2	0,87 ± 0,07
Hafersstroh (<i>Avena sativa</i> L.)	5	35,5 ± 4,6	24,3 ± 6,5	13,7 ± 4,0	31,6 ± 3,3	0,73 ± 0,07
Weizenstroh (<i>Triticum aestivum</i> L.)	27	36,6 ± 5,7	29,8 ± 7,7	16,9 ± 4,7	34,5 ± 4,6	0,80 ± 0,10
Körnermaisstroh (<i>Zea mays</i> L.)	12	37,3 ± 5,1	25,4 ± 4,3	15,8 ± 3,6	33,1 ± 4,0	0,77 ± 0,09
Gerstenstroh (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	17	40,4 ± 7,8	25,6 ± 5,1	12,7 ± 3,6	36,3 ± 5,9	0,84 ± 0,13
Reisstroh (<i>Oryza sativa</i> L.)	32	35,3 ± 4,5	26,7 ± 4,9	9,8 ± 5,5	32,5 ± 2,6	0,75 ± 0,06
Roggenstroh (<i>Secale cereale</i> L.)	3	37,0 ± 3,0	28,9 ± 1,0	12,7 ± 9,6	34,4 ± 1,8	0,80 ± 0,04
Switchgrass (<i>Panicum virgatum</i> L.)	36	38,3 ± 3,8	31,2 ± 2,9	8,4 ± 3,9	36,1 ± 2,8	0,84 ± 0,06
italienisches Ray-grass (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.)	4	23,1 ± 4,8	18,7 ± 6,3	4,3 ± 2,4	21,7 ± 3,5	0,50 ± 0,08
Fasersorghum (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench)	7	42,3 ± 2,6	26,2 ± 0,6	8,0 ± 0,4	36,4 ± 1,6	0,85 ± 0,03
Futtermittelsorghum (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench)	18	28,3 ± 4,6	22,8 ± 3,6	8,7 ± 3,9	26,6 ± 2,7	0,62 ± 0,06
Hanf (<i>Cannabis sativa</i> L.)	15	60,3 ± 6,2	16,8 ± 3,9	6,8 ± 3,4	44,8 ± 3,8	1,04 ± 0,08
Kenaf (<i>Hibiscus cannabinus</i> L.)	6	53,2 ± 4,1	18,4 ± 1,4	7,9 ± 1,2	41,3 ± 2,1	0,96 ± 0,04
Buche (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	3	45,4 ± 1,9	27,9 ± 6,8	23,1 ± 1,3	41,2 ± 2,1	0,96 ± 0,05
Pappel (<i>Populus</i> sp.)	4	42,0 ± 2,9	22,0 ± 6,2	24,8 ± 3,8	36,2 ± 3,4	0,84 ± 0,07
Weide (<i>Salix</i> sp.)	2	46,5 ± 13,5	18,5 ± 6,4	20,0 ± 1,4	37,3 ± 3,5	0,87 ± 0,08
Douglasie (<i>Pseudotsuga</i> sp.)	3	48,8 ± 7,6	21,1 ± 11,4	25,9 ± 2,2	40,0 ± 1,9	0,93 ± 0,04
Fichte (<i>Picea</i> sp.)	4	44,3 ± 4,2	26,1 ± 3,7	28,4 ± 0,7	39,7 ± 1,0	0,92 ± 0,02
b – Versuche in Libramont (Vorbehandlung in der Art von Thermohydrolyse)						
Miscanthus	9	48,4 ± 1,2	26,1±0,6	8,8±0,5	40,2±0,7	0,94±0,01
Switchgrass	7	40,1±1,7	30,3±0,9	7,2±0,3	36,8±1,4	0,86±0,03
Rohrschwengel (<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.)	26	34,0±1,2	25,2±1,1	4,3±0,2	31,0±1,0	0,72±0,02
Fasersorghum (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench)	16	29,7±1,0	25,1±2,3	3,2±0,5	28,4±1,0	0,66±0,02
Fasermis (<i>Zea mays</i> L.)	21	26,3±2,1	23,8±1,4	3,4±0,3	25,8±1,6	0,60±0,03
Knäuelgras-Luzerne	9	27,0±1,0	12,9±1,1	4,3±0,2	22,3±0,9	0,52±0,02
Hanf(<i>Cannabis sativa</i> L.)	15	47,5±3,5	6,4±1,6	8,0±1,0	31,9±2,3	0,74±0,05
Beinwell	4	22,4±0,2	9,6±0,7	6,9±1,1	18,3±0,3	0,42±0,01

- Die organische Substanz und das C / N Verhältnis: optimale Qualität und Quantität des Substrats für die Biogasproduktion

Viele Parameter beeinflussen das Verfahren der Biogasproduktion und somit die Menge und die Qualität des produzierten Biogases. Diese Faktoren hängen von den verwendeten

Produkten ab, aber auch von den physikalischen-chemischen Parametern der Gärung (Temperatur, pH-Wert ...) sowie von den technologischen Parametern (Verweilzeit, Last ...).

