

FASCICULE DE BREVET D'INVENTION

21 Numéro de dépôt : 1201700117

22 Date de dépôt : 27/03/2017

30 Priorité(s):

24 Délivré le : 31/05/2019

45 Publié le : 28.06.2019

73 Titulaire(s) :
SAPIDACAM S.A (SOCIETE D'ACTION
PRIORITAIRE INTEGREE DE DEVELOPPEMENT
AGRICOLE AU CAMEROUN),
B.P. 14902, YAOUNDE (CM)

72 Inventeur(s) :
Révérant ABANDA NDOUMA JULES (CM)

74 Mandataire:

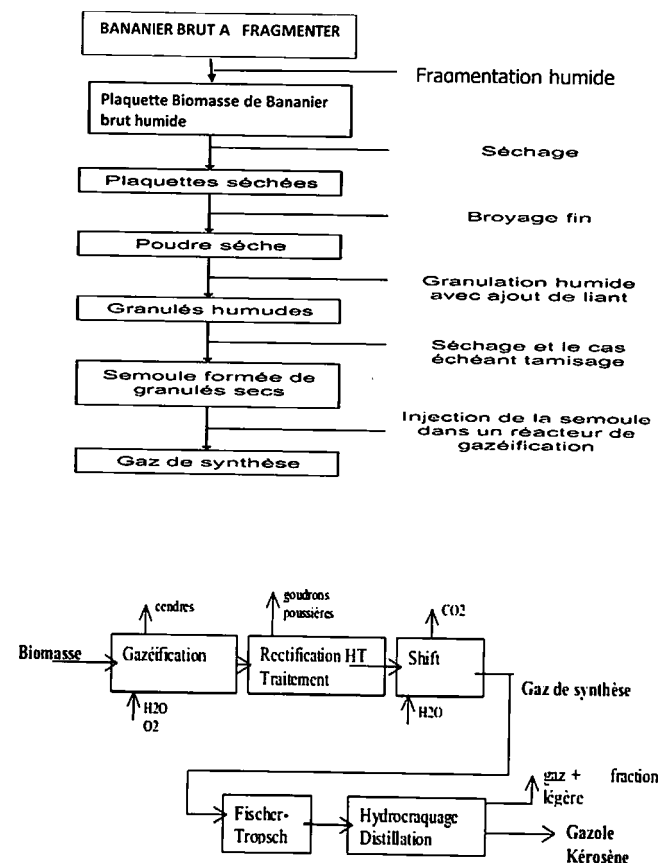
54 Titre : Energies renouvelables de la biomasse du bananier (ERBB).

57 Abrégé :

L'invention concerne deux aspects : - (1) fragmentation ou fraction du bananier à devenir une biomasse de bananier utile - (2) traitement de ladite biomasse de bananier fragmentée pour les énergies renouvelables et autres sous-produits issus du bananier. Le procédé de fractionnement par voie sèche ou humide de biomasse lignocellulosique comportant au moins 50 %, en masse, de lignines, cellulose et hémicelluloses, comportant : - (i) une étape de fragmentation du bananier pour obtenir une pâte grossièrement broyée - (ii) une étape de fragmentation du bananier par voie sèche pour obtenir une poudre ultrafine. L'invention concerne un procédé de fragmentation du bananier humide ou sèche et de traitement de cette biomasse lignocellulosique de bananier fractionnée en pâte, poudre, farine et pellet, incluant la gazéification d'un résidu ligneux en poudre. Le résidu ligneux provient d'un procédé de traitement biochimique de la biomasse lignocellulosique de bananier qui comporte une étape de prétraitement en voie humide, par chauffage en conditions acides et/ou d'auto-hydrolyse pour produire un substrat de bananier prétraité. Ledit substrat de bananier, éventuellement séparé d'une fraction liquide, est soumis à une hydrolyse enzymatique et est éventuellement soumis à une fermentation séparée ou concomitante à l'hydrolyse, ladite fermentation étant suivie d'une distillation. Le résidu ligneux de bananier est séparé en aval de l'hydrolyse. Il est séché et conditionné pour obtenir le résidu ligneux en poudre dont la granulométrie est comprise entre 15 et 900 µm, la teneur en eau inférieure à 12% pds, une densité de grain d'entre 500 et 900 kg/m³ et une vitesse minimale de fluidisation est supérieure à zéro et inférieure à 0.15m/s. La poudre, est introduite dans un gaz de fluidisation à une vitesse supérieure ou égale à la vitesse minimale de fluidisation.

L'invention est particulièrement adaptée pour la production des biocarburants à partir de gaz de synthèse, et en général dans un procédé de fragmentation de bananier pour plusieurs procédés de production des énergies renouvelables et autres, à base de bananier.

Fig. IX



- Dans certains cas, son limbe foliaire possède une longueur de 5 m et une largeur de 1,1 m (Champion, 1967). Le système foliaire est très développé et sa structure présente des particularités liées aux contraintes de l'alimentation hydrique (Lassoudière, 2007) ;

5 - L'inflorescence se forme au niveau de la tige souterraine, parcourt tout le centre du faux tronc avant son apparition à l'extérieur de la plante. Les fleurs femelles forment le régime de bananes qui constituent la partie comestible (Champion, 1967).

- L'inflorescence se forme au niveau de la tige souterraine, parcourt tout le centre du faux tronc avant son apparition à l'extérieur de la plante. Les fleurs femelles forment le régime de bananes qui constituent la partie comestible (Champion, 1967) de cette invention.

ART ANTERIEUR

10 Problèmes non résolus :

- Un des problèmes techniques qui se pose lors de l'utilisation d'un tel dispositif sans notre invention, est que « l'on n'utilise pas toute la plante. Seul 30% du bananier est utilisée sous forme alimentaire essentiellement ». Et à ce titre pour notre mobilité, nous utilisons par contrainte exclusivement des énergies fusils qui s'épuisent et qui sont également l'une des causes du réchauffement de notre planète.

15 - La plupart des pays producteurs et exportateurs de bananes, sont confrontés à un déficit énergétique majeur. Pourtant, ces pays génèrent une importante quantité annuelle de déchets, de biomasse de bananiers inexploités. Ces déchets représentent des millions de tonnes de matière fraîche et de matière sèche contenant de matière organique très utiles donc notre invention.

Estimations des déchets du bananier produits et abandonnés :

20 Après la récolte des fruits du bananier, une importante partie de la biomasse est généralement abandonnée dans des bananeraies ou gaspillée par incinération. Constituée essentiellement d'organes non souterrains, cette biomasse non valorisée se regroupe principalement en cinq parties morphologiques (limbes, nervures/pétioles, gaines foliaires, hampe du régime/rachis, tige florale). Suivant les calculs effectués sur base des données publiées par Lassoudière (2007), Vargas et al. (2005), ladite biomasse représente plus de la moitié (52,85 %) de la biomasse humide totale de la plante. Les bananes (fruits récoltés et commercialisés) représentent quant à elles 34,65 % ; le reste (12,5 %) étant représenté par la tige souterraine et les racines. Il en ressort que :

- les déchets représentés par les parties morphologiques aériennes de la plante représentent (en biomasse humide ou fraîche) environ 1,5 fois les fruits commercialisés ;

25 - les déchets de toutes les parties morphologiques non commercialisées (tige souterraine et racines comprises) représentent quant à eux environ 2 fois les fruits commercialisés (en biomasse humide ou fraîche). Nous avons à ce effet 19 à 20 tonnes de biomasse sèche de banane par hectare.

30 Ces déchets seraient nettement plus importants si on prend en compte toute la végétation découlant de la souche mère. Ainsi, d'après Reddy et al. (2003), chaque hectare de bananeraie génère annuellement environ 220 tonnes de déchets humides (rejets et rejets compris). À noter, selon Uma et al. (2005), que la biomasse lignocellulosique des bananiers du groupe génomique AAB serait plus riche en matière sèche et en fibres que celle du groupe génomique AAA. Nous n'avons pas trouvé dans la littérature les données relatives à la composition chimique détaillée de la tige souterraine/racines (parties morphologiques souterraines). Néanmoins, certaines études montrent que cette partie morphologique serait riche en amidon. Nous pourrions assimiler sa composition chimique à la moyenne des compositions chimiques de déchets constitués par l'ensemble des cinq parties morphologiques précédemment citées.

Lassoudière (2007) d'une part et Oliveira et al. (2007) d'autre part, ont publié les données portant sur la composition chimique de certaines parties morphologiques de bananiers du sous-groupe Cavendish (groupe génomique AAA). Ces données associées à celles d'autres auteurs (Polyamozhi et al., 1986 ; Viswanathan et al., 1989) nous ont permis de déterminer par pondération la composition chimique moyenne de ces déchets. Les tableaux 1 et 2 présentent une compilation desdites données. Partant de cette composition chimique, nous avons mis en évidence la valorisation énergétique potentielle des déchets de biomasse lignocellulosique du bananier par le biais d'une transformation en bioéthanol, biométhane et pellets.

Avantage :

5 - La présente invention met en exergue le potentiel énergétique des déchets (biomasse) du bananier produits et non valorisés, comme dans tous les pays producteur de banane et banane plantain d'Afrique en particulier et du Monde en général.

- La présente invention vise dont à remédier à ces inconvénients. Plus particulièrement, la présente invention vise à prévoir un dispositif qui permettrait de valoriser à 100% la valeur économique du bananier. Et favoriser l'inclusion des bioénergies propres à notre environnement.

Inconvénients :

10 Le bois de feu, surexploité et considéré comme source d'énergie du pauvre, est resté longtemps oublié de la comptabilité énergétique nationale. L'électricité reste un luxe auquel ne peuvent accéder les populations défavorisées des milieux ruraux en Afrique dont le niveau de pauvreté est d'environ 70 %. Selon l'Agence d'Électrification Rurale (AER) citée par Wandji (2007), *Exemple* : seulement 2 010 localités rurales camerounaises sur un total d'environ 7 500 dont la population est supérieure à 200 habitants, bénéficiaient du courant électrique en 2003.

15 Il ressort de ces statistiques qu'une importante tranche de la population ne dispose pas de revenus suffisants pour payer sa facture d'électricité, malgré les multiples problèmes d'approvisionnement et les délestages intempestifs. Ceci se traduit par une forte utilisation du bois-énergie et du kérosène. Les milieux ruraux se caractérisent ainsi par une faible pénétration des énergies modernes (sous forme de kérosène et rarement d'électricité). Ces dernières servent essentiellement à l'éclairage, les autres besoins énergétiques étant desservis par le bois-énergie.

NB : Et l'invention vient résoudre ces problèmes qui n'avaient pas encore de solutions.

LE BUT DE L'INVENTION

20 La présente invention vise à remédier à tout ou partie de ces inconvénients qui est le non utilisation de la biomasse de bananier.

A cet effet, selon un premier aspect, la présente invention vise un procédé de fractionnement par voie humide ou par voie sèche de biomasse lignocellulosique de bananier comportant au moins 50 %, en masse, de lignines, cellulose et hémicelluloses, procédé qui comporte :

- une étape de fragmentation de bananier humide ou sèche pour obtenir une biomasse en patte ou en poudre ultrafine et au moins une étape de séparation d'une fraction enrichie en cellulose, d'une part, d'une fraction enrichie en lignine et en hémicelluloses d'autre part, par tri électrostatique des particules ultrafines.

25 Des opérations ultérieures de tri aérodynamique (basé sur la densité de particules) et de tri dimensionnel (basé sur la taille des particules) peuvent être appliquées aux fractions préalablement séparées, pour augmenter leur pureté.

- Le procédé objet de la présente invention permet de concentrer les lignines, les minéraux et les polysaccharides sans solvant, sans réactif chimique et sans recyclage et traitement des déchets. Ce procédé permet ainsi de valoriser très efficacement ces différentes fractions en biomolécules et matériaux bio-sourcés.

30 Un produit biosourcé est un produit non alimentaire, partiellement ou totalement issu de la biomasse. Les produits biosourcés incluent les produits à haute valeur tels que ceux issus de la chimie fine (pharmaceutiques, parfums, additifs alimentaires, etc ...), ainsi que les produits de spécialité (lubrifiants, détergents, etc ...), ou encore les produits de commodité (polymères, intermédiaires chimiques, etc ...). Le concept exclut les produits biosourcés traditionnels, tels que ceux qui proviennent de la pulpe et du papier, du bois et de la biomasse, utilisés comme source d'énergie.

On parle de produit biosourcé pour une large gamme d'applications, et de matériau biosourcé plus spécifiquement dans le domaine de l'écoconstruction.

Par « poudre ultrafine », on entend ici un ensemble de particules dont le diamètre médian (d50) est inférieur à 200 µm (50% du volume total des particules correspondent au volume des particules de diamètres inférieur au d50). L'homogénéité de la composition des particules issues du broyage de végétaux augmente quand leur taille diminue. Ainsi, certaines particules ultrafines présentent une teneur en lignines, cellulose et/ou

hémicelluloses élevée. On note que ces lignines, celluloses et hémicelluloses sont présentes dans les parois des végétaux.

- 5 La combinaison des étapes de broyage ultrafin (particules de d_{50} inférieur à 200 μm) des lignocelluloses (bois et coproduits de la filière, coproduits agricoles et agro-alimentaires, plantes dédiées, déchets municipaux et industriels) et de tri en milieu sec strict (tri électrostatique, tri dimensionnel, tri aérodynamique), permet d'isoler des fractions enrichies en cellulose, en hémicelluloses, en lignines et/ou en minéraux, sans modification chimique, contrairement aux procédés de fractionnement chimiques développés jusqu'à présent.

Dans des modes de réalisation, l'étape de tri des particules ultrafines comporte:

- 10 Une étape de charge tribo-électrostatique de particules ultrafines et au moins une étape de déviation de trajectoire dans le champ électrique des particules chargées pour trier les particules.

Nous avons déterminé que ce type de tri est particulièrement efficace. Dans des modes de réalisation, le procédé objet de la présente invention comporte, en outre, une étape de raclage d'électrode d'un moyen de tri électrostatique mis en œuvre au cours de l'étape de déviation, pour collecter les particules fixées sur une électrode après l'étape de déviation de particules. Ces modes de réalisation permettent de collecter les particules fixées sur l'électrode, dont la charge électrique est forte, ce qui signifie que leur constitution est particulièrement homogène.

