DESUWOW

Développement de compétences professionnelles pour l'utilisation des déchets solides urbains et des déchets organiques dans l'agriculture

2020-1-UK01-KA202-079054

IO2

Reconnaissance
Ce document a reçu un financement de la Commission européenne dans le cadre de la convention de subvention—2020-1-UK01-KA202-079054, projet de partenariat stratégique ERASMUS+ « Développement des compétences professionnelles pour l'utilisation des déchets solides urbains et des déchets organiques dans l'agriculture ».

Clause de non-responsabilité
"Le soutien de la Commission européenne à la production de cette publication ne constitue pas une approbation du contenu qui reflète uniquement les opinions des auteurs, et la Commission ne peut être tenue responsable de l'utilisation qui pourrait être faite des informations qui y sont contenues".

Copyright notice
© 2020 - 2022 DESUWOW Consortium

CONTENUS

Chapitre 1- Introduction Conversion de la biomasse en énergie **7**
A propos **7**
Contexte **7**
Biomasse **8**
L'importance de la biomasse **9**
Durabilité dans l'utilisation de la biomasse **9**
Impact environnemental 10
Impact économique 11
Impact social 12

Chapitre 2 - Ressources et approvisionnement en biomasse **14**
A propos **14**
Ressources en biomasse **14**
Déchets de bois et sous-produits agricoles 15
Evaluation de la biomasse **15**
Approche d'inventaire de quantité 15
Évaluation forestière 16
Résidus agricoles 17
Cultures énergétiques 18
Autres ressources de biomasse 18
Approche économique 19
Approche de coût et quantité 19
Approche de la courbe d'offre 19
Approche d'approvisionnement basée sur les coûts 19
Données sur les ressources en biomasse **20**

Chapitre 3 - Utilisation de la biomasse **23**
A propos **23**
Utilisation de la biomasse **23**
Méthode de prétraitement de la biomasse **24**
Prétraitement d'extrusion 24
Prétraitement acide 24
Prétraitement alcalin 25
Prétraitement organosolv 25
Prétraitement liquide ionique 26
Prétraitement par explosion à la vapeur 26
Prétraitement par explosion de fibres d'ammoniac 27
Prétraitement par eau chaude liquide 28
Prétraitement biologique 28
Méthodes de conversion de biomasse **29**
Combustion directe 29
Gazéification 29
Pyrolyse 29

Digestion anaérobique 30
Liquéfaction 30
Liquéfaction indirecte 31
Liquéfaction directe 31
Hydrolyse- liquéfaction par fermentation 31
Liquéfaction thermodynamique 31
Pyrolyse 31
Hydrothermal 32

Chapitre 4- Procédé de conversion de l'énergie de la biomasse(bioénergie) 34
A propos 34
Bioénergie 34
Biocarburant 34
Biogaz 35
Flux de production de bioénergie 35
Production de chaleur et d'électricité 36
Production de biocarburants 37
Biodiesel 37
Technologies de production de biodiesel 38
Utilisation directe (dilution)ou mélange 38
Pyrolyse 38
Micro-émulsification 39
Transestérification 39
Transestérification catalysée par un acide 39
Transestérification catalysée par une base 40
Transestérification catalysée par la lipase 41
Transestérification catalysée par un liquide ionique 42
Bioéthanol 42
Processus de production de bioéthanol 43
Processus de prétraitement 43
Prétraitement traditionnel 44
Prétraitement avancé 44
Hydrolyse 45
Processus de fermentation 45
Processus de fermentation discontinue 45
Processus de fermentation continue 46
Processus de fermentation fed-batch 46
Hydrolyse et fermentation séparée 46
Saccharification et fermentation simultanées 46
Saccharification et co-fermentation simultanées
Bio-traitement consolidé 47
Production de biogaz 47
Processus de prétraitement 47
Méthodes de prétraitement physiques 48
Méthodes de prétraitement thermal 48

Méthodes de prétraitement chimiques 48
Méthodes de prétraitement biologiques 48
Méthodes de prétraitement combiné 48
Technologies de digestion anaérobie 48

Chapitre 5- Processus de développement de projets de biomasse 53
A propos 53
Concept de projet de biomasse à énergie 53
Etapes du projet 54
Etape de préparation 54
Idée de projet 54
Etudes de préfaisabilité 54
Etudes de faisabilité 55
Contrats et financement 57
Mise en oeuvre du projet 57
Développement du projet 57
Repérage du site 58
Approvisionnement et ressources en biomasse 58
Considérations techniques 58
Législation sur l'exploitation et la maintenance du projet 59
Economie de projet et financement 59

Chapitre 6- Aspect commercial de la conversion de la biomasse en énergie 62
A propos 62
Contexte 62
Accord d'approvisionnement en biomasse 62
Accord d'achat d'électricité 64
Contrat d'alimentation à vapeur/chaleur 65
Contrat de bio-résidue et d'élimination des déchets 65

Chapitre 7 - Evaluation économique 67
A propos 67
Contexte 67
Analyses financières 68
Capital de coût moyen pondéré
Revenu 69
Coût de l'offre de biomasse 69
Dépenses en capital 69
Durée de vie économique 70
Analyse économique 70
Avantages économiques locaux et coûts 70
Avantages économiques publics et coûts 70

Chapitre 8 - Evaluation environnementale et sociale 73
A propos 73
Contexte 73

Evaluation environnementale **74**
Eau 74
Biodiversité 75
Sol et terre 76
Air 78
Evaluation socio-économique **78**

Chapitre 1 - Introduction Conversion de la biomasse en énergie

À propos

Ce chapitre fournira des connaissances et des informations relatives à la biomasse et à sa conversion en énergie. Comme la biomasse provient de sources durables, il est encore nécessaire de mieux comprendre comment la convertir de manière durable. Ce chapitre fournira une introduction à la biomasse et à tous les processus impliqués dans le système et la gestion de projet.

Il y a quelques objectifs dans ce chapitre :

- Comprendre ce qu'est la biomasse et ses sources dans un aperçu général
- Comprendre l'importance de la conversion de la biomasse en énergie
- Comprendre le concept général de la valorisation énergétique de la biomasse
- Comprendre l'approche de durabilité dans la conversion de la biomasse

Contexte

Le paquet Fit-for-55 de la Commission européenne est une série de propositions législatives visant à atteindre l'objectif climatique accru de l'Union européenne en réduisant de 55 % les émissions d'ici 2030. Ce paquet comprend un objectif plus élevé et de nouvelles règles pour soutenir l'expansion des énergies renouvelables, y compris les ressources énergétiques renouvelables. En outre, l'Union européenne (UE) a fixé des objectifs ambitieux en matière de climat et d'énergie pour 2030, y compris un objectif à l'échelle de l'UE pour les énergies renouvelables de 32 % à 40 % de la consommation finale d'énergie.

IEn 2020, la part des énergies renouvelables dans l'Union européenne est de 21,3 % (Agence européenne pour l'environnement, 2021). Selon l'Agence européenne pour l'environnement, ce chiffre signifie que l'UE a atteint l'objectif de 20 % de part d'énergie renouvelable pour 2020. L'amélioration et les progrès constants en matière de production d'énergie renouvelable sont une nécessité car le nouvel objectif de consommation finale d'énergie pour les énergies renouvelables est 40 % en 2030. Selon la fiche d'information sur l'énergie de l'UE, 75 % des émissions totales de gaz à effet de serre dans l'UE proviennent

des secteurs de l'énergie. Ainsi, l'augmentation de la production d'énergie renouvelable réduira les émissions de GES elles-mêmes.
Les critères renforcés pour la bioénergie durable conformément à la stratégie de l'UE en matière de biodiversité pour 2030 sont les suivants :

- Interdire l'approvisionnement en biomasse pour la production d'énergie à partir des forêts primaires, des tourbières et des zones humides
- Pas de soutien à la biomasse forestière dans les installations exclusivement électriques à partir de 2026
- Interdire les incitations financières nationales pour l'utilisation de grumes de sciage ou de placage, de souches et de racines pour la production d'énergie
- Exiger que toutes les installations de chaleur et d'électricité à base de biomasse respectent des seuils minimaux d'économie de gaz à effet de serre
- Appliquer les critères de durabilité de l'UE aux petites installations de chaleur et d'électricité (égales ou supérieures à 5 MW)

Biomasse

La biomasse est organique, ce qui signifie qu'elle est constituée de matériaux provenant d'organismes vivants, tels que les plantes et les animaux. La biomasse provient de diverses ressources qui comprennent les résidus de l'industrie du bois, les cultures énergétiques, les effluents de l'agriculture et de l'agroalimentaire, la fraction organique des déchets solides municipaux, les déchets ménagers et les boues d'épuration des stations d'épuration.

La biomasse de l'**agriculture** peut comprendre les résidus de cultures, la bagasse, les déchets animaux, les cultures énergétiques, etc. La **foresterie** peut comprendre les résidus d'exploitation forestière, les sous-produits de la transformation du bois, la liqueur noire de l'industrie de la pâte et du papier, le bois de chauffage, etc., et d'**autres types de déchets biologiques** qui peuvent inclure les déchets alimentaires, les déchets de l'industrie alimentaire, la fraction organique des déchets solides municipaux, les déchets ménagers organiques, etc.

La biomasse pour l'utilisation de l'énergie (bioénergie) doit être produite, traitée et utilisée de manière durable et efficace afin d'optimiser les économies de gaz à effet de serre et de maintenir les services écosystémiques. L'utilisation de la biomasse notamment à des fins énergétiques doit être mise en œuvre sans provoquer de déforestation ou de dégradation des habitats ou de perte de biodiversité. La performance environnementale d'une chaîne de valeur et de processus bioénergétiques dépend fortement des différentes étapes de la voie, de la culture et de la récolte des matières premières, au traitement, à la conversion et à la distribution des vecteurs bioénergétiques, jusqu'à l'utilisation finale de l'énergie. Par conséquent, la durabilité doit être évaluée au cas par cas.

L'importance de la biomasse

La biomasse a des caractéristiques polyvalentes qui peuvent être appliquées à plusieurs applications, telles que la chaleur, l'électricité et les combustibles. En tant que biomasse générée à partir de sources renouvelables, cela rendra l'utilisation de la biomasse plus durable. Si la production de biomasse est mise en œuvre de manière durable, elle réduira les émissions de gaz à effet de serre car il s'agit d'un vecteur neutre en carbone. Outre l'impact de la biomasse sur l'environnement, la biomasse améliorera l'économie et la sécurité énergétique.

La bioénergie peut jouer un rôle important dans la réalisation des objectifs de l'UE en matière d'énergies renouvelables d'ici 2030 et au-delà. Des opportunités d'augmenter l'utilisation de la bioénergie sont observées, par ex. sur le terrain en utilisant des résidus agricoles, des sous-produits et des déchets. La bioénergie peut également jouer un rôle important en tant que vecteur énergétique flexible pour équilibrer les systèmes électriques et permettre ainsi des parts plus élevées de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire. Toujours avec des pratiques durables, la bioénergie peut contribuer à assurer des aspects environnementaux tels que la préservation de la biodiversité ou le maintien des services écosystémiques, entre autres ; économies de gaz à effet de serre, durabilité et développement rural.

La biomasse est également l'une des sources importantes qui peuvent être utilisées comme ressource d'énergie renouvelable pouvant soutenir les accords verts européens. En 2017, la Commission européenne a publié un rapport final sur l'utilisation durable et optimale de la biomasse pour l'énergie dans l'UE. En 2021, la Commission européenne a proposé une révision de la directive sur les énergies renouvelables afin de renforcer les critères de durabilité de l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques. Il existe des objectifs qui visent à atteindre au niveau national comme suit (Commission européenne, 2021):

- Les bâtiments, une nouvelle référence de 49 % d'utilisation d'énergies renouvelables d'ici 2030

- L'industrie, une nouvelle référence d'une augmentation annuelle de 1,1 point de pourcentage de l'utilisation des énergies renouvelables
- Chauffage et refroidissement, l'augmentation annuelle indicative actuelle de 1,1 point de pourcentage devient contraignante pour les États membres, avec des compléments nationaux indicatifs spécifiques
- Chauffage et refroidissement urbains, une augmentation annuelle indicative de 2,1 points de pourcentage de l'utilisation des énergies renouvelables et de la chaleur et du froid résiduels (une augmentation par rapport à l'augmentation actuelle de 1,0 point de pourcentage)
- Secteur des transports, la proposition introduit un objectif de réduction de 13 % de l'intensité des gaz à effet de serre des carburants de transport d'ici 2030.

L'utilisation avancée et plus durable de la biomasse pour l'énergie est importante pour atteindre les objectifs proposés par la Commission européenne.

Durabilité dans l'utilisation de la biomasse

La biomasse est une source d'énergie attrayante disponible en permanence sur Terre. La bioénergie peut devenir une source d'énergie propre, fiable et durable. En outre, la bioénergie joue un rôle clé dans la réalisation des objectifs climatiques et énergétiques de l'UE. Dans le cadre du Green Deal européen, la Commission européenne évoque les perspectives d'une dépendance accrue à l'égard des sources d'énergie issues de la biomasse - et donc de l'utilisation de la biomasse. Certains impacts sont liés à la production de bioénergie. La bioénergie peut aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). En outre, cela apportera des avantages économiques à la société, comme la création de nouveaux emplois et des sources d'énergie abordables. Cependant, la durabilité ne concerne pas seulement l'aspect environnemental, elle concerne également les aspects sociaux et économiques.

Impact environnemental

Selon Institute for European Environmental Policy (2021), la durabilité environnementale s'entend donc dans le contexte de deux principes fondamentaux :

- Le premier est de reconnaître et de récompenser la biomasse laissée sous sa forme vivante (pour la résilience des écosystèmes et les puits de carbone naturels) comme apportant une contribution importante aux objectifs du pacte vert de l'UE ;
- Le second est l'endroit où la biomasse est récoltée et utilisée, pour assurer la protection des écosystèmes dont provient cette biomasse et sans lesquels il n'y aurait pas d'approvisionnement durable.

Sur la base de plusieurs évaluations existantes de la compréhension et de l'estimation de l'approvisionnement durable en biomasse, les conditions suivantes doivent être prises en compte lors de la mobilisation des ressources en biomasse de manière durable :

- Disponibilité des terres et utilisations concurrentes des terres, ainsi que gestion des terres, telle que l'intensité de la production. Cela comprend les changements

indirects d'utilisation des terres par déplacement. Les zones dédiées à la production de denrées alimentaires, d'aliments pour animaux et de fibres doivent être exclues.
- Impact sur les cycles du carbone, en supprimant la biomasse qui, autrement, continuerait à accumuler du carbone in situ.
- Impact sur d'autres objectifs environnementaux (autres que l'atténuation du climat) par la culture et l'extraction de la biomasse, tels que les besoins en eau pour la croissance, ou la perte de nutriments et de structure du sol où les résidus en excès sont éliminés.

La production de biomasse agricole peut entraîner des impacts négatifs sur les sols (par exemple, la perte de nutriments et de matière organique du sol, l'érosion, le drainage des tourbières), la disponibilité de l'eau (en particulier dans les zones où l'eau est rare) et la biodiversité. L'étude de la Commission européenne de 2013 a conclu que « des risques potentiels considérables pour la durabilité de la culture des biocarburants existent, en particulier les risques pour les sols, la qualité de l'eau et la disponibilité de l'eau ». L'utilisation de résidus agricoles (par exemple : la paille) peut également avoir des impacts négatifs sur les sols tels que la fertilité et la structure, et sur la biodiversité s'ils sont extraits en quantités excessives. D'autre part, l'utilisation des déchets pour produire du biogaz peut réduire considérablement les émissions de méthane et autres. C'est la raison pour laquelle le contrôle et la réglementation sont importants pour produire de la bioénergie.
Cependant, pour assurer la durabilité de la production de bioénergie, les critères renforcés conformément à la stratégie de l'UE en matière de biodiversité pour 2030 sont :
- Interdire l'approvisionnement en biomasse pour la production d'énergie à partir des forêts primaires, des tourbières et des zones humides
- Pas de soutien à la biomasse forestière dans les installations exclusivement électriques à partir de 2026
- Interdire les incitations financières nationales pour l'utilisation de grumes de sciage ou de placage, de souches et de racines pour la production d'énergie
- Exiger que toutes les installations de chaleur et d'électricité à base de biomasse respectent des seuils minimaux d'économie de gaz à effet de serre
- Appliquer les critères de durabilité de l'UE aux petites installations de chaleur et d'électricité (égales ou supérieures à 5 MW)

Impact economique

Selon la Commission européenne (2016), il existe certains impacts de l'aspect économique dans la production de bioénergie :

- Contribution à la valeur ajoutée brute - Cet impact positif sur la valeur ajoutée brute est une combinaison de
    - un "effet de déploiement" positif : l'augmentation des autres sources d'énergie renouvelables entraîne davantage d'investissements et donc un impact positif plus important sur l'ensemble de l'économie
    - un "effet revenu" positif : les emplois supplémentaires créés par ce changement entraînent un revenu supplémentaire pour les ménages, qui est dépensé en consommation
    - un « effet indirect » négatif : d'autres sources d'énergie renouvelables nécessitent un niveau de soutien public plus élevé, soit directement par le

biais de subventions, soit par le biais de tarifs de rachat. Cela peut impacter les consommateurs, si les tarifs de rachat leur sont directement répercutés par une hausse des prix de l'énergie, ou si les subventions sont financées par une hausse de la fiscalité : dans les deux cas, la consommation des ménages diminuerait. Un soutien accru pour d'autres énergies renouvelables peut également être mis à disposition en accordant moins de soutien public à d'autres secteurs, ce qui aura également un impact économique négatif.

- Impact sur les petites et moyennes entreprises (PME) - Les PME et les micro-entreprises sont largement représentées dans la chaîne de production et d'utilisation de la bioénergie à travers, en particulier, les petits propriétaires forestiers et les petites installations de bioénergie. Dans le scénario de référence, les PME du secteur forestier pourraient être concernées par les programmes nationaux. Il est toutefois peu probable que ces PME aient à se conformer à plusieurs régimes nationaux compte tenu de leur éventail probable d'activités.
- Impact sur le développement rural - Des impacts positifs sur le développement rural peuvent se produire dans les cas où une demande supplémentaire en bioénergie incite à une exploitation plus intensive des forêts de l'UE et à l'utilisation de matières premières agricoles de l'UE (plutôt que, par exemple, en augmentant les importations ou en détournant les résidus industriels d'autres utilisations). Cela sera principalement dicté par le marché et/ou par les programmes de subventions pertinents dans chaque région. Elle peut également être influencée au niveau de l'UE, par ex. appui à la mobilisation du bois dans le cadre des programmes de développement rural.
- Impact sur le marché intérieur et le commerce intra-UE
- Impact sur le commerce extérieur - diminution des importations en provenance des pays tiers pour toutes les options
- Innovation et recherche - Alors que la bioénergie a un angle d'innovation important (par exemple en ce qui concerne les biocarburants avancés pour le transport), les options politiques sont peu susceptibles de faire une différence fondamentale pour l'innovation et la recherche puisque les exigences de durabilité n'auraient un impact que sur des technologies (c'est-à-dire l'utilisation de la biomasse solide et gazeuse pour la chaleur et l'électricité)

Impact social

Les aspects sociaux des systèmes bioénergétiques, selon Segon et Domac (n.d.) peuvent être divisés en deux catégories :

- Lié au niveau de vie - Dans ce cas, le niveau de vie était lié au revenu du ménage, à l'éducation, à l'environnement et aux soins de santé, tandis que la cohésion sociale et la stabilité étaient définies en termes de paix et de relations communautaires, d'emploi, de stabilité de la population rurale, d'infrastructure et de soutien pour les industries connexes.
- Contribuer à accroître la cohésion sociale et la stabilité.

Il y a des impacts sur l'aspect social (ERIA, 2008; EC, 2016):

- Création d'emplois - L'emploi dans l'économie de la bioénergie est le plus important dans le secteur de la biomasse solide, où 306 800 Européens avaient un emploi en 2014. En outre, 110 350 personnes étaient employées dans le secteur des biocarburants, 66 200 dans le secteur du biogaz et 8 410 dans les déchets urbains renouvelables. secteur. Des impacts sur l'emploi se produiront également à la suite du léger passage de la bioénergie à d'autres énergies renouvelables dans les options politiques, en raison d'une intensité de main-d'œuvre plus élevée d'autres sources d'énergie renouvelables.
- Avantages pour la santé - des techniques de biomasse améliorées pour la cuisson et le chauffage domestique amélioreront la qualité de vie des femmes et des nourrissons. La réduction de l'incidence des maladies se traduira également par des avantages économiques en raison d'une diminution des hospitalisations et des journées de travail perdues et des dépenses en soins médicaux.
- Autonomisation des femmes - Le développement de la bioénergie a le potentiel d'impliquer les femmes dans l'élevage de pépinières et la collecte de semences, ce qui pourrait conduire à une meilleure participation à l'économie du village.
- Amélioration possible de l'indice de développement humain (IDH) - Comme indiqué précédemment, le développement des programmes de bioénergie devrait augmenter l'emploi, ce qui améliorera les revenus des individus. Les gens peuvent utiliser un revenu supplémentaire pour subvenir à leurs besoins de base tels que l'éducation, les soins de santé et des aliments nutritifs.

References:

Ahmed, I., et. al., 2021. Socio-Economic and Environmental Impacts of Biomass Valorisation: A Strategic Drive for Sustainable Bioeconomy. https://www.mdpi.com/2071-1050/13/8/4200/htm

Climate-KIC, 2021. Material Economics (2021). EU Biomass Use In A Net-Zero Economy - A Course Correction for EU Biomass. ttps://www.climate-kic.org/wp-content/uploads/2021/06/MATERIAL-ECONOMICS-EU-BIOMASS-USE-IN-A-NET-ZERO-ECONOMY-ONLINE-VERSION.pdf

Cristobal, Garcia J., et. al., 2016. Environmental sustainability assessment of bioeconomy value chains. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC96980

Dale, V.H., 2013. Indicators for assessing socioeconomic sustainability of bioenergy systems: A short list of practical measures. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X12003652

Dunmade, I. S., 2019. Potential social lifecycle impact analysis of bioenergy from household and market wastes in African cities. https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2019/05/AR2019_Vol17No4_Dunmade.pdf

European Commission, 2016. Sustainability of Bioenergy. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_en_impact_assessment_part4_v4_418.pdf

European Commission, 2018. A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/edace3e3-e189-11e8-b690-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-149755478

European Commission, Camia, A., Giuntoli, J., Jonsson, R., et al., 2021. The use of woody biomass for energy production in the EU. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7120db75-6118-11eb-8146-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-228484245

European Commission, 2021. Facts and Figures of Bioenergy in the EU. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/environmental-sustainability-energy-generation-forest-biomass-2021-01-26_en

Institute for European Environmental Policy, 2021. Policy Report: Biomass in the EU Green Deal. https://ieep.eu/uploads/articles/attachments/a14e272d-c8a7-48ab-89bc-31141693c4f6/Biomass%20in%20the%20EU%20Green%20Deal.pdf?v=63804370211

Jack, M., & Hall, P., 2010. Large-scale forests for bioenergy: land-use, economic and environmental implications. https://www.fao.org/3/i1507e/i1507e06.pdf

McGill University, 2021. Socioeconomic and environmental impact of bioenergy. https://www.mcgill.ca/bioenergy/impact

Moosmann, D., Majer, S., & Ugarte, S. et al., 2020. Strengths and gaps of the EU frameworks for the sustainability assessment of bio-based products and bioenergy. https://energsustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-020-00251-8

NREL, 2021. Bioenergy Sustainability Analysis. https://www.nrel.gov/bioenergy/sustainability-analysis.html

Ravindranath, N. H., & Rao, K. Usha., 2005.Environmental Effects of Energy from Biomass and Municipal Wastes. https://www.eolss.net/sample-chapters/c09/E4-23-04-05.pdf

Sacchelli, S., 2016. Social, economic, and environmental impacts of biomass and biofuel supply chains. http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-366-9.00009-5

Spagnolo, Sofia., et. al., 2020. Sustainability assessment of bioenergy at different scales: An emergy analysis of biogas power production. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262034083X

Wang, J., Yang, Y., Bentley, Y., Geng, X., & Liu, X., 2018. Sustainability Assessment of Bioenergy from a Global Perspective: A Review. http://dx.doi.org/10.3390/su10082739

Working Group for Sustainable Biomass Utilisation Vision in East Asia, 2008. Social Aspects of Biomass Utilisation. https://www.eria.org/uploads/media/Research-Project-Report/ERIA_RPR_FY2007_6-3_Chapter_5.pdf

Chapitre 2 - Ressources et approvisionnement en biomasse

À propos

Ce chapitre donnera un aperçu des différentes sources de conversion de la biomasse en énergie et discutera de la manière de rendre l'approvisionnement plus durable. En outre, cette section fournira un aperçu de l'évaluation de la disponibilité des ressources, des caractéristiques et du type de biomasse qui déterminera les types de technologies appropriées pour la biomasse spécifique.