Die Biomethanisation ist ein komplexes biologisches Verfahren (Ahring, 2003a und 2003b) in das vier großen Gruppen von Bakterien eingreifen:

- Hydrolytische Bakterien, die die komplexe organische Substanz in einfachere Moleküle zerkleinern (Monomere, Dimere, Aminosäuren, organische Säuren)
- Acidogene Bakterien verwandeln einfache Moleküle zu flüchtigen Fettsäuren, CO₂, H₂ (Wasserstoff) und Alkohole,
- Acetogene Bakterien, die Essigsäure herstellen,
- Schließlich die methanogenen Bakterien, die CH₄ und CO₂ produzieren durch die Spaltung des Moleküls von Essigsäure (70% des produzierten Methans) oder die das CO₂ in CH₄ verringern mit Hilfe des Wasserstoffs, der während der Säurebildung hergestellt wurde (30% des hergestellten CH₄).

Der Hauptregelungsfaktor der Herstellung von CH₄ ist gelöster Wasserstoff, der notwendig ist für die hydrogenen Bakterien, aber er hemmt die acetogenen Bakterien. Daher sammeln sich die flüchtigen Fettsäuren an und der pH-Wert sinkt und dies hemmt wiederum die methanogenen Bakterien. Die Kunst der Biomethanisation besteht deshalb in der Schaffung eines Verhältnisses der quantitativen (Zuführungsrate) und qualitativen (Verdauungsgeschwindigkeit, Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff, Schwefelgehalt) Zuführung von organischen Substraten zu Optimierung der Umwandlung von Biomasse in CH₄ im Fermenter.

Deshalb ist **der Gehalt an organischen Stoffen** ein wichtiges Merkmal der Biomasse: je höher dieser ist, desto höher ist die Methan-Produktion, aber die Qualität der Nährstoffe aus denen sie zusammengesetzt ist, ist auch wichtig. Die Methan-Produktion pro Kilogramm abgebauten organischen Materials hängt vom Gehalt an Eiweiß, Kohlenhydraten und Fetten ab: 1 kg reines Eiweiß ergibt 480 Liter CH₄, 1 kg reines Fett ergibt 1 000 Liter CH₄ und schließlich 1 kg reine Kohlenhydrate ergibt 375 Liter CH₄ (Gleichung BUSWELL und MUELLER, 1952). Es ist jedoch wichtig, genau wie für die Herstellung von Bioethanol der zweiten Generation, dass diese organische Substanz zugänglich für die Bakterien ist. Der Ligningehalt verringert die Produktion von Biogas durch die Begrenzung des Abbaus des Substrats. Somit führt die Erhöhung des Fasergehalts zwischen dem im Juni geernteten Gras und dem im Februar geernteten, von 23 auf 55% steigend, zu einer Abnahme der Methanerträge von 48% (PROCHNOW, 2005). Schließlich ist das **Verhältnis C / N** des Substrates für den reibungslosen Ablauf der Biomethanisation wichtig. Ein Verhältnis **zwischen 25 und 32 ist optimal** (Ahring BK. *et al.*, 2003b). Ein zu niedriges Verhältnis führt zu einem Risiko einer Ansammlung von Stickstoff, der die Gärung hemmt. Dahingegen wird ein zu hohes C / N-Verhältnis die Methanproduktion nicht ermöglichen.

4. Vergleich des Endenergiewertes der drei Nutzungswege

-Direkte Verbrennung

Die Art der landwirtschaftlichen Biomasse hat wenig Einfluss auf den Ho-Wert (Tabelle 4), der zwischen 1,8 und 1,9 GJ/100 kg TS liegt. Die ersten erhaltenen Ergebnisse des Projekts ENERBIOM bestätigen die Homogenität des Ho der verschiedenen Pflanzen, zwischen 1,78 GJ/100 kg TS für Rohrschwingel und 1,88 GJ/100 kg TS für Miscanthus. Zum Vergleich: Der Ho der Holzspäne liegt zwischen 1,8 und 2,1 kg GJ/100 kg TS

TABELLE 4 – Heizwerte der landwirtschaftlichen Biomasse im Vergleich mit denene von Holz (Methode der kalorimetrischen Bombe; Ho und Hu, oberer und unterer Heizwert in GJ/100 kg TS; Quelle : LERMaB).

