

BM-A1

Conception, exploitation et optimisation avancées des systèmes de biogaz

Programme : EFTP de niveau avancé

Code du module : BM-A1

Niveau : Certificat/diplôme avancé en technologie de la biomasse

Description du cours

Ce module apporte des connaissances techniques avancées et des compétences pratiques en matière de conception, d'exploitation, d'évaluation des performances et d'optimisation des systèmes de biogaz destinés à la production d'énergie. Le cours porte sur les principes d'ingénierie qui régissent la digestion anaérobie, la sélection des matières premières, la conception des digesteurs, les calculs de dimensionnement et l'optimisation de l'exploitation. Les apprenants étudieront la conception de systèmes de biogaz adaptés aux applications domestiques, institutionnelles, agricoles et aux petites applications industrielles courantes en Afrique de l'Ouest.

L'accent est mis sur la conversion de déchets organiques disponibles localement — notamment les épluchures de manioc, les déjections d'élevage, les résidus de transformation alimentaire, les déchets organiques municipaux et les sous-produits agro-industriels — en ressources énergétiques renouvelables utiles. Au moyen de calculs pratiques, d'exercices de terrain, de démonstrations en laboratoire et d'activités de conception technique, les stagiaires acquerront les compétences nécessaires pour sélectionner des technologies de digesteur appropriées, déterminer la capacité d'un système, estimer le potentiel de production de gaz et évaluer les performances du système.

Le module adopte une approche de formation fondée sur les compétences (Competency-Based Education and Training — CBET), dans laquelle les notions théoriques sont immédiatement reliées à des applications réelles. Les diplômés disposeront ainsi des compétences nécessaires pour soutenir des projets de valorisation énergétique des déchets, des initiatives d'électrification rurale, des systèmes agricoles durables et des entreprises d'énergie renouvelable en Afrique de l'Ouest.

Justification

L'Afrique de l'Ouest génère chaque année des millions de tonnes de déchets biodégradables provenant de l'agriculture, de l'élevage, des industries de transformation alimentaire et des zones urbaines. Une grande partie de ces déchets reste sous-utilisée, ce qui crée des problèmes environnementaux et de santé publique.

La technologie du biogaz offre une solution pratique en transformant ces déchets en énergie renouvelable propre, en produisant un engrais organique comme sous-produit utile, en réduisant la dépendance au bois-énergie et aux combustibles fossiles, en soutenant l'électrification rurale et l'accès à l'énergie, en créant des

emplois dans les industries des énergies renouvelables et en améliorant la gestion des déchets dans les municipalités et les agro-industries.

Les diplômés de l'EFTP avancé doivent maîtriser la conception et l'optimisation des systèmes de biogaz afin de répondre à la demande croissante de techniciens, de superviseurs et d'entrepreneurs qualifiés dans le secteur des énergies renouvelables.

BM-A1-1

Principes de conception des systèmes de biogaz

Objectifs d'apprentissage

À la fin de ce chapitre, les stagiaires seront capables de :

1. Expliquer les principes d'ingénierie qui régissent la conception d'un système de biogaz.
2. Comparer les différentes technologies de digesteur et sélectionner celle qui convient à une application donnée.
3. Déterminer les besoins en matières premières pour la production de biogaz.
4. Calculer le volume du digesteur à partir du temps de séjour hydraulique (HRT) et des caractéristiques de la matière première.
5. Concevoir une petite ou moyenne installation de biogaz adaptée au contexte ouest-africain.

1.1. Introduction à la conception d'un système de biogaz

Les systèmes de biogaz sont des installations spécialement conçues pour convertir des déchets organiques en un gaz combustible utile. Cette conversion s'effectue par digestion anaérobie, c'est-à-dire par dégradation de la matière organique en absence d'oxygène. Un système complet de biogaz comprend généralement trois éléments principaux : la collecte de la matière première, une cuve de mélange et le digesteur anaérobie. Ces éléments fonctionnent selon la séquence illustrée ci-dessous.

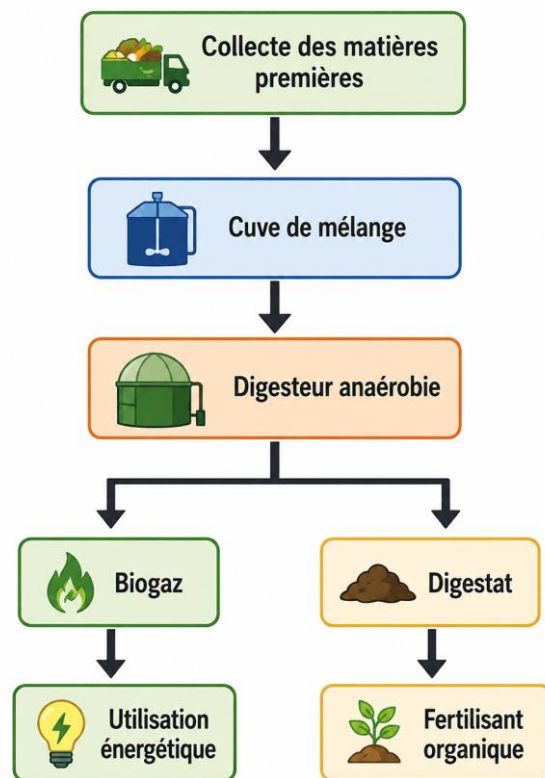


Figure 1.1 — Chaîne fonctionnelle d'un système de biogaz

Lors de la conception, les ingénieurs doivent prendre en compte plusieurs facteurs importants : quantité de matière première disponible de manière régulière, composition et type de matière première, conditions climatiques locales, quantité de gaz requise, disponibilité de l'eau, utilisation finale prévue du biogaz et faisabilité économique globale du projet. La prise en compte de ces facteurs permet de concevoir un système efficace, fiable et adapté à l'utilisation réelle.

1.2. Critères de conception et normes

1.2.1. Exigences de conception

Une installation de biogaz bien conçue doit respecter plusieurs exigences essentielles pour fonctionner de manière sûre et efficace. La construction doit être parfaitement étanche au gaz afin d'empêcher toute fuite de biogaz et toute entrée d'air dans le digesteur. La structure doit être suffisamment robuste et stable pour supporter le poids des matières contenues et résister aux contraintes environnementales. Le système doit permettre un stockage sûr du gaz produit et garantir un écoulement suffisant du lisier afin que la matière digérée circule correctement dans l'installation.

Tous les éléments doivent être fabriqués à partir de matériaux résistant à la corrosion liée au milieu humide ou acide du digesteur. Enfin, l'installation doit rester facilement accessible pour les inspections et les opérations de maintenance périodiques.

Tableau 1.1 — Paramètres importants de conception

Paramètre	Plage type
Température du digesteur	25–40 °C
pH	6,8–7,5
Rapport C/N	20:1–30:1
Matières sèches totales (TS)	8–12 %
Temps de séjour hydraulique (HRT)	20–60 jours
Teneur en méthane	50–70 %

1.2.2. Considérations climatiques en Afrique de l'Ouest

La majeure partie de l'Afrique de l'Ouest connaît un climat tropical avec des températures élevées toute l'année, généralement comprises entre 25 °C et 35 °C. Ces conditions sont très favorables à la digestion mésophile, qui constitue le mode le plus courant de digestion anaérobie. Grâce aux températures ambiantes naturellement élevées, un chauffage supplémentaire du digesteur est souvent inutile ou limité. Les systèmes de biogaz peuvent ainsi être plus simples, moins coûteux à exploiter et plus économes en énergie dans le contexte ouest-africain.

1.3. Sélection des matières premières

La qualité de la matière première influence directement la quantité et la qualité du gaz produit. Lors de la sélection, il faut rechercher une forte teneur en matières volatiles, une humidité compatible avec l'activité

bactérienne, un rapport carbone/azote (C/N) favorable, une disponibilité régulière pendant l'année et un faible niveau de contamination afin d'éviter les problèmes dans le digesteur.

Tableau 1.2 — Matières premières courantes en Afrique de l'Ouest

Matière première	Rendement en biogaz (m ³ /kg VS)	Disponibilité
Fumier bovin	0,20–0,30	Élevée
Fientes de volaille	0,35–0,60	Élevée
Lisier porcin	0,30–0,50	Modérée
Épluchures de manioc	0,35–0,55	Très élevée
Effluents d'huilerie de palme (POME)	0,45–0,70	Élevée
Déchets alimentaires	0,50–0,80	Élevée
Déchets organiques municipaux	0,30–0,60	Élevée

1.4. Types de digesteurs et sélection

1. Digesteur à dôme fixe

Le digesteur à dôme fixe est une structure souterraine équipée d'un espace de stockage du gaz intégré et fixe. Il présente une longue durée de vie et demande peu de maintenance. L'absence d'éléments en acier réduit les problèmes de corrosion et les coûts d'exploitation sont faibles, ce qui le rend très adapté aux communautés rurales. Ses principaux inconvénients sont la difficulté des réparations du fait de son implantation souterraine et la variation possible de la pression du gaz au cours de l'exploitation.

2. Digesteur à cloche flottante

Le digesteur à cloche flottante possède un gazomètre mobile qui flotte sur le lisier et procure une pression de gaz relativement constante. Il permet de visualiser facilement le volume de gaz et reste simple à exploiter. En revanche, la cloche métallique est sujette à la corrosion et les coûts de maintenance sont supérieurs à ceux d'autres configurations.

3. Digesteur à écoulement piston

Le digesteur à écoulement piston est un long réacteur horizontal, adapté aux lisiers épais. Il est couramment employé dans les grandes exploitations d'élevage disposant d'un flux régulier de déjections animales.

4. Réacteur continu parfaitement agité (CSTR)

Le réacteur continu parfaitement agité (Continuous Stirred Tank Reactor — CSTR) utilise un brassage mécanique et fonctionne en continu. Il est principalement utilisé dans les installations agro-industrielles et

les unités de traitement des déchets municipaux où de grands volumes de déchets doivent être traités de manière régulière.

Tableau 1.3 — Matrice de sélection des digesteurs

Critère	Dôme fixe	Cloche flottante	Écoulement piston	CSTR
Coût	Faible	Moyen	Moyen	Élevé
Maintenance	Faible	Moyenne	Moyenne	Élevée
Stabilité de la pression du gaz	Moyenne	Élevée	Moyenne	Élevée
Adaptation au milieu rural	Élevée	Élevée	Moyenne	Faible
Adaptation à l'industrie	Faible	Moyenne	Moyenne	Élevée

1.5. Calculs de dimensionnement du digesteur

Le dimensionnement est basé sur la quantité quotidienne de matière première et le temps de séjour.

Étape 1 — Déterminer l'apport quotidien de lisier

$$Q_s = M_f + W \dots (1.1)$$

Où Q_s est le volume quotidien de lisier (m³/jour), M_f le volume quotidien de matière première (m³/jour) et W le volume d'eau ajouté (m³/jour).

Étape 2 — Calculer le volume du digesteur

$$V_d = Q_s \times HRT \dots (1.2)$$

Où V_d est le volume du digesteur (m³) et HRT le temps de séjour hydraulique (jours).

Étape 3 — Estimer la production de biogaz

$$B = M_f \times Y \dots (1.3)$$

Où B est la production quotidienne de biogaz (m³/jour), M_f la masse quotidienne de matière première (kg/jour) et Y le rendement spécifique en biogaz (m³/kg).

Exemple : une exploitation génère 500 kg de fumier bovin par jour. On ajoute 500 L d'eau par jour et le HRT est de 30 jours. On suppose 1 kg de fumier $\approx$ 1 L.

- Lisier quotidien : $Q_s = 0,5 + 0,5 = 1,0$ m³/jour.
- Volume du digesteur : $V_d = 1,0 \times 30 = 30$ m³.
- Taille requise du digesteur : **30 m³**.

Application pratique — Conception d'un système pour une coopérative rurale de transformation du manioc

Matériel : calculatrice, mètre ruban, fiche de données sur les matières premières, feuille de conception et papier quadrillé.

Procédure :

1. Relever les matières premières disponibles — épluchures de manioc, fumier bovin et déchets alimentaires — et enregistrer les quantités journalières.
2. Déterminer le volume quotidien de lisier.
3. Sélectionner un type de digesteur et justifier le choix selon le coût, la maintenance, la disponibilité des matières premières et les compétences de la communauté.
4. Calculer le volume du digesteur à l'aide de l'équation 1.2.
5. Estimer la production de gaz à l'aide de l'équation 1.3.
6. Esquisser l'installation : cuve de mélange, digesteur, stockage du gaz, sortie de lisier et stockage de l'engrais.

Compétence attendue : les apprenants sont capables de dimensionner et de représenter de manière autonome un système de biogaz adapté aux conditions locales.

Étude de cas — Production de biogaz à partir d'épluchures de manioc au Ghana

Les industries de transformation du manioc au Ghana génèrent d'importantes quantités d'épluchures qui sont traditionnellement rejetées à l'air libre, provoquant des odeurs et une pollution environnementale. Une installation pilote de biogaz utilisant un digesteur à dôme fixe a été mise en place pour traiter les épluchures de manioc mélangées à du fumier bovin.

Résultats :

- réduction des coûts d'élimination des déchets ;
- production de gaz de cuisson pour les travailleurs ;
- production de digestat utilisé comme engrais pour les cultures de manioc ;
- réduction de la consommation de bois de feu.

1.6. Résumé du chapitre

Ce chapitre a présenté les principes et méthodes avancés de conception et de dimensionnement des systèmes de biogaz. Il a mis l'accent sur l'application de critères d'ingénierie afin de développer des installations efficaces, fiables et durables. Les apprenants ont étudié l'évaluation des matières premières disponibles localement, la sélection des technologies de digesteur selon des considérations techniques, environnementales et socio-économiques, ainsi que les calculs permettant de déterminer le volume du digesteur et les paramètres d'exploitation. Les méthodes d'estimation du potentiel de production de biogaz à partir de différents substrats ont également été abordées.

Une attention particulière a été accordée à la conception de systèmes répondant aux besoins des milieux ruraux et industriels en Afrique de l'Ouest, en tenant compte des ressources locales, du climat et de la demande énergétique. Ces compétences constituent la base des chapitres suivants consacrés à l'exploitation, au suivi, à l'optimisation, à l'épuration et à l'utilisation du biogaz.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Une municipalité souhaite créer une installation de biogaz utilisant les déchets organiques d'un marché. Expliquez quatre facteurs à prendre en compte pour choisir le type de digesteur.
2. Une exploitation avicole génère 800 kg de fientes par jour. On ajoute 800 L d'eau/jour et le HRT est de 25 jours. Calculez : a) le volume quotidien de lisier ; b) le volume de digesteur requis.
3. Concevez une installation communautaire de biogaz de 50 m³ pour une coopérative de transformation du manioc au Ghana. La coopérative génère 1 200 kg d'épluchures de manioc/jour et 300 kg de fumier bovin/jour. Vous devez :
 - caractériser les matières premières disponibles ;
 - estimer la production quotidienne de biogaz ;
 - sélectionner un type de digesteur approprié ;
 - calculer les exigences de temps de séjour hydraulique ;
 - déterminer le volume du digesteur ;
 - concevoir les besoins de stockage du gaz ;
 - développer un réseau de tuyauteries et un système d'utilisation ;
 - évaluer les usages possibles : cuisson, production d'électricité et séchage des cultures ;
 - estimer la production d'engrais ;
 - présenter un dessin technique complet et une analyse de faisabilité économique.

Livrables attendus : rapport de conception technique, schéma de procédé, calculs de dimensionnement du digesteur, fiche de spécification des matériaux, estimation des coûts, plan d'exploitation et de maintenance, recommandations d'optimisation des performances.

Résultat de compétence : les apprenants démontrent leur capacité à concevoir, évaluer et optimiser un système réel de biogaz utilisant des ressources de biomasse disponibles localement en Afrique de l'Ouest.

BM-A1-2

Évaluation et préparation des matières premières

Objectifs d'apprentissage

À la fin de ce chapitre, les stagiaires seront capables de :

1. Caractériser les matières premières de biomasse à partir de propriétés physiques, chimiques et biologiques pertinentes pour la digestion anaérobie.
2. Évaluer l'aptitude des matières premières disponibles localement à la production de biogaz.
3. Déterminer des proportions de mélange adaptées afin d'obtenir des conditions optimales de digestion.
4. Appliquer des méthodes de prétraitement appropriées pour améliorer la biodégradabilité et le rendement en méthane.
5. Réaliser des procédures d'évaluation et de préparation des matières premières pour des installations de biogaz de petite et moyenne taille.

2.1. Introduction à l'évaluation des matières premières

Le succès d'un système de biogaz dépend fortement de la qualité des matières premières utilisées. Leur évaluation consiste à analyser soigneusement les ressources de biomasse afin de déterminer si elles peuvent fournir une production de biogaz suffisante et soutenir l'exploitation de l'installation sur le long terme. Les principaux objectifs sont d'estimer le potentiel en biogaz, de vérifier la disponibilité dans le temps, d'identifier d'éventuels inhibiteurs, d'optimiser les performances du digesteur et de réduire les problèmes d'exploitation. Une bonne évaluation favorise un fonctionnement efficace et fiable.

2.2. Caractérisation des matières premières

La caractérisation consiste à analyser les propriétés physiques et chimiques qui influencent le procédé de digestion : humidité, matières sèches totales (TS), matières volatiles (VS), rapport C/N, pH, teneur en cendres et teneur en lignine.

Tableau 2.1 — Paramètres importants pour la caractérisation

Paramètre	Importance
Teneur en humidité	Détermine la consistance du lisier
Matières sèches totales (TS)	Indiquent la teneur en matière sèche
Matières volatiles (VS)	Mesurent la fraction biodégradable

Paramètre	Importance
Rapport carbone/azote (C/N)	Influence l'activité microbienne
pH	Influence la croissance microbienne
Teneur en cendres	Indique la fraction non combustible
Teneur en lignine	Influence la biodégradabilité

Tableau 2.2 — Caractéristiques types de matières premières ouest-africaines

Matière première	TS (%)	Rapport C/N	Potentiel en biogaz
Fumier bovin	15–20	20–25	Modéré
Fientes de volaille	20–30	7–12	Élevé
Épluchures de manioc	20–35	35–45	Élevé
Effluents d'huilerie de palme	4–8	20–30	Très élevé
Déchets alimentaires	20–30	15–25	Très élevé
Coques d'arachide	80–90	40–60	Faible sans prétraitement

Le rapport C/N est essentiel parce que les microorganismes utilisent le carbone comme source d'énergie et l'azote pour la croissance cellulaire. La plage optimale est généralement comprise entre 20 et 30. Au-dessus de 35, la digestion ralentit ; en dessous de 15, une inhibition par l'ammoniac peut se produire et perturber les bactéries.

2.3. Proportions de mélange — Co-digestion

La co-digestion consiste à mélanger au moins deux matières premières afin d'améliorer l'efficacité globale du procédé. Elle permet d'équilibrer les nutriments, d'améliorer l'humidité, d'accroître la production de méthane, de réduire le risque d'inhibition et d'augmenter la stabilité du digesteur. Par exemple, les épluchures de manioc sont riches en carbone tandis que les fientes de volaille sont riches en azote ; leur mélange permet d'obtenir un meilleur rapport C/N.

$$\text{Rapport de mélange} \approx (\sum C_i \times M_i) / (\sum N_i \times M_i) \dots (2.1)$$

Où C_i est la teneur en carbone, N_i la teneur en azote et M_i la masse de la matière première considérée.

Tableau 2.4 — Combinaisons types de matières premières

Matière première A	Matière première B	Bénéfice
Épluchures de manioc	Fientes de volaille	Amélioration du rapport C/N
Déchets alimentaires	Fumier bovin	Digestion stable
Effluents d'huilerie de palme	Bouse de vache	Rendement en méthane accru
Déchets organiques municipaux	Fientes de volaille	Équilibrage des nutriments

2.4. Méthodes de prétraitement

Le prétraitement améliore la biodégradabilité de la matière première en déstructurant les composés organiques complexes et en les rendant plus accessibles aux microorganismes.

2.4.1. Prétraitement mécanique

Les méthodes mécaniques réduisent la taille des particules par hachage, broyage, concassage ou déchiquetage. Elles augmentent la surface disponible et accélèrent l'attaque microbienne. Le broyage des

épluchures de manioc avant leur introduction dans le digesteur peut ainsi améliorer l'efficacité de la digestion.

2.4.2. Prétraitement thermique

Le prétraitement thermique utilise de l'eau chaude ou de la vapeur afin de rompre les parois cellulaires et d'améliorer la digestibilité. Il est particulièrement utile pour les résidus agricoles fibreux difficiles à dégrader naturellement.

2.4.3. Prétraitement chimique

Le prétraitement chimique peut être alcalin — par exemple avec NaOH ou Ca(OH)_2 — ou acide. Il facilite la dégradation de la lignine et améliore l'hydrolyse, mais peut augmenter les coûts d'exploitation et introduire des risques liés à la manipulation de produits chimiques forts.

2.4.4. Prétraitement biologique

Le prétraitement biologique utilise des organismes vivants ou des enzymes, notamment des champignons ou des préparations enzymatiques. Il est respectueux de l'environnement et demande peu d'énergie. Il convient notamment à la sciure, aux coques d'arachide et à la paille de riz, qui présentent une forte teneur en lignine.

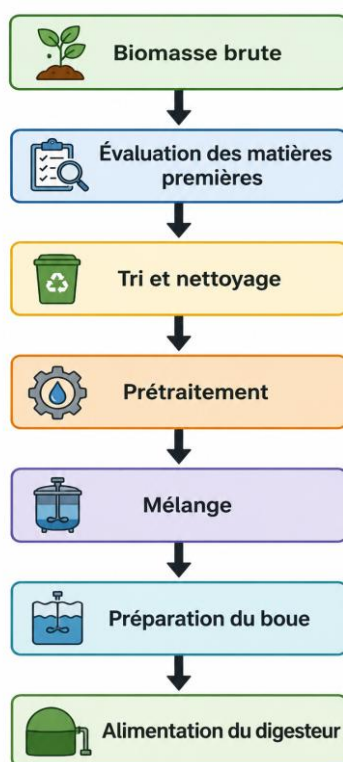


Figure 2.1 — Flux de préparation des matières premières

Application pratique 1 — Caractérisation et détermination d'un mélange

Objectif : évaluer des matières premières locales et déterminer un mélange approprié pour la co-digestion.

Matériel : épluchures de manioc, fientes de volaille, analyseur d'humidité ou étuve de séchage, balance, eau et calculatrice.

Partie A — Teneur en humidité (MC)

1. Peser un échantillon de 100 g.
2. Sécher à 105 °C.
3. Peser à nouveau l'échantillon.
4. Calculer la teneur en humidité.

$$MC (\%) = ((W_i - W_d) / W_i) \times 100 \dots (2.2)$$

Partie B — Mélange : les matières disponibles sont 50 kg d'épluchures de manioc et 20 kg de fientes de volaille. Déterminer une proportion de mélange permettant de se rapprocher de la plage optimale de C/N.

Partie C — Prétraitement : comparer des épluchures de manioc non traitées et des épluchures broyées. Observer la réduction de la taille des particules et discuter de l'effet attendu sur la digestion.

Compétence attendue : les apprenants savent évaluer les matières premières, calculer des proportions de mélange et recommander des techniques de prétraitement adaptées.

Étude de cas — Co-digestion d'épluchures de manioc et de fientes de volaille au Nigeria

Une unité moyenne de transformation du manioc dans le sud-ouest du Nigeria générait de grandes quantités d'épluchures mais obtenait de faibles rendements en biogaz en raison d'un déficit d'azote. Des fientes de volaille ont été ajoutées au mélange. Les résultats ont été une amélioration du rapport C/N, une augmentation de la production de méthane, une digestion plus rapide et une réduction des problèmes d'élimination des déchets.

2.5. Résumé du chapitre

Ce chapitre a présenté l'importance de l'évaluation et de la préparation des matières premières en production de biogaz. Les apprenants ont étudié les propriétés telles que l'humidité, les matières volatiles et le rapport C/N, ainsi que l'apport de la co-digestion pour améliorer la stabilité du procédé et le rendement en méthane. Les prétraitements mécaniques, thermiques, chimiques et biologiques ont été examinés comme moyens d'améliorer la biodégradabilité. Une évaluation et une préparation correctes constituent la base d'une exploitation stable et de rendements élevés, et préparent à l'analyse des performances du chapitre suivant.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez la caractérisation d'une matière première.
2. Pourquoi la caractérisation est-elle importante avant la conception ou l'exploitation d'une installation de biogaz ?
3. Pourquoi le rapport C/N est-il important en digestion anaérobie ?
4. Expliquez la différence entre matières sèches totales et matières volatiles.
5. Qu'est-ce que la co-digestion et pourquoi est-elle avantageuse ?
6. Décrivez trois caractéristiques d'une bonne matière première pour la production de biogaz.

7. Comparez les prétraitements mécanique et biologique.
8. Expliquez l'effet de la teneur en humidité sur les performances de digestion.
9. Discutez des difficultés liées à l'utilisation de résidus agricoles comme les coques d'arachide.
10. Pourquoi les épluchures de manioc sont-elles souvent mélangées à des déjections animales ?
11. Expliquez l'influence du prétraitement sur la production de méthane.
12. Un échantillon de biomasse pèse 500 g avant séchage et 125 g après séchage. Calculez : a) l'humidité (%) ; b) les matières sèches totales (%).
13. Calculez la teneur en humidité d'un échantillon pesant 1,2 kg avant séchage et 0,3 kg après séchage.
14. Proposez un mélange adapté pour une communauté disposant de grandes quantités d'épluchures de manioc et de fientes de volaille.

Analyse des performances de la digestion anaérobie

Objectifs d'apprentissage

À la fin de ce chapitre, les stagiaires seront capables de :

1. Calculer et interpréter le taux de charge organique (Organic Loading Rate — OLR) des systèmes de biogaz.
2. Évaluer l'effet du temps de séjour hydraulique (HRT) sur les performances de digestion.
3. Suivre et analyser les tendances de production de biogaz.
4. Identifier les problèmes d'exploitation à partir d'indicateurs de performance.
5. Recommander des mesures d'optimisation afin d'améliorer le rendement en gaz et la stabilité du procédé.

3.1. Introduction à l'analyse des performances

Une fois le digesteur en fonctionnement, ses performances doivent être suivies en permanence afin de maintenir une production stable de méthane, d'assurer une conversion efficace de la matière première en biogaz, d'éviter les défaillances et de maximiser la récupération d'énergie. Les principaux indicateurs sont l'OLR, le HRT, le débit de production de gaz, la teneur en méthane et le pH.

3.2. Taux de charge organique (OLR)

L'OLR représente la quantité de matière organique introduite quotidiennement par unité de volume de digesteur. Il est généralement exprimé en kilogrammes de matières volatiles par mètre cube de digesteur et par jour (kg VS/m³·jour). Un OLR trop élevé risque de surcharger le digesteur ; un OLR trop faible conduit à une sous-utilisation et à une production de gaz inférieure au potentiel.

$$OLR = VS_daily / V_d \dots (3.1)$$

Où VS_daily est la quantité journalière de matières volatiles (kg/jour) et V_d le volume du digesteur (m³).

Tableau 3.2 — Valeurs types d'OLR

Type de digesteur	OLR (kg VS/m ³ ·jour)
Dôme fixe	1–3
Écoulement piston	2–5
CSTR	2–8

3.3. Temps de séjour hydraulique (HRT)

Le HRT est le temps moyen pendant lequel la matière reste dans le digesteur avant d'être évacuée.

$$HRT = V_d / Q_s \dots (3.2)$$

Où HRT est exprimé en jours, V_d est le volume du digesteur et Q_s l'apport quotidien de lisier.

Un HRT long favorise une digestion plus complète mais impose un digesteur plus volumineux et donc plus coûteux. Un HRT court permet de réduire le volume du digesteur mais augmente le risque de lessivage des microorganismes actifs avant la fin de la digestion.

Tableau 3.3 — Valeurs types de HRT

Climat	HRT
Tropical	20–40 jours
Tempéré	40–60 jours

L'Afrique de l'Ouest bénéficie généralement de HRT plus courts du fait des températures ambiantes plus élevées qui accélèrent le procédé biologique.

3.4. Suivi de la production de gaz

La production de gaz est le principal indicateur direct des performances du digesteur. Un suivi régulier permet d'évaluer l'efficacité de l'installation et de détecter rapidement les anomalies.

Tableau 3.4 — Paramètres de suivi

Paramètre	Objectif
Volume quotidien de gaz	Productivité
Pourcentage de méthane	Qualité du combustible
Pression du gaz	Fonctionnement du système
Débit de gaz	Suivi de la consommation

$$GY = B / VS_{daily} \dots (3.3)$$

Où GY est le rendement en gaz (m^3 de biogaz/kg VS) et B la production quotidienne de biogaz.

Tableau 3.5 — Indicateurs types de bonnes performances

Indicateur	Bonne performance
Teneur en méthane	55–70 %
pH	6,8–7,5
OLR	Dans la plage de conception
Production quotidienne de gaz	Stable

3.5. Dépannage des performances

3.5.1. Faible production de gaz

Les causes possibles sont notamment un apport insuffisant de matière première, une surcharge, une température trop basse ou la présence d'inhibiteurs. Un apport insuffisant ne fournit pas assez de substrat aux bactéries, tandis qu'une surcharge peut déséquilibrer le procédé. Une faible température ralentit l'activité microbienne et certains inhibiteurs peuvent empoisonner la digestion.

3.5.2. Odeur forte

Une odeur forte et désagréable indique souvent une acidification du lisier ou une charge excessive perturbant l'équilibre de la digestion.

3.5.3. Formation de mousse

La mousse peut être favorisée par des matières premières riches en protéines ou par un brassage inadéquat qui crée des conditions non homogènes.

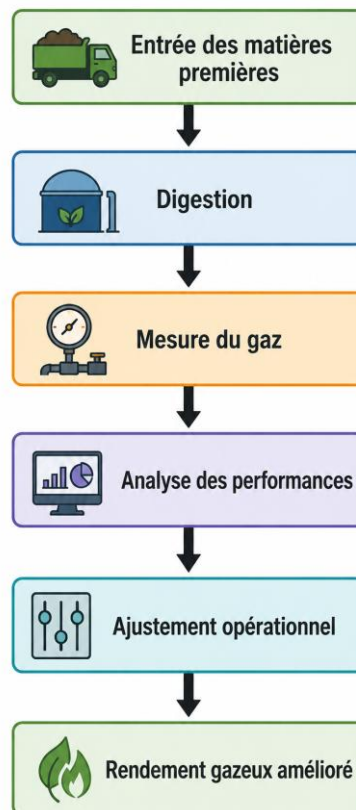


Figure 3.1 — Cycle de suivi et d'amélioration des performances du digesteur

$$\eta = (Production\ réelle\ de\ gaz / Production\ attendue\ de\ gaz) \times 100 \dots (3.3)$$

Application pratique — Suivi et évaluation d'un digesteur

Objectif : évaluer les performances d'un digesteur pilote.

Matériel : débitmètre de gaz, pH-mètre, fiches de données et calculatrice.

Procédure : mesurer la production quotidienne de gaz pendant sept jours consécutifs ; enregistrer l'apport quotidien de matière, le volume de gaz et le pH du lisier ; calculer l'OLR avec l'équation 3.1 et le HRT avec l'équation 3.2 ; analyser les tendances et identifier les problèmes d'exploitation.

Compétence attendue : évaluer les performances de digestion et recommander des mesures d'optimisation adaptées.

Étude de cas — Installation de biogaz d'une huilerie de palme au Ghana

Une installation de transformation d'huile de palme au Ghana a mis en place un CSTR pour traiter les effluents d'huilerie de palme (POME). Les opérateurs ont d'abord augmenté rapidement le débit d'alimentation pour maximiser le gaz. L'OLR a alors dépassé les limites de conception, le digesteur s'est acidifié et la production de méthane a fortement diminué. Les opérateurs ont réduit l'OLR, augmenté la fréquence de suivi puis rétabli progressivement la charge jusqu'au niveau optimal. La production de méthane s'est stabilisée, la qualité du gaz s'est améliorée et l'installation a fourni une énergie fiable pour le fonctionnement de l'huilerie. Cette étude illustre l'importance d'un suivi rigoureux et d'une augmentation contrôlée de la charge.

3.6. Résumé du chapitre

Ce chapitre a porté sur l'évaluation des performances de la digestion anaérobie à l'aide d'indicateurs d'exploitation essentiels. Les apprenants ont appris à calculer l'OLR, le HRT et le rendement en gaz, et ont étudié l'importance du suivi de la production de gaz, de la concentration en méthane, du pH et des conditions de charge. Les exercices de dépannage et les activités pratiques de suivi permettent de diagnostiquer les problèmes et d'appliquer des actions correctives. Ces compétences sont indispensables pour optimiser les systèmes de biogaz et maximiser la production d'énergie renouvelable à partir des ressources locales.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez l'OLR.
2. Pourquoi l'OLR est-il considéré comme l'un des paramètres d'exploitation les plus importants ?
3. Expliquez le concept de HRT.
4. Expliquez comment l'OLR et le HRT influencent la production de biogaz et la stabilité du digesteur.
5. Que se passe-t-il lorsqu'un digesteur est surchargé ?
6. Quel est l'effet de la température sur les performances de digestion ?
7. Pourquoi faut-il suivre la concentration de méthane ?
8. Quels sont les signes d'une acidification du digesteur ?
9. Expliquez la relation entre HRT et volume du digesteur.

10. Discutez de l'importance des relevés quotidiens de production de gaz.
11. Décrivez trois actions correctives possibles en cas de faible production de gaz.
12. Calculez le HRT d'un digesteur de 60 m^3 recevant $2,5 \text{ m}^3$ de lisier par jour.
13. Un digesteur a un volume de 50 m^3 , reçoit 2 m^3 de lisier/jour et 100 kg VS/jour . Calculez : a) le HRT ;
b) l'OLR.
14. Un digesteur reçoit 120 kg VS/jour et a un volume de 40 m^3 . Calculez l'OLR.
15. Si la production attendue est de $80 \text{ m}^3/\text{jour}$ et la production réelle de $68 \text{ m}^3/\text{jour}$, calculez le rendement du digesteur.

Techniques d'optimisation du procédé

Objectifs d'apprentissage

À la fin de ce chapitre, les stagiaires seront capables de :

1. Identifier et suivre les paramètres critiques de régulation d'un procédé de digestion anaérobie.
2. Évaluer l'effet des conditions d'exploitation sur le rendement en biogaz et la concentration de méthane.
3. Appliquer des stratégies d'amélioration du rendement.
4. Diagnostiquer les problèmes d'exploitation courants qui affectent la production de biogaz.
5. Recommander des actions correctives et des mesures d'optimisation assurant une exploitation stable.

4.1. Introduction à l'optimisation du procédé

L'optimisation d'une installation de biogaz consiste à maintenir des conditions d'exploitation appropriées afin de maximiser la production de méthane tout en préservant la stabilité du procédé et sa viabilité économique. Même un digesteur bien conçu peut mal fonctionner si ses conditions d'exploitation ne sont pas correctement maîtrisées. Les objectifs sont d'accroître le rendement en gaz, d'améliorer la concentration de méthane, de réduire les arrêts, de prévenir les défaillances et d'améliorer les performances économiques globales.

4.2. Paramètres de contrôle du procédé

1. Température

La température influence directement l'activité des microorganismes. La digestion psychrophile se produit sous 20 °C, la digestion mésophile entre 25 °C et 40 °C et la digestion thermophile entre 50 °C et 60 °C. En Afrique de l'Ouest, la majorité des digesteurs fonctionne naturellement dans la plage mésophile, l'ambiante étant souvent comprise entre 25 °C et 35 °C. Les fluctuations de température réduisent l'activité microbienne et la production de méthane et peuvent déstabiliser le digesteur.

2. pH

La plage optimale est généralement de 6,8 à 7,5. Sous 6,5, une acidification peut apparaître ; au-dessus de 8,0, une inhibition par l'ammoniac peut ralentir ou arrêter la méthanogenèse.

Tableau 4.2 — Effets des variations de pH

pH	Condition / effet
< 6,5	Acidification
6,8–7,5	Digestion optimale
> 8,0	Inhibition par l'ammoniac

3. Acides gras volatils (AGV/VFA)

Les AGV sont des produits intermédiaires de la digestion. Leur accumulation importante est un signal d'alerte pouvant révéler une surcharge, une activité méthanogène insuffisante ou un déséquilibre du procédé.

4. OLR

Le maintien de l'OLR dans la plage de conception est essentiel pour éviter une suralimentation du digesteur et préserver la stabilité du procédé.

5. HRT

Le HRT doit être suffisant pour permettre une digestion complète de la matière introduite.

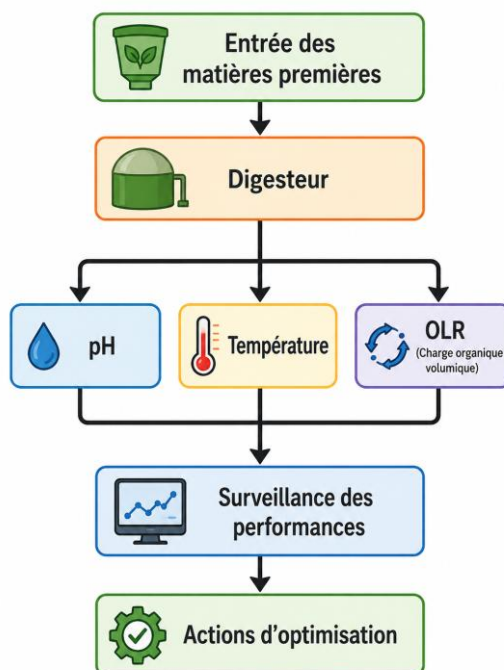


Figure 4.1 — Boucle de contrôle du procédé de digestion anaérobie

4.3. Stratégies d'amélioration du rendement

4.3.1. Co-digestion

Le mélange de matières complémentaires améliore l'équilibre nutritif. Les associations épluchures de manioc/fientes de volaille ou déchets alimentaires/fumier bovin sont des exemples utiles. Les bénéfices sont un meilleur rapport C/N, un rendement en méthane supérieur et une meilleure stabilité du procédé.

4.3.2. Prétraitement

Le broyage, le déchiquetage, le traitement thermique ou le traitement biologique augmentent la biodégradabilité et accélèrent l'hydrolyse, ce qui peut accroître la production de gaz.

4.3.3. Optimisation du brassage

Un brassage adapté évite la sédimentation, la formation de croûtes et les gradients de température. Il améliore le contact entre microorganismes et substrat et rend la digestion plus homogène.

4.3.4. Maîtrise de la température

Une température stable améliore la production de méthane, l'efficacité de digestion et la fiabilité globale. Même de petites fluctuations peuvent ralentir l'activité bactérienne.

4.3.5. Complémentation nutritive

Certaines matières premières manquent de nutriments essentiels. Il peut alors être nécessaire d'ajouter des oligoéléments, un fumier riche en azote ou des agents tampons afin de maintenir des conditions favorables.

4.4. Dépannage de l'exploitation

4.4.1. Faible production de gaz

Causes possibles : faible apport de matière, température basse, qualité insuffisante du substrat, surcharge ou HRT trop court. Les actions correctives consistent à ajuster l'alimentation, stabiliser la température, corriger la charge et, si nécessaire, augmenter le temps de séjour.

4.4.2. Acidification du digesteur

Les symptômes sont notamment un pH bas, une forte odeur et une diminution de la teneur en méthane. Les principales causes sont une charge excessive et l'accumulation d'AGV. Les actions correctives sont de réduire immédiatement l'alimentation, d'ajouter un matériau tampon si nécessaire et de rétablir progressivement la charge une fois la stabilité retrouvée.

4.4.3. Formation excessive de croûte

Une couche épaisse en surface est souvent associée à une matière première fibreuse ou à un brassage insuffisant. Il convient d'améliorer le mélange et de prétraiter les matières fibreuses avant leur introduction.

4.4.4. Fuite de gaz

Une fuite se manifeste notamment par une baisse de pression et une diminution de la production énergétique. Les opérateurs doivent inspecter les conduites et raccords, réparer les joints défectueux et effectuer des essais d'étanchéité réguliers.

Application pratique — Optimisation des performances d'un digesteur

Matériel : pH-mètre, thermomètre, débitmètre de gaz, fiches de données et calculatrice.

1. Enregistrer quotidiennement l'apport de matière, la production de gaz, le pH et la température.
2. Comparer les résultats aux valeurs recommandées.
3. Identifier les problèmes : OLR élevé, pH faible, fluctuations de température, etc.
4. Recommander des actions correctives.
5. Estimer l'amélioration attendue du rendement en gaz après optimisation.

Compétence attendue : diagnostiquer les problèmes de performance et proposer des mesures d'optimisation.

Étude de cas — Installation de biogaz d'une exploitation avicole au Sénégal

Une exploitation avicole au Sénégal a installé une unité moyenne de biogaz pour convertir les fientes de poulet en gaz de cuisson et en électricité. Au départ, l'installation subissait des baisses fréquentes de production de gaz, des épisodes d'acidification et une mauvaise homogénéité de l'alimentation. Les opérateurs ont introduit des horaires d'alimentation contrôlés, amélioré le mélange des fientes avec l'eau et mis en place un suivi quotidien du pH. La production de gaz a augmenté de 25 %, la qualité du méthane s'est améliorée et les interruptions d'exploitation ont fortement diminué.

Quiz

1. Discutez de cinq paramètres importants de contrôle de la digestion anaérobie et expliquez leur influence sur la production de biogaz.
2. Un digesteur produisait initialement 60 m³/jour de biogaz. Après optimisation, la production atteint 78 m³/jour. Calculez le pourcentage d'amélioration du rendement.