- 15 Dans des modes de réalisation, le procédé objet de la présente invention comporte, en outre, une étape d'inversion cyclique de la polarité de chaque électrode d'un moyen de tri électrostatique mis en œuvre au cours de l'étape de déviation. Ces modes de réalisation permettent de décoller et collecter les particules fixées aux électrodes, dont les constitutions sont particulièrement homogènes et de collecter les particules fixées sur chaque électrode sans action mécanique telle que le raclage.

Dans des modes de réalisation, le procédé objet de la présente invention comporte, en aval de l'étape de déviation, au moins une étape de déviation secondaire. La séparation des composants résultant de la pluralité de tris successifs réalisés par le procédé est alors plus précise.

- 20 Dans des modes de réalisation, les particules les moins chargées obtenues après une première étape de déviation, sont recyclées dans le séparateur tribo-électrique. L'avantage de ces modes de réalisation est qu'ils permettent aux particules dont la charge électrique est indéterminée après deux tris électrostatiques de suivre une nouvelle mise en œuvre du procédé objet de la présente invention.

Dans des modes de réalisation, le procédé objet de la présente invention comporte, en aval d'au moins une étape de déviation, une étape de comparaison des dimensions de particules en regard d'une valeur limite prédéterminée et une étape d'alimentation d'un moyen de broyage en particules dont les dimensions sont supérieures à la limite prédéterminée.

- 25 Grâce à ces dispositions, les particules trop grandes pour être triées efficacement sont broyées de nouveau de manière à optimiser leur tri. En revanche, les particules dont les dimensions sont nominales peuvent être triées de nouveau sans subir de broyage supplémentaire. Dans des modes de réalisation, au cours de l'étape de charge, on met en œuvre un lit d'air fluidisé dynamique. La mise en œuvre d'un lit d'air fluidisé permet, à la fois la formation des charges électrostatiques sur les particules en mouvement et leur séparation en vue de leur tri.

Dans des modes de réalisation, au cours de l'étape de fragmentation de la biomasse, on met en œuvre un broyage de la biomasse.

- 30 Dans des modes de réalisation, au cours de l'étape de fragmentation de la biomasse, on met en œuvre un broyeur vibrant ou à boulets rotatifs.

Dans des modes de réalisation, le procédé objet de la présente invention comporte, en amont ou au cours de l'étape de fragmentation de la biomasse, une étape de prétraitement de la biomasse. Ce prétraitement permet de favoriser la déconstruction de la biomasse lors du broyage.

Dans des modes de réalisation, au cours de l'étape de prétraitement, on effectue un traitement chimique de la biomasse par contact avec un gaz ou un aérosol oxydant. Par exemple, un gaz oxydant comportant de l'oxygène ou de l'ozone peut être utilisé. Les oxydants sont connus pour provoquer la dégradation des constituants phénoliques de la paroi végétale et favoriser ainsi la rupture sous contrainte mécanique.

- Les parties amylacées dont l'amidon est hydrolysé en glucose, sucre fermentescible : *procédé de fragmentation et broyage du fruit vert de banane sec en farine.*
- Les parties lignocellulosiques dont la cellulose peut être dégradée en sucres fermentescibles : *procédé de fragmentation des faux troncs feuilles et rejets de bananier en poudre sèche ou pâte humide.*

2) Deuxième grand niveau de procédé avec le BANANIER déjà fragmenté

En biomasse de bananier utilisable directement au traitement pour obtenir les énergies renouvelables dans cette invention à trois grands procédés de traitement de cette biomasse qui se présente comme il suit :

- ❖ Le procédé de traitement par voie biochimique
- ❖ Le procédé de traitement par voie thermochimique
- ❖ Le procédé de traitement par voie biologique

AVANT TOUT:

Nous commençons par les divers procédés de fragmentation du bananier (A humide et B sèche) c'est à dire la tige et les feuilles d'une part et le fruit de l'autre part en biomasse du bananier comme premier aspect de cette invention.

A- Utilisation humide ou fraîche du bananier objet de cette invention

Procédé A1 : fragmentation de bananier humide (faux tronc, feuille rame et rejets) par moulinage à marteau afin d'aboutir à la biomasse lignocellulose fraîche de bananier en pâte.

Procédé A2 : fragmentation de banane fraîche (fruits humide) par moulinage à marteau afin d'obtenir une pâte amidonnée de biomasse de bananier.

Procédé A3 : fragmentation de banane fraîche (fruits humide) par moulinage à marteau afin d'obtenir les cossettes de biomasse de bananier humide.

B- Utilisation sèche ou sec du bananier objet de cette invention :

Procédé B1 : fragmentation de bananier séché (faux tronc, feuille hampe et rejets secs) par moulinage à meule afin d'aboutir à la biomasse lignocellulose sec de bananier en poudre.

Procédé B2 : fragmentation de banane sec (fruits séchés) par moulinage à meule afin d'obtenir une farine amidonnée de biomasse de bananier.

Procédé B3 : fragmentation des cossettes de banane sec (fruits et peaux sec) par moulinage à meule afin d'obtenir une farine de cossettes de biomasse de bananier sec.

- Le procédé de fractionnement par voie sèche ou humide de biomasse lignocellulosique comportant au moins 50 %, en masse, de lignines, cellulose et hémicelluloses, comportant : (i) une étape de fragmentation du bananier pour obtenir une pâte grossièrement broyé (ii) une étape de fragmentation du bananier par voie sèche pour obtenir une poudre ultrafine.

L'invention concerne un procédé de fragmentation du bananier humide ou sèche et de traitement de cette biomasse lignocellulosique de bananier fractionnée en pâte, poudre, farine et pellet, incluant la gazéification d'un résidu ligneux en poudre. Le résidu ligneux provient d'un procédé de traitement biochimique de la biomasse lignocellulosique de bananier qui comporte une étape de prétraitement en voie humide, par chauffage en conditions acides et/ou d'auto-hydrolyse pour produire un substrat de bananier pré-traité. Ledit substrat de bananier, éventuellement séparé d'une fraction liquide, est soumis à une hydrolyse enzymatique et est éventuellement soumis à une fermentation séparée ou concomitante à l'hydrolyse, ladite fermentation étant suivie d'une distillation. Le résidu ligneux de bananier est séparé en aval de l'hydrolyse. Il est séché et conditionné pour obtenir le résidu ligneux en poudre dont la granulométrie est comprise entre 15 et 900 μm , la teneur en eau inférieure à 12% pds, une densité de grain d'entre 500 et 900 kg/m^3 et une vitesse minimale de fluidisation est supérieure à zéro et inférieure à 0,15m/s, La poudre, seule ou en mélange, est introduite dans un gaz de fluidisation à une vitesse supérieure ou égale à la vitesse minimale de fluidisation. L'invention est particulièrement adaptée pour la production des biocarburants à partir de gaz de synthèse, et en générale dans un procédé de fragmentation de bananier pour plusieurs procédés de production des énergies renouvelables à base de bananier.

Les exemples de réalisation de semoules de biomasse selon l'invention sont indiqués ci-après.

- 5 Les caractéristiques de la poudre de bananier séchée, à partir de laquelle ces exemples de semoule sont obtenus par granulation humide, sont indiquées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1

10	Diamètres (microns)	d10	14,6
		d50	37,7
		d95	104,1
	Etalement de la distribution granulométrique	$(d90-d10)/d50$	2
15	Autres caractéristiques	Densité aérée (Kg/m ³)	206
		Angle d'avalanche θ (°)	72
		Cohésion à 3 kPa (KPa)	0,99

Les caractéristiques de cette poudre de bananier sèche en font une poudre qui s'écoule difficilement par rapport à des poudres non-cohésives comme la semoule et le sucre en poudre, dont les cohésions à 3kPa sont d'environ 0,01 et 0,05 kPa respectivement, et leur angle d'avalanche autour de 40°C.

- 20 Un certain nombre d'études est consacré au broyage fin de particules de biomasse de bananier, notamment de plaquettes, pour atteindre des granulométries du millimètre au micron selon les cas. Dans ces études, les effets de la nature de la biomasse de bananier, du type de broyeur(s) utilisé(s), de la granulométrie désirée ont été caractérisés sur le coût énergétique de l'opération proprement dite de broyage fin, et/ou les propriétés de la poudre obtenue (distribution granulométrique, forme des particules).

La présente description est donnée à titre non limitatif. On note, dès à présent, que les figures ne sont pas à l'échelle.

- 25 On appelle « ultrafine » une pâte, farine, ou une poudre dont les particules ont un diamètre médian inférieur à 200 micromètres, préférentiellement compris entre 10 micromètres et 200 micromètres.

Selon une autre définition, on appelle « ultrafine » une poudre dont la moitié (50 %) en volume, des particules a une dimension inférieure à 200 micromètres ($d50 < 200\mu\text{m}$), préférentiellement inférieur à 100 micromètres, plus préférentiellement inférieur à 50 micromètres. Pour mesurer les particules, un granulomètre laser peut être mis en œuvre.

En référence à la figure I/XV, le dispositif conforme à l'invention comprend, le circuit de la collecte du faux tronc à la fragmentation en poudre ou à la pâte de la biomasse de bananier.

- 30 - Tel que représenté sur les figures, le dispositif comprend un élément(1) qui est essentiel le bananier c'est-à-dire (la tige, les feuilles et les fruits) à l'état humide ou sèche. (Figure I/XV)
 - Dans le mode de fonctionnement de la figure IV/XV, l'élément (figure II/XV) présente la chaîne complète de fragmentation du bananier afin de rendre sa biomasse utile pour la fabrication des énergies renouvelables et d'autres produits comme les engrais bio et la pâte à papier pour carton et chemises cartonnées.
 - Le bananier récoltée est d'abord fragmenté, déchetée en copeaux ou pellet et broyée en pâte humide ou en poudre sèche afin d'aboutir à la fabrication des différentes biomasses utiles en fonction de nos divers procédés de transformation en énergies renouvelables tel que :

Les biocarburants, la bioélectricité et la pâte à papier.

La raffinerie sèche du végétal a pour but de rendre la biomasse, et la biomasse lignocellulosique en particulier, plus adaptée un usage final donné. Ce type de procédés a la particularité de ne pas générer d'effluents polluants, au contraire de la raffinerie en voie liquide.

5 Les particules ultrafines issues du broyage ont l'avantage de présenter une composition chimique très homogène. Le moyen 110 de charge tribo-électrostatique permet aux particules de se charger ou de se décharger en électrons en fonction de leur composant chimique principal. Le moyen 120 de tri électrostatique principal sépare ainsi les particules dont les composants principaux sont différents. Le dispositif 100 sépare ainsi les fractions enrichies en différents composants.

On observe, sur la figure IV/XV, un deuxième mode de réalisation particulier du dispositif 200 objet de la présente invention. Ce dispositif comporte :

- Un moyen 240 de broyage de la biomasse en poudre de particules ultrafines comportant :
 - un moyen 245 de configuration de la finesse de broyage réalisé par le moyen 240 de broyage et
 - un moyen 275 de configuration de la température du moyen 240 de broyage;
- une entrée 205 de particules ultrafines issues d'un broyage,
- un moyen 210 de charge tribo-électrostatique des particules reçues,
- un moyen 220 de tri électrostatique principal des particules transmises qui comportant :
 - deux électrodes 225 ;
 - un moyen 280 de raclage d'électrode du moyen 220 de tri électrostatique principal et
 - un moyen 285 d'inversion de la polarité d'une électrode 225 du moyen 220 de tri électrostatique principal ;
- deux moyens 250 secondaires de tri électrostatique comportant chacun deux électrodes 255 et deux moyens 270 de comparaison des dimensions de particules en regard d'une valeur limite prédéterminée.

20 Le moyen 240 de broyage de la biomasse en poudre de particules ultrafines est, par exemple, un broyeur centrifuge configuré pour broyer la biomasse en particules ultrafine. Ce moyen 240 de broyage comporte un moyen 245 de configuration de la finesse du broyage réalisé par le moyen 240 de broyage. Ce moyen 245 de configuration de la finesse du broyage est, par exemple, un écran tactile sur lequel un programme informatique fait apparaître la finesse de broyage actuelle, une zone interactive permettant à un utilisateur d'augmenter la finesse de broyage et une zone interactive permettant à l'utilisateur de réduire la finesse de broyage. En fonction de la finesse de broyage configurée, le moyen 240 de broyage est configuré pour broyer la biomasse en poudre de particules dont le diamètre a été défini par le moyen 245 de configuration. Ce moyen 240 de broyage comporte également un moyen 275 de configuration de la température du moyen 240 de broyage. Ce moyen 275 de configuration de la température est, par exemple, un écran tactile sur lequel un programme informatique fait apparaître la température du moyen 240 de broyage actuelle, une zone interactive permettant à un utilisateur d'augmenter ladite température et une zone interactive permettant à l'utilisateur de réduire ladite température.

30 L'entrée 205 de particules ultrafines issues d'un broyage est, par exemple, un conduit connectant le moyen 240 de broyage et le moyen 210 de charge tribo-électrostatique des particules reçues. Le moyen 210 de charge tribo-électrostatique des particules reçues est, par exemple, une surface intérieure d'un conduit dont au moins une partie est en verre, téflon, PVC ou acier. Les particules parcourant le conduit se chargent au contact du moyen 210 de charge. En particulier, la cellulose se charge de charges positives. Les particules se déplacent dans le moyen 210 de charge grâce à la mise en œuvre d'un lit d'air fluidisé dynamique mis en mouvement par une turbine, par exemple. Le moyen 220 de tri électrostatique principal des particules transmises est, par exemple, un conduit cylindrique sur la surface intérieure duquel sont placées deux électrodes 225 diamétralement opposées. L'une de ces électrodes 225 est positivement polarisée, et l'autre électrode 225 est négativement polarisée. A proximité de chacune de ces électrodes 225 et en aval du moyen 220 de tri sont positionnés deux conduits configurés pour permettre le passage des particules étant attirées par l'une ou l'autre des électrodes 225. Les particules chargées négativement par le moyen 210 de charge sont attirées par l'électrode 225 chargée positivement. Les particules chargées positivement par le moyen 210 de charge sont attirées par l'électrode 225 chargée négativement.

Ce moyen 220 de tri électrostatique principal comporte, de plus, un moyen 280 de raclage d'électrode du moyen 220 de tri électrostatique principal. Ce moyen 280 de raclage est, par exemple une forme en plastique souple configuré pour épouser les formes de l'électrode 225 sur lequel la forme est placée. Cette forme est mise en mouvement par un moteur mécanique lorsque le dispositif est mis à l'arrêt.