Ligninzellulose-haltige Kulturen	Raps (Abfälle)	Sonnenblume (Abfälle)	Switchgrass	Miscanthus	Mais (Stroh)	Mais (Abfälle)	Mais (Spindel)	Weizen (Stroh)	Dinkel	Rohr-Schwingegel	Sorghum	Holz (harzhaltig)	Holz (blättrig)
Ho Verbrennung (GJ/100 kg MS)	1,79	2,16	1,89	1,88	1,80	1,84	1,87	1,87	1,88	1,79	1,91	1,97	1,87
Hu Verbrennung (GJ/100 kg MS)	1,65	2,01	1,76	1,75	1,67	1,70	1,73	1,74	1,74	1,66	1,78	1,83	1,73

- Umwandlung in Bioethanol der zweiten Generation

Die vorher dargestellte Tabelle 3 zeigt das theoretische Produktionspotential für Bioethanol der zweiten Generation der verschiedenen landwirtschaftlichen Biomassen, wobei man sich auf ihre chemische Zusammensetzung basiert, das heißt, die Erträge der Hydrolyse der Zellulose und Hemizellulose in vergärbare Monosaccharide und der Vergärung dieser Monosaccharide in Ethanol sind gleich an 100%.

Basierend auf den beobachteten Erträgen für die verschiedenen in Libramont angebauten ligninzellulosehaltigen Pflanzen (Tabelle 3b) oder aus der Literatur extrapolierten für die anderen Etappen des Produktionsprozesses (CARPITA u. a. 2000; HAMELINCK u.a. 2005; DA COSTA SOUSA u.a., 2009), können wir das Produktionspotential für Bioethanol der zweiten Generation pro 100 kg Trockenmasse oder pro Hektar bestimmen, unter den Bedingungen eines Mittelgebirges wie es an diesem Standort der Fall ist. **Die ligninzellulosehaltige Pflanzen, die mit einer Vorbehandlung des Typs Thermohydrolyse das größte Produktionspotential für Bioethanol der zweiten Generation haben, sind Miscanthus, Switchgrass (Grosse Kulturzone), Rohrschwingel, Fasersorghum, Fasermais und Hanf**. Dieser Vorteil hat zwei Gründe: Zum einen ist die Summe des Gehalts an Zellulose und Hemizellulose hoch, und zweitens führt der Ertrag der Produktion von ligninzellulosehaltiger Biomasse pro Hektar zu einem Produktionspotential an Bioethanol der zweiten Generation, das besser ist im Vergleich zu anderen ligninzellulosehaltigen Biomassen.

- Vergärung in Biogas

Im Rahmen des Kooperationsprojekts LUXCYCLE 2004-2006 (CRP- GL, CRP-Henri Tudor, IG-Lux und Universität Luxemburg), wurden **die Produktionspotentiale** für die Biomasse und für Methan **bei verschiedenen Anbausystemen** untersucht. Die festgehaltenen Wintergetreide (Triticale, Dinkel, Gerste, Hafer) werden grün geerntet bei der höchsten Biomasseproduktion (Milch-Stadium) und somit kann ihnen eine Sommerkultur mit langem Zyklus folgen (Mais, Sorghum) oder eine Sommerkultur mit einem kürzeren Zyklus (Hanf oder Sonnenblumen). Die Analyse des Methanwertes der Biomasse wurde in Sequenzen durchgeführt, mit Hilfe von 2-Liter-Fermentern, die der Norm VDI 4630 entsprechen.

In der Tabelle 5 werden die Ergebnisse in Bezug auf die Erzeugung der Biomasse und auf die normalisierten Kubikmeter CH₄ pro Hektar Anbaufläche (Nm³/ha) oder pro Tonne Trockenmasse (Nm³ / t TS) dargestellt. Dieses landwirtschaftliche und „biologische“ Konzept **der zweijährigen Produktion der Biomasse** erzeugt durchschnittlich pro Jahr 5 600 Nm³/ha CH₄ und ist für die zwei Wirtschaftsjahre ähnlich. **Das Duo Gerste und Sorghum ist a priori das produktivste** und ermöglicht die jährliche Herstellung von 6 000 bis 7 000 Nm³/ha CH₄. In den Jahren 2004-2005 war die Winterproduktion von CH₄ gleichwertig mit der Sommerproduktion. Im Gegensatz dazu wurden in den Jahren 2005-2006 70% der CH₄ Produktion aus der im Winter produzierten Biomasse erreicht.