4.5. Résumé du chapitre

Ce chapitre a présenté l'optimisation des procédés de digestion anaérobie. Les apprenants ont étudié l'influence de la température, du pH, de l'OLR, du HRT et des AGV sur les performances, ainsi que les stratégies d'amélioration du rendement : co-digestion, prétraitement, optimisation du brassage et complémentation nutritive. Des méthodes structurées de dépannage des problèmes d'exploitation ont également été introduites. Ces compétences permettent aux techniciens de maximiser la production de biogaz et de préparer le gaz à des usages efficaces.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Qu'est-ce que l'optimisation d'un procédé de biogaz ?

2. Pourquoi le contrôle du pH est-il important pendant la digestion anaérobie ?
3. Expliquez l'effet des fluctuations de température sur la production de gaz.
4. Que sont les acides gras volatils ?
5. Décrivez trois stratégies d'amélioration du rendement.
6. Pourquoi le mélange des matières premières est-il important ?
7. Expliquez les causes de l'acidification d'un digesteur.
8. Quel est l'effet d'une fuite de gaz sur les performances de l'installation ?
9. Discutez du rôle du suivi du procédé dans les installations de biogaz.
10. Décrivez une procédure systématique de dépannage en cas de faible production de gaz.
11. La production d'un digesteur passe de 50 à 65 m³/jour. Calculez le pourcentage d'amélioration.
12. Un digesteur devrait produire 90 m³/jour mais n'en produit que 72. Calculez son rendement.
13. Proposez des mesures d'optimisation pour un digesteur fonctionnant à pH 6,2.

Systèmes d'utilisation du biogaz

Objectifs d'apprentissage

À la fin de ce chapitre, les stagiaires seront capables de :

1. Évaluer les différentes technologies d'utilisation du biogaz pour des applications domestiques, commerciales et industrielles.
2. Concevoir des systèmes simples de biogaz pour la cuisson et le chauffage.
3. Évaluer les systèmes de production d'électricité à partir de biogaz.
4. Expliquer les technologies d'épuration du biogaz et les méthodes de stockage.
5. Recommander des options d'utilisation adaptées aux besoins énergétiques locaux et aux ressources disponibles.

5.1. Introduction à l'utilisation du biogaz

La viabilité économique d'une installation de biogaz dépend largement de l'efficacité avec laquelle le gaz produit est utilisé. Un usage approprié permet de générer des bénéfices réels et de récupérer l'investissement. Le biogaz brut contient généralement 50–70 % de méthane (CH_4), principal composant énergétique, 30–45 % de dioxyde de carbone (CO_2), 0–2 % de sulfure d'hydrogène (H_2S) et des quantités variables de vapeur d'eau. L'élimination des impuretés et l'utilisation efficace du gaz sont donc essentielles.

5.2. Systèmes de cuisson et de chauffage

5.2.1. Réchauds à biogaz

La cuisson constitue l'application la plus courante, notamment en milieu rural. Les réchauds à biogaz assurent une combustion propre, réduisent la pollution de l'air intérieur, diminuent la consommation de bois de feu et améliorent la santé des ménages. Un réchaud domestique consomme généralement 0,3 à 0,5 m^3 de biogaz par heure, tandis qu'une grande cuisine collective peut consommer 2 à 5 m^3/h .

5.2.2. Chauffage de l'eau

Le biogaz peut fournir de l'eau chaude dans les exploitations laitières, les industries de transformation alimentaire et les cuisines institutionnelles, ce qui réduit la dépendance à d'autres combustibles.

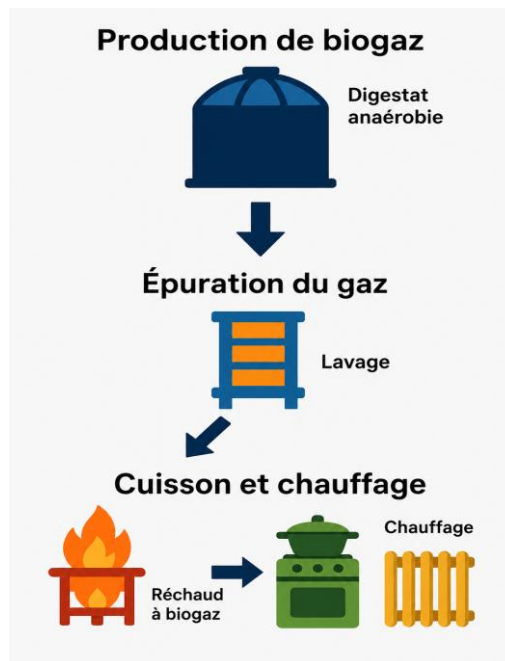


Figure 5.1 — Flux type d'utilisation du biogaz

5.2.3. Séchage des cultures

Des brûleurs à biogaz peuvent fournir la chaleur nécessaire au séchage de produits agricoles comme le maïs, le manioc, le cacao et le riz, contribuant à la conservation des récoltes et à la création de valeur ajoutée.

5.3. Production d'électricité

Le biogaz peut alimenter des moteurs à combustion interne couplés à des générateurs. Les principaux éléments d'un système sont le digesteur, l'unité d'épuration du gaz, le stockage du gaz, le groupe moteur-générateur et le réseau de distribution. Les petits groupes présentent généralement un rendement électrique de 20–30 %. Les systèmes de cogénération de chaleur et d'électricité (CHP) atteignent un rendement global de 70–85 % parce qu'ils valorisent simultanément l'électricité et la chaleur utile.

Un système CHP comprend notamment :

- le digesteur qui produit le biogaz ;
- l'unité d'épuration qui élimine les impuretés ;
- le réservoir qui stocke le gaz épuré ;
- le groupe moteur-générateur qui produit l'électricité ;
- le système de distribution qui fournit l'électricité et la chaleur aux usages finaux.

La double valorisation de l'électricité et de la chaleur réduit les pertes énergétiques et améliore l'économie des installations de taille importante.

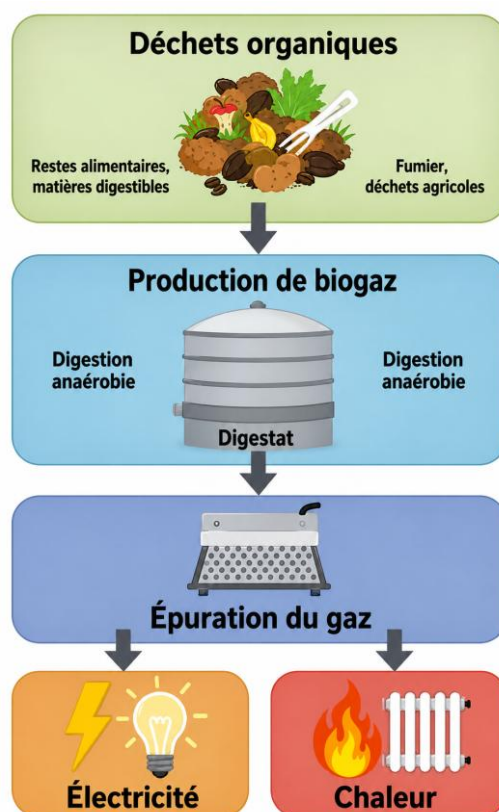


Figure 5.2 — Chaîne de conversion énergétique d'un système de cogénération

Tableau 5.1 — Rendements types

Technologie	Rendement
Petit générateur	20–30 % électrique
Système CHP	70–85 % global

5.4. Épuration du biogaz

Le biogaz brut peut être épuré en biométhane en retirant notamment le CO_2 , le H_2S et la vapeur d'eau. L'épuration augmente la concentration en méthane, améliore la qualité du combustible, permet l'utilisation comme carburant pour véhicules et facilite le stockage et le transport. Un biométhane épuré contient typiquement plus de 95 % de méthane et moins de 5 % de CO_2 .

Les technologies courantes comprennent :

- **lavage à l'eau** : le CO_2 est absorbé dans l'eau ;
- **lavage chimique** : des solutions chimiques absorbent les impuretés ;
- **séparation membranaire** : des membranes sélectives séparent les gaz ;
- **adsorption modulée en pression (PSA)** : des adsorbants moléculaires séparent le méthane des autres gaz.

5.5. Options de stockage du biogaz

Le stockage permet d'utiliser ultérieurement le gaz produit lorsque la demande est faible et d'équilibrer production et consommation.

1. **Sacs souples de gaz** : solution simple, peu coûteuse et facile à installer, courante dans les petites exploitations et les communautés rurales.
2. **Cloche flottante** : assure une pression relativement constante et est couramment utilisée dans les installations domestiques.
3. **Bouteilles haute pression** : utilisées après épuration du biogaz en biométhane pour les applications nécessitant un gaz de haute qualité, notamment le carburant pour transport et la distribution commerciale.

Tableau 5.2 — Comparaison des systèmes de stockage

Type de stockage	Coût	Capacité	Pression
Sac de gaz	Faible	Moyenne	Faible
Cloche flottante	Moyen	Moyenne	Moyenne
Bouteille	Élevé	Élevée	Élevée

Application pratique — Conception et évaluation d'un système d'utilisation

Scénario : une coopérative produit 120 m³ de biogaz par jour. Le gaz doit répondre aux besoins de cuisson communautaire, de séchage des céréales et d'une petite production d'électricité.

Les apprenants doivent :

1. estimer la demande de gaz de chaque usage ;
2. sélectionner les technologies adaptées à la cuisson, au séchage et à la production électrique ;
3. dessiner un réseau simple de distribution ;
4. recommander le stockage le plus approprié ;
5. comparer la faisabilité économique des options retenues.

Compétence attendue : mettre en relation la production de biogaz avec des technologies d'usage adaptées et concevoir un système pratique d'utilisation.

Étude de cas — Unité de transformation du manioc alimentée au biogaz au Ghana

Une coopérative ghanéenne de transformation du manioc a installé une unité utilisant des épluchures de manioc et des eaux usées comme matières premières. Le biogaz est utilisé pour la cuisson des travailleurs, pour la chaleur nécessaire au séchage du manioc et pour la production d'électricité destinée à l'éclairage et aux machines. Les bénéfices comprennent une réduction de la consommation de diesel, des coûts d'exploitation plus faibles, une meilleure gestion des déchets et un revenu supplémentaire issu de la vente de biofertilisant provenant du lisier digéré.

Quiz

1. Comparez les avantages et les limites de l'utilisation du biogaz pour la cuisson, la production d'électricité et la production de biométhane.
2. Un générateur à biogaz reçoit une énergie combustible équivalente à 200 kWh/jour et produit 55 kWh/jour d'électricité. Calculez le rendement électrique.

5.6. Résumé du chapitre

Ce chapitre a examiné les principales voies de valorisation du biogaz : cuisson, chauffage, production d'électricité, épuration et stockage. Les apprenants ont étudié les exigences d'épuration du gaz, les technologies de générateurs, les systèmes CHP, les méthodes d'épuration et les options de stockage. Les exercices de conception et études de cas ont permis de développer la capacité à évaluer les technologies et à recommander des solutions en fonction des besoins énergétiques locaux. Ces compétences complètent la chaîne de valeur du biogaz, depuis l'évaluation des matières premières et l'optimisation du digesteur jusqu'à l'utilisation finale de l'énergie.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Quels sont les principaux composants du biogaz brut ?
2. Pourquoi l'épuration du gaz est-elle nécessaire avant son utilisation ?
3. Expliquez le fonctionnement d'un réchaud à biogaz.
4. Comparez la cuisson et la production d'électricité comme voies d'utilisation du biogaz.
5. Qu'est-ce qu'un système de cogénération (CHP) ?
6. Décrivez quatre technologies d'épuration du biogaz.
7. Pourquoi le biométhane est-il considéré comme un combustible de haute qualité ?
8. Comparez différents systèmes de stockage du gaz.
9. Discutez des bénéfices de l'utilisation du biogaz dans les communautés rurales.
10. Expliquez comment le biogaz peut contribuer au développement agro-industriel en Afrique de l'Ouest.
11. Calculez le rendement électrique d'un générateur produisant 70 kWh à partir de 250 kWh d'énergie combustible.
12. Un système CHP reçoit 400 kWh d'énergie combustible et produit 100 kWh d'électricité ainsi que 180 kWh de chaleur utile. Calculez le rendement global.
13. Recommandez un système d'utilisation adapté à une coopérative de transformation du manioc produisant 100 m³/jour de biogaz.

BM-A2

Conception des systèmes de gazéification de biomasse et analyse des performances

Objectifs d'apprentissage

À la fin de ce cours, les stagiaires seront capables de :

- concevoir des systèmes de gazéification de biomasse ;
- analyser les procédés de gazéification et les performances des réacteurs ;
- évaluer la qualité et les usages du gaz de synthèse ;
- optimiser l'efficacité d'un système de gazéification.

BM-A2-1

Fondamentaux de la gazéification et conception des réacteurs

Acquis d'apprentissage du chapitre

À l'issue de ce chapitre, les stagiaires seront capables de :

- expliquer les principes de la gazéification de biomasse ;
- décrire les étapes du procédé de gazéification ;
- distinguer les gazéificateurs à lit fixe et à lit fluidisé ;
- sélectionner un type de gazéificateur en fonction de la matière première et de l'application ;
- appliquer des critères de sélection des réacteurs pour une conception efficace.

1.1. Introduction à la gazéification de biomasse

La gazéification de biomasse est un procédé thermochimique qui transforme des matières carbonées issues de la biomasse en un mélange gazeux combustible appelé gaz de synthèse ou *syngas*. Contrairement à la combustion directe, qui brûle complètement la biomasse en présence d'un excès d'oxygène, la gazéification se déroule avec une quantité limitée d'oxygène. Cette oxydation partielle transforme la biomasse en combustibles gazeux utiles plutôt qu'en la brûlant entièrement. Les matières premières courantes comprennent les copeaux de bois, les résidus agricoles, les déchets forestiers, les cultures énergétiques et les déchets organiques municipaux.

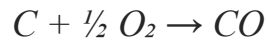
Le gaz de synthèse peut être utilisé pour la production d'électricité, la production de chaleur, la cogénération de chaleur et d'électricité (CHP), la fabrication de carburants de synthèse et la production de produits chimiques.

1.2. Principes de la gazéification

La gazéification transforme la biomasse solide en gaz combustibles au moyen de réactions physiques et chimiques qui se produisent généralement entre 700 °C et 1 200 °C.

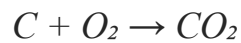
a) Oxydation partielle

Le carbone réagit avec une quantité limitée d'oxygène pour former du monoxyde de carbone. Cette réaction libère la chaleur nécessaire aux autres réactions de gazéification.



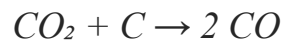
b) Oxydation complète

Une partie du carbone brûle complètement et produit du dioxyde de carbone, fournissant une chaleur supplémentaire.



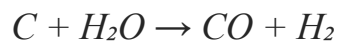
c) Réaction de Boudouard

Le dioxyde de carbone réagit avec le carbone pour former du monoxyde de carbone.



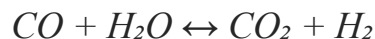
d) Réaction eau-gaz

La vapeur d'eau réagit avec le carbone pour former du monoxyde de carbone et de l'hydrogène. L'hydrogène produit contribue à la qualité énergétique du gaz.



e) Réaction de conversion eau-gaz

Le monoxyde de carbone réagit avec la vapeur d'eau pour former de l'hydrogène et du dioxyde de carbone. Cette réaction est importante pour les gaz de synthèse riches en hydrogène.



f) Méthanation

Le monoxyde de carbone réagit avec l'hydrogène pour produire du méthane, ce qui augmente le pouvoir calorifique du gaz de synthèse.



1.3. Étapes de la gazéification de biomasse

Le procédé comprend quatre étapes principales.

a) Séchage

L'humidité est éliminée de la biomasse à des températures pouvant atteindre environ 200 °C. Une forte humidité réduit l'efficacité du réacteur, augmente la consommation d'énergie et diminue la qualité du gaz de synthèse. Il est donc préférable d'utiliser une matière relativement sèche.

b) Pyrolyse

Entre environ 200 °C et 600 °C, la biomasse se décompose en absence d'oxygène et produit du charbon, des goudrons et des gaz volatils.

c) Zone d'oxydation

Une combustion partielle se produit entre environ 800 °C et 1 200 °C. Elle fournit la chaleur nécessaire aux réactions endothermiques de gazéification et maintient la température du réacteur.

d) Zone de réduction

Les réactions de gazéification transforment le charbon en gaz combustibles, principalement CO, H₂ et CH₄. Le méthane contribue particulièrement au pouvoir calorifique du gaz.

1.4. Composition et propriétés du gaz de synthèse

La composition dépend de la matière première, du type de réacteur et des conditions d'exploitation. Ces facteurs déterminent la qualité et la valeur énergétique du gaz et donc son aptitude à la production d'électricité ou à des usages chimiques.

Tableau 1.1 — Composition type du gaz de synthèse

Composant	Plage type (%)
Monoxyde de carbone (CO)	15–30
Hydrogène (H ₂)	10–25
Méthane (CH ₄)	1–10
Dioxyde de carbone (CO ₂)	5–20
Azote (N ₂)	20–50

Les propriétés importantes sont :

- **pouvoir calorifique** : quantité d'énergie contenue dans le gaz ;
- **propreté du gaz** : de faibles niveaux de goudrons et de particules améliorent son utilisation ;
- **teneur en hydrogène** : une teneur plus élevée est recherchée pour certaines synthèses de carburants et applications de production d'énergie.

1.5. Types de gazéificateurs

1.5.1. Gazéificateurs à lit fixe

Dans un lit fixe, la biomasse reste dans un lit relativement stationnaire traversé par un agent gazéifiant comme l'air ou la vapeur.

1. Gazéifieur à contre-courant (updraft). La biomasse est introduite par le haut, l'air entre par le bas et le gaz sort en partie supérieure. Il présente une bonne efficacité thermique, peut accepter une biomasse relativement humide et reste simple à construire. En revanche, le gaz présente généralement une forte

teneur en goudrons et exige un traitement supplémentaire. Cette technologie est courante dans les systèmes de chauffage de petite taille et les applications rurales.

2. Gazéifieur co-courant (downdraft). La biomasse et l'air se déplacent globalement vers le bas et le gaz sort en partie inférieure. Les principaux avantages sont une production de goudrons plus faible, un gaz plus propre et une bonne adaptation aux moteurs. Les limites sont la sensibilité à l'humidité des matières premières et une capacité généralement limitée pour les très grandes installations. Il est souvent utilisé pour de petites centrales et des moteurs à combustion interne.

3. Gazéifieur à courant transversal (crossdraft). L'air entre d'un côté du réacteur et le gaz sort du côté opposé. Cette configuration répond rapidement aux variations de charge et est compacte, mais présente une distribution de température moins uniforme et une flexibilité limitée vis-à-vis du combustible. Elle est surtout adaptée aux petits systèmes industriels.

1.5.2. Gazéificateurs à lit fluidisé

Dans un lit fluidisé, les particules de biomasse sont mises en suspension par un courant d'air, d'oxygène ou de vapeur. Le lit se comporte comme un fluide, ce qui améliore le mélange et le transfert de chaleur.

Lit fluidisé bouillonnant (BFB). Il fonctionne avec des vitesses de gaz relativement faibles, assure une exploitation stable, une température uniforme, une conversion élevée et une bonne flexibilité de matière première. Il est adapté aux installations de taille moyenne.

Lit fluidisé circulant (CFB). Il emploie des vitesses plus élevées qui entraînent une circulation continue des particules. Il offre un débit important, une excellente flexibilité de combustible et convient aux installations industrielles de grande taille, notamment les centrales et unités de conversion biomasse-carburants.

Tableau 1.2 — Comparaison des gazéificateurs à lit fixe et à lit fluidisé

Paramètre	Lit fixe	Lit fluidisé
Échelle	Petite à moyenne	Moyenne à grande
Flexibilité de matière première	Modérée	Élevée
Uniformité de température	Plus faible	Plus élevée
Production de goudrons	Modérée à élevée	Plus faible
Complexité	Faible	Plus élevée
Coût d'investissement	Plus faible	Plus élevé
Efficacité	Modérée	Élevée

1.6. Critères de sélection du réacteur

La sélection d'un gazéifieur dépend notamment :

- **des caractéristiques de la matière première :** humidité, granulométrie, teneur en cendres et densité énergétique ;

- **de la capacité souhaitée** : les lits fixes conviennent souvent aux petites capacités, les lits fluidisés aux installations plus importantes ;
- **des exigences de qualité du gaz** : les applications nécessitant un gaz très propre peuvent favoriser des gazéificateurs co-courant ou des lits fluidisés avancés ;
- **des aspects économiques** : investissement, coût d'exploitation, maintenance et durée de vie ;
- **des exigences environnementales** : émissions, gestion des déchets et empreinte carbone ;
- **de la fiabilité d'exploitation** : robustesse, facilité de maintenance, disponibilité de la matière première et stabilité du procédé.

1.7. Résumé du chapitre

La gazéification est un procédé thermochimique qui convertit la biomasse en gaz de synthèse sous apport limité d'oxygène. Elle comprend le séchage, la pyrolyse, l'oxydation et la réduction. Le gaz obtenu contient principalement CO, H₂, CH₄, CO₂ et N₂. Les systèmes emploient surtout des réacteurs à lit fixe ou à lit fluidisé. Les lits fixes sont simples et adaptés aux petites installations ; les lits fluidisés offrent un meilleur mélange, une efficacité supérieure et une plus grande flexibilité des matières premières pour les capacités plus importantes. Le choix du réacteur repose sur la matière première, la capacité, la qualité du gaz, les coûts, les exigences environnementales et la fiabilité.

Questions de révision de fin de chapitre

I. Questions à choix multiple

1. Quel est le principal produit de la gazéification de biomasse ? a) cendres ; b) vapeur ; c) gaz de synthèse ; d) charbon de bois.
2. Quelle étape élimine l'humidité de la biomasse ? a) réduction ; b) séchage ; c) oxydation ; d) méthanation.
3. Quel type de gazéificateur produit généralement le moins de goudrons ? a) contre-courant ; b) co-courant ; c) courant transversal ; d) lit fixe uniquement.
4. Quel type de réacteur présente la meilleure uniformité de température ? a) contre-courant ; b) courant transversal ; c) lit fluidisé ; d) co-courant.
5. La réaction eau-gaz produit : a) CO₂ et CH₄ ; b) CO et H₂ ; c) O₂ et H₂ ; d) CO₂ et O₂.

II. Questions à réponse courte

1. Définissez la gazéification de biomasse.
2. Expliquez les quatre étapes de la gazéification.
3. Décrivez les différences entre les gazéificateurs à contre-courant et co-courant.
4. Donnez trois avantages des gazéificateurs à lit fluidisé.
5. Identifiez cinq critères de sélection d'un réacteur de gazéification.

III. Questions de discussion

1. Comparez l'adéquation des lits fixes et des lits fluidisés pour des projets d'électrification rurale.
2. Discutez de l'influence des propriétés de la matière première sur les performances du gazéifieur.
3. Expliquez pourquoi la qualité du gaz de synthèse est importante pour les applications en aval.
4. Évaluez les facteurs économiques et environnementaux influençant la sélection d'un gazéifieur.
5. Proposez une technologie de gazéification adaptée à une unité de transformation agricole et justifiez votre choix.

Paramètres d'exploitation et contrôle du procédé

Acquis d'apprentissage du chapitre

À l'issue de ce chapitre, les stagiaires seront capables de :

- analyser l'effet des paramètres d'exploitation sur les performances de gazéification ;
- réguler les conditions du réacteur afin de maximiser l'efficacité ;
- évaluer l'influence des propriétés de la matière première sur la production de gaz de synthèse ;
- optimiser les rapports air/combustible et les profils de température ;
- appliquer des techniques de contrôle de procédé aux installations commerciales.

2.1. Introduction au contrôle du procédé

Les performances d'un système de gazéification dépendent fortement du maintien de conditions d'exploitation adaptées. De faibles variations de température, de débit d'air ou de qualité de la biomasse peuvent modifier la composition du gaz, l'efficacité de conversion, la formation de goudrons, la stabilité du réacteur et la durée de vie des équipements. Un contrôle efficace favorise une qualité de gaz constante, une récupération énergétique maximale, une exploitation sûre, une réduction des émissions et de meilleures performances économiques.

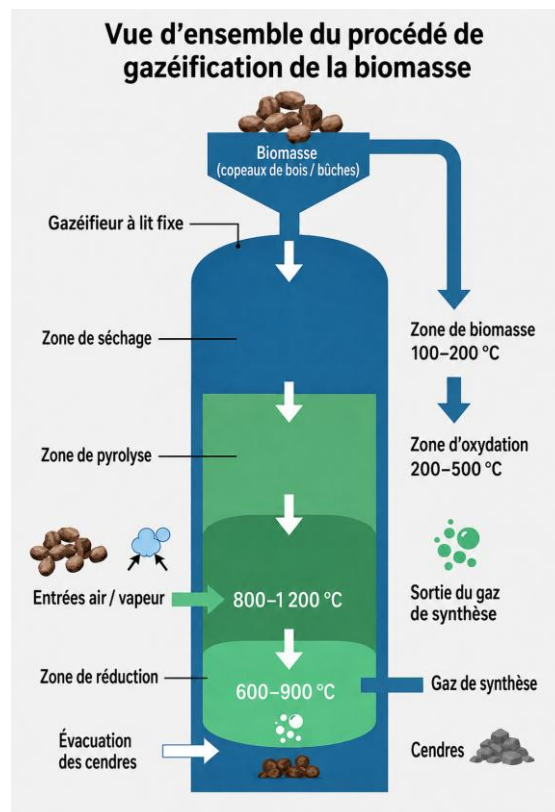


Figure 2.1 — Vue d'ensemble du procédé de gazéification de biomasse

2.2. Effets de la température

La température est le paramètre d'exploitation le plus critique. Les zones caractéristiques sont :

- séchage : 100–200 °C ;
- pyrolyse : 250–600 °C ;
- oxydation : 800–1 200 °C ;
- réduction : 700–1 000 °C.

2.2.1. Température trop basse

Une température inférieure à l'optimum entraîne une gazéification incomplète, une formation accrue de goudrons, une production d'hydrogène plus faible et une conversion du charbon moins complète. L'efficacité globale diminue.

2.2.2. Température élevée

Une température plus élevée peut améliorer la conversion du carbone, la qualité du gaz et la production d'hydrogène tout en réduisant les goudrons. Toutefois, une température excessive peut provoquer la fusion des cendres, le mâcheférage et la détérioration des réfractaires. La température doit donc rester dans la plage adaptée au réacteur et à la matière première.

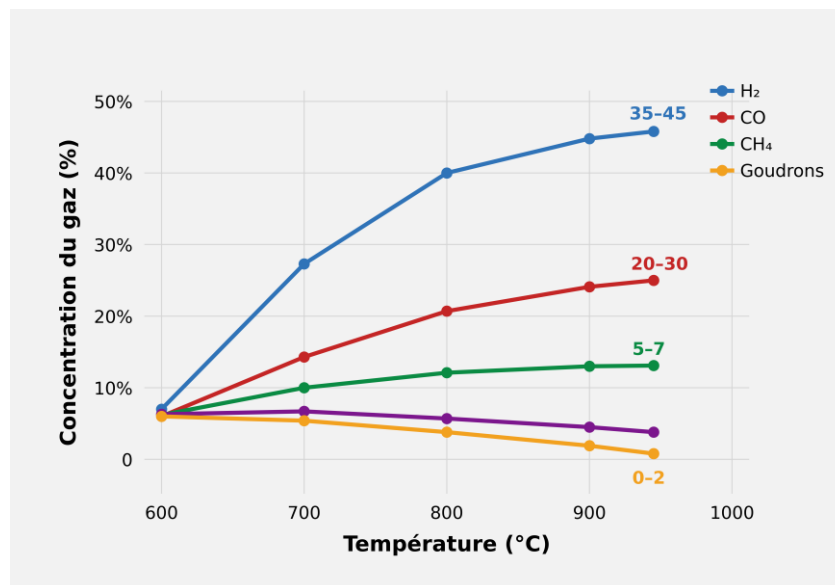


Figure 2.2 — Effet de la température sur les produits de gazéification

Exercice pratique — Chute de température dans un gazéifieur co-courant

Un gazéifieur fonctionne normalement à 850 °C. La température tombe à 650 °C. Prévoyez :

1. l'évolution de la formation de goudrons ;
2. l'effet sur la qualité du gaz ;
3. les problèmes d'exploitation susceptibles d'apparaître.

2.3. Effets de la pression

Les gazéifieurs peuvent fonctionner à pression atmosphérique ou sous pression.

Gazéification atmosphérique : conception plus simple, investissement inférieur et maintenance plus aisée.

Gazéification pressurisée : débit de gaz plus élevé, meilleure capacité du réacteur et intégration favorable aux turbines à gaz, mais coût d'investissement et complexité du contrôle plus importants.

La pression influence la cinétique des réactions, le temps de séjour du gaz, la formation de méthane et le dimensionnement des équipements. Une pression plus élevée favorise généralement la méthanation et peut augmenter le pouvoir calorifique, mais exige des équipements plus robustes et coûteux.

2.4. Rapport air/combustible (AFR)

Le rapport air/combustible (Air-Fuel Ratio — AFR) indique la masse d'air apportée par rapport à la masse de biomasse alimentée.

$$AFR = \text{Masse d'air fournie} / \text{Masse de biomasse alimentée} \dots (2.1)$$

La gazéification repose sur une oxydation partielle ; le besoin en air est donc typiquement de l'ordre de 0,2 à 0,4 de la quantité stœchiométrique nécessaire à une combustion complète.

- **Excès d'air** : davantage de combustion complète, pouvoir calorifique du gaz plus faible, qualité réduite et dilution accrue par l'azote.
- **Air insuffisant** : température de réacteur trop faible, conversion incomplète, formation excessive de goudrons et instabilité.

Exemple : un gazéifieur consomme 120 kg/h de biomasse et reçoit 180 kg/h d'air. L'AFR vaut $180/120 = 1,5$. Les opérateurs doivent vérifier si ce rapport convient à leur type de réacteur et aux objectifs de gazéification, puis le corriger si nécessaire.

2.5. Propriétés de la matière première

1. Humidité

L'humidité recommandée est généralement de 10–20 %. Une humidité élevée abaisse la température du réacteur, augmente l'énergie nécessaire au séchage et réduit l'efficacité.

$$\text{Humidité (\%)} = ((\text{Masse humide} - \text{Masse sèche}) / \text{Masse humide}) \times 100 \dots (2.2)$$

2. Granulométrie

De grosses particules peuvent être mal converties en raison d'une pénétration thermique insuffisante. Des particules trop fines peuvent augmenter la perte de charge et la production de poussières.

3. Teneur en cendres

Une forte teneur en cendres peut entraîner le mâcheférage, la formation de clinker et l'agglomération du lit. Les copeaux de bois présentent souvent 1–3 % de cendres, les balles de riz 15–25 % et les pailles 5–15 %.

4. Masse volumique apparente

Une masse volumique apparente plus élevée améliore la régularité de l'alimentation, peut accroître la capacité de traitement et réduit le volume de stockage nécessaire.

2.6. Systèmes de contrôle du gazéifieur

Les installations modernes emploient des systèmes automatisés.

- **Capteurs courants** : thermocouples, transmetteurs de pression, débitmètres d'air et de biomasse, analyseurs de gaz et capteurs d'oxygène.
- **Boucles de régulation** : contrôle du débit d'air, du débit d'alimentation en biomasse, de la température du réacteur et de la pression.
- **Systèmes de contrôle distribué (DCS)** : suivi continu des conditions, gestion des alarmes, enregistrement des données et optimisation de l'exploitation.

2.7. Résumé du chapitre

Les performances de gazéification reposent sur la maîtrise de la température, de la pression, de l'AFR et des propriétés de la matière première. Une température trop basse entraîne une conversion incomplète et davantage de goudrons ; une température excessive peut endommager le réacteur. L'AFR doit rester dans une plage compatible avec l'oxydation partielle : trop d'air réduit la qualité du gaz, trop peu d'air déstabilise le procédé. L'humidité, la granulométrie, les cendres et la masse volumique apparente influencent également fortement le fonctionnement. Les systèmes automatisés, les capteurs et les DCS permettent de suivre et réguler ces paramètres en temps réel afin d'améliorer la qualité du gaz, l'efficacité, la sécurité et la fiabilité.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Pourquoi la température est-elle considérée comme le paramètre le plus important de gazéification ?
2. Quel est l'effet d'un apport d'air excessif sur la qualité du gaz de synthèse ?
3. Expliquez l'effet d'une forte humidité sur le rendement du réacteur.
4. Comparez les systèmes de gazéification atmosphériques et pressurisés.
5. Décrivez le rôle de l'instrumentation dans la régulation d'un gazéifieur.

Production et épuration du gaz de synthèse

Acquis d'apprentissage du chapitre

À l'issue de ce chapitre, les stagiaires seront capables de :

- analyser la composition et la qualité du gaz de synthèse ;
- évaluer les contaminants du gaz de gazéification ;
- sélectionner des technologies appropriées d'élimination des goudrons ;
- concevoir des systèmes d'épuration pour différentes applications ;
- évaluer l'aptitude du gaz aux moteurs, turbines et procédés industriels.

3.1. Composition du gaz de synthèse

Le gaz de synthèse est le gaz combustible produit pendant la gazéification. Sa composition dépend de la matière première, du réacteur et des conditions d'exploitation. Dans les installations utilisant des biomasses ouest-africaines, les plages indiquées dans la source sont généralement : CO 15–30 %, H₂ 10–25 %, CH₄ 1–10 %, CO₂ 5–20 % et N₂ 20–50 %.

La qualité exigée dépend de l'usage. Pour des moteurs de production d'électricité rurale, le gaz doit contenir peu de goudrons et de poussières et présenter un pouvoir calorifique stable. Les turbines à gaz nécessitent un gaz très propre, avec une faible teneur en alcalins et en particules fines. La production chimique exige un rapport H₂/CO précis et une grande pureté.

3.2. Contaminants du gaz

1. Goudrons

Les goudrons sont des hydrocarbures lourds formés pendant la pyrolyse. Ils peuvent obstruer les conduites, endommager moteurs et brûleurs et réduire l'efficacité. Leur élimination est donc essentielle, notamment avec des matières comme les épiluchures de manioc, les balles de riz et les copeaux de bois.

2. Matières particulaires

Les particules comprennent le charbon fin, les cendres et les poussières transportées avec le gaz. Elles peuvent bloquer les conduites et détériorer les équipements. Une épuration efficace est particulièrement importante avec des matières à forte teneur en cendres comme les balles de riz.

3. Métaux alcalins

Le sodium et le potassium présents dans certaines biomasses peuvent provoquer corrosion et encrassement des turbines, échangeurs et autres équipements à haute température.

3.3. Techniques d'élimination des goudrons

a) Réduction primaire

La réduction primaire se produit dans le réacteur lui-même grâce à une température élevée, à des lits catalytiques ou à une conception optimisée comme le gazéifieur co-courant. Elle diminue la charge imposée aux systèmes d'épuration en aval et peut être avantageuse pour les petites installations.

b) Traitement secondaire

Les traitements en aval comprennent :

- **séparateurs cycloniques** : éliminent surtout les particules grossières et une partie des goudrons ; ils sont simples, économiques et faciles à maintenir ;
- **laveurs humides** : des pulvérisations d'eau éliminent des goudrons, poussières et gaz solubles ;
- **craquage catalytique** : transforme une partie des goudrons en gaz combustibles et peut ainsi améliorer le rendement gazeux et la qualité du syngas.

3.4. Systèmes d'épuration

1. Cyclones

Les cyclones éliminent principalement les particules de taille supérieure à environ 10 μm . Ils ne comportent pas de pièces mobiles et sont souvent utilisés comme première étape.

2. Filtres à manches

Ils assurent une filtration fine pouvant atteindre environ 99 % de collecte des particules. Une maintenance régulière est nécessaire pour éviter le colmatage.

3. Électrofiltres

Les précipitateurs électrostatiques utilisent un champ électrique pour capturer les particules fines. Leur coût supérieur les destine surtout aux grandes installations industrielles.

4. Filtres à charbon actif

Ils permettent d'éliminer certains contaminants organiques, composés soufrés et odeurs et sont utiles lorsqu'un gaz plus propre est requis.

3.5. Évaluation de la qualité du gaz

Les paramètres principaux sont : pouvoir calorifique, concentration en goudrons, charge en particules, teneur en hydrogène et humidité. Dans les conditions ouest-africaines, la fréquence de suivi peut être quotidienne ou hebdomadaire en fonction de l'échelle de l'installation. Des kits de terrain et des analyses de laboratoire de base permettent d'identifier rapidement les dérives. Une bonne qualité du gaz améliore les performances des moteurs, réduit les coûts de maintenance et augmente l'efficacité globale.

3.6. Résumé du chapitre

La qualité du gaz de synthèse détermine la réussite des usages en aval tels que la cuisson, la production d'électricité et la chaleur industrielle. Une mauvaise qualité endommage les équipements, réduit l'efficacité et augmente les coûts de maintenance. Un système d'épuration efficace associe des mesures de réduction des goudrons dans le réacteur et des opérations en aval — cyclones, laveurs humides, filtres à manches et charbon actif. Le suivi régulier du pouvoir calorifique, des goudrons, des particules et de l'humidité permet de maintenir une exploitation fiable et améliore la viabilité économique des projets.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Citez les principaux composants du gaz de synthèse.
2. Pourquoi les goudrons constituent-ils un problème d'exploitation majeur ?
3. Comparez un séparateur cyclonique et un filtre à manches.
4. Expliquez le rôle du craquage catalytique des goudrons.
5. Discutez des exigences de qualité du gaz de synthèse pour les moteurs.

Évaluation des performances du système

Acquis d'apprentissage du chapitre

À l'issue de ce chapitre, les stagiaires seront capables de :

- calculer l'efficacité de gazéification ;
- réaliser une analyse du bilan énergétique ;
- évaluer les indicateurs de performance ;
- identifier les causes de pertes d'efficacité ;
- recommander des mesures d'amélioration.

4.1. Évaluation de l'efficacité de gazéification

Deux indicateurs importants sont le rendement gaz froid (Cold Gas Efficiency — CGE) et le rendement de conversion du carbone (Carbon Conversion Efficiency — CCE).

a) Rendement gaz froid (CGE)

Le CGE indique la part de l'énergie de la biomasse transférée au gaz de synthèse.

$$CGE (\%) = (\text{Énergie du gaz de synthèse} / \text{Énergie de la biomasse}) \times 100 \dots (4.1)$$

Dans des systèmes correctement exploités, les valeurs types indiquées dans la source sont de 60–85 %.

b) Rendement de conversion du carbone (CCE)

Le CCE mesure la fraction du carbone de la matière première convertie en produits gazeux.

$$CCE (\%) = (\text{Carbone converti en gaz} / \text{Carbone de la matière première}) \times 100 \dots (4.2)$$

Les valeurs types mentionnées sont de 80–98 %. Cet indicateur aide à évaluer les pertes sous forme de charbon non converti.

4.2. Calcul du bilan énergétique

Le bilan énergétique indique où l'énergie entre, est convertie et se perd. L'énergie entrante provient surtout de la biomasse, avec éventuellement des contributions de l'air et de la vapeur. L'énergie sortante comprend l'énergie du gaz de synthèse, les pertes thermiques, l'énergie emportée par les cendres chaudes et celle contenue dans le charbon non converti.

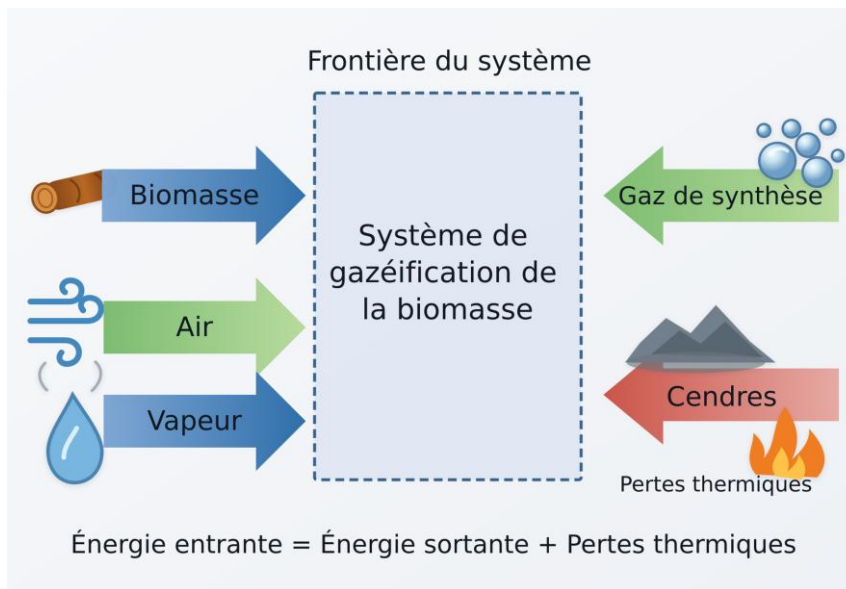


Figure 4.3 — Schéma-blocs du bilan énergétique

Exemple : un gazéifieur reçoit 500 kW d'énergie sous forme de biomasse et produit un gaz de synthèse d'une puissance énergétique de 350 kW.

$$CGE = (350 / 500) \times 100 = 70 \%$$

Cela signifie que 70 % de l'énergie de la biomasse a été convertie en énergie utile dans le gaz, les 30 % restants correspondant à diverses pertes.

4.3. Analyse des pertes thermiques

Les principales pertes sont le rayonnement des parois chaudes du réacteur, la convection par les gaz, l'énergie du charbon non converti et la chaleur emportée avec les cendres. Une meilleure isolation, une conception appropriée et un contrôle du procédé réduisent ces pertes.

4.4. Indicateurs de performance

Les principaux indicateurs utilisés en exploitation sont :

- CGE : conversion globale de l'énergie ;
- CCE : utilisation du carbone ;
- rendement en goudrons : qualité du gaz et efficacité de leur réduction ;
- production spécifique de gaz : productivité du réacteur par kilogramme de biomasse ;
- rendement thermique : performance énergétique globale.