Ce moyen 280 de raclage est configuré pour collecter les particules ainsi raclées. Les particules raclées ont la particularité de comporter un grand nombre de fractions attirées par l'électrode 225, au point que ces particules se soient fixées à l'électrode 225. Par exemple, dans le cas d'une électrode 225 chargée négativement, les particules collectées par le moyen 280 de raclage comportent majoritairement des fractions comportant de la cellulose. Ce moyen 220 de tri électrostatique principal comporte, de plus, un moyen 285 d'inversion de la polarité d'une électrode 225 du moyen 220 de tri électrostatique principal. Ce moyen d'inversion de la polarité est par exemple un circuit électronique, mise en œuvre un dixième de seconde toutes les minutes, configuré pour inverser la polarité de l'électrode 225. L'inversion de polarité permet de décoller et collecter les particules fixées sur ladite électrode 225.

Dans des variantes, le moyen 220 de tri électrostatique principal comporte un moyen 280 de raclage et un moyen 285 d'inversion de la polarité pour chaque électrode 225 du moyen 220 de tri. A l'issue de chacun des conduits du moyen 220 de tri électrostatique principal, un moyen 250 secondaire de tri électrostatique est positionné. Chacun de ces moyens 250 secondaires de tri électrostatique comporte une électrode positivement ou négativement polarisée. L'électrode du moyen 250 secondaire de tri est polarisée de manière similaire à l'électrode à proximité du conduit auquel est fixé ledit moyen 250 secondaire de tri.

Dans des variantes, l'électrode du moyen 250 secondaire de tri est polarisée de manière inverse à l'électrode à proximité du conduit auquel est fixé ledit moyen 250 secondaire de tri.

Dans des variantes, au moins un moyen 250 secondaire de tri électrostatique comporte deux électrodes polarisées de manière opposées situées de part et d'autre dudit moyen 250 secondaire de tri. De cette manière, les particules comportant une majorité de fractions comportant de la ligna-cellulose sont attirées par l'une des électrodes. Chaque moyen 250 secondaire de tri électrostatique permet ainsi de trier d'une part les particules comportant une majorité de cellulose et d'autre part une majorité de lignine-hémicelluloses et minéraux. En sortie de chaque moyen 250 secondaire de tri sont positionnés deux conduits. Un premier conduit correspond à un résultat de tri similaire, dit « convergent », par le premier moyen 220 de tri et le moyen 250 secondaire de tri à la sortie duquel ce conduit est positionné. Par exemple, une particule comportant une proportion importante de cellulose est chargée positivement, puis attirée par l'électrode chargée négativement dans le moyen 220 de tri, puis finalement attirée par l'électrode chargée négativement dans le moyen 250 secondaire de tri. Dans le cas où le résultat du tri d'une particule par le moyen 220 de tri et le moyen 250 secondaire de tri est différent, on dit que le résultat du tri « diverge ». Dans le cas où le résultat du tri par le moyen 220 de tri et le moyen 250 secondaire de tri diverge, la particule entre dans le deuxième conduit en sortie dudit moyen 250 secondaire de tri.

Dans des variantes, au moins un moyen 250 secondaire de tri comporte au moins un moyen 280 de raclage et/ou un moyen 285 d'inversion de polarité similaires à ceux configurés pour le moyen 220 de tri électrostatique principal. Chaque conduit configuré pour recevoir les particules dont le résultat du tri par le moyen 220 de tri et le moyen 250 secondaire de tri diverge comporte un moyen 270 de comparaison des dimensions de particules en regard d'une valeur limite prédéterminée. Ce moyen 270 de comparaison est, par exemple, un trieur de type cyclone. Dans des variantes, ce moyen 270 de comparaison est un filtre configuré pour retenir les particules dont les dimensions sont supérieures à la valeur limite prédéterminée. Les particules dont les dimensions sont supérieures à la valeur limite prédéterminée sont transmises au moyen 240 de broyage pour être broyées de nouveau. Les particules dont les dimensions sont inférieures à la valeur limite prédéterminée sont transmises de nouveau au moyen 210 de charge afin d'être triées.

Les particules ultrafines issues du broyage ont l'avantage de présenter une composition chimique très homogène. Le moyen 210 de charge tribo-électrostatique permet aux particules de se charger ou de se décharger en électrons en fonction de leur composant principal. Le moyen 220 de tri électrostatique principal sépare ainsi les particules dont les composants principaux sont différents.

Le dispositif 200 sépare ainsi les fractions de la biomasse enrichies en différents composants, ces composants ayant des propriétés et des applications industrielles différentes. De plus, la séparation des composants résultant de la pluralité de tris successifs réalisés par le moyen 220 de tri principal et les deux moyens 250 secondaires de tri dispositif 200 est alors plus précise que si le dispositif 200 comportait un seul moyen 220 de tri électrostatique principal, comme dans le dispositif 100 illustré en figure 5. Ce dispositif 200 concentre le moyen 240 de broyage, le moyen 205 de réception, le moyen 210 de charge et chaque moyen 220, 250 de tri. Ainsi, le dispositif 200 est plus compact. De plus, la poudre n'a pas le temps de s'agréger, de se charger en humidité, de s'oxyder ou, plus généralement, de changer d'état, entre le broyage et le tri. Le

fonctionnement du dispositif en est amélioré. Le diamètre moyen des particules en sortie du moyen 240 de broyage du dispositif 200 permet d'obtenir des particules qui ont une composition chimique homogène et une fois chargées, demeurent mobiles en fonction de leur charge en présence des électrodes. Grâce au moyen 270 de comparaison du dispositif 200, les particules trop grandes pour être triées efficacement sont broyées de nouveau de manière à optimiser le tri de ces particules. En revanche, les particules dont les dimensions sont nominales peuvent être retriées sans nouveau broyage. Le moyen 275 de configuration de la température du moyen 240 de broyage configuré pour que la biomasse atteigne une température à laquelle au moins un composant de la biomasse devient cassant permet au moyen 240 de broyage de broyer plus facilement la biomasse en particules ultrafines. La mise en œuvre d'un lit d'air fluidisé permet, à la fois la constitution des charges électrostatiques sur les particules en mouvement et leur séparation en vue de leur tri. Le moyen 280 de raclage d'électrode 225 du moyen 220 de tri électrostatique principal permet de collecter les particules fixées sur l'électrode 225), dont la charge électrique est forte, ce qui signifie que leur constitution est particulièrement homogène.

Le moyen 285 d'inversion cyclique de la polarité de chaque électrode 225 du moyen 220 de tri électrostatique principal permet de décoller les particules fixées aux électrodes 225), dont les constitutions sont particulièrement homogènes et de collecter les particules fixées sur chaque électrode sans action mécanique telle que le raclage.

On observe, en figure VII/XV, deux unités de séparation cycloniques 305 et 310 reliées au même unique moyen d'aspiration 315. On rappelle qu'une unité de séparation cyclonique est une unité technologique imposant une rotation rapide à un gaz afin d'en séparer, par centrifugation, les fines particules solides qui y sont mélangées. Les entrées des unités de séparation cycloniques 305 et 310 constituent respectivement les contenants 130 ou 230, d'une part, et 135 ou 235, d'autre part. Lorsqu'un seul étage est mis en œuvre, F1 A- représente la fraction obtenue sur l'électrode chargée négativement lorsqu'un seul étage est mis en œuvre, F2B+ représente la fraction obtenue sur l'électrode chargée positivement lorsque, en entrée d'un deuxième étage, l'échantillon est la fraction F1 B+, F2A- représente la fraction obtenue sur l'électrode chargée négativement lorsque, en entrée d'un deuxième étage, l'échantillon est la fraction F1 A- et la terminaison du nom de la fraction en « e » signifie que la fraction a été obtenue par raclage de l'électrode.

Exemple 1 : Application du procédé objet de la présente invention à la feuille de bananier.

En ce qui concerne le mode de préparation, un échantillon de feuille brute a subi les opérations de raffinerie suivantes:

- imprégnation (sans traitement),
- pas d'opération de séchage et
- broyage.

La feuille de bananier a été broyée sans traitement préalable avec un taux d'humidité inférieur à 20% (en masse). Le broyeur utilisé est un broyeur à impact pour des tailles de particules inférieure 200 µm. Les substrats sont préalablement broyés au broyeur à couteaux puis au broyeur centrifuge.

Les différents broyats ou poudres obtenus ont été séparés par tri électrostatique dans les conditions suivantes :

- l'alimentation est de 0,5 à 1 kg/h et
- le voltage est de 5 à 20 Kv.

Les différentes fractions obtenues sont caractérisées, et un exemple de caractérisation est présenté dans la Tableau 2 (le tri tribo-électrostatique est effectué avec des électrodes présentant une différence de potentiel de 15 kVolts, à une distance, entre elles, de 3 cm. et mesurant 30 cm de hauteur pour 10 cm. de largeur).

Tableau 2 : Exemple de la feuille de bananier - Composition des fractions, en poids.

	Fractions	taux récupéré	cendre	lignine	hémicelluloses	cellulose
FO		81,9	4,43	20,5	28,3	44,2
F1A-	25	81,2	5,14	22,4	32,5	41,8
F1B+	46	52,2	3,67	18,1	22,6	54,7
F1A-e	4	42,2	15,2	16,6	30,1	37,3

F1B+e	5	44,8	2,94	16,6	22,4	57,8
-------	---	------	------	------	------	------

- 5 Le taux récupéré (deuxième colonne) est donné en pourcentage de masse.
- On observe que la combinaison des opérations de broyage de la feuille de bananier et de tri électrostatique en milieu sec strict, a permis d'isoler:
- d'une part, des fractions enrichies en cellulose (jusqu'à 57,8 % comparé à 44,2 % dans la feuille brute de bananier) et appauvries en hémicelluloses (jusqu'à 22,4 %, comparé à 28,3 % dans la feuille brute) et -d'autre part, des fractions enrichies en lignine (jusqu'à 22,4 %, comparé à 20,5 % dans la feuille brute), hémicelluloses (jusqu'à 32,5 %, comparé à 28,3 % dans la feuille brute) ou des complexes lignine-hémicelluloses.
- 10 Sur les électrodes, on a obtenu également des fractions très riches en minéraux (jusqu'à 15,2 % pour la fraction -, comparé à 4,4 % dans la feuille de bananier brute), sans modifications chimiques.
- On observe, au vu de ce tableau 2 que les fractions F1 B+ et F1 B+e contiennent plus de cellulose, en comparaison avec les autres fractions. Cette cellulose peut être utilisée comme source de bioénergie après hydrolyse en glucose et fermentation (bioéthanol et biogaz). En revanche, les fractions F1 A- et F1 A-e sont enrichies en lignine-hémicelluloses, qui peuvent être destinées à la synthèse de matériaux bio-sourcés. Ainsi, on a amélioré la bioaccessibilité et la transformation de la cellulose en glucose (avec un taux doublé comparé à la paille brute), sans avoir recours à des prétraitements chimiques. On a concentré des fractions enrichies en
- 15 complexes de lignine-hémicelluloses et en minéraux qui peuvent être destinés à la synthèse des matériaux bio-sourcés.
- La figure VI/XV illustre la transformation par hydrolyse enzymatique des fractions de paille de blé, comme décrit dans la publication *Barakat et al, « Eco-friendly drychemo-mechanical pretratments of lignocellulosic biomass : impact on energy and yield of the enzymatic hydrolysis » Applied Energy 2014, 113 (2014) 97-105*, incorporée ici par référence qui détaille les méthodes utilisées ici pour analyser les sucres, la lignine et la purification enzymatique.
- 20 Les barres verticales blanches représentent, en mg/g, le glucose (cellulose). Les barres verticales noires représentent, en mg/g, le xylose (hémicelluloses). Cette figure VI/XV met en évidence l'enrichissement en cellulose hydrolysable dans les fractions « + ». Le glucose résultant de l'hydrolyse enzymatique de la cellulose peut être utilisé comme source de fermentation pour la production de bioéthanol ou d'autres molécules à destination de la chimie verte, en fonction des microorganismes fermentaires utilisés.

Exemple 2 : rejeton de banane

- Dans le cas de rejeton, un échantillon de biomasse brute a subi les opérations suivantes:
- 25 - broyage à couteaux,
- broyage à palette,
- séchage jusqu'à une teneur en eau inférieure à 10 %,
- broyage à boulets rotatifs et une fraction enrichie en minéraux et notamment en silice et une fraction enrichie en lignine et cellulose et appauvrie en minéraux.

Exemple 3 : feuille de bananier

- 30 Les figures VIII/XV et IX/XV représentent, respectivement, les teneurs en cellulose et en lignine de différentes fractions obtenues par la mise en œuvre du procédé objet de la présente invention sur une biomasse constituée de bananier. On observe que ce procédé permet d'obtenir, d'une part, des fractions enrichies en cellulose (F1 B+ et F2B+) et d'autre part, des fractions enrichies en lignine (F1 A- et F2A-).

Exemple 4 : rejeton de bananier

L'étape de broyage ayant le coût énergétique le plus important est la dernière amenant la granulométrie dans la gamme de l'ultrafin (de la centaine à la dizaine de micromètres). C'est donc sur celle-ci que les efforts visant à réduire l'énergie de broyage sont à fournir. L'exemple suivant est donné sur la paille de blé, avec un broyeur à boulets tournant de laboratoire. La température à l'intérieur de la jarre de broyage (broyeur à boulets Marne 0 de Faure instruments) peut atteindre 40°C lorsque le broyage est exécuté à température ambiante, ce qui a un effet sur l'élasticité/rigidité des fibres de paille. Pour limiter cet effet de perte de rigidité, le broyeur à

boulets a été utilisé en chambre froide à 5°C (l'intérieur du broyeur monte alors à 20°C en fonctionnement stabilisé).

5 La Figure 10 montre l'évolution de la durée de broyage en fonction de la température :

- la durée totale de broyage pour rejoindre un d50 de 20 µm est de 120 heures à 40°C (courbe du haut) contre 70 heures à 20°C (courbe du bas).

10 La fragmentabilité de la biomasse est améliorée par l'utilisation de basses température : il est nécessaire de contrôler la température de broyage afin de la maintenir les végétaux dans leur plage de rigidité, soit sous les 40 °C pour les matériaux considérés. Des températures fortement négatives n'apportent pas de réel avantage (coût important, re-agglomération et reprise d'humidité par condensation lors du retour à la température ambiante).

