HAL open science

Comment optimiser les chaînes d'approvisionnement en biomasse issue de cultures énergétiques ?

Benoit Gabrielle, Aurélie Perrin, Julie Wohlfahrt, Truls Flatberg, Thor Harald Bjorkvoll, G.I. Echevarria, D. Sanchez, Raimo van Der Linden, Chantal Loyce, Elise Pelzer, et al.

To cite this version:

Benoit Gabrielle, Aurélie Perrin, Julie Wohlfahrt, Truls Flatberg, Thor Harald Bjorkvoll, et al.. Comment optimiser les chaînes d'approvisionnement en biomasse issue de cultures énergétiques ?. Innovations Agronomiques, 2017, 54, pp.23-29. 10.15454/1.5137728981830786E12 . hal-01562297

HAL Id: hal-01562297

https://hal.science/hal-01562297v1

Submitted on 13 Jul 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Innovations Agronomiques 54 (2016), 23-29

Comment optimiser les chaînes d'approvisionnement en biomasse issue de cultures énergétiques ?

Gabrielle B.[1], Perrin A.[1], Wohlfahrt J.[2], Flatberg T.[3], BjØrkvoll T.[3], Echevarría G. I.[4], Sanchez D.[4], Van der Linden R.[5], Loyce C.[6], Pelzer E.[6], Ragaglini G.[7], Shield I.[8], Yates N.[8]

[1] INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, UMR EcoSys, Thiverval-Grignon, France

[2] INRA, SAD – ASTER, Mirecourt, France

[3] SINTEF Technology and Society, Department of Applied Economics, Trondheim, Norway

[4] CIEMAT, Energy Systems Analysis Unit, Madrid, Spain

[5] Energy Research Centre of The Netherlands (ECN), Biomass & Energy Efficiency Unit, Bioenergy Group, Petten, NL.

[6] AgroParisTech, INRA, UMR Agronomie, Thiverval-Grignon, France

[7] Scuola Superiore Santa Anna, Institute of Life Sciences, Field Crops and Bioenergy, Pisa, Italy

[8] Rothamsted Research, Agro-Ecology, Harpenden, Herts, United Kingdom.

Correspondance : Benoit.Gabrielle@agroparistech.fr

Résumé

Des chaînes d'approvisionnement en biomasse respectueuses de l'environnement et économiquement compétitives sont un facteur clé de succès pour le développement de la bio-économie. Or celui-ci est susceptible d'être entravé par la pénurie potentielle de biomasse lignocellulosique, matière première la plus demandée pour fabriquer des produits bio-sourcés. Des technologies innovantes pour la gestion des cultures, la récolte de biomasse et leur pré-traitement, le stockage et le transport offrent de nombreuses possibilités pour augmenter l'offre en biomasse tout en réduisant les coûts et en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement. Trois récents projets européens visaient à développer de telles technologies l'ensemble des chaînes logistiques, et à évaluer leur viabilité et durabilité. Les sources de biomasse étudiées incluaient les rémanents forestiers, les résidus d'arboriculture ainsi que des cultures lignocellulosiques annuelles, pérennes et ligneuses. Des filières existantes dans différentes régions d'Europe ont servi de cas d'étude en vraie grandeur et de support pour des démonstrations à l'échelle commerciale. Les principaux verrous identifiés concernent le stockage de biomasse et la phase de production pour les cultures dédiées, et des leviers d'amélioration portant sur la densification de la biomasse, le développement de systèmes de récolte plus efficaces et les systèmes de production de biomasse ont permis de réduire les coûts, la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

Mots-clés : Biomasse, Chaînes d'approvisionnement, Optimisation, Cultures énergétiques, Durabilité

Abstract: How to improve the performance of biomass supply chains from energy crops ?