Figure 4.2 — Tableau de bord de performance d'un système de gazéification

Une évaluation régulière permet d'identifier les problèmes tels qu'une forte teneur en goudrons, un pouvoir calorifique faible ou une conversion insuffisante et d'appliquer des actions correctives portant sur la température, l'alimentation, le rapport air/combustible, l'humidité ou le système d'épuration.

4.5. Résumé du chapitre

L'évaluation des performances repose notamment sur le CGE et le CCE, l'analyse de la qualité du gaz et les bilans énergétiques. Les calculs de bilan permettent de localiser les pertes par rayonnement, convection, cendres chaudes ou charbon non converti. Un suivi régulier, associé à un dépannage méthodique des problèmes de goudrons, de pouvoir calorifique ou de conversion, améliore l'efficacité, réduit les arrêts et renforce la fiabilité et l'économie de l'installation.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez le rendement gaz froid (CGE).
2. Expliquez le rendement de conversion du carbone (CCE).
3. Décrivez les sources courantes de pertes thermiques.
4. Calculez le CGE d'un système recevant 600 kW d'énergie de biomasse et produisant 420 kW dans le gaz de synthèse.
5. Proposez des solutions en cas de production excessive de goudrons.

Applications de la gazéification

Acquis d'apprentissage du chapitre

À l'issue de ce chapitre, les stagiaires seront capables de :

- évaluer des applications pratiques de gazéification ;
- concevoir des systèmes pour la production de chaleur ;
- évaluer les possibilités de production d'électricité ;
- appliquer la gazéification à la chaleur de procédé industrielle ;
- analyser les bénéfices économiques et environnementaux.

5.1. Applications thermiques

L'utilisation directe du gaz de synthèse pour la chaleur est souvent la voie la plus efficace. Le gaz chaud est brûlé afin de fournir de la chaleur pour le séchage des cultures, les fours de briqueterie, les chaudières de production de vapeur ou les industries alimentaires. Les principaux avantages sont une efficacité globale élevée, des équipements moins coûteux que pour la production d'électricité et une réduction importante de la consommation de combustibles fossiles.

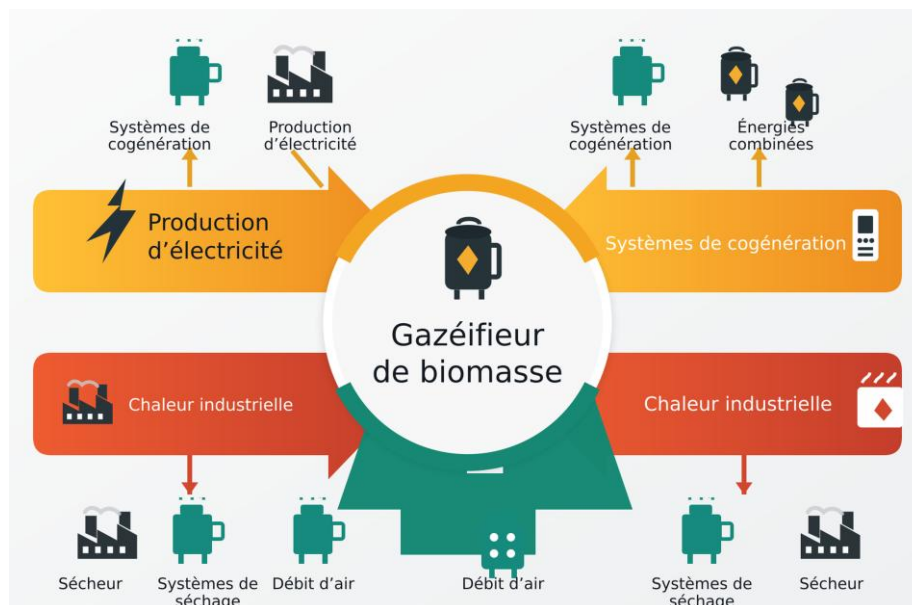


Figure 5.1 — Carte des applications de la gazéification de biomasse

5.2. Production d'électricité

a) Moteurs à combustion interne

Technologie éprouvée pour de petites installations, notamment l'électrification rurale et les mini-réseaux communautaires. Les moteurs sont relativement abordables et faciles à maintenir, à condition de disposer d'un gaz suffisamment épuré.

b) Turbines à gaz

Elles conviennent à des puissances plus élevées et à des installations industrielles ou raccordées au réseau. Elles exigent un gaz de synthèse de très haute qualité.

c) Cogénération (CHP)

La cogénération produit simultanément de l'électricité et de la chaleur utile à partir du même gaz. Les rendements globaux indiqués dans la source se situent typiquement entre 70 et 90 %. La valorisation de la chaleur améliore l'utilisation de l'énergie et l'économie du projet.

5.3. Chaleur de procédé industrielle

Le gaz de synthèse peut fournir de la chaleur à de nombreuses industries : cimenteries, industrie alimentaire, textile et céramique. Les plages de température indiquées sont :

- transformation alimentaire : 100–300 °C ;
- textile : 150–250 °C ;
- céramique : 800–1 200 °C ;
- ciment : au-dessus de 1 200 °C.

La connaissance de ces températures aide à choisir le gazéifieur et les dispositifs de récupération de chaleur adaptés à chaque procédé.

5.4. Bénéfices environnementaux

La gazéification peut réduire les émissions de gaz à effet de serre par rapport au brûlage à l'air libre des résidus ou à l'utilisation de combustibles fossiles. Elle valorise des résidus tels que les balles de riz, les épluchures de manioc, les coques de café et les déchets de bois, réduit la mise en décharge, limite la pollution et renforce la sécurité énergétique grâce à l'utilisation de ressources locales. Elle soutient ainsi une production plus propre, une meilleure gestion des déchets et l'atténuation du changement climatique.

5.5. Évaluation technico-économique

Une évaluation technico-économique permet de déterminer avant investissement si le projet est techniquement réalisable et financièrement viable. Elle prend en compte l'investissement, la disponibilité et le coût de la matière première, les dépenses d'exploitation — maintenance, main-d'œuvre et utilités — et les revenus tirés de l'électricité, de la chaleur ou d'autres produits.

Les indicateurs économiques cités sont :

- **valeur actualisée nette (VAN ; NPV dans la source)** : rentabilité globale sur la durée de vie ;
- **délai de récupération** : temps nécessaire pour récupérer l'investissement initial ;
- **taux de rentabilité interne (TRI ; IRR dans la source)** : rendement attendu de l'investissement.

Étude de cas industrielle — Unité de transformation du café

Une unité de transformation du café génère environ 2 tonnes/jour de coques de café. Un système de gazéification peut convertir ce déchet en chaleur pour les opérations de séchage. Les bénéfices potentiels

sont la réduction des déchets, la production de chaleur sur site, la baisse de consommation de diesel et une meilleure durabilité environnementale. Les stagiaires sont invités à évaluer : la disponibilité et la régularité des coques, le type de gazéifieur, la production de syngas et d'énergie attendue et la faisabilité économique globale.

5.6. Résumé du chapitre

La gazéification offre de nombreuses applications adaptées à l'Afrique de l'Ouest : séchage de cultures, fours, chaudières, transformation alimentaire, production d'électricité par moteurs ou turbines, cogénération et chaleur industrielle. Les systèmes CHP sont particulièrement intéressants parce qu'ils valorisent l'électricité et la chaleur et atteignent des rendements globaux élevés. La réussite d'un projet exige une sélection correcte du gazéifieur, une épuration et une régulation adaptées, une analyse économique intégrant l'investissement, les coûts de matière première et les indicateurs financiers, ainsi qu'une prise en compte des bénéfices environnementaux.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Quelles sont les principales applications de la gazéification de biomasse ?
2. Comparez la production d'électricité par moteur et par turbine.
3. Expliquez les bénéfices des systèmes CHP.
4. Identifiez des industries susceptibles de bénéficier de la gazéification de biomasse.
5. Réalisez une évaluation préliminaire d'un projet de gazéification de biomasse dans votre zone locale.

BM-A3

Technologies de production des biocarburants et gestion de la qualité

Objectifs d'apprentissage

À l'issue de ce cours, les stagiaires seront capables de :

- appliquer les technologies de production du biodiesel et du bioéthanol ;
- analyser l'efficacité de conversion et les performances des procédés ;
- évaluer la qualité des carburants conformément aux normes applicables ;
- mettre en œuvre des procédures appropriées de stockage et de manutention.

BM-A3-1

Technologies de production du biodiesel

1.1. Introduction

Le biodiesel est l'un des carburants liquides renouvelables les plus prometteurs pour remplacer le gazole d'origine pétrolière dans les transports, l'agriculture et la production décentralisée d'électricité. Contrairement au gazole fossile, il est obtenu à partir d'huiles et de graisses biologiques renouvelables au moyen de technologies de conversion chimique bien établies, applicables à l'échelle communautaire comme industrielle.

Dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest, la production croissante d'huiles végétales issues notamment du palmier à huile, de l'arachide, du soja, du tournesol et du jatropha, ainsi que la disponibilité grandissante d'huiles de cuisson usagées provenant des hôtels et des industries agroalimentaires, offrent des possibilités de développer des filières durables de biodiesel. Ces filières peuvent créer des emplois, réduire la dépendance vis-à-vis des carburants importés et améliorer la qualité de l'environnement.

Pour les techniciens et formateurs, la maîtrise de la production de biodiesel ne consiste pas seulement à mémoriser des réactions chimiques. Elle exige de savoir sélectionner les matières premières, exploiter les équipements en sécurité, optimiser le rendement de conversion, diagnostiquer les problèmes de procédé et vérifier la qualité du produit selon les normes internationales.

1.2. Sélection des matières premières pour la production de biodiesel

Le succès d'une installation de biodiesel commence par une sélection rigoureuse de la matière première, car la composition chimique de l'huile influe directement sur l'efficacité de production, les coûts d'exploitation et la qualité finale du carburant. La figure 1.1 illustre une démarche systématique permettant de choisir les matières premières les plus appropriées tout en réduisant les coûts et en maximisant le rendement en biodiesel.

Une matière première est ici le matériau biologique brut dont on extrait l'huile destinée à être transformée en biodiesel. Sa teneur en triglycérides détermine la quantité théorique de biodiesel pouvant être produite. Les triglycérides sont des composés naturels constitués d'une molécule de glycérol liée chimiquement à trois molécules d'acides gras. Lors de la production de biodiesel, ils sont transformés en esters méthyliques d'acides gras (FAME), qui constituent le biodiesel, tandis que le glycérol est généré comme coproduit valorisable.

Les producteurs ouest-africains disposent de plusieurs matières premières locales :

- **huile de palme** : source commercialement importante en raison de son rendement élevé à l'hectare et de sa chaîne d'approvisionnement déjà développée ;
- **Jatropha curcas** : culture pouvant pousser sur des terres marginales et ne concurrençant pas directement les cultures alimentaires, mais dont les rendements irréguliers en graines ont limité l'adoption commerciale à grande échelle dans plusieurs pays ;
- **huile d'arachide et huile de soja** : techniquement adaptées à la conversion en biodiesel mais souvent plus coûteuses sur le marché alimentaire, sauf en cas de surplus ;
- **huiles de cuisson usagées** : option particulièrement durable puisqu'elle transforme un déchet en carburant utile, mais ces huiles contiennent souvent de l'eau, des particules alimentaires et des acides gras libres qui imposent un prétraitement.

Plusieurs propriétés physiques et chimiques déterminent l'aptitude d'une matière première. La teneur en eau doit rester très faible, car l'eau réagit avec les catalyseurs alcalins et favorise la formation de savon au lieu du biodiesel, réduisant ainsi l'efficacité de conversion et compliquant la séparation des produits.

La teneur en acides gras libres (FFA, *Free Fatty Acids*) constitue un autre paramètre critique. Les acides gras libres sont des molécules d'acides gras qui ne sont plus liées au glycérol. Lorsque leur concentration dépasse environ 2 % en masse, des catalyseurs alcalins comme l'hydroxyde de sodium réagissent avec eux et forment du savon par saponification. Cette formation de savon réduit le rendement en biodiesel, consomme du catalyseur, crée des émulsions stables et augmente les coûts de purification. Dans ce cas, une estérification acide est normalement réalisée avant la transestérification afin d'abaisser la teneur en FFA.

La sélection économique de la matière première nécessite d'équilibrer le rendement en huile, le coût d'acquisition, la distance de transport, la disponibilité saisonnière, les besoins de traitement et la qualité finale du biodiesel. Ainsi, une unité de taille moyenne au Ghana peut choisir l'huile de palme brute pour sa disponibilité toute l'année, tandis qu'un projet municipal au Sénégal peut privilégier les huiles de cuisson usagées collectées dans les hôtels et restaurants afin de réduire les coûts de matière première et d'améliorer la gestion des déchets.

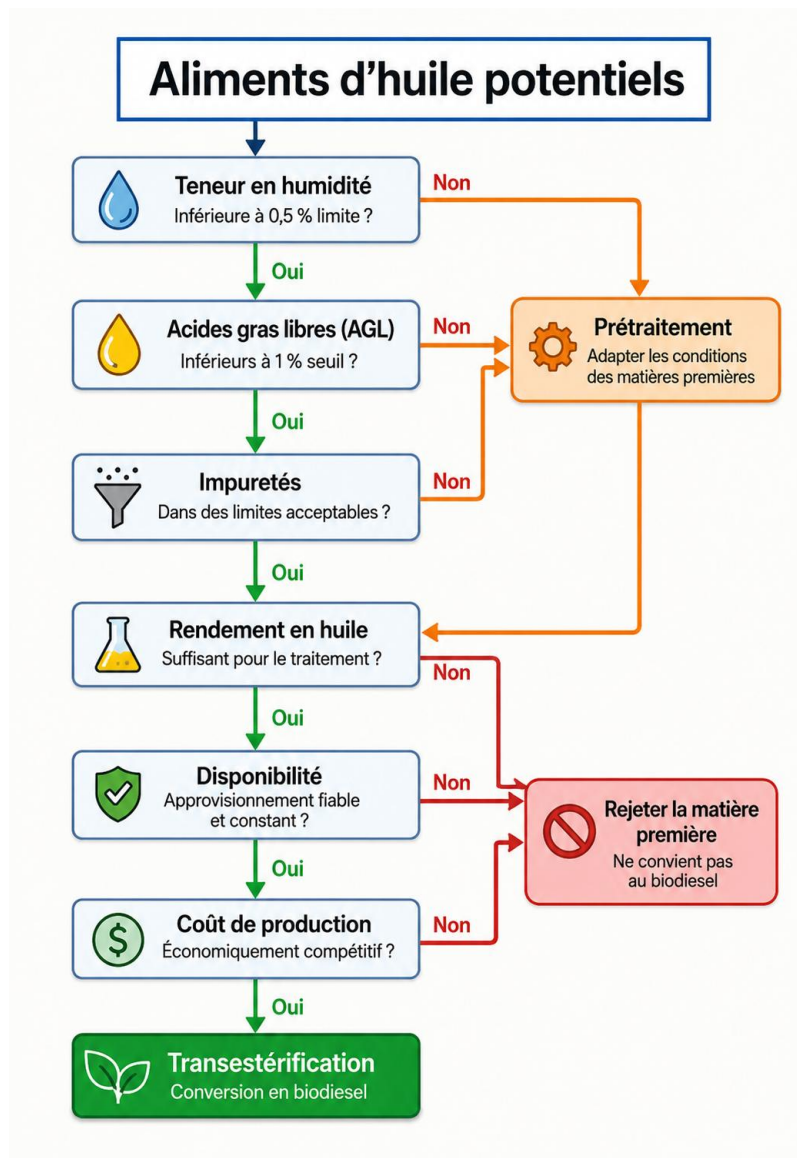


Figure 1.1 — Cadre décisionnel de sélection des matières premières pour la production de biodiesel

1.3. Procédé de transestérification

La transestérification est la principale réaction chimique utilisée pour produire le biodiesel. Elle correspond à la réaction entre des triglycérides et un alcool à chaîne courte, généralement du méthanol ou de l'éthanol, en présence d'un catalyseur, afin de produire des esters d'acides gras et du glycérol.

Le méthanol est l'alcool le plus utilisé parce qu'il réagit rapidement, reste relativement peu coûteux et permet d'obtenir un biodiesel compatible avec les normes internationales de carburant. L'hydroxyde de sodium (NaOH) et l'hydroxyde de potassium (KOH) sont les catalyseurs les plus courants dans les installations industrielles, car ils assurent une conversion élevée dans des conditions modérées.

La réaction globale s'écrit :



Bien que cette équation soit simple, la réaction se déroule en réalité en trois étapes réversibles successives. Les triglycérides sont d'abord convertis en diglycérides avec libération d'une molécule d'ester méthylique. Les diglycérides réagissent ensuite pour former des monoglycérides et une deuxième molécule d'ester.

Enfin, les monoglycérides produisent du glycérol et la dernière molécule d'ester méthylique. Un excès de méthanol déplace l'équilibre vers la formation de biodiesel conformément au principe de Le Chatelier.

Les réacteurs industriels fonctionnent généralement entre 55 °C et 65 °C, soit à proximité du point d'ébullition du méthanol. Cette température accélère la cinétique tout en limitant les pertes de méthanol par évaporation. Un mélange mécanique efficace est également indispensable, car l'huile végétale et le méthanol sont naturellement non miscibles. L'agitation augmente la surface de contact entre les réactifs, améliore le transfert de matière et accélère la réaction. Le temps de réaction est habituellement de 45 à 90 minutes selon la conception du réacteur, la concentration en catalyseur et la qualité de l'huile.

Le rapport molaire alcool/huile a une forte influence sur l'efficacité de conversion. Le rapport stœchiométrique est de 3:1, mais l'industrie utilise fréquemment environ 6:1 afin d'obtenir une conversion presque complète. L'excès de méthanol est ensuite récupéré et recyclé afin d'améliorer la rentabilité du procédé.

Exemple 1

Une installation traite 1 000 kg d'huile végétale. Le besoin recommandé en méthanol représente 20 % de la masse d'huile.

$$\text{Méthanol requis} = 0,20 \times 1\,000 = 200\text{ kg}$$

Si l'efficacité de récupération du méthanol est de 85 % :

$$\text{Méthanol récupéré} = 0,85 \times 200 = 170\text{ kg}$$

Le méthanol frais nécessaire au lot suivant est donc :

$$\text{Méthanol frais} = 200 - 170 = 30\text{ kg}$$

Cette estimation montre l'importance économique des systèmes de récupération du méthanol dans les installations commerciales.

1.4. Équipements d'une installation de production de biodiesel

Une installation commerciale comprend plusieurs unités interconnectées permettant de transformer l'huile brute en biodiesel de haute qualité de manière sûre et efficace. La figure 1.2 présente le flux complet d'une installation de taille moyenne, depuis la préparation de la matière première jusqu'au stockage final.

Les cuves de stockage reçoivent l'huile végétale brute ou l'huile de cuisson usagée avant le prétraitement. Les solides en suspension sont éliminés par filtration et l'humidité par chauffage contrôlé. Lorsque la teneur en acides gras libres dépasse la limite acceptable, un réacteur d'estérification acide permet de réduire l'acidité avant la transestérification alcaline.

Le réacteur de transestérification constitue le cœur du procédé : il assure le chauffage, le mélange et le temps de réaction requis. Après la conversion chimique, le mélange est dirigé vers une cuve de décantation ou une centrifugeuse. La phase glycérine, plus dense, se sépare alors de la phase biodiesel, plus légère. Le biodiesel brut est ensuite lavé à l'eau ou purifié à sec afin d'éliminer les résidus de catalyseur, de savon, de

méthanol et de glycérol. Enfin, un séchage élimine l'eau résiduelle avant transfert dans les cuves de stockage.

Les installations industrielles recourent de plus en plus à l'automatisation pour améliorer la sécurité et la régularité du produit :

- transmetteurs de température pour surveiller le réacteur ;
- débitmètres pour doser les réactifs ;
- capteurs de pression pour détecter les situations anormales ;
- automates programmables (PLC) pour commander automatiquement pompes et vannes selon les paramètres définis.

Cette automatisation réduit les erreurs opérateur et améliore la constance de la production. L'entretien régulier des pompes, agitateurs, échangeurs de chaleur, vannes, filtres et canalisations est essentiel, car leur défaillance diminue directement l'efficacité de production et augmente les coûts. Les formateurs doivent insister sur l'entretien préventif, la lubrification, l'inspection des joints, l'étalonnage des instruments et la manipulation sûre du méthanol. Le méthanol est toxique, très inflammable et peut provoquer des effets graves sur la santé s'il est mal manipulé.

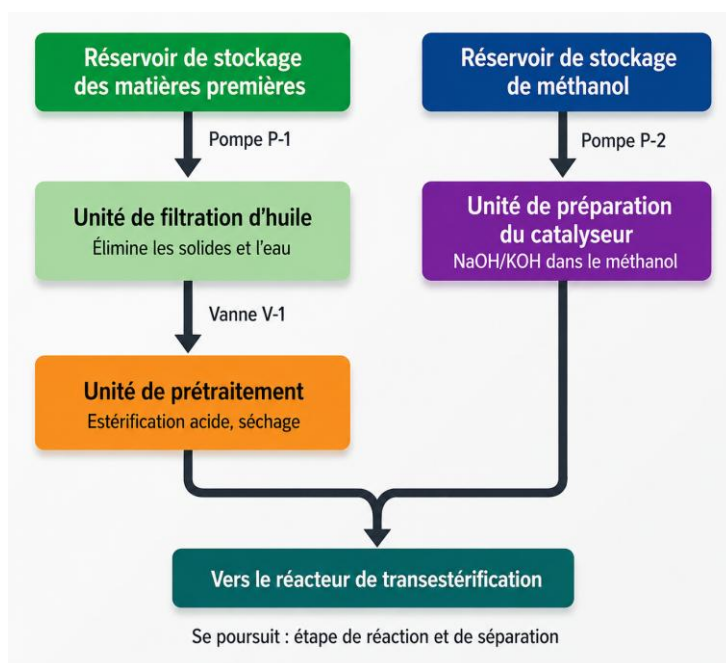


Figure 1.2 — Schéma de procédé complet d'une installation industrielle de biodiesel

Application pratique

Une coopérative de production située près de Kumasi, au Ghana, collecte environ 1 500 litres d'huile de cuisson usagée par semaine auprès des restaurants et vendeurs de nourriture. Après filtration et séchage, les techniciens déterminent la teneur en acides gras libres par titrage avant de décider si un prétraitement est nécessaire. L'huile préparée est transformée dans un réacteur discontinu de transestérification équipé d'une enveloppe chauffante électrique et d'un agitateur mécanique. Le glycérol récupéré est vendu à des fabricants locaux de savon, créant un revenu supplémentaire.

Pendant les séances de formation, les instructeurs présentent chaque étape et demandent aux stagiaires d'identifier les dangers, de calculer les quantités de méthanol, de suivre la température de réaction et de diagnostiquer des problèmes tels qu'une formation excessive de savon ou une séparation incomplète des phases. Cette approche relie les principes du génie chimique aux pratiques industrielles de la filière ouest-africaine des biocarburants.

1.5. Résumé du chapitre

La production de biodiesel repose sur la conversion efficace d'huiles riches en triglycérides en esters méthyliques d'acides gras par transestérification. Une production fiable commence par une sélection rigoureuse des matières premières, car l'humidité, les impuretés et la teneur en acides gras libres influencent fortement la réaction et la qualité du produit. Les installations industrielles doivent intégrer prétraitement, réaction contrôlée, séparation, purification, récupération du méthanol et stockage sûr. Une bonne conduite du procédé, un entretien préventif efficace et le respect strict des règles de sécurité permettent d'atteindre des rendements élevés tout en produisant un carburant conforme aux normes internationales.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Une installation prévoit de traiter 5 000 litres d'huile de palme brute contenant 4 % d'acides gras libres. Analysez s'il convient d'utiliser directement une transestérification alcaline ou si un prétraitement est nécessaire. Justifiez votre recommandation en tenant compte de la chimie de la réaction, du comportement du catalyseur, des coûts de production et de la qualité finale du biodiesel.
2. Un réacteur discontinu traite 2 000 kg d'huile végétale avec un rapport massique méthanol/huile de 0,20. Si le rendement de récupération du méthanol est de 90 %, calculez la quantité initiale de méthanol, la quantité récupérée après traitement et la quantité de méthanol frais nécessaire au lot suivant. Expliquez l'effet de la récupération du méthanol sur l'économie de l'installation.
3. Pendant la production, les techniciens observent une formation excessive de savon, une mauvaise séparation du glycérol et une baisse du rendement en biodiesel. Diagnostiquez les causes probables et proposez des mesures correctives portant sur la préparation de la matière première, le choix du catalyseur, la conduite du procédé et le fonctionnement des équipements.

BM-A3-2

Technologies de production du bioéthanol

2.1. Introduction

Le bioéthanol est l'un des biocarburants liquides renouvelables les plus produits au monde et constitue un élément important des transports durables et des systèmes énergétiques industriels. Il s'agit d'un alcool

obtenu par fermentation biologique des sucres, principalement par des levures, puis purifié par distillation et déshydratation.

Contrairement au biodiesel, produit à partir d'huiles végétales et de graisses animales, le bioéthanol provient surtout de matières premières riches en glucides : cultures sucrières, cultures amylacées et biomasse lignocellulosique. En Afrique de l'Ouest, des ressources agricoles abondantes comme la canne à sucre, le manioc, le sorgho sucré, le maïs et la mélasse offrent d'importantes possibilités de production commerciale tout en créant des emplois ruraux, en renforçant la sécurité énergétique et en valorisant les productions agricoles.

Les techniciens doivent connaître toute la chaîne de production, depuis la préparation de la matière première et la fermentation jusqu'à la distillation, la déshydratation, le contrôle qualité et l'exploitation sûre de l'installation. Ce chapitre associe connaissances théoriques avancées et pratiques industrielles pour permettre aux stagiaires d'exploiter, superviser, diagnostiquer et optimiser des installations de bioéthanol.

2.2. Préparation des matières premières

La préparation est la première étape, et l'une des plus importantes, car elle détermine la disponibilité des sucres fermentescibles pour leur conversion en éthanol. La figure 2.1 présente la séquence d'opérations permettant de transformer la biomasse agricole en sucres fermentescibles.

Les matières premières sont classées en trois catégories principales selon les glucides qu'elles contiennent.

Matières riches en sucres

Les jus de canne à sucre, de betterave sucrière et de sorgho sucré ainsi que la mélasse contiennent des sucres simples directement fermentescibles. Ils nécessitent donc un prétraitement relativement simple.

Matières riches en amidon

Le manioc, le maïs, l'igname, le blé et la pomme de terre stockent leurs glucides sous forme d'amidon, polysaccharide constitué de molécules de glucose. La levure ne pouvant pas fermenter directement l'amidon, celui-ci doit d'abord être hydrolysé en sucres simples.

Matières lignocellulosiques

La paille de riz, les tiges de maïs, la bagasse de canne, les coques de noix de coco, les copeaux de bois et d'autres résidus agricoles contiennent de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine. La cellulose peut être convertie en glucose après prétraitement et hydrolyse enzymatique. La lignine protège la cellulose et rend le matériau résistant à la dégradation biologique ; ces matières exigent donc un traitement plus poussé.

En Afrique de l'Ouest, le manioc est particulièrement intéressant grâce à sa forte teneur en amidon, son adaptation aux climats locaux et l'existence d'une filière agricole importante. La canne à sucre est également une ressource majeure en raison de sa forte teneur en sucres et de sa transformation relativement simple. La mélasse, coproduit de la sucrerie, est elle aussi largement utilisée parce qu'elle est peu coûteuse et riche en sucres fermentescibles.

La préparation commence par le nettoyage pour éliminer terre, pierres, débris végétaux et autres corps étrangers. Elle se poursuit par une réduction granulométrique — hachage, broyage ou mouture — afin d'augmenter la surface accessible aux réactions. Le matériau préparé est ensuite mélangé à l'eau pour former une suspension présentant une concentration en solides adaptée.

Pour les matières amylacées comme le manioc, une gélatinisation est réalisée entre environ 80 °C et 100 °C : les granules d'amidon absorbent l'eau, gonflent et deviennent plus accessibles aux enzymes. La liquéfaction utilise ensuite l'alpha-amylase pour transformer l'amidon gélatinisé en chaînes glucidiques plus courtes appelées dextrines. La saccharification emploie la glucoamylase pour convertir les dextrines en glucose fermentescible.

L'efficacité d'hydrolyse peut être évaluée par :

$$\text{Efficacité d'hydrolyse (\%)} = (\text{glucose réellement produit} / \text{glucose théoriquement disponible}) \times 100$$

Exemple 1

Une usine de transformation du manioc produit 420 kg de glucose à partir d'une matière présentant un potentiel théorique de 480 kg.

$$\text{Efficacité d'hydrolyse} = (420 \div 480) \times 100 = 87,5 \%$$

Ce résultat indique que 87,5 % de l'amidon disponible a été converti en glucose fermentescible.

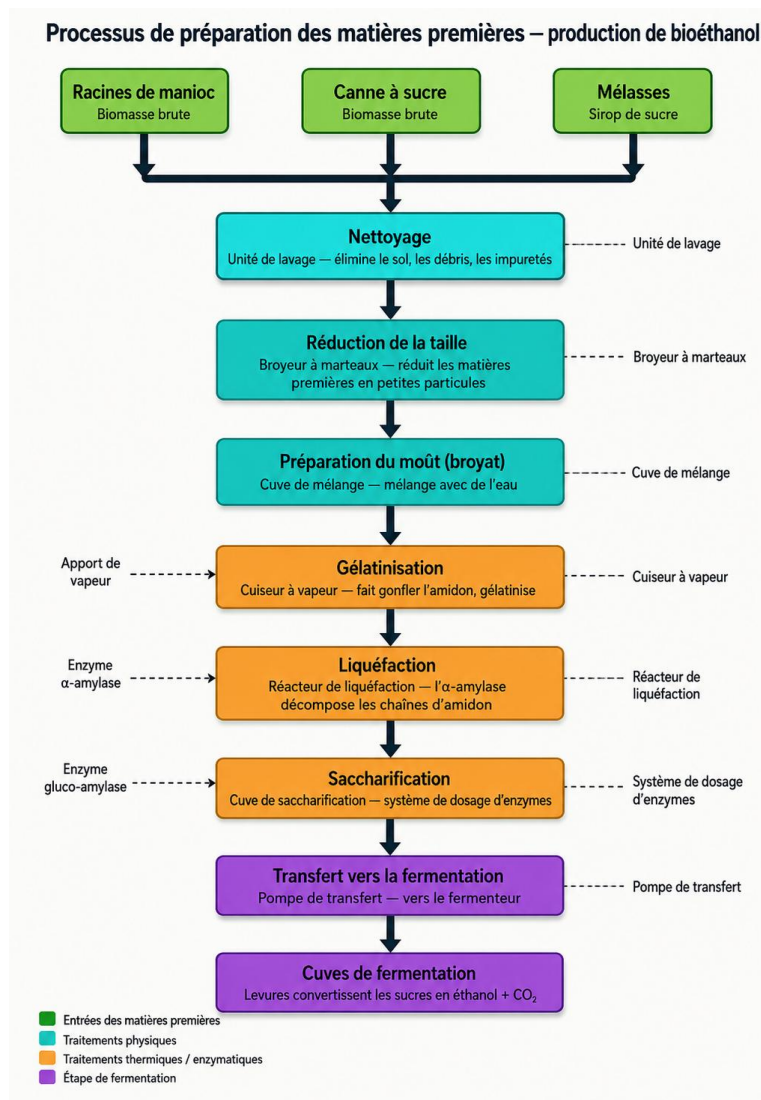


Figure 2.1 — Procédé de préparation des matières premières pour la production de bioéthanol

2.3. Fermentation

La fermentation est la conversion biologique des sucres en éthanol par des micro-organismes en conditions pauvres en oxygène. Le micro-organisme le plus couramment utilisé dans l'industrie est *Saccharomyces cerevisiae*, communément appelé levure de boulanger.

La réaction biochimique principale est :



Une molécule de glucose donne ainsi deux molécules d'éthanol et deux molécules de dioxyde de carbone. Les rendements industriels sont inférieurs au rendement théorique, car une partie du glucose sert à la croissance et au métabolisme d'entretien des levures.

La réussite de la fermentation dépend d'un contrôle rigoureux des conditions :

- **température** : généralement 30 à 35 °C pour maximiser la production d'éthanol tout en préservant la viabilité des levures ; une température trop élevée réduit l'activité enzymatique et peut tuer les cellules, tandis qu'une température trop basse ralentit le procédé ;
- **pH** : habituellement maintenu entre 4,5 et 5,5, ce qui limite la contamination bactérienne tout en favorisant la levure ;

- **nutriments** : apport éventuel d'azote, phosphore, magnésium et oligoéléments pour soutenir la croissance microbienne.

La fermentation peut être conduite en mode discontinu, semi-continu alimenté (*fed-batch*) ou continu. Le mode discontinu est courant dans les petites et moyennes installations pour sa simplicité et sa flexibilité. Le mode continu permet une productivité plus élevée et une qualité plus régulière, mais demande une conduite plus sophistiquée et une maîtrise stricte de la contamination.

Le rendement théorique est d'environ 0,51 kg d'éthanol par kilogramme de glucose. L'efficacité de fermentation (FE) est calculée par :

$$FE (\%) = (\text{éthanol réellement produit} / \text{production théorique d'éthanol}) \times 100$$

Exemple 2

Une cuve reçoit 900 kg de glucose. Production théorique :

$$900 \times 0,51 = 459 \text{ kg d'éthanol}$$

Production réelle : 420 kg.

$$FE = (420 \div 459) \times 100 = 91,5 \%$$

Cette valeur correspond à une très bonne performance de fermentation.

Les fermenteurs industriels sont équipés de systèmes automatiques qui surveillent en continu la température, le pH, la vitesse d'agitation, l'oxygène dissous, le niveau de mousse et la durée de fermentation. La mousse peut perturber les capteurs et réduire le volume utile ; des agents antimousse de qualité alimentaire sont donc ajoutés de manière contrôlée.

Les problèmes courants comprennent les contaminations bactériennes, les carences nutritives, les températures excessives, le mélange insuffisant et la conversion incomplète des sucres. Les techniciens les diagnostiquent en surveillant les concentrations en éthanol et en sucres, les tendances du pH et le débit de dégagement de CO₂.

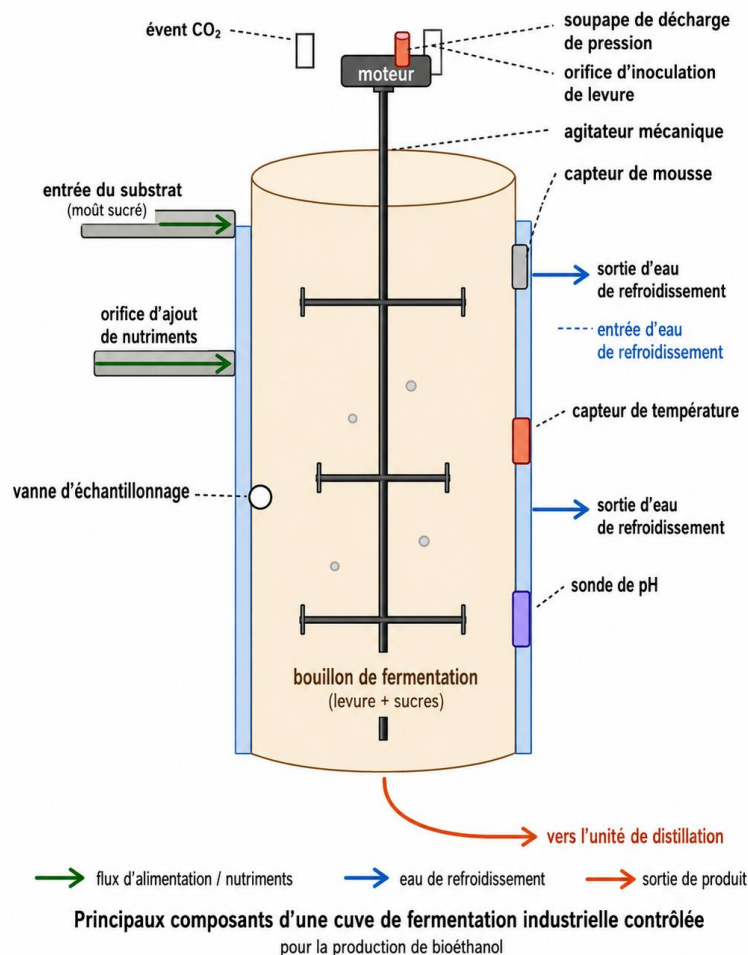


Figure 2.2 — Système industriel contrôlé de fermentation du bioéthanol

Contrôle industriel de la fermentation et dépannage

La surveillance du procédé est indispensable à une production stable. Les opérateurs mesurent régulièrement la concentration en sucres avec des réfractomètres ou des hydromètres, la concentration en éthanol par mesure de densité ou chromatographie en phase gazeuse, et la viabilité des levures par observation microscopique. Une baisse inattendue de la production de CO_2 peut révéler une diminution de l'activité des levures ou une contamination.

Des bactéries comme *Lactobacillus* concurrencent les levures pour les sucres disponibles et produisent des acides organiques qui inhibent la production d'éthanol. Les mesures préventives incluent la stérilisation des équipements, le nettoyage approprié, le maintien de conditions de fermentation acides et le contrôle microbiologique régulier.

La consommation énergétique influe également sur l'économie du procédé. La chaleur générée pendant la fermentation doit être évacuée afin d'éviter une baisse du rendement. Des systèmes de récupération de chaleur peuvent transférer cette énergie au préchauffage de la matière première et réduire ainsi la consommation énergétique globale de l'installation.

2.5. Distillation et déshydratation

Après fermentation, le liquide obtenu, appelé moût fermenté ou *beer*, ne contient généralement que 8 à 15 % d'éthanol en volume. Une distillation est donc nécessaire pour séparer l'éthanol de l'eau et des autres composés dissous. Cette séparation thermique repose sur les différences de température d'ébullition.

À pression atmosphérique, l'éthanol bout vers 78,37 °C et l'eau à 100 °C. Lorsque le moût est chauffé, des vapeurs enrichies en éthanol se forment préférentiellement, remontent dans la colonne puis sont condensées pour obtenir un produit à environ 95–96 % d'éthanol.

Une séparation totale par distillation ordinaire n'est pas possible, car le système éthanol-eau forme un azéotrope autour de 95,6 % d'éthanol. Un azéotrope est un mélange qui bout à composition constante et ne peut donc pas être purifié davantage par simple distillation.

Un bioéthanol carburant exige généralement une pureté supérieure à 99,5 %. Une étape de déshydratation suit donc la distillation pour éliminer l'eau restante. L'adsorption sur tamis moléculaire est aujourd'hui la technologie la plus courante. Les tamis moléculaires sont des matériaux cristallins très poreux qui adsorbent sélectivement les molécules d'eau tout en laissant passer l'éthanol. D'autres solutions existent, notamment la distillation azéotropique, la séparation membranaire et la distillation sous vide, mais elles sont moins courantes dans les installations industrielles de taille moyenne.

La distillation représente l'un des principaux postes de consommation énergétique d'une usine de bioéthanol. Les installations modernes intègrent donc échangeurs de chaleur et récupération d'énergie pour améliorer l'efficacité thermique.

L'efficacité de récupération par distillation (DF) peut être estimée par :

$$DF (\%) = (\text{éthanol récupéré} / \text{éthanol entrant dans le système de distillation}) \times 100$$

Exemple 3

Une colonne reçoit un moût contenant 950 kg d'éthanol. Après distillation et déshydratation, 910 kg sont récupérés.

$$\text{Efficacité de récupération} = (910 \div 950) \times 100 = 95,8 \%$$

La récupération est donc excellente et les pertes d'éthanol restent faibles.

Les systèmes industriels comprennent généralement une colonne de dégazage du moût (*beer column*), une colonne de rectification, un condenseur, un ballon de reflux, un rebouilleur, une unité de déshydratation à tamis moléculaire, des cuves de stockage et l'instrumentation associée. Un contrôle correct des températures de colonne, du taux de reflux, du débit de vapeur et du fonctionnement du condenseur est indispensable pour garantir une qualité carburant constante.