Exemple 5 : feuille de bananier

Pour observer un effet de l'atmosphère de broyage sur la broyabilité et/ou sur la réactivité de la paille de blé, des tests ont été menés en atmosphère oxydante (air) et neutre (argon) dans un broyeur à boulets Faure modèle Marne O muni d'une jarre céramique de 8 Litres. La présence d'argon lors du broyage n'affecte pas la fragmentabilité de la paille de blé. La durée nécessaire à l'obtention d'une poudre à 20 microns est la même. En revanche, la réactivité, par exemple la capacité à libérer de l'énergie thermique, est modifiée.

15 Exemple 6 : feuille de bananier

20 On décrit, ci-dessous, une combinaison d'une séparation électrostatique et d'un prétraitement chimique et d'un traitement enzymatique postérieur à la séparation. Comme illustré en figure 11, au cours d'une étape 605, la paille de blé est broyée, par exemple à l'aide d'un broyeur à couteaux avec une grille de deux mm. Puis, la paille broyée est imprégnée par de la soude au cours d'une étape 610. Par exemple cette étape 610 est réalisée selon la méthode décrite par Barakat et al. 2014, dans la publication référencée ci-dessus. Après un séchage à 40°C jusqu'à ce que le taux d'humidité atteigne une valeur entre 7 % et 10%, la biomasse est broyée de nouveau avec un broyeur impact (UPZ, déjà décrit en détail en regard des figures 1 à 9), au cours d'une étape 615. Le broyat est ensuite fractionné par séparation électrostatique selon la même méthode et dans les conditions décrites en regard des figures 1 à 9, au cours d'une étape 620.

25 Au cours d'une étape 625, au moins une des fractions enrichies ainsi obtenues est fonctionnalisée par traitement par des enzymes (Barakat et al. 2014). Les résultats obtenus sont présentés en figure 12. L'ordonnée y représente le taux de sucres réducteurs (glucose), en milligrammes par gramme. A gauche, on représente la paille non séparée. Au centre, sont représentées les fractions positives F1 B+ après un passage dans le séparateur. A droite, sont représentées les fractions positives F2B+ après deux passages dans le séparateur. Les rectangles pleins noirs représentent les résultats obtenus en l'absence d'imprégnation à la soude. Les rectangles hachurés représentent les résultats obtenus avec une étape d'imprégnation à la soude.

En général, le couplage des procédés traitement chimique, broyage et séparation électrostatique a un effet très significatif sur l'accessibilité de la cellulose par les enzymes (cellulases) et la production du glucose (précurseur pour produire l'éthanol) qui atteint un rendement de 95% pour les fractions chargées positivement.

En référence à la figure I/XV, le dispositif conforme à l'invention comprend, le circuit de la collecte du faux tronc à la fragmentation en poudre ou à la pâte de la biomasse de bananier.

30 Tel que représenté sur les figures, le dispositif comprend un élément qui est essentiel le bananier c'est-à-dire (la tige, les feuilles et les fruits) à l'état humide ou sèche.

Dans le mode de fonctionnement l'une des figures, l'élément présente la chaîne complète de fragmentation du bananier afin de rendre sa biomasse utile pour la fabrication des énergies renouvelables et d'autres produits comme les engrais bio et la pâte à papier pour carton et chemises cartonnées.

Le bananier récoltée est d'abord fragmenté, déchiquetée en copeaux ou pellet et broyée en pâte humide ou en poudre sèche afin d'aboutir à la fabrication des différentes biomasses utiles en fonction de nos divers procédés de transformation en énergies renouvelables tel que : les biocarburants, la bioélectricité, engrais biologique et la pâte à papier.

quantité sous diverses formes : faux tronc, feuilles, bulbes et fruits de banane et banane plantain etc. L'un de ses principaux intérêts est qu'elle n'entre pas en concurrence avec les usages alimentaires et que le gisement potentiel est beaucoup plus important.

Trois voies sont principalement développer dans cette invention :

- 1- la conversion par voie biochimique
- 2- la conversion par voie thermochimique.
- 3- Et biologiquement par fermentation alcoolique

Procédé d'énergie renouvelable C1 : procédé de transformation biochimique de la biomasse de bananier fraîche ou humide segmenté, pour traitement en bioéthanol de 2^{ème} génération.

10 **PROCEDE DE TRAITEMENT PAR VOIE BIOCHIMIQUE :**

La conversion biochimique permet de transformer la biomasse de bananier en éthanol, voire en d'autres alcools. Les travaux de recherche du Pasteur Abanda Ndouma Jules, en ce qui concerne les Energies nouvelles au Cameroun se concentrent sur les étapes liées aux procédés spécifiques de 1^{ère} et de 2^{ème} génération :

- a) **1^{ère} étape** : prétraitement pour libérer les sucres complexes,
- b) **2^{ème} étape** : hydrolyse enzymatique pour transformer les sucres complexes en sucres simples facilement fermentescibles.

Les procédés de production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique intègrent plusieurs considérations de base:

- la lignine ne peut être fermentée en éthanol,
- la matrice lignocellulosique doit être prétraitée pour rendre cellulose et hémicelluloses hydrolysables,
- les fractions cellulosiques et hémicellulosiques sont des sources potentielles de sucres fermentescibles.

Procédé de fabrication de l'éthanol cellulosique de bananier à 6 étapes :

Le processus de fabrication d'éthanol à partir de cellulose est beaucoup plus complexe que celui réalisé à partir d'amidon ou de sucrose. La cellulose doit d'abord être décomposée en molécules fermentescibles. Or, les longues chaînes de molécules de glucose qui composent la cellulose sont encapsulées par de la lignine, une matière très résistante et difficilement désagrégeable.

Plusieurs procédés ont été développés pour produire l'éthanol cellulosique :

L'hydrolyse acide, l'hydrolyse enzymatique et le procédé thermochimique (gazéification). Bien que ces procédés dits de « deuxième génération » soient tous techniquement réalisables, à ce jour, le procédé d'hydrolyse enzymatique est le seul procédé utilisé à l'échelle industrielle au Canada qui utilise comme matière première de la biomasse d'origine agricole.

Les étapes du procédé d'hydrolyse enzymatique sont similaires à celles du procédé de fabrication de l'éthanol de grains. Toutefois, les techniques et les microorganismes impliqués sont fort différents.

Les principales étapes de la production d'éthanol cellulosique par voie d'hydrolyse enzymatique sont les suivantes :

1. Prétraitement

La matière première (fibres) est tout d'abord prétraitée par un procédé de défibrage à explosion de vapeur. Cette étape permet d'accroître la surface spécifique afin d'augmenter l'accessibilité des fibres aux enzymes utilisées dans les étapes suivantes du procédé. L'efficacité de ce prétraitement est primordiale pour limiter la durée de l'étape d'hydrolyse et donc, les coûts de l'ensemble du procédé.

2. Hydrolyse enzymatique

L'hydrolyse de la cellulose est réalisée à partir des cellulases, un ensemble d'enzymes qui, mises en contact avec la matière première, la décomposent afin de produire des unités de sucres élémentaires. En milieu naturel, les cellulases sont produites par les bactéries symbiotiques présentes dans l'estomac des ruminants et des termites. Ce sont d'ailleurs ces enzymes qui permettent aux ruminants d'utiliser une grande partie de l'énergie contenue dans les plantes. Les cellulases utilisées dans le processus d'hydrolyse de la cellulose doivent rencontrer des critères spécifiques de façon à optimiser le taux de conversion de la cellulose en sucres élémentaires. À l'heure actuelle, cette étape est la plus dispendieuse puisque plusieurs jours sont nécessaires

pour compléter cette décomposition. Plusieurs recherches sont actuellement en cours afin d'augmenter l'efficacité de ces enzymes. L'hydrolyse de la cellulose nécessite jusqu'à 100 fois plus d'enzymes que celle de l'amidon.

3. Séparation

Après l'hydrolyse enzymatique, la lignine, demeurée intacte, est séparée de la liqueur puis déshydratée. Elle peut être valorisée directement pour produire de l'énergie thermique ou de l'énergie électrique, de la litière, des absorbants, etc.

4. Fermentation

La liqueur obtenue après la séparation contient les sucres issus de l'hydrolyse enzymatique. Ces sucres sont fermentés par des microorganismes. À cette étape, la recherche de bactéries en remplacement des levures permettrait d'accélérer le procédé et d'améliorer le rendement de la biomasse.

5. Distillation

La liqueur fermentée contient environ 5 à 6 % d'éthanol. L'éthanol est séparé de la liqueur par un système de distillation à plusieurs colonnes qui fournira un alcool pur à 96 %.

6. Déshydratation

Pour les besoins de la commercialisation, l'éthanol est déshydraté par un tamis moléculaire.

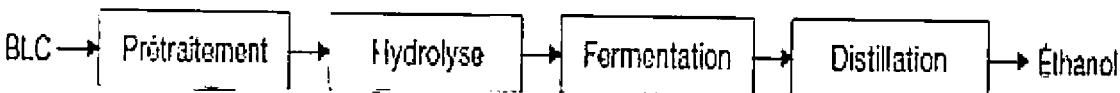
L'éthanol est alors dit « anhydre ». Un dénaturant y est ajouté en petite quantité (2 à 5 %) afin d'éviter qu'il ne soit commercialisé sur le marché de l'alimentation humaine.

Jusqu'à 75 % de la cellulose et de l'hémicellulose contenues dans la matière première végétale peuvent être transformées partiellement en éthanol. L'efficacité de cette transformation dépend notamment du taux de récupération de la cellulose et de l'hémicellulose, de l'efficacité de leur conversion en sucres fermentescibles ainsi que de l'efficacité de la fermentation du glucose en éthanol.

Deux coproduits sont générés par la fabrication d'éthanol cellulosique :

La lignine et le dioxyde de carbone (CO₂) produit lors de la fermentation. La quantité de lignine produite dépend grandement de la matière première. Elle est minimale pour la transformation des cultures énergétiques en éthanol et maximale pour la transformation de résidus forestiers de conifères. Une fois récoltée, nettoyé des impuretés (alcool résiduel) puis comprimé, le dioxyde de carbone trouve un débouché dans la fabrication des boissons gazeuses et de la glace sèche ou dans les processus de refroidissement rapide des aliments. Au total, une tonne de biomasse, sur base de matière sèche, produirait actuellement entre 200 et 230 litres d'éthanol. L'optimisation des procédés de conversion de la cellulose et de l'hémicellulose ainsi que de la fermentation pourrait faire augmenter ce rendement à près de 400 litres.

Par conséquent, le schéma générique du procédé comprend les principales opérations unitaires suivantes: le prétraitement de la matière première, l'hydrolyse, la fermentation éthanolique et la séparation de l'éthanol du moût de fermentation.



Procédés physiques	Broyage mécanique intense (fragments <math>< 2\text{mm}</math>) Thermolyse (chauffage à $T < 300^{\circ}\text{C}</math> suivi d'une hydrolyse acide)$
Procédés physico-chimiques	Thermohydrolyse (cuisson sous forte pression à $\sim 200^{\circ}\text{C}</math> pendant 15 à 60 minutes permettant la solubilisation de l'hémicellulose et de la lignine)Explosion à la vapeur (injection de vapeur à haute pression pendant quelques secondes suivi d'une détente brutale à pression atmosphérique)Explosion à la vapeur en conditions acides (identique à la précédente mais en milieu acide)Procédé AFEX (Ammonia Fiber Explosion)Explosion au CO2$
Procédés chimiques	Prétraitement à l'acide dilué à chaud Prétraitement en milieu alcalin (qui conduisent à une solubilisation quasi-totale de la lignine et d'une partie des hémicelluloses et à un gonflement des fibres de cellulose ainsi rendues beaucoup plus accessibles aux enzymes) Le procédé Organosolv consiste à solubiliser et extraire la lignine et les hémicelluloses dans un solvant organique Procédés d'oxydation chimique, notamment l'ozonolyse ou l'oxydation humide Procédés biologiques mettant en oeuvre des enzymes de type peroxydase ou des champignons lignolytiques

Source : Etat des lieux, perspectives et enjeux du développement - Daniel BALLERINI, avec la collaboration de Nathalie ALAZARD-TOUX.

5 Le procédé de prétraitement universel et idéal n'existe pas. Les technologies a priori les plus attrayantes sont la thermo hydrolyse, le prétraitement à l'acide dilué et l'explosion à la vapeur. Elles dépendent du matériau à traiter du bananier.

Le prétraitement

Il ne s'agit pas du conditionnement du végétal proprement dit qui consiste généralement en un broyage/découpage des matériaux fibreux mais du traitement nécessaire pour rendre la cellulose accessible à l'hydrolyse.

10 Les principaux procédés de prétraitement ont pour objectif :

- d'abaisser la teneur en lignine et hémicelluloses du substrat solide à traiter,
- d'augmenter la porosité de la matrice, en diminuant la cristallinité de la cellulose ou en augmentant sa surface spécifique,
- de conjuguer les deux principes.

Explosion à la vapeur de la biomasse de bananier en poudre

15 L'explosion à la vapeur est un traitement se déroulant en deux étapes qui permet non seulement d'hydrolyser et d'extraire les saccharides, mais également de déstructurer la biomasse de bananier.

La première phase est : le vapocraquage, pendant laquelle la vapeur sous forte pression (jusqu'à 40 bars, 250°C) pénètre dans les fragments de bananier. Ces conditions conduisent à l'hydrolyse des polysaccharides. Après quelques minutes, une brutale décompression est appliquée, déstructurant la biomasse de bananier. La réaction peut être catalysée par du dioxyde de soufre (SO₂) ou de l'acide sulfurique. Un traitement mené à 175°C, avec 4,5% de SO₂ pendant 7,5 min sur du pin de Douglas a permis d'extraire 70% des hémicelluloses ou 86% des hexoses, l'immense majorité sous forme monomère. De plus, les concentrations en HMF et furfural ne dépassent pas 0,5 g/L.