TABELLE 5 – Durchschnittliche jährliche Produktion der Biomasse und CH₄, und Ho der Verbrennung dieses Biogases für verschiedene Kulturduos während der Jahre 2004-2005 und 2005-2006 in Noertzange (Luxembourg).

Produktionen		Jahr	Ertrag (TS t/ha)			CH ₄ (Nm ³ /ha)			CH ₄ (Nm ³ /t MS)			Ho CH ₄ (GJ/100kgTS)		
Winter	Sommer		Winter	Sommer	Total	Winter	Sommer	Total	Winter	Sommer	Total	Winter	Sommer	Total
Triticale	Sonnenbl.	Durch.	12,4	8,0	20,4	3799	2048		308	256	564	1,10	0,92	2,02
Gerste	Sorghum	Durch.	10,3	10,8	21,1	3172	3361	6533	308	313	621	1,11	1,12	2,23
Dinkel	Hanf	Durch.	11,8	7,9	19,7	3448	1685	5133	293	213	507	1,05	0,77	1,82
Triticale	Mais	Durch.	9,7	7,6	17,3	2696	2140	4836	279	282	561	1,00	1,01	2,01
Hafer	-	2004-05	10,5	-	10,5	3864	-	3864	368	-	368	1,32	-	1,32

Zum Vergleich: die Methanwerte der Kulturen, die denen im Rahmen des Projekts ENERBIOM untersuchten Kulturen ähnlich sind, haben die folgende Größenordnung: 390 Nm³ / t TS für Grassilage (LEHTOMÄKI u.a., 2008), 377 Nm³ / t TS für die Silage von Miscanthus (E. SMEKENS, EAST SA, persönliche Mitteilung), und 197 Nm³ / t TS für Topinambour (Glea, on-line).

5. Energetische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und die ökologische und gesellschaftliche Relevanz der drei Nutzungswege

- Energetische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und beeinflussende Faktoren

Das Energiesystem der ligninzellulosehaltigen Biomasse beginnt bei der Produktion der natürlichen Ressourcen und der Werkzeuge für die Produktionsverfahren und endet beim Verbrauch des Endenergieprodukts. Aus den vorher zitierten Ergebnissen, die in der Tabelle 6 aufgeführt sind, können wir einen Nutzungsweg ableiten, der einen Energie-Vorteil gegenüber einem anderen hat. In unserem Fall, aus energetischer Sicht, scheint es bei weitem besser zu sein es vorzuziehen die Biomasse zu verbrennen aber die Berechnung des Energieertrags ist komplex und erfordert Genauigkeit und Abstand.

TABELLE 6 – HO-Synthese für eine Kultur für die drei Nutzungswege

Ligninzellulosehaltige Kultur	Ho des Bioethanolproduktionspotentials (GJ/100 kg TS)		Ho Verbrennung (GJ/100 kg TS)		Ho des Methanproduktionspotentials (GJ/100 kg TS)	
Miscanthus	0,940 ± 0,016	(a)	1,933 ± 0,018	(a)	1,35	(d)
Switchgrass	0,861 ± 0,031	(a)	1,885 ± 0,007	(a)		
Rohrschwengel	0,726 ± 0,024	(a)	1,829 ± 0,020	(a)		
Fasersorghum	0,664 ± 0,022	(a)	1,823 ± 0,033	(a)	1,085 ± 0,155	(c)
Fasermais	0,604 ± 0,037	(a)	1,843 ± 0,010	(a)	1,015 ± 0,065	(c)
Knäuelgras-Luzerne	0,522 ± 0,022	(a)	1,882 ± 0,020	(a)		
Hanf	0,747 ± 0,053	(a)	1,799 ± 0,012	(a)	0,765 ± 0,015	(c)

(a) CRA-W ; (b) LERMaB ; (c) CRP-GL ; (d) EAST S.A. ; (e) AGRA Ost

Zwei Parameter sind in bei der energetischen Verwertung des Futtermittels in Betracht zu ziehen: die Menge der verwendbaren Trockenmasse pro Hektar und die Futtermittelqualität, das heißt, den Hang zur Erbringung von Energie pro Tonne Trockenmasse. Diese beiden Parameter werden selber von vielen agronomischen und technologischen Faktoren beeinflusst.