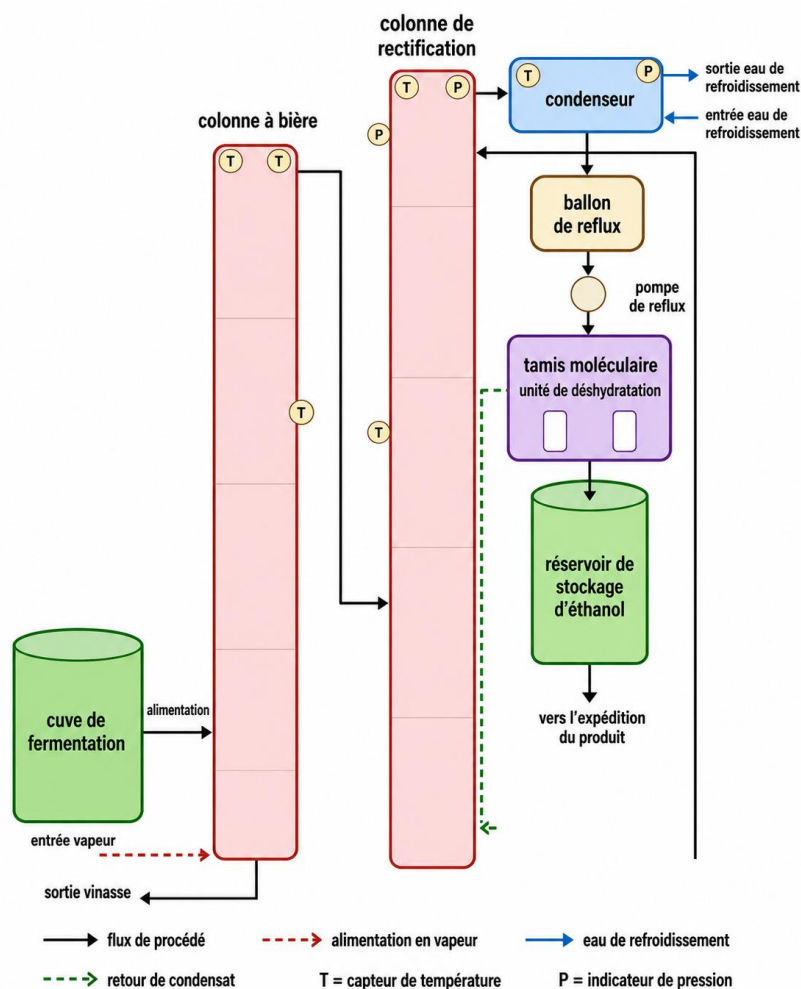


Figure 2.3 — Système industriel de distillation et de déshydratation du bioéthanol

Application pratique

Une usine de bioéthanol à base de manioc de taille moyenne au Nigeria traite environ 120 tonnes de racines fraîches par jour afin de produire un éthanol carburant destiné au mélange avec l'essence. Le manioc est lavé, broyé, hydrolysé enzymatiquement et fermenté avec *Saccharomyces cerevisiae*. Le moût est distillé dans une colonne à plusieurs étages puis déshydraté sur tamis moléculaire pour atteindre une pureté supérieure à 99,5 %.

Le CO₂ de fermentation est comprimé et fourni à des fabricants de boissons voisins. La vinasse riche en nutriments est transformée en aliments pour animaux et en engrais organique. Pendant la formation, les instructeurs démontrent la préparation des enzymes, la propagation des levures, la surveillance de la fermentation et la conduite de la distillation, en insistant sur la sécurité, l'hygiène, les économies d'énergie et l'entretien préventif. Cette approche relie les principes biochimiques aux pratiques industrielles ouest-africaines.

2.6. Résumé du chapitre

La production de bioéthanol transforme une biomasse riche en glucides en carburant liquide renouvelable au moyen d'une chaîne comprenant préparation, fermentation, distillation et déshydratation. Une préparation efficace maximise la disponibilité des sucres ; une fermentation contrôlée permet aux levures de convertir le glucose avec un rendement élevé ; la distillation et les tamis moléculaires produisent ensuite

un éthanol de qualité carburant répondant aux normes internationales. La réussite industrielle repose sur le contrôle du procédé, la prévention des contaminations, l'intégration énergétique, la maintenance des équipements et la surveillance continue des paramètres clés.

L'Afrique de l'Ouest dispose de ressources agricoles importantes pouvant soutenir des filières économiquement viables et contribuer au développement rural, à la valorisation des déchets et à la production d'énergie renouvelable.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Une installation traite des racines de manioc contenant 72 % d'amidon. Expliquez toute la séquence de préparation nécessaire avant fermentation, la fonction de chaque étape et les conséquences d'une mauvaise efficacité d'hydrolyse sur la production d'éthanol et l'économie de l'usine.
2. Une cuve de fermentation reçoit 1 200 kg de glucose fermentescible. En supposant un rendement théorique de 0,51 kg d'éthanol par kilogramme de glucose et une production réelle de 570 kg, calculez la production théorique d'éthanol et l'efficacité de fermentation, puis expliquez trois facteurs opérationnels pouvant empêcher d'atteindre 100 % de conversion.
3. Un système de distillation produit régulièrement un éthanol à seulement 93 % au lieu des 99,5 % requis. Analysez les causes techniques possibles, évaluez les performances de la distillation et de la déshydratation et recommandez les actions correctives nécessaires pour rétablir la qualité carburant.

Traitement et valorisation des biocarburants

3.1. Introduction

La production de biodiesel et de bioéthanol ne s'achève pas à la fin des réactions de conversion. Les biocarburants bruts sortant des réacteurs ou des fermenteurs contiennent des impuretés susceptibles de dégrader la qualité, d'altérer le fonctionnement des moteurs et d'empêcher le respect des normes nationales et internationales. Le traitement et la valorisation regroupent donc des opérations physiques, chimiques et mécaniques destinées à améliorer la pureté, la stabilité au stockage, la valeur énergétique et la récupération de coproduits utiles.

Les filières modernes cherchent également à réduire les coûts, améliorer l'efficacité énergétique, limiter les déchets et accroître la rentabilité. En Afrique de l'Ouest, où de nombreuses unités fonctionnent sous contraintes de ressources et d'énergie, des technologies de purification efficaces et la valorisation des résidus sont particulièrement importantes pour créer des bioraffineries compétitives et durables plutôt que de simples unités de production de carburant.

3.2. Techniques de purification

La purification élimine les substances indésirables afin d'obtenir un carburant conforme à des référentiels tels qu'ASTM D6751 et EN 14214 pour le biodiesel, ou ASTM D4806 et spécifications équivalentes pour l'éthanol carburant. Les impuretés peuvent réduire l'efficacité de combustion, accélérer l'usure des moteurs, provoquer de la corrosion, encrasser les circuits de carburant et raccourcir la durée de stockage.

Purification du biodiesel

Le biodiesel brut issu de la transestérification peut contenir du méthanol résiduel, des particules de catalyseur, des savons, du glycérol libre, des traces de triglycérides, de l'eau et des solides en suspension. Ces contaminants proviennent de réactions incomplètes, d'un excès de catalyseur ou d'une séparation insuffisante.

La première étape est généralement une décantation gravitaire ou une séparation centrifuge, au cours de laquelle la phase glycérine, plus dense, se sépare de la phase biodiesel. La décantation est peu coûteuse et convient aux petites unités ; les centrifugeuses sont préférées dans l'industrie car elles accélèrent la séparation, améliorent la récupération et permettent un fonctionnement continu.

Après séparation, deux grandes méthodes sont possibles :

- **lavage à l'eau** : le biodiesel est mis en contact avec de l'eau propre et tiède qui dissout le catalyseur résiduel, les savons, le glycérol et le méthanol. Une utilisation excessive d'eau accroît toutefois la consommation et génère des effluents à traiter ;

- **purification à sec** : le biodiesel traverse des colonnes garnies de résines échangeuses d'ions, de silicate de magnésium ou d'autres adsorbants qui retiennent sélectivement les impuretés sans produire d'eaux de lavage.

Le biodiesel est ensuite séché afin d'éliminer l'humidité dissoute. L'eau favorise la croissance microbienne, la corrosion des cuves et la dégradation du carburant. Le séchage peut être réalisé sous vide, par circulation d'air chaud ou par évaporation contrôlée jusqu'au respect des spécifications.

Purification de l'éthanol

L'éthanol étant produit sous forme de solution aqueuse, sa purification repose sur la distillation et la déshydratation. Une filtration sur charbon actif peut ensuite éliminer des composés colorés, des substances responsables d'odeurs et des traces de contaminants organiques. Une filtration fine élimine les particules susceptibles d'endommager les équipements de stockage ou les systèmes d'alimentation en carburant.

Pendant la purification, les techniciens surveillent notamment :

- teneur en eau ;
- alcool résiduel ;
- teneur en glycérol ;
- acidité ;
- masse volumique ;
- viscosité ;
- point d'éclair ;
- point de trouble.

L'efficacité de purification peut être exprimée par :

$$\text{Efficacité de purification (\%)} = (\text{masse d'impuretés éliminées} / \text{masse initiale d'impuretés}) \times 100$$

Exemple 3.1

Un biodiesel brut contient 18 kg d'impuretés éliminables. Après purification à sec et séchage, il reste 1,5 kg.

$$\text{Impuretés éliminées} = 18 - 1,5 = 16,5 \text{ kg}$$

$$\text{Efficacité} = (16,5 \div 18) \times 100 = 91,7 \%$$

Le système a donc éliminé la grande majorité des contaminants.

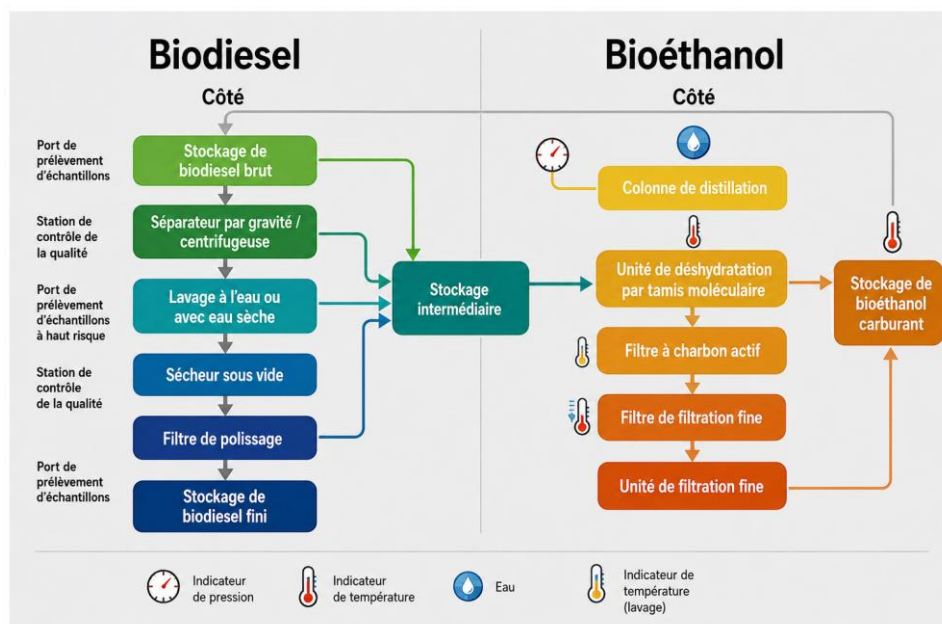


Figure 3.1 — Schéma de purification du biodiesel et du bioéthanol

3.3. Valorisation des coproduits

La valorisation des coproduits améliore fortement la durabilité économique des biocarburants. Un coproduit est un matériau secondaire issu de la fabrication qui possède une valeur commerciale ou industrielle. Les installations modernes cherchent à le récupérer, le traiter et le commercialiser plutôt qu'à le considérer comme un déchet.

Glycérol issu du biodiesel

Environ 10 kg de glycérol brut sont produits pour 100 kg de biodiesel. Le glycérol brut contient du méthanol résiduel, du catalyseur, des savons et de l'eau. Une purification par neutralisation, évaporation, filtration et distillation permet d'obtenir un produit valorisable dans :

- la fabrication de savons ;
- les cosmétiques ;
- les formulations pharmaceutiques ;
- l'agroalimentaire ;
- les antigels ;
- la synthèse chimique.

Dans de nombreuses communautés ouest-africaines, de petites coopératives convertissent le glycérol brut en savon de lessive, ce qui crée des emplois et réduit les déchets.

Vinasse et DDGS issus du bioéthanol

La distillation du bioéthanol génère de grandes quantités de vinasse (*stillage*), contenant protéines, fibres, glucides non fermentés, cellules de levure, minéraux et matières organiques dissoutes. Après concentration et séchage, elle peut donner des drèches de distillerie séchées avec solubles (DDGS), utilisées pour l'alimentation des volailles, bovins ou poissons. La vinasse liquide peut aussi être digérée anaérobiquement pour produire du biogaz destiné aux chaudières ou à la production d'électricité interne.

Dioxyde de carbone de fermentation

Le CO₂ libéré lors de la fermentation peut être capté, comprimé, purifié et liquéfié pour la carbonatation des boissons, la conservation alimentaire, les extincteurs, le soudage, les serres ou la production de glace carbonique. Cette valorisation crée des recettes supplémentaires et limite les rejets directs.

Résidus de trituration des oléagineux

Les tourteaux de palmiste et de soja peuvent être utilisés comme aliments pour animaux en raison de leur teneur en protéines. Le tourteau de jatropha contient des composés toxiques et ne doit pas être donné directement aux animaux ; après traitement adapté, il peut être valorisé comme engrais organique, compost ou substrat de méthanisation.

La valorisation des coproduits nécessite néanmoins un contrôle qualité. Par exemple, le méthanol résiduel du glycérol doit être ramené à des niveaux sûrs avant fabrication de savon, et les DDGS destinées à l'alimentation animale doivent respecter les critères microbiologiques.

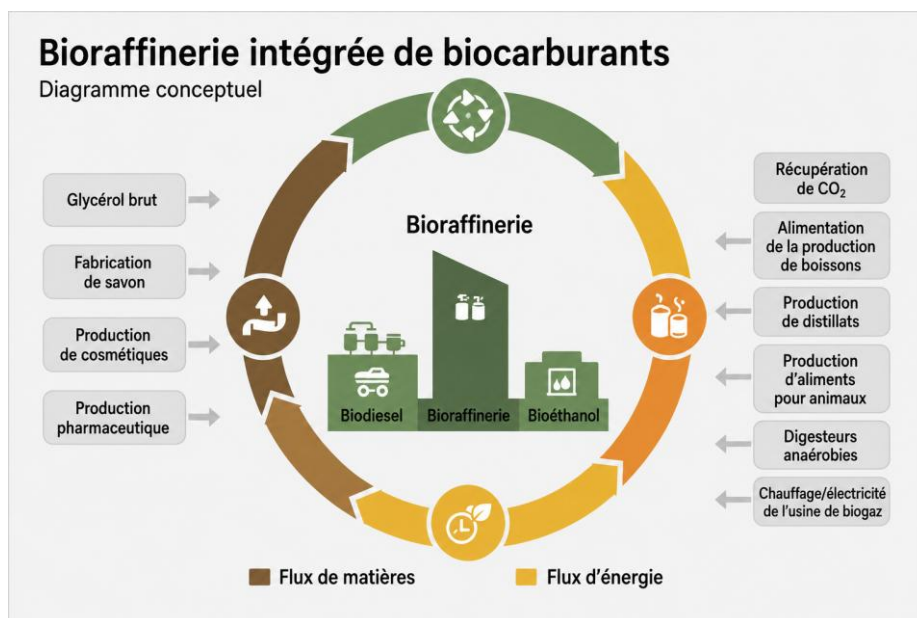


Figure 3.2 — Concept de bioraffinerie intégrée de biocarburants

3.4. Optimisation des procédés

L'optimisation est une démarche systématique visant à maximiser l'efficacité, réduire les coûts, améliorer la qualité et limiter les impacts environnementaux. Elle combine génie des procédés, contrôle-commande, gestion de la qualité, maintenance et analyse économique.

Surveillance des variables de procédé

La température influence les vitesses de réaction, l'activité microbienne et l'efficacité des séparations. La pression agit sur la distillation et la récupération des solvants. Les débits déterminent les temps de séjour et la qualité du mélange ; le pH influe sur l'activité enzymatique, la fermentation et le comportement des catalyseurs. Les installations modernes utilisent des PLC, des systèmes de contrôle distribué (DCS) et des systèmes SCADA pour suivre en continu ces variables et ajuster automatiquement les conditions.

Optimisation énergétique

La distillation et le séchage sont très consommateurs de chaleur. L'intégration thermique permet de récupérer la chaleur perdue d'une unité pour préchauffer un autre flux. Les échangeurs de chaleur, la récupération des condensats, l'isolation et les variateurs de vitesse sont couramment employés pour améliorer la performance énergétique.

Optimisation des matières

Le dosage du catalyseur doit être maîtrisé : une quantité insuffisante réduit la vitesse de réaction, tandis qu'un excès augmente le coût et les besoins de purification. De même, l'optimisation du rapport méthanol/huile recherche un compromis entre taux de conversion et coût de récupération du solvant.

Optimisation de la maintenance

La maintenance préventive repose sur des inspections, lubrifications, étalonnages et remplacements planifiés. La maintenance prédictive utilise l'analyse vibratoire, la thermographie, l'analyse d'huile et les données de capteurs pour détecter les dégradations avant une panne majeure. Ces pratiques améliorent la disponibilité et réduisent les arrêts.

Optimisation de la qualité

Le contrôle statistique des procédés, les analyses de laboratoire régulières et la formation continue des opérateurs permettent de maintenir le produit dans les spécifications. Des plans d'échantillonnage assurent la représentativité des prélèvements ; toute dérive déclenche des actions correctives avant la production de volumes importants hors spécification.

L'efficacité globale du procédé peut être calculée par :

$$\text{Efficacité globale du procédé (\%)} = (\text{énergie utile contenue dans le biocarburant final} / \text{énergie totale entrante}) \times 100$$

Exemple 3.2

Une unité consomme une biomasse contenant 12 500 MJ. Les biodiesels et bioéthanol finis contiennent 9 500 MJ d'énergie utile.

$$\text{Efficacité globale} = (9\,500 \div 12\,500) \times 100 = 76 \%$$

Les 24 % restants correspondent aux pertes thermiques, aux inefficacités des équipements, aux conversions incomplètes et aux auxiliaires. Les efforts doivent donc cibler la récupération d'énergie, l'isolation et le contrôle du procédé.

Le rendement de production peut aussi être suivi par :

$$\text{Rendement de production (\%)} = (\text{masse réelle de produit} / \text{masse théorique de produit}) \times 100$$

La surveillance continue permet de détecter une dégradation du catalyseur, une désactivation enzymatique, une contamination ou un dysfonctionnement avant qu'ils ne provoquent des pertes économiques majeures.

Application pratique

Une bioraffinerie intégrée de taille moyenne en Côte d'Ivoire transforme de l'huile de palme brute en biodiesel et produit simultanément de l'éthanol à partir de mélasse fournie par des sucreries voisines. Le biodiesel est purifié par lavage à sec, ce qui supprime les effluents de lavage ; un système de récupération du méthanol réduit les consommations chimiques. Le glycérol est purifié puis vendu aux savonneries locales. Le CO₂ de fermentation est capté et vendu à des producteurs de boissons. La vinasse de distillation est méthanisée pour fournir du biogaz servant à produire la vapeur de distillation. La chaleur des condenseurs préchauffe les flux entrants et réduit la consommation de la chaudière.

Pendant la formation, les stagiaires réalisent des prélèvements, des essais qualité, des opérations de maintenance préventive, des exercices d'optimisation et de dépannage à partir de données réelles. Ce modèle montre comment une industrie ouest-africaine peut améliorer sa rentabilité tout en réduisant ses impacts environnementaux.

3.5. Résumé du chapitre

Le traitement et la valorisation sont indispensables pour transformer des biocarburants bruts en produits renouvelables de haute qualité. Les techniques de purification éliminent l'eau, le méthanol, le glycérol, les catalyseurs, les savons et les matières en suspension, ce qui améliore la stabilité, les performances de combustion et la durée de stockage. Les coproduits tels que le glycérol, le CO₂, la vinasse et les résidus oléagineux peuvent être transformés en produits commercialisables et contribuer au modèle de bioraffinerie intégrée. L'optimisation associe automatisation, intégration énergétique, maintenance et gestion de la qualité afin de maximiser la conversion tout en réduisant les coûts et les impacts environnementaux.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Une installation de biodiesel produit régulièrement un carburant contenant trop de glycérol résiduel et de savon après purification. Analysez les causes possibles en tenant compte de la conversion, de l'efficacité de séparation, du lavage et du séchage. Recommandez des améliorations pour satisfaire ASTM D6751 ou EN 14214.
2. Une usine de bioéthanol génère quotidiennement 25 tonnes de vinasse et 8 tonnes de CO₂. Proposez une stratégie intégrée de valorisation adaptée à une unité ouest-africaine de taille moyenne. Évaluez les bénéfices techniques, environnementaux et économiques et expliquez la contribution à une bioéconomie circulaire.
3. Une installation reçoit une biomasse contenant 15 000 MJ et produit des biocarburants finis contenant 11 100 MJ. Calculez l'efficacité globale, identifiez les sources probables de perte d'énergie et proposez des mesures d'optimisation qui améliorent le rendement sans dégrader la qualité.

Contrôle de la qualité des carburants et normes

4.1. Introduction

La réussite commerciale du biodiesel et du bioéthanol dépend non seulement d'une conversion efficace, mais aussi d'une qualité constante conforme aux normes reconnues. Des carburants de mauvaise qualité peuvent provoquer des pannes moteur, de la corrosion, l'encrassement des injecteurs, des émissions excessives, une instabilité au stockage et une perte de confiance des utilisateurs.

Le contrôle qualité fait donc partie intégrante de chaque installation. Il garantit que chaque lot satisfait aux spécifications techniques avant distribution. Les systèmes modernes associent essais de laboratoire, surveillance du procédé, maîtrise statistique, documentation et conformité réglementaire. Dans les pays ouest-africains qui développent les carburants renouvelables, les techniciens doivent savoir évaluer la qualité, interpréter les résultats de laboratoire, mettre en œuvre l'assurance qualité et appliquer les exigences réglementaires.

4.2. Paramètres de qualité des carburants

Les paramètres de qualité sont des propriétés physiques et chimiques mesurables qui déterminent si un carburant peut être stocké, transporté et utilisé sans risque. La figure 4.1 présente les principaux paramètres surveillés.

Biodiesel

- **Teneur en esters** : le biodiesel est constitué principalement d'esters méthyliques d'acides gras (FAME). Une forte teneur en esters indique une transestérification complète ; une faible valeur peut révéler des huiles non réagies ou une contamination.
- **Masse volumique** : masse de carburant par unité de volume, généralement en kg/m^3 . Les systèmes d'injection sont conçus pour une plage définie ; une valeur trop élevée ou trop faible modifie l'injection et la combustion.
- **Viscosité cinématique** : résistance d'un liquide à l'écoulement sous l'effet de la gravité. Une viscosité élevée détériore l'atomisation et augmente fumées, dépôts et consommation ; une viscosité trop faible réduit la lubrification des organes d'injection.
- **Point d'éclair** : température minimale à laquelle les vapeurs s'enflamment en présence d'une source d'ignition. Le méthanol résiduel abaisse fortement le point d'éclair et accroît le risque d'incendie.
- **Teneur en eau** : l'eau favorise les micro-organismes, la corrosion, les pertes d'efficacité et l'obstruction des filtres. Elle peut provenir d'un séchage incomplet, de condensation ou d'une mauvaise manutention.
- **Indice d'acide** : mesure des composés acides. Une valeur élevée peut indiquer oxydation, hydrolyse ou mauvaise qualité de matière première et accélérer la corrosion des cuves, canalisations, pompes et injecteurs.

- **Stabilité à l'oxydation** : résistance du biodiesel à la dégradation chimique pendant le stockage.
L'oxygène, la lumière, la chaleur et certains métaux favorisent la formation de gommages, sédiments et composés acides.
- **Propriétés à froid** : point de trouble, température à laquelle les premiers cristaux de cire apparaissent, et point d'écoulement, température minimale à laquelle le carburant reste fluide. Ces propriétés sont importantes pour l'exportation ou l'utilisation en environnement plus frais.

Bioéthanol

La pureté est le premier critère ; l'éthanol carburant doit normalement dépasser 99,5 % vol. La teneur en eau doit être très faible pour éviter une perte de qualité et la séparation de phases dans les mélanges essence-éthanol. Sont également contrôlés la conductivité électrique, le pH, le soufre, les chlorures et les impuretés métalliques.

La masse volumique peut être calculée par :

$$\text{Masse volumique} = \text{masse} \div \text{volume}$$

Exemple 4.1

Un échantillon de biodiesel a une masse de 875 g pour exactement 1 litre.

$$\text{Masse volumique} = 875 \text{ g} \div 1 \text{ L} = 875 \text{ kg/m}^3$$

Cette valeur se situe dans la plage acceptable de nombreuses normes internationales.

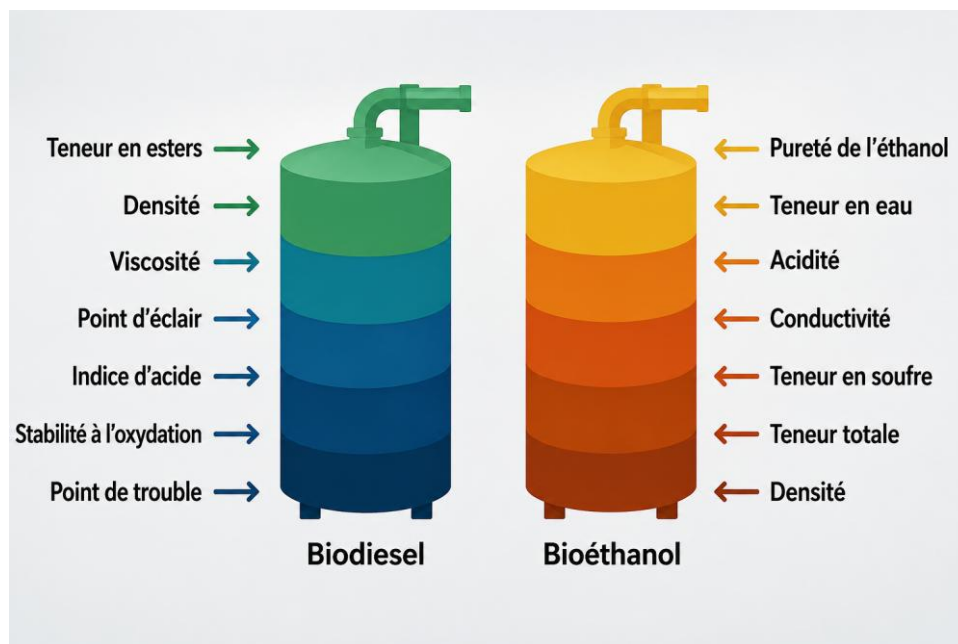


Figure 4.1 — Principaux paramètres de qualité du biodiesel et du bioéthanol

4.3. Procédures d'essai

La qualité ne peut être garantie qu'au moyen d'essais systématiques normalisés. Les laboratoires modernes utilisent des méthodes reconnues afin d'obtenir des résultats exacts, répétables et comparables.

Échantillonnage

Un échantillon représentatif doit refléter le lot entier. Une mauvaise méthode d'échantillonnage peut fausser l'analyse malgré des instruments précis. Les prélèvements doivent être réalisés avec des récipients propres, des dispositifs appropriés et des procédures évitant contamination et évaporation.

Masse volumique et viscosité

La masse volumique peut être mesurée avec un hydromètre, un densimètre à tube en U oscillant ou un pycnomètre. Les hydromètres conviennent au terrain ; les appareils numériques apportent une meilleure précision. La viscosité est déterminée avec des viscosimètres capillaires ou rotatifs automatiques. Le biodiesel est généralement mesuré à 40 °C, car la viscosité dépend fortement de la température.

Point d'éclair

Il est mesuré avec des appareils à vase fermé tels que le Pensky-Martens. L'échantillon est chauffé progressivement et une source d'ignition est introduite périodiquement jusqu'à l'inflammation des vapeurs. Cette mesure permet notamment de vérifier l'élimination du méthanol résiduel.

Teneur en eau

La titration Karl Fischer, très sensible, mesure de faibles quantités d'eau et constitue une méthode de référence internationale pour l'analyse de l'humidité des carburants.

Indice d'acide

Une quantité connue de biodiesel est dissoute dans un solvant puis titrée avec une solution étalonnée d'hydroxyde de potassium jusqu'à neutralisation. La quantité de base consommée indique la concentration en composés acides.

Bioéthanol et stabilité à l'oxydation

La pureté du bioéthanol peut être déterminée par chromatographie en phase gazeuse, mesure de densité ou alcoolmètre étalonné. La chromatographie permet aussi d'identifier des traces de méthanol, alcools supérieurs, aldéhydes et composés organiques volatils. La stabilité à l'oxydation est évaluée avec des équipements d'oxydation accélérée tels que l'appareil Rancimat.

Les laboratoires mettent également en œuvre : étalonnage des instruments, matériaux de référence, analyses en double, essais d'aptitude, accréditation et cartes de contrôle statistique.

Exemple 4.2

Un technicien détermine que 0,42 mg de KOH sont nécessaires pour neutraliser les acides présents dans 1 g de biodiesel.

$$\text{Indice d'acide} = 0,42 \text{ mg KOH/g}$$

Si la limite applicable est de 0,50 mg KOH/g, le carburant satisfait cette exigence.

4.4. Normes nationales et internationales

Les normes établissent des exigences techniques uniformes pour que les carburants produits par différents fabricants soient sûrs et compatibles. Elles facilitent le commerce, protègent les consommateurs, améliorent la fiabilité des moteurs et appuient les réglementations environnementales.

Les principales organisations citées dans le cours sont :

- **ASTM International**, dont les normes sont largement utilisées en Amérique du Nord et ailleurs ;
- **Comité européen de normalisation (CEN)**, qui publie les normes européennes ;
- **Organisation internationale de normalisation (ISO)**, qui élabore des normes techniques internationales.

ASTM D6751 définit les exigences du biodiesel destiné à être mélangé au gazole pétrolier. Elle couvre notamment la teneur en esters, le point d'éclair, l'eau et les sédiments, la viscosité, les cendres sulfatées, le soufre, la corrosion de la lame de cuivre, l'indice de cétane, l'indice d'acide, la stabilité à l'oxydation, le glycérol libre et total, le phosphore et les propriétés à froid.

EN 14214 établit des exigences comparables pour le biodiesel sur le marché européen, mais certaines limites diffèrent en fonction des systèmes de carburant, du climat et des priorités réglementaires.

L'éthanol carburant est couramment évalué selon **ASTM D4806** ou des spécifications nationales équivalentes, qui définissent notamment la pureté, l'eau, l'acidité, les chlorures inorganiques, le soufre et la conductivité électrique.

De nombreux pays africains élaborent ou adoptent des normes nationales fondées sur des spécifications ASTM, EN ou ISO, adaptées aux conditions climatiques, aux technologies de moteurs et aux matières premières locales. Les organismes nationaux de normalisation collaborent avec les ministères chargés de l'énergie, de l'environnement, de l'agriculture et de l'industrie.

La conformité ne se limite pas aux essais de laboratoire. Les producteurs doivent mettre en place un système de management de la qualité comprenant procédures documentées, programmes d'étalonnage, dossiers de production, traçabilité, actions correctives, audits internes et amélioration continue, souvent selon les principes d'**ISO 9001**. Des organismes de certification inspectent périodiquement les installations ; une certification réussie renforce la confiance, facilite l'exportation et atteste l'engagement envers la qualité et l'environnement.

Exemple 4.3

Résultats d'un lot de biodiesel :

- masse volumique : 882 kg/m³ ;
- viscosité : 4,6 mm²/s ;
- point d'éclair : 168 °C ;
- indice d'acide : 0,36 mg KOH/g ;
- teneur en eau : 280 mg/kg.

Le cours indique que toutes ces valeurs se situent dans les limites de la norme applicable ; l'ingénieur qualité accepte donc le lot pour stockage et distribution commerciale.

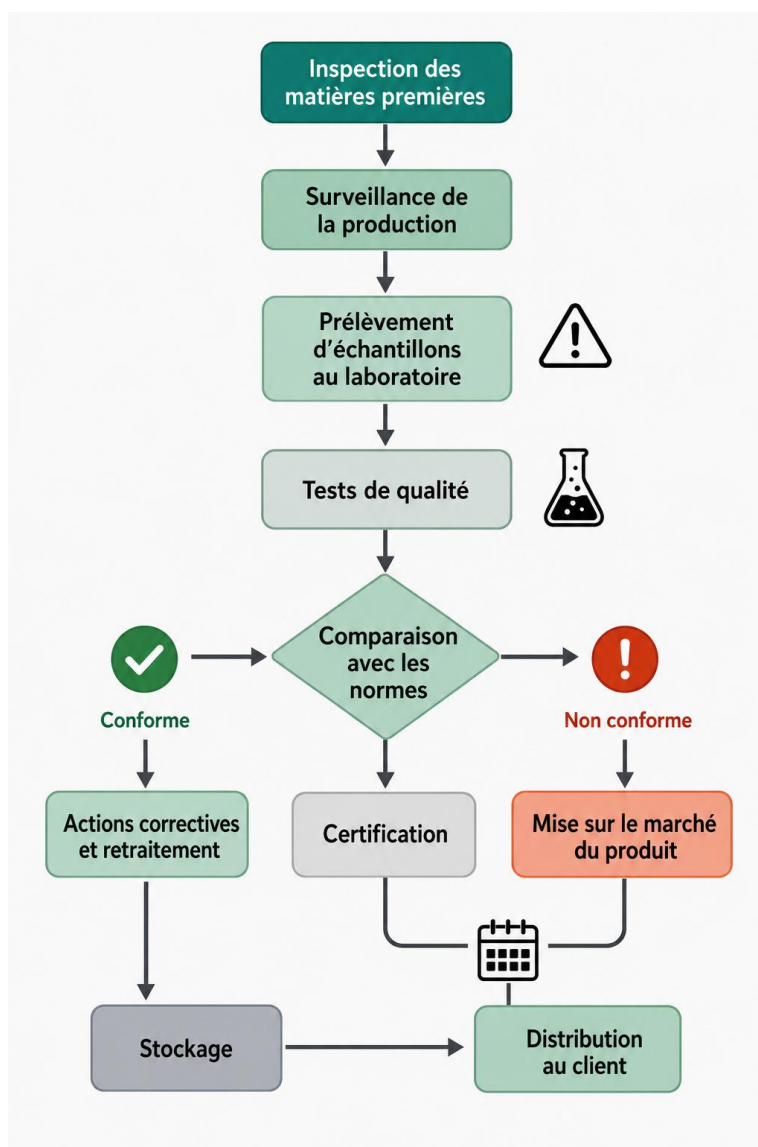


Figure 4.3 — Système d'assurance qualité des biocarburants

Application pratique

Un producteur de biodiesel de taille moyenne au Ghana alimente des machines agricoles de plantations de palmiers à huile. Avant la libération de chaque lot, le laboratoire mesure masse volumique, viscosité, point d'éclair, indice d'acide, humidité et glycérol libre selon des procédures ASTM normalisées. Tout lot non conforme retourne en purification. L'installation maintient des instruments étalonnés, des procédures opératoires normalisées et des dossiers complets pour répondre aux inspections réglementaires et aux audits clients. Les formateurs utilisent ce contexte pour enseigner prélèvements, analyses, interprétation des rapports et actions correctives.

4.5. Résumé du chapitre

Le contrôle de la qualité est fondamental pour la production, le stockage, la distribution et l'utilisation du biodiesel et du bioéthanol. Des paramètres comme masse volumique, viscosité, point d'éclair, eau, indice d'acide, stabilité à l'oxydation et pureté de l'éthanol déterminent directement les performances des moteurs,

la stabilité du carburant, la sécurité et la conformité réglementaire. Des essais normalisés fournissent la preuve objective de la conformité. Les normes ASTM, CEN, ISO et nationales favorisent une qualité constante, le commerce et la protection des consommateurs. Un système efficace combine analyses, surveillance du procédé, documentation, étalonnage et amélioration continue.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Un lot de biodiesel présente : masse volumique 890 kg/m^3 , viscosité $6,8 \text{ mm}^2/\text{s}$, point d'éclair $120 \text{ }^\circ\text{C}$, indice d'acide $0,65 \text{ mg KOH/g}$ et eau 650 mg/kg . Évaluez l'aptitude à la distribution commerciale selon les principes internationaux, identifiez les paramètres non conformes, expliquez les causes possibles et recommandez les corrections nécessaires avant libération.
2. Une usine de bioéthanol souhaite créer un nouveau laboratoire qualité. Concevez un programme d'essais en identifiant équipements analytiques, procédures, exigences d'étalonnage, pratiques d'assurance qualité et compétences du personnel nécessaires pour produire des résultats fiables conformes aux exigences nationales.
3. Un ingénieur mesure un échantillon de $0,880 \text{ kg}$ occupant $1,0 \text{ litre}$, avec un point d'éclair de $172 \text{ }^\circ\text{C}$ et un indice d'acide de $0,38 \text{ mg KOH/g}$. Calculez la masse volumique, évaluez la qualité à partir des propriétés indiquées et expliquez l'importance de chaque paramètre pour les moteurs, le stockage et la stabilité à long terme.

Stockage, manutention et distribution

5.1. Introduction

La production et la certification ne représentent qu'une partie de la chaîne de valeur. Les biocarburants doivent ensuite être stockés, manutentionnés, transportés et distribués de façon à préserver leur qualité et à protéger les travailleurs, les consommateurs et l'environnement. De mauvaises pratiques de stockage peuvent provoquer oxydation, contamination par l'eau, développement microbien, dégradation et pertes économiques. Une manutention inappropriée expose le personnel aux incendies, vapeurs toxiques, brûlures chimiques et pollutions.

Les installations modernes intègrent conception technique, sécurité au travail, protection de l'environnement, logistique et assurance qualité pendant toute la phase post-production. Cette maîtrise est particulièrement importante en Afrique de l'Ouest, où les carburants sont parfois transportés sur de longues distances sous températures élevées et avec des infrastructures variables.

5.2. Systèmes de stockage

Un système de stockage bien conçu préserve la qualité tout en protégeant travailleurs, équipements et environnement. Il doit limiter l'exposition à l'humidité, l'oxygène, la lumière, la chaleur excessive et les contaminants.

Biodiesel

Le biodiesel est plus sensible à l'oxydation que le gazole pétrolier en raison de ses esters d'acides gras insaturés. L'oxydation produit des acides organiques, gommages, sédiments et polymères susceptibles de dégrader la combustion et de bloquer filtres et injecteurs. Le biodiesel doit donc être stocké dans des cuves propres, sèches et opaques, limitant l'entrée d'air et de lumière. L'acier au carbone, l'acier inoxydable et l'aluminium sont généralement adaptés, tandis que le cuivre, le laiton, le plomb et le zinc doivent être évités car ils catalysent l'oxydation.

Bioéthanol

Le bioéthanol est hygroscopique : il absorbe facilement l'humidité de l'air. Même de faibles quantités d'eau réduisent sa pureté et peuvent provoquer une séparation de phases dans les mélanges essence-éthanol. Les cuves doivent donc être étanches, équipées d'évents limitant l'humidité et protégées contre les entrées d'eau pendant le chargement et le déchargement.

Choix des cuves et confinement

Le choix dépend de la capacité de production, des besoins de distribution, du climat et du budget. Les petites unités utilisent souvent des cuves cylindriques aériennes en acier, faciles à inspecter. Les grandes installations peuvent employer des réservoirs verticaux à toit fixe et couverture flottante interne pour limiter évaporation et exposition à l'oxygène. Des cuves enterrées peuvent être utilisées lorsque l'espace est

limité ou lorsque la stabilité thermique est recherchée, mais elles exigent une protection contre la corrosion et une surveillance des fuites.

Les zones de stockage doivent comporter un confinement secondaire. Des murs de rétention ou digues sont construits pour retenir le carburant en cas de défaillance d'une cuve. Le cours indique une capacité de rétention typiquement au moins égale à **110 % de la capacité de la plus grande cuve**.

La température influence également la stabilité. Des températures élevées accélèrent l'oxydation ; des températures très basses peuvent accroître la viscosité du biodiesel et favoriser la cristallisation. Lorsque cela est possible, les cuves sont ombragées ou isolées. Une circulation ou un brassage peut être utilisé dans les grands réservoirs pour homogénéiser les propriétés.

Les inspections de routine doivent rechercher corrosion, fuites, sédiments, eau, joints endommagés, événements obstrués et indicateurs de niveau defectueux. Des échantillons doivent être prélevés régulièrement au fond des réservoirs, où eau et sédiments ont tendance à s'accumuler.

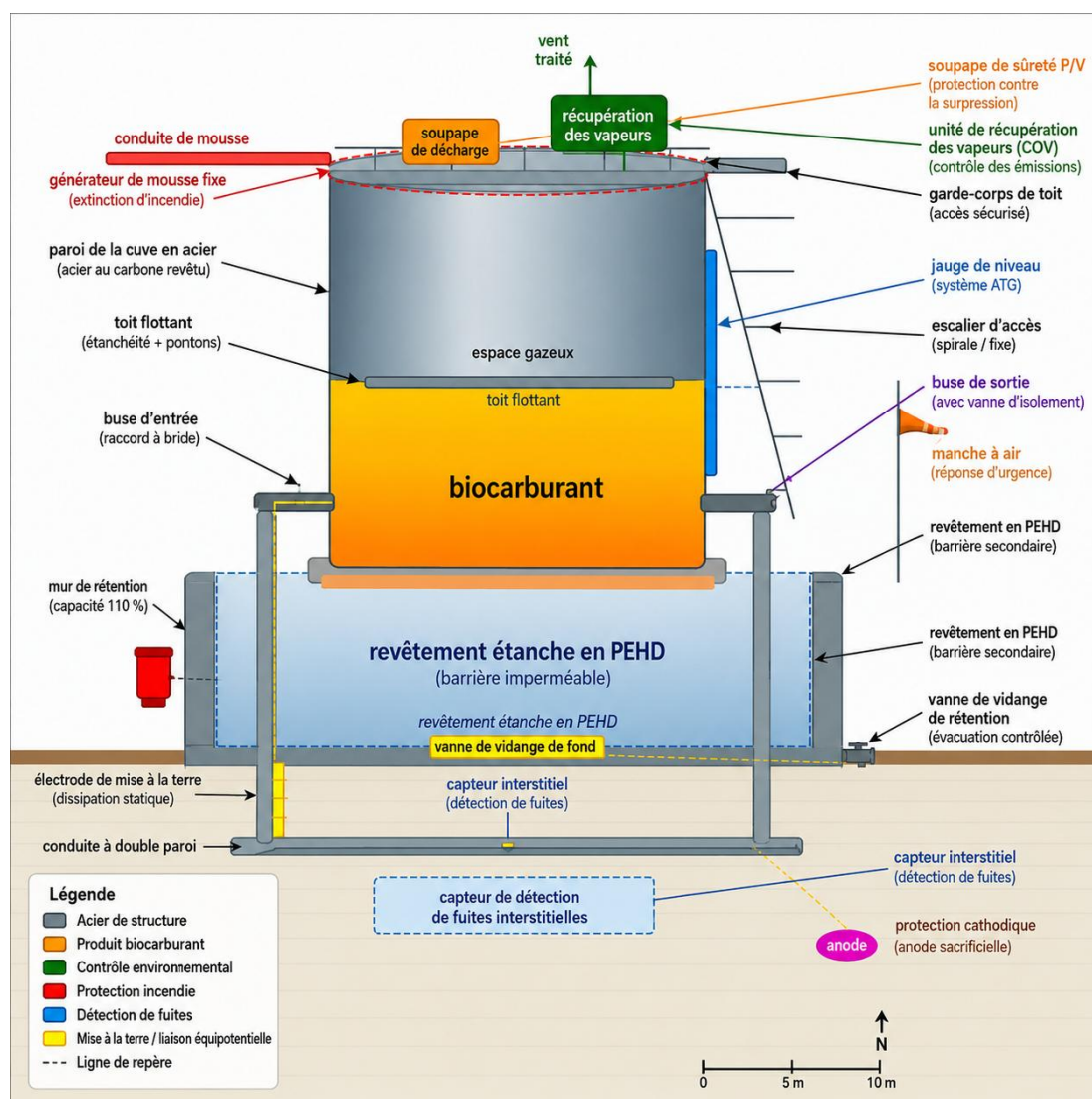


Figure 5.1 — Installation industrielle de stockage de biocarburants

La capacité de stockage peut être estimée par :

$$\text{Capacité de stockage} = \text{production quotidienne de carburant} \times \text{nombre de jours de stockage}$$

Exemple 5.1

Une usine produit 12 000 litres de biodiesel par jour et souhaite disposer de sept jours de réserve.

$$\text{Capacité} = 12\,000 \times 7 = 84\,000 \text{ litres}$$

Elle doit donc installer une capacité combinée d'au moins 84 000 litres, avec une marge supplémentaire pour la flexibilité d'exploitation et la réserve d'urgence.