20 La deuxième phase : Un traitement plus sévère (215°C, 6,6 min, 2,38% SO₂) entraîne une forte dégradation des saccharides. La quantité d'hémicelluloses dans l'hydrolysât chute à 37,5%. L'extraction d'hémicelluloses est très efficace par ce traitement. Toutefois, la décompression dégrade énormément les fibres. Il est donc impossible d'en faire de la pâte de bonne qualité, mais cela constitue un prétraitement intéressant avant une hydrolyse enzymatique de la cellulose. Ainsi l'explosion à la vapeur est utilisée majoritairement pour faire de l'éthanol cellulosique (à partir des hémicelluloses et de la cellulose de bananier).

25 L'hydrolyse

Du fait de la structure de la cellulose, de sa cristallinité et de son association avec la lignine et les hémicelluloses encore présents, même après l'étape de prétraitement, son hydrolyse en monomères fermentescibles (glucose) est une opération difficile qui peut être réalisée par deux méthodes : hydrolyse chimique catalysée par un acide ou hydrolyse enzymatique.

L'hydrolyse chimique : se fait en deux étapes. La première est semblable au prétraitement par acide dilué et permet de digérer les hémicelluloses et de solubiliser les sucres qui en sont issus. Après séparation, la fraction solide contenant la cellulose est soumise à une nouvelle hydrolyse.

30 L'hydrolyse enzymatique : l'hydrolyse de la cellulose par des enzymes est souvent la voie préconisée pour l'obtention des sucres fermentescibles pour les raisons suivantes :

- elle est plus économique,
- elle génère peu d'effluents à traiter,
- elle présente des perspectives d'amélioration beaucoup plus grandes que l'hydrolyse chimique qui a fait l'objet de travaux depuis plusieurs dizaines d'années.

Parmi les bactéries cellulolytiques figurent des bactéries appartenant aux genres Ruminococcus, Clostridium, Cellulomonas, Thermonospora, Streptomyces. Bien que certaines bactéries comme Clostridium thermocellum produisent des cellulases ayant une activité spécifique élevée, leurs capacités de production et leurs taux de

croissance sont trop faibles pour envisager leur utilisation au stade industriel. Les champignons cellulolytiques appartiennent à différents genres : *Aspergillus*, *Schizophyllum*, *Penicillium*, *Trichoderma*...

5 Parmi ceux-ci, *Trichoderma reesei* est capable de sécréter des concentrations importantes de cellulases très actives et a fait l'objet d'utilisation industrielle.

Les systèmes cellulolytiques sont des systèmes multienzymatiques possédant trois types d'action qui sont capables de dégrader totalement la cellulose. Les efforts actuels visent à diminuer le coût de production des cellulases et à augmenter leur activité spécifique.

Hydrolyse enzymatique :

L'hydrolyse enzymatique s'est imposée pour la production d'éthanol à partir d'amidon. Elle est cependant encore loin d'être efficace pour l'éthanol de seconde génération.

10 Elle est utilisée jusqu'à l'échelle pilote pour l'hydrolyse de la cellulose (voir par exemple les projets NILE et FUTUROL).

Trois classes d'enzymes différentes sont alors nécessaires. Les $\text{exo-1,4-}\beta\text{-d-glucanases}$ produisent du cellobiose en partant des extrémités de la cellulose, les $\text{endo-1,4-}\beta\text{-d-glucanases}$ hydrolysent les liaisons glycosidiques internes à la cellulose, pour créer de nouvelles extrémités réductrices, et enfin les $\text{1,4-}\beta\text{-d-glucosidases}$ convertissent la cellobiose en glucose. En ce qui concerne les hémicelluloses, le cocktail d'enzymes nécessaire est encore plus important, sachant que chaque enzyme admet comme substrat un type de liaison spécifique. Ne serait-ce que pour les GGM, il est indispensable de posséder des $\text{endo-1,4-}\beta\text{-mannanases}$, des $\beta\text{-mannosidases}$, des $\beta\text{-glucosidases}$, des $\alpha\text{-galactosidases}$ ainsi que des $\text{acetylmannane-esterases}$ si les groupes acétyles doivent être libérés. Ces enzymes peuvent être produites à partir de microorganismes, comme *Trichoderma reesei* ou encore *Penicillium purpurogenum*.

L'efficacité des enzymes est réduite par leur inhibition à leur produit, leur propre substrat, ainsi que par les composés phénoliques. Ce procédé reste cependant séduisant pour une hydrolyse secondaire, après autohydrolyse ou extraction alcaline. En effet, il limiterait la dégradation des monosaccharides et pourrait réduire la libération des groupes acétyles, inhibiteurs pour la fermentation (cf. la partie C.2.2 de ce chapitre).

20 Ce procédé faciliterait la fermentation, mais diminuerait la matière première fermentescible, un hexose lié à un groupe acétyle ne pouvant pas être transformé en éthanol. Les hémicelluloses étant solubilisées, l'action des enzymes est facilitée. Néanmoins, pour obtenir une hydrolyse enzymatique efficace et rentable, les microorganismes doivent être améliorés, la manipulation génétique semblant être la voie la plus prometteuse.

Fermentation

La fermentation éthanolique

25 Une fois la cellulose hydrolysée en glucose, celui-ci est fermenté de la même façon que le glucose issu de l'amidon de bananier. Il demeure des problèmes spécifiques à l'utilisation de matériaux lignocellulosiques comme substrat initial tels que :

- la fermentation des pentoses en éthanol (xylose issu des hémicelluloses de bananier),
- la présence de composés toxiques et inhibiteurs issus des hémicelluloses et de la lignine,
- la possibilité d'effectuer l'hydrolyse enzymatique et la fermentation en une seule étape.

Fermentation par les levures

30 Alors que *Saccharomyces cerevisiae*, dont certaines souches sont utilisées industriellement pour la fermentation alcoolique, ne peut utiliser la xylose comme source de carbone, d'autres espèces de levures peuvent convertir la xylose en éthanol (*Pichia stipitis*, *Candida shehatae*, *Pachysolen tannophilus*). Cependant ces levures présentent de nombreux points faibles : performances fermentaires sensiblement inférieures à celles de *S. cerevisiae* sur glucose, inhibition par l'éthanol à partir de concentrations de l'ordre de 3 à 5 %, forte sensibilité aux inhibiteurs présents dans les hydrolysats tels que l'acide acétique.

Des études sont menées pour modifier le génome de *Saccharomyces cerevisiae* de façon à le rendre capable de transformer la xylose.

Fermentation par les bactéries

5 La xylose est convertible en éthanol par plusieurs espèces de bactéries thermophiles comme *Thermoanaerobacter ethanolicus*, *Clostridium thermohydrosulfuricum* ou par des souches modifiées de *Bacillus stearothermophilus*. Des bactéries mésophiles comme *Escherichia coli* et *Klebsiella oxytoca* ou *K. plantico* la sont également capables de fermenter les pentoses.

De bonnes productions d'éthanol ont été obtenues avec des souches d'*E. Coli* chez lesquelles des améliorations notables ont été obtenues: forte expression de certains gènes (*pdc* et *adh*) pour orienter le flux de carbone vers la production d'éthanol, obtention de mutants résistants à l'éthanol, délétion du gène de la fumarate réductase à l'origine de la formation de succinate.

10 La distillation

Les étapes de récupération de l'éthanol par distillation/rectification/déshydratation sont identiques à celles des procédés déjà éprouvés de production d'éthanol de 1^{ère} génération.

TRAITEMENT PAR VOIE THERMOCHIMIQUE BTL (Biomass To Liquid)

Conversion thermochimique

15 La deuxième voie étudiée par le Pasteur Abanda N.J. est la filière thermochimique. Elle permet en particulier de produire du biodiesel et du biokérosène et utilise notamment deux technologies : la gazéification et la pyrolyse.

Dans la voie gazéification ou BtL (Biomass to Liquids), il s'agit de conditionner la biomasse de banane et de banane plantain, de la gazéifier, de purifier le gaz de synthèse obtenu, puis de procéder à une synthèse Fischer-Tropsch pour transformer le gaz de synthèse en biodiesel et biokérosène de très haute qualité.

20 La pyrolyse est un autre procédé thermochimique utilisé pour obtenir du diesel, de l'essence ou du kérosène. Il consiste à liquéfier la biomasse, puis à traiter le liquéfiât pour en faire des carburants. Le Pasteur Abanda N.J. s'est investi à développer une technologie de pyrolyse, pour développer un procédé de traitement des liquéfiâts.

Et au-delà...

Au-delà des voies biochimique et thermochimique, d'autres pistes, plus exploratoires, de production de biocarburants de 2^{ème} génération sont étudiées, comme la production d'alcools supérieurs à partir de biomasse du bananier par voie biologique. Le procédé suit les mêmes étapes que celles de la production d'éthanol cellulosique.

25 Un procédé en 4 étapes

La biomasse est d'abord traitée et broyée en poudre. Les partenaires du projet ont choisi la torréfaction (comme pour le café), afin d'obtenir une poudre suffisamment fine pour être insérée dans un gazéifieur avec au final une moindre consommation énergétique. La poudre est ensuite transformée en gaz de synthèse, à très haute température (entre 1 200 et 1 600 °C) et en présence d'oxygène. La transformation est réalisée en moins de deux secondes, avec un niveau de conversion supérieur à 99 %. Avant d'être utilisé sous forme de carburant liquide, le gaz de synthèse doit être d'une grande pureté et avoir la composition adéquate. Cette opération passe par l'emploi de catalyseurs spécifiques. La conversion finale fait ensuite appel à une technologie bien connue sous le nom de procédé de Fischer-Tropsch.

30 Gazole de synthèse ou BTL (Biomass To Liquid)

Le terme BTL est appliqué aux carburants synthétiques produits à partir de biomasse par voie thermochimique.

L'objectif est de produire des carburants similaires à ceux actuels issus de l'énergie fossile et qui pourront donc être utilisés dans les systèmes existants de distribution de carburant et avec des moteurs standards.

Les biocarburants de synthèse tels que le diesel Fischer-Tropsch (FT-diesel), le diméthyle-éther (DM E) l'hydrogène (H₂) et, dans une moindre mesure, le bio méthanol, figurent parmi les filières de biocarburants liquides les plus prometteuses à moyen-long terme. Ces filières dites "de synthèse" n'ont toutefois pas encore dépassé le stade du pilote, voire de la recherche et du développement (R&D), et il faudra certainement plusieurs années avant qu'elles ne s'imposent sur le marché des biocarburants. Toutefois, plusieurs projets de grande envergure sont actuellement en cours, visant le développement commercial des premières usines de

production. Parmi les projets les plus ambitieux, notons le projet RENEW (dont Volkswagen, BP et Total sont partenaires). L'un des processus de production évalués dans le cadre de ce projet est le procédé Carbo-V[®] de la société Choren.

5 Le procédé Carbo- V[®] (tel qu'il est décrit par Choren) est un processus de gazéification en trois étapes impliquant la succession des sous-processus suivant s :

- gazéification à basse température;
- gazéification à haute température;
- gazéification endothermique à lit entraîné.

10 La biomasse est dans un premier temps carbonisée de façon continue par oxydation partielle (pyrolyse à basse température) avec de l'air ou de l'oxygène à basse température de l'ordre 400-500°C. La biomasse est ainsi décomposée en un gaz contenant des goudrons (éléments volatils) et en résidus charbonneux (charbon de bananier).

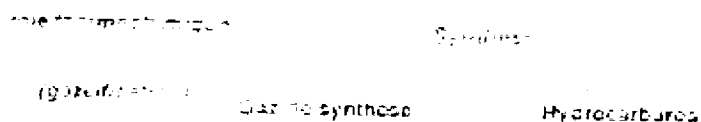
Le gaz contenant du goudron est ensuite post-oxydé avec de l'air et/ou de l'oxygène dans une chambre de combustion fonctionnant au-dessus du point de fusion des cendres du combustible pour la transformer en un milieu de gazéification à haute température.

15 Le charbon de bananier est broyé en un combustible pulvérisé puis injecté dans le milieu de gazéification à haute température. Le combustible pulvérisé et le milieu de gazéification réagissent de façon endothermique dans le réacteur de gazéification à plus de 1000°C où ils sont convertis en un gaz de synthèse brut constitué de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂). Catalysée dans lesquels l'oxyde de carbone et d'hydrogène sont convertis en hydrocarbures liquides.



Le BTL (biomass to liquid) ou carburant de synthèse

20



25 UTILISATION DE NOTRE INVENTION POUR LA PRODUCTION DE BIODIESEL

Peuvent être associées aux biocarburants de 2^{ème} génération, les cultures de bananier dont les technologies utilisées pour obtenir le bio carburant sont les mêmes que pour ceux de 1^{ère} génération, mais qui n'entrent pas en concurrence avec l'alimentation humaine ou animale.

Une fois cette réaction réalisée de manière appropriée, le gaz de synthèse peut être utilisé pour la production de Fischer-Tropsch - Diesel. Le procédé Fischer-Tropsch est une réaction chimique.

30 L'invention s'applique avantageusement à la gazéification de biomasse de bananier en vue de la réalisation de biocarburants à partir du gaz de synthèse largement connu sous l'appellation « Syngaz ». Par Les procédés de raffinerie de biomasse lignocellulosique de bananier qui participent à la fourniture de bioénergies, sous forme de poudre et d'éthanol, de matériaux bio-sourcés, notamment pour charger des matrices et de biomolécules à haute valeur ajoutée, par exemple des phénols, des acides gras et des minéraux.

L'étape de gazéification proprement dite est réalisée en continu à partir de la biomasse de banane de nature et de granulométrie différentes stockée habituellement à la pression atmosphérique.

Ainsi, les procédés de gazéification de la biomasse lignocellulosique de bananier permettent de générer un gaz de synthèse qui permet de produire en aval soit des carburants liquides soit d'autres produits organiques. Cette gazéification se déroule en présence typiquement de vapeur d'eau vers 1400-1600°C pour des réacteurs à flux entraîné. Classiquement, ces procédés convertissent le carbone de la biomasse de bananier avec un gaz

5 L'invention est particulièrement avantageuse à mettre en œuvre dans une installation comprenant un réacteur à flux entraîné (RFE), avec un dispositif constitué par un granulateur à plateau tournant ou un granulateur-mélangeur à fort taux de cisaillement, le réacteur étant un réacteur de type à flux entraîné.

Ainsi l'invention consiste essentiellement à introduire une étape de granulation humide de la poudre séchée de biomasse avant l'étape d'injection dans le réacteur de gazéification.

De par la modification de la forme et l'augmentation de la taille induites par la granulation, les granulés de biomasse formant une semoule ont des propriétés d'écoulement grandement améliorées par rapport à une poudre séchée de biomasse.

