Bioénergies : gouvernance, approvisionnement et viabilité

Description de la formation

Cette formation propose une vision intégrée des principales technologies de valorisation de la biomasse lignocellulosique, depuis la mobilisation et le conditionnement des ressources jusqu'à leur transformation en produits énergétiques et chimiques à valeur ajoutée. Destinée aux professionnels, elle aborde les différentes voies de conversion biologique et thermochimique, les technologies de production de chaleur et d'électricité ainsi que les stratégies de post-traitement et de valorisation des intermédiaires et coproduits.

En s'appuyant sur des exemples concrets et des applications industrielles, la formation met l'accent sur les principes de fonctionnement des procédés, les opérations unitaires, les performances technologiques et les contraintes associées à leur déploiement. Une attention particulière est accordée à la complémentarité des technologies et aux critères permettant de sélectionner les chaînes de valorisation les mieux adaptées aux caractéristiques des gisements disponibles.

L'objectif ultime est de fournir aux participants les connaissances et les outils nécessaires pour identifier, comparer et évaluer différentes opportunités de valorisation de la biomasse lignocellulosique, en intégrant les considérations techniques, énergétiques et technico-économiques essentielles à la prise de décision et au développement de projets industriels.

Objectifs de la formation

Objectif général

Cette formation vise à permettre aux participants d'analyser, de concevoir et d'évaluer des chaînes de valorisation de la biomasse lignocellulosique, depuis l'identification et la caractérisation des ressources disponibles jusqu'à leur transformation en produits à valeur ajoutée. Elle permettra de développer une approche intégrée de sélection des technologies, fondée sur les caractéristiques des gisements, les performances des procédés et la viabilité technico-économique des projets.

Objectifs spécifiques

À l'issue de cette formation, les participants seront en mesure de :

1. Évaluer le potentiel des ressources disponibles en identifiant, caractérisant et quantifiant les gisements de biomasse lignocellulosique d'un site ou d'un territoire donné.

2. Déterminer les prétraitements appropriés en fonction des propriétés physicochimiques de la biomasse et des exigences des technologies de conversion envisagées.

3. Analyser et sélectionner les technologies de conversion les mieux adaptées aux ressources disponibles, aux produits recherchés et aux contraintes techniques et opérationnelles.

4. Identifier les stratégies de post-traitement optimales permettant d'assurer la qualité, la conformité et la valorisation des produits issus des procédés de conversion.

5. Réaliser une analyse technico-économique préliminaire afin d'estimer les investissements, les coûts d'exploitation et le potentiel de rentabilité des différentes filières de valorisation.

6. Comparer et optimiser différents scénarios de valorisation en intégrant les considérations techniques, économiques et environnementales afin d'orienter les décisions de développement et d'investissement.

Finalité de la formation

Au terme du cours, les participants auront acquis une vision globale et opérationnelle des filières de valorisation de la biomasse lignocellulosique, leur permettant de formuler des recommandations technologiques éclairées et d'évaluer le potentiel de développement de projets industriels adaptés aux réalités du terrain.

Compétences visées / Cibles précises

À l'issue de cette formation, les participants seront en mesure de concevoir et d'évaluer une chaîne de valorisation optimale de la biomasse lignocellulosique, en tenant compte des caractéristiques des ressources disponibles, des technologies de transformation et des réalités technico-économiques propres à chaque projet.

Plus spécifiquement, cette formation permettra aux participants de développer les compétences nécessaires pour :

- Caractériser et quantifier les gisements de biomasse lignocellulosique disponibles sur un territoire ou un site donné, en évaluant leur potentiel de valorisation, leurs propriétés et les contraintes associées à leur mobilisation.
- Sélectionner les stratégies de prétraitement les mieux adaptées aux caractéristiques des biomasses disponibles et aux exigences des procédés de conversion envisagés.
- Identifier et comparer les technologies de conversion les plus pertinentes, en fonction de la nature des ressources, des produits recherchés et des performances techniques attendues.
- Déterminer les options de post-traitement et de conditionnement optimales, afin de maximiser la qualité et la valeur des produits obtenus tout en considérant les contraintes opérationnelles.

- Réaliser une évaluation technico-économique préliminaire permettant d'estimer la faisabilité d'un projet, de comparer différents scénarios technologiques et d'identifier les principaux facteurs influençant sa rentabilité.

L'ambition de cette formation est de permettre aux professionnels de passer de la connaissance des technologies à la prise de décision éclairée, en développant une vision intégrée de la chaîne de valorisation, depuis la ressource brute jusqu'au produit final.