5.3. Exigences de sécurité

La sécurité fait partie intégrante de la production, du stockage et de la distribution. Le biodiesel et le bioéthanol présentent des dangers différents qui nécessitent des mesures techniques, des procédures administratives et des équipements de protection individuelle.

Le bioéthanol est un liquide très inflammable à point d'éclair relativement bas. Ses vapeurs peuvent former des mélanges explosifs dans les espaces mal ventilés. Les zones de stockage et de manutention doivent donc être classées selon les risques et équipées de matériels électriques antidéflagrants, d'une instrumentation à sécurité intrinsèque et d'une ventilation naturelle ou mécanique adéquate. Fumer, utiliser une flamme nue ou introduire une source d'ignition doit être interdit dans les zones dangereuses.

Le biodiesel possède un point d'éclair nettement plus élevé et est moins inflammable que l'éthanol ou le gazole pétrolier, mais il reste combustible. Les déversements créent un risque de chute et peuvent contaminer les sols et les eaux.

Les opérateurs manipulant méthanol, biodiesel, éthanol, catalyseurs, acides ou produits de nettoyage doivent utiliser des EPI appropriés : gants résistants aux produits chimiques, lunettes, vêtements de protection et chaussures adaptées. Une protection respiratoire peut être nécessaire avec les solvants volatils ou dans les zones peu ventilées.

Les moyens de lutte contre l'incendie comprennent notamment des extincteurs portatifs adaptés aux feux de liquides inflammables de classe B, des systèmes fixes à mousse, des réserves d'eau d'urgence et des sorties clairement signalées. Le personnel doit être formé et participer à des exercices d'évacuation.

La mise à la terre et la liaison équipotentielle sont essentielles pendant les transferts de carburant, car l'écoulement des liquides peut générer de l'électricité statique. Une décharge peut enflammer les vapeurs si les cuves, canalisations et camions-citernes ne sont pas correctement reliés et mis à la terre.

Les procédures de gestion des déversements doivent être documentées. Les petits déversements sont confinés avec des absorbants ; les déversements importants nécessitent l'isolement de la zone, la suppression des sources d'ignition, l'alerte des équipes d'intervention et l'élimination des déchets contaminés conformément aux règles environnementales.

La sécurité comprend aussi des procédures d'exploitation claires, l'inspection régulière des équipements, la consignation des énergies (LOTO) pendant la maintenance, les permis d'entrée en espace confiné, la communication des dangers et la formation continue. Chaque installation doit disposer de fiches de données de sécurité (FDS/SDS) pour les produits dangereux.

Une matrice de risque simple peut utiliser :

$$\text{Niveau de risque} = \text{probabilité} \times \text{conséquence}$$

Exemple 5.2

Pour une fuite possible de méthanol : probabilité = 3, conséquence = 4.

$$\text{Niveau de risque} = 3 \times 4 = 12$$

Selon la matrice du site, le score 12 correspond à un risque élevé nécessitant des mesures techniques immédiates, une meilleure inspection et une maintenance préventive renforcée.

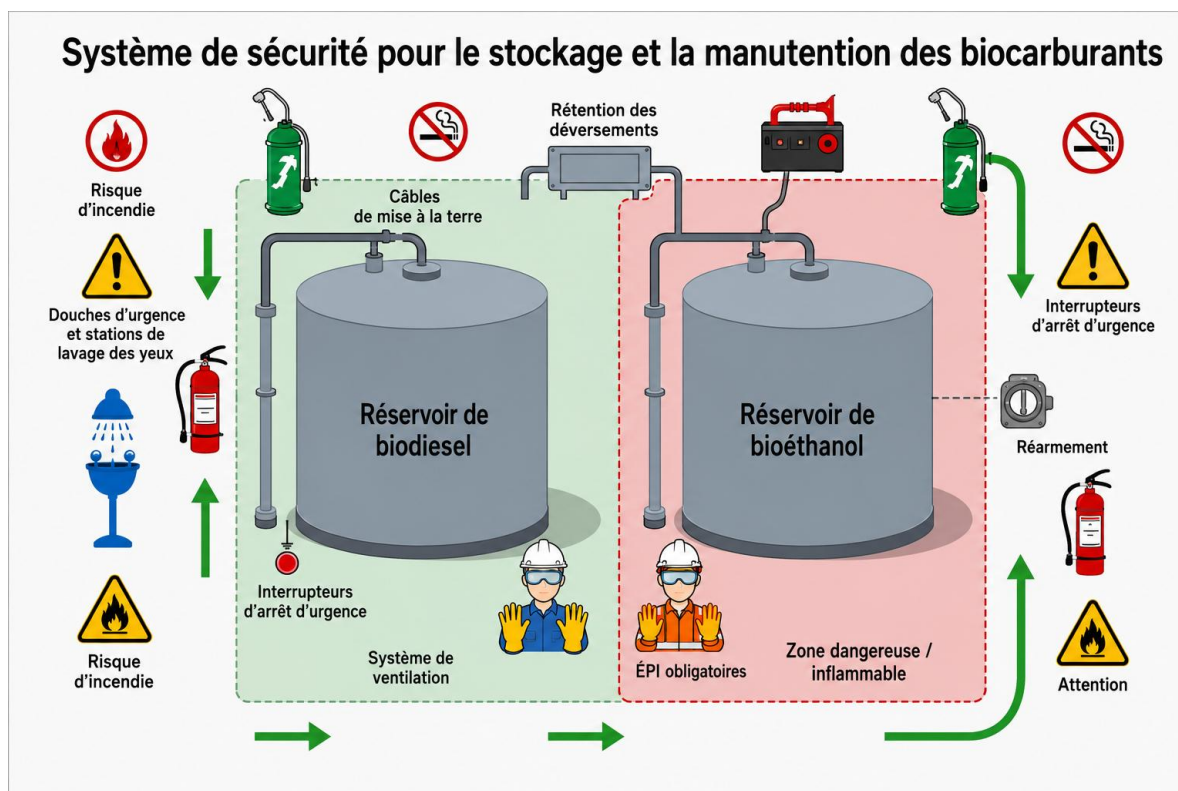


Figure 5.2 — Système de sécurité pour le stockage et la manutention des biocarburants

5.4. Transport

Le transport est la dernière étape avant la livraison aux terminaux de mélange, dépôts, industriels ou marchés de détail. Les biocarburants peuvent être transportés par camion-citerne, wagon-citerne, pipeline, voie navigable ou navire selon l'échelle et les infrastructures. Dans de nombreux pays ouest-africains, la route domine en raison du développement limité des réseaux ferroviaires et de pipelines.

Les citernes de transport doivent être dédiées ou spécifiquement adaptées au service afin d'éviter la contamination par les cargaisons précédentes. Avant chargement, elles doivent être inspectées pour vérifier propreté, intégrité mécanique, absence d'eau et absence de résidus incompatibles.

Le chargement doit utiliser des systèmes fermés afin de réduire les émissions de vapeur et l'exposition à l'humidité. La mise à la terre et la liaison equipotentielle sont obligatoires pendant les opérations de chargement et de déchargement afin de prévenir l'accumulation d'électricité statique. Les niveaux doivent être surveillés pour éviter le surremplissage et les déversements.

La qualité doit être préservée durant le trajet : le biodiesel ne doit pas rester longtemps en plein soleil à température élevée, ce qui accélère son oxydation ; les circuits d'éthanol doivent limiter l'entrée d'humidité par des raccordements étanches et des événements fonctionnels.

La planification logistique prend en compte distance, état des routes, accessibilité saisonnière, demande des clients, capacités de stockage et calendrier des livraisons. Une logistique optimisée réduit les coûts tout en assurant la disponibilité du carburant.

Chaque expédition doit être accompagnée d'informations de traçabilité : identification du produit, numéro de lot, certificat qualité, quantité, destination, consignes de sécurité et contacts d'urgence. Les opérateurs de transport doivent disposer d'équipements d'intervention contre les déversements, d'absorbants, de moyens de communication et d'extincteurs appropriés. Les conducteurs doivent être formés au transport de matières dangereuses, à la conduite préventive, aux interventions d'urgence et à la conformité réglementaire.

L'efficacité de transport (TE) peut être calculée par :

$$TE (\%) = (\text{carburant livré} / \text{carburant chargé}) \times 100$$

Exemple 5.3

Une citerne est chargée de 18 000 litres de biodiesel et en livre 17 820 litres.

$$TE = (17\,820 \div 18\,000) \times 100 = 99 \%$$

Cette valeur traduit une excellente performance de distribution avec des pertes minimales.

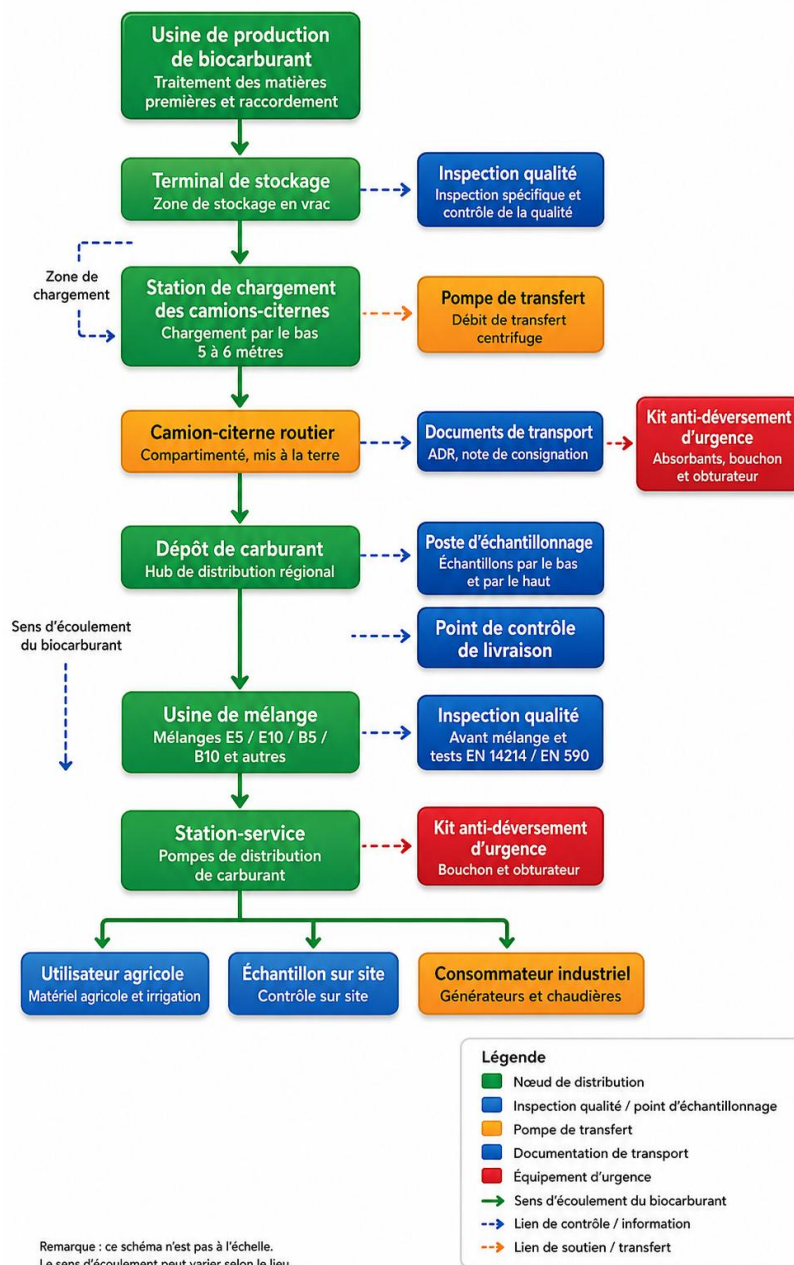


Figure 5.3 — Réseau de distribution et de transport des biocarburants

Application pratique

Un producteur de biodiesel en Côte d'Ivoire fournit des coopératives agricoles et des groupes électrogènes de zones rurales. Après certification en laboratoire, le biodiesel est transféré dans des cuves dédiées en acier au carbone équipées de dispositifs limitant l'humidité et d'un confinement secondaire. Avant le chargement, chaque camion-citerne est inspecté, sa propreté est vérifiée et un échantillon représentatif est prélevé. Les conducteurs suivent les itinéraires prescrits, conservent la documentation et disposent du matériel d'intervention nécessaire.

À la livraison, les techniciens vérifient l'identité du produit, les conditions de stockage et prélèvent un échantillon de confirmation avant déchargement. Cette pratique démontre l'intégration de la préservation qualité, de la logistique, de la sécurité au travail et de la protection environnementale sur toute la chaîne post-production.

5.5. Résumé du chapitre

Des systèmes efficaces de stockage, manutention et distribution sont indispensables pour préserver la qualité, la sécurité et la valeur commerciale du biodiesel et du bioéthanol. Les installations de stockage protègent contre l'oxydation, l'humidité, les contaminations et les températures extrêmes. Une gestion globale de la sécurité associe mesures techniques, EPI, prévention incendie, gestion des déversements, communication des dangers et formation. Le transport conserve la qualité grâce à des équipements dédiés, des procédures de chargement adaptées, une documentation complète et un entretien préventif, tout en limitant les pertes et les impacts environnementaux.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Un producteur souhaite construire une capacité de stockage correspondant à dix jours de production, à raison de 15 000 litres par jour. Déterminez la capacité minimale et évaluez les caractéristiques techniques nécessaires pour préserver le carburant, prévenir la pollution et assurer la sécurité sous climat tropical ouest-africain.
2. Un camion-citerne transportant de l'éthanol carburant se renverse en route vers un dépôt régional et provoque un déversement important. Élaborez un plan complet d'intervention couvrant sécurité du personnel, prévention incendie, confinement, protection de l'environnement, communication avec les secours et enquête ultérieure. Expliquez comment une préparation appropriée peut réduire les conséquences.
3. Une société de distribution charge 25 000 litres de biodiesel mais n'en livre régulièrement que 24 600 litres. Calculez l'efficacité de transport, identifiez les causes techniques et opérationnelles probables et recommandez des améliorations permettant de réduire les pertes tout en préservant qualité et conformité.

BM-A4

Production d'électricité à partir de biomasse et conception de systèmes énergétiques ruraux

Objectifs d'apprentissage

À l'issue de ce cours, les stagiaires seront capables de :

- concevoir des systèmes de production d'électricité à partir de biomasse ;
- analyser des systèmes de cogénération de chaleur et d'électricité (CHP) ;
- développer des solutions énergétiques décentralisées à base de biomasse ;
- réaliser des évaluations technico-économiques de base ;
- concevoir des systèmes biomasse pour l'électrification rurale et les services énergétiques communautaires.

BM-A4-1

Technologies de production d'électricité à partir de biomasse

1.1. Introduction

La production d'électricité à partir de biomasse transforme l'énergie chimique contenue dans les matières organiques en énergie électrique et thermique utile. Contrairement aux sources intermittentes telles que le solaire et l'éolien, la biomasse peut fournir une puissance continue et pilotable lorsqu'elle est gérée durablement.

En Afrique de l'Ouest, les résidus agricoles et forestiers, résidus de palmier à huile, balles de riz, sciure, coques de noix de coco et déchets organiques municipaux offrent des possibilités importantes de production décentralisée et de développement industriel rural. La maîtrise des technologies de production permet aux techniciens et formateurs de concevoir, exploiter et maintenir des systèmes fiables destinés aux agro-industries, communautés rurales, établissements d'enseignement et petites industries.

1.2. Systèmes de production par combustion

La combustion est la réaction chimique contrôlée entre la biomasse et l'oxygène qui libère de la chaleur. Cette chaleur est ensuite transformée en énergie mécanique puis électrique, notamment au moyen de turbines à vapeur. La combustion reste la technologie la plus mature et la plus répandue en raison de sa simplicité, de sa fiabilité et de sa capacité à utiliser de nombreux combustibles biomasse.

Avant combustion, la biomasse est généralement séchée, réduite en taille et tamisée. L'humidité affecte fortement les performances, car une partie de l'énergie sert d'abord à évaporer l'eau. Pour de nombreux systèmes, le cours recommande une humidité inférieure à environ 20 %.

La combustion se déroule en trois grandes étapes :

1. **Séchage** : élimination de l'humidité.

2. **Pyrolyse** : libération de composés volatils lorsque la biomasse se décompose à haute température.

3. **Combustion du charbon** : oxydation du carbone solide restant en CO₂ avec dégagement de chaleur.

Les principaux systèmes sont :

- **foyers à lit fixe** : construction simple, faible coût d'exploitation, adaptés aux petites installations ;
- **foyers à lit fluidisé** : particules maintenues en suspension par l'air, assurant bon mélange, rendement élevé et grande flexibilité de combustible ;
- **combustion de biomasse pulvérisée** : biomasse finement broyée, adaptée aux grandes centrales.

Le rendement de combustion (CF) peut être estimé par :

$$CF (\%) = (chaleur\ utile\ produite / chaleur\ disponible\ dans\ la\ biomasse) \times 100$$

Exemple 1.1

Un système reçoit une biomasse contenant 5 500 MJ et transmet 4 620 MJ de chaleur utile au système vapeur.

$$CF = (4\ 620 \div 5\ 500) \times 100 = 84 \%$$

Ce résultat correspond à une combustion efficace avec des pertes thermiques relativement faibles.

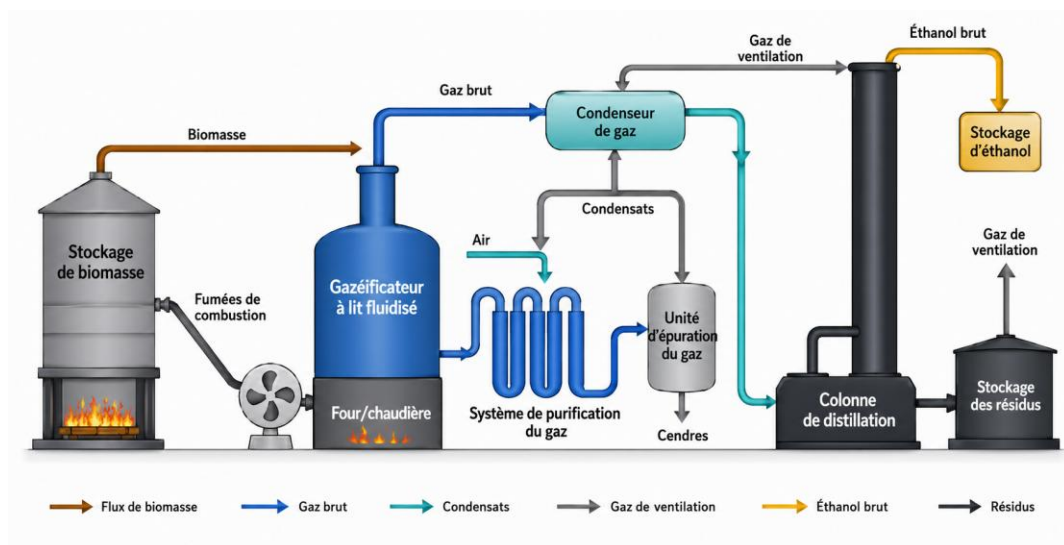


Figure 1.1 — Centrale électrique à combustion de biomasse

1.3. Systèmes de production de vapeur

La production de vapeur constitue le cœur de nombreuses centrales biomasse. La chaleur de combustion est transférée à l'eau dans les tubes de chaudière, générant de la vapeur à haute pression. Cette vapeur se détend dans une turbine et fait tourner son arbre, qui entraîne un générateur électrique.

La chaudière est le principal échangeur thermique. Un échangeur de chaleur transfère de l'énergie thermique entre deux fluides sans qu'ils se mélangent. Les chaudières industrielles comprennent notamment :

- chaudières à tubes de fumée ;
- chaudières à tubes d'eau ;

- chaudières à lit fluidisé.

Les chaudières à tubes d'eau sont souvent privilégiées pour les moyennes et grandes installations, car elles peuvent fonctionner en sécurité à pression et température élevées tout en produisant rapidement de grandes quantités de vapeur.

Le **cycle de Rankine** est le cycle thermodynamique le plus courant dans les centrales à vapeur biomasse. Il comprend quatre étapes :

1. l'eau est pompée à haute pression ;
2. la chaudière transforme l'eau pressurisée en vapeur ;
3. la vapeur se détend dans la turbine et produit de la puissance mécanique ;
4. la vapeur est condensée en eau et renvoyée vers la chaudière.

La puissance électrique dépend notamment de la pression de vapeur, de la température, du débit massique et du rendement de la turbine.

Le rendement de chaudière (BF) est calculé par :

$$BF (\%) = (\text{chaleur absorbée par l'eau} / \text{chaleur libérée par le combustible}) \times 100$$

Exemple 1.2

Une chaudière reçoit 7 200 MJ de chaleur issue du combustible et l'eau en absorbe 6 120 MJ.

$$BF = (6\,120 \div 7\,200) \times 100 = 85 \%$$

Le résultat traduit une bonne performance de transfert thermique.

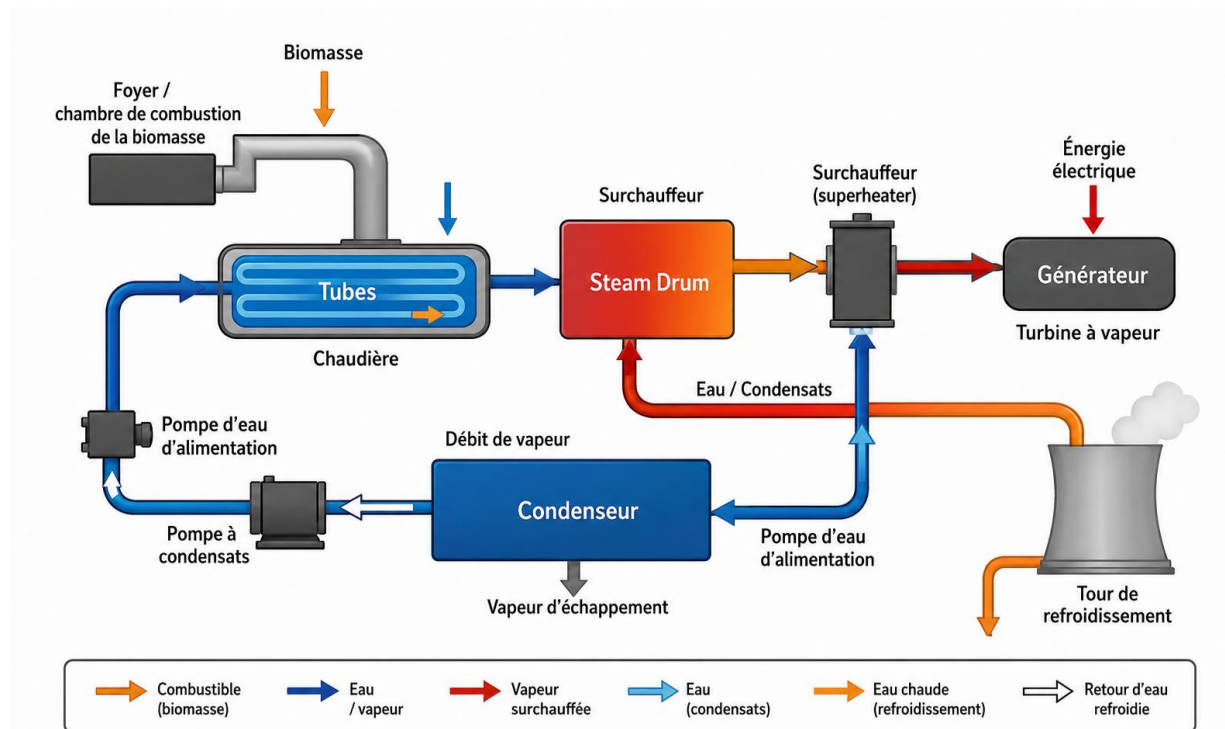


Figure 1.2 — Cycle de production d'électricité à vapeur à partir de biomasse

1.4. Technologies de cogénération (CHP)

La cogénération, ou production combinée de chaleur et d'électricité (CHP), produit simultanément de l'électricité et de la chaleur utile à partir d'une même source de combustible. Contrairement aux centrales classiques qui rejettent une grande partie de la chaleur fatale, un système CHP la récupère pour des usages comme le séchage des cultures, le chauffage industriel, la transformation alimentaire, l'eau chaude ou le chauffage des locaux.

Dans un système biomasse CHP, la chaudière génère de la vapeur qui traverse d'abord une turbine entraînant un générateur électrique. Au lieu de rejeter toute la vapeur d'échappement, la chaleur résiduelle est récupérée par des échangeurs et fournie aux procédés industriels ou aux systèmes de chauffage.

Les rendements globaux dépassent fréquemment 80 %. Les applications citées comprennent les huileries de palme, sucreries, rizeries, industries alimentaires, textiles, hôpitaux, universités et centres ruraux d'agro-transformation.

Le rendement global est :

$$\text{Rendement CHP global (\%)} = ((\text{énergie électrique} + \text{chaleur utile}) / \text{énergie du combustible}) \times 100$$

Exemple 1.3

Une installation reçoit 10 000 MJ de biomasse, produit 2 900 MJ d'électricité et récupère 5 300 MJ de chaleur utile.

$$\text{Rendement CHP} = ((2\,900 + 5\,300) \div 10\,000) \times 100 = 82 \%$$

Cet exemple montre l'avantage de valoriser la chaleur qui serait autrement perdue.

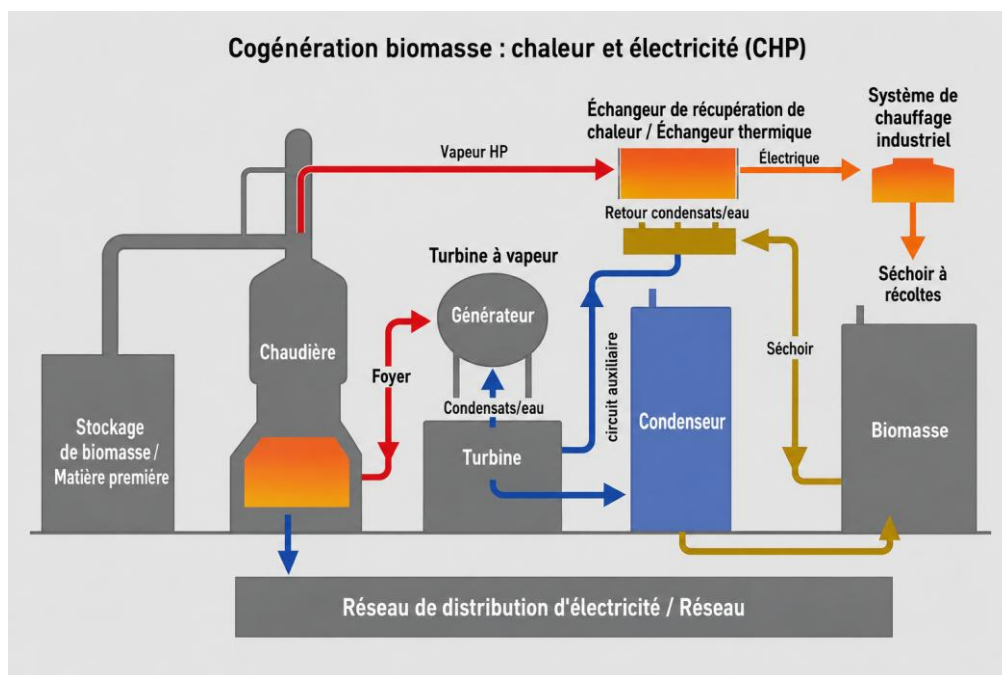


Figure 1.3 — Système biomasse de cogénération de chaleur et d'électricité

Application pratique

Une coopérative de transformation d'huile de palme au Ghana génère des rafles, coques de palmiste et fibres en quantité. Elle installe une centrale biomasse CHP. La combustion fournit la vapeur nécessaire à la stérilisation des fruits et produit simultanément de l'électricité pour les équipements d'extraction, l'éclairage et les logements du personnel. L'électricité excédentaire est fournie aux entreprises voisines, tandis que la chaleur récupérée sert au séchage des palmistes. Cet exemple montre comment les résidus deviennent une ressource énergétique et réduisent l'usage du diesel, les coûts d'exploitation et la vulnérabilité énergétique rurale.

1.5. Résumé du chapitre

La combustion de biomasse reste une technologie très répandue pour la production renouvelable d'électricité grâce à sa fiabilité, sa flexibilité de combustible et son expérience industrielle. Les systèmes vapeur convertissent la chaleur en vapeur haute pression, qui entraîne une turbine selon le cycle de Rankine. La cogénération améliore encore l'efficacité en récupérant la chaleur résiduelle pour les procédés ou les services communautaires, avec des rendements globaux pouvant dépasser 80 %. La préparation du combustible, l'efficacité de combustion, la conduite de la chaudière et la récupération de chaleur sont essentielles pour maximiser la production tout en réduisant coûts et impacts environnementaux.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez la combustion de biomasse et expliquez ses trois grandes étapes. Pourquoi une combustion complète est-elle importante pour une production efficace d'électricité ?
2. Comparez les foyers à lit fixe et à lit fluidisé en termes de principe, avantages, limites et applications. Quelle technologie recommanderiez-vous pour une rizerie de taille moyenne en Afrique de l'Ouest ? Justifiez.
3. Une chaudière reçoit 8 500 MJ de chaleur et transfère 7 140 MJ au système vapeur. Calculez son rendement.
4. Expliquez comment le cycle de Rankine convertit la chaleur en électricité. Décrivez le rôle de la chaudière, de la turbine, du condenseur, de la pompe d'alimentation et du générateur.
5. Une usine de manioc produit environ 20 tonnes de pelures par jour et souhaite les utiliser pour produire de l'électricité. Recommandez une technologie, en précisant préparation, équipements, bénéfices et difficultés possibles.
6. Une chaudière biomasse produit moins de vapeur alors que la consommation de combustible augmente. Identifiez au moins quatre causes possibles et proposez des actions correctives.
7. Une installation CHP reçoit 12 000 MJ de biomasse, produit 3 400 MJ d'électricité et 6 100 MJ de chaleur utile. Calculez le rendement global, expliquez pourquoi la cogénération est plus efficace qu'une centrale électrique classique et citez deux secteurs ouest-africains susceptibles d'en bénéficier.

Composants et exploitation d'une centrale biomasse

2.1. Introduction

Une centrale biomasse comprend plusieurs sous-systèmes intégrés qui transforment la biomasse en électricité en toute sécurité. La biomasse doit être réceptionnée, préparée et alimentée vers le système de combustion. La chaleur génère de la vapeur dans la chaudière ; celle-ci entraîne une turbine reliée à un générateur. La compréhension de la conception, de l'exploitation et de la maintenance de ces composants permet d'améliorer la fiabilité, réduire les arrêts et maximiser la production.

2.2. Systèmes de manutention du combustible

Le système de manutention reçoit, stocke, prépare et alimente la biomasse à un débit régulier. Il assure la continuité de fonctionnement, limite les pertes, réduit le travail manuel et évite les interruptions dues à une alimentation irrégulière.

Le processus commence par la livraison et l'inspection. L'humidité, la granulométrie, la contamination et le contenu énergétique sont vérifiés avant stockage. La biomasse est ensuite dirigée vers des silos, trémies ou entrepôts couverts protégés de la pluie et de l'humidité.

Avant combustion, une réduction de taille peut être réalisée avec déchiqueteuses, concasseurs ou broyeurs à marteaux. Une granulométrie uniforme améliore l'alimentation, la combustion et les transferts thermiques. Une biomasse humide peut être séchée avec de la chaleur récupérée de la centrale.

Les convoyeurs mécaniques assurent le transfert : bandes transporteuses pour les trajets horizontaux, convoyeurs à vis pour l'alimentation contrôlée des chaudières, élévateurs à godets pour les transferts verticaux. Les installations modernes utilisent des doseurs automatiques commandés par capteurs et PLC.

Les problèmes courants comprennent la formation de voûtes dans les silos, le blocage des convoyeurs, la poussière excessive, la combustion instable et l'usure des équipements. L'entretien préventif, une granulométrie adaptée et la maîtrise de l'humidité améliorent la fiabilité.

Le débit d'alimentation peut être estimé par :

$$\text{Débit de combustible} = \text{puissance thermique requise} / \text{pouvoir calorifique du combustible}$$

Exemple 2.1

Une chaudière exige 15 MW thermiques et les copeaux disponibles ont un PCI de 15 MJ/kg.

$$\text{Débit} = 15 \text{ MJ/s} \div 15 \text{ MJ/kg} = 1 \text{ kg/s}$$

Le système doit donc fournir environ 1 kg de biomasse par seconde.

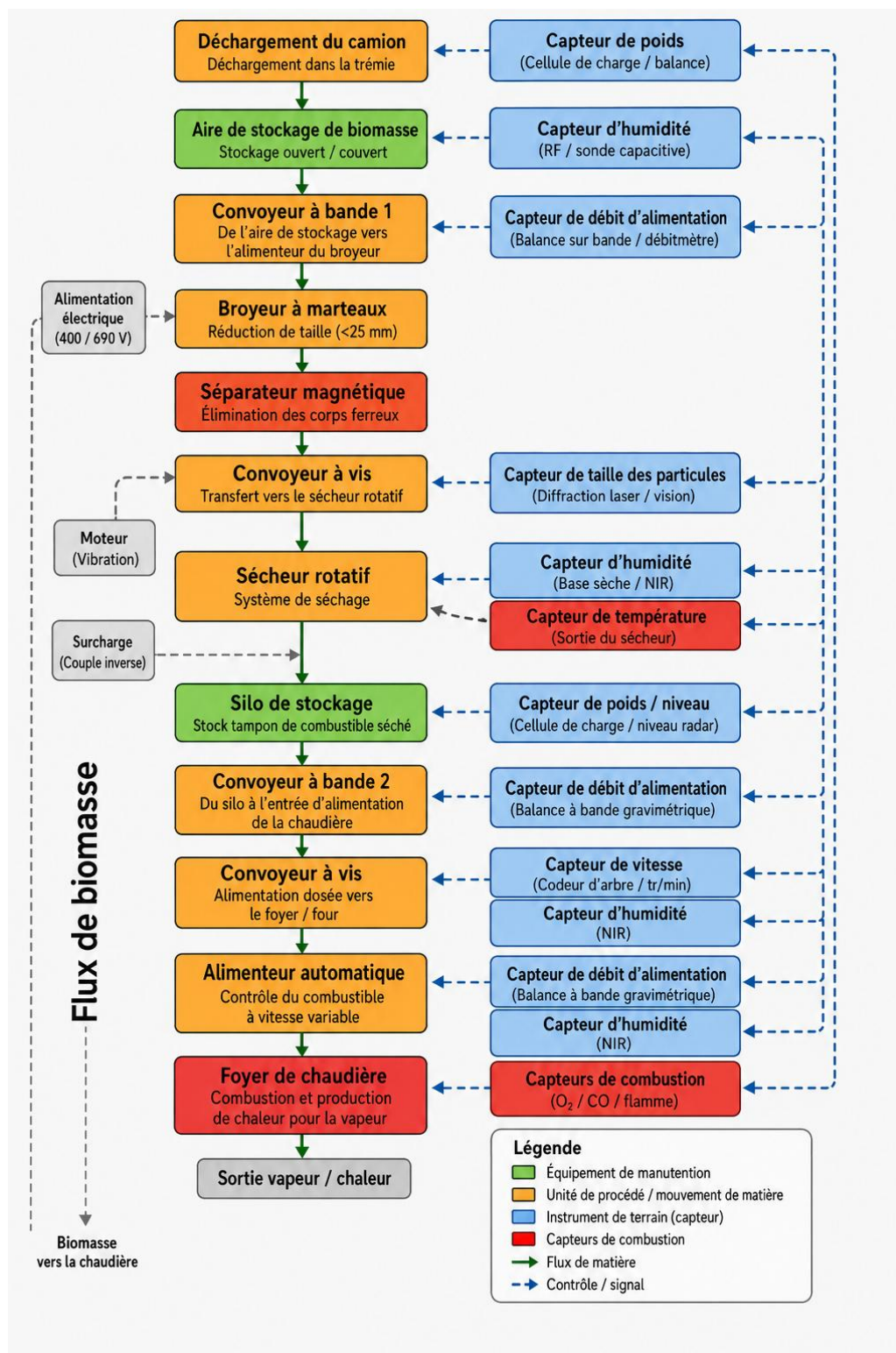


Figure 2.1 — Système de manutention du combustible biomasse

2.3. Chaudières et turbines

La chaudière et la turbine à vapeur constituent le cœur de la production. La chaudière transforme l'eau en vapeur haute pression grâce à la chaleur de combustion. Elle comprend généralement chambre de combustion, tubes d'eau ou tubes de fumée, ballon vapeur, surchauffeur, économiseur, préchauffeur d'air, système d'évacuation des cendres et traitement des fumées.

Les chaudières à tubes d'eau sont courantes en centrale biomasse parce qu'elles supportent des pressions et températures élevées. L'économiseur récupère la chaleur des fumées pour préchauffer l'eau d'alimentation ;

le préchauffeur d'air utilise également les fumées pour chauffer l'air de combustion et réduire la consommation de combustible.

La vapeur haute pression se détend à travers plusieurs étages d'aubes de turbine. Son énergie thermique est convertie en énergie mécanique de rotation. Les turbines peuvent être :

- **à action** : des jets de vapeur à grande vitesse frappent les aubes ;
- **à réaction** : la rotation est produite par les différences de pression à travers les aubes mobiles.

Les grandes centrales emploient souvent des turbines à réaction multi-étagées.

La maintenance des chaudières comprend inspection des surfaces d'échange, nettoyage des suies, surveillance de la qualité de l'eau, contrôle des soupapes et des régulations de pression. Pour les turbines : lubrification des paliers, surveillance vibratoire, alignement du rotor, inspection des aubes et remplacement des joints.

Le rendement de chaudière (BE) est :

$$BE (\%) = (\text{chaleur utile transmise à la vapeur} / \text{chaleur libérée par la biomasse}) \times 100$$

Exemple 2.2

Une chaudière reçoit 9 500 MJ et en transfère 8 075 MJ à la vapeur.

$$BE = (8\,075 \div 9\,500) \times 100 = 85 \%$$

2.4. Systèmes de génération électrique

Le générateur synchrone transforme l'énergie mécanique de la turbine en courant alternatif par induction électromagnétique. Le rotor produit un champ magnétique tournant qui induit une tension dans les enroulements fixes du stator. Des transformateurs élèvent ensuite la tension pour le transport. Les appareillages de commutation protègent et isolent les équipements, et les disjoncteurs déconnectent automatiquement les sections défectueuses.

Les centrales modernes utilisent des PLC et des systèmes SCADA pour surveiller tension, fréquence, courant, facteur de puissance, vitesse de turbine et charge. Le rendement électrique dépend de la conception du générateur, des pertes mécaniques et électriques et des conditions d'exploitation.

Le rendement du générateur (GE) est :

$$GE (\%) = (\text{puissance électrique de sortie} / \text{puissance mécanique d'entrée}) \times 100$$

Exemple 2.3

Une turbine fournit 4,8 MW mécaniques et le générateur délivre 4,5 MW électriques.

$$GE = (4,5 \div 4,8) \times 100 = 93,8 \%$$

La sécurité électrique est essentielle : mise à la terre, isolation, protection contre les surcharges, courts-circuits et foudre. Les procédures de consignation (LOTO) doivent être appliquées avant toute intervention.

Application pratique

Une scierie de taille moyenne au Liberia produit plusieurs tonnes de sciure et de chutes de bois par jour. Elle installe une chaudière biomasse et une turbine à vapeur avec alimentation automatisée. La biomasse est transférée des silos par vis vers la chambre de combustion. L'électricité alimente les équipements, l'éclairage et les bureaux, tandis que le surplus est fourni aux communautés voisines via un mini-réseau. Les formateurs utilisent l'installation pour enseigner manutention, chaudière, turbine, synchronisation, maintenance et diagnostic des pannes.