10 Le convoyage de la biomasse de bananier est ainsi grandement amélioré ce qui permet d'obtenir une injection aisée et en continu dans le réacteur de gazéification, avec un dosage fin, précis, stable et reproductible.

Le procédé de production de syngas

15 La production de « syngas », notamment par une voie BTL, et en particulier dans un gazéifieur à flux entraîné, comporte, dans une première étape, un prétraitement de la biomasse lignocellulosique native pour réduire la charge à l'état d'une poudre finement broyée (entre 50 et 200 μ m) et facilement fluidisable de manière à permettre le transport pneumatique et l'injection de la charge biomasse dans l'unité de gazéification dont les conditions de fonctionnement sont typiquement une pression P comprise entre 20 et 45 bars (1 bar = 0,1 MPa) et une température T comprise entre 1200°C et 1600°C.

Dans la seconde étape de gazéification, la matière carbonée est oxydée partiellement en présence d'oxygène et de vapeur d'eau dans l'unité de gazéification ou gazéifieur.

La présente invention concerne la première étape de prétraitement de la biomasse lignocellulosique de bananier.

20 L'unité de gazéification ayant besoin d'être finement régulée et alimentée avec un débit de charge solide homogène, le prétraitement de la biomasse est une phase indispensable pour permettre le bon fonctionnement des étapes ultérieures de fluidisation et de gazéification.

La gazéification peut être effectuée dans un gazéifieur à lit ou flux entraîné à injection sèche, c'est-à-dire d'un gazéifieur destiné à la production à haute T et P de « syngas » par voie sèche.

Le principe de cette technologie, qui est éprouvée pour des charges fossiles comme le charbon, est basé sur le transport pneumatique d'une charge pulvérisée jusqu'à l'entrée d'un brûleur qui est alimenté aussi en oxygène et/ou vapeur d'eau. Lorsque cette technologie est appliquée à des charges lignocellulosiques, le principal verrou technique est le système d'alimentation et transport pneumatique en amont du gazéifieur.

25 Ce système est essentiellement un lit fluidisé qui opère dans le régime de fluidisation homogène, avec un gaz inerte, typiquement N₂ ou CO₂. La différence de pression entre ce lit fluidisé et le gazéifieur à flux entraîné permet le transport pneumatique des particules solides vers ce dernier. Une fois dans le gazéifieur (P = 20-45 bars) la charge pulvérisée est gazéifiée très rapidement (temps de séjour inférieur à 2s) pour produire un syngas (mélange notamment de H₂ + CO) qui peut être ensuite valorisé par plusieurs voies différentes (synthèse Fischer-Tropsch, méthanisations, production d'hydrogène...).

30 D'autres procédés intègrent cette technologie pour la gazéification des charges biomasse de bananier. C'est le cas de la chaîne BTL (Biomass To Liquid), qui considère de manière générale un prétraitement thermique et mécanique de la biomasse lignocellulosique de bananier (torréfaction + broyage) avant gazéification.

La fluidisation homogène implique un lit expansé mais sans création des bulles afin de permettre une alimentation continue et stable au brûleur du gazéifieur. Par ailleurs, il est aussi souhaité de minimiser la vitesse de fluidisation afin de limiter le débit de gaz inerte qui sera injecté au gazéifieur. La vitesse de fluidisation s'entend comme la vitesse superficielle du fluide, i.e. Le ratio entre le débit volumique de gaz et la section de l'équipement dans lequel a lieu la fluidisation, sans prise en compte de la présence du solide à fluidiser. La vitesse minimale de fluidisation est une caractéristique propre à la poudre solide qui correspond au débit minimum de gaz nécessaire à la mise en fluidisation de la poudre. La vitesse minimale de fluidisation est mesurée selon la norme ASTM D7743- 1 « Standard Test Method for Measuring the Minimum Fluidization Velocities of Free Flowing Powders ».

Le régime de fluidisation homogène correspond aux particules de type A selon la Classification de Geldart (Ref : « Types of Gas Fluidisation », D. Geldart, *Podwer*

REVENDEICATIONS

1. Procédé de fractionnement du bananier par voie humide de biomasse lignocellulosique comportant au moins 50 %, en masse, de lignines, cellulose et hémicelluloses, suivant la (Figure II/XV) caractérisé en ce qu'il comporte :
 - une étape de fragmentation du bananier afin d'obtenir un gâteau humide de biomasse dur,
 - 5 - une étape de pressage des fragments du bananier afin d'obtenir des granulés séchés de biomasse,
 - une étape de fragmentation du bananier humide afin d'obtenir une biomasse humide pâteuse,
 - une étape de fragmentation du fruit de banane frais vert ou mur en cossette afin d'obtenir une biomasse cossette humide ou séchée,
 - une étape de fragmentation du fruit de banane frais mur afin d'obtenir une pâte de biomasse sucée,
 - une étape de fragmentation du cossette de banane afin d'obtenir une biomasse en farine séchée.

2. Procédé de fractionnement par voie sèche de biomasse lignocellulosique comportant au moins 50 %, en masse, de lignines, cellulose et hémicelluloses, suivant la (Figure II/XV) caractérisé en ce qu'il comporte :
 - 10 - une étape de fragmentation de la biomasse pour obtenir une poudre ultrafine et
 - une étape de séparation d'une fraction enrichie en cellulose, d'une part, d'une fraction enrichie en lignine, en hémicelluloses et en minéraux d'autre part, par tri électrostatique des particules ultrafines.

3. Procédé selon la revendication 2, dans lequel l'étape de séparation des fractions suivant la (Figure III/XV) comporte :
 - une étape de charge tribo-électrostatique de particules ultrafines,
 - une étape de déviation de trajectoire dans le champ électrique des particules chargées pour trier les particules.

- 15 4. Procédé selon les revendications précédentes dans lequel, au cours de l'étape de diverses fragmentations du bananier en biomasse utile, on met en œuvre un broyage de la biomasse et qui comporte, en outre :
 - une étape de raclage d'électrode d'un moyen de tri électrostatique mis en œuvre au cours de l'étape de déviation, pour collecter les particules fixées sur une électrode après l'étape de déviation de particules,
 - une étape d'inversion cyclique de la polarité de chaque électrode d'un moyen de tri électrostatique mis en œuvre au cours de l'étape de déviation,
 - en aval de l'étape de déviation, au moins une étape de déviation secondaire,
 - 20 - en aval d'au moins une étape de déviation, une étape de comparaison des dimensions de particules en regard d'une valeur limite prédéterminée et une étape d'alimentation d'un moyen de broyage en particules dont les dimensions sont supérieures à la limite prédéterminée et dans lequel, au cours de l'étape de charge, on met en œuvre un lit d'air fluidisé dynamique.

5. Procédé selon les revendications précédentes, dans lequel, au cours de l'étape de fragmentation de la biomasse, on met en œuvre un broyeur vibrant ou à boulets rotatifs, et qui comporte, en amont ou au cours de l'étape de fragmentation de la biomasse, une étape de prétraitement de la biomasse de bananier fragmentée, au cours de laquelle, on effectue un traitement chimique de la biomasse par contact soit avec un gaz ou un aérosol oxydant, soit avec un gaz ou un aérosol réducteur et soit avec un gaz inerte ; il comporte, en
 - 25 aval de l'étape de séparation, une étape de fonctionnalisation d'au moins une fraction enrichie, au cours de laquelle, on effectue une torréfaction et une hydrolyse enzymatique de la fraction enrichie ; les fractions enrichies soit en cellulose, soit en héli-celluloses-lignine soit en minéraux étant utilisés pour la génération de biocarburant et pour la production de matériaux bio-sourcés.

6. Procédé de traitement de biomasse lignocellulosique de bananier suivant la (Figure VIII à XV/XV) comprenant :
 - 30 a)-une étape de préparation d'une poudre de bananier dont la granulométrie est comprise entre 15 et 900 μm , de préférence entre 20-500 μm , ayant une teneur en eau inférieure à 15% pds, une densité de grain entre 500 et 900 kg/m³, et une vitesse minimale de fluidisation supérieure à zéro et inférieure à 0.15 m/s, de préférence inférieure à 0.1 m/s,

- 5 b)-une étape de fluidisation d'une partie au moins de ladite poudre de bananier, seule ou en mélange, par injection d'un gaz de fluidisation à une vitesse supérieure ou égale à la vitesse minimale de fluidisation de ladite poudre,
- c)-une étape d'injection dudit milieu fluidisé dans une étape de gazéification pour produire un gaz de synthèse contenant CO et H₂, et ladite étape a) de préparation de poudre comporte un traitement biochimique (étapes A à D) avec obtention d'un résidu ligneux et le traitement du résidu ligneux (étape E) avec obtention d'une poudre:
- 10 A)-une étape de prétraitement de biomasse lignocellulosique de bananier effectuée par voie humide, par chauffage en conditions acides et/ou d'auto-hydrolyse, étape qui génère un substrat de bananier prétraité ; de préférence ledit prétraitement est une explosion à la vapeur en conditions acides,
- B)-une étape optionnelle de séparation liquide/solide de tout ou partie du substrat prétraité issu de l'étape (A) avec obtention d'un liquide et d'un substrat prétraité contenant le solide,
- C)-une étape d'hydrolyse enzymatique du substrat prétraité issu de l'étape (A) et/ou issu de l'étape optionnelle (B), effectuée en présence d'enzymes cellulolytiques ou hémicellulolytiques,
- 15 C1/C2)-éventuellement une étape de fermentation (C1), l'hydrolyse et la fermentation ayant lieu simultanément ou séparément, et la fermentation étant suivie ou non d'une étape de séparation (C2).
- D)-une étape de séparation solide/liquide après hydrolyse enzymatique et/ou, lorsqu'elles existent après fermentation ou séparation, avec obtention d'un résidu ligneux de bananier
- E)- une étape de séchage de façon à ce que sa teneur en eau soit inférieure à 15% pds, et conditionnement dudit résidu ligneux en poudre dépourvue du caractère fibreux et dont la granulométrie est comprise entre 15 et 900µm.
7. Procédé selon les revendications précédentes caractérisé en ce que :
- 20 - le résidu ligneux en poudre de bananier présente en outre une densité de grain entre 500 et 900kg/m³, une densité de chargement entre 200 et 400 kg/m³,
- le séchage a lieu à une température de 80-150°C, de préférence 120-125°C,
 - le conditionnement est une opération physique pour séparer les particules agglomérées, par exemple par démottage et/ou décolmatage et/ou homogénéisation et/ou broyage et/ou pastillage-broyage de façon à obtenir une poudre de bananier dont la granulométrie est comprise entre 15 et 900µm, de préférence entre 20-500µm ayant une teneur en eau inférieure à 15% pds, et une densité de grain d'entre 500 et 900 kg/m³,
- 25 - l'étape A) est effectuée à une température de 120-250°C et avec une teneur en eau du milieu réactionnel d'au moins 35% pds,
- lorsqu'elle existe, l'étape B) comporte éventuellement un lavage du solide et/ou une neutralisation,
 - l'étape C) est effectuée à une température de 35-50°C, à un pH compris entre 4 et 6, en présence d'enzymes issues d'une souche sélectionnée dans le groupe formé par *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Penicillium* ou *Schizophyllum*, *Clostridium*, de préférence la souche est *Trichoderma reesei*, l'une des revendications précédentes dans lequel l'étape D) est réalisée :
- 30 - dans le cas où il n'y a pas de fermentation ou autre traitement : immédiatement après hydrolyse enzymatique (étape C) la fermentation (C1) (fermentation alcoolique, de préférence éthanolique) est effectuée à une température de 25-40°C, en présence d'une levure *Saccharomyces cerevisiae*, une des revendications précédentes dans lequel le résidu ligneux en poudre est préparé sans torréfaction.
8. Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel le résidu ligneux issu de l'étape D) du procédé ne subit pas de traitement chimique avant l'étape E) caractérisé en ce que :
- l'étape de gazéification est opérée dans un gazéifieur à flux entraîné à injection sèche, avec un lit entraîné, à une pression de 20-80 bars et une température de 1200-1600°C ;

- le résidu ligneux de bananier en poudre est fluidisé en mélange soit avec au moins une autre poudre d'origine biomasse ligno-cellulosique de banane ou banane plantain, soit avec au moins une autre poudre d'origine fossile ;

- le résidu ligneux de bananier en poudre issu de l'étape E) est conditionné sous forme de pastilles ou extradés, et, avant d'être fluidisé, il est broyé pour obtenir ledit résidu en poudre ;

la gazéification produit un gaz de synthèse ultérieurement traité pour la production des biocarburants ou d'autres produits chimiques, ou bien pour une utilisation énergétique dans des centrales à cycle combiné (exemple : centrales à biomasse de bananier ou encore centrales de cogénération).

9. Procédé de traitement de la biomasse de bananier par voie bio-chimique suivant la figure (XII/XV) comportant :

a)-une étape de traitement par voie biochimique de la biomasse humide en gâteau dur, afin d'obtenir du bioéthanol ;

b)-une étape de traitement par voie biochimique de la biomasse humide en gâteau dur, afin d'obtenir du biogaz ou du bîmane ;

c)-une étape de traitement de granulé de biomasse de bananier sec, afin d'obtenir de la bioélectricité par cogénération ;

d)- une étape de traitement du digestât de biomasse de bananier, afin d'obtenir des engrais biologique solide ou liquide ;

e)- une étape de traitement du gâteau dur de biomasse de bananier humide, afin d'obtenir de la pâte à papier.

10. Procédé de traitement de la biomasse de bananier par voie thermo-chimique suivant la figure (XV/XV) comportant une étape de traitement de la biomasse sec en poudre, afin d'obtenir les biocarburants (biodiésel, biokérozène et..).