Vor allem **die Art der Biomasse und die des Pflanzenanbaus** werden im Falle von landwirtschaftlicher Biomasse einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Rohstoffe haben. Tatsächlich hängt die Energieeffizienz von den chemischen (organische und anorganische Verbindungen), strukturellen (Faser, Lignin ..) und physischen (Feuchtigkeit,

Korngröße, Dichte) Eigenschaften der Biomasse ab. Allerdings, wie wir gesehen haben, müssen diese Eigenschaften von einem Nutzungsweg zum anderen nicht die gleichen sein.

Für eine gegebene Art ist das **Vegetationsstadium** einer der wichtigsten Faktoren, der die Zusammensetzung und die Struktur beeinflusst. Während die meisten unerwünschten Elemente wie Stickstoff, Schwefel, Kalium und Chlor signifikant mit dem Alter der Vegetation sinken erhöht sich der Ligningehalt. Wenn wir das Beispiel einer so genannten natürlichen Wiese nehmen, haben die natürlichen Graslandarten offenbar nur geringen Einfluss auf die chemische Zusammensetzung der produzierten Biomasse bei einem bestimmten Reifestadium (PROCHNOW, 2009a) ... Dies würde **eine intensive Bewirtschaftung befürworten mit mehreren Silageschnitten für Biogas, einem groben Gras für die Verbrennung und einem Zwischenprodukt für die Bioethanolindustrie.**

Die **Erntesaison** ist ebenso wichtig wie das Vegetationsstadium. Während eine Winterernte die Eigenschaften der Kultur verändert, wie zum Beispiel die Feuchtigkeit oder den abnehmenden Gehalt an unerwünschten Elementen durch Auswaschung oder Translokation, kann sie aber auch erhebliche Verluste an Trockenmasse hervorrufen. Es wurden Verluste des Trockenmasseertrags von fast 70% für naturnahes Grünland und 35% für Miscanthus gemessen (PROCHNOW, 2009a). Diese Verluste und ihre Auswirkungen auf die inhärente Qualität der Biomasse für einen Nutzungsweg müssen daher für jede Futtermittelkultur oder energiespezifische Kultur betrachtet werden, um eine optimale Bewirtschaftung in Funktion des gewünschten Nutzungsweges zu bestimmen und dies auf Grundlage der Wirtschafts- und Energiebilanz.

Die Ernte ist ein weiterer wichtiger Bestandteil des Energiepotentials einer Kultur. Für Futterpflanzen sind **die Techniken der Ernte**, der Silage und / oder **Vortrocknen** bekannt und leicht mit konventionellen landwirtschaftlichen Maschinen machbar, dies ist nicht der Fall, für einige energiespezifische Kulturen wie Hanf. Die Effizienz und der Prozentsatz der Verluste können davon betroffen sein. Schließlich erhöhen die geringe Energiedichte der ligninzellulosehaltigen Biomasse und deren Verstreuung die Kosten der Ernte, der Logistik und der Verarbeitung, dies behindert die Nutzungswege, die eine Mobilisierung großer Mengen von Rohstoffen erfordern (REIJNDERS und HUIJBREGTS, 2009).

Schließlich, aus technologischer Sicht müssen zwei Aspekte berücksichtigt werden: die Kultur und **das industrielle Verfahren der Verwertung**. In der Tat muss sich das letztere an die Eigenschaften der verwendeten Rohstoffe anpassen können. Zum Beispiel im Fall von Bioethanol hat die Vorbehandlung der ligninzellulosehaltigen Biomasse, die die strukturellen Polysaccharide befreit, erhebliche Auswirkungen auf die Erträge des Verfahrens (HENDRIKS u.a. 2009, Tabelle 8).