Cost-efficient, environmental-friendly and socially sustainable biomass supply chains are urgently needed to achieve the 2020 and 2030 targets of the European Union. Optimized logistics are a key factor of success for bio-based value-chains, and there is currently ample room for improvement. Innovative techniques for crop management, biomass harvesting and pre-treatment, storage and

transport offer a prime avenue to increase biomass supply while keeping costs down and minimizing adverse environmental impacts. This communication will draw on results from recent projects funded by the European Commission on the development of new or improved technologies for logistics chains, encompassing energy crops, forest and agricultural residues. It includes an assessment of their sustainability at supply-area level for small to large-scale bio-based projects. The main bottlenecks of logistics reside in storage capacity and feedstock production, and some promising avenues to alleviate include legume-lignocellulosics mixtures, decentralized densification via briquetting, more efficient harvesting systems and a widening of harvesting time windows. In a case-study in Burgundy, reduction in costs of more than 30% could be achieved with these options, along with an abatement of 10 to 20% of greenhouse gas emissions.

Keywords: Biomass, Supply chains, Optimization, Energy crops, Sustainability

1. La logistique, un point clé dans la performance de la bio-économie

Des chaînes d'approvisionnement en biomasse respectueuses de l'environnement et compétitives sont un facteur clé de succès pour le développement de la bio-économie. Or celui-ci est susceptible d'être entravé par la pénurie potentielle de biomasse lignocellulosique[1] agricole, matière première la plus demandée pour fabriquer des produits bio-sourcés. Des techniques innovantes pour gestion des cultures, récolte de la biomasse, de stockage et de transport offrent une voie privilégiée pour accroître l'offre de biomasse tout en réduisant les coûts et en minimisant les impacts environnementaux négatifs (Styles et al., 2008 ; Gold et Seuring, 2011 ; Gabrielle et al., 2014). Les défis majeurs pour le déploiement des chaînes d'approvisionnement en biomasse à grande échelle réside le caractère diffus et peu dense de la biomasse, sa haute teneur en humidité et sont risque de détérioration pendant le stockage.

Les pistes pour améliorer les chaînes logistiques incluent, entre autres (Gold et Seuring, 2011) :

- Une efficacité accrue des étapes de récolte et de transport,
- La densification de la biomasse après récole, avec ou sans pré-traitement thermique, pour réduire les coûts de transport sur une base de contenu énergétique,
- La réduction des distances de transport ou le recours à des moyens peu polluants,
- Le recours à des systèmes de production de biomasse permettant l'échelonnement de la fourniture sur l'année, pour limiter les besoins en stockage, et possédant une productivité par hectare élevée.

Trois projets financés en parallèle par le 7ème Programme-cadre de la Commission européenne sur la période 2012-2016 visaient à relever ces défis, focalisés sur la biomasse forestière, les cultures énergétiques et les résidus horticoles et agricoles, respectivement (Akangas et al., 2015). Cet article se focalise sur le 2ème projet (Logist'EC), impliquant un large panel de cultures lignocellulosiques, mais rapporte quelques résultats marquants des deux autres projets.

2. Des améliorations par maillon de la chaîne allant de pair avec une approche holistique.

Le principe commun aux projets logistiques était qu'une amélioration dans les différents maillons de la chaîne logistique pouvait conduire à des marges substantielles sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, en mettant en évidence des itinéraires technologiques optimaux. Les projets ont

1 La biomasse lignocellulosique est une source de matière première très générique pour des filières à base de biomasse, pour produire de l'énergie (chaleur, électricité, carburants), des biomatériaux ou des matières premières pour la chimie.

ainsi examiné les différents maillons de la chaîne, allant de la production de la biomasse à la livraison sur une unité de transformation, et incluant pour certains aspects l'usage final (électricité, chaleur, ou biomatériaux ; Figure 1). Les différentes options technologiques explorées par les projets sont résumées dans le Tableau 1.