Les participants disposeront ainsi des outils nécessaires pour transformer un gisement de biomasse en une véritable opportunité de développement industriel, en conciliant performance technologique, viabilité économique et utilisation optimale des ressources.

Contenus de la formation

Introduction – Positionnement des biocombustibles dans le paysage énergétique renouvelable (1 h)

Survol des principales sources d'énergie renouvelable (hydroélectricité, solaire photovoltaïque, éolien et géothermie) afin de situer le rôle et le potentiel des biocombustibles dans la transition énergétique. Présentation comparative de leurs caractéristiques, avantages, limites et complémentarités, notamment en matière de disponibilité des ressources, de stockage, de flexibilité énergétique et d'applications industrielles.

Caractérisation de la biomasse et des produits issus de sa conversion (2 h)

Présentation des propriétés qui déterminent l'aptitude d'une biomasse à être valorisée énergétiquement et les méthodes normalisées permettant de les mesurer. Le chapitre abordera les caractéristiques de base telles que la teneur en humidité, en cendres, en matières volatiles. La composition chimique sera également examinée, tant sur le plan organique (analyse élémentaire) qu'inorganique (alcalins et alcalino-terreux, chlore, soufre et métaux lourds). Une attention particulière sera accordée à l'impact de ces éléments sur la corrosion, les émissions, la formation de mâchefers et l'encrassement des systèmes de combustion. Le chapitre traitera également du contenu énergétique de l'intrant, et de l'effet de l'humidité sur l'énergie réellement récupérable. La masse volumique apparente et la densité énergétique seront présentées pour en illustrer l'influence sur le stockage, la manutention et les coûts de transport, ce qui permettra de justifier le recours à la densification (granulation, torréfaction, pyrolyse). Enfin, la caractérisation des produits issus de la conversion sera abordée : granules, coproduits de pyrolyse, etc.

L'objectif de ce chapitre est de permettre aux participants de caractériser une biomasse et ses produits de conversion, d'interpréter les résultats d'analyse et de les relier aux exigences des

technologies de prétraitement et de conversion, ainsi qu'aux critères de qualité des combustibles commercialisés.

Prétraitements et conditionnement de la biomasse lignocellulosique (2 h)

Présentation des principales opérations unitaires et stratégies de prétraitement visant à préparer et à adapter la biomasse lignocellulosique aux exigences des procédés de conversion biologique et thermochimique en aval. Le chapitre abordera l'ensemble des étapes de préparation de la ressource, depuis sa récupération et sa mobilisation en milieu forestier jusqu'à son conditionnement, notamment par le séchage, le broyage, le tamisage, la réduction granulométrique et la densification. Un survol des approches de prétraitement mécaniques, thermiques, chimiques et physicochimiques permettra également de comprendre leurs effets sur les propriétés de la biomasse et leur influence sur les performances des procédés de conversion. Une attention particulière sera accordée aux critères de sélection et à l'intégration de ces différentes opérations, en fonction des caractéristiques des gisements, des technologies envisagées et des considérations technico-économiques.

Conversion biologique de la biomasse lignocellulosique (3 h)

Présentation approfondie des principales technologies de conversion biologique de la biomasse, en mettant l'accent sur leurs principes fondamentaux, leurs conditions opératoires, leurs performances et leurs applications industrielles. Le chapitre abordera les mécanismes biochimiques impliqués dans la transformation de la matière organique, les principales voies métaboliques exploitées ainsi que l'influence des caractéristiques des matières premières et des paramètres de procédé sur les rendements et la qualité des produits obtenus.

La production de bioéthanol de première génération à partir de grains servira de référence pour présenter les principales opérations unitaires associées aux procédés de fermentation industrielle, notamment la préparation des matières premières, l'hydrolyse enzymatique, la fermentation, la séparation et la purification des produits. Cette approche permettra ensuite d'introduire les technologies de production de bioéthanol de deuxième génération à partir de biomasse lignocellulosique, en abordant les défis particuliers liés à la déconstruction de la matrice végétale, à la libération des sucres fermentescibles, à la gestion des inhibiteurs de fermentation et à l'optimisation des performances des microorganismes. Les différentes configurations technologiques, notamment les procédés d'hydrolyse et de fermentation séparées ou simultanées, seront également examinées.