TABELLE 7 –Auswirkung der Art der Vorbehandlung auf das Produktionspotenzial von Bioethanol der zweiten Generation aus Fasermais

<u>Art der Vorbehandlung</u>	<u>H₂SO₄ aufgelöst</u>	<u>Thermohydrolyse</u>	<u>Ca(OH)₂</u>	<u>Verpuffung durch Dampf katalysiert durch ...</u>		
				NH ₃ Typ AFEX	NH ₃ Typ ARP	SO ₂
Bioethanol (Liter Ethanol/ T TS)	274,3 ±16,5	258,0 ±15,7	257,1 ±15,9	278,9 ±16,9	264,7 ±16,0	247,3 ±15,1

– Gesellschaftliche und ökologische Relevanz

Neben den energetischen und wirtschaftlichen Aspekten müssen diese Produktionen weiterhin gegenüber der Umwelt relevant sein. Die ökologischen Vorteile variieren je nach Art, Ort und Erzeugungsweg der Biomasse (SMEETS u.a., 2009). Im Allgemeinen sind die externen Umwelteffekte, die mit der Biomasseproduktion verbunden sind, die gleichen sei es zur Nutzung für Tierzucht oder für Energiezwecke. Allerdings werden sich Unterschiede ergeben wenn man die ganze Kette "Produktion-Verwertung" betrachtet. Die

Lebenszyklusanalyse (LZA) der Biomasseproduktion bis zum Energieverbrauch, ist **eines der Hilfsmittel, das den Vergleich zwischen den Nutzungswegen** und somit eine Entscheidung **ermöglicht**. Die Reihe der Normen ISO 14040, die im Jahr 1997 veröffentlicht wurde, beschreibt die Methode und die Ethik, die von den LZA-Studien befolgt werden müssen (MORAS, 2007).

Eine aktuelle Studie der Agentur für Umwelt und Energie-Management auf Grundlage dieser Methode (ADEME, 2009) kommt zu dem Schluss, dass auf der einen Seite **die Energieerzeugung aus ligninzellulosehaltigen Pflanzen deutlich weniger Treibhausgase ausstößt** als die fossile Energieproduktion **und andererseits mehrjährige Kulturen eine geringere Umweltbelastung als einjährige haben**. Um die Umweltauswirkungen der Einwegnutzung der Graslandbiomasse oder Futtermittelbiomasse für die Energieerzeugung zu schätzen, könnte das Bezugssystem vielleicht die Viehzucht sein, da es diese ist, die ersetzt wird.

Schlussfolgerung

Die energetische Verwertung der Biomasse, die vorher für die landwirtschaftliche Erzeugung vorgesehen war, ist technisch für drei Nutzungswege möglich: die Verbrennung, die Biomethanisation und die Produktion von Bioethanol der zweiten Generation. Bei der Futtermittelproduktion sowie bei den energiespezifischen Pflanzen, scheinen die Ergebnisse vielversprechend und die technischen Hindernisse, trotz unterschiedlicher Grade, überwindbar zu sein. Einige Punkte sollten jedoch hervorgehoben und gemäßigt werden.

Es ist klar, dass wir hier eine exklusive Verwertung dieser Produktionen betrachten. Eine **gemischte Verwertung**, wie zum Beispiel die Biomethanisation mit landwirtschaftlichen Nebenprodukten oder sogar eine Mitverbrennung mit anderen Biomassen bieten weitere Perspektiven in Bezug auf die technischen und ökologischen Lösungen. Zum Beispiel, wenn die Verbrennung von Stroh technologische Anpassungsschwierigkeiten aufweist, wäre es auch eine Möglichkeit den relativen Anteil des Graslandes zu verringern durch eine Zuführung von Holz, das einen geringeren Gehalt an unerwünschten Elementen hat. Eine andere Möglichkeit ist die Biogasproduktion aus einer Mischung von Futtermitteln und Gülle tierischen Ursprungs.

Ein weiterer Punkt betrifft **die Qualität der produzierten Energie**. Wenn in der Energiebilanz die effizienteste Form die Verbrennung zu sein scheint, müssen wir die Art des Energieverbrauchs betrachten: Mobilität, Heizung, oder Dienstleistung. Wenn Bioethanol zum Beispiel teilweise (10%) mit fossilen Brennstoffen gemischt wird, dann brauchen die Fahrzeuge und die Vertriebsstrukturen nicht angepasst zu werden. Diese Form der Energie hat unangreifbare Vorteile für die Übergangszeit in der wir uns befinden gegenüber anderen Energieformen für unsere Mobilität.

Damit die landwirtschaftliche Produktion von zellulosehaltiger Biomasse signifikant ist, müssen die Erntemengen erhöht und gleichzeitig muss die Produktion nachhaltiger werden. Nachhaltigkeit, die bestimmte Kulturpflanzen bieten können, die speziell zur energetischen Verwertung dienen, wie Miscanthus und Switchgrass und deren energetische Zukunft vielversprechend aussieht. Trotz deren Interesse, muss das landwirtschaftliche Potenzial dieser beiden Arten für jede sozio-ökonomische und pedoklimatische Bedingung der landwirtschaftlichen Regionen definiert werden. Schließlich können einige an unsere Regionen angepasste Futterpflanzen interessant sein, wie Mais, Sorghum und vor allem Grünlandarten.