2.5. Résumé du chapitre

La production efficace d'électricité repose sur l'intégration correcte des systèmes de manutention du combustible, chaudières, turbines à vapeur et équipements électriques. La manutention assure une alimentation continue et uniforme. La chaudière transforme la chaleur de combustion en vapeur haute pression, la turbine convertit cette énergie en puissance mécanique, puis le générateur produit l'électricité. Maintenance, automatisation, inspection préventive et contrôle du procédé améliorent fiabilité et efficacité tout en réduisant les coûts.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez : a) système de manutention du combustible ; b) chaudière ; c) turbine à vapeur ; d) générateur synchrone.
2. Expliquez les fonctions des principaux composants d'un système de manutention. Pourquoi un débit de combustible constant est-il important pour la stabilité de la chaudière ?
3. Comparez chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumée en termes de construction, pression, efficacité, sécurité et applications. Laquelle convient le mieux à une centrale biomasse de taille moyenne ?
4. Une chaudière reçoit 12 500 MJ et transmet 10 500 MJ à la vapeur. Calculez son rendement.
5. Une usine de transformation du bois souhaite valoriser sa sciure. Décrivez les principaux composants nécessaires à la manutention, à la chaudière et à la génération électrique et expliquez leur fonctionnement intégré.
6. Des fluctuations de pression vapeur et de puissance électrique ainsi que des blocages fréquents du convoyeur sont observés. Identifiez quatre causes possibles et proposez des mesures correctives.
7. Une turbine fournit 6 MW mécaniques et le générateur produit 5,58 MW. Calculez le rendement du générateur, discutez des facteurs qui l'influencent et expliquez l'apport de la maintenance régulière.

Surveillance des performances et analyse de l'efficacité

3.1. Introduction

La réussite à long terme d'une centrale biomasse dépend autant de son exploitation que de sa conception. La surveillance des performances consiste à mesurer et évaluer en continu des paramètres techniques afin de garantir un fonctionnement sûr, efficace et économique. L'analyse des rendements permet d'identifier les pertes, d'optimiser les équipements, de réduire la consommation de combustible et d'améliorer la production.

À mesure que les centrales biomasse sont raccordées aux réseaux nationaux et mini-réseaux ouest-africains, les techniciens doivent également maîtriser les exigences de l'intégration électrique.

3.2. Indicateurs d'efficacité

Les indicateurs courants comprennent :

- rendement de chaudière : transfert de la chaleur de combustion vers l'eau/vapeur ;
- rendement de turbine : conversion de l'énergie de la vapeur en énergie mécanique ;
- rendement du générateur : conversion mécanique-électrique ;
- rendement global de la centrale : conversion de l'énergie biomasse en électricité utile ;
- rendement global CHP : inclut aussi la chaleur utile ;
- taux de chaleur (*heat rate*) : énergie du combustible nécessaire pour produire une unité d'électricité, un taux plus faible indiquant une meilleure performance ;
- disponibilité : proportion du temps programmé pendant laquelle la centrale est capable de produire ;
- facteur de capacité : énergie réellement produite par rapport à l'énergie maximale possible à pleine puissance.

Le rendement électrique global (EE) est :

$$EE (\%) = (\text{énergie électrique produite} / \text{énergie de la biomasse consommée}) \times 100$$

Exemple 3.1

Une centrale consomme 18 000 MJ de biomasse et produit 5 400 MJ d'électricité.

$$EE = (5\,400 \div 18\,000) \times 100 = 30 \%$$

Si elle fournit aussi 8 100 MJ de chaleur utile :

$$\text{Rendement CHP} = ((5\,400 + 8\,100) \div 18\,000) \times 100 = 75 \%$$

La valorisation de la chaleur améliore fortement le rendement global.

3.3. Optimisation de l'exploitation

L'optimisation vise à améliorer continuellement les performances tout en réduisant consommation, coûts, usure et émissions.

Combustion et combustible

Le rapport air/combustible doit permettre une combustion complète sans excès d'air inutile qui évacuerait de la chaleur dans les fumées. Une mauvaise combustion augmente la consommation, les fumées, la formation de clinker et réduit la vapeur produite. Une biomasse trop humide abaisse la température, car une part de l'énergie est utilisée pour évaporer l'eau. Une granulométrie irrégulière perturbe également la combustion.

Circuit vapeur

La pression, la température et le débit de vapeur doivent rester dans les plages prévues. Les tubes de chaudière sont nettoyés régulièrement pour éliminer les suies qui réduisent le transfert de chaleur. Le traitement de l'eau évite le tartre, qui agit comme un isolant thermique.

Automatisation et maintenance

Les PLC, SCADA et DCS surveillent températures, pressions, débits de combustible et d'air, puissance du générateur, vibrations et émissions. Ils permettent d'ajuster automatiquement les conditions. L'entretien préventif des convoyeurs, pompes, paliers, turbines, générateurs, vannes, échangeurs et équipements électriques limite les arrêts inattendus.

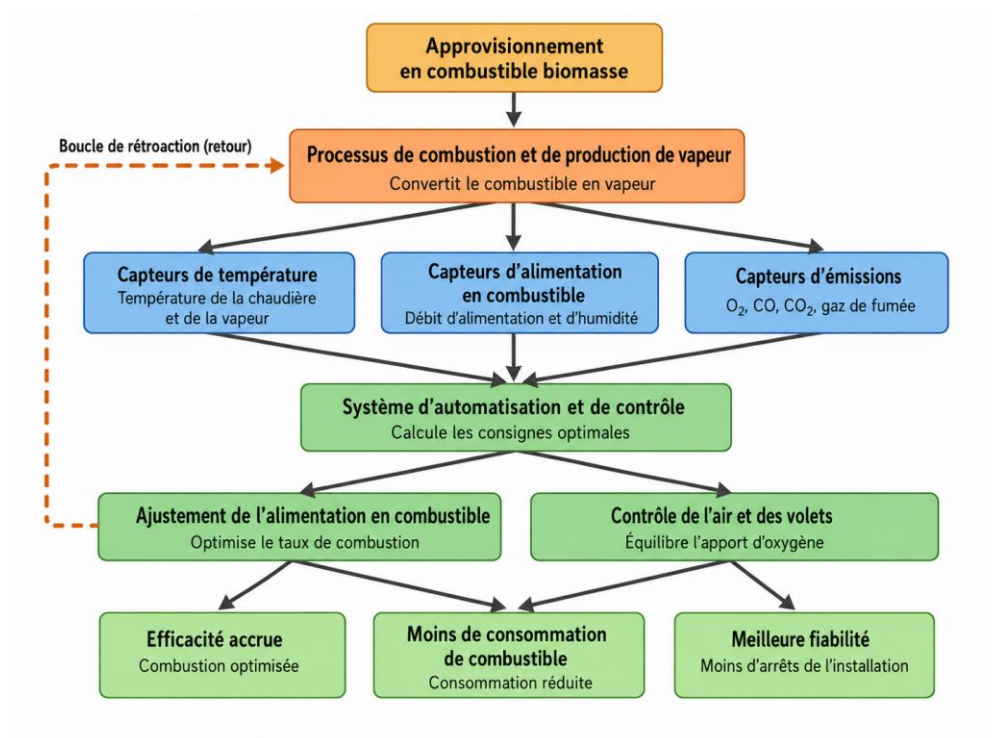


Figure 3.2 — Système d'optimisation du procédé d'une centrale biomasse

La consommation spécifique de combustible (SFC) est :

$$SFC = \text{biomasse consommée} / \text{électricité produite}$$

Exemple 3.2

Une centrale consomme 16 tonnes de biomasse pour 40 MWh.

$$SFC = 16 \div 40 = 0,40 \text{ tonne/MWh}$$

Après optimisation, la consommation tombe à 14 tonnes pour la même production :

$$\text{Nouvelle } SFC = 14 \div 40 = 0,35 \text{ tonne/MWh}$$

La valorisation du combustible s'est donc améliorée.

3.4. Considérations relatives au raccordement au réseau

L'intégration au réseau consiste à connecter la centrale à un réseau de transport ou de distribution afin de fournir de l'électricité de manière fiable. Avant couplage, tension, fréquence et angle de phase du générateur doivent correspondre au réseau. Le cours rappelle que la fréquence est d'environ 50 Hz dans la plupart des pays d'Afrique de l'Ouest.

La **synchronisation** compare la tension, la fréquence et la séquence des phases du générateur avec celles du réseau ; le disjoncteur de couplage ne se ferme que lorsque les conditions sont satisfaites.

Les protections comprennent disjoncteurs et relais mesurant tension, courant, fréquence et sens de puissance. La centrale doit maintenir une bonne qualité d'énergie en limitant fluctuations, harmoniques et interruptions, particulièrement pour les hôpitaux, industries, installations de communication et établissements d'enseignement.

Pour l'électrification rurale, des centrales biomasse peuvent fonctionner en mini-réseau isolé. Si le réseau national s'étend ultérieurement, ces mini-réseaux peuvent être interconnectés, sous réserve de respecter le code réseau, les études de qualité de puissance et la coordination des protections demandées par l'opérateur.

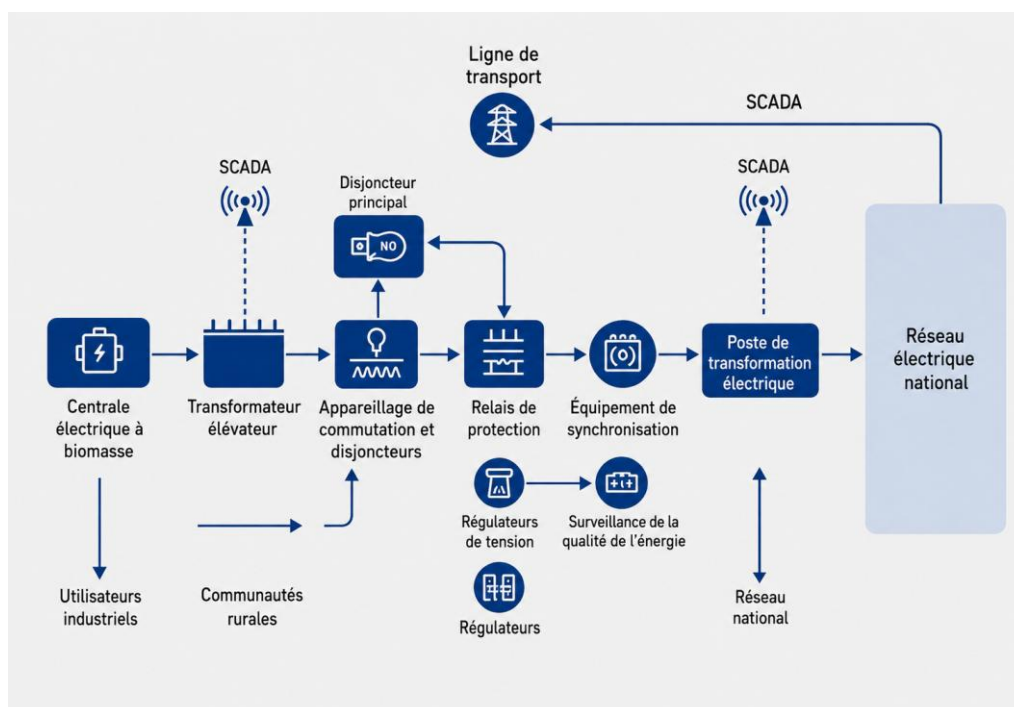


Figure 3.3 — Intégration d'une centrale biomasse au réseau électrique

Le facteur de charge de la centrale (PLF) est :

$$PLF (\%) = (\text{énergie réellement produite} / \text{production maximale possible}) \times 100$$

Exemple 3.3

Une centrale de 5 MW fonctionne pendant 24 h.

$$\text{Production maximale} = 5 \times 24 = 120 \text{ MWh}$$

Production réelle : 102 MWh.

$$PLF = (102 \div 120) \times 100 = 85 \%$$

Cela indique une très bonne utilisation de l'installation.

Application pratique

Une sucrerie au Nigeria exploite une centrale CHP alimentée par la bagasse. Les opérateurs suivent rendement de chaudière, pression vapeur, puissance turbine, consommation et performance du générateur via SCADA. Des rapports quotidiens permettent d'identifier les tendances, planifier la maintenance et optimiser la combustion. Pendant la campagne sucrière, l'électricité excédentaire est exportée vers le réseau national après synchronisation via un poste dédié. Les stagiaires utilisent cette installation pour relier calculs de rendement, données réelles et procédures de couplage.

3.5. Résumé du chapitre

La surveillance continue des performances permet d'améliorer efficacité, fiabilité et économie des centrales biomasse. Des indicateurs tels que rendement de chaudière, rendement du générateur, rendement global, taux de chaleur, facteur de capacité et PLF décrivent la performance. L'optimisation combine combustion efficace, préparation du combustible, automatisation, maintenance préventive et analyse de données. Le raccordement au réseau exige synchronisation, régulation de tension et fréquence, protections et respect des exigences nationales.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Expliquez pourquoi la surveillance continue est importante et comment les données en temps réel améliorent fiabilité, efficacité et planification de la maintenance.
2. Distinguez rendement électrique et rendement global CHP. Pourquoi les installations CHP sont-elles généralement plus efficaces ?
3. Une centrale reçoit 22 000 MJ de biomasse et produit 6 600 MJ d'électricité. Calculez son rendement électrique.
4. La consommation augmente tandis que la production de vapeur diminue pendant plusieurs semaines. Identifiez les causes possibles et recommandez des mesures de restauration de l'efficacité.
5. Décrivez les exigences techniques avant raccordement au réseau et expliquez l'importance de la synchronisation, de la régulation de tension/fréquence et des protections.

6. Une centrale de 8 MW fonctionne 24 h et produit 168 MWh. Calculez le PLF, interprétez le résultat et proposez deux améliorations possibles.

BM-A4-4

Systèmes biomasse décentralisés et ruraux

4.1. Introduction

L'accès à une électricité fiable reste difficile dans de nombreuses communautés rurales d'Afrique de l'Ouest. L'extension des réseaux nationaux vers les zones éloignées est souvent coûteuse en raison des longues distances, de la faible densité de population et du coût des infrastructures. Des systèmes énergétiques biomasse décentralisés offrent une solution en utilisant des résidus agricoles, des déchets forestiers, du fumier et des coproduits agro-industriels disponibles localement pour produire électricité et chaleur à proximité des consommateurs.

Ces systèmes réduisent la dépendance aux combustibles fossiles, créent des emplois locaux, améliorent la productivité agricole et favorisent le développement économique rural.

4.2. Applications en mini-réseau

Un mini-réseau est un réseau local de distribution d'électricité desservant une zone limitée : village, coopérative agricole, école, centre de santé ou petit parc industriel. Il peut fonctionner indépendamment ou être raccordé ultérieurement au réseau national.

Un mini-réseau biomasse peut utiliser la combustion, la gazéification ou le biogaz. Ses principaux éléments sont :

- stockage de biomasse ;
- préparation du combustible ;
- unité de conversion ;
- générateur ;
- transformateurs ;
- lignes de distribution ;
- protections ;
- branchements clients.

Les matières premières typiques comprennent balles de riz, rafles de maïs, pelures de manioc, coques de noix de coco, sciure, coques de palmiste, bagasse et fumier. La capacité dépend de la demande, de la disponibilité de biomasse, de l'évolution de la population et des variations saisonnières. Une évaluation de la demande est donc nécessaire avant le dimensionnement.

La demande énergétique quotidienne (DED) peut être estimée par :

$$DED \text{ (kWh/jour)} = \text{puissance totale raccordée (kW)} \times \text{nombre moyen d'heures de fonctionnement}$$

Exemple 4.1

Une communauté a une charge raccordée de 85 kW utilisée en moyenne 8 h/jour.

$$\text{Demande quotidienne} = 85 \times 8 = 680 \text{ kWh/jour}$$

Cette valeur sert de base au dimensionnement du générateur et à l'estimation du besoin de biomasse.

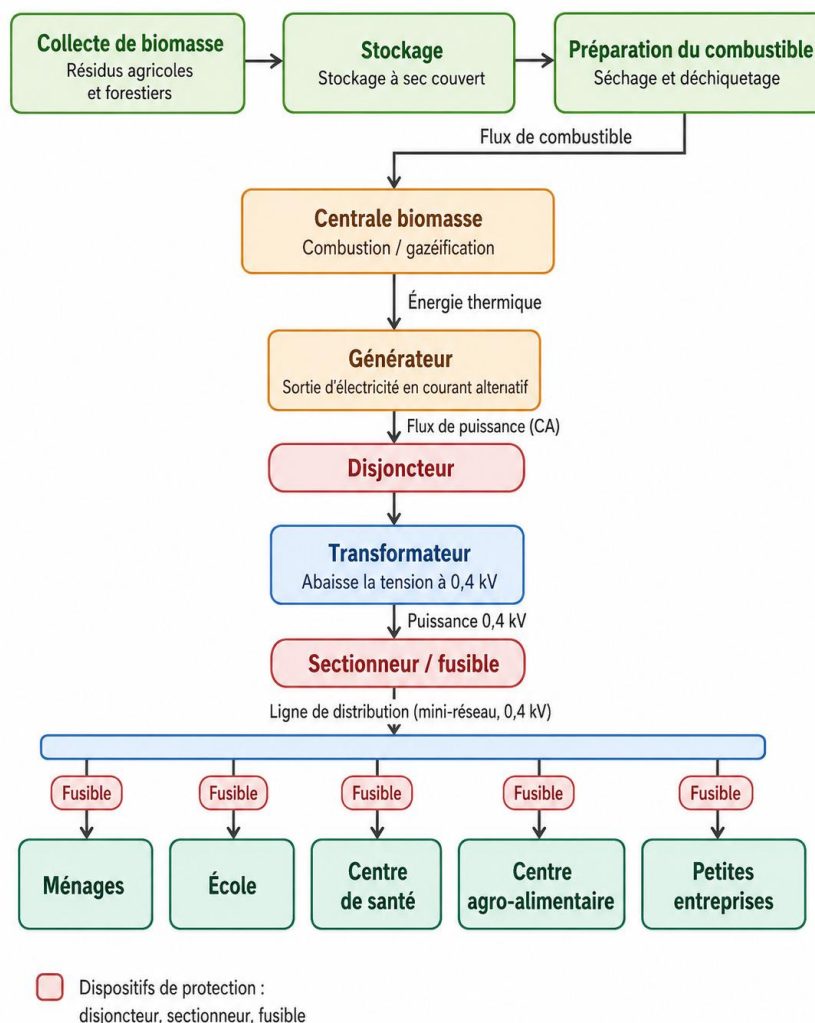


Figure 4.1 — Mini-réseau alimenté par biomasse

Les mini-réseaux réduisent les pertes de transport puisque l'électricité est produite près des utilisateurs. Ils favorisent aussi la participation communautaire : les habitants peuvent fournir de la biomasse et participer à l'exploitation et à la maintenance.

4.3. Systèmes biomasse à l'échelle communautaire

Ces systèmes répondent aux besoins énergétiques de villages, coopératives, institutions ou petites industries avec des ressources locales. Par rapport aux grandes centrales centralisées, ils demandent généralement moins de capital, une exploitation plus simple et moins d'infrastructures de transport.

Le développement commence par une évaluation des ressources portant sur quantité, qualité et saisonnalité des matières premières. La récolte doit rester durable afin d'assurer l'exploitation à long terme sans dégrader l'environnement ni concurrencer la production alimentaire.

Les technologies possibles comprennent :

- petits systèmes de combustion produisant vapeur et électricité ;
- gazéificateurs produisant un gaz alimentant un moteur à combustion interne ;
- digesteurs anaérobies transformant fumier et déchets organiques en biogaz pour la cuisson ou l'électricité.

La participation communautaire est déterminante. La propriété locale encourage l'entretien, la collecte régulière de combustible et la bonne gestion financière. La formation de techniciens locaux permet d'effectuer les interventions courantes sans dépendance permanente à des spécialistes extérieurs.

Le système ne doit être ni surdimensionné, ce qui augmenterait les investissements, ni sous-dimensionné, ce qui empêcherait de répondre aux besoins. Les enquêtes doivent donc couvrir consommation des ménages, activités commerciales, transformation agricole, services publics et expansion future.

La disponibilité du système (SA) est :

$$SA (\%) = (\text{temps de fonctionnement} / \text{temps de fonctionnement programmé}) \times 100$$

Exemple 4.2

Une centrale communautaire est programmée pour 720 h sur un mois et fonctionne réellement 684 h.

$$SA = (684 \div 720) \times 100 = 95 \%$$

Cela indique une excellente fiabilité d'exploitation.

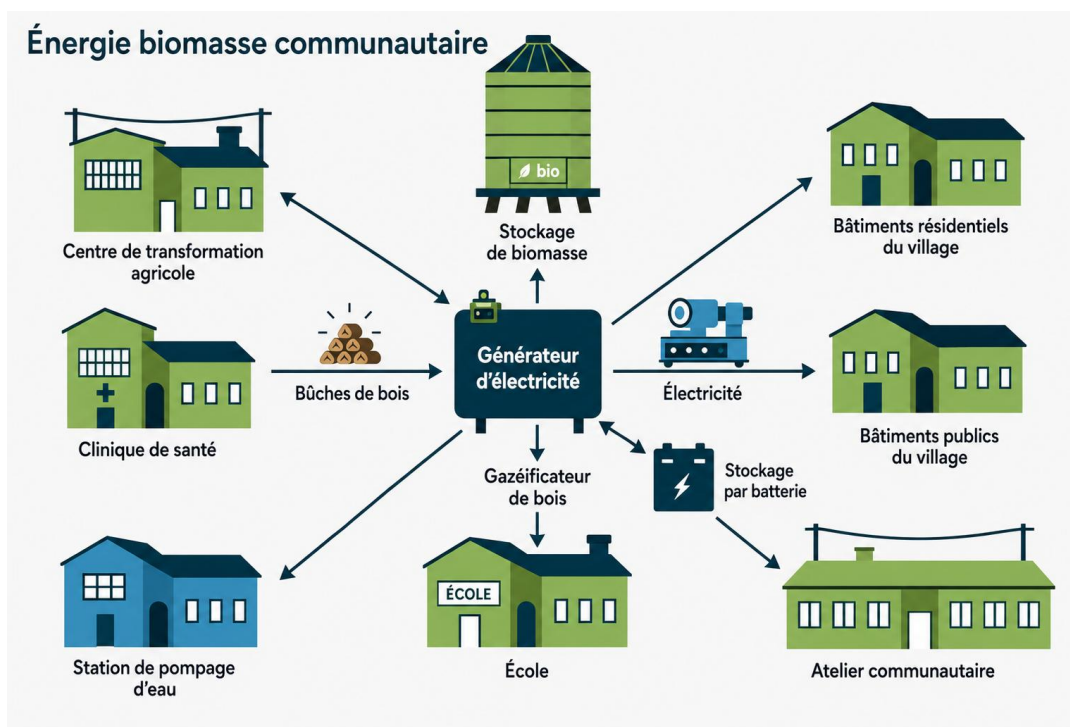


Figure 4.2 — Système énergétique biomasse communautaire

4.4. Usages productifs de l'énergie

L'usage productif de l'énergie désigne l'utilisation de l'électricité ou de la chaleur dans des activités génératrices de revenus et non uniquement dans les ménages. La viabilité financière à long terme des systèmes ruraux dépend souvent de la croissance de cette demande productive.

L'électricité biomasse peut alimenter :

- décorticage et mouture du riz ou du maïs ;
- transformation du manioc et du palmier à huile ;
- séchage des grains ;
- conservation du poisson ;
- refroidissement du lait ;
- transformation des fruits ;
- travail du bois ;
- soudage, menuiserie et couture ;
- chambres froides, cybercafés, pompage d'eau et petites industries.

Les écoles bénéficient d'un éclairage fiable et de l'informatique ; les centres de santé peuvent alimenter équipements médicaux et réfrigérateurs à vaccins ; les systèmes de pompage améliorent l'accès à l'eau potable.

Les charges productives sont souvent plus élevées que l'éclairage domestique ; elles doivent donc être planifiées pour éviter les surcharges et conserver la stabilité du système.

Le revenu annuel d'une activité peut être estimé par :

$$\text{Revenu annuel} = \text{revenu quotidien} \times \text{nombre de jours d'exploitation par an}$$

Exemple 4.3

Une rizerie alimentée par un mini-réseau génère 250 USD/jour et fonctionne 300 jours/an.

$$\text{Revenu annuel} = 250 \times 300 = 75\,000 \text{ USD}$$

Ce revenu contribue à la viabilité de la rizerie et du système énergétique.

Application pratique

Une coopérative agricole du nord du Ghana produit des rafles de maïs et d'autres résidus. Elle installe un mini-réseau de gazéification biomasse de 250 kW. L'électricité alimente moulins à maïs, pompes d'irrigation, chambres froides, écoles et centre de santé. Des techniciens locaux sont formés à l'exploitation, à la surveillance du générateur et à la maintenance préventive. Les revenus de l'agro-transformation financent la maintenance et l'expansion. Le projet illustre comment une solution décentralisée peut simultanément améliorer l'accès à l'énergie, la productivité agricole et le développement économique local.

4.5. Résumé du chapitre

Les systèmes biomasse décentralisés peuvent fournir une électricité fiable aux communautés rurales en utilisant les ressources disponibles localement. Les mini-réseaux limitent le besoin d'extension du réseau national et réduisent les pertes. Les systèmes communautaires associent technologie adaptée, gestion locale des ressources et participation des habitants. Les usages productifs de l'énergie créent des emplois, augmentent les revenus et renforcent la viabilité économique. Une planification rigoureuse, un

dimensionnement correct et une exploitation efficace permettent à ces technologies de soutenir durablement le développement rural.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez : a) mini-réseau ; b) système énergétique biomasse communautaire ; c) usage productif de l'énergie ; d) évaluation de la demande énergétique.
2. Expliquez pourquoi les systèmes biomasse décentralisés peuvent être plus adaptés que l'extension du réseau national aux communautés rurales éloignées.
3. Comparez production centralisée et mini-réseaux biomasse selon investissement, fiabilité, pertes de transport, maintenance et accessibilité rurale.
4. Une communauté possède une charge de 120 kW fonctionnant 7 h/jour. Calculez la demande énergétique quotidienne.
5. Une coopérative de riz, manioc et huile de palme souhaite un mini-réseau. Recommandez un système en tenant compte des matières disponibles, composants, bénéficiaires et usages productifs.
6. Un mini-réseau subit des coupures fréquentes en raison d'un approvisionnement irrégulier en biomasse et d'une mauvaise maintenance. Identifiez quatre causes possibles et proposez des mesures de fiabilisation.
7. Une centrale était programmée pour 800 h sur deux mois mais a fonctionné 744 h. Calculez sa disponibilité, interprétez le résultat et recommandez des mesures d'amélioration.

Évaluation des ressources et dimensionnement des systèmes

5.1. Introduction

La conception réussie d'un système biomasse commence par une évaluation approfondie des ressources et une estimation réaliste de la demande. Une centrale trop petite ne répond pas aux besoins ; une installation trop grande augmente inutilement les investissements et dégrade la rentabilité. L'évaluation des ressources et le dimensionnement rendent donc le projet techniquement fiable, économiquement viable et écologiquement durable.

En Afrique de l'Ouest, la disponibilité de biomasse varie selon les saisons agricoles et les pratiques locales. Les techniciens doivent savoir estimer les ressources, évaluer la demande et sélectionner la technologie de conversion appropriée.

5.2. Cartographie des ressources biomasse

La cartographie consiste à identifier, quantifier et localiser les ressources utilisables pour l'énergie. Elle détermine si un approvisionnement suffisant est disponible à long terme.

Les ressources courantes comprennent : balles de riz, tiges de maïs, pelures de manioc, coques de palmiste, coques de noix de coco, bagasse, sciure, fumier, résidus forestiers et déchets organiques municipaux. Les informations peuvent provenir d'enquêtes de terrain, de statistiques agricoles, d'images satellitaires et de systèmes d'information géographique (SIG/GIS).

La quantité réellement utilisable dépend de :

- production agricole ;
- rapport résidu/produit ;
- autres usages concurrents ;
- saisonnalité ;
- efficacité de collecte ;
- distance de transport.

Toute la biomasse produite ne peut pas être mobilisée : certains résidus sont nécessaires à la protection du sol, à l'alimentation animale ou à des usages traditionnels.

La qualité doit également être évaluée : humidité, teneur en cendres, pouvoir calorifique, granulométrie et stabilité au stockage. Une faible humidité et un pouvoir calorifique élevé améliorent généralement la performance et réduisent les coûts logistiques. L'inventaire doit être mis à jour car la production agricole évolue avec les pluies, les pratiques culturelles et le marché.

La biomasse disponible peut être estimée par :

$$\text{Biomasse disponible} = \text{production totale de biomasse} \times \text{efficacité de collecte}$$

Exemple 5.1

Une coopérative produit 8 000 tonnes de riz par an. Rapport résidu/produit pour les balles : 0,22 ; efficacité de collecte : 75 %.

$$\text{Balles totales} = 8\,000 \times 0,22 = 1\,760 \text{ tonnes}$$

$$\text{Biomasse disponible} = 1\,760 \times 0,75 = 1\,320 \text{ tonnes/an}$$

Cette valeur sert au dimensionnement de la centrale.

5.3. Évaluation de la demande

L'évaluation de la demande estime les besoins présents et futurs d'une communauté, institution ou industrie. Elle évite le sous-dimensionnement et le surdimensionnement.

Les consommateurs peuvent inclure ménages, écoles, centres de santé, pompage d'eau, agro-industries, ateliers, commerces et éclairage public. Pour chaque charge, on détermine puissance et durée quotidienne d'utilisation. Les variations horaires et saisonnières doivent être prises en compte, de même que la croissance démographique et économique future.

La demande quotidienne est calculée par :

$$\text{Demande énergétique quotidienne} = \text{puissance} \times \text{durée de fonctionnement}$$

Exemple 5.2

Charges d'une communauté :

- ménages : $60 \text{ kW} \times 6 \text{ h} = 360 \text{ kWh/j}$;
- rizerie : $40 \text{ kW} \times 8 \text{ h} = 320 \text{ kWh/j}$;
- centre de santé : $15 \text{ kW} \times 24 \text{ h} = 360 \text{ kWh/j}$;
- école : $10 \text{ kW} \times 7 \text{ h} = 70 \text{ kWh/j}$.

$$\text{Demande quotidienne totale} = 360 + 320 + 360 + 70 = 1\,110 \text{ kWh/jour}$$

Cette estimation guide le choix du générateur et le calcul du besoin annuel de biomasse.

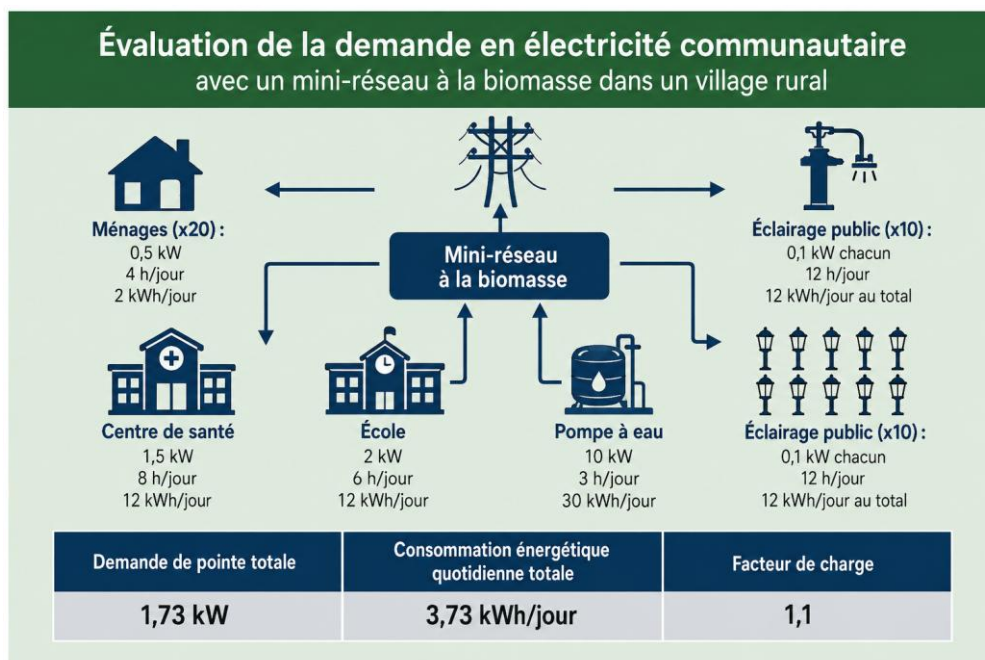


Figure 5.1 — Évaluation de la demande électrique communautaire

5.4. Sélection technologique

Le choix d'une technologie dépend des ressources, de la demande, de l'économie, de l'environnement et des compétences disponibles.

- Une petite communauté disposant de beaucoup de fumier peut utiliser un digesteur de biogaz couplé à un moteur-générateur.
- Une communauté produisant beaucoup de balles de riz, sciure ou résidus de bois peut utiliser un gazéifieur, adapté à la production décentralisée d'électricité.
- Une grande agro-industrie disposant de bagasse ou de résidus de palme peut adopter une centrale vapeur à combustion ou un système CHP produisant électricité et chaleur de procédé.

Les facteurs techniques incluent : type et humidité de la biomasse, puissance requise, complexité, maintenance, disponibilité des pièces, performance environnementale et expertise locale. Une biomasse humide peut être mal adaptée à la gazéification mais convenir à la digestion anaérobie.

Les facteurs économiques comprennent investissements, exploitation, collecte, transport, maintenance et durée de vie. Les technologies entretenables localement offrent souvent une meilleure durabilité. Les facteurs environnementaux incluent émissions, gestion des cendres, emprise au sol, eau et récolte durable.

Critères	Combustion	Gazéification	Digestion anaérobie	CHP (cogénération)
Type de biomasse	Biomasse solide sèche	Biomasse ligneuse sèche	Déchets organiques humides	Biomasse sèche / gazeuse
Teneur en humidité	<25%	<20%	>60% (humide)	<20%
Capacité de puissance	Échelle kW–MW	kW–quelques MW	Échelle kW–MW	Échelle kW–MW
Rendement	20–30% électrique	25–35% électrique	35–40% électrique	60–80% global
Coût d'investissement	Faible à modéré	Modéré à élevé	Modéré	Élevé
Complexité de maintenance	Faible	Élevée (problèmes de goudrons)	Modérée	Élevée
Impact environnemental	Émissions plus élevées	Faibles émissions	Réduit les déchets	Haute efficacité
Applications adaptées	Chaleur et électricité	Électricité en zone rurale	Exploitations agricoles, déchets humides	Chaleur + électricité

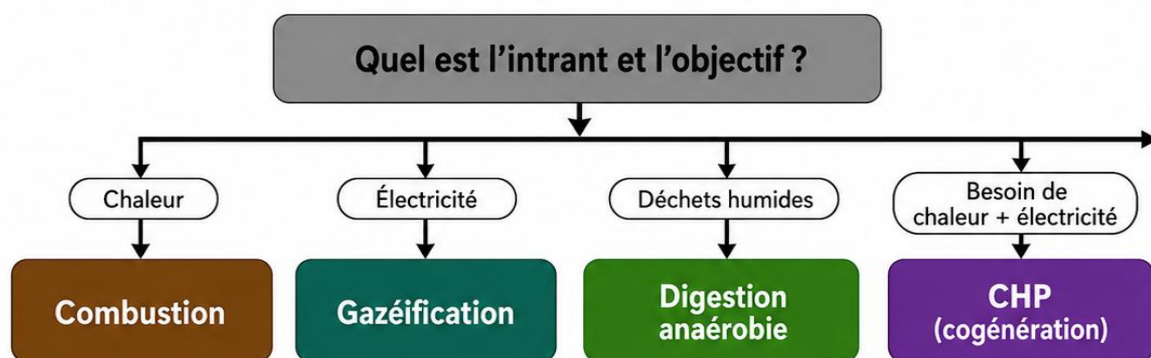


Figure 5.2 — Matrice de sélection des technologies biomasse

Exemple 5.3

Une coopérative dispose d'environ 1 500 tonnes/an de balles de riz, doit fournir 250 kW et la matière présente 14 % d'humidité. Les compétences techniques locales sont moyennes. Le cours recommande un gazéifieur à co-courant ou à lit fluidisé couplé à un moteur à combustion interne plutôt qu'une digestion anaérobie, car la matière est relativement sèche et disponible en quantité suffisante.

Application pratique

Une coopérative de Sierra Leone cultive riz, manioc et palmier à huile. Des ingénieurs cartographient les résidus par enquêtes de terrain et images satellitaires puis estiment leur disponibilité annuelle. Des réunions communautaires évaluent la demande des ménages, rizeries, unités de manioc, pompes, écoles et centres de santé. Après comparaison, un mini-réseau de gazéification de 300 kW est retenu, alimenté par des balles de riz et coques de palmiste disponibles toute l'année. Les techniciens locaux sont formés à la collecte, l'exploitation, la maintenance du générateur et la surveillance de la consommation.

5.5. Résumé du chapitre

L'évaluation des ressources et le dimensionnement constituent la base technique d'un projet biomasse. La cartographie identifie les approvisionnements durables en tenant compte de la saisonnalité, des usages concurrents, du transport et de la qualité. L'analyse de la demande évalue les besoins actuels et futurs pour éviter le sur- ou sous-dimensionnement. Le choix technologique combine critères techniques, économiques, environnementaux et opérationnels. Une planification rigoureuse améliore la fiabilité, limite le risque d'investissement et soutient l'électrification rurale durable.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez : a) cartographie des ressources biomasse ; b) efficacité de collecte ; c) évaluation de la demande ; d) dimensionnement du système.
2. Expliquez pourquoi l'évaluation des ressources doit précéder la sélection technologique et les conséquences d'une surestimation ou sous-estimation de la biomasse disponible.
3. Comparez combustion, gazéification et digestion anaérobie selon matières adaptées, conditions d'exploitation, puissance, rendement et usages ruraux.
4. Une coopérative produit 12 000 tonnes de maïs par an. Le rapport résidu/produit des tiges est de 0,35 et l'efficacité de collecte de 70 %. Calculez la quantité annuelle disponible pour l'énergie.
5. Un district rural veut installer un mini-réseau pour ménages, écoles, centres de santé et agro-industries. Décrivez les étapes d'une évaluation de la demande et l'influence des résultats sur le dimensionnement et le choix des équipements.
6. Une centrale connaît des pénuries de combustible pendant la saison sèche malgré une production annuelle suffisante. Identifiez quatre causes possibles et proposez des mesures pour assurer l'approvisionnement toute l'année.
7. Une communauté consomme quotidiennement : ménages 420 kWh, école 90 kWh, centre de santé 180 kWh, rizerie 360 kWh. Calculez la demande totale et recommandez une technologie biomasse en justifiant le choix par les résidus disponibles et les besoins.

BM-A4-6

Évaluation technico-économique et socio-économique

6.1. Introduction

Un projet biomasse doit être techniquement solide, économiquement rentable et socialement accepté pour réussir à long terme. Un projet performant sur le plan technique peut échouer si les coûts dépassent les bénéfices ou si la communauté ne soutient pas son exploitation.

L'évaluation technico-économique associe ingénierie et économie pour vérifier la viabilité financière. L'évaluation socio-économique analyse les impacts plus larges sur l'emploi, les revenus, le développement communautaire et l'environnement. Dans les zones rurales d'Afrique de l'Ouest, les techniciens et planificateurs doivent savoir évaluer les coûts, les retours financiers et la participation locale.

6.2. Analyse coûts-bénéfices

L'analyse coûts-bénéfices compare tous les coûts du projet aux bénéfices économiques, environnementaux et sociaux attendus sur sa durée de vie.

Coûts d'investissement

Ils comprennent terrain, bâtiments, équipements de préparation de biomasse, chaudières ou gazéificateurs, générateurs, réseau électrique, services d'ingénierie, transport, installation, mise en service et formation.

Coûts d'exploitation

Après démarrage, le projet supporte collecte et transport de biomasse, main-d'œuvre, maintenance, pièces, assurance, préparation du combustible, administration et services auxiliaires. Des provisions doivent couvrir les défaillances imprévues.

Bénéfices

Ils comprennent recettes d'électricité, revenus des usages productifs, économies de diesel, vente de coproduits comme biochar ou cendres, réduction des émissions, création d'emplois et amélioration de la productivité agricole.

L'analyse couvre généralement une durée de 15 à 25 ans selon la technologie.

Le rapport bénéfices/coûts (BCR) est :

$$BCR = \text{bénéfices totaux} \div \text{coûts totaux}$$

Un BCR supérieur à 1 indique que les bénéfices dépassent les coûts.

Exemple 6.1

Coût du projet : 850 000 USD ; bénéfices estimés sur la durée de vie : 1 360 000 USD.

$$BCR = 1\,360\,000 \div 850\,000 = 1,60$$

Le projet est donc considéré comme économiquement attractif selon cet indicateur.