Une attention particulière sera accordée au concept de bioraffinerie lignocellulosique, qui vise à maximiser la valorisation de l'ensemble des constituants de la biomasse plutôt que de se limiter à la conversion de sa fraction cellulosique. Les possibilités de valorisation des hémicelluloses, de la lignine et des composés extractibles seront explorées, notamment pour la production de molécules plateformes, de produits chimiques biosourcés, de matériaux et de

bioproduits à valeur ajoutée. Les principales stratégies de fractionnement, de récupération et de purification de ces composés seront présentées, de même que les défis associés à leur intégration dans des chaînes de transformation industrielles.

Le chapitre abordera également les technologies de conversion biologique par digestion anaérobie, permettant la production de biogaz et de biométhane à partir de différentes matières organiques. Les principales étapes microbiologiques du processus, soit l'hydrolyse, l'acidogenèse, l'acétogenèse et la méthanogenèse, seront expliquées afin de comprendre les mécanismes régissant la transformation de la matière organique en méthane. Les différentes configurations de digesteurs, les stratégies d'alimentation, les conditions opératoires et les paramètres influençant la stabilité et les performances des procédés seront examinés. Une attention particulière sera accordée aux opérations unitaires associées à la récupération, à l'épuration et à l'enrichissement du biogaz en biométhane, ainsi qu'aux possibilités de valorisation du digestat et du dioxyde de carbone coproduit.

Finalement, une analyse comparative des différentes voies de conversion biologique permettra d'évaluer leur potentiel, leurs avantages et leurs limitations, notamment en matière de rendement de conversion, de sélectivité des produits, de flexibilité des matières premières, de maturité technologique, de besoins énergétiques et de contraintes opérationnelles. Les principaux enjeux liés à la mise à l'échelle industrielle, à l'intégration des opérations unitaires et à la viabilité technico-économique des procédés seront également abordés, afin de mieux comprendre les facteurs déterminant leur compétitivité et leur potentiel de déploiement.

L'objectif de ce chapitre est de permettre aux participants de comprendre, de comparer et de sélectionner les technologies de conversion biologique les mieux adaptées aux caractéristiques des ressources disponibles et aux produits recherchés, tout en développant une vision intégrée des possibilités de valorisation de la biomasse lignocellulosique dans une perspective de bioraffinerie et d'économie circulaire.

Conversion thermochimique de la biomasse lignocellulosique (3 h)

Présentation approfondie des principales technologies de conversion thermochimique de la biomasse lignocellulosique, notamment la torréfaction, la pyrolyse et la gazéification, en mettant l'accent sur leurs principes fondamentaux, leurs conditions opératoires, leurs performances et leurs applications industrielles. Le chapitre abordera les mécanismes de décomposition thermique de la biomasse ainsi que l'influence des principaux paramètres de procédé, tels que la température, la pression, la vitesse de chauffage, le temps de résidence et la nature de l'atmosphère réactionnelle, sur la distribution et la qualité des produits obtenus.

Pour chacune des voies de conversion, les différentes configurations technologiques et les principales opérations unitaires seront examinées, depuis l'alimentation et la préparation de la biomasse jusqu'à la récupération, la séparation et au conditionnement des produits. Une

attention particulière sera accordée aux technologies de réacteurs, aux stratégies de transfert thermique, aux systèmes de récupération énergétique ainsi qu'aux défis associés à l'intégration et à l'exploitation des procédés à l'échelle industrielle.

Le chapitre présentera également les différentes catégories de produits et de sous-produits issus de ces transformations, notamment les biocombustibles solides torréfiés, les biohuiles, les biochars, les gaz de synthèse et les autres fractions valorisables. Les possibilités de valorisation énergétique et chimique de ces produits seront explorées, incluant leur utilisation pour la production de chaleur, d'électricité, de carburants renouvelables et de molécules à valeur ajoutée. Les enjeux liés à la qualité des produits, à leur purification et aux traitements nécessaires à leur utilisation finale seront également abordés.

Finalement, une analyse comparative des technologies permettra d'en évaluer le potentiel, les avantages et les limitations, notamment en matière de rendement énergétique, de flexibilité des matières premières, de maturité technologique, de complexité opérationnelle et de contraintes environnementales et économiques. Cette approche permettra aux participants de mieux comprendre les critères guidant le choix d'une technologie de conversion thermochimique en fonction des caractéristiques du gisement disponible, des produits recherchés et des objectifs de valorisation industrielle.

L'objectif de ce chapitre est de fournir aux participants les connaissances nécessaires pour comprendre, comparer et sélectionner les voies de conversion thermochimique les mieux adaptées à un contexte donné, tout en développant une vision intégrée des possibilités de valorisation de la biomasse lignocellulosique.