Il y a quelques objectifs dans ce chapitre :

- Comprendre et pouvoir déterminer les ressources en biomasse
- Comprendre comment évaluer la disponibilité, les caractères et les types de ressources de biomasse
- Comprendre comment sécuriser et rendre plus durable l'approvisionnement en ressources de biomasse
- Comprendre les impacts de la gestion des ressources sur l'environnement et la durabilité

Ressources de biomasse

La matière première est la biomasse disponible à partir de ressources renouvelables qui sont disponibles pour une utilisation à la fois directe et transformée en d'autres formes de produits à utiliser pour les matériaux de source d'énergie. Les matières premières de la biomasse telles que les cultures énergétiques qui sont plantées spécifiquement pour les sources de biomasse, les résidus d'activités agricoles, les résidus forestiers, les algues, les résidus de transformation du bois, les déchets municipaux et les déchets humides qui peuvent provenir des stations d'épuration (boues organiques).

Bois et sous-produits agricoles

L'approvisionnement en biomasse domestique de l'UE à des fins énergétiques provenant du secteur forestier s'élevait à plus de 60 % en 2016, mais 32,5 % des ressources étaient constituées par l'approvisionnement direct en biomasse ligneuse provenant des forêts et d'autres terres boisées, et 28,2 % par l'approvisionnement indirect en bois, les cultures agricoles et les sous-produits agricoles représentaient 27 %, les déchets (municipaux, industriels, etc.) 12 % (European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, 2019). La biomasse agricole est la matière dérivée d'organismes biologiques tels que le maïs, la paille, les plantes, les déchets animaux, les abats et les graminées vivaces.

Les principales ressources de biomasse de bois et de sous-produits agricoles sont les suivantes :

- Résidus/déchets de bois de chauffage et de biomasse ligneuse provenant des opérations d'exploitation forestière (peuvent se produire sous forme d'éclaircie dans les jeunes peuplements ou de coupe dans les vieux peuplements pour le bois).
- Résidus de transformation du bois provenant des industries du bois et de l'ameublement (sciage, contreplaqué, panneau de bois, élément de construction, meuble, revêtement de sol, etc.).
- Cultures agricoles et résidus de l'agro-industrie.
- Déchets de bois urbains (matériaux de bois collectés après des projets de construction ou de démolition, palettes de bois rejetées et tout autre déchet de construction et de démolition à base de bois).

Cependant, sur la base de la stratégie de l'UE pour la biodiversité à l'horizon 2030, l'approvisionnement en biomasse pour la production d'énergie directement à partir des forêts primaires - comme l'approvisionnement direct en bois, ainsi que la biomasse provenant des tourbières et des zones humides sont interdits.

Déchets

Les processus de conversion des déchets en énergie (WtE), en tant que source d'énergie renouvelable, devraient jouer un rôle de plus en plus important dans la gestion durable des DMS au niveau mondial. Une meilleure gestion des déchets solides (recyclage, détournement des déchets des décharges et récupération d'énergie à partir des déchets) devrait réduire d'environ 10 à 15 % les émissions mondiales de GES.

Selon Frontline BioEnergy (2021), certains types de déchets sont potentiellement utilisés comme matière première pour la bioénergie, tels que :

- Déchets solides municipaux, tels que les déchets de jardin, le papier et le carton, les plastiques, le caoutchouc, le cuir, les textiles et les déchets alimentaires
- Combustible dérivé de déchets (RDF) à partir de déchets solides municipaux triés (MSW)
- Bois issu de déchets de construction et de démolition (C&D)
- Glycérine brute issue de la production de biodiesel
- Déchets de papier
- Boue de papier
- Drêches de distillerie séchées et solubles
- Litière de volaille
- Fumier de vache
- Farines de viande et d'os provenant d'opérations d'équarrissage

L'utilisation de déchets ou de flux résiduels de matières biologiques ou organiques pourrait également avoir une contribution significative sur la production de bioénergie, cela minimisera les impacts associés à la mise en décharge.

Évaluation de la biomasse

Avec diverses ressources de biomasse, il y a plus de flexibilité pour produire des produits biosourcés. Cependant, l'économie, l'environnement, l'énergie mais aussi les questions climatiques sont des aspects importants de l'évaluation de la disponibilité de la biomasse.

Selon Walsh (2014), il manque encore une évaluation des ressources en biomasse, une méthodologie et des unités capables de fournir des résultats.
Il existe deux approches principales pour l'évaluation des ressources en biomasse (Walsh, 2014) :

1. Approche de la quantité (inventaire)
2. Approche économique

Approche de la quantité (inventaire)

L'approche quantitative consiste uniquement à estimer les quantités comptables et physiques, mais pas les aspects économiques, tels que les coûts et les prix. Selon Walsh (2014), les évaluations quantitatives (inventaires) sont très utiles pour établir des limites supérieures (quantités théoriques) des ressources en biomasse et peuvent être ajustées en utilisant des contraintes appropriées (par exemple, les terres disponibles, les besoins environnementaux/écologiques, les utilisations existantes du matériau) fournir des estimations des quantités de ressources qui peuvent être techniquement disponibles.

Il existe 4 principales évaluations dans l'approche quantitative en fonction des types de matériaux :

Évaluation forestière

L'évaluation forestière comprend l'estimation du surplus potentiel de matériaux forestiers, de résidus de transformation du bois, ainsi que de matériaux morts. La plupart des études concernant l'évaluation forestière pour l'utilisation de la biomasse portent sur les résidus de transformation. Selon Walsh (2014), l'estimation de la quantité de résidus peut être affinée par certains paramètres, tels que

- Diamètre
- Volume de la tige
- Hauteur
- Espèces ou types d'arbres (feuillus ou résineux)
- Âge
- L'efficacité des différentes méthodes de récolte

Les résidus de traitement sont estimés ci-dessous :
"**Quantités de bois utilisées pour produire des produits en bois multipliées par un facteur de génération de résidus."**

Le tableau 1 ci-dessous explique les facteurs de génération de résidus de toutes les opérations forestières.

Tableau 1. Fraction de résidus par unité de bois marchand extraite (%) pour chaque type de forêt et de gestion (Daioglou, 2015)

	Type de gestion

Biome forestier	Coupe nette	Coupe sélective	Plantation de bois
	Production de résidus par production de bois		
Boréal Toundra boisée	69	NA	78
Conifère frais Tempéré mixte Feuillus tempéré	53	NA	63
Savane Chaud mixte Région boisée tropicale Forêt tropical	39	18	52

D'autres arbres restants, tels que les arbres de petit diamètre, de type non commercial, les arbres morts ou malades, ont également des ressources bioénergétiques potentielles.

Résidus agricoles

Selon Walsh (2014), les résidus de cultures agricoles sont généralement estimés par :
“Multiplier les rendements des cultures par un indice de récolte (rapport du matériel végétal non céréalier au matériel céréalier) »
Exemple:
Supposons que la production de blé soit en moyenne de 3,0 tonnes métriques sèches (dMT) de grain/hectare et ait un indice de récolte de 1,3, alors 3,9 dMT de paille sont produites par hectare.
Selon l'Australian Society Plant Scientists (ASPS) (2017), le terme « indice de récolte » est utilisé en agriculture pour quantifier le rendement d'une espèce de culture par rapport à la quantité totale de biomasse qui a été produite. Les valeurs potentielles de l'indice de récolte de diverses espèces cultivées et horticoles sont présentées au tableau 2.

Tableau 2. L'indice de récolte (masse sèche du composant récolté/masse sèche totale des pousses) varie selon les espèces cultivées. Les sélectionneurs de plantes ont sélectionné

un IH élevé dans le cadre de leurs stratégies d'amélioration des cultures et ont réalisé des gains substantiels (ASPS, 2017)

Espèces cultivées	Composant récolté	Indice de récolte
Blé,orge	Grain	0.55
Riz	Grain	0.50
Maïs	Grain	0.52
Tournesol	Grain	0.50
Haricot	Gousses	0.25
Cacahuètes	Gousses	0.50
Coton	Capsules	0.33
Betterave à sucre	Racine	0.50
Patate	Tubercule	0.82
Patate douce	Tuber	0.65
Chrysanthemum/chrysanthème	Fleurs	0.46
Tulipe	Fleurs	0.20

Ainsi, en multipliant les hectares par le rendement, on obtient une estimation de la quantité totale de paille produite. Les estimations de la quantité de résidus peuvent être encore affinées en tenant compte des facteurs susceptibles de limiter leurs quantités. Les contraintes techniques peuvent inclure des limites à l'efficacité des machines de collecte. Cependant, selon Haberl et al. (2011), il existe des utilisations alternatives des résidus, car les résidus de culture jouent un rôle important dans la limitation de l'érosion des sols et le maintien de la matière organique du sol.

Cultures énergétique

Selon Walsh (2014), il existe plusieurs types de matières premières, telles que les matières premières de 1ère génération dont la production est importante et les données disponibles comme le maïs, le blé, le sorgho, la canne à sucre, la betterave à sucre, le soja, le colza et l'huile de palme qui peuvent être utilisées pour produire les biocarburants comme l'éthanol et le biodiesel, et d'autres bioproduits ; il existe également une 2e (ou 3e) génération de matières premières comme les cultures ligneuses à courte rotation ou les cultures herbacées qui ne sont pas encore produites commercialement.

Pour cela, il faut tenir compte à la fois des rendements attendus et des terres (superficie) appropriées où les cultures peuvent être cultivées. Pour les rendements, l'approche la plus simple consiste à supposer des rendements potentiels sur la base d'opinions d'experts, éventuellement complétées par des résultats d'essais sur le terrain.

Selon Ecofys (2016), les données sur le rendement des cultures pour toutes les cultures pour l'UE-27, l'Ukraine, la Russie et la Biélorussie ont été collectées principalement auprès d'Eurostat et de la FAO. Cependant, les données sur les pratiques de gestion pour une région spécifique ont été recueillies à partir de la littérature publiée évaluée par des pairs.

Rendement résiduel (t/ha) = rapport culture/résidu × rendement réel de la culture (t/ha)

Le rendement en résidus donne la quantité de résidus générés à partir d'un hectare dans une région spécifique. Pour le calcul du rendement total en résidus pour une culture spécifique dans une région spécifique, l'équation suivante a été utilisée :

Rendement total de résidus (t/région) = rapport culture/résidus × production totale (t/région)

Le rendement total en résidus a été défini comme : "La quantité totale de résidus produite à partir d'une culture spécifique dans une région spécifique (par exemple, la production totale de résidus de blé en Bulgarie)."

Autres ressources de biomasse

L'évaluation d'autres ressources de biomasse telles que : les déchets solides municipaux, les déchets de démolition, les déchets de construction, les déchets animaux, les déchets de transformation des aliments, etc. utilisent généralement une méthodologie plus simple.

Pour les zones plus petites, l'évaluation consiste généralement en des enquêtes pour évaluer les quantités disponibles. Pour les grandes surfaces, les quantités de ressources sont souvent estimées en multipliant une unité de base définie par un facteur de production de déchets par unité de base

Selon Walsh (2014), pour les déchets urbains, l'unité de base peut être la population (pour les DSM), les mises en chantier (pour la construction résidentielle) ou les dépenses (pour les déchets de construction/rénovation industrielle). D'autres améliorations pourraient inclure des ajustements pour la composition des déchets, le type de logement (par exemple, unifamiliale, unités multifamiliales) et la taille (par exemple, pieds carrés), le type de rénovation (par exemple, rénovation majeure de la cuisine, ajout d'une terrasse en bois), les quantités recyclées ou les différences régionales dans les matériaux de construction utilisés. Les quantités de fumier animal (et la production potentielle de méthane) sont estimées en multipliant les facteurs de production de fumier (quantité de fumier/jour/unité animale définie) par la quantité d'unités animales définies.

Approche économique

L'approche économique dans l'évaluation des ressources en biomasse consiste à fournir des considérations économiques détaillées. Cette approche peut inclure une estimation coût-quantité ainsi qu'une estimation des courbes d'approvisionnement en ressources - quantités disponibles et prix.

Approche de coût de quantité

Selon Walsh (2014), l'approche de la quantité et des coûts associés comprend une composante d'inventaire, mais étend l'évaluation pour inclure des estimations des coûts de la biomasse en plus des quantités physiques. Les coûts (prix) peuvent être obtenus en interrogeant les fournisseurs potentiels sur le prix qu'ils s'attendent à être payés, en compilant des données à partir d'études existantes ou en utilisant les prix des matériaux payés pour des utilisations alternatives comme approximation. Pour les nouvelles cultures énergétiques, les coûts (prix) sont généralement estimés puisque ces cultures ne sont pas actuellement produites. De plus, certaines études estiment les coûts des machines en utilisant le prix d'achat et les spécifications techniques, tandis que d'autres études utilisent des taux de récolte personnalisés (par exemple, les taux de tonte du foin ou de mise en balles pour le panic raide) pour estimer les coûts de récolte ou de ramassage. Les coûts des résidus de culture sont estimés à l'aide d'une approche similaire.

Approche de la courbe d'offre

Dans l'approche de la courbe d'offre, les quantités de ressources de biomasse sont estimées en fonction du prix qui peut être payé pour les ressources. Les estimations de plusieurs de ces combinaisons prix/quantité peuvent être utilisées pour construire la courbe d'offre. Les estimations de la courbe d'offre peuvent utiliser des approches simples basées en grande partie sur l'approche quantité-coût pour plusieurs combinaisons quantité/coût (la méthodologie basée sur les coûts). Alternativement, les courbes d'offre peuvent être estimées à l'aide de modèles économiques. Les modèles économiques sont complexes et gourmands en données, et généralement peu transparents, mais ils offrent une flexibilité maximale pour examiner les changements d'une variable donnée et, s'ils sont menés dans un cadre dynamique, permettent aux variables d'un modèle de changer en réponse les unes aux autres et en fonction de temps.

Approche d'approvisionnement basée sur les coûts

Une courbe d'offre simple pour les cultures énergétiques peut être estimée en connaissant les rendements, la zone sur laquelle les rendements se produisent et les coûts de production pour plusieurs zones. Par exemple, supposons que dans une région définie, il y a 10 000 hectares au total et que des rendements de 5 dMT ha-1 peuvent être atteints sur 1000 ha (total de 5000 dMT), 7,5 dMT ha-1 sur 2000 ha (15 000 dMT), 10 dMT ha1 sur 4000 ha (40 000 dMT), 12,5 dMT ha-1 sur 2000 ha (25 000 dMT), et 15 dMT ha sur 1000 ha (15 000 dMT). Supposons en outre que les coûts de production correspondants soient de 50, 45, 40, 35 et 30 $ US par dMT. Un rendement typique pour le producteur (bénéfice) et/ou un coût de transport typique (pour des distances définies) peuvent être ajoutés aux estimations des coûts de production, mais seront exclus de cet exemple. La courbe d'offre est construite en ordonnant les coûts de la valeur la plus basse à la plus élevée (30 à 50 $ US par dMT) et en utilisant des quantités cumulées à chaque niveau de prix. Ainsi pour $US 35 par dMT, la quantité totale est celle à $US 30 par dMT (15 000 dMT) plus celle entre $US 30 et 35 par dMT (25 000 dMT) pour un total de 40 000 dMT. La figure 1 illustre la courbe d'offre pour cet exemple.

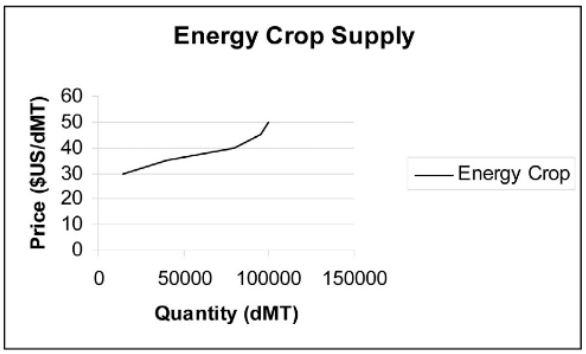

Figure 1. Exemple de courbe d'offre pour les cultures énergétiques utilisant une méthodologie basée sur les coûts (Walsh, 2014)

Données sur les ressources en biomasse

Les données européennes sont disponibles dans la base de données EUROSTAT (Office statistique de l'UE) (http://epp.eurostat.ec.europa.eu). EUROSTAT ne collecte pas les données – ce sont les États membres qui s'en chargent. Au contraire, il consolide les données et garantit qu'elles sont comparables (cohérentes entre les données fournies par les différents pays). EUROSTAT comprend des données sur l'utilisation des sols (agriculture, forêt, loisirs, résidentiel) et l'occupation du sol (cultures, prairies, forêts, zones bâties). Les statistiques agricoles comprennent la structure des exploitations, l'utilisation des terres agricoles, la main-d'œuvre, la production, l'offre/l'utilisation, les prix et les revenus agricoles. Les données sont disponibles aux niveaux national et régional.
Il comprend également des informations sur l'utilisation des nutriments et des pesticides et sur l'agriculture biologique. Les données sur la foresterie comprennent la production et le commerce du bois et des produits du bois, ainsi que l'emploi dans la foresterie et l'exploitation forestière. Il a accès aux données de la Conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe (bois mort, biomasse et carbone dans la biomasse et les sols forestiers) et aux données de l'évaluation des ressources forestières de la FAO où tous les pays du monde sont invités à déclarer et à prévoir la superficie des forêts, les ressources en bois et les extractions.

References

Australian Society of Plant Scientists (ASPS), 2017. Plants in Action: Harvest Index. https://www.rseco.org/content/641-harvest-index.html

CAN Europe, 2021. The Revision of the Renewable Energy Directive: An Opportunity to Boost Ambition and Accelerate Deployment of Renewable Energy. https://caneurope.org/content/uploads/2021/05/CAN_briefing_REDrevision_210507.pdf

Ciucci, Matteo., 2021. Renewable Energy. https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/70/renewable-energy

Cruciani, Michel., 2017. The Landscape of Renewable Energies in 2030. https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/the_landscape_of_renewable_energies_in_europe_in_2030.pdf

Daioglou, Vassilis., Stehfest, Elke., et al., 2015. Projections of the availability and cost of residues from agriculture and forestry. https://doi.org/10.1111/gcbb.12285

Dimpl, Elmar, 2010. Small-scale Electricity Generation from Biomass Part II: Biogas. https://energypedia.info/images/4/43/Small-scale_Electricity_Generation_From_Biomass_Part-2.pdf

Dimple, Elmar, 2011. Small-scale Electricity Generation from Biomass Part III: Vegetable Oil. https://energypedia.info/images/5/5f/Small-scale_Electricity_Generation_From_Biomass_Part-3.pdf

Dimpl, Elmar, 2011. Small-scale Electricity Generation from Biomass Part I: Biomass Gasification. https://energypedia.info/images/9/93/Small-scale_Electricity_Generation_From_Biomass_Part-1.pdf

ECOTEC, 2002. Renewable Energy Sector in the EU: its Employment and Export Potential. https://ec.europa.eu/environment/enveco/eco_industry/pdf/ecotec_renewable_energy.pdf

Ellaban,Omar., Abu-Rub, Haitham., & Blaabjerg, Frede., 2014. Renewable Energy Resources: Current Status, Future Prospects and Their Enabling Technology. https://oglethorpe.edu/wp-content/uploads/2020/01/renewable-sustainable-reviews.pdf

European Commission, 2016. Internal Market in Electricity.

European Commission, 2021. Delivering European Green Deal. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en

European Commission, 2021. European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_3541

European Commission, 2021. Renewable Energy Directive - Target and Rules. https://ec.europa.eu/energy/topics/renewable-energy/directive-targets-and-rules_en

European Commission, 2021. Renewable Energy Directive. https://ec.europa.eu/energy/topics/renewable-energy/directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en#2021-revision-of-the-directive-

European Union, 2018. Regulation (EU) 2018/842. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0842&from=EN

EUROSTAT, 2022. Renewable Energy Statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics

IPCC, 2018. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf

IRENA, 2018. Renewable Energy Prospects for the European Union. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Feb/IRENA_REmap-EU_2018_summary.pdf?la=en&hash=818E3BDBFC16B90E1D0317C5AA5B07C8ED27F9EF

McGill, 2022. Socioeconomic and environmental impact of bioenergy. https://www.mcgill.ca/bioenergy/impact

Nitsch, Joachim., Krewitt, Wolfram., & Langniss, Ole., 2003. Renewable Energy in Europe. https://www.dlr.de/tt/en/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Europe.pdf

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy USA, 2014. Renewable Energy Activities: Choices for

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:en0016

European Commission., Iqbal, Yasir., et. al., 2016. Maximising the yield of biomass from residues of agricultural crops and biomass from forestry. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Ecofys%20-%20Final_%20report_%20EC_max%20yield%20biomass%20residues%2020151214.pdf

European Commission, 2021. 'Fit for 55': Delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to Climate Neutrality. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0550&from=EN

Tomorrow. https://www.energy.gov/eere/education/downloads/renewable-energy-activities-choices-tomorrow

RES Legal, 2018. Legal Sources on Renewable Energy. http://www.res-legal.eu/

Sahana, 2021. Advantages and Disadvantages of Conventional Sources of Energy. https://www.techquintal.com/advantages-and-disadvantages-of-conventional-sources-of-energy/

Walsh, Marie. E, Biomass Resources Assessment. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09046-1

Chapitre 3 - Utilisation de la biomasse

À propos de

Ce chapitre donnera un aperçu de l'utilisation de la biomasse en énergie. Cette section comprend les avantages de l'utilisation de la biomasse, en particulier pour la société et l'environnement. En outre, cette section fournira un aperçu des processus d'utilisation de la

biomasse en énergie qui seront créés pour être faciles à comprendre par les lecteurs qui ne sont pas familiers avec le sujet de la conversion de la biomasse en énergie.

Il y a quelques objectifs dans ce chapitre :

- Comprendre ce qu'est l'utilisation de la biomasse
- Comprendre les processus d'utilisation de la biomasse
- Comprendre comment la biomasse fournit de l'énergie et de l'électricité
- Comprendre l'importance de l'utilisation de la biomasse
- Comprendre comment l'utilisation de la biomasse peut avoir des impacts positifs sur la société

Utilisation de la biomasse

La bioénergie peut jouer un rôle important dans la réalisation des objectifs de l'UE en matière d'énergies renouvelables d'ici 2030 et au-delà. Des opportunités d'augmenter l'utilisation de la bioénergie sont observées, par ex. sur le terrain en utilisant des résidus agricoles, des sous-produits et des déchets.
La bioénergie peut également jouer un rôle important en tant que vecteur énergétique flexible pour équilibrer les systèmes électriques et permettre ainsi des parts plus élevées de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire. Garantissant également des aspects environnementaux tels que la préservation de la biodiversité ou le maintien des services écosystémiques, la bioénergie peut contribuer, entre autres, aux économies de gaz à effet de serre, à la durabilité et au développement rural.

La demande de l'UE en énergies renouvelables devrait augmenter considérablement avec l'élimination progressive des combustibles fossiles dans le bouquet énergétique de l'UE et les objectifs fixés pour les sources d'énergie renouvelables. Le secteur de l'énergie est de loin le plus grand utilisateur de résidus et de sous-produits de la transformation interne du bois dans l'UE, et le secteur du chauffage et du refroidissement la plus grande utilisation finale de la bioénergie en général, utilisant environ 75 % de toute la bioénergie consommée. La bioélectricité et les carburants de transport représentent respectivement 13 % et 12 % (Banja et al., 2019).
Selon Andersen et al. (2021), d'ici 2050, la consommation d'énergie issue de la biomasse devrait augmenter à un rythme soutenu avec des estimations allant d'un quasi-doublement à un triplement. Lorsque l'utilisation des matériaux est incluse, le chiffre de la consommation augmente encore avec une augmentation de 50 % de la seule consommation de matériaux prévue, car ils remplacent d'autres matériaux à plus forte intensité de carbone.