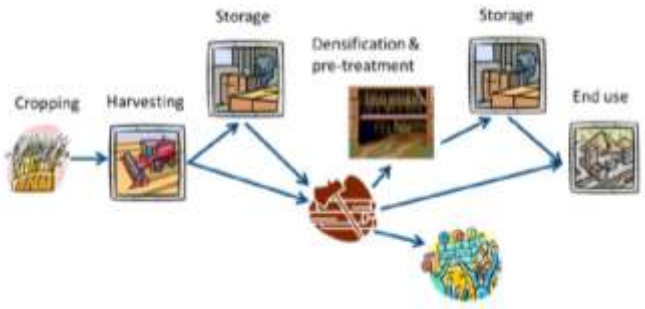

Figure 1 : Schéma des chaînes logistiques étudiées par le projet Logist'EC.

Tableau 1 : Résumé des tâches, tests ou développements effectuées pour les cultures à biomasse étudiées dans Logist'EC. Le code couleur indique l'échelle concernée (noir: laboratoire/champ ; vert: pilote ; marron: commerciale/démonstration). GES: gaz à effet de serre ; TCR: taillis à courte rotation ; Torwash: voie de torréfaction humide.

Source de Biomasse	Composantes logistiques			
	Production	**Système de récolte**	**Stockage**	**Pré-traitement**
Triticale	Association avec des légumineuses		Balles stockées en extérieur ou couvertes, briquettes en extérieur Granulés torréfiés	Granulation, briquettage Torréfaction, Torwash, avec granulation
Sorgho	Essai de réponse à l'azote		Biomasse torréfiée et/ou granulée; briquettes	Granulation, briquettage Torréfaction, Torwash, avec granulation
Canne de Provence	Effets de la destruction en fin de cycle ; Suivi des émissions de GES ; Recyclage d'un effluent de procédé de densification	Double récolte (été / hiver) Récolte précoce (automne)	Biomasse torréfiée et/ou granulée	Torréfaction, torréfaction avec lavage, Torwash, avec granulation
Miscanthus	Effets de la destruction en fin de cycle ; Suivi des émissions de GES ; dynamique du C du sol	Récolte automnale Récolte et pressage en balles simultanée Faible hauteur de coupe	Balles à brins courts	Granulation, briquettage Torréfaction, Torwash, avec granulation
Saule en TCR		Comparaison des systèmes existants Amélioration d'une faucheuse		Torréfaction, briquettage, Granulation, briquettage de biomasse torréfiée, granulation
Peuplier en TCR	Effets de la destruction en fin de cycle	Conception d'une tête de coupe à forte capacité	Billots et plaquettes	Torréfaction
TCR Eucaplyptus en TCR	Association avec légumineuses ; Ré-utilisation d'eaux grises	Conception d'une tête de coupe à forte capacité		Torréfaction

En parallèle à ce travail, un volet des projets était consacré à l'intégration des composantes de la chaîne d'approvisionnement et à l'évaluation de la durabilité, dans ses dimensions environnementales, économiques, voire sociales. En amont des chaînes, les gisements de biomasse ont été modélisées avec des approches statistiques ou à base de systèmes experts spatialement explicites. Des modèles économiques d'optimisation des chaînes ont été développés, incluant les sites de stockage, le réseau de transport, les processus de conversion et les utilisations finales de la biomasse. L'objectif était de guider les opérateurs des chaînes d'approvisionnement dans leurs choix et de fournir des informations à d'autres types de décideurs.

3. Résultats: aperçu général et points saillants

3.1 Des projets débouchant sur une large palette de résultats scientifiques et technologiques

Au terme de ses 3 années fonctionnement, les projets logistiques ont débouché sur quatre grands types de résultats:

- Des critères de performance technique, économique et environnementale précis pour l'ensemble des technologies commerciales sur les chaînes logistiques, ainsi que les améliorations développées au cours du projet,
- Un ensemble de méthodes, d'outils et de modèles pour intégrer, concevoir et évaluer des chaînes d'approvisionnement basées sur des cultures lignocellulosiques,
- Des bases de données sur les chaînes logistiques (par rapport aux équipements utilisés, la conduite des cultures biomasse, leurs rendements, et leur durabilité),
- Quelques exemples de mise en œuvre de la chaîne, qui documentent leur faisabilité, l'application des bases et des outils de données, et leur performance globale ainsi que leur durabilité (bilans environnementaux, impacts sociaux et économiques).