Production combinée de chaleur et d’électricité à partir de la biomasse lignocellulosique – Cogénération (CHP) (2 h)

Présentation des principales technologies permettant la production de chaleur et d’électricité à partir de la biomasse lignocellulosique, en mettant l’accent sur les systèmes de cogénération (Combined Heat and Power – CHP), leurs principes de fonctionnement, leurs performances énergétiques et leurs applications industrielles. Le chapitre abordera les différentes stratégies de conversion énergétique de la biomasse, notamment par combustion directe et par gazéification, ainsi que les possibilités de récupération et de valorisation simultanée de l’énergie thermique et électrique. Une attention particulière sera accordée aux avantages de la cogénération en matière d’efficacité énergétique globale, de réduction des pertes thermiques et d’intégration aux besoins énergétiques des installations industrielles.

Les principales technologies de combustion de la biomasse seront présentées, notamment les chaudières à grille, les systèmes à lit fluidisé et les autres configurations adaptées aux combustibles lignocellulosiques. Le chapitre examinera les différentes opérations unitaires associées à ces installations, depuis l’alimentation et la manutention du combustible jusqu’à la

combustion, au transfert thermique, à la production de vapeur et à la récupération des résidus. Les technologies de conversion de l'énergie thermique en électricité seront également abordées, notamment les cycles de Rankine à vapeur, les cycles organiques de Rankine (ORC) et les turbines à vapeur. L'influence des conditions opératoires, de la qualité du combustible et des caractéristiques des équipements sur les rendements thermiques et électriques sera également examinée.

Le chapitre présentera ensuite les systèmes de cogénération reposant sur la gazéification de la biomasse, en mettant l'accent sur la production, le conditionnement et l'utilisation du gaz de synthèse comme combustible pour la génération d'électricité et de chaleur. Les principales configurations technologiques seront examinées, notamment les gazéificateurs à lit fixe et à lit fluidisé, ainsi que leur intégration à des moteurs à combustion interne, des turbines à gaz et d'autres systèmes de conversion énergétique. Une attention particulière sera accordée aux opérations unitaires de refroidissement, de filtration et d'épuration des gaz, notamment à la gestion des particules, des goudrons et des autres contaminants susceptibles d'affecter la fiabilité et les performances des équipements de production électrique.

Les différentes stratégies de récupération et de valorisation de la chaleur résiduelle seront également explorées, notamment à travers l'utilisation d'échangeurs thermiques, de réseaux de distribution de chaleur et de systèmes de récupération énergétique. Le chapitre abordera les concepts de rendement électrique, de rendement thermique et de rendement énergétique global, ainsi que les principes de dimensionnement et d'optimisation des installations en fonction des profils de consommation énergétique. Les possibilités d'intégration de ces technologies aux procédés industriels, aux réseaux de chaleur et aux installations décentralisées seront examinées, en tenant compte des variations saisonnières de la demande et des contraintes liées à l'approvisionnement en biomasse.

Une attention particulière sera également portée aux enjeux opérationnels et environnementaux associés à ces technologies, notamment la gestion des cendres, l'encrassement, la corrosion, les émissions atmosphériques et les systèmes de traitement des gaz de combustion. Les principales contraintes liées à la qualité et à l'humidité des combustibles, à la continuité des opérations, à la maintenance des équipements et à la fiabilité des installations seront abordées afin de mieux comprendre les défis rencontrés lors de leur déploiement à l'échelle industrielle.

Finalement, une analyse comparative des différentes configurations de cogénération permettra d'évaluer leur potentiel, leurs avantages et leurs limitations, notamment en matière de rendement énergétique, de capacité de production, de flexibilité opérationnelle, de maturité technologique et de viabilité économique. Les principaux facteurs influençant les coûts d'investissement et d'exploitation seront présentés, de même que les conditions favorisant la rentabilité des projets, telles que la disponibilité et le coût de la biomasse, la valorisation de la chaleur produite, les tarifs de l'électricité et les besoins énergétiques des utilisateurs.

L'objectif de ce chapitre est de permettre aux participants de comprendre, de comparer et de sélectionner les technologies de production combinée de chaleur et d'électricité les mieux adaptées aux caractéristiques des gisements de biomasse et aux besoins énergétiques d'un site

donné, tout en développant une compréhension des critères techniques, énergétiques et économiques qui déterminent la pertinence d'un projet de cogénération à partir de biomasse lignocellulosique.