La production de bioénergie peut également offrir d'importantes possibilités d'avantages sociaux, environnementaux et économiques et contribuer au développement rural. D'autres utilisations possibles de la biomasse (par exemple pour l'alimentation humaine et animale, les produits du bois, etc.) doivent également être envisagées pour garantir la durabilité de l'approvisionnement en matières premières dans une perspective globale de bioéconomie.

Il existe 3 principales méthodes de conversion de la conversion de la biomasse en énergie thermique utile, en électricité et en combustibles pour l'énergie, comme suit :

1. Combustion directe

2. Gazéification
3. Liquidation de la biomasse.

Méthodes de prétraitement de la biomasse

L'objectif principal du processus de prétraitement est de déconstruire la structure complexe de la biomasse comprenant la lignine, l'hémicellulose et la cellulose afin que chaque biopolymère puisse être utilisé efficacement pour produire des carburants, de l'énergie et des matériaux chimiques. Plusieurs méthodes de prétraitement de la biomasse sont disponibles, y compris physiques, chimiques, physico-chimiques et biologiques, certaines d'entre elles sont répertoriées comme suit :

1. Méthodes physiques consistant en extrusion, broyage à boulets, broyage à disque humide, prétraitement aux micro-ondes.
2. Méthodes chimiques consistant en un prétraitement acide, un prétraitement alcalin, un prétraitement organosolv, un prétraitement par ozonolyse.
3. Méthodes physico-chimiques qui consistent en une explosion de vapeur, une explosion de fibres d'ammoniac, de l'eau chaude liquide, une explosion de dioxyde de carbone, une oxydation humide.
4. Méthodes biologiques qui consistaient en des champignons de la pourriture blanche, des champignons de la pourriture brune, des champignons de la pourriture molle.

Prétraitement d'extrusion

Le traitement par extrusion est l'une des méthodes prometteuses de prétraitement physique pour la déconstruction de la biomasse lignocellulosique. L'extrusion est définie comme une opération de création d'objets d'un profil de section fixe en les forçant à travers une filière de la section souhaitée. Le matériau subira une expansion lorsqu'il sortira de la matrice.

Il existe certains avantages et limitations du prétraitement par extrusion de la biomasse,
Avantages :

- Facilité au niveau de la surveillance et du contrôle des processus.
- Aucune formation de composés inhibiteurs due à la dégradation des sucres.
- Adaptabilité pour la modification de processus.
- Débit continu et élevé.
- Pas besoin de laver la biomasse prétraitée si l'extrusion est réalisée sans ajout chimique.
- Peut être combiné avec d'autres méthodes de prétraitement pour de meilleurs résultats

Limitations:

- Manque de données pour l'analyse économique.
- Processus énergivore.
- Mauvais écoulement pendant le traitement continu entraînant la combustion du matériau.

Prétraitement acide

Le prétraitement acide est le plus étudié et le plus largement utilisé pour le processus de prétraitement de la biomasse lignocellulosique. L'objectif principal du procédé de

prétraitement acide est d'hydrolyser la fraction hémicellulosique de la biomasse lignocellulosique. L'efficacité de cette méthode de prétraitement est généralement renforcée par l'augmentation de la proportion d'hémicellulose et de fractions extractives dans la biomasse.

Le prétraitement acide de la biomasse présente certains avantages et limites, comme suit:
Avantages:

- Vitesse de réaction élevée pour solubiliser la fraction hémicellulose de la biomasse, rendant ainsi la fraction cellulosique accessible aux enzymes cellulases.
- Une méthode de déconstruction peut être conçue pour le traitement de la biomasse afin de générer des hydrolysats d'hémicellulose séparés (après prétraitement) et des hydrolysats de cellulose (après hydrolyse enzymatique).
- Réduction des coûts pour les enzymes xylanases : l'hémicellulose est largement hydrolysée pendant le prétraitement en fonction du type de matière première et des conditions de traitement ; par conséquent, les enzymes xylanases à coût élevé ne sont généralement pas nécessaires pour l'hydrolyse.

Limitations:

- Les inhibiteurs, tels que le furfural et l'hydroxyméthylfurfural (HMF), produits à partir de la dégradation des sucres, nécessitent une étape de détoxification supplémentaire pour rendre les sucres libérés fermentescibles.
- Besoin de récipients en acier inoxydable coûteux en raison de la nature corrosive de l'acide.
- Coût supplémentaire pour l'alcali pour neutraliser l'acide après le prétraitement.
- Préoccupation environnementale due à l'utilisation excessive de produits chimiques.

Prétraitement alcalin

Le prétraitement alcalin est une autre méthode de prétraitement de la biomasse lignocellulosique largement étudiée et largement utilisée. Ce processus est similaire à un processus de prétraitement acide, mais généralement effectué à une température plus basse. Alors que le prétraitement acide solubilise la fraction hémicellulose de la biomasse, l'objectif du processus de prétraitement alcalin est de solubiliser la fraction lignine de la biomasse lignocellulosique. Comme dans le processus de prétraitement acide, le processus de prétraitement alcalin solubilise également la plupart des extraits de la biomasse.

Il existe certains avantages et limitations du prétraitement alcalin de la biomasse
Avantages:

- Délignification efficace
- Dégradation plus faible du sucre par rapport au prétraitement à l'acide dilué en raison de la température de traitement plus basse ; possible de prétraiter à température ambiante en utilisant un temps plus long.
- La lignine et les autres extraits peuvent être séparés avant l'hydrolyse enzymatique sans perte de glucides ; grande possibilité d'obtenir de la lignine réactive pour une application de grande valeur.

Limitations:

- Excès de composés phénoliques dû à la dégradation de la lignine, qui sont des inhibiteurs potentiels de l'hydrolyse enzymatique des polymères de sucre.

- Coût supplémentaire pour les enzymes hydrolytiques de l'hémicellulose en plus des enzymes cellulases.
- Coût supplémentaire pour l'acide pour neutraliser l'alcali après le prétraitement.

Prétraitement Organosolv

Organosolv est une méthode prometteuse de prétraitement de la biomasse, dans laquelle la biomasse est mélangée à un solvant organique sélectionné, avec ou sans catalyseur supplémentaire (acide ou alcalin) et chauffée à une température et une durée appropriées. Divers solvants organiques ou mélanges de solvants peuvent être utilisés ; y compris les solvants à bas point d'ébullition, tels que l'éthanol, le méthanol et l'acétone ; des solvants à point d'ébullition élevé, tels que le glycérol, l'éthylène glycol et l'alcool tétrahydrofurfurylique ; et d'autres classes de solvants organiques, tels que les acides organiques, les phénols, les cétones et le diméthylsulfoxyde.

Le prétraitement organosolv de la biomasse présente certains avantages et limites
Avantages:

- La lignine extraite est relativement de haute pureté, de faible poids moléculaire et sans soufre, ce qui permet une application de grande valeur de la lignine.
- Les trois biopolymères - cellulose, hémicellulose et lignine - peuvent être séparés en différents flux.
- Il peut être combiné avec d'autres procédés de prétraitement pour une hydrolyse efficace de la biomasse.

Limitations:

- Coût élevé du solvant : Le processus de recyclage est également énergivore. Un solvant supplémentaire est nécessaire pour éviter la précipitation de la lignine due au lavage à l'eau.
- Formation de composés inhibiteurs, tels que le furfural et le HMF, en raison de la dégradation des sucres lors de l'utilisation d'un catalyseur acide.
- Le solvant résiduel sera inhibiteur pour l'hydrolyse enzymatique et les organismes fermentaires.
- Préoccupations environnementales et sanitaires dues à l'utilisation de liquides organiques volatils à haute température.

Prétraitement liquide ionique

Il s'agit d'une approche relativement nouvelle pour le prétraitement de la biomasse, dans laquelle toute la biomasse est dissoute dans un liquide ionique sélectionné et les polymères glucidiques sont précipités en ajoutant des anti-solvants appropriés ; séparant ainsi la lignine et les glucides.

Il existe certains avantages et limitations du prétraitement liquide ionique de la biomasse
Avantages:

- Les liquides ioniques, considérés comme des solvants verts, sont stables jusqu'à 300 oC ; ont une volatilité extrêmement faible avec un impact minimal sur l'environnement
- Possibilité de séparer chacun des biopolymères : cellulose, hémicellulose et lignine.
- Un liquide ionique avec des propriétés souhaitables peut être synthétisé.

Limitations:

- Le coût des liquides ioniques est encore très élevé.
- De nombreux liquides ioniques sont toxiques pour les enzymes hydrolytiques et les organismes en fermentation.
- Le coût de la récupération des solvants est fastidieux et coûteux.
- Difficile de manipuler la boue de biomasse visqueuse avec un liquide ionique pendant le prétraitement à une température supérieure à 150 oC.

Prétraitement par explosion à la vapeur

Le prétraitement par explosion à la vapeur est un procédé de prétraitement physico-chimique largement étudié. Dans ce processus, la biomasse broyée et préconditionnée est traitée avec de la vapeur saturée à haute température (160-290 oC) et haute pression (0,7 et 4,8 MPa) pendant quelques secondes à plusieurs minutes avant que la pression ne soit relâchée de manière explosive. Cette méthode est plus efficace dans la biomasse feuillue et herbacée mais nécessite l'ajout d'un catalyseur acide pour un prétraitement efficace du bois résineux en raison de la présence d'une plus faible quantité de groupes acétyle dans l'hémicellulose de résineux.

Le prétraitement par explosion à la vapeur de la biomasse présente certains avantages et limites

Avantages:

- Pas d'utilisation de produits chimiques et donc pas de coûts de recyclage et environnementaux.
- Dilution relativement moindre de l'hémicellulose libérée.
- La biomasse à haute granulométrie peut être utilisée, ce qui entraîne d'importantes économies d'énergie. La réduction de taille représente environ un tiers de l'ensemble du processus de prétraitement.

Limitations

- Une déconstruction incomplète du complexe lignine-glucide peut conduire à la condensation et à la précipitation de la lignine soluble ; entraînant ainsi une efficacité réduite de l'hydrolyse de la biomasse.
- Une température élevée (environ 270 oC) est la meilleure pour améliorer la digestibilité de la cellulose ; cependant, cela conduit à la formation de composés inhibiteurs - le furfural et le HMF.
- Les acides faibles et les composés phénoliques, tels que les acides acétique, formique et lévulinique, générés au cours de ce processus sont inhibiteurs pour l'hydrolyse enzymatique et la fermentation ultérieure.

Prétraitement par explosion de fibres d'ammoniac (AFEX)

La méthode AFEX est un procédé de prétraitement physico-chimique alcalin. Sa méthode de traitement est similaire à celle de l'explosion à la vapeur mais fonctionne à plus basse température. Dans ce procédé, la biomasse est mélangée à de l'ammoniac anhydre liquide (0,3 à 2 kg/kg de biomasse sèche) ; cuit à 60–90 ◦C et à une pression supérieure à 3 MPa pendant 10–60 min.

Le rapport optimal entre l'ammoniac et la biomasse, ainsi que la température, la pression et le temps de cuisson dépendent du type de matériaux de biomasse lignocellulosique. La

méthode AFEX est très efficace pour les cultures herbacées et les résidus agricoles, mais relativement moins efficace pour la biomasse ligneuse. AFEX est également considéré comme une méthode réalisable pour le prétraitement de la biomasse herbacée pour extraire les protéines pour l'alimentation animale ainsi que la génération de sucre pour la production de biocarburants.

Le prétraitement par explosion de fibres d'ammoniac de la biomasse présente certains avantages et limites
Avantages:

- Aucune formation de composés inhibiteurs comme le furfural et le HMF à partir de la dégradation du sucre en raison du fonctionnement à basse température.
- Haute sélectivité pour la délignification.
- Facile à recycler en raison de la nature volatile de l'ammoniac ; Une récupération de 99 % de l'ammoniac est possible.
- L'ammoniac résiduel peut servir de source d'azote pour les organismes pendant la fermentation.

Limitations:

- Excès d'eau car les fragments phénoliques des lignines doivent être lavés pour éviter une inhibition lors de l'hydrolyse enzymatique et de la fermentation.
- Le recyclage de l'ammoniac est très coûteux pour un traitement à l'échelle commerciale.
- Inefficace pour la biomasse à haute teneur en lignine, comme les déchets de bois résineux et de journaux.
- Préoccupation environnementale due à l'utilisation de produits chimiques volatils.

Prétraitement de l'eau chaude liquide (LHW)

Différentes terminologies sont utilisées dans la littérature pour décrire ce processus, notamment la solvolyse, l'hydrothermolyse, le fractionnement aqueux et l'aquasolv. Ce procédé est comparable au prétraitement à l'acide dilué sans utiliser d'acide. Dans ce processus, la suspension de biomasse dans l'eau est cuite à température élevée (160–240 oC) pendant différentes périodes, en fonction du type de biomasse, pour solubiliser la fraction hémicellulose de la biomasse conduisant à une partie enrichie en cellulose.

Il existe certains avantages et limitations du prétraitement à l'eau chaude liquide de la biomasse
Avantages:

- Aucune utilisation de produits chimiques supplémentaires.
- Pas besoin d'utiliser des matériaux coûteux et résistants à la corrosion pour les réacteurs de prétraitement.
- Des particules de taille relativement grande peuvent être utilisées, ce qui conduit à des économies d'énergie, ce qui est nécessaire pour réduire la taille de la biomasse en particules fines.
- Possibilité de récupérer séparément les flux cellulose et hémicellulose.
- Formation minimale de composés inhibiteurs.

Limitations:

- Le flux de xylose est de très faible concentration et nécessite donc une opération supplémentaire coûteuse d'évaporation de l'eau pour obtenir une concentration de sucre appropriée pour la fermentation.
- Coût élevé car une température de prétraitement élevée est requise.
- Ne convient pas à la biomasse à haute teneur en lignine.

Prétraitement biologique

Le prétraitement biologique implique l'utilisation de micro-organismes pour dégrader la lignine de la biomasse et rendre les polymères glucidiques sensibles à l'hydrolyse enzymatique. Parmi les divers organismes capables de produire des enzymes pour dégrader la lignine et les polymères glucidiques de la biomasse, les champignons de la pourriture blanche, de la pourriture brune et de la pourriture molle sont importants. Les champignons de la pourriture blanche sont les plus efficaces pour le prétraitement de la biomasse en raison de leur efficacité enzymatique et de leur économie.
Les champignons de la pourriture brune dégradent la cellulose, tandis que les champignons de la pourriture blanche et de la pourriture molle dégradent à la fois la lignine et la cellulose. Le système enzymatique ligninolytique des champignons de la pourriture blanche se compose principalement de peroxydase de lignine (LiP), de peroxydase de manganèse (MnP) et de laccase.

Sur la base des modèles de production d'enzymes, les champignons de la pourriture blanche pourraient être classés en trois groupes:
- Groupe de la lignine-manganèse peroxydase - P. chrysosporium et Phlebia radiata.
- Groupe des laccases de peroxydase de manganèse - Dichomitus squalens et Rigidoporus lignosus.
- Groupe des laccases de la lignine peroxydase - Phlebia ochraceofulva et Junghuhnia separabilima.

Le prétraitement biologique de la biomasse présente certains avantages et limites
Avantages
- Aucun composé inhibiteur n'est produit.
- Le procédé est respectueux de l'environnement.

Limitations:
- Processus très lent; le temps de séjour est généralement compris entre 10 et 14 jours.
- Un grand espace est nécessaire pour effectuer le processus.
- Un contrôle strict de la température est nécessaire, ce qui entraîne une augmentation des coûts de traitement.
- La cristallinité de la cellulose n'a pas pu être réduite.

Méthodes de conversion de la biomasse

Combustion directe

La combustion est le moyen le plus courant et le plus traditionnel de produire de la chaleur à partir de la biomasse. Dans les pays en développement, l'efficacité thermique de la

combustion directe de la biomasse est généralement de 10 à 15 %. Après transformation, les rendements thermiques des foyers en Chine rurale sont d'environ 30%, et les meilleurs peuvent atteindre jusqu'à 50%. Le poêle est composé d'une chambre de combustion, d'un anneau coupe-feu, d'un passage de circulation des fumées, d'une cheminée, d'une porte de poêle, d'une grille et d'une entrée d'air. Les points clés de la conception sont d'augmenter l'intensité du rayonnement thermique et de la réflexion dans la chambre de combustion et de réduire la perte de combustion complète dans le poêle intérieur et la perte thermique de fumée.

Certains pays européens avancés adoptent des équipements de combustion à haut rendement tels que les équipements de combustion à lit sulfurisé. Dans l'équipement, le bois est découpé en petits morceaux qui traversent ensuite le lit sulfuré en un temps très court. Après combustion, les morceaux de bois incomplètement brûlés sont renvoyés vers le lit sulfuré depuis le système d'évacuation des fumées. Les chaudières commercialisées de petite et moyenne taille développées par ces pays utilisent le bois et les résidus comme combustible
Leurs efficacités peuvent atteindre 50% - 60%. Aux Pays-Bas, il existe environ 1,75 million de poêles à bois avec des spécifications de 5 à 20 kW et 600 000 foyers à bois pour le chauffage domestique et l'approvisionnement en eau chaude. Leurs rendements thermiques peuvent atteindre plus de 50 %. L'efficacité thermique des chaudières modèles à lit fixe brûlant de l'herbe et fabriquées par l'Angleterre et le Danemark est de 60 %.

Gazéification

Pyrolyse

La gazéification par pyrolyse de la biomasse est l'une des technologies optimales d'utilisation de la biomasse. Dans les équipements de gazéification, la biomasse est transformée en gaz combustible de haute qualité par action thermochimique à haute température. Le gaz peut être utilisé pour le séchage, le chauffage, l'isolation thermique et la production d'électricité.

Grâce à l'équipement de gazéification, presque toute la biomasse peut être transformée en combustible gazeux qui se compose principalement de CO, CO2, H2 et CH4. L'autre partie de l'énergie de la biomasse est utilisée pour réaliser l'action de gazéification. L'efficacité de la gazéification du bois est de 60% - 80%. La pyrolyse permet au taux de récupération d'énergie du riz d'atteindre plus de 94% et la valeur thermique du gaz combustible obtenu est de 2,5*10 kJ/m³. La valeur thermique du gaz combustible obtenu à partir de la pyrolyse du fumier de bétail est de 1,7*104 kJ/m³. L'efficacité de la gazéification des déchets multiples est supérieure à 80 %. La valeur thermique du gaz combustible peut être augmentée en ajoutant de l'hydrogène pendant le traitement de pyrolyse de la biomasse.

Depuis les années 1970, certains pays européens ont commencé à étudier des équipements de gazéification à fonctions multiples, adaptés à différents besoins et adoptant des techniques de pyrolyse à haute température. Deux types d'équipements de gazéification ont été développés :

- **Chambre de gazéification à lit coulissant**

La biomasse glisse lentement du haut de la chambre de gazéification lors de la gazéification. L'oxydant s'écoule vers le haut depuis le bas de la chambre de gazéification et traverse la biomasse pour la gazéifier. La température du gaz de sortie peut atteindre 600 oC et il n'y a pas de goudron dans le gaz.

- **Chambre de gazéification à lit sulfuré**

La biomasse broyée (d'une taille de quelques mm) est introduite dans la chambre de gazéification et est gazéifiée en traversant le matériau du flotteur. Le gaz produit a une température élevée qui atteint environ 800 oC. Le gazéifieur à lit sulfurisé est principalement adapté à la biomasse.

Digestion anaérobique

Avec la technologie de digestion anaérobie, le gaz combustible est obtenu pendant le traitement des déchets organiques et le résidu digéré peut être transformé en fourrage ou en engrais, ce qui est couramment développé en raison d'avantages économiques, environnementaux et écologiques évidents.
Certains pays en développement comme la Chine et l'Inde étendent et utilisent cette technologie dans les zones rurales. La technologie des digesteurs de taille familiale de la Chine occupe la position de leader dans le monde. Jusqu'à présent, il existe 4,75 millions de digesteurs de petite taille qui produisent 1,04 milliard de mètres cubes de biogaz par an. De plus, toutes les usines de biogaz à moyenne et grande échelle d'une capacité électrique de 2077 kW en Chine peuvent produire 29,1 millions de mètres cubes de biogaz par an.
Sur les aspects de traitement des eaux usées multi-industries et des déchets organiques, certains pays adoptent des techniques très performantes telles que : filtre anaérobie, UASB et lit sulfuré. La France et le Japon utilisent et étendent des équipements de digestion anaérobie à haut rendement qui adoptent une technologie adhérente à haute densité pour traiter les eaux usées organiques sur le marché international. Son efficacité est dix fois supérieure à celle des méthodes traditionnelles. La technologie de digestion sèche et les techniques de digestion anaérobie en deux étapes ont fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années et peuvent être utilisées pour traiter les déchets solides.

|| Fait

Selon le niveau technologique actuel, 10 m³ de biogaz peuvent être produits à partir d'une tonne de déchets, 35 m³ de biogaz à partir d'une tonne d'excréments humains et d'urine et 5 à 50 m³ de biogaz à partir d'une tonne d'eaux usées organiques à haute concentration.

Liquéfaction

Il existe 2 types différents de méthodes de liquéfaction pour la conversion de la biomasse en biocarburants :

1. Liquéfaction indirecte
2. La liquéfaction directe, qui consiste en 2 types de méthodes différentes :
    a. Hydrolyse - Fermentation Liquéfaction
    b. Liquéfaction thermodynamique, qui s'est séparée en 2 types de méthodes différentes :
        i. Méthode de pyrolyse
        ii. Méthode hydrothermale

Liquéfaction indirecte

La liquéfaction indirecte est une technologie prometteuse, qui se divise en deux étapes. La première étape est un processus de gazéification thermochimique. Dans ce processus, le gaz de synthèse est produit après la réaction de la matière première avec l'air ou la vapeur. Dans le gaz de synthèse, les substances primaires sont le CO, le CO2, le H2 et le H2O. La deuxième étape est le processus bien établi Fischer-Tropsch (F-T). Au cours du processus F – T, le mélange serait utilisé pour produire une gamme de produits chimiques, notamment l'alcool méthylique, l'éther diméthylique et l'alcool éthylique, alors qu'il existe peu de recherches sur les alcools supérieurs dérivés du gaz de synthèse de la biomasse.
Les plus grands défis sont la conception du nouveau réacteur catalytique pour l'échelle généralement plus petite des processus de conversion de la biomasse et des catalyseurs pour des produits chimiques spécifiques en fonction du rapport molaire de H2 à CO. Nous prenons la synthèse de l'alcool éthylique comme exemple pour introduire la liquéfaction indirecte.

Liquéfaction directe

Hydrolyse - Fermentation Liquéfaction

Au cours des dernières décennies, l'alcool éthylique a attiré beaucoup d'attention en tant qu'alternative potentielle aux combustibles fossiles. Actuellement, la fermentation de la biomasse est la principale technologie industrielle pour produire de l'alcool éthylique, dont les matières premières primaires sont le glucose (obtenu à partir du maïs) et le saccharose (obtenu à partir de la canne à sucre et de la betterave). Il y a les mêmes effets négatifs sur la production d'alcool éthylique utilisant de l'amidon ou du sucre comme matière première, ce qui concurrencerait directement la production alimentaire. Jusqu'à présent, la paille de maïs était considérée comme une matière première possible pour la production d'alcool éthylique.

Une fois la biomasse transportée vers l'usine de production, elle serait stockée dans l'entrepôt pour éviter la fermentation et la contamination bactérienne. Ensuite, la matière première serait prétraitée pour la rendre plus accessible à l'extraction. Dans le processus de fermentation, de l'hydrolysat, des levures, des nutriments et d'autres ingrédients seraient ajoutés. La fermentation est généralement exécutée à 25–30 ◦C et le temps de réaction approprié durerait de 6 à 72 h.

Liquéfaction thermodynamique

En général, il existe deux types de liquéfaction thermodynamique de la biomasse en fonction des conditions opératoires : liquéfaction par pyrolyse et liquéfaction hydrothermale.