Quelques exemples précis sont documentés ci-dessous, issus des différents projets.

3.2 Des équipements mieux adaptés et plus efficaces

Le broyage des rémanents est une étape incontournable des filières bioénergie pour la forêt, pour réduire les coûts de transport et permettre l'introduction dans des chaudières modernes. Néanmoins elle entraîne des coûts économiques et environnementaux importants. Les équipes du projet INFRES ont testé un prototype de broyeur pour des rémanents forestiers (résidus de coupes forestières) fonctionnant avec une motorisation hybride (diesel / électricité). Leur démonstration en conditions d'exploitation commerciale a mis en évidence une réduction de la consommation de carburant d'environ 30% par rapport et des émissions de gaz à effet de serre (GES) de 20% (Laitila et al., 2015), tout en fournissant des plaquettes de qualité suffisante pour le chauffage résidentiel.

Dans une perspective similaire, le défi principal du projet EUROPRUNING, consacré aux résidus horticoles, consistait à mettre au point un système de récolte des branchages issues des tailles de vignes ou d'arbres fruitiers permettant un conditionnement en balles ou fagots suffisamment denses pour rendre rentable l'exploitation de ces résidus. En effet, ceux-ci sont très peu valorisés à l'heure actuelle du fait de leur nature dispersée et des difficultés à mécaniser leur collecte. Un prototype de presses à balle développé par un partenaire du projet a fait l'objet de démonstrations récentes sur des vergers de pommiers, et a permis de récolter 80% des branchages au sol avec un débit de chantier d'une heure par hectare.

Les technologies de récolte des cultures lignocellulosiques sont disponibles au niveau commercial depuis une vingtaine d'années, mais n'avaient pas été comparées de manière indépendante sur un ensemble de critères uniforme. Des systèmes de récolte de TCR de saule ont été évalués sur la base

d'observations de terrain des récoltes au Royaume-Uni (Tableau 2). Les ensileuses permettant un broyage direct en plaquettes apparaissent la technologie la plus efficace à l'heure actuelle (Tableau 2). Une réserve concerne néanmoins le comportement de ces plaquettes humides pendant le stockage, et leur séchage. Les machines de bûcheronnage (de type abatteuse) sont également efficaces, mais il faut tenir compte du traitement post-récolte des billons obtenus (eg, déchiquetage). Leur stockage et séchage fait l'objet de tests en cours. La machine dédiée 'Bio-baler' est l'option la moins intéressante, ce qui explique un désintérêt pour cet équipement depuis 2011.

Tableau 2 : Critères de performance de différents systèmes de récolte des TCR de saule.

	Bio-Baler	Ensileuse faible puissance	Ensileuse moyenne puissance	Ensileuse forte puissance	Fagoteuse	Abatteuse
Coût (£ ha^{-1})	417	361	286	312	468	252
Consommation de carburant (l ha^{-1})	196	231	109	97	101	60
Débit de chantier (h ha^{-1})	5.0	4.2	1.7	1.4	1.7	1.8
Nombre de personnes	2,5	2,25	3,25	3,25	3,25	1
Produit	Balles rondes	Plaquettes 50-75 mm	Plaquettes 50-75 mm	Plaquettes 50-75 mm	Billons courts	Billons de longueur < 8m