Die wichtigsten Kriterien für oder gegen den Anbau einer Art sind vor allem agronomischer, technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Art:

- Die pedoklimatische Anpassung und der Biomasseertrag,
- Die Qualität der Biomasse und deren Integration in Bezug auf die energetische Verwertung,
- Die Häufigkeit der Ernte, die Lagerung und die Verfügbarkeit der Biomasse.

Die Energiepflanzen könnten zu **einer wirtschaftlichen Alternative werden für Landwirte auf der Suche nach Absatzmöglichkeiten**. Die Kriterien für die Opportunität der Beteiligung der Landwirte in diesem Bereich, und daher das Objekt unserer Befragung, wird sich sicherlich in Zukunft auf drei wesentliche Punkte stützen:

- Wirtschaftliche Effizienz und Identifizierung eines Absatzmarktes,
- Die ökologische Relevanz, gemessen an der Art des Produktionsverfahrens,
- Territoriale Kohärenz gegenüber der landwirtschaftlichen Nutzfläche und den bestehenden Spekulationen

Unabhängig von der vorgesehenen Produktion und Verwertung ist die strukturelle und elementare Charakterisierung der untersuchten Biomasse unumgänglich, für eine maximale Energieeffizienz und für die ökologische und ökonomische Relevanz, damit die technische und wirtschaftliche Zukunft dieser Form der Verwertung der Futtermittel in Betracht gezogen werden können. Die Identifizierung der Szenarien, die durch das Projekt ENERBIOM an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden, ergeben die Möglichkeit eine Einführung einer Struktur "Energie-Biomasse" in der "Großregion" zu beurteilen.

Danksagungen

Die Autoren bedanken sich bei Thomas Schmit, Fabienne Rabier, Denis Mahin und Paul Dricot (CRA-W), Lucien Hoffmann und Sébastien Lemaigre (CRP-GL), Emmanuel Glaude (ASBL Au Pays de l'Attert), Yann Rogaume (LERMaB), Christelle Mignon (CRA-W Valbiom), für ihre technischen und wissenschaftlichen Beiträge, sowie beim europäischen Fonds EFRE und der Wallonischen Region für die Finanzierung der in diesem Artikel genannten Projekte.

Bibliographische Referenzen

ADEME (2009) : "Evaluation de la bibliographie relative aux ACV appliquées aux productions lignocellulosiques." *ADEME, Paris*, 41 p.

AHRING BK. (2003a) : "Biomethanation I. Advances in biochemical engineering/biotechnology – vol. 81.", *Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York*. pp. 220