Pyrolyse

Dans la liquéfaction par pyrolyse, il pourrait être divisé en pyrolyse lente, pyrolyse rapide et pyrolyse éclair. La pyrolyse lente est généralement exécutée à une température de réaction, une vitesse de chauffage et un temps de séjour longs, ce qui produit un peu de bio-huile. Dans le procédé de pyrolyse flash, le temps de réaction est seulement ou inférieur à plusieurs secondes avec une vitesse de chauffage très élevée et une petite taille de

particules, et le produit principal est le gaz de synthèse. La pyrolyse rapide se déroule également à une vitesse de chauffage élevée (inférieure à celle de la pyrolyse flash) et à un temps de séjour court de la vapeur. Le produit favorable dans le processus est la bio-huile. Les bio-huiles de pyrolyse pourraient être directement brûlées dans des chaudières ou valorisées pour produire des carburants et des produits chimiques de valeur en utilisant les méthodes suivantes : extraction, émulsification, estérification/alcoolisation, fluides supercritiques, hydrotraitement, craquage catalytique et reformage à la vapeur.

Hydrothermique

La liquéfaction hydrothermale de la biomasse est l'une des méthodes efficaces pour traiter la biomasse à haute teneur en eau par rapport à la liquéfaction par pyrolyse. Cette liquéfaction de la biomasse n'est pas affectée par le niveau de teneur en eau et les types de biomasse à forte conversion et produits relativement purs. Les propriétés appropriées pour la liquéfaction de la biomasse sont démontrées, y compris une densité élevée, une bonne chaleur, une capacité de transfert de masse, une décomposition rapide et une extraction dans des conditions hydrothermales. Il s'agit d'une technologie respectueuse de l'environnement, et l'hétéroatome de la biomasse pourrait être converti en sous-produits indésirables.

References

Aftab, M. N. , Iqbal, I., Riaz, F., Karadag, A., & Tabatabaei, M., 2019. Different Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass for Use in Biofuel Production. https://www.intechopen.com/chapters/67131

Cătuţi, Mihnea., Elkerbout, Milan., Alessi, Monica., & Egenhofer, Christian., 2020. Biomass and Climate Neutrality. https://www.ceps.eu/wp-content/uploads/2020/08/PI2020-19_Biomass-and-climate-neutrality.pdf

Grande, Lucía., Pedroarena, Ivan., Korili, Sophia A., & Gil, Antonio., 2021. Hydrothermal Liquefaction of Biomass as One of the Most Promising Alternatives for the Synthesis of Advanced Liquid Biofuels: A Review. https://doi.org/10.3390/ma14185286 https://doi.org/10.3390/cleantechnol3010014

Mandø, M., 2013. Direct combustion of biomass. https://doi.org/10.1533/9780857097439.2.61

McKinsey & Company, 2010. Transformation of Europe's Power System until 2050. https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/dotcom/c

Pang, Shusheng, 2019. Advances in Thermochemical Conversion of Woody Biomass to Energy, Fuels and Chemicals. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.11.004

Segneanu, A. et al., 2013. Biomass Extraction Methods. https://www.intechopen.com/chapters/44370

UNIDO, 2007. Industrial Biotechnology and Biomass Utilisation. https://www.unido.org/sites/default/files/2009-04/Industrial_biotechnology_and_biomass_utilisation_0.pdf

US Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2021. Bioenergy Basics. https://www.energy.gov/eere/bioenergy/bioenergy-basics

Zhang, S., Yang, X., Zhang, H., Chu, C., Zheng, K., Ju, M., & Liu, L., 2019. Liquefaction of Biomass and Upgrading of Bio-Oil: A Review. http://dx.doi.org/10.3390/molecules24122250

lient_service/epng/pdfs/transformation_of_europes_power_system.ashx

Mengjie, Wang., & Suzhen, Ding., 1994. A Potential Renewable Energy Resource Development and Utilization of Biomass Energy. https://www.fao.org/3/t4470e/t4470e0n.htm

Omer, A., 2012. Biomass energy resources utilisation and waste management.. https://www.scirp.org/html/16-3000138_16848.htm

Zheng, J., & Rehmann, L., 2014. Extrusion pretreatment of lignocellulosic biomass: a review. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4227255/

Chapitre 4 - Processus de conversion de l'énergie de la biomasse (bioénergie)

À propos

Ce chapitre fournira des informations sur les pratiques et applications récentes de la conversion de la biomasse en énergie. Cette section permettra aux lecteurs de mieux comprendre les processus de conversion technique, y compris les avantages et les inconvénients en termes d'économie et d'environnement.

Il y a quelques objectifs dans ce chapitre :

- Comprendre ce qu'est l'énergie en général
- Comprendre l'importance de la conversion d'énergie dans le prisme de l'utilisation de la biomasse
- Pouvoir faire une évaluation des impacts sur les avantages et les inconvénients des processus
- Comprendre les différentes méthodes de conversion de la biomasse en énergie

Bioénergie

La bioénergie est un type d'énergie qui se développe à partir d'organismes vivants comme les plantes, le fumier animal, les eaux usées domestiques, les déchets, etc. Il existe différents types de bioénergie, il y a la combustion directe, le biocarburant et le biogaz qui peuvent être utilisés comme électricité, chaleur, gaz et carburant à certaines fins.

Biocarburant

Les biocarburants ou encore appelés agrocarburants sont des carburants liquides dérivés de la biomasse agricole ou forestière, soit de la biomasse fraîche, soit des déchets organiques. Bien que les combustibles fossiles aient leur origine dans la biomasse ancienne, ils ne sont pas considérés comme des agrocarburants selon la définition généralement acceptée car ils contiennent du carbone qui est hors du cycle du carbone depuis très longtemps. Les agrocarburants sont principalement utilisés dans le secteur des transports, notamment le biodiesel (agrodiesel) et le bioéthanol (agroéthanol).

- **Biodiesel** ou aussi appelé agrodiesel fabriqué à partir d'huiles végétales extraites de colza, de soja, de palmier à huile, de tournesol et d'algues, entre autres. Les graisses animales de l'industrie de la viande ainsi que l'huile de cuisson usagée des restaurants et les sous-produits de la production d'acides gras oméga-3 à partir d'huile de poisson peuvent également être utilisés comme matière première pour l'agrodiesel. L'agrodiesel peut être utilisé comme carburant pour les véhicules sous sa forme pure, mais il est généralement mélangé avec du diesel fossile. L'agrodiesel est l'agrocarburant liquide le plus répandu en Europe, où il est utilisé pour atteindre les objectifs obligatoires en matière d'énergie renouvelable dans le secteur des transports. Il est également utilisé dans les centrales thermiques et électriques comme substitut du pétrole fossile. Le colza, le soja et le palmier à huile sont les cultures les plus utilisées pour produire de l'agrodiesel à l'échelle industrielle.
- L'éthanol (ainsi que le propanol et le butanol) est produit par la fermentation du sucre en alcools qui peuvent être utilisés comme carburant, principalement dans les véhicules. **Le bioéthanol** ou agroéthanol est le plus utilisé. Une gamme de cultures à forte teneur en sucre et/ou en amidon telles que la canne à sucre, le maïs, la betterave sucrière, le blé, le manioc et le sorgho sucré sont utilisées comme matière première pour la production d'agroéthanol, le sucre et le maïs étant les plus populaires pour un usage industriel.L'agroéthanol produit à partir de sucres et d'amidons facilement dégradables est dit de **première génération**. Celle-ci est généralement dérivée de cultures vivrières et entre donc directement en concurrence avec la production alimentaire. Afin d'éviter la concurrence avec les aliments, de nombreuses expériences ont été menées pour produire des enzymes capables de décomposer les parois cellulaires de la lignine, de la cellulose ou de l'hémicellulose à partir par ex. des arbres ou de la paille. L'agroéthanol basé sur ces sources non alimentaires est appelé **deuxième génération**. Ce n'est pas économiquement viable à l'heure actuelle, même si l'industrie prétend être (presque) prête à le produire depuis une décennie.

Biogas

Biogaz

Le Biogaz est produit lorsque des micro-organismes digèrent des matières organiques dans des conditions anaérobies (c'est-à-dire en l'absence d'oxygène). Le biogaz est composé d'environ ⅔ de méthane et ⅓ de dioxyde de carbone et éventuellement de petites quantités d'autres gaz. Le fumier animal, le lisier, les déchets organiques des ménages et de l'industrie et les résidus de l'agriculture sont les principales sources de production de biogaz. Dans l'agriculture industrielle, le biogaz est considéré comme un moyen viable d'éviter les odeurs gênantes et de réduire les émissions de méthane des réservoirs à lisier tout en produisant de l'énergie et en fournissant des revenus supplémentaires aux agriculteurs.
Cependant, pour une production économiquement viable, il faut ajouter du matériel végétal provenant de déchets ou de résidus de culture. Lorsque des cultures telles que le maïs sont ajoutées (ce qui est fréquemment le cas en Europe), la comptabilité des émissions du cycle de vie a montré que la production est problématique en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Le biogaz peut être utilisé comme carburant de transport ou en remplacement du gaz naturel dans la production de chaleur et d'électricité. Les sous-produits peuvent être utilisés comme engrais sur les sols agricoles.

Flux de production de bioénergie

Il existe différentes méthodes qui peuvent être utilisées dans la production de bioénergie. Les méthodes dépendent de l'utilisation de la biomasse elle-même, pour produire du biocarburant, il existe différentes méthodes de production de biogaz, et vice versa.
Les méthodes peuvent également être différentes en fonction des matériaux utilisés dans la production. Comme il existe différents types de méthodes de prétraitement pour différents types ou caractéristiques de biomasse. Comme expliqué au chapitre 3, il existe également différents types de méthodes de conversion de l'utilisation de la biomasse en énergie, il y a la combustion directe qui servait à créer de la chaleur, la gazéification qui servait à créer du biogaz et la liquéfaction qui servait à créer du biocarburant.
Simplement, le flux de production de bioénergie peut être expliqué comme ceci :
Biomasse >>> Préparation (processus de prétraitement et de conversion en produit (formes commerciales) comme le biocarburant et le biogaz) >>> Produit >>> Vente et distribution >>> Conversion (biodiesel, bioéthanol, biogaz) en énergie >>> Bioénergie (chaleur et électricité)

Production de chaleur et d'électricité

La combustion directe est la méthode la plus courante pour convertir la biomasse en énergie utile. Toute la biomasse peut être brûlée directement pour chauffer les bâtiments et l'eau, pour la chaleur des procédés industriels et pour produire de l'électricité dans les turbines à vapeur. La combustion directe est le moyen le plus simple et le plus ancien de produire de l'électricité à partir de la biomasse. Les systèmes à combustion directe (ou «à feu direct») brûlent la biomasse dans des chaudières pour produire de la vapeur à haute pression. La vapeur fait tourner une turbine reliée à un générateur, le même type de générateur

électrique à vapeur utilisé dans les centrales électriques à combustibles fossiles. Lorsque la turbine tourne, le générateur tourne et de l'électricité est produite.

Biomasse >>> Chaudière >>> Vapeur >>> Turbine >>> Électricité
Certains pays européens avancés adoptent des équipements de combustion à haut rendement tels que les équipements de combustion à lit sulfurisé. Dans l'équipement, le bois est découpé en petits morceaux qui traversent ensuite le lit sulfuré en un temps très court. Après combustion, les morceaux de bois incomplètement brûlés sont renvoyés vers le lit sulfuré depuis le système d'évacuation des fumées. Les chaudières commercialisées de petite et moyenne taille développées par ces pays utilisent le bois et les résidus comme combustible. Leurs efficacités peuvent atteindre 50% - 60%

Les dispositifs utilisés pour la combustion directe des combustibles solides issus de la biomasse vont des petits poêles domestiques (1 à 10 kW) aux plus grandes chaudières utilisées dans les centrales électriques et les centrales de cogénération (> 5 MW). Les dispositifs intermédiaires couvrent les petites chaudières (10 à 50 kW) utilisées dans le chauffage des maisons unifamiliales, les chaudières de taille moyenne (50 à 150 kW) utilisées pour le chauffage des maisons multifamiliales ou des bâtiments et les grandes chaudières (150 à plus de 1 MW) utilisées pour le chauffage urbain. chauffage. Cependant, la co-combustion dans les centrales électriques à combustible fossile offre les avantages des centrales de grande taille (> 100 MWe) qui ne sont pas applicables à la combustion dédiée à la biomasse en raison de la disponibilité limitée de la biomasse locale.

Selon l'Association européenne de l'industrie de la biomasse, il existe des fours les plus fréquemment utilisés pour la combustion de la biomasse :

Tableau 3. Fours fréquemment utilisés pour la combustion de la biomasse

Type	Gamme de taille typique	Combustibles	Cendre(%)	Teneur en eau(%)
Poêle à bois	2 - 10 kW	Bûches de bois sec	<2	5 - 20
Chaudière à bûches	5 - 50 kW	Bois de grume, résidus de bois collants	<2	5 - 30
Poêles et chaudières à granulés	2 - 25 kW	Granulés de bois	<2	8 - 10
Fours understoker	20 kW - 2.5 MW	Copeaux de bois, résidus de bois	<2	5 - 50
Fours à grille mobile	150 kW - 15 MW	Tous les combustibles ligneux, la plupart de la biomasse	<50	5 - 60

Pré four avec grille	20 kW - 1.5 MW	Bois sec (résidus)	<5	5 - 35
Understoker avec grille rotative	2 - 5 MW	Copeaux de bois, haute teneur en eau	<50	40 - 65
Brûle-cigare	3 - 5 MW	Bottes de paille	<5	20
Lit fluidisé stationnaire	5 - 15 MW	Various biomass, d < 10 mm	<50	5 - 60
Lit fluidisé circulant	15 - 100 MW	Various biomass, d < 10 mm	<50	5 - 60
Chambre de combustion des poussières, flux entraîné	5 - 10	Various biomass, d < 5 mm	<5	<20

Les fours Understoker sont principalement utilisés pour les copeaux de bois et les combustibles similaires avec une teneur en cendres relativement faible, tandis que les fours à grille peuvent également être utilisés pour une teneur élevée en cendres et en eau. Les chaudières à lit fluidisé fixe ou bouillonnant (SFB) ainsi que les chaudières à lit fluidisé circulant (CFB) sont utilisées pour des applications à grande échelle et souvent utilisées pour les déchets de bois ou les mélanges de bois et de déchets industriels, par ex. de l'industrie des pâtes et papiers.

Production de biocarburants

Biodiesel

Le biodiesel est un carburant diesel alternatif obtenu à partir de sources renouvelables. Le biodiesel est un ester monoalkylique dérivé de graisses animales ou de certains types d'huiles, y compris les huiles végétales de cuisson. Les substances d'origine animale et végétale sont classées comme sources d'énergie de la biomasse. Selon Rajaluigam (2016), le carbone sera neutre lorsque le biodiesel est utilisé comme carburant, car pendant le processus de combustion, la quantité d'émission de carbone est égale à un animal ou une plante absorbée pendant toute sa durée de vie. Ainsi, l'émission sera faible dans la combustion verte du biocarburant.

Selon Aktas (2020), le biodiesel est produit en faisant réagir des huiles végétales ou animales avec un alcool et un catalyseur. C'est aussi un carburant diesel non toxique, biodégradable et renouvelable. Comme le biodiesel est constitué d'esters monoalkyliques, le

biodiesel ne contient pas d'huile, mais peut cependant être utilisé comme carburant, soit pur, soit en mélange avec du gazole de n'importe quelle proportion (Ölmez, 2005).

Selon Aktas (2020), certaines sources d'huile peuvent être utilisées dans la production de biodiesel :

- Huiles Végétales : Tournesol, Soja, Colza, Carthame, Coton, Palme
- Huiles de récupération : sous-produits de l'industrie des huiles végétales
- Huiles de récupération de l'origine des déchets urbains et industriels
- Huiles animales : huiles de givre, huiles de poisson et huiles de volaille
- Huiles végétales usagées : huiles de cuisson usagées

Technologies de production de biodiesel

Certaines technologies courantes permettent d'utiliser des types de matières premières à base d'huile et de graisse comme carburant dans les moteurs diesel, généralement appelés biodiesel. Les technologies sont l'utilisation directe ou le mélange d'huiles, la pyrolyse, la microémulsion et la transestérification. La transestérification est la méthode que divers chercheurs préfèrent utiliser pour la production de biodiesel en raison d'une production de meilleure qualité.

Utilisation directe (dilution) ou mélange

Le processus de dilution est un processus de dilution des huiles végétales et usées par mélange avec un solvant ou un carburant diesel dans certaines proportions. Les utilisations directes d'huiles végétales ont généralement été considérées comme non satisfaisantes et peu pratiques pour les moteurs diesel directs et indirects. Huiles utilisées dans la méthode de dilution de la production de biodiesel ; l'huile d'arachide, l'huile de colza, l'huile de tournesol et les huiles usagées. La viscosité élevée, la composition acide, la teneur en acides gras libres, ainsi que la formation de gomme due à l'oxydation et à la polymérisation pendant le stockage et la combustion, les dépôts de carbone et l'épaississement de l'huile lubrifiante sont des problèmes évidents.

Pour éviter de tels problèmes, les sources de carburant alternatives sont directement mélangées avec des carburants fossiles conventionnels. Ce type de mélange améliorera la qualité du carburant, réduira la consommation de carburant fossile, etc., il est donc également préférable comme moyen le plus pratique d'utiliser des carburants alternatifs tels que les biocarburants. Les mélanges d'huile bio et de diesel seront dans différents ratios comme 10:1, 10:2, 10:3, etc., (Mendhe, 2015).

Pyrolyse

Le mot « pyrolyse » est dérivé de pyro (qui peut être interprété comme « feu ») et lyse (qui est interprété comme « séparation »). Par conséquent, la pyrolyse peut être simplement définie comme la décomposition ou la désintégration de composés organiques à des températures très élevées, aidée soit par la présence d'un catalyseur approprié, soit par l'absence d'air. La pyrolyse est effectuée dans une plage de température de 400 à 600 °C. Le processus produit des gaz, de la bio-huile et un charbon en fonction de la vitesse de pyrolyse. Selon Gebremariam (2017), en fonction des conditions opératoires, le procédé de pyrolyse peut être divisé en trois sous-classes : la pyrolyse conventionnelle, la pyrolyse

rapide et la pyrolyse flash. La pyrolyse rapide est celle utilisée pour la production de bio-huile.

Tableau 4.Classification des méthodes de pyrolyse

Méthode	Température (°C)	Temps de séjour	Taux de chauffage	Principaux produits
Pyrolyse conventionnelle/ lente	Moyen-élevé (400-500)	Long 5-30 min	Bas 10	● Gaz ● Charbon ● Huile bio
Pyrolyse rapide	Moyen-élevé (400-650)	Court 0.5-2 s	Élevé 100	● Huiles bio ● Gaz ● Charbon
Pyrolyse éclair	Élevé (700-1000)	Tres court < 0.5 s	Bas 10	● Gaz ● Huile bio

Les matières organiques pouvant être pyrolysées comprennent les graisses animales, les huiles végétales, les triglycérides naturels. Les composants liquides des graisses pyrolysées et des triglycérides comprennent le biodiesel qui fonctionne de la même manière que le diesel pétrolier dans les moteurs diesel. Abbaszaadeh (2012) a également signalé que le carburant biodiesel produit par un processus de pyrolyse ou connu sous le nom de bio-huile convient aux moteurs diesel.

Micro-émulsification

Selon la définition de l'IUPAC, la micro-émulsion est une dispersion composée d'eau, d'huile et de tensioactif(s) qui est un système isotrope et thermodynamiquement stable avec un diamètre de domaine dispersé variant approximativement de 1 à 100 nm, généralement de 10 à 50 nm. Ma et al. (1999) ont expliqué que la formation de micro-émulsion est l'une des solutions potentielles pour résoudre le problème de la viscosité des huiles végétales

Les composants d'une micro-émulsion de biodiesel comprennent du carburant diesel, de l'huile végétale, de l'alcool et un tensioactif et un améliorant de cétane dans des proportions appropriées. Des alcools tels que le méthanol et l'éthanol sont utilisés comme additifs abaissant la viscosité, des alcools supérieurs sont utilisés comme tensioactifs et des nitrates d'alkyle sont utilisés comme améliorants de cétane.

Les micro-émulsions peuvent améliorer les propriétés de pulvérisation par vaporisation explosive des constituants à bas point d'ébullition dans les micelles. La micro-émulsion entraîne une réduction de la viscosité, une augmentation de l'indice de cétane et de bonnes caractéristiques de pulvérisation dans le biodiesel. Cependant, comme l'indique Parawira (2010), l'utilisation continue de diesel micro-émulsionné dans les moteurs entraîne des problèmes tels que le grippage de l'aiguille d'injecteur, la formation de dépôts de carbone et une combustion incomplète.

Transestérification

La transestérification est la méthode la plus pratique pour produire du biodiesel à partir de types de matières premières d'huile et de graisse, qui ressemble chimiquement au diesel pétrolier. Avec cette méthode, les huiles et les graisses (triglycérides) sont converties en leurs esters alkyliques avec une viscosité réduite à des niveaux proches du carburant diesel. Ce produit est donc un carburant aux propriétés similaires au carburant diesel à base de

pétrole, ce qui lui permet d'être utilisé dans les moteurs diesel pétroliers existants sans modifications.

Généralement, la transestérification est une réaction réversible, qui se déroule simplement essentiellement en mélangeant les réactifs habituellement sous chaleur et/ou pression. Cependant, si un type de catalyseur est ajouté à la réaction, le processus sera accéléré. Il existe un certain nombre de façons de produire la transestérification, comme la catalyse acide, la catalyse basique, la lipase catalysée, la supercritique, la nano catalyse et la catalyse liquide ionique.

Transestérification catalysée par un acide

La transestérification catalysée par un acide a été la première méthode de l'histoire à produire du biodiesel (ester éthylique) à partir d'huile de palme en utilisant de l'éthanol et de l'acide sulfurique. Le processus catalysé par un acide est dû à la réaction d'un triglycéride (graisse/huile) avec un alcool en présence d'un catalyseur acide pour former des esters (biodiesel) et du glycérol. Cette méthode est pratique et économiquement viable dans la production de biodiesel à partir de ressources en huile ou en graisse à haute teneur en acides gras libres. Cependant, la réaction catalysée par un acide nécessite un temps de réaction plus long et une température plus élevée que la réaction catalysée par un alcali.

La transestérification catalysée par un acide commence par mélanger l'huile directement avec l'alcool acidifié, de sorte que la séparation et la transestérification se produisent en une seule étape, l'alcool agissant à la fois comme solvant et comme réactif d'estérification. La transestérification catalysée par un acide doit être effectuée en l'absence d'eau, afin d'éviter la formation compétitive d'acides carboxyliques qui réduisent les rendements en esters alkyliques.

Étant donné que la transestérification est une réaction d'équilibre, il devrait toujours y avoir plus d'alcool que l'huile pour favoriser la réaction directe pour une conversion complète de l'huile en ester alkylique. Cependant, plus d'alcool au-delà de l'optimum entraînera également des coûts supplémentaires lors de la séparation de plus de glycérol produit de l'ester alkylique et c'est pourquoi il devrait toujours y avoir une optimisation du rapport pour une production efficace.

L'acide sulfurique, l'acide sulfonique et l'acide chlorhydrique sont les catalyseurs acides habituels, mais le plus couramment utilisé est l'acide sulfurique. La méthode de transestérification catalysée par un acide présente des avantages et des inconvénients.

Les avantages sont :

- Donne un rendement relativement élevé
- Insensible à la teneur en FFA dans la matière première, donc méthode préférée si une matière première de qualité inférieure est utilisée
- L'estérification et la transestérification se produisent simultanément
- Moins énergivore

Les désavantages sont:

- La corrosivité des acides endommage les équipements

- Plus de quantité de glycérol libre dans le biodiesel
- Nécessite un fonctionnement à plus haute température mais moins que supercritique
- Séparation relativement difficile du catalyseur du produit
- A un taux de production plus lent (prend relativement plus de temps)

Transestérification catalysée par une base

Le procédé de transestérification catalysé alcalin ou basique est la réaction d'un triglycéride (graisse/huile) avec un alcool en présence de catalyseurs alcalins tels que des alcoxydes et hydroxydes de métaux alcalins ainsi que des carbonates de sodium ou de potassium pour former des esters (biodiesel) et du glycérol. La transestérification catalysée par une base est beaucoup plus rapide que la transestérification catalysée par un acide et est moins corrosive pour les équipements industriels et est donc la plus souvent utilisée dans le commerce.
Cependant, la présence d'eau et une quantité élevée d'acides gras libres dans une matière première entraînent une saponification de l'huile et, par conséquent, une réaction incomplète au cours du processus de transestérification alcaline avec formation ultérieure d'émulsion et difficulté de séparation du glycérol. Le principal inconvénient résultant de la réaction de saponification est la consommation de catalyseur et la difficulté accrue du processus de séparation, ce qui entraîne des coûts de production élevés.