Post-traitements et valorisation des intermédiaires issus de la conversion de la biomasse lignocellulosique (2 h)

Présentation des principales stratégies de post-traitement et de valorisation des intermédiaires issus des différentes technologies de conversion biologique et thermochimique de la biomasse lignocellulosique. Le chapitre visera à établir les liens entre les procédés de conversion primaire et les étapes subséquentes de transformation, de purification et de conditionnement nécessaires à l'obtention de produits énergétiques, chimiques ou de matériaux à valeur ajoutée. Une attention particulière sera accordée aux caractéristiques physicochimiques des intermédiaires, aux exigences de qualité des produits finaux et aux différentes voies technologiques permettant leur valorisation industrielle.

Le chapitre abordera notamment les possibilités de valorisation du gaz de synthèse issu de la gazéification, en présentant les principales opérations unitaires de refroidissement, de séparation, de filtration, d'épuration et d'ajustement de sa composition. Les technologies permettant la transformation du gaz de synthèse en produits à valeur ajoutée seront examinées, notamment la synthèse Fischer-Tropsch pour la production d'hydrocarbures et de carburants synthétiques, la synthèse du méthanol, la méthanation pour la production de méthane de synthèse ainsi que la récupération et la purification de l'hydrogène. Les principales contraintes associées à la présence de contaminants, aux exigences des catalyseurs et aux conditions opératoires des procédés de synthèse seront également présentées.

Une attention particulière sera également accordée aux huiles pyrolytiques issues de la pyrolyse, dont les caractéristiques chimiques et physiques nécessitent généralement des traitements spécifiques avant leur utilisation comme combustibles ou matières premières pour l'industrie chimique. Les principales stratégies de stabilisation, de séparation et de valorisation seront abordées, notamment la filtration, la distillation lorsque applicable, le fractionnement, l'hydrodésoxygénation et les autres procédés de conversion catalytique. Le chapitre présentera les possibilités de transformation des biohuiles en carburants renouvelables, en produits chimiques biosourcés ou en intermédiaires destinés à des procédés de raffinage, tout en soulignant les défis associés à leur acidité, leur teneur en oxygène, leur stabilité et leur compatibilité avec les infrastructures industrielles existantes.

Le chapitre examinera ensuite les différentes possibilités de valorisation des sucres issus de la déconstruction de la biomasse lignocellulosique, notamment les sucres à cinq et six carbones provenant de l'hydrolyse des fractions cellulosiques et hémicellulosiques. Au-delà de leur utilisation conventionnelle pour la production de bioéthanol, les principales voies de conversion biologique et chimique seront présentées, incluant la production d'acides organiques, de solvants, de molécules plateformes et d'autres produits biosourcés à valeur ajoutée. Les

opérations de purification, de concentration, de séparation et de conditionnement des hydrolysats seront également abordées, de même que les enjeux associés à la présence d'inhibiteurs et à la sélectivité des procédés de transformation.

Les possibilités de valorisation d'autres intermédiaires et sous-produits seront également explorées, notamment les biochars, les fractions ligniniques, le biogaz brut, le dioxyde de carbone et les résidus organiques issus des différentes voies de conversion. Le chapitre présentera les principales stratégies de purification, de transformation et de mise en valeur de ces flux, dans une perspective d'utilisation optimale des ressources et de réduction des rejets. Une attention particulière sera accordée aux possibilités d'intégration de ces opérations au sein de bioraffineries capables de générer plusieurs produits commerciaux à partir d'un même gisement de biomasse.

Finalement, une analyse comparative des différentes options de post-traitement permettra d'évaluer leur potentiel, leurs avantages et leurs limitations, notamment en matière de complexité technologique, de rendement de conversion, de consommation énergétique, de maturité industrielle et de valeur commerciale des produits obtenus. Les principaux critères guidant la sélection des technologies seront présentés, en tenant compte de la qualité des intermédiaires disponibles, des spécifications des produits recherchés, des besoins en infrastructures et des considérations technico-économiques. Cette approche permettra également d'illustrer l'importance de l'intégration des procédés et de la valorisation des coproduits dans l'amélioration de la rentabilité globale des filières de transformation de la biomasse.

L'objectif de ce chapitre est de permettre aux participants de comprendre et de comparer les principales voies de valorisation des intermédiaires issus de la conversion biologique et thermochimique de la biomasse lignocellulosique, afin d'identifier les opérations de post-traitement les mieux adaptées aux produits recherchés et de développer une vision intégrée des chaînes de transformation, depuis la matière première jusqu'aux produits commerciaux finaux.

Clientèles visées

Ingénieurs, chargés de projet, techniciens, gestionnaires, opérateurs

Préalables à la formation

Lectures préliminaires dans le domaine des biocarburants

Encadrement pédagogique

Cours magistraux avec exemples québécois et canadiens