- AHRING BK. (2003b) : "Biomethanation I. Advances in biochemical engineering/biotechnology – vol. 82.", *Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York*. pp. 270
- BARDEAU G. (2009) "Etude de la faisabilité de produire des combustibles à partir de mélanges de coproduits agricoles", *rapport de master, ENSTIB*
- BIOBIB (2010): "A Database for biofuels" (pages consultée le 10 janvier 2010), [en ligne]. Adresse URL : <http://www.vt.tuwien.ac.at>
- BUSCH G. (2006) : "Future European agricultural landscapes. What can we learn from existing quantitative land use scenario studies?", *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114(1):121.
- CARPITA N., MCCANN M. (2000) : "The cell wall", In: Buchanan B., Gruissem W. & Jones R., eds. "Biochemistry and molecular biology of plants", *American Society of Plant Physiologists, Rockville*, 52-108.
- da Costa Sousa L., Chundawat S., Balan V. & Dale B. (2009) : "Cradle-to-grave' assessment of existing lignocellulose pretreatment technologies", *Curr. Opinion in Biotechnology*, 20, 1-9.
- DEMIRBAS M.F., BALAT M., BALAT H. (2009) : "Potential contribution of biomass to the sustainable energy development", *Energy Conversion and Management*, 50:1746.
- DOOS BR, SHAW R. (1999) : "Can we predict the future food production? A sensitivity analysis.", *Global Environmental Change-Human And Policy Dimensions* 9(4):261-283.
- FAO (2004) : "Unified BioEnergy Terminology" *FAO Rome* 58 p.
- GODIN B., GHYSEL F., AGNEESSENS R., SCHMIT T., GOFFLOT S., LAMAUDIÈRE S., SINNAEVE G., GOFFART J.-P., GERIN P. A., STILMANT D., DELCARTE J. (2010) (soumis) : "Détermination de la cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et des cendres dans diverses cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de deuxième génération.", *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*
- HAMELINCK C., VAN HOOIJDONK G., FAAIJ A. (2005a) : "Ethanol from lignocellulosic biomass : techno-economic performance in short-, middle- and long-term.", *Biomass and Bioenergy*, 28, 384–410.
- HAMELINCK C., SUURS R, FAAIJ A (2005b) : "International bioenergy transport costs and energy balance.", *Biomass and Bioenergy* 29(2):114.
- HENDRIKS A., ZEEMAN G. (2009) : "Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass.", *Bioresource Technol.*, 100, 10–18.
- HOUGHTON J., WEATHERWAX S., FERRELL J. (2006) : "Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol : A Joint Research Agenda.", In: Houghton J., Weatherwax S. & Ferrell J., eds. "A Research Roadmap Resulting from the Biomass to Biofuels Workshop" 7-9 December 2005, Rockville.
- HUANG H.J., RAMASWAMY S., TSCHIRNER U., RAMARAO B. (2008) : "A review of separation technologies in current and future biorefineries.", *Separation and Purification Technol.*, 62, 1–21.
- LEHTOMÄKI A, HUTTUNEN S, LEHTINEN TM, RINTALA JA. (2008) : "Anaerobic digestion of grass silage in batch leach bed processes for methane production." *Bioresource Technology*, 99(8):3267.
- MCKENDRY P. (2002a) : "Energy production from biomass (part 1): conversion technologies", *Bioresource Technology* 83(1):47.
- MCKENDRY P. (2002b) : "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies", *Bioresource Technology* 83(1):47.
- MONTAGNE X. (2005) : "Biocarburants - Les carburants liquides." In: Colonna P., eds. *La chimie verte. Paris, France : TEC & DOC Lavoisier*, 419-446.
- MORAS S. (2007) : "Analyse comparée du cycle de vie des filières de production d'énergie renouvelable de la biomasse." FUSAGx, Gembloux. 332 p.
- OGIER J.-C., BALLERINI D., LEYGUE J.-P., RIGAL L., POURQUIE J. (1999) : "Production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique.", *Oil & Gas Sci. and Technol.*, 54(1), 67-94.
- PALMQVIST E., HAHN-HAGERDAL B. (2000) : "Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. I: inhibition and detoxification.", *Bioresource Technol.*, 74, 17-24.
- PROCHNOW A, HEIERMANN M, PLÖCHL M, LINKE B, IDLER C, AMON T, HOBBS PJ. (2009a) : "Bioenergy from permanent grassland - A review: 1. Biogas." *Bioresource Technology* 100(21):4931.
- PROCHNOW A., HEIERMANN M., PLÖCHL M., AMON T., HOBBS PJ. (2009b) : "Bioenergy from permanent grassland - A review: 2." *Combustion. Bioresource Technology* 100(21):4945.

- PROCHNOW A., HEIERMANN M., DRENCKHAN A., SCHELLE H. (2005) : "Season pattern of biomethanisation of grass from landscape management", *Agricultural Engineering International, Manuscript*
- REIJNDERS L, HUIJBREGTS MAJ. (2009). "Biofuels for Road Transport: A seed to wheel perspective." *Springer, London*.
- ROSSILO-CALLE F., DE GROOT P., HEMSTOCK SL., WOODS J. (2007) : "The Biomass Assessment Handbook", *Earthscan, London*, 269.
- ROWE R. SN, TAYLOR G. (2009) : "Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK.", *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 13:271-290.
- SCHENKEL Y., BENABDALLAH B (2005) : "Guide biomasse énergie" *IEPF, Québec*, 391 p.
- SMEETS E., FAAIJ A. (2009). "The economical and environmental performance of miscanthus and switchgrass production and supply chains in a European setting." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7):1230.
- SMEETS E., FAAIJ A., LEWANDOWSKI I., TURKENBURG W. (2007) : "A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050.", *Progress in Energy and Combustion Science* 33(1):56.
- UNION EUROPEENNE (2003) : "Directive 2003/30/CE du parlement européen et du conseil du 8 mai 2003 visant à promouvoir l'utilisation de biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports.", *Journal officiel de l'Union européenne*, L 123, 42-46.