Généralement, les catalyseurs basiques manifestent une activité catalytique beaucoup plus élevée que les catalyseurs acides dans la réaction de transestérification, mais sont sélectivement adaptés pour dériver du biodiesel uniquement à partir d'huiles raffinées ayant une faible teneur en acides gras libres (FFA) généralement inférieure à 0,5 %. La production efficace de biodiesel à l'aide de la transestérification catalysée par une base ne dépend pas seulement de la qualité de la matière première, elle dépend également des variables cruciales de l'opération de réaction telles que le rapport molaire alcool/huile, la température de réaction, la vitesse de mélange, le temps de réaction, le type et concentration de catalyseur et également du type d'alcool utilisé (généralement du méthanol).

L'hydroxyde de sodium, l'hydroxyde de potassium et le méthylate de sodium sont des catalyseurs habituellement utilisés dans la transestérification catalysée par une base. L'hydroxyde de sodium est le plus souvent préférable en raison de son activité catalytique intermédiaire et d'un coût beaucoup plus faible. La méthode de transestérification catalysée par une base présente des avantages et des inconvénients
Les avantages sont:

- Vitesse de réaction plus rapide que la transestérification catalysée par un acide
- La réaction peut se produire dans des conditions de réaction douces et moins intenses en énergie
- Les catalyseurs courants tels que NaOH et KOH sont relativement bon marché et largement disponibles
- Moins corrosif

Les désavantages sont:

- Sensible à la teneur en FFA dans l'huile
- La saponification de l'huile est le principal problème en raison de la qualité de la matière première
- La récupération du glycérol est difficile
- Eaux usées alcalines

- Le produit généré nécessite un traitement

Transestérification catalysée par la lipase

Le processus de transestérification catalysé par la lipase est la réaction d'un triglycéride (graisse/huile) avec un alcool en présence d'enzyme lipase comme catalyseur pour former des esters (biodiesel) et du glycérol. La transestérification catalysée par la lipase est l'autre voie de transestérification des huiles et des graisses pour la production de biodiesel à l'aide d'enzymes dans lesquelles il n'y a pas de problème de saponification, de purification, de lavage et de neutralisation, de sorte qu'il s'agit toujours d'une méthode préférée de ces points de vue. Cependant, les problèmes associés aux catalyseurs enzymatiques sont leur coût plus élevé et leur temps de réaction plus long.

Les lipases pour leur activité de transestérification sur différentes huiles peuvent être trouvées à partir de différentes sources. Capacité à utiliser tous les mono, di et triglycérides ainsi que les acides gras libres, faible inhibition du produit, activité et rendement élevés dans des milieux non aqueux, faible temps de réaction, réutilisation de l'enzyme immobilisée, résistance à la température et à l'alcool sont les caractéristiques les plus souhaitables de lipases pour la transestérification des huiles pour la production de biodiesel. Les enzymes sont généralement immobilisées pour une meilleure charge, activité et stabilité des enzymes. La sélection et la conception de la matrice de support sont importantes dans l'immobilisation des enzymes. A cet égard, il existe un certain nombre de façons d'immobiliser les enzymes.

La méthode de transestérification catalysée par la lipase présente des avantages et des inconvénients.

Les avantages sont :

- Insensible aux FFA et à la teneur en eau de l'huile, donc préféré lorsque des matières premières de qualité inférieure sont utilisées
- Elle est réalisée à basse température de réaction
- La purification nécessite une étape simple, en permettant une séparation facile du sous-produit, le glycérol
- Donne un produit de haute pureté (esters)
- Permet de réutiliser l'enzyme immobilisée

Les inconvénients sont :

- Le coût de l'enzyme est généralement très élevé
- Donne un rendement relativement faible
- Il faut un temps de réaction élevé
- Le problème de l'inactivation des lipases causée par le méthanol et le glycérol

Transestérification catalysée par un liquide ionique

Les liquides ioniques sont des sels organiques composés d'anions et de cations liquides à température ambiante. Les cations sont responsables des propriétés physiques des liquides ioniques (telles que le point de fusion, la viscosité et la densité), tandis que l'anion contrôle ses propriétés chimiques et sa réactivité. Leur avantage unique est que, bien que synthétisés, ils peuvent être modérés pour s'adapter aux conditions de réaction requises.

Parmi les différents types possibles de liquides ioniques pour la catalyse de la réaction de transestérification pour la production de biodiesel, les liquides ioniques composés du cation 1-n-butyl-3-méthylimidazolium sont les composés les plus étudiés et discutés. Guo et al. (2014) ont conclu que la transestérification catalysée par un liquide ionique s'est avérée efficace et rapide pour la préparation de biodiesel à partir d'huile de soja.

Les avantages de cette méthode sont :

- Facile à séparer les produits finaux grâce à la formation de biphasique.
- Efficace et gain de temps
- Lors de la préparation des catalyseurs, leurs propriétés peuvent être conçues pour répondre à un besoin particulier
- Le catalyseur peut être facilement séparé et réutilisé plusieurs fois
- Activité catalytique élevée, excellente stabilité

Les inconvénients de cette méthode sont:

- Coût élevé de la production de liquide ionique
- Nécessite relativement plus d'alcool pour un rendement efficace

Bioéthanol

Le bioéthanol est considéré comme un substitut potentiel à l'essence conventionnelle et peut être utilisé directement dans les véhicules ou mélangé à l'essence, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'essence. Le bioéthanol (E100) peut être utilisé en application directe. Cependant, il est difficile de démarrer le moteur car le moteur démarre à basse température ou par temps froid, car l'E100 a besoin de plus de chaleur pour se vaporiser.

Les avantages du bioéthanol comprennent un indice d'octane élevé entraînant une efficacité et des performances accrues du moteur, un point d'ébullition bas, une large inflammabilité, un taux de compression et une chaleur de vaporisation plus élevés, un contenu énergétique comparable, un temps de combustion réduit et un moteur à mélange pauvre.

Certaines sources peuvent être utilisées dans la production de bioéthanol :

- La source de première génération provient de matières premières comestibles :
    - Maïs
    - Canne à sucre
- La source de seconde génération provient de la lignocellulose comme matière première :
    - Panic raide
    - Maïs
    - Bois
    - Cultures herbacées
    - Déchets de papier et produits en papier
    - Résidus agricoles et forestiers
    - Déchets des usines de pâtes et papiers
    - Déchets solides municipaux
    - Déchets de l'industrie alimentaire

- La source de troisième génération provient des algues comme matière première, il existe des types d'algues à forte productivité :
    - Nannochloropsis Oculata
    - Tetraselmis suecica
    - Scenedesmus dimorphus
    - Porphyridium cruentum (eau de mer)
    - Porphyridium cruentum (eau douce)
    - Padina Tetrastromatica

Le bioéthanol peut être utilisé dans certaines applications telles que :

- Carburant pour le transport
- Combustible pour la production d'électricité à partir de la combustion thermique
- Matière première dans l'industrie chimique
- Carburant dans les systèmes de cogénération

Processus de production de bioéthanol

La production de bioéthanol comprenait le prétraitement, l'hydrolyse et la fermentation. Certains types de procédés de prétraitement sont généralement utilisés dans la production de bioéthanol, tels que le prétraitement traditionnel et les méthodes de prétraitement avancées pour la lignocellulose. Dans le processus d'hydrolyse, la biomasse lignocellulosique peut être catalysée soit avec des enzymes soit avec un acide. Dans les technologies de fermentation, il en existe certains types, tels que le processus de fermentation par lots, le processus de fermentation en continu, le processus de fermentation par lots alimentés, l'hydrolyse et la fermentation séparées (SHF), la saccharification et la fermentation simultanées (SSF), la saccharification et la cofermentation simultanées (SSCF) et bioprocédés consolidés (CBP)

Biomasse lignocellulosique >>> Prétraitement >>> Hydrolyse >>> Fermentation >>> Distillation >>> Bioéthanol/Ethanol

Processus de prétraitement

Le procédé de prétraitement de la biomasse lignocellulosique va permettre de séparer la cellulose qui se trouve généralement dans une matrice de polymères constituée d'hémicellulose et de lignine. Cette séparation de la cellulose facilite le processus d'hydrolyse - car il devient plus accessible et plus facile de produire des monomères de sucre lors de l'hydrolyse. S'il n'y a pas de prétraitement, le processus d'hydrolyse ne sera pas efficace car l'enzyme se liera simplement à la surface de la lignine.

Le processus de prétraitement présente certains avantages

- Aide à prévenir la dégradation des sucres (pentoses)
- Assurer la viabilité de la production de bioéthanol, comme la taille du réacteur, les besoins en chaleur et en électricité
- Minimiser la formation d'inhibiteurs qui peuvent réduire le rendement de l'hydrolyse et de la fermentation du sucre en éthanol

Prétraitement traditionnel

Il existe 4 méthodes de prétraitement différentes telles que :

- Prétraitement physique - Dans le prétraitement physique, la biomasse lignocellulosique se décompose en petite taille, ce prétraitement implique le broyage, l'extrusion et l'irradiation. Cette méthode augmentera la surface et la taille des pores de la biomasse, ce qui peut augmenter l'efficacité de l'hydrolyse enzymatique. Le prétraitement physique peut être combiné au prétraitement chimique pour augmenter l'efficacité de déconstruction de la lignocellulose (Edeh, 2020).
- Prétraitement chimique - Le prétraitement chimique comprend des méthodes acides, alcalines (bases) et oxydatives. Cependant, le prétraitement chimique est très sensible et sélectif avec les types de matières premières. Le prétraitement chimique est très efficace mais il nécessite des conditions de travail et un environnement particuliers, ainsi que les sous-produits de cette méthode nécessitant une élimination particulière.
- Prétraitement physico-chimique - Dans le traitement physico-chimique, on combine en fait à la fois des prétraitements physiques et chimiques.
- Prétraitement biologique - Dans le prétraitement biologique, des micro-organismes tels que la pourriture blanche, la pourriture brune, les champignons et les bactéries de la pourriture molle décomposent la biomasse lignocellulosique pour une hydrolyse ultérieure.

Prétraitement avancé

Ce traitement est généralement appelé prétraitement de fractionnement de la lignocellulose (Edeh, 2020). Ce traitement visait à réduire le coût du processus de prétraitement dans la production de bioéthanol. Ce processus est réalisé en utilisant des solvants cellulosiques capables d'améliorer la séparation de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine dans la biomasse lignocellulosique.

Il existe 2 méthodes de traitement avancées différentes :

- Fractionnement à médiation acide - cette méthode utilise un solvant cellulosique comme l'acide phospholique, l'acétone ou l'éthanol, et fonctionne à 1 atm et 50 oC pour séparer la biomasse lignocellulosique. Cette méthode est effectivement utilisée pour prétraiter certaines lignocelluloses telles que le bambou, les tiges de maïs, la canne à sucre, le panic raide et l'herbe à éléphant (Sathisuksanoh, 2011).
- Fractionnement à base de liquide ionique (ILF) - Les liquides ioniques sont simplement des solutions salines constituées d'une quantité importante de cations organiques et d'une petite quantité d'anions inorganiques sous forme de liquide à température ambiante. Cette méthode est utilisée pour fractionner la lignocellulose afin d'obtenir des matières premières spécifiques, purifiées et polymères, intactes et facilement séparables et utilisées comme coproduits à valeur ajoutée (Edeh, 2020)

Hydrolyse

L'hydrolyse est un processus important dans la production de bioéthanol. L'hydrolyse se faisait autrefois après prétraitement de la biomasse lignocellulosique qui s'était déjà dégradée en glucides polymères (cellulose et hémicellulose). Cette étape décomposera les polymères glucidiques en monomères de sucre. Le procédé d'hydrolyse peut être utilisé avec une catalyse acide ou enzymatique.

L'hydrolyse catalysée par un acide est la méthode couramment utilisée dans la production de bioéthanol. Les acides fréquemment utilisés dans cette hydrolyse sont H2SO4 et HCl à haute concentration et basse température. Le résultat de cette méthode est une récupération de 90 % du sucre en peu de temps. Cependant, cette méthode présente certains avantages tels que le coût élevé, la difficulté de récupération, de contrôle et d'élimination de l'acide.

L'hydrolyse catalysée par une enzyme est une autre méthode du processus d'hydrolyse pour la production de bioéthanol. Ce processus utilise des enzymes telles que Clostridium, cellulomonas, Erwinia, Thermonospora, Bacteroides, Bacillus, Ruminococcus, Acetovibrio et Streptomyces. D'autres comprennent des champignons tels que Trichoderma, Penicillium, Fusarium, Phanerochaete, Humicola et Schizophyllum sp. (Edeh, 2020). Et l'enzyme microbienne la plus couramment utilisée est Trichoderma sp. (Imran, 2016). Cette méthode présente des avantages tels qu'une récupération élevée du sucre. Cependant, certains facteurs affectent le résultat, tels que le pH, la charge enzymatique et le temps, la température et la concentration du substrat. L'inconvénient de cette méthode est le coût de production élevé, car les enzymes sont chères.

Processus de fermentation

La fermentation est un processus biologique qui convertit les sucres monomères issus de l'hydrolyse en éthanol, en acides et également en gaz. Cette méthode utilise des levures, des champignons et des bactéries. Dans ce processus, le micro-organisme le plus couramment utilisé est la levure, en particulier Saccharomyces cerevisiae, car ce micro-organisme a un rendement élevé en éthanol et des limites de tolérance élevées (Surendhiran, 2019).

Il existe certaines technologies sur le processus de fermentation pour produire du bioéthanol, telles que la fermentation en série, discontinue, continue et à l'état solide, la saccharification et la fermentation simultanées (SSF), la saccharification et la co-fermentation simultanées (SSCF), la saccharification et la fermentation simultanées non isothermes. saccharification, filtration et fermentation simultanées et bioprocédés consolidés (CBP).

Processus de fermentation discontinue

Il s'agit du processus de fermentation le plus élémentaire dans la production de bioéthanol, car il est facile à contrôler et comporte plusieurs cuves. Le processus consiste à ajouter les substrats, le micro-organisme, le milieu de culture et les nutriments au début de l'opération dans un système fermé dans des conditions favorables à un moment prédéterminé. Les produits ne sont prélevés qu'à la fin du temps de fermentation. Cependant, les inconvénients de ce procédé sont un faible rendement, une longue durée de fermentation et une main-d'œuvre élevée, de sorte que ce procédé n'est pas attrayant pour la production commerciale.

Processus de fermentation continue

Ce procédé consiste à ajouter des substrats, du milieu de culture et des nutriments dans un fermenteur qui contient des micro-organismes actifs et à soutirer les produits en continu. Les avantages du processus de fermentation en continu sont une productivité élevée, de petits

volumes de fermenteur et un faible investissement et un faible coût d'exploitation (Jain, 2014). La longue durée de culture est l'inconvénient de ce processus car il s'agit d'un déclin potentiel de la capacité de la levure à supporter l'éthanol. Les avantages sont un faible investissement en capital, une productivité élevée et de petits volumes de fermenteur.

Processus de fermentation Fed-batch

Selon Edeh (2020), Chandel (2007) et Xiao (2019), le processus de fermentation discontinue est la combinaison de processus de fermentation discontinus et continus impliquant le chargement du substrat dans le fermenteur sans retirer le milieu. Comparé à d'autres procédés de fermentation, le procédé fed-batch a une productivité plus élevée, plus d'oxygène dissous dans le milieu, un temps de fermentation plus court et un effet toxique du milieu plus faible. L'inconvénient est que la productivité de l'éthanol est limitée par la concentration de la masse cellulaire et le débit d'alimentation.

Hydrolyse et fermentation séparées (SHF)

Selon Edeh (2020), Azhar (2017) et Tavva (2016), l'hydrolyse enzymatique est séparée de la fermentation permettant aux enzymes de fonctionner à haute température et aux micro-organismes de fermentation de fonctionner à température modérée pour des performances optimales. Étant donné que les enzymes hydrolytiques et les organismes de fermentation fonctionnent dans leurs conditions optimales, on s'attend à ce que la productivité de l'éthanol soit élevée. Les inconvénients du SHF sont un coût d'investissement élevé d'autant plus que deux réacteurs sont nécessaires, l'exigence d'un temps de réaction élevé, et la possibilité de limiter les activités cellulaires par les sucres libérés lors de l'étape d'hydrolyse.

Saccharification et fermentation simultanées (SSF)

La saccharification et la fermentation simultanées (SSF) où la saccharification de la cellulose et la fermentation des sucres monomères sont réalisées simultanément dans le même réacteur (Rastogi, 2018). Selon Edeh (2020), l'inconvénient du SSF est la variation de la température optimale requise pour une performance efficace de la cellulase et des micro-organismes lors de l'hydrolyse et de la fermentation, respectivement.

Saccharification et cofermentation simultanées (SSCF)

Il s'agit de réaliser l'hydrolyse et la saccharification dans la même unité avec co-fermentation des sucres pentoses. Habituellement, des souches de Saccharomyces cerevisiae génétiquement modifiées qui peuvent fermenter le xylose sont utilisées puisque la Saccharomyces cerevisiae normale ne peut pas fermenter le sucre pentose (Bondesson, 2016). Comme le SSF, le SSCF présente les avantages d'un coût inférieur, d'un rendement en éthanol plus élevé et d'un temps de traitement plus court (Chandel, 2007).

Bioprocédés consolidés (CBP)

Selon Hasunuma (2012), ce processus nécessite que la production d'enzymes, l'hydrolyse et la fermentation soient réalisées dans une seule unité. Le microorganisme le plus utilisé dans ce processus est Clostridium thermocellum car il a la capacité de synthétiser la cellulase qui dégrade la lignocellulose en sucres monomères et produit de l'éthanol. Bien que le CBP en soit encore à ses balbutiements, les avantages suivants ont été identifiés : moins énergivore, coût de l'enzyme moins cher, faible coût d'investissement, moins de possibilité de contamination (Edeh, 2020).

Production de biogaz

Selon l'Agence européenne pour l'environnement, le biogaz est un type de gaz, riche en méthane, qui est produit par la fermentation de déjections animales, d'eaux usées humaines ou de résidus de culture dans un récipient hermétique. Simplement, le biogaz est un carburant sous forme de gaz qui est produit par un processus anaérobie à partir de la biomasse. Le processus anaérobie dans la production de biogaz est le processus de méthanogenèse (production de méthane) sans la présence d'oxygène.
Le méthane est un gaz à effet de serre et aussi un hydrocarbure qui est un composant principal du gaz naturel. Cependant, le méthane peut être produit dans un processus anaérobie à partir de sources de biomasse telles que les déchets et les eaux usées - il ne provient donc pas uniquement du gaz naturel (combustible fossile).
En moyenne, le biogaz contient :

- 55-80% méthane (CH_4)
- 20-40% de dioxyde de carbone (CO_2).
- traces de gaz, y compris le sulfure d'hydrogène toxique et l'oxyde nitreux.

Dans la production de méthane, il y a 4 étapes essentielles telles que l'hydrolyse, l'acidification, l'acétogénèse et la méthanogénèse. Ces étapes consistent dans le processus de digestion anaérobie. Dans le processus de digestion anaérobie, il existe 2 méthodes différentes, y compris le fonctionnement en une seule étape et le fonctionnement en deux étapes. Cependant, le monoétage est moins efficace, mais il est simple. De nombreux chercheurs ont recommandé le fonctionnement en deux étapes, car il est plus efficace en termes de temps de rétention de la production de biogaz.

Selon la Commission européenne (2017), en Europe, les cultures énergétiques (principalement le maïs) fournissent environ la moitié de la production de biogaz (318 PJ, 7,6 Mtep), suivies par la mise en décharge (114 PJ, 2,7 Mtep), les déchets organiques (y compris les déchets municipaux) (86 PJ, 2,0 Mtep), boues d'épuration (57 PJ, 1,3 Mtep) et fumier (46 PJ, 1,1 Mtep).

Vous trouverez ci-dessous le schéma de flux de production de biogaz simple :
Matière première >>> Prétraitement >>> Processus de digestion anaérobie >>> Biogaz brut >>> Purification >>> Stockage >>> Distribution

Processus de prétraitement

Semblable au processus de production de bioéthanol, un prétraitement est nécessaire dans la production de biogaz. Dans la production de biogaz, le prétraitement vise à ouvrir la structure du substrat, ce qui peut augmenter le rendement en biogaz. Le prétraitement améliorera l'efficacité et la qualité du résultat de la digestion anaérobie. Il existe 5 méthodes

de prétraitement différentes, telles que physique, chimique, thermique, biologique et combinée.

Méthodes de prétraitement physique

Dans le prétraitement physique, la structure de la biomasse sera décomposée en utilisant la force physique. Ce prétraitement est utilisé pour rendre la biomasse facilement traitée dans le digesteur anaérobie car la biomasse est sensible aux processus microbiens et enzymatiques. Il existe différents types de méthodes de prétraitement physique telles que:

- Broyage
- Cavitation
- Irradiation micro-ondes
- Extrusion

Méthode de prétraitement thermique

Selon Edeh (2020), le prétraitement thermique améliore l'hydrolyse, avec un rendement accru en méthane lors de la digestion anaérobie ultérieure. Une large gamme de températures a été étudiée, allant de 60 à 270 °C, mais des températures supérieures à 200 °C se sont avérées responsables de la production de matières organiques solubles récalcitrantes ou d'intermédiaires toxiques/inhibiteurs pendant le processus de prétraitement (Wilson, 2009)

Méthodes de prétraitement chimique

Il existe certains types de méthodes de prétraitement chimique qui peuvent être utilisées dans le processus de production de biogaz, telles que :

- Prétraitement acide/ Prétraitement alcalin
- Prétraitement oxydant
- Prétraitement d'ozonation

Méthode de prétraitement biologique

Le processus de prétraitement à médiation biologique est basé sur la fonction de multiples formes de microbes hétérotrophes (Edeh, 2020). Le prétraitement fongique améliore la dégradation de la lignine et de l'hémicellulose et entraîne donc une digestibilité accrue de la cellulose, qui est de préférence essentielle pour le processus de digestion anaérobie. Plusieurs classes de champignons, y compris les champignons de la pourriture brune, blanche et molle, ont été utilisées pour le prétraitement de la biomasse lignocellulosique pour la production de biogaz, les champignons de la pourriture blanche étant les plus efficaces.

Méthodes de prétraitement combinées

Il existe différents types de méthodes combinées de prétraitement telles que :

- Explosion de vapeur
- Physicochimique
- Expansion des fibres d'ammoniac

Technologies de digestion anaérobie

Le système de digestion anaérobie à plusieurs étapes est plus efficace en termes de qualité et de performance du produit. Le système de digestion anaérobie à plusieurs étapes standard est un système à deux étapes acide/gaz (AG), dans lequel les étapes de formation d'acide (hydrolyse et fermentation d'acide volatil) sont physiquement séparées de l'étape de formation de gaz (formation de méthane) en étant conduit dans des réservoirs de digestion séparés. Afin de concevoir un digesteur anaérobie, nous devons répondre à trois exigences principales telles que : produire un volume élevé de biogaz de haute qualité - capable de gérer en continu un taux de charge organique élevé ; et d'avoir un temps de rétention hydraulique court afin d'avoir un volume de réacteur plus petit.

La première étape, connue sous le nom de digesteur primaire ou de phase acide, consiste en l'hydrolyse et la première étape de production d'acide, au cours de laquelle les bactéries acidogènes convertissent la matière organique en composés solubles et en acides gras volatils. La deuxième étape, connue sous le nom de digesteur secondaire ou d'étape de méthane, consiste en une conversion supplémentaire de la matière organique en acide acétique par acétogénèse, ainsi qu'en l'étape de formation de méthane, dans laquelle les bactéries méthanogènes convertissent la matière soluble en biogaz.

Selon l'EPA (2006), la digestion anaérobie en plusieurs étapes présente des avantages par rapport aux procédés de digestion anaérobie en une seule étape, notamment :

- Les systèmes à plusieurs étapes nécessitent moins de volume de digesteur pour gérer la même quantité de volume d'entrée car ils ont des temps de rétention plus courts et permettent des taux de chargement plus élevés que les systèmes à une étape.
- Les systèmes à plusieurs étapes ont atteint la réduction VS, ce qui permet un meilleur contrôle des odeurs.
- Un système à plusieurs étapes peut être configuré pour réduire les problèmes de mousse.
- Les systèmes multi-étages réduisent le court-circuit des solides en séparant les étages et en optimisant le temps de rétention dans chaque étage.