3.3 La densification sous forme de briquettes réduit les coûts de transport

La densification conventionnelle de la biomasse sous forme de balles offre plusieurs avantages pour conditionner la biomasse après récolte, mais des alternatives comme le pressage en briquettes (briquettage) ou en granulés peuvent apporter des améliorations significatives pour la logistique. Les briquettes atteignent des densités voisines de 1000 kg m^{-3} (contre 300 kg m^{-3} pour les balles), et sont des combustibles supérieurs en termes de qualité, surtout quand elles sont associés à un pré-traitement thermique. Le briquettage est une technologie couramment utilisée pour les résidus de bois ainsi que pour le charbon, mais encore peu développé pour les matériaux plus fibreux (tels que des cultures énergétiques). Les différentes sources de biomasse étudiées dans Logist'EC (Tableau 1) ont été testées dans une presse à briquettes afin de déterminer la faisabilité de ce pressage et les paramètres optimaux de fonctionnement tels que la forme, la taille et la température de la filière.

Le triticale est apparu comme une bonne matière première pour ce procédé, tandis que le sorgho s'est avéré plus difficile à presser. Le miscanthus a généré un faible niveau de friction dans la presse, avec pour résultat une faible consommation d'énergie mais également une densité des briquettes moins élevée que pour le sorgho. A l'inverse les briquettes de TCR saule ont atteint une densité assez forte, autour de 1100 kg m^{-3}.

3.4 Explorer des scénarios d'amélioration avec la modélisation de la filière

Les options développées pour les différents maillons des chaînes logistiques ont été intégrées dans des modèles de chaînes logistiques, et ont permis de mettre en évidence des marges de progrès intéressantes et d'explorer des scénarios, ou à l'inverse de relativiser l'intérêt des améliorations notées sur une seule étape. Ainsi l'utilisation des innovations du projet INFRES n'entraîne qu'une réduction des coûts de l'ordre de 5 % par rapport aux filières existantes.

Pour le cas d'étude focalisé sur la coopérative 'Bourgogne Pellets', qui développe le miscanthus en Côte d'Or, trois voies d'amélioration de la performance économique ont été explorées à l'aidea d'un modèle mathématique d'optimisation qui cherche à maximiser la marge économique de la coopérative. La première piste consistait à densifier la biomasse par briquettage, tandis que la deuxième concernait une récolte du miscanthus à l'automne, pour profiter d'un rendement supérieur. Dans un troisième scénario, la production de biomasse était multipliée par un facteur 5 par rapport à la situation actuelle, pour voir d'éventuelles économies d'échelle. Le Tableau 3 résume les résultats économiques de ces scénarios. L'augmentation de la production annuelle n'a pas été source d'économies d'échelle à cause de l'augmentation associée des distances et coûts de transport de la biomasse. A l'inverse, la récolte automnale a permis d'augmenter les rendements par hectare cultivé et de réduire ces distances, avec en conséquence une marge par tonne de biomasse produite multipliée par près de 50 % par rapport à la situation actuelle. La densification par briquettage entraînerait également une forte hausse du profit, dont il faut noter qu'elle s'accompagnerait d'un changement de produit final pour la coopérative (qui vendrait directement les briquettes sortant des presses plutôt que des granulés fabriqués au siège de la coopérative).

Tableau 3. Production annuelle, coûts et profit par tonne de biomasse sèche (MS) simulés pour la coopérative Bourgogne Pellets, pour 3 scénarios : une récolte du miscanthus à l'automne, une multiplication de la production par 5, ou une densification de la biomasse par briquettage décentralisé.

Scénario	Production annuelle [t MS]	Coût [1000€]	Revenu [1000€]	Profit [€/t MS]
Référence	6 000	942	1 072	21,7
Récolte automnale	6 428	977	1 173	30,5
Production maximale	30 000	5 002	5 644	21.4
Briquettage	6 000	683	910	37,9

4. Conclusion et perspectives

Les projets sur la logistique ont montré que celle-ci pouvait être source d'améliorations, soit par des innovations sur un ou plusieurs maillons de la chaîne, soit par une optimisation globale du système en tenant compte de la demande en produits finaux et des contraintes de production.