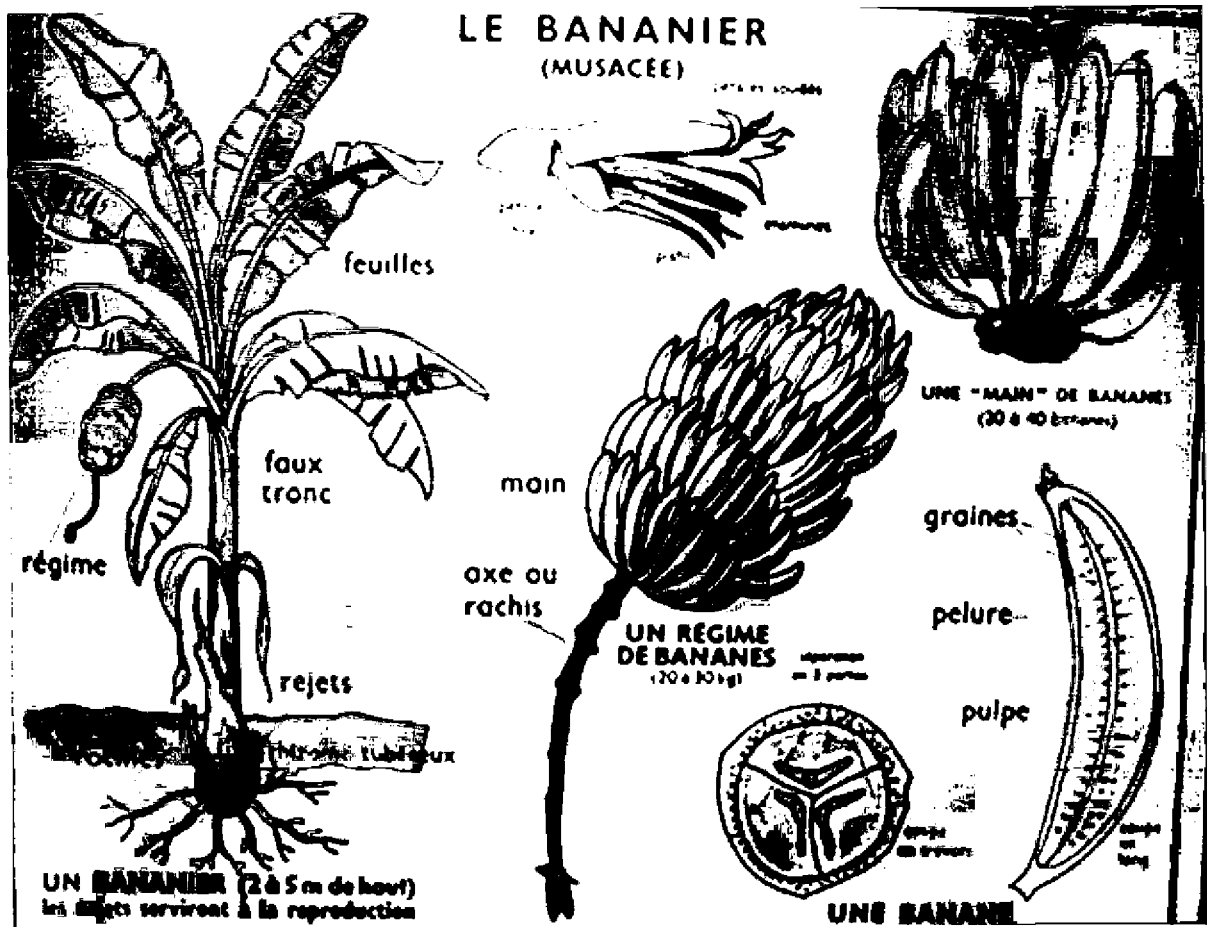
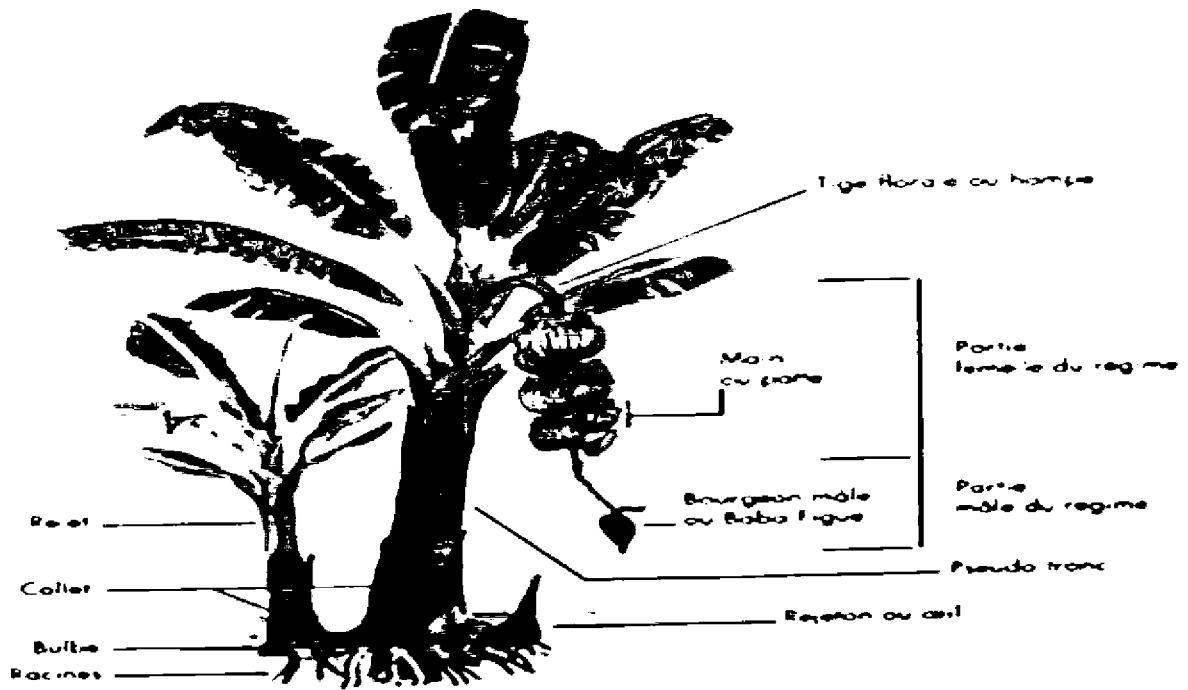
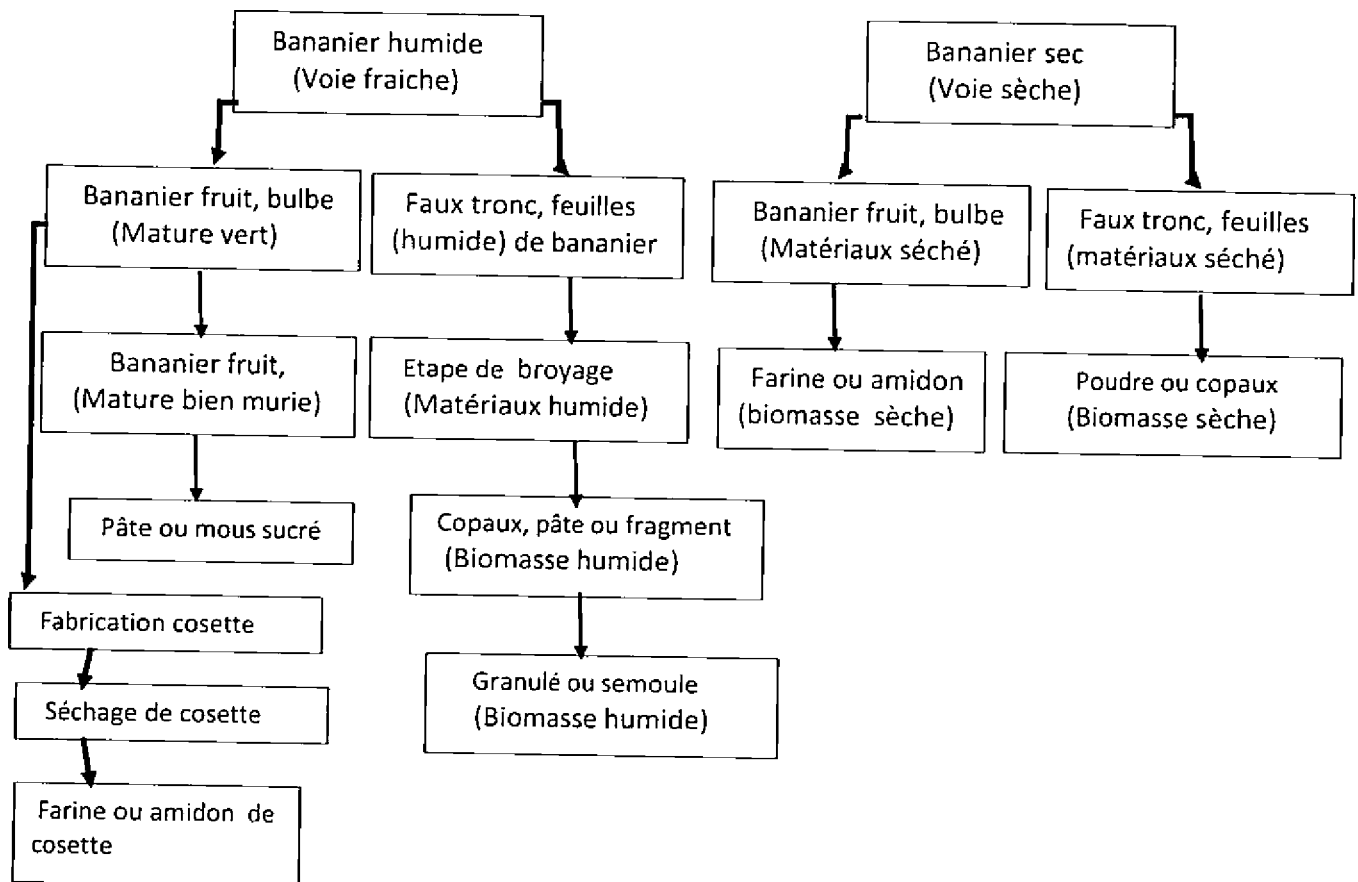


FIGURE I/XV

Le Bananier en général
(Faux tronc, feuilles, fruit, rejet, rachis, bourgeon mâle, hampe et bulbe)
Schéma procédé de fragmentation ou fractionnement du bananier



Suivant le présent schéma, le Bananier subit les étapes de fragmentation ou fractionnement afin de disposer une biomasse utile pour les bioénergies et autres.

Etape 1 : séparation des matériaux humides au fraîches et sèches ou séchés

Etape 2 : fragmentation du matériau fraie par broyage afin d'aboutir à une biomasse fraîche en pâte dure ou mole

Etape 3 : fragmentation du matériau sec par raffinerie afin d'obtenir une biomasse en poudre ultrafine

Etape 4 : fragmentation de cosette par broyage pour une biomasse farine ou d'amidon

Etape 5 : de pressage et séchage de pâte de bananier pour aboutir au granulé de biomasse de bananier.

- broyage à couteaux,

-broyage à palette,

-séchage jusqu'à une teneur en eau inférieure à 10 %,

-broyage à boulets rotatifs et

-tri électrostatique en deux passages.

FIGURE II/XV

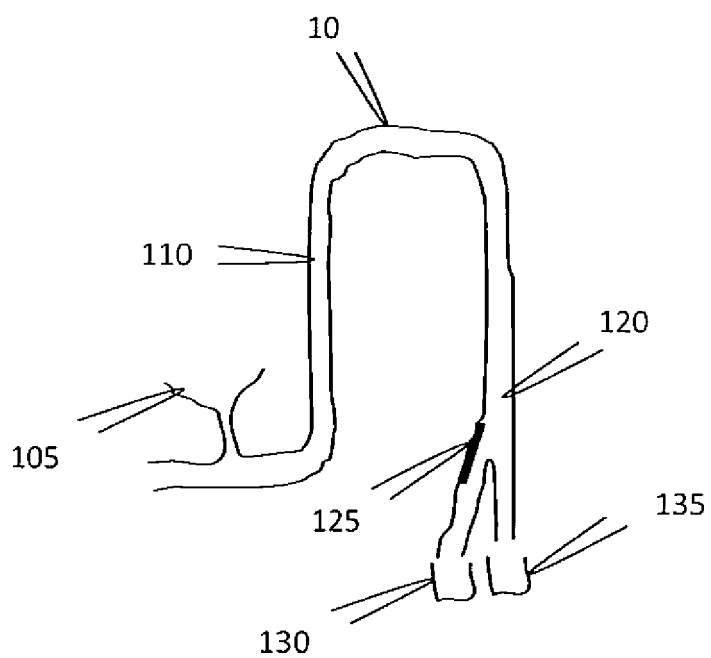
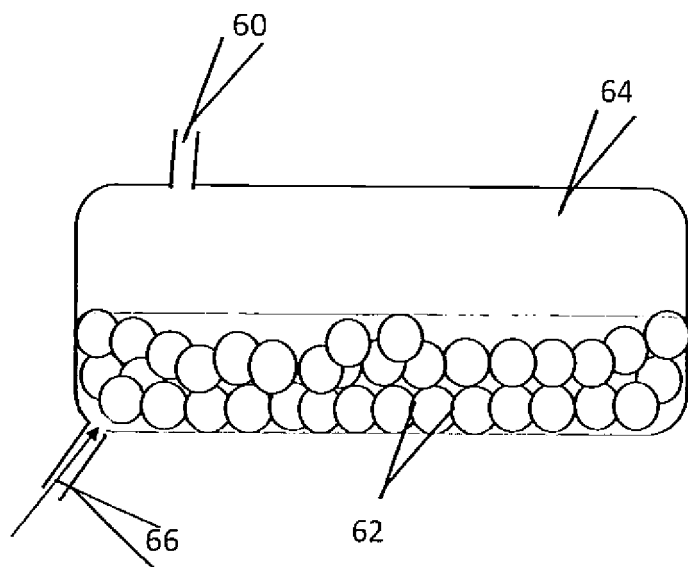