Désavantages:

- Les exigences de tuyauterie pour un système à plusieurs étages, son fonctionnement et sa maintenance sont plus complexes que celles d'un système à un étage.

Il existe différents types de digesteurs, qui sont principalement utilisés dans l'industrie impliquant des systèmes à plusieurs étages :

- Réacteurs à cuve agitée à flux continu (CSTR)
- Réacteurs à écoulement piston anaérobies (APFR)
- Réacteur de contact anaérobie (ACR)
- Biofilms
- Réacteurs discontinus
- Réacteur anaérobie à chicanes (ABR)
- Bioréacteur hybride

- Couverture de boue anaérobie à flux ascendant (UASB)

References

Achinas, Spyridon., Achinas, Vasileios., & Euverink, Gerrit Jan Willem., 2017. A Technological Overview of Biogas Production. http://www.engineering.org.cn/en/10.1016/J.ENG.2017.03.002

Aktas, Ezgi Sühel., Demir, Özlem., & Uçar, Deniz., 2020. A Review of The Biodiesel Sources and Production Methods. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/941575

Ayoola, A.A., et. al., 2020. Biodiesel Fuel Production Processes: A Short Review. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1107/1/012151/pdf

Azhar, Siti Hajar Mohd., et. al., 2017. Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405580816302424

Bondesson, PM., & Galbe, M., 2016. Process design of SSCF for ethanol production from steam-pretreated, acetic-acid-impregnated wheat straw. https://doi.org/10.1186/s13068-016-0635-6

Camia, A., Robert, N., Jonsson, K., Pilli, R., Garcia Condado, S., et. al., 2018. Biomass production, supply, uses and flows in the European Union: First results from an integrated assessment. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC109869

Chattopadhyay, Soham., & Sen, Ramkrishna., 2020. Materials and Methods for Biodiesel Production.

Liu, Chen-Guang., et. al., 2019. Cellulosic ethanol production: Progress, challenges and strategies for solutions. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975019300382?casa_token=-1vuUsBucisAAAAA:NZegYefhU8CAW8lbn02a6jfX3mfim7geCUPr2NMMgUZLXzIcu26m_iuKgT0aF-Eh8fgCP2oUTA

M, Rastogi., & S, Shrivastava., 2018. Current Methodologies and Advances in Bio-ethanol Production. https://crimsonpublishers.com/jbb/fulltext/JBB.000505.php

Origin Energy, 2018. Biomass to Bioenergy. https://www.originenergy.com.au/blog/biomass-to-bioenergy/

Özçimen, D., & Yücel, S., 2011. Novel Methods in Biodiesel Production. https://www.intechopen.com/chapters/17489

Pasha, M.K., Dai, L., Liu, D., et. al., 2021. An overview to process design, simulation and sustainability evaluation of biodiesel production. https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-021-01977-z

Pietrangeli, B., & Lauri, R., 2018. Biogas Production Plants: A Methodological Approach for Occupational Health and Safety Improvement. https://www.intechopen.com/chapters/58439

Queensland Government, 2021. Biogas Production. https://www.business.qld.gov.au/industries/mining-energy-water/energy/renewable/projects-queensland/starting-biogas-project/biogas-production

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-38881-2_7

Dunford, Nurhan., 2016. Biodiesel Production Techniques. https://extension.okstate.edu/fact-sheets/biodiesel-production-techniques.html

Edeh, I., 2020. Bioethanol Production: An Overview. https://www.intechopen.com/chapters/74319

Environmental & Energy Study Institute, 2017. Fact Sheet Biogas: Converting Waste to Energy. https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-biogasconverting-waste-to-energy

EPA, 2006. Biosolids Technology Fact Sheet: Multi-Stage Anaerobic Digestion. https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-11/documents/multistage-anaerobic-digestion-factsheet.pdf

European Biogas Association, 2018. Overview on key EU policies for the biogas sector. https://www.europeanbiogas.eu/overview-on-key-eu-policies-for-the-biogas-sector/

European Biomass Industry Association, 2021. Combustion. https://www.eubia.org/cms/wiki-biomass/combustion/

European Commission, 2016. Optimal use of biogas from waste streams. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ce_delft_3g84_biogas_beyond_2020_final_report.pdf

Eyl-Mazzega, Marc-Antoine., & Mathieu, Carole., 2019. Biogas and Biomethane in Europe: Lessons from Denmark, Germany and Italy. https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/mathieu_eyl-mazzega_biomethane_2019.pdf

Gebremariam, Shemelis Nigatu., & Marchetti, J. M., 2017. Biodiesel Production Technologies: Review. https://www.researchgate.net/publication/316867804_Biodiesel_production_technologies_Review

Hasunuma, Tomohisa., Kondo, Akihiko., 2012. Consolidated bioprocessing and simultaneous saccharification and fermentation of lignocellulose to ethanol with thermotolerant yeast strains. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2012.05.004

Imran, M., et. al., 2016. Cellulase Production from Species of Fungi and Bacteria from Agricultural Wastes and Its Utilization in Industry: A Review. https://doi.org/10.4236/aer.2016.42005

Rajalingam, A., Jani, S. P., Kumar, A. Senthil., & Khan, M. Adam., 2016. Production Methods of Biodiesel. https://www.researchgate.net/publication/306140139_Production_methods_of_biodiesel

Ravindra, Pogaku., et. al., 2007. Economics and environmental impact of bioethanol production technologies: an appraisal. https://academicjournals.org/journal/BMBR/article-abstract/3B685B910909

Roman, K., Barwicki, J., Hryniewicz, M., Szadkowska, D., & Szadkowski, J., 2021. Production of Electricity and Heat from Biomass Wastes Using a Converted Aircraft Turbine AI-20. https://doi.org/10.3390/pr9020364

Ryms, Michal., et. al., 2013. Methods of Liquid Biofuel Production - The Biodiesel Example. http://tchie.uni.opole.pl/PECO13_2/EN/RymsLewandowski_PECO13_2.pdf

Salihu, Aliyu., & Alam, Md. Zahangir., 2016. Pretreatment Methods of Organic Wastes for Biogas Production. https://scialert.net/fulltext/?doi=jas.2016.124.137

Sathitsuksanoh, N., Zhu, Z., Wi, S., Zhang, & YH., 2011. Cellulose solvent-based biomass pretreatment breaks highly ordered hydrogen bonds in cellulose fibers of switchgrass. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20967803/

Scarlat,Nicolae., Dallemand, Jean-François., & Fahl, Fernando., 2018. Biogas: Developments and perspectives in Europe. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811830301X

Surendhiran, Duraiarasan., & RazackSirajunnisa, Abdul., 2019. Role of Genetic Engineering in Bioethanol Production From Algae. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128137666000187

Tavva, S.S. Mohan Dev., et. al., 2016. Bioethanol production through separate hydrolysis and fermentation of Parthenium hysterophorus biomass. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115303517?casa_token=jhqY659ts1MAAAAA:Xg8LcA2aXteSxTL97PiRxQjqW88YEJS5nHfacIAiaB6X9_O3POjZGOSOG1R3uuGHYvVIPccfCQ

Teferra, Demsew., & Wubu, Wondwosen., 2018. Biogas for Clean Energy.

Jain, Anjali., & Chaurasia, Satyendra P., 2014. Bioethanol Production in Membrane Bioreactor (MBR) System: A Review. https://www.ripublication.com/ijerd_spl/ijerdv4n4spl_18.pdf

Janiszewska, Dorota., & Ossowska, Luiza., 2020. Biomass as the Most Popular Renevable Energy Source in EU. https://www.ersj.eu/journal/1640/download

Karuppiah, T., & Azariah, V. E., 2019. Biomass Pretreatment for Enhancement of Biogas Production. https://www.intechopen.com/chapters/65202

Kasinath, Arcana., et. al., 2021. Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121007887

Korbag, I., et al., 2020. Recent Advances of Biogas Production and Future Perspective. https://www.intechopen.com/chapters/72920

Kucukkara, Berk., Yaldiz, Osman., Sozer, Salih., & Ertekin, Can., 2011. Biogas Production from Agricultural Wastes in Laboratory Scale Biogas Plant. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/118929

Lebuhn, M., Munk, B. & Effenberger, M., 2014. Agricultural biogas production in Germany - from practice to microbiology basics. https://energsustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/2192-0567-4-10

https://www.researchgate.net/publication/330953118_Biogas_for_Clean_Energy/figures?lo=1

UN Climate Technology Centre & NEtwork, 2021. Biomass Combustion and Cofiring for Electricity and Heat. https://www.ctc-n.org/technologies/biomass-combustion-and-co-firing-electricty-and-heat

US. Environmental Protection Agency, 2007. Biomass Combined Heat and Power Catalog of Technologies. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/biomass_combined_heat_and_power_catalog_of_technologies_v.1.1.pdf

Viaspace, 2021. Direct Combustion in Biomass Power Plants. http://www.viaspacegreenenergy.com/direct-combustion.php

Wilson, Christopher., & Novak, John T., 2009. Hydrolysis of macromolecular components of primary and secondary wastewater sludge by thermal hydrolytic pretreatment. https://www.researchgate.net/publication/223004268_Hydrolysis_of_macromolecular_components_of_primary_and_secondary_wastewater_sludge_by_thermal_hydrolytic_pretreatment

Chapitre 5 - Processus de développement de projets de biomasse

À propos

Ce chapitre présentera un aperçu du processus de développement du point de vue à la fois des maîtres d'ouvrage et des développeurs de projets professionnels. Il fournira le concept d'un projet de biomasse, décrira la complexité de tels projets, présentera les parties prenantes impliquées et discutera des étapes de développement et de mise en œuvre du projet

Il y a quelques objectifs dans ce chapitre :

- Comprendre les bases du développement de projet de la valorisation énergétique de la biomasse
- Pouvoir décrire la complexité du développement du projet
- Comprendre les étapes du projet biomasse-énergie
- Comprendre quels types de parties prenantes et autres professionnels peuvent être impliqués dans le projet

Concept de projet de conversion de la biomasse en énergie

La biomasse est l'une des ressources les plus prometteuses pour la production d'énergie renouvelable. Selon la Banque mondiale (2017), l'utilisation de la biomasse présente certains avantages tels que

- Fournir des ressources énergétiques moins chères et plus stables - comme l'électricité, la vapeur et la chaleur pour un processus industriel ou tout type d'opération nécessitant un approvisionnement constant en énergie.

- Développer et améliorer l'économie de l'entreprise et des opérations en exportant le surplus d'énergie - électricité, chaleur ou vapeur produite à partir de la biomasse.
- Fournir des options d'énergie renouvelable qui peuvent être une solution pour l'environnement, la communauté locale et/ou l'industrie elle-même.
- Réduire les émissions de gaz à effet de serre en remplaçant les ressources énergétiques fossiles telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel par la biomasse.
- Réduire le potentiel de déchets industriels et agricoles à éliminer en décharge en les utilisant comme matière première énergétique.

Les projets de conversion de la biomasse en énergie peuvent avoir des effets positifs sur la demande d'énergie. Il existe deux types d'énergie provenant de la production de bioénergie :

- Utilisation pour la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur pour la consommation interne
- Utilisation pour la consommation interne et le surplus à des fins commerciales - comme l'exportation d'électricité, de chaleur ou de vapeur pour d'autres utilisations énergétiques.

  Le point le plus important pour le développement d'un projet de biomasse est l'approvisionnement en biomasse suffisant ou non pour une production à long terme. En outre, le développeur du projet doit expliquer la viabilité financière - car cela aura un impact important sur les investisseurs. Si le promoteur du projet ne parvient pas à assurer la disponibilité de la biomasse et la viabilité financière du projet de bioénergie, il n'obtiendra jamais le projet dans une phase financière effective.

Cependant, pour calculer la disponibilité et la viabilité financière, ci-dessous sur le tableau 5.1. expliqué la viabilité technique de la production de bioénergie sur la base de la quantité minimale de biomasse nécessaire et de la technologie disponible basée sur COWI

Tableau 5. Quantités minimales d'apport de biomasse et tailles de technologie d'usine (COWI)

Technologie	**1-1.5 MWe**	**5-10 MWe**	**10-40 MWe**
	Apport minimal de biomasse (tonnes/jour)		
Installations de combustion utilisant une chaudière eau/vapeur	20-100	100-200	200-900
Installations de combustion utilisant la technologie ORC	50-200	200-500	n/a
Production de biogaz avec moteur à gaz	40-200	n/a	n/a

Étapes du projet

Il existe deux étapes de projet différentes telles que la préparation et la mise en œuvre du projet. Selon la Banque mondiale (2017),

Étape de préparation

Il y a 4 phases différentes de l'étape de préparation du développement du projet de bioénergie, comme suit :

1. Idée de projet

Il est nécessaire de préparer l'idée conceptuelle détaillée avant d'autres études et le développement du projet. L'idéation du projet est nécessaire pour s'assurer que l'idée principale est réalisable pour la mise en œuvre - y compris sur le plan environnemental, social et financier. Les ressources en biomasse, les enjeux locaux, les réglementations nationales et l'utilisation de la bioénergie peuvent faire partie des considérations principales de l'idéation du projet. L'aperçu détaillé de l'idée et du concept du projet est expliqué ci-dessus (section précédente).

2. Étude de préfaisabilité

L'étude de préfaisabilité vise à mesurer dans un premier temps le potentiel de mise en œuvre et d'investissement du projet. Certains points doivent être pris en compte dans l'étude de préfaisabilité, tels que :

1. Description de la ressource combustible de biomasse (quantité, caractéristiques, prix, transport, logistique, besoin en combustible complémentaire, etc.
2. Obstacles au projet
3. Concepts techniques potentiels (plusieurs concepts peuvent être identifiés et brièvement évalués)
4. Calcul de la production d'énergie attendue (électricité, vapeur, chaleur)
5. Disposition préliminaire
6. Possibilité de se connecter au réseau électrique (distance au réseau, niveau de tension, coûts de connexion, etc.)
7. Évaluation préliminaire des ventes d'énergie (PPA, prix de l'électricité, prix de la chaleur, prix de la vapeur, etc.)
8. Évaluation préliminaire des sites alternatifs (accès au site, taille, raccordement au réseau, à l'égout, etc.)
9. Évaluation préliminaire des emplacements alternatifs
10. Évaluation préliminaire des risques et impacts environnementaux et sociaux
11. Évaluation préliminaire des coûts de construction (CAPEX) et des coûts d'exploitation (OPEX)
12. Analyse financière préliminaire
13. Évaluation préliminaire des risques
14. Évaluation préliminaire des permis et licences nécessaires
15. Planification et mise en œuvre du projet, y compris le calendrier provisoire.

Pour développer un document d'étude de préfaisabilité, il peut être développé avec le contenu mis en évidence ci-dessous (Banque mondiale, 2017):

1. Introduction
2. Conclusion et recommandations
3. Description du projet
4. Production d'énergie attendue
5. Demandes de puissance et de chaleur
6. Évaluation préliminaire de l'impact sur l'environnement
7. Évaluation de sites alternatifs
8. Disposition
9. Conception de génie civil
10. Équipement électromécanique
11. Connexion au réseau
12. Estimation du coût
13. Processus d'autorisation et de licence
14. Planification et mise en œuvre du projet
15. Preliminary financial analysis/Analyse financière préliminaire
16. Analyse préliminaire des risques
17. Annexes

3. Étude de faisabilité

Lorsque l'analyse et les résultats du projet à partir de l'étude de préfaisabilité sont favorables, une étude de faisabilité détaillée peut être développée. L'objectif de l'étude de faisabilité du projet est de créer des détails permettant aux parties intéressées et aux parties prenantes de s'engager à poursuivre son développement. En outre, cela aidera le projet à être plus organisé et réaliste. Cette étude de faisabilité peut aider à obtenir des investissements des institutions financières - car elles sont tenues de faire cette étude dans le développement du projet.

Il existe 3 étapes d'étude de faisabilité différentes selon la Banque mondiale (2017), telles que :

1. Design conceptuel
    a. Définition des caractéristiques du combustible, telles que la composition et le pouvoir calorifique
    b. Description de la technologie appliquée
    c. Évaluation des technologies appropriées, y compris la manipulation du combustible, le système de combustion, la chaudière, la manipulation et l'élimination des cendres, les technologies de traitement des gaz de combustion pour répondre aux normes d'émissions atmosphériques applicables et pertinentes, le système de récupération d'énergie, etc.
    d. Évaluation de l'emplacement ou des emplacements potentiels de l'usine suite à une évaluation des aspects techniques, environnementaux et économiques, et de l'acceptabilité locale/
    e. Évaluation initiale des coûts d'investissement (CAPEX) et des dépenses opérationnelles (OPEX)/

   f. Évaluation de l'utilisation potentielle de vapeur et/ou de chaleur. Est-il possible d'utiliser la chaleur à des fins industrielles, peut-être sous forme de vapeur ? Existe-t-il un marché pour le chauffage/refroidissement urbain ?
   g. Examen des connexions au réseau électrique, autres clients externes, services d'eau et d'assainissement, etc.
2. Étude de faisabilité bancable
   a. Le design conceptuel et l'investissement requis
   b. Approvisionnement sécurisé à long terme en biomasse (volume, pouvoir calorifique/propriétés et prix)
   c. Analyse financière et économique, y compris calculs coûts-avantages, calculs de la valeur actualisée nette (VAN) et du taux de rendement interne (IRR), et analyses similaires
   d. Aperçu du cadre réglementaire et politique actuel pertinent pour le projet
   e. Évaluation des sources de financement supplémentaires potentielles, analyses de sensibilité et analyses de risque importantes pour les institutions de financement
   f. Évaluation des risques potentiels pour la viabilité financière du projet et suggestions de mesures d'atténuation
   g. Évaluation de l'impact environnemental et social, y compris l'identification des mesures d'atténuation
   h. Études organisationnelles de sociétés de services O&M potentielles
   i. Plan d'approvisionnement et identification des fournisseurs et sous-traitants potentiels d'équipement
   j. Plan de mise en œuvre, y compris le calendrier et le calendrier de financement.
3. Permis d'autorité

   Les éléments suivants font normalement partie du processus d'autorisation :
   a. Permis environnemental basé sur l'étude d'impact environnemental préparée conformément aux exigences réglementaires
   b. Permis de construire
   c. Permis de construire
   d. Approbation du raccordement au réseau électrique, le cas échéant
   e. Système de chauffage urbain, le cas échéant
   f. Approbation pour le rejet des eaux usées, le cas échéant.

   Remarque : Si l'étude de faisabilité indique que le projet est viable, la prochaine étape du projet peut être lancée.

4. Contrats et financement

L'étape des contrats et du financement fait passer le projet de l'étude de faisabilité à la décision finale d'investissement (FID) par le maître d'ouvrage. Cela implique de faire avancer le projet sur un certain nombre de fronts, y compris la conception des grandes lignes et la sélection des entrepreneurs.

La sélection des contractants peut se faire de plusieurs manières via les marchés publics, y compris la concurrence entre les soumissionnaires

potentiels qualifiés, ou via un processus de passation de marché basé sur le dialogue avec un ou plusieurs contractants potentiels.

La mise en œuvre du projet

Après l'étape de préparation du projet et si le résultat est viable, il y a l'étape suivante qui est la mise en œuvre du projet. La mise en œuvre du projet sur la base des documents de préparation du projet élaborés initialement. Selon la Banque mondiale (2017), il y a 5 étapes dans la mise en œuvre du projet, telles que :

1. Préparation et examen de la conception détaillée du système
2. Construction
3. Mise en service
4. Phase d'exploitation et de test
5. déclassement

Le développement de projets

Il y a certaines composantes des considérations du projet bioénergétique, car cela affectera le développement du projet. Selon la Banque mondiale (2017), il existe certains obstacles au développement de projets bioénergétiques tels que :

- Un site avec un accès et une taille appropriés est-il disponible à un coût raisonnable ?
- Le maître d'ouvrage a-t-il suffisamment de force pour diriger le projet ?
- Le financement est-il disponible à des conditions raisonnables ?
- Existe-t-il un marché bien défini pour l'exportation d'énergie (électricité et/ou vapeur/chaleur), offrant des prix sûrs à long terme et rendant le projet réalisable ?
- Un raccordement au réseau est-il disponible à courte distance et le raccordement est-il possible à des conditions raisonnables ? (Ceci n'est pas pertinent si le projet est développé uniquement pour l'auto-approvisionnement en électricité et/ou en chaleur/vapeur.)
- La législation nationale (et toute législation régionale ou internationale) est-elle favorable à ce type de projet, et peut-on s'attendre à une approbation environnementale ?

Il faut répondre à ces questions avant de passer à la mise en œuvre du développement du projet. En dehors de cela, il existe d'autres points et considérations dans le développement du projet comme suit :

1. Identification du site

Le site est un point important à placer pour être considéré dans le système et toutes les opérations de manière plus durable - environnementale, financière et sociale. Certaines questions peuvent aider à identifier le site approprié, telles que :

- Quel est le coût des sites adaptés et disponibles ?
- Existe-t-il des restrictions à leur utilisation ?
- Le site potentiel est-il assez grand pour l'usine de biomasse et pour la zone de stockage de biomasse nécessaire ?

- Comment est l'infrastructure de la région? Par exemple, raccordement au réseau (le cas échéant), raccordement aux clients chaleur/vapeur (le cas échéant), accès routier/ferroviaire (le cas échéant), alimentation électrique, raccordement à l'égout, approvisionnement en eau brute, etc.
- Quelle est la distance de la ressource biomasse ?
- Y a-t-il suffisamment d'espace de stockage disponible pour faire face aux interruptions de l'approvisionnement externe en carburant (saison des pluies, routes bloquées, etc.) ?

2. Approvisionnement et ressources en biomasse

Dans le développement du projet, il est important de connaître l'approvisionnement et les ressources en biomasse pour une projection à long terme. Cela aidera à projeter la production dans des modes de production durables. Certaines questions peuvent être utilisées par le maître d'ouvrage pour évaluer la faisabilité du projet :

- Y a-t-il suffisamment de biomasse disponible, et de qui/où ?
- La saisonnalité ou la saison des pluies est-elle un obstacle ?
- Comment la biomasse est-elle stockée jusqu'à la livraison à l'usine (chez le fournisseur de biomasse) ?
- Qui livre la biomasse et quelle est la structure contractuelle?
- Comment la qualité de la biomasse est-elle vérifiée ?
- Quel est le prix et le mécanisme de paiement (poids, taux d'humidité) ?

3. Considérations techniques

Outre l'approvisionnement et les ressources en biomasse, la technologie utilisée doit être considérée avant de prendre toute décision à son égard. Après avoir répondu aux questions liées à l'approvisionnement et aux ressources en biomasse, le maître d'ouvrage peut faire des réflexions sur la technicité. Certaines questions aideront les considérations techniques, telles que :

- Les déchets de biomasse sont-ils appropriés comme combustible pour la production d'énergie ?
- Le comportement de corrosion potentiel du carburant est-il acceptable pour les fournisseurs de technologie ?
- Si des combustibles de biomasse supplémentaires sont nécessaires, la centrale de biomasse peut-elle fonctionner sans limitation sur les combustibles provenant à la fois sur site et hors site ? (La manipulation du combustible, la chaudière à vapeur et le nettoyage des gaz de combustion sont des points importants à prendre en compte.)
- Est-il techniquement et économiquement faisable de convertir les déchets de biomasse en électricité/chaleur ?
- Y a-t-il suffisamment de biocarburant disponible et, si ce n'est pas le cas, des sources de carburant supplémentaires sont-elles disponibles, et à quel prix et à quelles conditions ?
- Une connexion au réseau est-elle possible à la bonne tension (si l'exportation de puissance est pertinente) ?

- Un raccordement pour la fourniture de vapeur et/ou de chaleur aux industries voisines ou aux réseaux de chauffage urbain est-il accessible (si exportation de chaleur et/ou de vapeur) ?
- Qui paiera la ligne de transport jusqu'au point de raccordement au réseau et le raccordement chaleur/vapeur ?
- Comment la biomasse est-elle manipulée et stockée sur le site ?
- Comment l'approvisionnement en énergie de secours est-il sécurisé (en cas de panne de l'installation, de manque d'approvisionnement en biomasse, etc.) ?