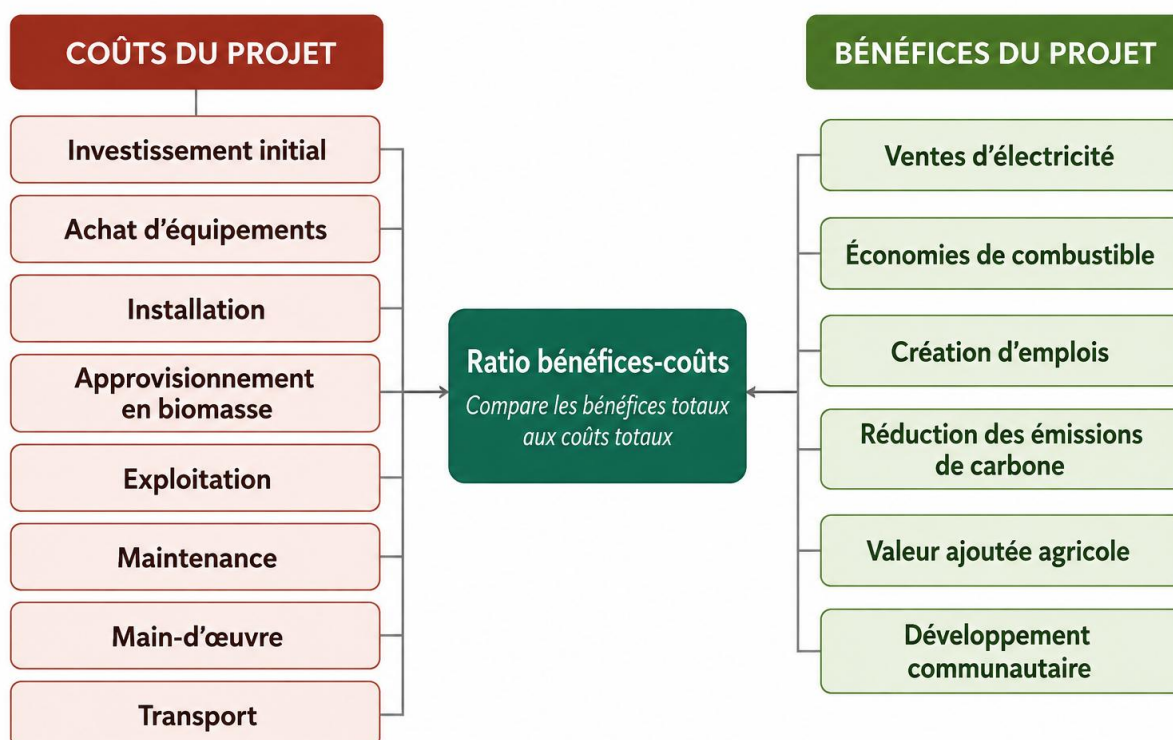


Figure 6.1 — Cadre d'analyse coûts-bénéfices

6.3. Faisabilité financière

La faisabilité financière détermine si le projet peut générer suffisamment de revenus pour récupérer l'investissement et produire un rendement acceptable.

Le **délai de récupération** (*Payback Period*) indique le temps nécessaire pour que le revenu net cumulé rembourse l'investissement initial. Un délai plus court signifie généralement un risque plus faible.

$$\text{Délai de récupération} = \text{investissement initial} / \text{revenu net annuel}$$

La **valeur actuelle nette (VAN/NPV)** tient compte de la valeur temporelle de l'argent : une VAN positive indique généralement un projet financièrement attractif. Le **taux de rentabilité interne (TRI/IRR)** est le taux d'actualisation pour lequel la VAN devient nulle ; des TRI plus élevés sont généralement recherchés.

Les études examinent également tarifs de l'électricité, charges annuelles, renouvellement des équipements, inflation, taux d'intérêt, financement et éventuelles subventions ou exonérations fiscales. Une analyse de sensibilité fait varier des hypothèses comme le prix de la biomasse, la demande, le coût du transport ou le rendement des équipements pour mesurer la robustesse du projet.

Exemple 6.2

Investissement initial : 1 200 000 USD ; revenu net annuel : 240 000 USD.

$$\text{Délai de récupération} = 1\,200\,000 \div 240\,000 = 5 \text{ ans}$$

L'investissement initial est donc récupéré après environ cinq années d'exploitation.

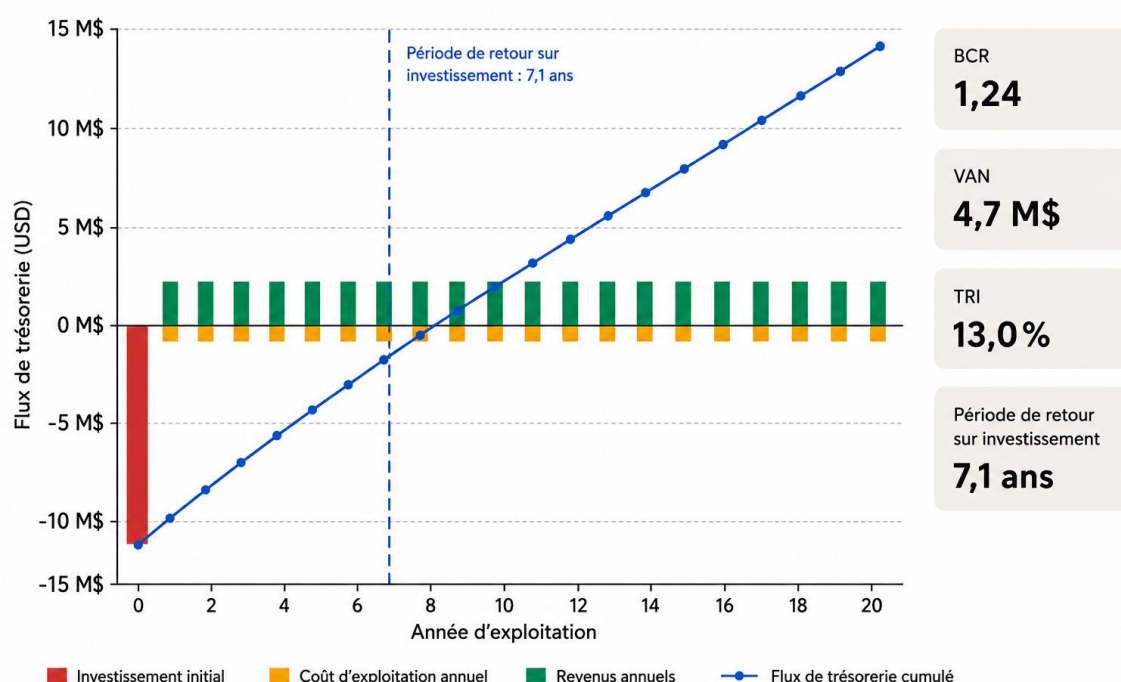


Figure 6.2 — Analyse de la faisabilité financière

6.4. Modèles de participation communautaire

La participation communautaire désigne l'implication active des habitants dans la planification, le financement, la réalisation, l'exploitation et la gestion. Les projets fortement participatifs sont souvent plus durables grâce au sentiment d'appropriation et de responsabilité.

Les modèles cités comprennent :

- **propriété communautaire** : gestion par une coopérative locale ou un comité énergétique ; les membres apportent travail, biomasse, terrain ou financement et partagent les bénéfices ;
- **partenariat public-privé** : l'État apporte infrastructures, politique ou incitations, tandis que le secteur privé investit, exploite et maintient ;
- **coopérative** : des agriculteurs fournissent ensemble la biomasse, participent aux décisions et partagent les revenus ;
- **propriété privée** : un producteur indépendant d'électricité investit et vend l'énergie aux communautés ou au réseau sous contrat d'achat à long terme.

Une bonne participation exige gouvernance transparente, communication régulière, partage équitable des bénéfices, développement des compétences et formation continue. Les femmes, les jeunes, les organisations paysannes et les entreprises locales doivent être représentés.

L'évaluation sociale porte sur l'emploi, les revenus des ménages, l'éducation, la santé, l'égalité de genre, l'environnement et l'industrialisation rurale.

Un indicateur simple de création d'emplois est :

$$\text{Emplois créés} = \text{emplois directs} + \text{emplois indirects}$$

Exemple 6.3

Emplois directs : 18 ; emplois indirects dans la collecte et le transport : 47.

$$\text{Total} = 18 + 47 = 65 \text{ emplois}$$

Le projet contribue ainsi au développement économique local au-delà de la seule production d'électricité.

Application pratique

Une coopérative agricole du Bénin installe une unité de gazéification de 500 kW alimentée par des tiges de coton et des résidus de maïs. Une étude technico-économique compare construction, approvisionnement, recettes électriques et maintenance. Le délai de récupération est estimé à environ six ans et l'analyse de sensibilité montre que le projet reste rentable même si le transport de biomasse augmente modérément. La coopérative adopte un modèle de propriété communautaire : les agriculteurs fournissent la biomasse, élisent un comité de gestion et reçoivent des dividendes. L'électricité alimente égrenage, mouture, irrigation, écoles et centres de santé et crée des emplois dans la collecte, l'exploitation et la maintenance.

6.5. Résumé du chapitre

Les évaluations technico-économiques et socio-économiques déterminent si un projet biomasse est techniquement faisable, financièrement rentable et socialement durable. L'analyse coûts-bénéfices compare coûts et bénéfices ; la faisabilité financière utilise BCR, délai de récupération, VAN et TRI pour évaluer rentabilité et risque. La participation communautaire renforce l'appropriation, la gouvernance, l'approvisionnement et le partage équitable des bénéfices. Ces méthodes permettent de concevoir des systèmes soutenant développement rural, emploi et sécurité énergétique à long terme.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Expliquez pourquoi une évaluation technico-économique est essentielle avant la construction d'une centrale biomasse. Discutez de l'influence des performances techniques, de la viabilité économique et de l'acceptation sociale.
2. Comparez les projets communautaires, coopératifs, en partenariat public-privé et privés. Présentez leurs avantages et limites dans les communautés rurales d'Afrique de l'Ouest.
3. Un projet présente des bénéfices sur la durée de vie de 2 400 000 USD et des coûts de 1 800 000 USD. Calculez le BCR et déterminez si le projet est économiquement faisable selon cet indicateur.
4. Un district rural envisage un mini-réseau de 400 kW utilisant balles de riz et pelures de manioc. Décrivez les facteurs économiques, techniques, environnementaux et sociaux à évaluer avant approbation.
5. Un projet exige 900 000 USD d'investissement initial et devrait générer 180 000 USD de revenu net annuel. Calculez le délai de récupération, discutez de l'attractivité de l'investissement et citez d'autres indicateurs à examiner avant une décision finale.

BM-A5

Installation, exploitation, maintenance et sécurité des systèmes biomasse

Présentation du module

Ce module apporte des connaissances pratiques avancées et des compétences relatives à l'installation, l'exploitation, la maintenance, le dépannage et la gestion sûre des systèmes énergétiques à biomasse. Il permet aux stagiaires d'installer les équipements conformément aux spécifications techniques, de mettre en service les systèmes pour assurer une exploitation fiable et de surveiller les performances en conditions normales.

Le module insiste également sur la maintenance courante et préventive, le diagnostic systématique des pannes, le dépannage et l'application des pratiques de santé, sécurité au travail et environnement (SSTE/OHSE) pendant tout le cycle de vie. À l'issue du module, les stagiaires doivent être capables d'installer, exploiter, entretenir et dépanner des systèmes biomasse de manière sûre et efficace tout en respectant les normes techniques, les exigences de sécurité au travail et les règles environnementales.

Objectifs d'apprentissage

À l'issue de ce module, les stagiaires seront capables de :

- installer des systèmes énergétiques biomasse conformément aux spécifications techniques ;
- exploiter et surveiller les systèmes de manière sûre et efficace ;
- réaliser la maintenance courante et préventive ;
- diagnostiquer et dépanner les défauts ;
- appliquer les normes de santé, sécurité au travail et environnement.

BM-A5-1

Procédures d'installation et mise en service

1.1. Introduction

Le bon fonctionnement d'un système biomasse commence par une installation et une mise en service correctement réalisées. Même une installation bien conçue n'atteindra pas les performances prévues si les équipements sont mal montés ou insuffisamment testés avant exploitation.

L'installation comprend l'assemblage, le positionnement, le raccordement et l'inspection des composants selon les plans d'ingénierie et les instructions des fabricants. La mise en service est le processus systématique de vérification du fonctionnement correct, sûr et efficace de chaque composant avant remise à l'exploitant.

En Afrique de l'Ouest, ces systèmes sont de plus en plus installés dans les agro-industries, établissements d'enseignement, mini-réseaux ruraux et projets énergétiques communautaires utilisant des balles de riz, pelures de manioc, coques de palmiste, sciure ou biogaz. Les techniciens doivent donc maîtriser préparation du site, installation, inspection, essais et mise en service.

1.2. Préparation du site

La préparation du site consiste à aménager l'emplacement avant la livraison et l'assemblage des équipements. Une préparation correcte améliore la qualité d'installation, facilite la maintenance, renforce la sécurité et prolonge la durée de vie.

Étude du site

Une étude détaillée vérifie la conformité du lieu avec les plans et spécifications. Les techniciens évaluent :

- stabilité du sol ;
- accessibilité ;
- drainage ;
- espace de travail ;
- conditions environnementales ;
- proximité des matières premières et des charges électriques.

Le site doit disposer d'un espace suffisant pour l'installation, les inspections, le stockage du combustible, une éventuelle extension et l'accès des secours.

Fondations

Les chaudières, gazéificateurs, digesteurs, générateurs, turbines et cuves exigent des fondations en béton armé capables de reprendre les charges statiques et dynamiques. Les fondations doivent être planes, structurellement sûres et conformes aux plans approuvés.

Ventilation et utilités

Les locaux de chaudières et générateurs doivent assurer un débit d'air suffisant pour la combustion et limiter l'accumulation de chaleur. Les installations de biogaz doivent être bien ventilées afin d'éviter l'accumulation de gaz combustible.

Avant montage, il faut disposer des utilités nécessaires : énergie électrique pour les travaux, eau propre pour les essais hydrostatiques et le nettoyage, drainage, éclairage, communications et voies d'accès pour les équipements lourds.

Sécurité du chantier

La zone est balisée et clôturée si nécessaire, avec signalisation, extincteurs, premiers secours et sorties d'urgence. L'identification des dangers et l'évaluation des risques doivent être achevées avant les travaux. Une liste de contrôle doit vérifier dimensions des fondations, implantation, utilités, drainage, ventilation, dispositions de sécurité et accessibilité.

Exemple 1.1

Une rizerie rurale prévoit un gazéifieur biomasse de 300 kW. Les techniciens vérifient les dimensions des fondations, assurent un drainage capable de résister aux pluies, construisent un stockage couvert, posent les conduits électriques enterrés et réservent l'espace nécessaire à la maintenance future du générateur. Une bonne préparation réduit les retards et les problèmes ultérieurs.

1.3. Installation des équipements

L'installation consiste à positionner, assembler, aligner et raccorder les composants mécaniques, électriques et de commande conformément aux plans approuvés et aux recommandations des fabricants.

Les équipements lourds — chaudières, gazéifieurs, digesteurs, générateurs, turbines, cuves et échangeurs — sont généralement installés en premier. Les opérations de levage utilisent grues, chariots ou autres moyens conformément à des procédures approuvées afin d'éviter blessures et dommages. Les équipements sont nivelés avec précision puis ancrés aux fondations.

Installation mécanique

Elle comprend :

- canalisations ;
- pompes et vannes ;
- convoyeurs de combustible ;
- évacuation des cendres ;
- refroidissement ;
- lubrification ;
- conduits d'échappement.

Les joints de tuyauterie sont alignés correctement et soumis à des essais de pression pour prévenir les fuites.

Installation électrique

Elle comprend générateurs, transformateurs, appareillage de commutation, tableaux de commande, capteurs, moteurs, câbles, mise à la terre et relais de protection. Le câblage doit respecter les normes électriques nationales et tous les équipements doivent être correctement mis à la terre.

Instrumentation et alignement

Après les ensembles mécaniques et électriques sont installés capteurs de température, transmetteurs de pression, débitmètres, indicateurs de niveau, capteurs de vibration et PLC. Un étalonnage correct est indispensable, car des mesures erronées peuvent compromettre sécurité et rendement.

L'alignement des équipements tournants — turbines, pompes, moteurs, générateurs — est particulièrement critique. Un mauvais alignement augmente vibrations, usure des paliers et risque de rupture. Les outils d'alignement laser sont courants dans les installations industrielles modernes.

Après montage, il faut inspecter boulons, soudures, connexions électriques, points de lubrification, isolation, supports et protecteurs avant les essais.

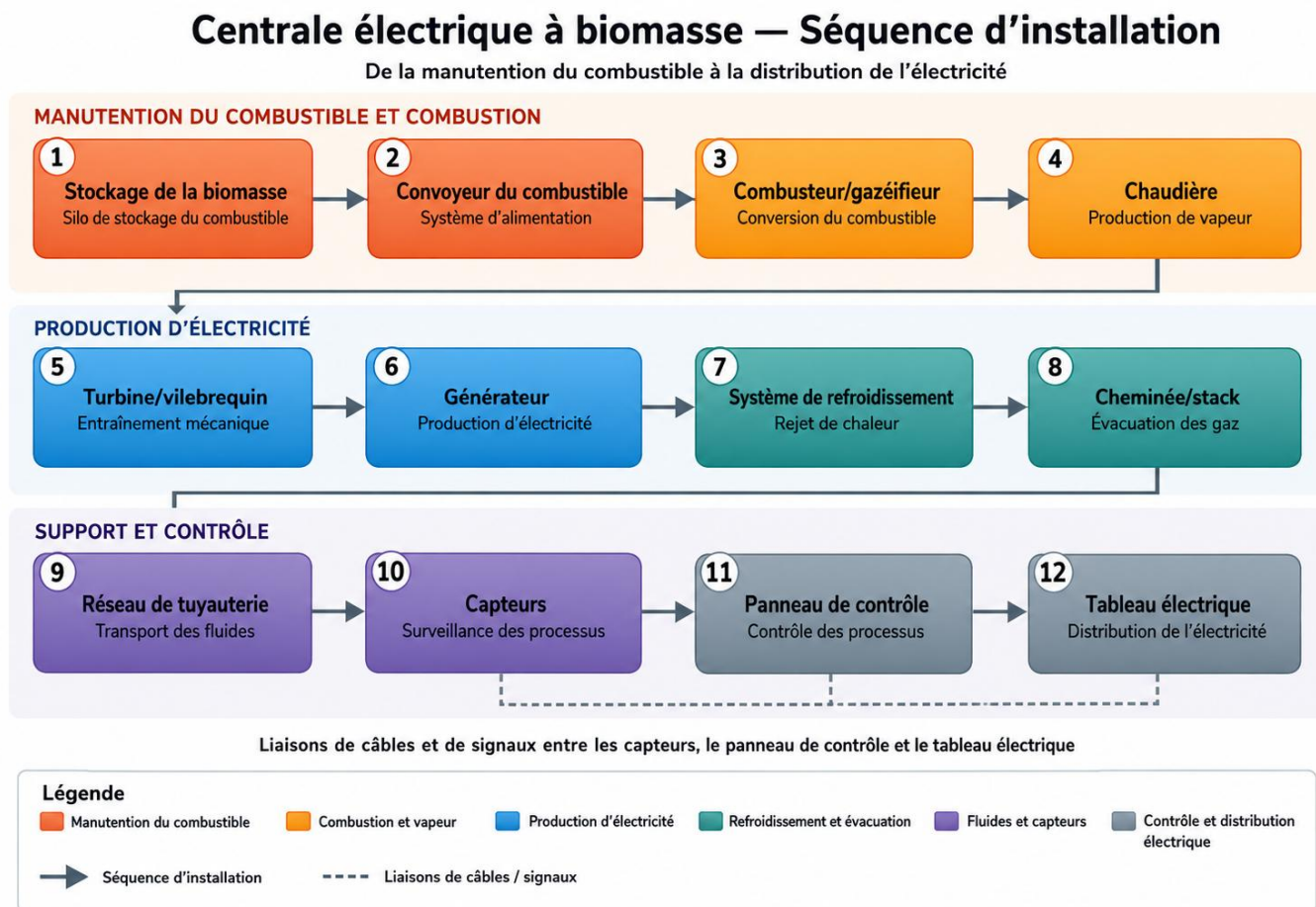


Figure 1.1 — Installation des principaux composants d'une centrale biomasse

Exemple 1.2

Lors de l'installation d'une chaudière biomasse dans une usine de manioc, un léger désalignement est détecté entre les arbres de la turbine et du générateur. Un outil laser corrige le défaut avant mise en service, évitant vibrations excessives, défaillance des paliers et baisse de rendement.

1.4. Essais du système et mise en service

La mise en service vérifie systématiquement que chaque composant fonctionne en sécurité et conformément aux performances de conception avant le démarrage commercial.

Inspection initiale

Les techniciens vérifient installation, serrage des boulons, protecteurs, supports de tuyauterie, câbles et étalonnage des instruments.

Essais mécaniques et électriques

Les pompes, convoyeurs, ventilateurs, vannes, moteurs et machines tournantes sont d'abord testés individuellement sans charge afin de vérifier sens de rotation, lubrification, vibration et intégrité. Les chaudières et appareils sous pression font l'objet d'essais hydrostatiques.

Les essais électriques comprennent :

- résistance d'isolement ;
- résistance de mise à la terre ;
- continuité ;
- vérification des relais de protection ;
- sens de rotation des moteurs ;
- essais fonctionnels des automatismes.

Les arrêts d'urgence, alarmes, interverrouillages et systèmes de mise en sécurité doivent être testés avant démarrage.

Mise en service à froid

Elle est réalisée avant introduction du combustible. Les équipements fonctionnent sans combustion afin de vérifier instrumentation, automatisation, communications capteurs-contrôleurs, vannes et protections électriques.

Mise en service à chaud

Après validation à froid, le combustible est introduit progressivement. Les opérateurs surveillent température de combustion, pression vapeur, consommation, puissance générateur, émissions, vibrations et températures des équipements. Les paramètres sont ajustés jusqu'à stabilisation.

Essais de réception

Ils confirment la conformité aux spécifications contractuelles : puissance électrique, rendement thermique, consommation de combustible, émissions, pression vapeur, tension, fréquence et sécurité. La liste de mise en service doit couvrir inspection mécanique, essais électriques, étalonnage, vérification sécurité, marche d'essai, tests de performance, formation des opérateurs et documentation finale.

Le taux d'achèvement peut être calculé par :

$$\text{Achèvement de la mise en service (\%)} = (\text{essais réalisés} / \text{essais planifiés}) \times 100$$

Exemple 1.3

Un programme prévoit 48 activités d'inspection et d'essai ; 46 sont terminées.

$$\text{Achèvement} = (46 \div 48) \times 100 = 95,8 \%$$

Les deux essais restants doivent être menés avant l'acceptation pour exploitation commerciale.

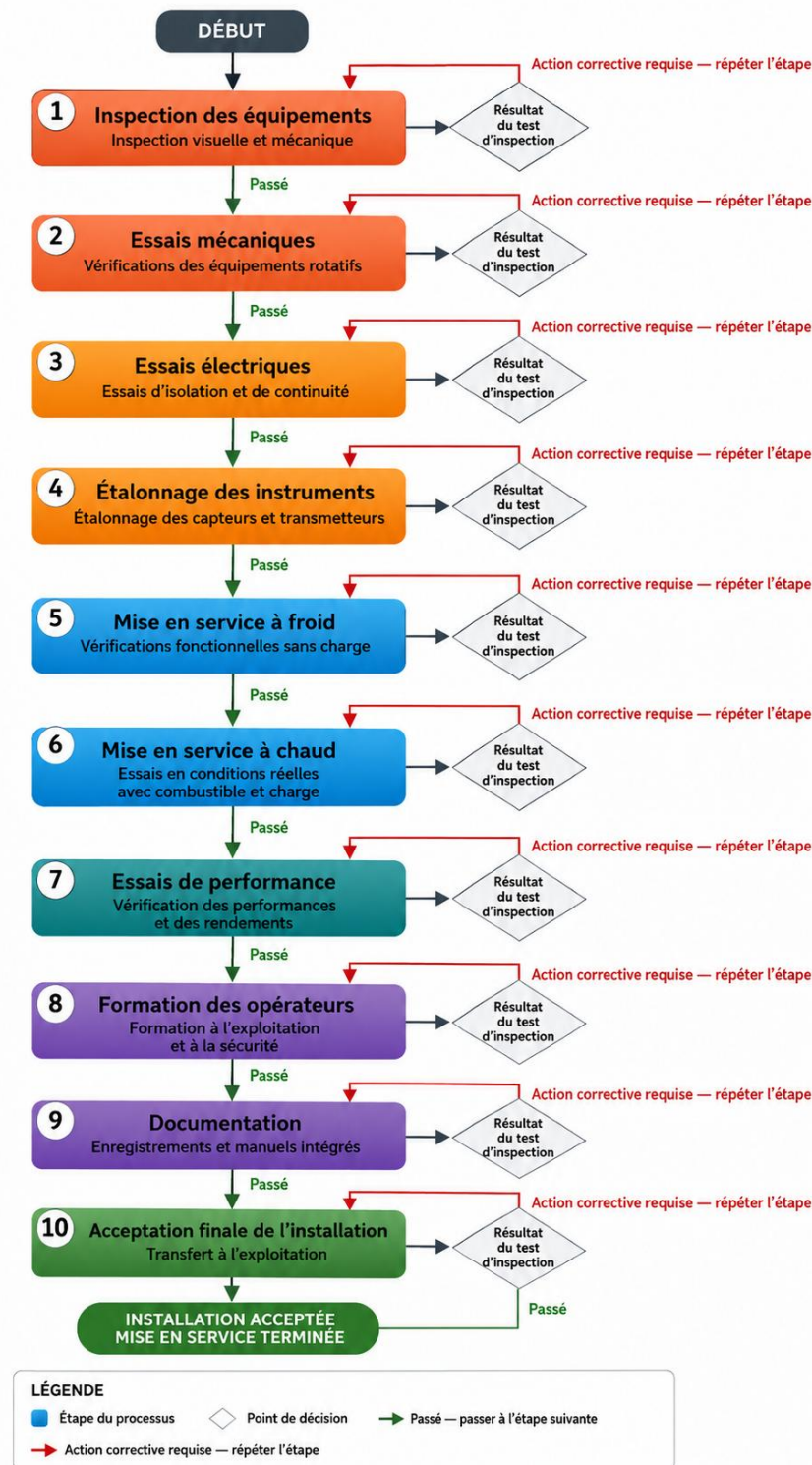


Figure 1.2 — Procédure de mise en service d'un système biomasse

Application pratique

Une coopérative du nord du Nigeria installe un gazéifieur biomasse de 500 kW alimenté par les balles de rizeries voisines. Les ingénieurs réalisent fondations en béton armé, drainage et stockage couvert. Les techniciens montent gazéifieur, refroidissement, épuration du gaz, groupe moteur-générateur et tableaux électriques, tout en alignant les machines et en étalonnant l'instrumentation. Après essais mécaniques et électriques, la mise en service à froid vérifie convoyeurs, pompes, ventilateurs et commande. Les balles de riz sont ensuite introduites progressivement et les paramètres ajustés jusqu'à une production stable. Les opérateurs reçoivent une formation sur démarrage, arrêt, urgence et inspection avant remise officielle.

1.5. Résumé du chapitre

Une installation et une mise en service rigoureuses sont indispensables à la sécurité, l'efficacité et la fiabilité. La préparation du site garantit fondations, utilités, drainage, ventilation et conditions de travail. Le montage exige positionnement, alignement, assemblage mécanique, raccordements électriques, instrumentation et inspection. La mise en service vérifie le fonctionnement par inspection, essais à froid, mise en service à chaud, réception de performances et formation. Une exécution méthodique réduit les risques et améliore les performances à long terme.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez : a) préparation du site ; b) installation des équipements ; c) mise en service à froid ; d) mise en service à chaud.
2. Expliquez pourquoi la préparation du site est critique et les conséquences de fondations mal conçues ou d'utilités insuffisantes.
3. Distinguez mise en service à froid et à chaud en précisant objectifs, activités et résultats attendus.
4. Un programme comprend 60 activités et 57 sont achevées. Calculez le pourcentage d'achèvement.
5. Une coopérative veut installer un gazéifieur utilisant des coques de palmiste. Décrivez toute la procédure depuis la préparation du site jusqu'à la mise en service finale, y compris raccordements, instrumentation, essais et formation.
6. Pendant la mise en service à chaud d'une chaudière, on observe fuite de vapeur, combustion instable et vibration anormale du générateur. Identifiez quatre causes possibles et les actions correctives avant exploitation commerciale.
7. Une centrale nouvellement mise en service produit moins que la puissance spécifiée. Discutez des facteurs techniques, d'installation et d'exploitation possibles et expliquez comment les essais de réception permettent de les identifier et corriger.

Exploitation et surveillance du système

2.1. Introduction

Une exploitation efficace et une surveillance continue sont essentielles pour assurer des performances fiables, sûres et économiques. Une bonne conduite maintient les équipements dans leurs limites de conception, tandis que la surveillance détecte les situations anormales avant qu'elles ne deviennent des pannes majeures.

Les installations modernes associent procédures opératoires, instrumentation et enregistrement des performances afin de maintenir la stabilité, améliorer l'efficacité, réduire les arrêts et appuyer la maintenance préventive.

2.2. Procédures opératoires

Les procédures opératoires normalisées (SOP) guident les techniciens pour le démarrage, l'exploitation et l'arrêt en sécurité.

Avant démarrage

L'inspection préalable comprend :

- disponibilité et qualité de la biomasse ;
- niveaux de lubrification ;
- alimentation en eau de refroidissement ;
- position correcte des vannes ;
- connexions électriques ;
- fonctionnement des protections et arrêts d'urgence ;
- étalonnage et communication des instruments.

Démarrage

Les équipements sont lancés selon la séquence du fabricant. L'alimentation en combustible commence progressivement afin d'établir une combustion ou une gazéification stable. Pression chaudière, température, débit d'air et débit de combustible augmentent progressivement sous surveillance.

Exploitation normale

Les techniciens surveillent continuellement : combustion, pression vapeur, puissance du générateur, consommation, émissions, vibrations, refroidissement et charge électrique. Bruits, vibrations, fumées ou lectures anormales doivent être examinés immédiatement.

Arrêt

L'alimentation biomasse est réduite et arrêtée progressivement en laissant le combustible restant se consumer. Chaudières et gazéificateurs sont refroidis de manière contrôlée pour éviter les contraintes

thermiques. Les charges électriques sont déconnectées en sécurité avant l'arrêt du générateur. Toutes les données d'exploitation sont consignées.

Exemple 2.1

Une installation de gazéification alimentant une coopérative de manioc commence chaque journée par une inspection complète : humidité du combustible, état du gazéifieur, lubrification, refroidissement, alarmes et disponibilité du générateur. L'application de la SOP réduit les défaillances et améliore la fiabilité.

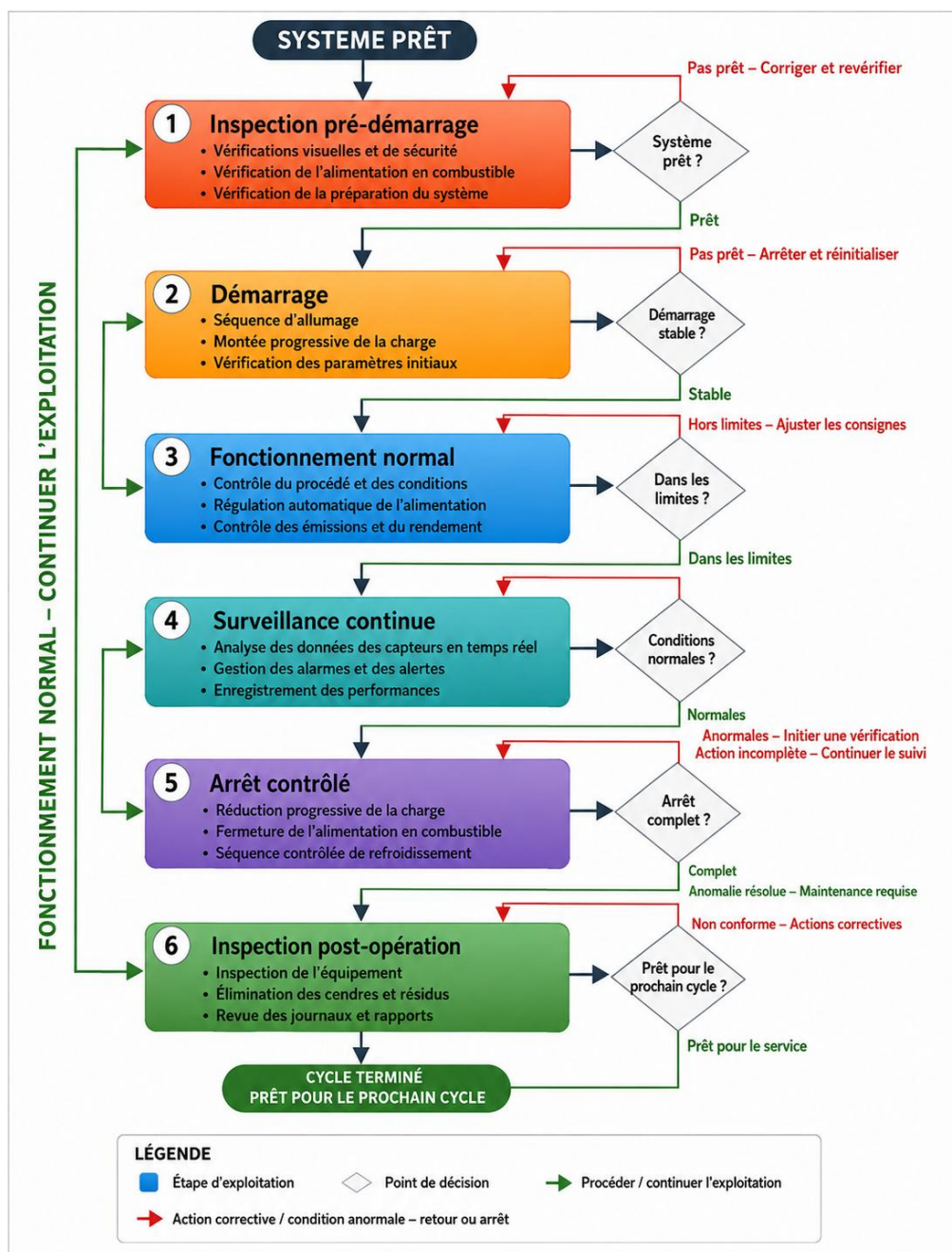


Figure 2.1 — Séquence d'exploitation d'un système biomasse

2.3. Instrumentation et surveillance

L'instrumentation regroupe les dispositifs de mesure, affichage, enregistrement et contrôle des paramètres d'exploitation.

- **Température** : thermocouples et détecteurs résistifs de température (RTD) mesurent température de combustion, vapeur, eau de refroidissement, huile de lubrification et fumées. Une température excessive peut indiquer un défaut de combustion, un refroidissement insuffisant ou une panne.
- **Pression** : manomètres et transmetteurs suivent vapeur, gaz, combustible et circuits hydrauliques.
- **Débit** : débitmètres pour eau, vapeur, combustible, air et fluides de refroidissement. Ils aident à optimiser combustion, consommation et transfert de chaleur.
- **Mesures électriques** : voltmètres, ampèremètres, wattmètres, fréquencemètres et mesure du facteur de puissance surveillent le générateur. Une tension et une fréquence stables sont particulièrement importantes pour les mini-réseaux et réseaux nationaux.
- **Analyse des gaz** : mesure de l'oxygène, du CO₂, du CO et d'autres gaz afin d'optimiser le rapport air/combustible et de réduire les émissions.

Les centrales modernes utilisent des PLC et SCADA pour collecter automatiquement les données, afficher les informations en temps réel, générer des alarmes et assister les opérateurs. L'étalonnage régulier est indispensable, car des mesures inexactes peuvent entraîner fonctionnement dangereux, baisse d'efficacité ou arrêts inutiles.

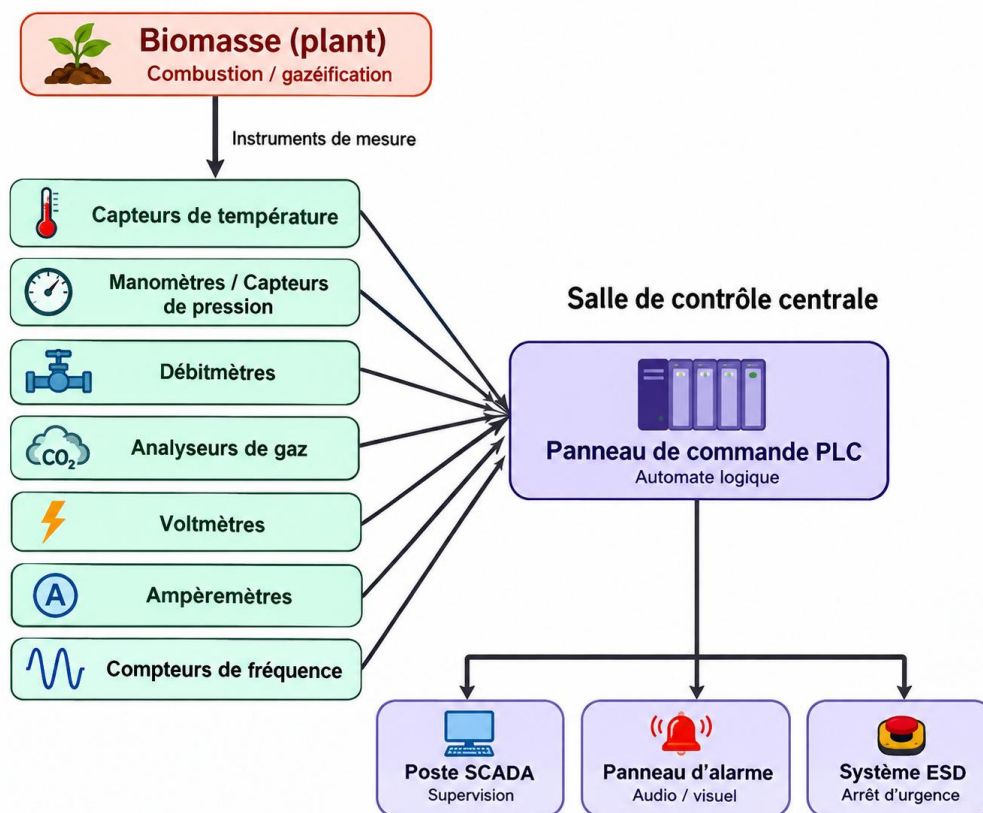


Figure 2.2 — Instrumentation et surveillance d'une centrale biomasse

Exemple 2.2

Dans une huilerie de palme, des thermocouples mesurent la température du foyer, des transmetteurs mesurent la pression vapeur et des analyseurs de gaz optimisent la combustion. Le SCADA affiche en continu les paramètres dans la salle de commande et alerte automatiquement les opérateurs en cas de dépassement.

2.4. Enregistrement des performances

L'enregistrement consiste à collecter et documenter systématiquement les données pour évaluer la performance, planifier la maintenance et améliorer l'efficacité.

Les paramètres enregistrés à intervalles réguliers comprennent : consommation de biomasse, température de combustion, pression vapeur, puissance générateur, tension, fréquence, charge, humidité du combustible, heures de fonctionnement, émissions et temps d'arrêt.

Les données peuvent être conservées dans des registres ou dans un système informatisé de gestion de la maintenance (GMAO/CMMS). Les SCADA modernes enregistrent automatiquement l'historique et permettent des analyses de tendance.

Les indicateurs clés incluent puissance électrique, consommation, rendement chaudière, rendement générateur, disponibilité, PLF et consommation spécifique. Le suivi révèle les dégradations progressives avant qu'une panne sérieuse ne survienne. Les tendances anormales doivent être analysées rapidement lors des réunions de maintenance.

La disponibilité est :

$$\text{Disponibilité (\%)} = (\text{temps de fonctionnement} / \text{temps programmé}) \times 100$$

Exemple 2.3

Une centrale est programmée pour 720 h et fonctionne 684 h.

$$\text{Disponibilité} = (684 \div 720) \times 100 = 95 \%$$

Cela correspond à une excellente fiabilité avec peu d'arrêts.

Application pratique

Une coopérative rizicole du Sénégal exploite une centrale à combustion de balles de riz de 400 kW. Les opérateurs suivent une procédure normalisée comprenant inspection quotidienne, démarrage contrôlé, surveillance continue et arrêt planifié. Le SCADA affiche pression chaudière, température de combustion, puissance et consommation. Les données sont enregistrées toutes les heures et examinées chaque semaine. L'analyse révèle progressivement une hausse de consommation liée à l'encrassement des tubes, permettant de programmer le nettoyage avant une baisse importante des performances.

2.5. Résumé du chapitre

Une exploitation sûre et efficace repose sur des procédures normalisées, la surveillance continue des paramètres critiques et l'enregistrement précis des performances. Un démarrage et un arrêt contrôlés réduisent les défaillances. Capteurs de température, pression, débit, mesures électriques, analyseurs de gaz, PLC et SCADA fournissent les informations nécessaires au maintien d'un fonctionnement stable. L'enregistrement appuie maintenance préventive, amélioration de rendement, diagnostic des pannes et décisions de gestion.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Expliquez pourquoi il faut respecter des procédures normalisées de démarrage et d'arrêt et les conséquences d'une mauvaise conduite.
2. Comparez surveillance manuelle et automatisée avec PLC/SCADA, avec avantages et limites.
3. Une centrale est programmée pour 840 h sur cinq semaines et fonctionne réellement 798 h. Calculez sa disponibilité.
4. Une centrale communautaire utilise une chaudière et une turbine. Identifiez les principaux paramètres à surveiller et expliquez leur influence sur efficacité, fiabilité et sécurité.
5. On observe une hausse de température des fumées, une baisse de pression vapeur et une hausse de consommation. Identifiez quatre causes possibles et proposez des actions correctives.
6. Une centrale subit des arrêts inattendus fréquents depuis trois mois. Expliquez comment l'enregistrement des performances, l'analyse des tendances et la surveillance peuvent aider à identifier les causes profondes et améliorer la fiabilité.

Maintenance préventive et corrective

3.1. Introduction

La maintenance est indispensable à une exploitation sûre, fiable et efficace des systèmes biomasse. Sans entretien, les équipements se détériorent progressivement, ce qui augmente la consommation de combustible, réduit la puissance, provoque des pannes imprévues et accroît les coûts.