Grâce à la participation de PME spécialisées dans la logistique de la biomasse, un certain nombre de développements innovants effectués pour le projet ont pu être directement commercialisés: c'est le cas de machines de récolte pour les taillis à courte rotation (de l'entreprise CRL, UK), d'une nouvelle tête de coupe pour les cultures herbacées mise au point par la PME Nobili (IT), de l'adaptation d'une presse à briquettes pour les herbacées (CF Nielsen, DK), ou encore d'un système informatique de planification de l'utilisation des ressources pour suivre les flux et stocks de biomasse dans une chaîne d'approvisionnement (MHG Systems, FL).

D'autres innovations relèvent plus du moyen terme, mais ont également un potentiel important pour réduire les coûts et améliorer la durabilité. C'est le cas des associations céréales-légumineuses, ou de procédés de torréfaction humide pour recouvrir les nutriments des cultures et améliorer leur qualité par rapport à des applications en thermochimie.

La modélisation mathématique a montré des marges de progrès intéressants en utilisant des technologies existantes, mais également l'importance de la prise en compte de la dimension temporelle (saisonnière), et la sensibilité des résultats économiques à l'incertitude sur la demande en produits finaux. D'autre part, reconstituer des assemblages optimaux sur les différentes parties des chaînes est reste un défi important, compte tenu des interactions entre les options choisies (entre mode de récolte et de stockage, par exemple). Ceci d'autant plus que la structure de ces chaînes de valeur, qui sont

relativement récentes et encore à la recherche d'un modèle économique viable fait de leur amélioration une cible mouvante, dont les caractéristiques sont souvent mal documentées. Logist'EC a fourni une première étape dans cette voie, et son transfert aux praticiens et aux développeurs de projets devrait être facilitée par une contribution sous forme de bases de données et modèles de simulation au projet Européen S2Biom (Khawaja et Janssen, 2014).

Références bibliographiques

Alakangas E., Vis M., Spinelli R., Vos J., 2015. Smart logistics for forest residues, prunings and dedicated plantations. Proc. Joint Conference on Mobilization of Woody Biomass for Energy and Industrial use, FAO, Rome, May 2015.

http://www.infres.eu/openfile/342 (lien testé le 5/11/2016).

Gabrielle B., Bamière L., Caldes N., DeCara S., Decocq G., Ferchaud F., Loyce C., Pelzer E., Perez Y., Wohlfahrt J., Richard G., 2014. Paving the way for sustainable bioenergy in Europe: technological options and research avenues for large-scale biomass feedstock supply Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33, 11-25.

Gold S., Seuring S., 2011. Supply chain and logistics issues of bio-energy production. Journal of Cleaner Production, 19, 32-42.

Khawaja C., Janssen R., 2014. Sustainable supply of non-food biomass for a resource efficient bioeconomy. A review paper on the state-of-the-art WIP - Renewable Energies, Munich.

http://www.s2biom.eu/images/Publications/S2biom_review_state-of_the_art_Final.pdf (lien testé le 5/11/2016).

Laitila J., Routa J., Prinz R., Kokko K., Kaksonen P., Suutarinen J., Eliasson L.J., 2015. Prototype of hybrid technology chipper. Deliverable D4.6, INFRES project (311881), Luke, Joensuu.

Perrin A., Wohlfahrt J., Flatberg T., Morandi F., De La Rua Lope C., Østergard H., BjØrkvoll T., Gabrielle B., 2015. Optimization of biomass supply-chain logistics and sustainability assessment. The case of Miscanthus at Bourgogne Pellets, France Proceedings of the Biomass and Energy Crops V conference, Brussels, 20-22 Oct. 2015, Association of Applied biologists, Warwick, UK.

Styles D., Thorne F., Jones M.B., 2008. Energy crops in Ireland: An economic comparison of willow and Miscanthus production with conventional farming systems Biomass and Bioenergy, 32, 407-421.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL ou son DOI)