4. Exploitation et maintenance du projet

Dans le développement de projet, les considérations sur le fonctionnement et l'entretien de tout sont importantes, car cela aidera à comprendre comment le projet peut fonctionner de manière durable et à long terme. Après avoir répondu aux questions liées au site, à l'approvisionnement en biomasse et à la technicité, il y a d'autres questions à considérer sur le fonctionnement et l'entretien du projet, y compris les ressources humaines et la technologie, telles que :

- La maintenance sera-t-elle effectuée par le personnel de l'usine ou sera-t-elle externalisée ?
- Le personnel possédant les compétences requises est-il disponible localement pour gérer et exploiter la centrale ?
- L'usine aura-t-elle un haut degré d'automatisation, réduisant ainsi le besoin de main-d'œuvre ? (Cela peut nécessiter un personnel plus qualifié.)
- Des voies d'évacuation des cendres sont-elles disponibles ?

5. Législation

L'une des parties les plus importantes du développement d'un projet de production de bioénergie est la législation. Il est important de continuer à s'assurer que le projet est conforme à toutes les réglementations et normes de chaque pays. Il y a quelques questions principales auxquelles on peut répondre pour s'assurer de la faisabilité du projet, telles que :

- La législation nationale (et toute législation régionale ou internationale) est-elle favorable à ce type de projet, et peut-on s'attendre à des autorisations d'urbanisme et environnementales ?
- La législation autorise-t-elle de telles installations ?
- Quelles sont les limites d'émission locales et nationales qui doivent être respectées ? Quel est le coût associé ?

6. Économie et financement du projet

Après avoir répondu à tous les points ci-dessus, l'économie et le financement du projet peuvent être calculés. L'économie et le financement du projet sont importants pour assurer le fonctionnement et la mise en œuvre efficace du projet à long terme. Il

y a quelques questions auxquelles on peut répondre sur le calcul et la planification de l'économie et du financement du projet, telles que :

- Qui sera le propriétaire et l'exploitant du projet?
- Le projet est-il financièrement viable et les risques potentiels sont-ils identifiés et suffisamment atténués ?
- Le projet a-t-il accès à un financement suffisant de sources internes, ou un financement externe d'institutions financières sera-t-il nécessaire pour sa mise en œuvre ?
- Le financement est-il disponible à des conditions et à des coûts acceptables?
- Le projet dépend-il de la vente externe d'énergie ? Si oui, existe-t-il un marché pour la vente d'électricité, de vapeur industrielle ou de chaleur à des clients extérieurs
- Quelles conditions peuvent être obtenues pour le raccordement et la vente d'électricité au réseau, y compris les mécanismes de soutien disponibles pour les énergies renouvelables tels que les tarifs de rachat, les certificats d'énergie propre, etc. ?
- Existe-t-il un tarif pour la vente de chaleur et/ou de vapeur ?
- Le tarif de rachat peut-il être garanti, quelles sont les conditions commerciales et le délai ?
- Les revenus prévus du projet sont-ils suffisants pour générer un retour sur investissement (ROI) proportionnel aux risques du projet ?

References

Asian Development Bank, 2007. People's Republic of China: Preparing the Integrated Renewable Biomass Energy Development Project. https://www.adb.org/sites/default/files/project-document/66115/40682-prc-tar.pdf

Central Europe Programme, 2014. Project Stories from the CENTRAL EUROPE Programme: Energy Efficiency and Renewable Energies. https://www.interreg-central.eu/Content.Node/4-energy-final.pdf

Greenalia., European Investment Bank., 2017. Curtis Biomass Power Generation Plant. https://www.eib.org/en/projects/pipelines/all/20170647

International Energy Agency (IEA), 2007. Bioenergy Project Development & Biomass Supply. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Good-Practice-Guideines-Bioenergy-Project-Development-and-Biomass-Supply.pdf

Kretschmer, Bettina., Bennett, Sophie., IEEP. 2011. Analysing Bioenergy Implementation in EU Member States: Results from the Biomass Futures Expert Survey. https://ieep.eu/uploads/articles/attachments/9e389cf9-cf7e-463c-9a50-ac4b7bc5c127/IEEP_Biomass_Futures_Expert_Survey.pdf?v=63664509756

United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 2021. The Role of Bioenergy in the Clean Energy Transition and Sustainable Development: Lessons from Developing Countries. https://www.unido.org/sites/default/files/files/2021-07/New-Publication-Bioenergy.pdf

World Bank Group, 2017. Converting Biomass to Energy. https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/28305/118738-WP-BioMass-report-06-2017-PUBLIC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

International Renewable Energy Agency (IRENA)., European Commission., 2018. Renewable Energy Prospects for the European Union. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Feb/IRENA_REmap_EU_2018.pdf

Chapitre 6 - Aspects commerciaux de la transformation de la biomasse en énergie

À propos

Ce chapitre fournira des informations sur la réglementation et le cadre de la commercialisation de la biomasse en énergie. Il présentera une meilleure compréhension de la réglementation de l'UE sur les accords d'approvisionnement en biomasse, l'achat d'électricité, l'accord d'approvisionnement en vapeur/chaleur et l'élimination des résidus de l'accord de production de bioénergie

Il y a quelques objectifs dans ce chapitre :

- Comprendre la structure des accords dans l'approvisionnement en biomasse
- Comprendre les différents processus d'accords dans le développement de projets de bioénergie
- Comprendre la réglementation et le cadre de l'UE sur la commercialisation de la biomasse en énergie
- Comprendre comment appliquer la réglementation et le cadre au travail réel

Arrière plan

Les aspects commerciaux de la bioénergie doivent être pris en considération. Ces aspects sont importants dans les projets qui dépendent de l'approvisionnement externe - depuis sa biomasse, sa production, sa vente et son traitement des déchets. Pour s'assurer que le projet est financièrement viable, formaliser les accords avec les fournisseurs et les tiers est une nécessité.

Les accords dans le développement et la mise en œuvre du projet aideront le développeur, le fournisseur et également les tiers à avoir des connaissances concrètes et une analyse financière réaliste pour établir le projet de manière efficace et plus organisée. Dans les aspects de commercialisation de la biomasse à l'énergie, il y a des aspects considérables à avoir, comme suit :

1. Accords d'approvisionnement en biomasse - qui peuvent inclure l'approvisionnement en biomasse sur site et l'approvisionnement externe en biomasse (fournisseurs)
2. Accords financiers et de prêt - qui comprennent des fonds propres pour le projet, des prêts bancaires
3. Approbations des autorités
4. Accords de construction - qui incluent des consultants, un constructeur technique et également une compagnie d'assurance pour couvrir la possibilité de risque
5. Accords de consommation et d'achat - qui incluent la consommation d'énergie interne et la vente externe aux clients.

Accords d'approvisionnement en biomasse

Les accords d'approvisionnement en biomasse sont importants dans la mise en œuvre du projet. Dans le projet de bioénergie, la biomasse joue le rôle principal pour faire avancer le projet. Si l'approvisionnement en biomasse échoue, le projet échouera également et les conséquences sont importantes, notamment sur le plan financier. Selon la Banque mondiale (2017), les facteurs les plus importants à intégrer dans un accord d'approvisionnement en biomasse sont les suivants :

- Quantité de biomasse (tonnes par jour, livrées sur site) et que se passe-t-il si le fournisseur ne fournit pas la biomasse conformément à l'accord
- Qualité de la biomasse (généralement poids et teneur en humidité), comment la qualité est déterminée et que se passe-t-il si les spécifications ne sont pas respectées
- Prix de la biomasse (Euros par tonne) et comment le prix varie avec les paramètres de qualité
- Lieu de livraison (idéalement sur place)
- Critères de rejet et conséquences d'un retard de livraison

Il existe une structure principale dans l'accord d'approvisionnement en biomasse (Banque mondiale, 2017), comme suit :

1. **Explication de la relation entre le fournisseur et l'utilisateur** final pour l'approvisionnement en biomasse à quel site ou projet
2. **Objectif**
   "Le fournisseur s'engage à fournir à l'utilisateur final, et l'utilisateur final s'engage à acheter auprès du fournisseur, de la biomasse selon les spécifications, dans les quantités, pour la période, au prix et selon les termes et conditions énoncés ci-dessous."
3. **Durée du contrat**
   "Ce contrat est d'une durée de [XX MOIS/ANNÉES] et débutera le [DATE] et se terminera le [DATE]."

4. **Quantité**
   « La quantité mensuelle minimale de biomasse fournie au cours du contrat défini sera de [XX] mètres cubes [OU XX TONNES]. En cas d'insuffisance de la biomasse disponible pour le fournisseur, le fournisseur est responsable de [L'APPROVISIONNEMENT AUPRÈS DE TIERS/LE VERSEMENT DE LA COMPENSATION].
5. **Origine et livraison**
   « La biomasse sera dérivée des sources suivantes : [insérer le cas échéant].
   La biomasse sera fournie sous forme de [BAGGED/BALED/LOOSE] et livrée à l'utilisateur final par un véhicule approprié pour être livrée dans le magasin de carburant de l'utilisateur final. »
6. **Qualité et spécifications**
   “Régulation des paramètres de qualité clés tels que, par exemple, la teneur en humidité.
   La teneur en humidité cible sur une base humide doit être de [XX %] en poids sur la base des [normes pertinentes] mais ne doit en aucun cas dépasser [YY %]. Si la biomasse livrée ne répond pas aux spécifications minimales déterminées par échantillonnage, le fournisseur en sera responsable [COMPENSATION]
7. **Poids, échantillonnage et analyse**
   « L'utilisateur final peut à tout moment envoyer des échantillons représentatifs de biomasse pour évaluation, analyse, test et approbation. Tous les échantillons doivent répondre aux spécifications.
8. **Prix**
   "Le prix de la biomasse livrée dans le magasin de carburant de l'utilisateur final sera basé sur le tarif suivant jusqu'au [DATE] [XX] $ par mètre cube de biomasse ; [OU : XX $ PAR TONNE DE BIOMASSE]. Pour la biomasse conforme aux spécifications minimales mais avec une teneur en humidité supérieure à [ZZ %], le prix sera de [PRIX AJUSTÉ]."
9. **Factures, facturation et paiement**
   « Le fournisseur facturera l'utilisateur final sur une base mensuelle. Cela sera basé sur le nombre de chargements enregistrés (en poids ou en volume) et sera évalué le XX jour de chaque mois
10. **Assurance**
    « Le fournisseur aura une assurance responsabilité civile adéquate pour la manutention et le transport des quantités spécifiées de biomasse. La responsabilité d'assurer l'utilisateur final contre les conséquences économiques d'une éventuelle incapacité du fournisseur à respecter les obligations contractuelles incombe à [UTILISATEUR FINAL/FOURNISSEUR]. Indépendamment de cela, le fournisseur devra, en cas de manquement aux obligations du présent contrat, payer à l'utilisateur final une pénalité définie comme [définition de la pénalité en cas de manquement].
11. **Cas de litige**
12. **Résilience**
13. **Force majeure**
14. **Représentation**
15. **Droit applicable et juridiction**

Contrats d'achat d'électricité (PPA)

Lorsque le projet produit plus d'énergie que les besoins énergétiques du maître d'ouvrage, celui-ci peut préparer un PPA. Cet accord peut fonctionner entre le propriétaire du projet - un producteur d'énergie indépendant et l'acheteur d'électricité qui est souvent une compagnie publique d'électricité. Le PPA est un accord à long terme qui utilise des dispositions commerciales pour les prix et les quantités d'énergie au cours de la période donnée. De plus, cet accord fournira au producteur et à l'acheteur une sécurité et une stabilité dans le processus d'achat d'électricité. L'aspect commercialisation aidera à maintenir un flux de revenus stable pour garantir la mise en œuvre du projet à long terme.

Selon la Banque mondiale (2017), il existe des éléments clés du PPA, tels que :

1. Qualité requise de la puissance (fréquence, tension, arrêt programmé)
2. Quantités de capacité et d'énergie vendues (MWh par an)
3. Prix de la production d'électricité (en euros par MWh) et capacité disponible (si le projet est perçu comme une charge de base), le prix peut refléter des tarifs de rachat spéciaux pour les énergies renouvelables et les crédits d'énergie renouvelable
4. Flexibilité pour le producteur de faire des ventes à des tiers (si autorisé par l'acheteur)
5. Indemnisation du producteur en cas de limitation de la production (par l'acheteur ou le gestionnaire du réseau de transport) en raison de contraintes sur le réseau de transport
6. Indemnisation de l'acheteur en cas de retard dans l'achèvement du projet ou de sous-exécution de la livraison (peut inclure des sanctions ou des dommages-intérêts pour les projets perçus comme une charge de base)
7. Durée de l'accord (généralement cinq ans ou plus)
8. Règles de répartition, y compris les restrictions potentielles.

Il existe des structures clés du PPA, comme suit :

1. Objectif
2. Descriptif de l'installation
3. Installations d'interconnexion et comptage
4. Obligation de vendre et d'acheter la production d'énergie
5. Paiement de la production d'énergie
6. Cadre réglementaire de soutien (tarif de rachat, obligations d'achat, etc.)
7. Facturation et paiement
8. Opération et maintenance
9. Défaut et résiliation
10. Administration des contrats et avis
11. Règlement des différends
12. Force majeure
13. Représentations et garanties
14. Assurance et indemnisation
15. Juridiction réglementaire et conformité
16. Affectation et autres restrictions de transfert
17. Information confidentielle
18. Divers

Contrat d'approvisionnement en vapeur/chaleur

Semblable à l'accord d'achat d'électricité, cet accord porte sur l'excédent de vapeur/chaleur (eau chaude) qui peut alimenter une industrie voisine. Cette activité contribue à pérenniser les revenus du projet. Selon la Banque mondiale (2017), le contrat de fourniture de chaleur doit inclure et définir les éléments suivants, tels que :

1. Paramètres vapeur/chaleur (température/pression) et variations maximales
2. Quantités de chaleur vendues (MWh par an)
3. Prix de la chaleur (Euros par MWh)
4. Responsabilité des coûts d'investissement pour l'infrastructure de transfert de chaleur entre le fournisseur de chaleur et l'utilisateur de chaleur
5. Durée de l'accord (années).

Entente sur les résidus biologiques et l'élimination des déchets

Comme le processus de valorisation énergétique de la biomasse génère des résidus et des déchets, l'accord d'élimination est une nécessité. Les déchets peuvent provenir du processus de combustion, de la production de biogaz et d'autres bio-travail dans le projet qui doivent être éliminés. Le résultat de l'élimination peut produire d'autres produits qui sont utiles à des fins de réutilisation, comme l'engrais - même si la qualité est bonne, cela peut être un autre revenu dans le projet.

Il y a quelques éléments clés dans l'accord d'élimination des bio-résidus, comme suit :

1. Quantités de bio-résidus (tonnes par jour)
2. Qualité du bio-résidu (valeur nutritive)
3. Prix (ou coût d'élimination) du bio-résidu (Euros par tonne).

References

Gramatikov, Plamen, 2009. Biomass Energy Utilisation - Ecological and Economic Aspects. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/013/47013696.pdf

International Renewable Energy Agency (IRENA), 2018. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf

Irmak, Sible., IntechOpen, 2019. Challenges of Biomass Utilization for Biofuels. https://www.intechopen.com/chapters/65348

Sobamowo, Gbeminiyi M., Ojolo, Sunday J., 2018. Techno-Economic Analysis of Biomass Energy Utilization through Gasification Technology for Sustainable Energy Production and Economic Development in Nigeria. https://doi.org/10.1155/2018/4860252

Varnagirytė-Kabašinskienė, I., Lukminė, D., Mizaras, S. et al., 2019. Lithuanian forest biomass resources: legal, economic and ecological aspects of their use and potential. https://doi.org/10.1186/s13705-019-0229-9

Working Group for Sustainable Biomass Utilisation Vision in East Asia, 2008. Economic Aspects of Biomass Utilisation, in Sagisaka, M. (ed.),

Scarlat, Nicolae., Dallemand, Jean-Francois., et. al., 2015. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.03.006

S2Biom, 2016. Overview report on the current status of biomass for bioenergy, biofuels and biomaterials in Europe. https://www.s2biom.eu/images/Publications/D8.1_S2Biom_Overview_report_of_current_status_of_biomass_in_Europe.pdf

Sustainable Biomass Utilisation Vision in East Asia, ERIA Research Project Report 2007-6-3, Chiba: IDE-JETRO, pp.38-69. https://www.eria.org/uploads/media/Research-Project-Report/ERIA_RPR_FY2007_6-3_Chapter_3.pdf

World Bank Group, 2017. Converting Biomass to Energy. https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/28305/118738-WP-BioMass-report-06-2017-PUBLIC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Chapitre 7 - Évaluation économique

À propos

Ce chapitre donnera un aperçu de l'analyse des coûts et de l'évaluation de la production de bioénergie. Cette section peut permettre de mieux comprendre comment calculer et évaluer les aspects économiques de la production de bioénergie

Il y a quelques objectifs dans ce chapitre :

- Comprendre les bases de l'évaluation économique de la conversion de la biomasse en énergie
- Capable de calculer les aspects économiques de la production de bioénergie
- Comprendre les points importants dans le calcul économique et l'évaluation de la production de bioénergie

Arrière plan

L'évaluation économique du projet est une nécessité à analyser. L'évaluation consiste en une analyse financière et économique. L'analyse financière doit être effectuée en détail pour que le projet fonctionne de manière efficace et réaliste. L'analyse du projet peut aider à la mise en œuvre du projet à long terme. L'analyse économique aidera le maître d'ouvrage à évaluer les impacts sur la société en calculant les coûts et les bénéfices.

L'analyse financière peut aider le maître d'ouvrage, les investisseurs et également la banque - gestion des prêts à pouvoir voir la faisabilité du projet et sa gestion. Ce sera un élément important pour que le propriétaire, les investisseurs et les autres parties prenantes concernées se sentent en sécurité et réalistes quant au projet et comprennent les coûts et les avantages du projet.

À propos de l'analyse financière dans une entreprise, il existe des éléments qui peuvent aider à développer un scénario dans le projet, tels que :

1. Dernier coût de l'énergie, il peut s'agir d'un autre type d'énergie et de ressources. Cela aidera à comparer l'énergie actuellement disponible et les coûts énergétiques de production du projet.
2. La stabilité de l'approvisionnement énergétique.
3. Analyse du stockage et de l'élimination pouvant inclure les coûts et tout autre risque et problème technique.

Il existe des éléments clés qui différencient l'analyse financière et économique, tels que :

1. Analyse financière
    a. L'évaluation basée sur le point de vue de l'investisseur
    b. Les prix du marché sont importants à prendre en compte
    c. Les taxes, les tarifs, etc. sont importants pour évaluer ce qui peut aider à gérer les coûts et les avantages du projet
    d. Focus sur les intériorités

2. Analyse économique
    a. L'évaluation basée sur la perspective économique de la société
    b. Valeur des taxes, tarifs, subventions, etc. du projet pour la société
    c. Prise en compte des facteurs externes à la fois négatifs et positifs, comme la réduction des émissions de gaz à effet de serre, etc.

Selon la Banque mondiale (2017), il existe des éléments clés pour garantir la viabilité financière du projet de biomasse, tels que :

1. La disponibilité de l'approvisionnement en matières premières de la biomasse est stable et sûre.
2. Marché stable qui peut fournir un accès facile à la distribution de l'électricité ou de la chaleur produite.
3. La disponibilité du volume de biomasse est suffisante pour l'opération et la technologie utilisée dans le projet.
4. Tous les processus tels que la collecte, le stockage et le transport de la biomasse, les processus de prétraitement, le processus de traitement des déchets et des résidus du projet peuvent être bien financés dans le cadre du projet.
5. Des tarifs acceptables et des tarifs abordables en phase de financement.

En ce qui concerne l'analyse économique, il existe certains éléments clés pour maintenir le projet économiquement viable et durable, tels que :

1. Les ressources de biomasse pour la production d'énergie ne causeront pas d'impacts sociaux négatifs, comme la crise alimentaire, la perte de biodiversité, etc.
2. L'approvisionnement en matière première de biomasse provient de sources secondaires ou tertiaires, comme la biomasse résiduelle qui peut être bénéfique pour le climat et l'environnement.

Analyse financière

Comme déjà mentionné ci-dessus, l'analyse financière aidera les maîtres d'ouvrage, les investisseurs et les parties prenantes concernées à évaluer le projet en termes de viabilité financière. Un investisseur sera intéressé à investir dans le projet si le taux de rendement interne est supérieur au coût moyen pondéré du capital. Simplement, l'investissement doit générer un profit.

Certains risques sont associés à la viabilité financière des projets de conversion de la biomasse en énergie, tels que :

1. L'approvisionnement en matière première de biomasse est instable.
2. La qualité de la biomasse est insuffisante par rapport à la technologie utilisée dans le projet.
3. L'accès au marché pour les produits est faible.
4. Méconnaissance des investissements des projets de biomasse et de bioénergie.
5. La limitation de la collecte, du transport et des autres processus techniques des matières premières de la biomasse.

   Selon la Banque mondiale, il existe des références typiques pour les paramètres financiers clés des projets de biomasse, tels que :

1. Taux de rentabilité interne (TRI) du projet : > 10 %
2. Valeur actualisée nette du projet : > 0 %, en fonction des risques liés au projet
3. Période d'amortissement : <10 ans
4. Ratio de couverture du service de la dette : 1,2 à 1,5

–

Remarque : Les estimations mentionnées ci-dessus sont des résultats généralisés et différeront selon les frontières et les conditions spécifiques au projet. Les repères nationaux pour ces critères dépendent souvent du taux d'intérêt sous-jacent de l'économie, du risque pays et du niveau général de développement économique et sont sujets à des changements au fil du temps.

Vous trouverez ci-dessous une approche de l'analyse financière (Banque mondiale, 2017):

Revenus de la production d'énergie) - (CAPEX) - (Coût de financement) - (OPEX) = (Valeur nette)

Pour mieux comprendre l'approche de l'analyse financière, il existe des méthodologies clés utilisées dans une analyse financière appliquée aux projets de conversion de la biomasse en énergie, comme suit :

1. Coût moyen pondéré du capital (WACC)

Le WACC est un calcul du coût du capital dans lequel chaque catégorie de capital est pondérée proportionnellement. Par conséquent, le WACC est le taux d'actualisation approprié pour une évaluation financière. Le taux d'actualisation du projet est très important, car il affecte la valeur actuelle des coûts et avantages futurs.
Le WACC est calculé selon la formule suivante :

WACC = (part des capitaux propres x coût des capitaux propres) + (part de la dette x coût de la dette après impôt)

2. Revenu

Dans la mise en œuvre du projet, des revenus sont nécessaires pour évaluer et réaliser. Les revenus doivent tenir compte de la demande du marché pour les produits fabriqués - ils peuvent inclure les tarifs et leur effet sur les flux de trésorerie. Le montant de la production et les prix sont importants à évaluer pour la viabilité financière du projet.

Dans les revenus de la conversion de la biomasse en énergie, il existe 2 ressources différentes comme suit :

a. Sur réseau, qui comprend :
    - Électricité
    - Chaleur
    - Gaz
    - Les résidus qui peuvent potentiellement être convertis en d'autres produits, comme les engrais
b. Hors réseau, qui comprend :
    - Économies provenant de sources externes, comme le charbon, le gaz naturel et le pétrole
    - Les résidus qui peuvent potentiellement être convertis en d'autres produits, comme les engrais

3. Coût de l'approvisionnement en biomasse

L'approvisionnement en biomasse du projet est crucial à évaluer. Le calcul de l'approvisionnement en biomasse aidera la mise en œuvre du projet sûre et stable. Certains éléments de coût clés sont importants pour calculer l'approvisionnement en biomasse, en particulier si la biomasse provient de différentes sources, telles que :

a. Coût de la collecte
b. Coût du transport
c. Coût du prétraitement
d. Coût de stockage

4. Dépenses en capital (CAPEX)

Dans l'analyse financière du projet de conversion de la biomasse en énergie, le CAPEX est un coût d'investissement total nécessaire pour développer et acquérir l'usine du projet, y compris les biens, les bâtiments, l'équipement, les machines et les autres technologies nécessaires.

Une dépense en capital doit être capitalisée. Cela oblige le propriétaire à répartir le coût de la dépense (le coût fixe) sur la durée de vie utile de l'actif.

5. Durée de vie économique

Selon la Banque mondiale, la durée de vie moyenne d'un plan de conversion de la biomasse en énergie est supposée être de 20 à 30 ans, ce qui correspond également à la durée de l'analyse financière. Il est important d'inclure la valeur résiduelle de la centrale énergétique si une période d'analyse plus courte est sélectionnée.