Une stratégie efficace combine la maintenance préventive, qui réduit la probabilité de panne, et la maintenance corrective, qui rétablit l'équipement après une défaillance. Dans une centrale biomasse, elle concerne les systèmes mécaniques, électriques, d'instrumentation et de commande. Les techniciens doivent savoir planifier, inspecter, identifier l'usure et remplacer les composants avant que leur défaillance n'affecte l'installation.

3.2. Planification de la maintenance

La planification organise les interventions pour assurer la sécurité et l'efficacité avec un minimum d'arrêts.

Maintenance préventive

Elle comprend inspections planifiées, nettoyage, lubrification, étalonnage, réglages et remplacement avant panne.

Maintenance corrective

Elle intervient lorsqu'un défaut s'est produit, afin de restaurer le fonctionnement normal aussi rapidement que possible.

La planification commence par un inventaire des équipements : chaudières, gazéificateurs, générateurs, turbines, pompes, convoyeurs, ventilateurs, moteurs, vannes, tableaux, capteurs et automatismes. Chaque élément possède un calendrier fondé sur les recommandations constructeur, les heures de fonctionnement et les conditions du site.

Des exemples de fréquence sont :

- **quotidien** : inspections visuelles, nettoyage, contrôle de lubrification et paramètres ;
- **hebdomadaire** : resserrage, inspection des courroies et chaînes, filtres, dispositifs de sécurité ;
- **mensuel ou annuel** : inspections détaillées, étalonnage, révision des machines tournantes et remplacement des pièces usées.

La gestion des pièces de rechange est également importante. Paliers, joints, courroies, filtres, capteurs, garnitures et protections électriques critiques doivent être disponibles afin de limiter les temps d'arrêt. Les GMAO/CMMS sont de plus en plus utilisées pour programmer les travaux, conserver l'historique, gérer les stocks et générer des rapports.

Exemple 3.1

Une centrale à combustion programme : inspection quotidienne des convoyeurs, lubrification hebdomadaire des paliers, nettoyage mensuel des tubes de chaudière, étalonnage trimestriel des capteurs de pression et révision annuelle de la turbine. Ce programme réduit les arrêts imprévus et améliore la fiabilité.

3.3. Routines d'inspection

Les inspections recherchent usure, dommages, fuites, corrosion, vibrations, surchauffes et situations anormales avant qu'elles ne deviennent des défaillances.

Inspection visuelle

Recherche de boulons desserrés, isolants endommagés, fuites d'huile ou de combustible, poussière excessive, corrosion, soudures fissurées, fumées ou situations inhabituelles.

Inspection mécanique

Sur pompes, turbines, moteurs, convoyeurs, ventilateurs et paliers : vibration, alignement, lubrification, état des arbres et température des paliers. Une vibration excessive peut révéler un déséquilibre, un désalignement, un palier usé ou des fixations desserrées.

Inspection électrique

Contrôle des isolations de câbles, connexions, appareillage, disjoncteurs, transformateurs, mise à la terre et relais. La thermographie peut détecter des composants électriques en surchauffe avant panne.

Chaudières et équipements de manutention

Les chaudières et appareils sous pression sont inspectés pour suie, corrosion, tartre, fuites de vapeur, réfractaires endommagés et fonctionnement des soupapes. Les convoyeurs sont vérifiés pour usure, blocage, tension des chaînes et performance d'alimentation.

Les rapports d'inspection doivent enregistrer date, état, défauts, actions et recommandations. L'historique facilite l'identification des problèmes récurrents.

Exemple 3.2

Lors d'une inspection de chaudière, les techniciens constatent une accumulation de suie sur les tubes et une petite fuite de vapeur sur une bride. Le nettoyage des tubes et le remplacement du joint rétablissent le rendement et évitent une dégradation plus grave.

3.4. Remplacement des composants

Le remplacement consiste à retirer un composant usé, endommagé ou défectueux et à installer une pièce conforme afin de restaurer l'exploitation. Une intervention réalisée au bon moment évite les dommages secondaires.

Avant tout remplacement, le système doit être isolé de toutes ses sources d'énergie par une procédure de consignation (LOTO). Les alimentations électriques sont coupées, les pressions des circuits vapeur ou gaz supprimées et les machines mobiles sécurisées.

Les pièces fréquemment remplacées comprennent :

- paliers ;
- bandes transporteuses, chaînes et pignons ;
- filtres, joints et garnitures ;
- vannes, pompes et moteurs ;
- thermocouples et capteurs de pression ;
- contacteurs électriques et disjoncteurs ;
- instruments de contrôle ;
- tubes de chaudière, réfractaires, isolants et soupapes de sécurité selon l'état.

Les pièces doivent respecter les spécifications du fabricant et être compatibles avec l'équipement. Après remplacement, on vérifie alignement, lubrification, connexions électriques, étalonnage et comportement global avant remise en service. Un essai fonctionnel confirme le fonctionnement sous conditions normales.

Les dossiers de maintenance doivent indiquer identification de la pièce, date, motif, référence et technicien responsable.

La disponibilité après maintenance peut être calculée par :

$$\text{Disponibilité (\%)} = (\text{temps de fonctionnement} / \text{temps total programmé}) \times 100$$

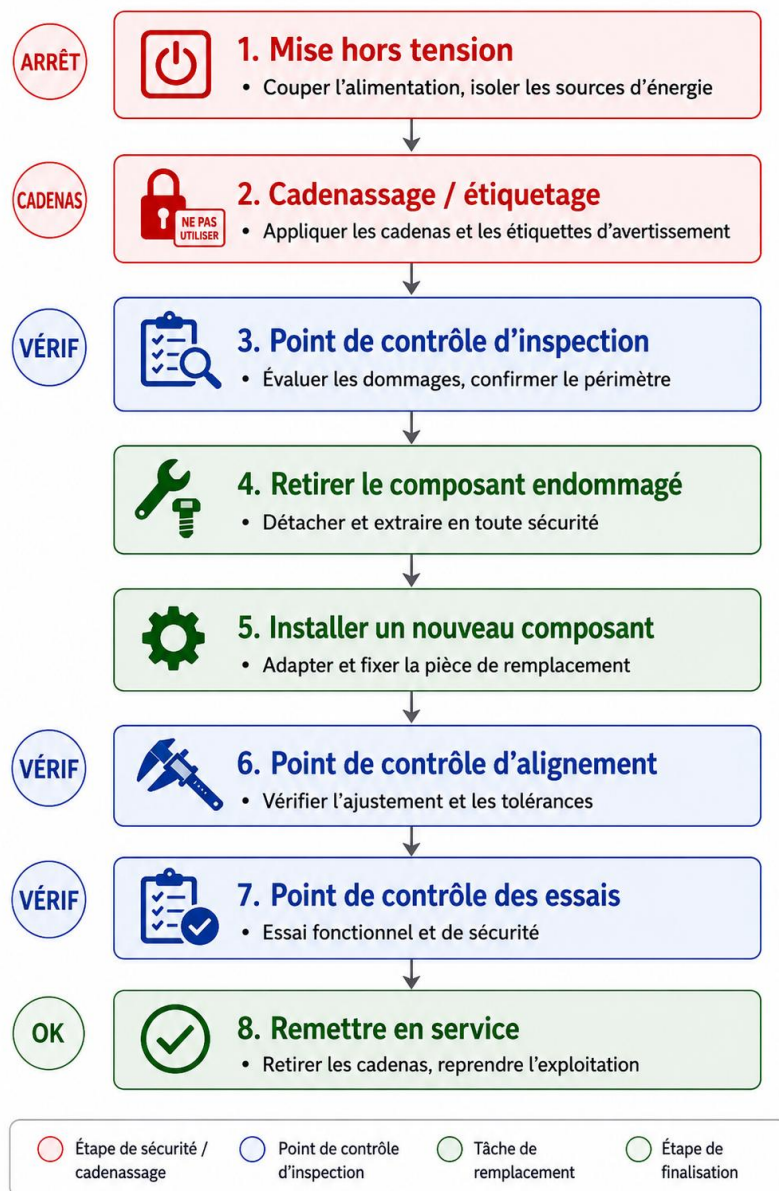


Figure 3.1 — Procédure de remplacement d'un composant d'équipement biomasse

Exemple 3.3

Une centrale est programmée pour 600 h et, après maintenance, fonctionne 570 h.

$$\text{Disponibilité} = (570 \div 600) \times 100 = 95 \%$$

Cette valeur indique que les activités de maintenance soutiennent une exploitation fiable.

Application pratique

Une centrale en Côte d'Ivoire alimentant une huilerie de palme suit un programme préventif fondé sur les heures de marche. Une inspection quotidienne détecte une vibration anormale d'un palier de convoyeur. L'équipe consigne le convoyeur, remplace le palier, lubrifie les composants adjacents, vérifie l'alignement puis teste le système. Pendant le même arrêt, les tubes de chaudière sont nettoyés, les manomètres étalonnés et les connexions électriques resserrées. Toutes les opérations sont enregistrées afin d'optimiser les calendriers futurs.

3.5. Résumé du chapitre

La maintenance préventive et corrective est essentielle pour préserver sécurité, fiabilité et efficacité. La planification organise inspections, lubrification, nettoyage, étalonnage et entretien programmé. Les inspections détectent usure, corrosion, fuites, vibrations et surchauffes avant panne. Le remplacement en temps opportun de composants conformes, sous consignation et avec essais de remise en service, restaure les performances et évite les dommages secondaires. La documentation soutient la maintenance préventive et réduit les coûts à long terme.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez : a) maintenance préventive ; b) maintenance corrective ; c) planification de la maintenance ; d) consignation (LOTO).
2. Expliquez pourquoi la maintenance préventive est généralement plus économique que la maintenance corrective et son influence sur fiabilité, sécurité et coûts.
3. Comparez maintenance préventive et corrective en termes d'objectifs, calendrier, coût, temps d'arrêt et applications typiques.
4. Une centrale est programmée pour 750 h et fonctionne 705 h après maintenance. Calculez sa disponibilité.
5. Une installation de gazéification fonctionne depuis six mois. Préparez un plan de maintenance préventive pour manutention du combustible, gazéifieur, générateur, équipements électriques et instrumentation.
6. Lors d'une inspection, des vibrations excessives du générateur, une fuite de vapeur et la surchauffe d'un moteur sont constatées. Identifiez les causes possibles et les mesures nécessaires avant remise en service.
7. Une centrale connaît des défaillances répétées des paliers de convoyeur malgré leur remplacement régulier. Discutez des causes techniques et opérationnelles et recommandez des améliorations de conception et de maintenance.

Dépannage et diagnostic des défauts

4.1. Introduction

Même avec une bonne installation, exploitation et maintenance, les systèmes biomasse peuvent subir des défauts dus à l'usure, une mauvaise qualité du combustible, une erreur d'exploitation, des pannes électriques ou des conditions environnementales variables. L'identification et la correction rapides sont essentielles pour limiter les arrêts et maintenir la sécurité.

Le **dépannage** est la démarche systématique visant à rechercher la cause profonde d'un problème. Le **diagnostic des défauts** analyse symptômes, mesures et conditions pour déterminer pourquoi un équipement ne fonctionne pas correctement. Une bonne méthode nécessite connaissances techniques, expérience pratique, instruments adaptés et démarche logique.

4.2. Problèmes d'exploitation courants

Les systèmes biomasse associent composants mécaniques, électriques, thermiques et de commande. Une défaillance d'un sous-système peut réduire la performance globale.

Problèmes de combustible

Une biomasse trop humide réduit la température de combustion, le rendement de chaudière et augmente la consommation. Des particules trop grandes ou irrégulières peuvent bloquer convoyeurs, doseurs ou gazéificateurs et provoquer une alimentation instable.

Défauts de combustion

Un mauvais rapport air/combustible, des passages d'air obstrués ou une biomasse de mauvaise qualité peuvent provoquer combustion incomplète, fumées excessives, faible température du foyer, plus de cendres et moins de vapeur.

Défauts de chaudière

Fuites de vapeur, pression insuffisante, tartre dans les tubes, accumulation de suie et défaillance des soupapes diminuent le transfert thermique et augmentent les coûts.

Défauts mécaniques

Sur pompes, convoyeurs, paliers, ventilateurs, moteurs et turbines, vibrations, bruits, surchauffe ou fuite de lubrifiant peuvent indiquer paliers usés, désalignement, accouplements desserrés ou manque de lubrification.

Défauts électriques et d'instrumentation

Les défauts électriques comprennent surcharge, fluctuations de tension, basse fréquence, isolation endommagée, connexions lâches et déclenchement des relais. Les défauts d'instrumentation incluent

capteurs inexacts, communication interrompue, dérive d'étalonnage, transmetteurs endommagés ou signaux de commande défectueux.

Tableau 4.1 — Emplacements de défauts courants et symptômes

Composant	Défaut ou symptôme courant	Cause ou effet possible
Convoyeur de combustible	Blocage / alimentation interrompue	Mauvaise qualité de biomasse ou panne mécanique
Stockage biomasse	Combustible humide	Rendement de combustion réduit
Chambre de combustion	Flamme instable	Alimentation irrégulière ou rapport air/combustible incorrect
Tubes de chaudière	Dépôts de suie	Transfert thermique et rendement réduits
Conduite vapeur	Joint fuyard	Perte d'énergie et risque de sécurité
Paliers du générateur	Vibrations excessives	Usure mécanique ou désalignement
Tableau électrique	Câblage défectueux / surchauffe	Risque d'incendie ou d'arrêt
Capteurs	Endommagés / absence de signal	Surveillance et commande incorrectes
Filtres	Colmatage par les cendres	Débit de gaz et performance réduits

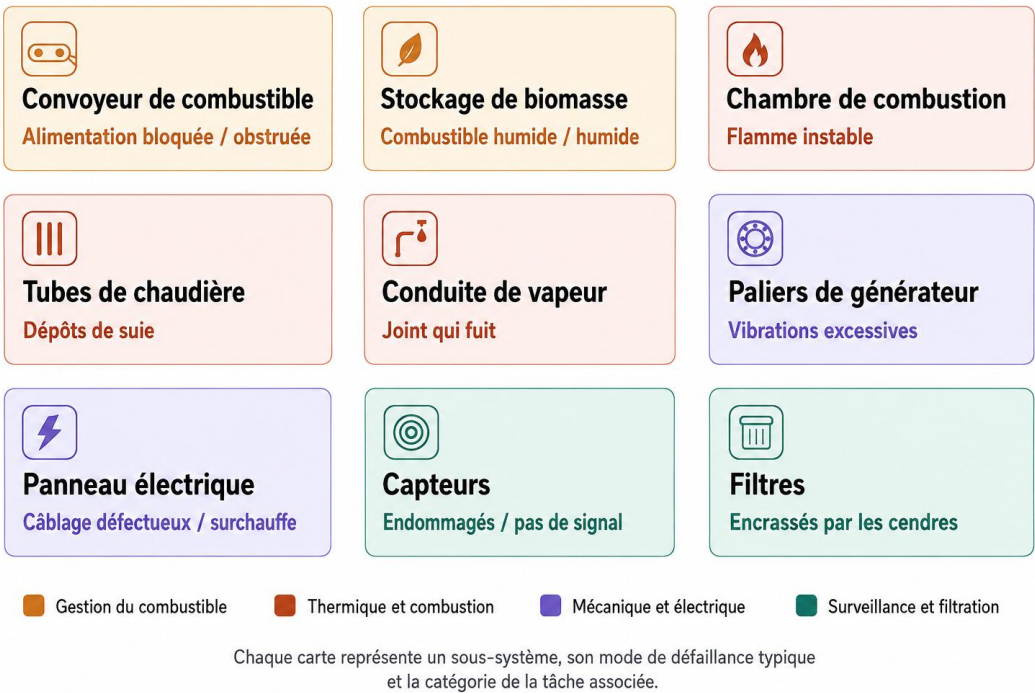


Figure 4.1 — Défauts courants dans un système biomasse

Exemple 4.1

Sur une chaudière, les opérateurs observent davantage de fumées, une baisse de pression vapeur et une hausse de consommation. L'inspection révèle une biomasse humide et des passages d'air partiellement obstrués. Après séchage du combustible et nettoyage des conduits d'air, les performances sont rétablies.

4.3. Outils et méthodes de diagnostic

Le diagnostic commence généralement par une inspection visuelle : boulons desserrés, isolation endommagée, fuite, corrosion, vibration, bruit, températures anormales, câbles endommagés et traces de surchauffe.

Les opérateurs comparent les températures, pressions, débits, courant, tension, fréquence, vibrations et émissions aux valeurs normales. Des écarts importants signalent souvent un défaut en développement.

Outils mécaniques

- analyseur de vibrations ;
- outil d'alignement laser ;
- tachymètre ;
- thermomètre infrarouge.

L'analyse vibratoire permet d'identifier paliers usés, déséquilibre d'arbre, fixation desserrée et désalignement avant la panne.

Outils électriques

- multimètre numérique ;
- mesureur de résistance d'isolement (mégohmmètre) ;
- pince ampèremétrique ;
- analyseur de qualité de l'énergie ;
- indicateur de séquence de phases.

Ils permettent de diagnostiquer courts-circuits, vieillissement d'isolant, déséquilibre de tension, surcharge et mauvaise mise à la terre.

Thermographie

Les caméras thermiques détectent les échauffements anormaux dans moteurs, appareillages, transformateurs, connexions, paliers et chaudières.

Données PLC/SCADA

Les historiques d'alarmes, courbes de tendance et données archivées aident à identifier les pannes récurrentes. Une démarche systématique suit généralement :

1. observer les symptômes ;
2. collecter les données ;
3. identifier les causes possibles ;
4. tester les hypothèses ;
5. appliquer les corrections ;
6. vérifier le retour au fonctionnement normal.

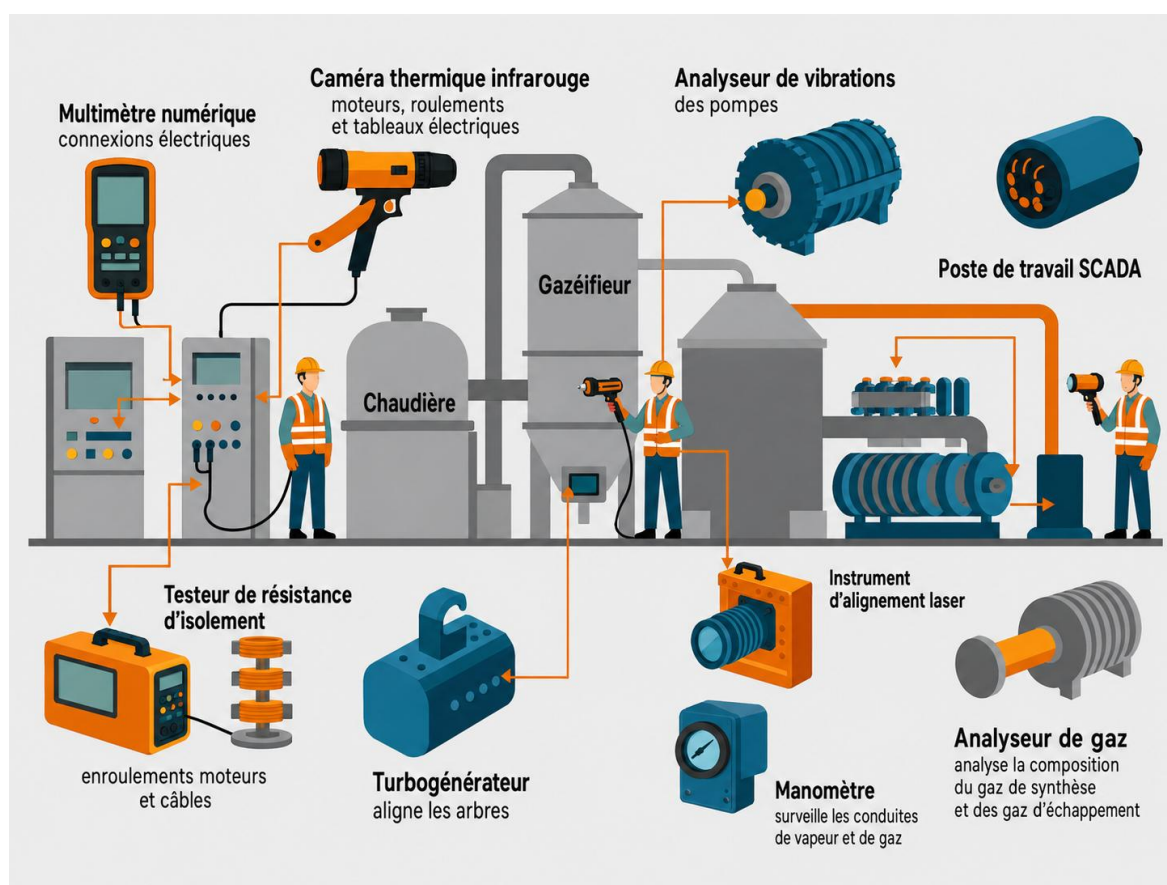


Figure 4.2 — Outils de diagnostic d'une centrale biomasse

Exemple 4.2

Un générateur déclenche fréquemment. Les techniciens consultent d'abord l'historique SCADA, puis mesurent la résistance d'isolement avec un mégohmmètre. Ils découvrent un câble dont l'isolation s'est dégradée par pénétration d'humidité. Le remplacement du câble élimine les déclenchements répétitifs.

4.4. Actions correctives

Une action corrective est une réparation, un réglage ou un remplacement visant à supprimer le défaut identifié et restaurer le fonctionnement. Elle doit traiter la cause profonde et non seulement le symptôme.

Actions mécaniques

Remplacement de paliers usés, resserrage, réparation de canalisations, lubrification, alignement des arbres, remplacement de bandes de convoyeur et équilibrage de machines tournantes.

Combustion et chaudière

Réglage du rapport air/combustible, nettoyage du foyer, élimination des cendres, amélioration de la qualité et du séchage du combustible, alimentation régulière et nettoyage des tubes de chaudière.

Électricité et instrumentation

Remplacement de câbles, resserrage de connexions, réparation du générateur, réarmement ou correction des protections, étalonnage, remplacement de capteurs et amélioration de la mise à la terre. Les interventions électriques doivent respecter la consignation LOTO.

Les problèmes d'instrumentation peuvent être corrigés par étalonnage, remplacement de capteur, mise à jour logicielle, inspection des câbles de communication et vérification des signaux. L'étalonnage se fait avec des instruments de référence certifiés.

Après réparation, un essai fonctionnel confirme le retour aux conditions normales. Le rapport doit documenter défaut, cause profonde, actions, pièces, résultats d'essai et recommandations pour éviter la récurrence.

Le taux de succès des réparations est :

$$\text{Taux de réussite des réparations (\%)} = (\text{réparations réussies} / \text{réparations totales}) \times 100$$

Exemple 4.3

Au cours d'un mois, 30 opérations correctives sont réalisées ; 28 réussissent dès la première tentative.

$$\text{Taux de réussite} = (28 \div 30) \times 100 = 93,3 \%$$

Le résultat indique une bonne efficacité de la démarche de dépannage.

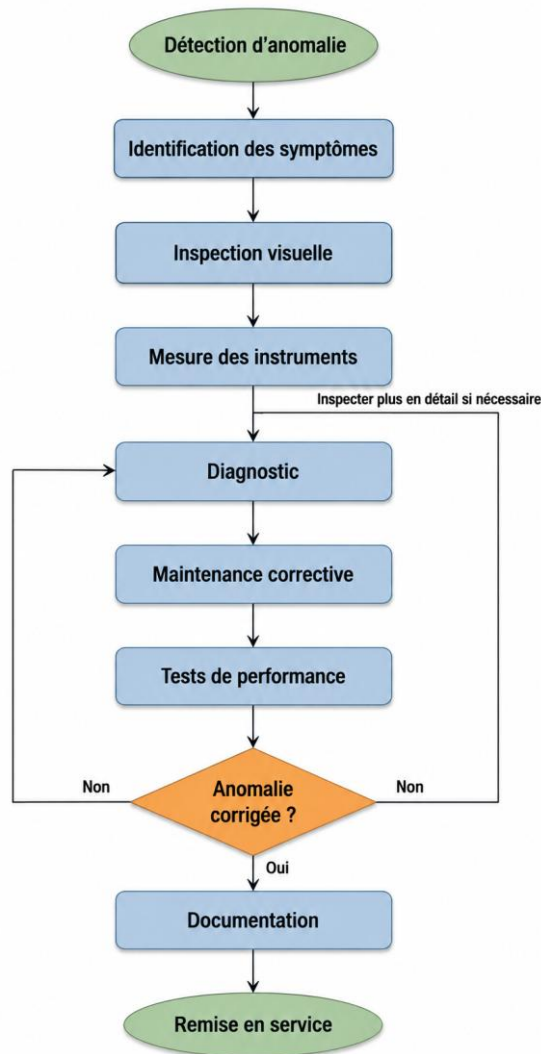


Figure 4.3 — Procédure de dépannage d'un système biomasse

Application pratique

Une unité de gazéification desservant une coopérative de maïs au Ghana présente une puissance instable et des arrêts fréquents du moteur. L'historique SCADA montre une baisse de pression du gaz et une hausse de la pression différentielle du filtre. L'inspection révèle un filtre d'épuration fortement contaminé par les goudrons et particules. L'équipe consigne l'installation, nettoie le filtre, inspecte la canalisation, réétalonne les capteurs de pression et vérifie le fonctionnement du moteur avant redémarrage. La puissance revient à la normale et les données sont archivées pour référence.

4.5. Résumé du chapitre

Le dépannage et le diagnostic sont des compétences essentielles pour maintenir la fiabilité. Les problèmes peuvent provenir du combustible, de la combustion, de la chaudière, des machines tournantes, de l'électricité ou de l'instrumentation. Un diagnostic efficace combine inspection visuelle, mesures, instruments spécialisés, historiques de fonctionnement et résolution systématique pour identifier la cause profonde. Les actions correctives comprennent réparation, réglage, étalonnage, nettoyage, remplacement et essais de vérification. Une documentation rigoureuse réduit la répétition des défauts.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez : a) dépannage ; b) diagnostic de défaut ; c) maintenance corrective ; d) analyse des causes profondes.
2. Expliquez pourquoi identifier la cause profonde est plus efficace que réparer seulement la pièce endommagée et les conséquences d'un mauvais dépannage.
3. Comparez défauts mécaniques et électriques selon symptômes, méthodes de diagnostic et actions correctives.
4. Une équipe effectue 40 maintenances correctives en un trimestre ; 37 restaurent le fonctionnement dès la première tentative. Calculez le taux de réussite.
5. Une centrale présente faible pression vapeur, fumées excessives et hausse de consommation. Décrivez une procédure systématique, les instruments à utiliser et les actions correctives.
6. On observe vibration excessive du générateur, déclenchements électriques fréquents et lectures de température incorrectes. Identifiez les causes possibles, les outils de diagnostic et les actions nécessaires.
7. Un mini-réseau subit des arrêts répétés depuis six mois malgré plusieurs réparations. Expliquez comment dossiers de maintenance, données SCADA, rapports d'inspection et analyse des causes profondes peuvent améliorer la fiabilité à long terme.

Pratiques de santé, sécurité au travail et environnement

5.1. Introduction

Les pratiques de santé, sécurité au travail et environnement (SSTE/OHSE) sont fondamentales pour l'exploitation sûre et durable des systèmes biomasse. Les centrales comportent des équipements à haute température, machines tournantes, systèmes sous pression, installations électriques, combustibles et gaz dangereux qui peuvent mettre le personnel en danger.

Une gestion SSTE efficace protège les travailleurs, prévient les dommages matériels, réduit les impacts environnementaux et assure le respect des réglementations nationales et des normes internationales. Les techniciens doivent être capables d'identifier les dangers, mettre en œuvre la prévention incendie et gaz, utiliser des EPI adaptés et respecter les exigences environnementales sur tout le cycle de vie.

5.2. Identification des dangers

L'identification des dangers consiste à reconnaître les conditions, activités ou équipements susceptibles de provoquer blessure, maladie, dommage environnemental ou perte matérielle. Elle permet de mettre en place des mesures avant accident.

Les principales catégories sont :

- **mécaniques** : arbres tournants, convoyeurs, pompes, ventilateurs, concasseurs et machines mobiles pouvant entraîner happement ou écrasement ;
- **thermiques** : chaudières, chambres de combustion, conduites vapeur, échappements et surfaces chaudes pouvant provoquer de graves brûlures ;
- **électriques** : conducteurs nus, isolation endommagée, circuits surchargés, mauvaise terre et haute tension pouvant entraîner choc, arc électrique ou incendie ;
- **chimiques** : carburants, lubrifiants, produits de nettoyage, cendres et gaz de combustion tels que le CO ;
- **poussières** : exposition respiratoire et, dans certaines conditions, explosion de poussières combustibles ;
- **espaces confinés** : réservoirs, digesteurs et silos pouvant contenir des atmosphères pauvres en oxygène ou toxiques.

Les dangers sont repérés par inspections, évaluations des risques, analyses de sécurité de tâche et enquêtes sur incidents. Signalisation, barrières et procédures adaptées doivent être utilisées.

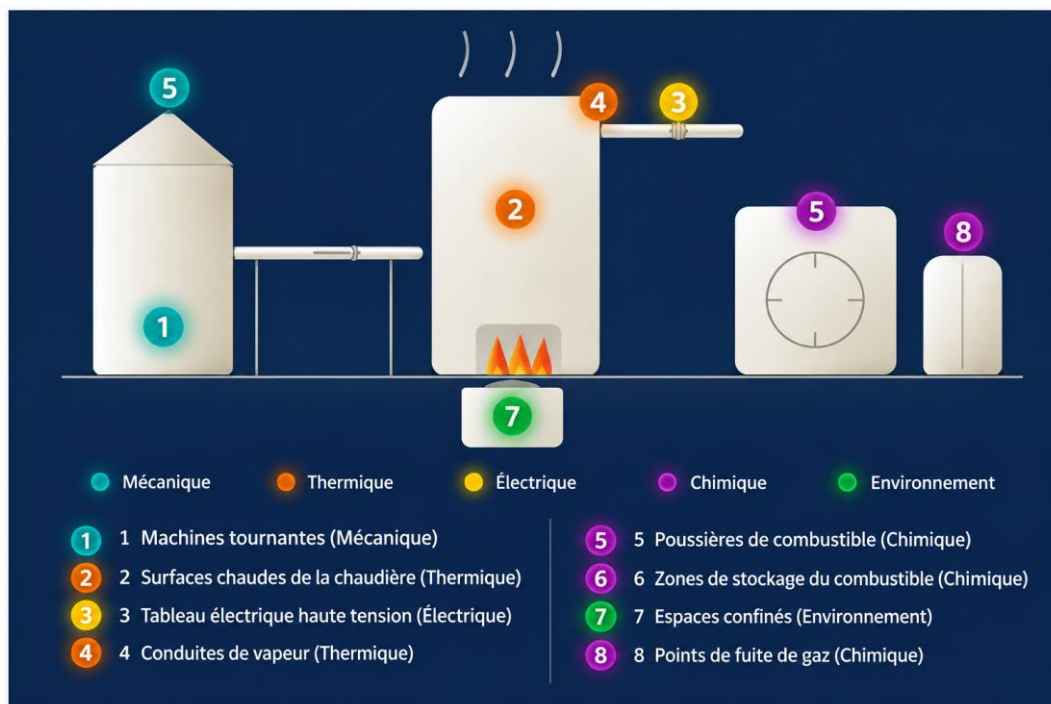


Figure 5.1 — Identification des dangers dans une centrale biomasse

Exemple 5.1

Une inspection détecte une accumulation excessive de poussière près du convoyeur. La poussière est retirée selon une procédure approuvée, la ventilation est améliorée et le programme de nettoyage est renforcé afin de réduire le risque d'explosion et l'exposition respiratoire.

5.3. Sécurité incendie et gaz

Les combustibles, gaz inflammables et équipements chauds rendent la prévention incendie particulièrement importante. Elle commence par le rangement, le stockage sûr du combustible, l'inspection et le respect des procédures.

La biomasse doit être conservée au sec, dans des zones ventilées éloignées des sources d'ignition. Les accumulations de poussière doivent être limitées. Les systèmes de combustion sont inspectés pour surchauffe, accumulation de cendres et fuites.

Les systèmes biogaz demandent une attention particulière : le méthane est très inflammable, tandis que le monoxyde de carbone issu de la gazéification et de la combustion est toxique et inodore. Des détecteurs doivent surveiller les concentrations et déclencher des alarmes en cas de niveau dangereux.

Le matériel de sécurité peut inclure :

- extincteurs portatifs ;
- bouches d'incendie ;
- seaux de sable ;
- détecteurs de fumée ;
- alarmes ;
- voies d'évacuation clairement identifiées.

Les travailleurs doivent être formés à la prévention, l'intervention et l'évacuation. Les extincteurs à poudre chimique sont couramment utilisés car ils conviennent à plusieurs types de feux, notamment électriques et solides combustibles. **L'eau ne doit jamais être utilisée sur un équipement électrique sous tension.**

Les plans d'urgence doivent définir les responsabilités en cas d'incendie, fuite de gaz, explosion ou autre événement. Des exercices réguliers améliorent la préparation.



Figure 5.2 — Système de sécurité incendie et gaz

Exemple 5.2

Un détecteur de méthane proche d'un digesteur signale une concentration élevée due à une fuite sur un raccord. Les opérateurs isolent l'alimentation, évacuent la zone, ventilent le bâtiment, réparent la fuite et vérifient le retour à un niveau sûr avant redémarrage.

5.4. Équipements de protection individuelle (EPI)

Les EPI sont des vêtements et équipements spécialisés qui réduisent l'exposition aux risques. Ils constituent la dernière ligne de défense après les mesures techniques et administratives.

Le choix dépend de la tâche :

- casque pour chutes d'objets et impacts ;
- lunettes et écran facial contre particules, étincelles, poussières et projections chimiques ;
- protections auditives pour turbines, générateurs, soufflantes et concasseurs ;
- gants résistants à la chaleur pour surfaces chaudes ou gants chimiques pour huiles et agents de nettoyage ;
- chaussures de sécurité à embout renforcé ;
- protection respiratoire dans les zones poussiéreuses ou susceptibles de contenir des gaz nocifs ;
- vêtements haute visibilité près des véhicules et engins ;
- harnais pour les travaux en hauteur.

Les EPI doivent être inspectés avant usage, entretenus, nettoyés et remplacés lorsqu'ils sont endommagés.

Les travailleurs doivent être formés au choix, à l'utilisation, aux limites, au stockage et à l'entretien.



Figure 5.3 — EPI recommandés pour les techniciens de centrales biomasse

Exemple 5.3

Des techniciens remplaçant l'isolation autour d'une chaudière utilisent casque, gants thermiques, vêtements de protection, chaussures de sécurité, protection oculaire et masque antipoussière. Ces EPI limitent brûlures, irritation respiratoire, lésions oculaires et blessures aux pieds.

5.5. Exigences de conformité environnementale

La conformité environnementale consiste à exploiter l'installation selon les lois, réglementations et bonnes pratiques reconnues afin de limiter la pollution, protéger les ressources naturelles et soutenir une énergie durable.

Émissions atmosphériques

Les centrales doivent réduire particules, fumées, oxydes d'azote, monoxyde de carbone et autres polluants.

Les technologies citées comprennent :

- cyclones ;
- filtres à manches ;
- précipitateurs électrostatiques ;
- laveurs humides.

Déchets solides et eaux usées

Les cendres doivent être gérées de manière responsable. Selon leur composition, elles peuvent être utilisées comme amendement du sol ou éliminées dans une installation autorisée. Les eaux usées doivent être traitées avant rejet pour protéger rivières, lacs et nappes.

Bruit et ressources

Le bruit des turbines, générateurs et soufflantes peut être limité par maintenance, isolation acoustique et barrières. La collecte de biomasse doit rester durable afin d'éviter déforestation, dégradation des sols et perte de biodiversité.

La surveillance environnementale comprend mesure des émissions, qualité des eaux, bruit et quantités de déchets. Des dossiers précis démontrent la conformité et soutiennent l'amélioration continue. Les techniciens doivent connaître les réglementations nationales et des référentiels tels qu'**ISO 14001** — **Systèmes de management environnemental**.

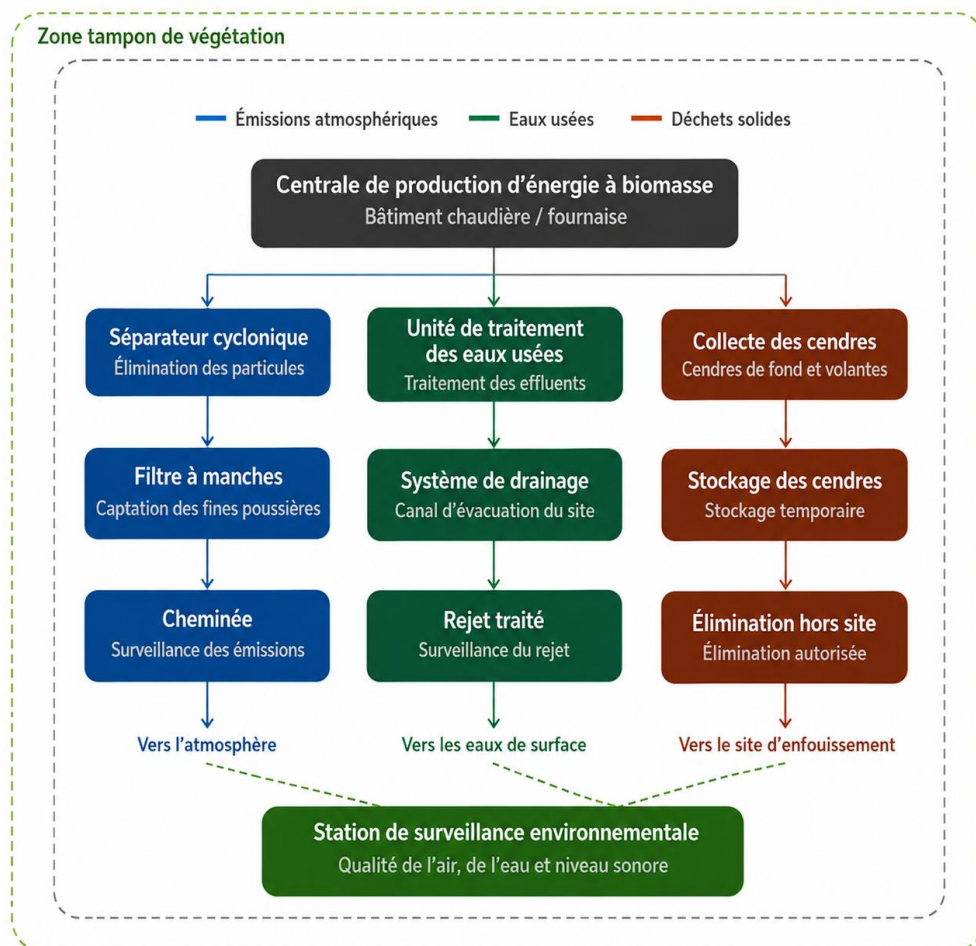


Figure 5.4 — Mesures de protection environnementale dans une centrale biomasse

Exemple 5.4

Une centrale à combustion installe un cyclone puis un filtre à manches pour réduire les particules avant rejet des fumées. Les cendres sont collectées séparément et fournies à des agriculteurs après vérification de leur qualité environnementale. La surveillance continue des émissions confirme le respect des exigences nationales.

Application pratique

Une centrale à combustion de 600 kW alimentant une coopérative rizicole au Mali met en œuvre un programme SSTE complet. Avant chaque poste, les opérateurs tiennent un point sécurité et inspectent EPI, extincteurs, détecteurs de gaz, sorties d'urgence et premiers secours. Les inspections de routine identifient câbles électriques endommagés, poussières excessives et fuites de vapeur avant qu'elles ne deviennent graves. Les émissions sont surveillées en continu et les cendres valorisées en agriculture lorsqu'elles sont conformes. Des exercices d'urgence impliquant opérateurs, pompiers et représentants de la communauté sont organisés deux fois par an.

5.6. Résumé du chapitre

La santé, la sécurité au travail et l'environnement sont essentiels à une exploitation biomasse sûre et durable. L'identification des dangers permet de maîtriser les risques mécaniques, thermiques, électriques, chimiques et environnementaux. La prévention incendie et gaz réduit les risques d'incendie, explosion et

exposition toxique grâce au stockage correct, à la détection, aux plans d'urgence et aux équipements de lutte. Les EPI fournissent une protection complémentaire. La conformité environnementale assure une gestion responsable des émissions, eaux usées, déchets et ressources naturelles selon les réglementations et les normes applicables.

Questions de révision de fin de chapitre

1. Définissez : a) identification des dangers ; b) équipement de protection individuelle ; c) conformité environnementale ; d) évaluation des risques.
2. Expliquez pourquoi l'identification des dangers doit précéder l'exploitation ou la maintenance et comment l'évaluation des risques améliore la sécurité.
3. Comparez mesures techniques, mesures administratives et EPI pour la maîtrise des risques. Laquelle doit être prioritaire ? Justifiez.
4. Lors d'une inspection mensuelle, 48 dangers sont identifiés et 45 corrigés avant la fin du mois. Calculez le taux de correction.
5. Une centrale à balles de riz connaît une accumulation de poussières et des fuites occasionnelles de méthane provenant d'un stockage de biogaz voisin. Décrivez les mesures de sécurité, équipements incendie, systèmes de détection et EPI nécessaires.
6. Les opérateurs constatent une sortie d'urgence bloquée, un extincteur périmé, une isolation électrique endommagée et l'absence d'EPI chez certains travailleurs. Identifiez les risques et recommandez les actions correctives nécessaires.
7. Une centrale souhaite augmenter sa capacité tout en respectant les réglementations environnementales nationales. Discutez des évaluations, technologies de dépollution, pratiques de gestion des déchets, systèmes de surveillance et activités de concertation à examiner avant approbation.