Analyse économique

Une analyse économique est généralement menée sur la base d'une demande des pouvoirs publics (par exemple, dans le cadre d'une demande de subvention d'investissement), pour fournir des connaissances sur les impacts que le projet aura sur la société. L'importance de ce type d'analyse varie considérablement selon la taille du projet. Une analyse économique estime le bénéfice net du projet en incorporant tous les bénéfices et coûts, y compris les effets externes, qui sont quantifiés et exprimés en termes monétaires.

- Les petits projets de biomasse dans les pays en développement, découplés du réseau national, auront principalement un impact économique local. Les impacts sociaux et environnementaux sont également d'échelle locale.
- Les grands projets de biomasse, connectés aux réseaux énergétiques nationaux, auront un impact économique plus important sur la société dans son ensemble. Plus les quantités de biomasse appliquées dans le projet sont importantes, plus l'impact environnemental et potentiellement social est important.

Voici une approche de l'analyse économique (Banque mondiale, 2017):
Revenus de la production d'énergie) + (Bénéfices externes pour la société) - (Coûts d'investissement et coûts d'exploitation et de maintenance) - (Coûts externes pour la société) = (Bénéfices nets pour la société)

1. Avantages et coûts économiques locaux

Un projet de biomasse peut potentiellement avoir des impacts importants sur l'économie locale, ou il peut fonctionner sans affecter du tout la zone locale. Les effets locaux positifs et négatifs potentiels d'un projet de biomasse sont les suivants :

Avantages:

- Une augmentation possible des revenus des agriculteurs locaux grâce à la demande locale de biomasse
- Une source locale d'énergie stable issue de la centrale biomasse
- La création d'emplois locaux (soit à l'usine, soit dans le secteur agricole)
- Améliorations possibles des infrastructures, telles que la connexion au réseau ou l'amélioration des routes pour le transport de la biomasse.

Frais:

- Effets environnementaux négatifs dus aux émissions de l'usine
- Les effets sociaux doivent être soigneusement pris en compte. Si la biomasse à utiliser pour la production d'énergie est actuellement utilisée par les habitants pour la consommation humaine, la consommation animale ou la génération de revenus, l'élimination de la biomasse peut entraîner des problèmes sociaux.

2. Avantages et coûts économiques publics

Les projets de biomasse peuvent avoir un impact sur la macroéconomie et peuvent offrir plusieurs autres avantages macroéconomiques, tels que:

Avantages:

- Un approvisionnement énergétique stable
- Moins de subventions aux énergies fossiles dans le budget public
- Amélioration des opportunités de production industrielle, et donc de création d'emplois, grâce à la stabilité de l'approvisionnement énergétique
- Augmentation de la sécurité nationale de l'approvisionnement énergétique, rendant le pays moins dépendant de l'importation d'énergie étrangère, Réduction des émissions de gaz à effet de serre, car l'énergie issue des biodéchets implique moins d'émissions par rapport aux autres sources d'énergie fossiles
- Plus d'avantages environnementaux grâce à la réduction de la production d'électricité à base de combustibles fossiles alternatifs
- Réduction des coûts de santé et meilleure qualité globale de l'air due aux externalités de la pollution.

Frais:

- Aucun effet négatif sur l'environnement, sauf si la biomasse primaire est utilisée pour la production d'énergie. Cela compromettrait la durabilité du projet, entraînant une augmentation globale des émissions de gaz à effet de serre.
- Effets économiques négatifs : Dépenses en capital et coûts d'exploitation et de maintenance, risque potentiel posé par l'exposition des devises étrangères à la volatilité des taux de change

References

Deloitte, 2022. Towards an Integrated Energy System: Assessing Bioenergy's Socio-Economic and Environmental Impact. https://bioenergyeurope.org/article/347-towards-an-integrated-energy-system-assessing-bioenergy-s-socio-economic-and-environmental-impact.html

Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L. J., Yakovleva, N., Camacho-Ferre, F., 2020. Analysis of the Circular Economic Production Models and Their Approach in Agriculture and Agricultural Waste Biomass Management. https://doi.org/10.3390/ijerph17249549

IEA Bioenergy, 2018. Bioeconomy and biorefining strategies in the EU Member States and beyond. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/12/Bioeconomy-and-Biorefining-Strategies_Final-Report_DEC2018.pdf

Lange, L., Connor, K. O., Arason, S., Bundgård-Jørgensen, U., Canalis, A., Carrez, D., Gallagher, J., Gøtke, N., Huyghe, C., Jarry, B., Llorente, P., Marinova, M., Martins, LO., Mengal, P., Paiano, P., Panoutsou, C., Rodrigues, L., Stengel, D. B., van der Meer, Y., and Vieira, H., 2021. Developing a Sustainable and Circular Bio-Based Economy in EU: By Partnering Across Sectors, Upscaling and Using New Knowledge Faster, and For the Benefit of Climate, Environment & Biodiversity, and People & Business. https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.619066

Stegmann, Paul., Londo, Marc., and Junginger, Martin., 2020. The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100029

Vanhamaki, Susanna., et. al., 2019. Bio-based Circular Economy in European National and Regional Strategies. https://projects2014-2020.interregeurope.eu/fileadmin/user_upload/tx_tevprojects/library/file_1554360917.pdf

World Bank Group, 2017. Converting Biomass to Energy. https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/28305/118738-WP-BioMass-report-06-2017-PUBLIC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Chapitre 8 - Évaluation environnementale et sociale

À propos

Ce chapitre donnera l'introduction et fournira un aperçu de la méthodologie de dépistage et d'évaluation des risques et des impacts environnementaux et sociaux (E&S) des processus de transformation de la biomasse en énergie.

Il y a quelques objectifs dans ce chapitre :

- Comprendre les risques et les impacts environnementaux et sociaux de la production de bioénergie
- Comprendre comment évaluer les impacts environnementaux et sociaux de la production d'énergie

Arrière plan

Des problèmes environnementaux et sociaux pourraient découler de projets et d'usines de production d'énergie de la biomasse. Les évaluations environnementales et sociales sont importantes pour être développées dans le développement du projet.

La biomasse peut fournir une énergie alternative qui peut remplacer les combustibles fossiles en ce qui concerne les avantages des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, l'utilisation de la biomasse pour l'énergie peut avoir un impact sur l'environnement social et local, comme la qualité de l'air, la biodiversité, la consommation d'eau et aussi l'utilisation des terres au niveau local. En outre, d'un point de vue social, cela peut avoir un impact sur les moyens de subsistance locaux, la sécurité alimentaire, l'emploi et aussi la pauvreté.

Selon la Banque mondiale (2017), il existe quelques exemples d'impacts environnementaux et sociaux des projets de biomasse, comme suit :

1. Impacts environnementaux, tels que :

- Qualité de l'air : Les émissions provenant de la combustion de bio-résidus peuvent entraîner une pollution de l'air.
- Nutriments : l'élimination des résidus de l'écosystème agricole peut entraîner l'épuisement des nutriments dans le sol si les cendres ne sont pas restituées au sol.
- Biodiversité : si la demande de résidus dépasse l'offre, de nouvelles zones agricoles peuvent être créées à partir de la conversion, par exemple, de zones humides, de terres arbustives ou de forêts, ce qui peut avoir un impact négatif sur la biodiversité.
- Eau : La qualité et la quantité de l'eau peuvent être affectées, par exemple par le rejet d'eaux usées ou l'utilisation accrue des eaux souterraines pour la production de biomasse.
- Terre : Si seules des ressources secondaires sont utilisées, les impacts locaux sur la terre sont probablement faibles. Cependant, si d'autres utilisateurs utilisent déjà les matières premières, des conséquences environnementales pourraient survenir si ces utilisateurs recherchent d'autres matières premières.

2. Impacts sociaux, tels que :
    - Emploi : L'usine de bioénergie peut générer des emplois dans la région.
    - Économie : L'usine peut profiter à l'économie locale.
    - Sécurité alimentaire : selon les utilisations existantes des matières premières, des problèmes potentiels de sécurité alimentaire peuvent survenir si des cultures vivrières ou fourragères sont utilisées pour la production d'énergie.

Plusieurs politiques et outils peuvent être utilisés pour évaluer les impacts environnementaux et sociaux, comme suit :

Normes de performance de l'IFC : les normes de performance environnementale et sociale et les notes d'orientation définissent les responsabilités des clients de l'IFC en matière de gestion de leurs risques environnementaux et sociaux.
Disponible sur: http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/Topics_Ext_Content/IFC_External_Corporate_Site/IFC+Sustainability/Our+Approach/Risk+Management/Performance+Standards/

- Principes de l'Équateur : Un cadre de gestion des risques, actuellement adopté par 83 institutions financières dans 36 pays, couvrant 70 % de la dette internationale de financement de projets dans les marchés émergents. Les principes sont utilisés pour déterminer, évaluer et gérer les risques environnementaux et sociaux dans les projets, principalement destinés à fournir une norme minimale de diligence raisonnable pour soutenir la prise de décision responsable.
  Disponible sur: http://www.equator-principles.com
- Outil d'aide à la décision en matière de bioénergie : Planification stratégique et évaluation des risques dans les choix d'investissement, développé par ONU-Énergie, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et le Programme des Nations Unies pour l'environnement.
  Disponible sur: http://www.bioenergydecisiontool.org
- RASLRES Bioenergy Tool, développé par le Fonds européen de développement régional de l'UE.

Disponible sur: http://www.raslres.eu
Remarque : cet outil est développé pour la région nordique et est principalement applicable dans des contextes similaires.

Évaluation environnementale

Les principaux sujets des évaluations d'impact environnemental dans le cadre du projet de conversion de la biomasse en énergie sont l'eau, la biodiversité, le sol et la terre, et l'air.

1. Eau

L'utilisation non durable de l'eau étant une menace pour l'environnement et le développement humain, l'utilisation de l'eau pour les projets de bioénergie doit être durable et ne doit pas compromettre la qualité et la quantité de l'eau.

Selon la Banque mondiale, il existe des questions clés pour évaluer l'utilisation de l'eau dans le projet de conversion de la biomasse en énergie, telles que :

- L'utilisation de l'eau pour la production de biomasse ou la conversion des matières premières affectera-t-elle la disponibilité de l'eau ou la sécurité de l'approvisionnement dans le bassin versant ?
    - Si une irrigation supplémentaire ou nouvelle est nécessaire pour produire la culture bioénergétique, un bilan hydrique local doit quantifier l'impact du projet sur les ressources en eau locales.
    - Si les producteurs de biomasse ou de matières premières connectés aux réseaux locaux de distribution d'eau prévoient d'augmenter leur consommation d'eau, l'impact sur la sécurité de l'approvisionnement en eau peut être important et doit être évalué.

- L'utilisation de l'eau pour la production de biomasse ou la conversion de matières premières affectera-t-elle la qualité de l'eau ?
    - Considérez, par exemple, si la production de la culture entraîne des changements dans la gestion des terres, le défrichement des terres ou l'abattage des arbres. Si tel est le cas, il peut y avoir un risque de perte de la couche arable par érosion, ce qui pourrait finir par avoir un impact sur les ruisseaux et les rivières.
    - L'utilisation d'engrais ou de pesticides supplémentaires ou nouveaux peut avoir des répercussions sur la qualité de l'eau. Considérez à la fois les ressources en eau souterraine et en eau de surface.
    - Si le producteur de biomasse ou de matières premières utilise des ressources en eau supplémentaires ou nouvelles en raison du projet, la capacité et la qualité des systèmes locaux de traitement de l'eau doivent être évaluées et prises en compte dans la conception.

- L'utilisation de l'eau pour la production de biomasse ou la conversion des matières premières modifiera-t-elle les débits d'eau et la disponibilité de l'eau pour les utilisateurs en aval ?

- L'utilisation de l'eau pour la production de biomasse ou la conversion des matières premières modifiera-t-elle les débits d'eau et la disponibilité de l'eau pour les utilisateurs en aval ?

Remarque : Si la réponse à l'une des questions ci-dessus est « oui », un ou plusieurs sujets de préoccupation nécessiteront une enquête et une évaluation plus approfondies.

2. Biodiversité

Le développement de la bioénergie peut avoir des impacts négatifs sur la biodiversité en provoquant la perte d'habitats, la fragmentation des zones et la perte d'espèces. La biodiversité a non seulement une valeur en tant que fournisseur de services à l'humanité (par exemple, de la nourriture, des médicaments), mais elle a aussi une valeur en soi. De plus, les habitats diversifiés, connectés et fonctionnels sont les plus résistants aux menaces externes telles que le changement climatique ou la pollution. Il est important d'évaluer, de prévenir et de minimiser les impacts des projets sur les écosystèmes et la biodiversité.

Selon la Banque mondiale, il existe des questions clés pour évaluer la biodiversité dans le projet de conversion de la biomasse en énergie, telles que :

- Le projet de biomasse affectera-t-il des espèces rares ou menacées ?

  - Le risque pour toute espèce rare ou menacée doit être évalué. Ceci est particulièrement critique si les habitats naturels (forêts, zones humides, etc.) sont modifiés ou si la production est intensifiée sur les zones actuellement cultivées. Au niveau mondial, les espèces rares ou menacées sont inscrites sur la Liste rouge des espèces menacées de l'UICN, accessible à l'adresse: http://www.iucnredlist.org.

  L'examen des listes régionales d'espèces menacées devrait également être inclus dans l'évaluation.

- Le projet de biomasse affectera-t-il les écosystèmes ou les habitats menacés, par exemple par la dégradation, la conversion, la perte ou la fragmentation ?
  - Si des terres sont défrichées pour être cultivées, il existe un risque que des écosystèmes ou des habitats soient perdus ou fragmentés, ce qui peut avoir des effets néfastes sur les espèces de ces régions.
  - L'intensification de la production, la perte de nutriments ou une pollution excessive peuvent conduire à la dégradation des habitats naturels entourant la zone du projet.

- Le projet de biomasse entraînera-t-il l'introduction d'espèces non indigènes et/ou envahissantes ?
  - Le risque d'espèces envahissantes doit être pris en compte dans les situations où une flore non indigène (comme une nouvelle culture énergétique) est introduite dans la région.

- Le projet de biomasse affectera-t-il ou modifiera-t-il les services écosystémiques dans la région ?
    - Les services écosystémiques comprennent une multitude de services différents, et les modifications des paysages naturels mettent généralement un ou plusieurs d'entre eux en danger. Il est donc nécessaire d'évaluer l'impact sur les écosystèmes
    - Il convient de veiller à ce que les services écosystémiques qui fournissent des services vitaux à la région ne soient pas mis en danger (par exemple, la protection contre les inondations ou la purification de l'eau effectuée par les forêts de mangrove).
    - Les services écosystémiques ne font souvent pas partie de l'économie formelle (c'est-à-dire que la valeur fournie par ces services n'est pas évaluée en termes économiques), mais ils remplissent des fonctions importantes pour la région locale et les communautés concernées. Il convient donc de veiller à garantir une consultation et une participation libres, préalables et éclairées des communautés concernées.

Remarque : Si la réponse à l'une des questions ci-dessus est « oui », un ou plusieurs sujets de préoccupation nécessiteront une collecte et une évaluation plus poussées des données.

3. Sol et terre

La terre est une ressource rare, son utilisation devient importante pour des raisons sociales, environnementales et économiques. L'utilisation durable des zones productives est importante pour la production alimentaire et pour la fourniture d'une gamme de services écosystémiques, tels que la purification de l'eau, le stockage du carbone, la protection contre l'érosion et comme habitat pour les plantes et les animaux.

Selon la Banque mondiale, il existe des questions clés pour évaluer les sols et les terres dans le projet de conversion de la biomasse en énergie, telles que :

- Le projet de biomasse conduira-t-il à la conversion des utilisations des terres, par exemple, la conversion de zones humides et/ou de forêts en terres agricoles, pour répondre à la demande de matière première bioénergétique sélectionnée pour le projet ?
    - Si le projet implique un appel à des fournisseurs locaux, les propriétaires fonciers peuvent être incités à changer d'utilisation des terres, par exemple en défrichant des terres arbustives ou des forêts pour faire place à une plantation ou à d'autres terres productives. Dans de tels cas, il pourrait y avoir un risque de perte de biodiversité et de carbone.
    - L'approvisionnement en biomasse primaire ou secondaire ou en matières premières peut entraîner un risque de conversion des terres. Pour les systèmes basés sur les déchets, ce risque devrait être minime

- Les changements prévus dans la gestion des terres, l'utilisation des terres ou l'intensification de l'utilisation des terres pour produire de la biomasse ou des matières premières pour le projet affecteront-ils les zones ou les propriétaires fonciers voisins ou plus éloignés (par exemple, si la production actuelle se déplace vers d'autres terres) ?
    - Si le projet entraîne une augmentation de la demande d'une biomasse primaire ou secondaire dans la région hôte, les propriétaires fonciers peuvent délaisser les cultures vivrières ou fourragères, ce qui entraîne une diminution de l'offre de celles-ci. Cela peut conduire à la conversion de nouvelles terres ailleurs pour compléter la production perdue. Dans de tels cas, il convient d'être prudent et les impacts sur l'offre et la demande dans la région doivent faire l'objet d'une analyse plus approfondie.

- La production de biomasse affectera-t-elle la qualité des sols ou conduira-t-elle à la dégradation des sols et des terres ?
    - Considérez si la fourniture de biomasse pour le projet implique des changements dans la gestion des terres, par exemple, une augmentation du travail du sol ou l'utilisation de machinerie lourde. Cela peut avoir un impact sur le sol, entraînant éventuellement une dégradation.
    - Lorsque des ressources de biomasse secondaire sont utilisées, la dégradation du sol et la perte de nutriments peuvent se produire si les cendres et autres résidus ne sont pas restitués au sol.
    - Si le projet est lié à la production de bétail ou d'autres animaux de pâturage, une demande supplémentaire peut amener les agriculteurs à augmenter le nombre d'animaux. Ceci, à son tour, peut conduire à un surpâturage qui, dans certaines régions, peut provoquer une érosion et, dans d'autres, peut déclencher des processus de désertification.

- Des engrais artificiels ou des pesticides sont-ils nécessaires pour cultiver la matière première en quantité et qualité suffisantes ?
    - L'utilisation d'engrais ou de pesticides peut avoir un impact négatif sur la qualité des sols et de l'eau, la productivité des sols et la biodiversité des sols.

Remarque : Si la réponse à l'une des questions ci-dessus est « oui », un ou plusieurs sujets de préoccupation nécessiteront une collecte et une évaluation plus poussées des données.

4. Air

L'air pur est important pour les humains, les animaux et l'environnement, et la pollution de l'air est nocive pour la santé et la production alimentaire, entre autres. Les soins doivent donc
être prises pour éviter la pollution de l'air due à la production ou à la conversion de matières premières pour la production de bioénergie. La pollution de l'air peut être

biologique (pollen, champignons), physique (odeur, thermique, radiative) et chimique (ozone, oxydes d'azote, oxydes de soufre) et pourrait résulter des émissions des plantes et des changements de pratiques de gestion (comme l'intensification) sur les terres agricoles ou dans les forêts.

Selon la Banque mondiale, il existe des questions clés pour évaluer l'air dans le projet de conversion de la biomasse en énergie, telles que :

- La production, la conversion ou le transport de la matière première entraîneront-ils des émissions de polluants atmosphériques, tels que des oxydes d'azote, des particules, des oxydes de soufre, de l'ozone, des aérosols, de la suie ou des composés organiques volatils ?
    - L'utilisation de machines lourdes ou de certains types de camions pour le transport de la biomasse ou des matières premières (ou d'autres intrants nécessaires) peut entraîner des émissions de polluants.
    - Le brûlage de résidus de champs ou de déchets sur le site de production de biomasse peut entraîner des émissions de polluants.

- La production, la conversion ou le transport de la matière première entraînera-t-il des émissions d'odeurs et des émissions odorantes, de chaleur thermique ou de rayonnement ?
    - Si la matière première pour le projet est du fumier, de la litière de poulet ou des déchets provenant du traitement de l'industrie alimentaire, le stockage et le transport de la matière première peuvent entraîner des nuisances ou de la pollution s'ils ne sont pas bien manipulés.

- La production, la conversion ou le transport de la matière première entraînera-t-il l'émission de polluants atmosphériques biologiques, tels que le pollen, les champignons ou les bactéries ?
    - Si la matière première est un déchet biologique ou si les restes digérés de la production de biogaz sont utilisés dans les champs comme engrais, il peut y avoir un risque de propagation de bactéries et de polluants.
    - Si la matière première est un déchet biologique, le transport, le traitement et le stockage doivent être organisés de manière à minimiser le risque de propagation des bactéries.
    - Certains systèmes agricoles, principalement où le bétail est impliqué, peuvent propager des spores, qui, dans de rares cas, peuvent entraîner des risques pour la santé si les concentrations sont élevées.

Remarque : Si la réponse à l'une des questions ci-dessus est « oui », un ou plusieurs sujets de préoccupation nécessiteront une collecte et une évaluation plus poussées des données.

Évaluation socio-économique

Outre les enjeux environnementaux, le développement d'un projet de biomasse peut entraîner des risques et des impacts sociaux, notamment sur les communautés locales affectées par le projet. Cela peut inclure des impacts sur les moyens de subsistance, le patrimoine culturel, l'accès ou la propriété des terres et l'accès aux ressources naturelles. En résumé, les questions à examiner incluent (Banque mondiale, 2017) :

- La sécurité alimentaire
- Acquisition de terres, titres de propriété et tenure
- Accès aux actifs et aux ressources naturelles
- Santé et sécurité communautaires
- Sécurité énergétique et accès
- Genre et groupes vulnérables
- Questions relatives au travail, droits du travail, emploi, salaires et revenus.

Le porteur de projet devra systématiquement dépister les enjeux socio-économiques liés au type de biomasse concernée (primaire, secondaire, tertiaire), les impacts socio-économiques pouvant varier selon le type de matière première.

Un engagement adéquat avec les communautés affectées tout au long du cycle du projet sur les questions qui pourraient potentiellement les affecter et pour s'assurer que les informations environnementales et sociales pertinentes sont divulguées et diffusées doit être activement recherché et mis en œuvre par le promoteur du projet. En plus des communautés affectées, une liste préliminaire d'autres parties prenantes potentielles comprend :

- Autorités centrales et ministères
- Représentants des régions, des gouvernements locaux et des organismes de réglementation
- Organisations non gouvernementales, y compris les organisations de conservation
- Organisations syndicales, organisations commerciales, groupes d'agriculteurs et organisations communautaires
- Secteur privé, agences de recherche, universités et cabinets de conseil
- Institutions financières, petits prestataires de services financiers et compagnies d'assurance
- Organisations religieuses et culturelles.

References

Ahmed, I., Zia, M.A., Afzal, H., Ahmed, S., Ahmad, M., Akram, Z., Sher, F., and Iqbal, H.M.N., 2021. Socio-Economic and Environmental Impacts of Biomass Valorisation: A Strategic Drive for Sustainable Bioeconomy. https://doi.org/10.3390/su13084200

Deloitte, 2022. Towards an Integrated Energy System: Assessing Bioenergy's Socio-Economic and Environmental Impact. https://bioenergyeurope.org/article/347-towards-an-integrated-energy-system-assessing-bioenergy-s-socio-economic-and-environmental-impact.html

FAO, UNEP, 2010. A Decision Support Tool for Sustainable Bioenergy. https://www.fao.org/3/am237e/am237e.pdf

Martín-Gamboa, M., Quinteiro, P., Dias, A.C., Iribarren, D., 2021. Comparative Social Life Cycle Assessment of Two Biomass-to-Electricity Systems. https://doi.org/10.3390/ijerph18094918

Song, Junnian., Li, Kexin., and Yang, Wei., 2021. Integrated economic–environmental–social assessment of straw for bioenergy production. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820539-6.00013-3

World Bank Group, 2017. Converting Biomass to Energy. https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/28305/118738-WP-BioMass-report-06-2017-PUBLIC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Zhang, Yueling., Li, Junjie., Liu, Huan., Zhao, Guangling., Tian, Yaju., and Xie, Kechang., 2021. Environmental, social, and economic assessment of energy utilization of crop residue in China. https://link.springer.com/article/10.1007/s11708-020-0696-x

Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

Ce projet (numéro de projet : 2020-1-UK01-KA202-079054) a été financé avec le soutien de la Commission européenne. Cette publication n'engage que l'auteur et la Commission ne peut être tenue responsable de l'utilisation qui pourrait en être faite. des informations qui y sont contenues.