FIGURE III/XV

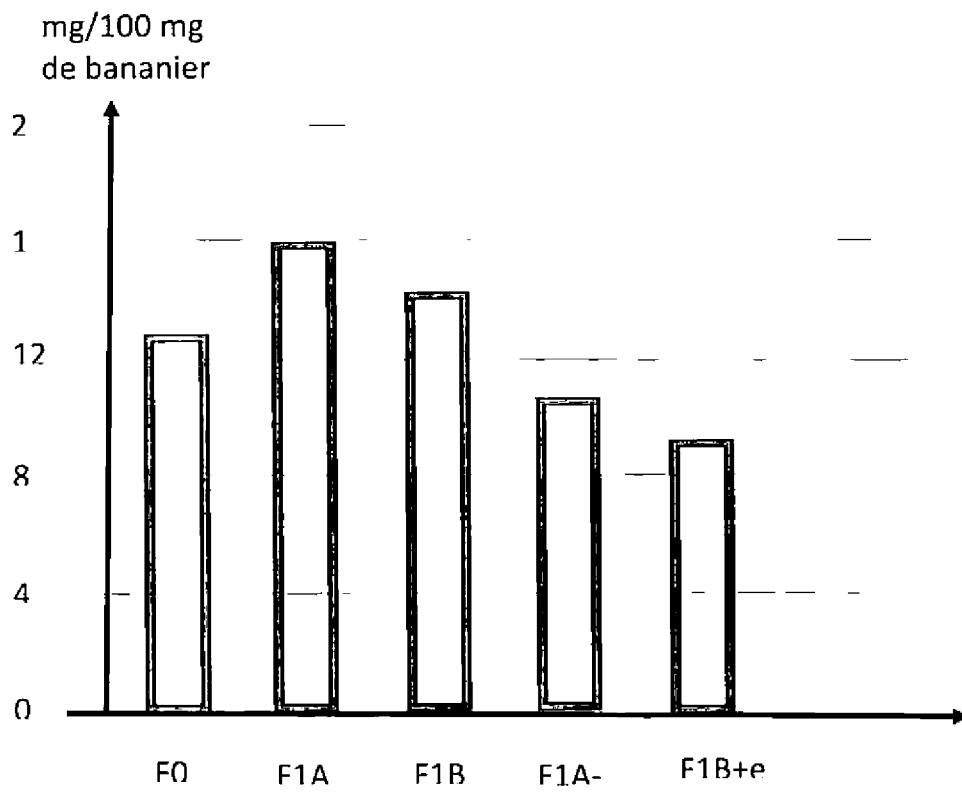
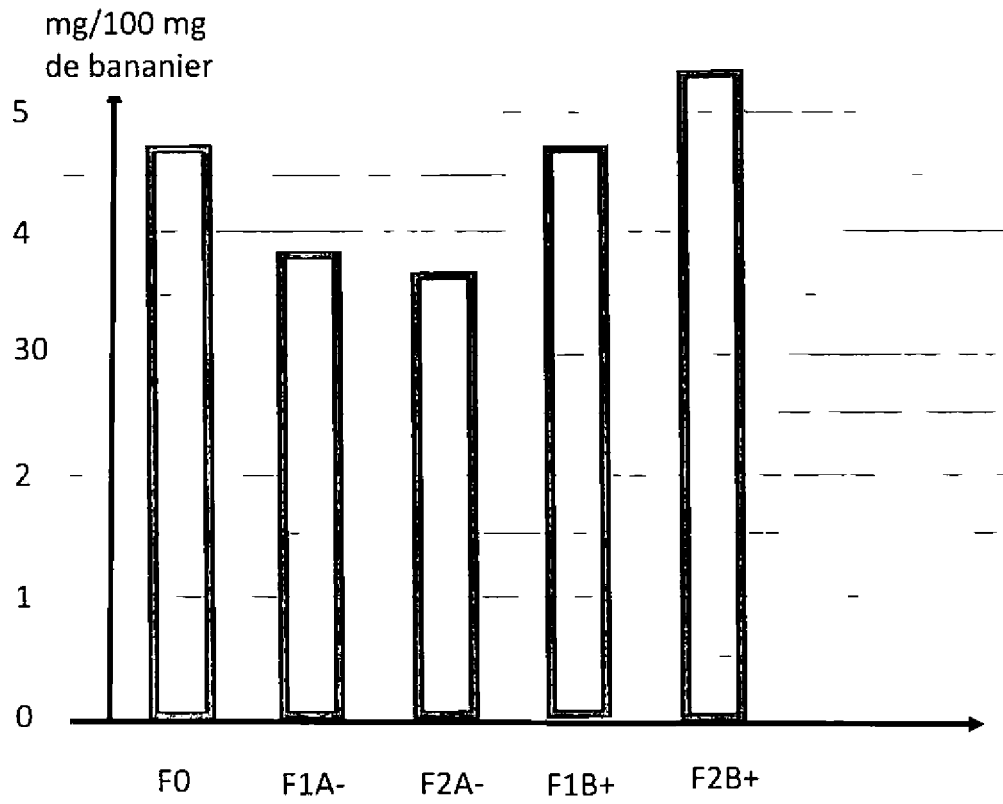


FIGURE VII/XV

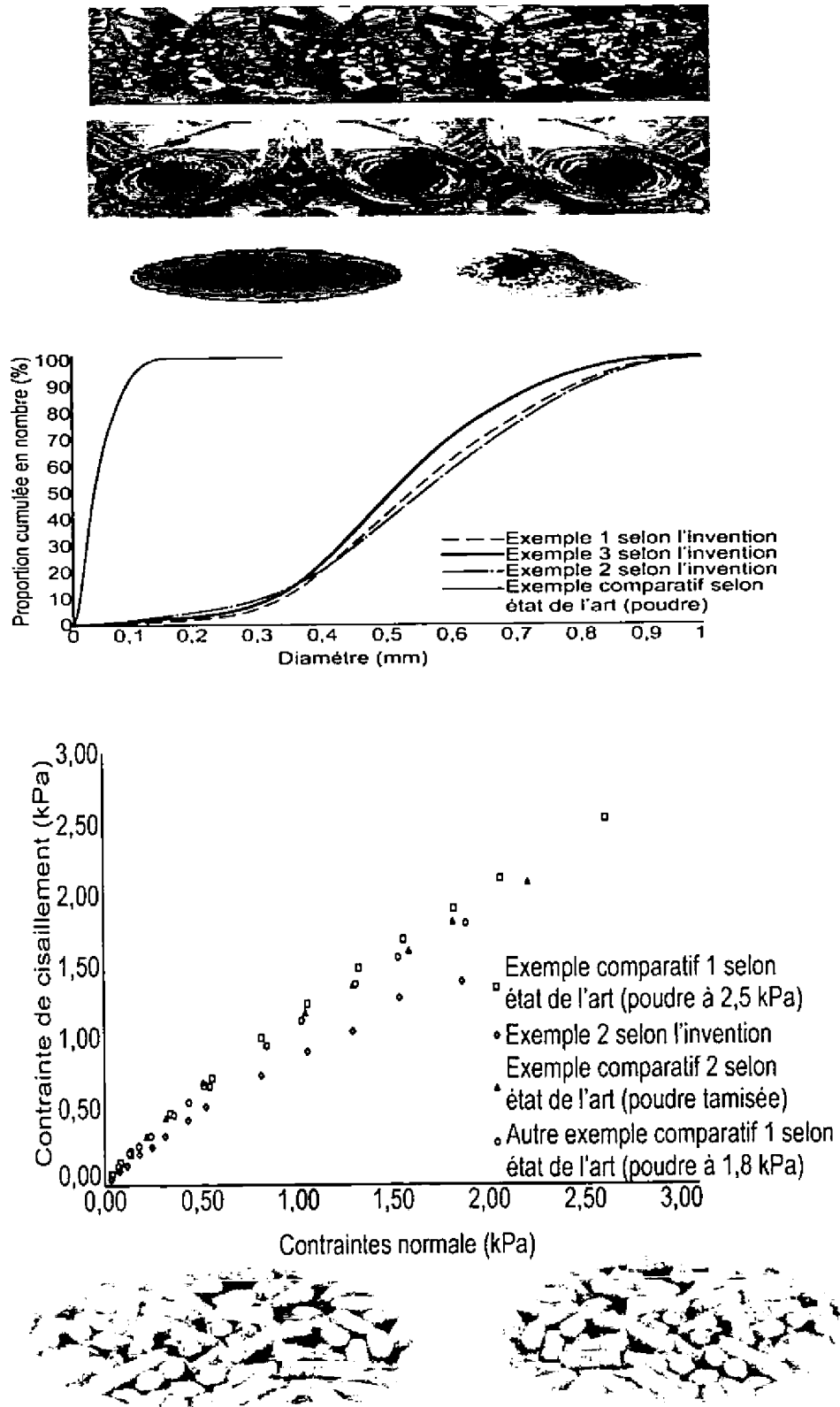


FIGURE VIII/XV

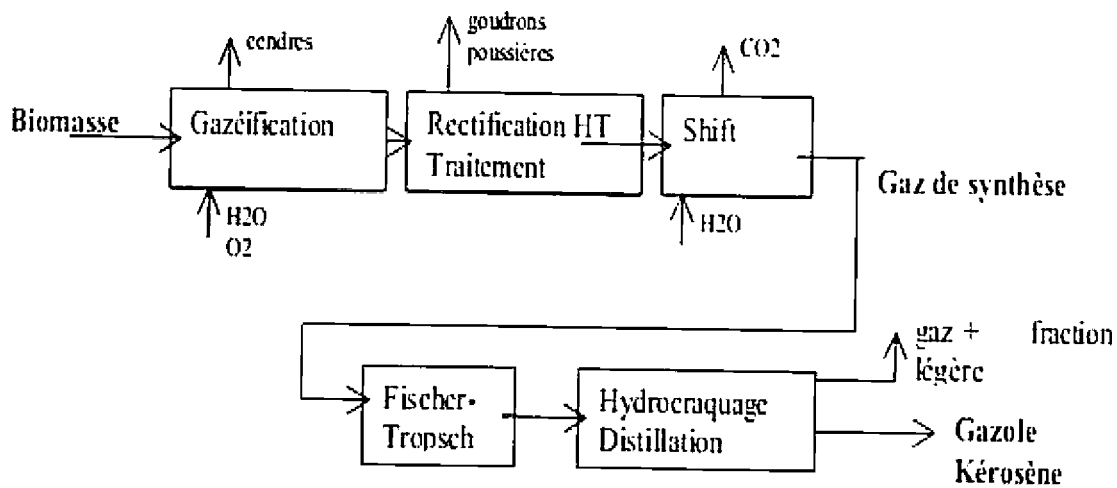
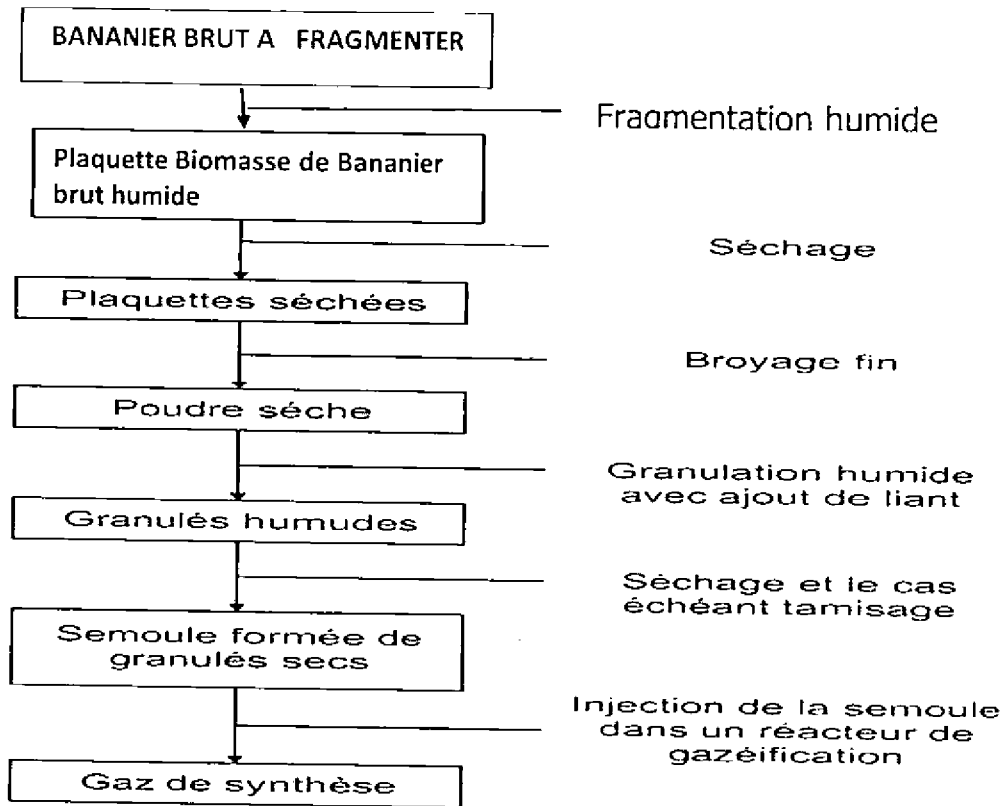


FIGURE IX/XV

Tableau 2. Composition chimique de la biomasse lignocellulosique des parties morphologiques du bananier appartenant au sous-groupe Cavendish : *Musa AAA* — *Chemical composition of lignocellulosic biomass of Cavendish sub group banana's morphological parts: Musa AAA.*

	Parties morphologiques (PAM)				
	Limbes	Nervures + pétioles	Gaines foliaires	Tige florale	Hampe du régime + rachis
Biomasse sèche et humide (%)					
mfPAM ^a (% mfPE)	13,00	9,25	17,83	8,92	3,85
mfPAM ^b (% mfPAM _T)	24,60	17,50	33,74	16,88	7,28
msPAM ^c (% mfPAM)	16,50	9,80	3,40	7,80 ^d	9,80 ^d
msPAM ^e (% mfPE)	4,06	1,72	1,15	1,32	0,71
Composition chimique^f (% msPAM^{ab})					
Cellulose	20,70	39,50	37,10	14,40	28,40
Hémicellulose	8,60	21,50	11,40	5,50	7,50
Lignine	24,30	18,00	13,30	10,70	10,50
Amidon	1,10	0,40	8,40	26,30	1,40
Protéines	8,30	1,60	1,90	3,20	2,00
Lipides	8,40	2,10	3,50	2,50	2,90
Cendres	19,40	11,60	19,00	26,10	26,80
ESSE	1,23	0,57	3,03	2,13	0,94
Pectines et autres	7,97	4,73	2,37	9,17	19,56
Composition chimique^f (% mfPAM)					
Cellulose	0,84	0,68	0,43	0,19	0,20
Hémicellulose	0,35	0,37	0,13	0,07	0,05
Lignine	0,99	0,31	0,15	0,14	0,07
Amidon	0,04	0,01	0,10	0,35	0,01
Protéines	0,34	0,03	0,02	0,04	0,01
Lipides	0,34	0,04	0,04	0,03	0,02
Cendres	0,79	0,20	0,22	0,34	0,19
ESSE	0,05	0,01	0,03	0,03	0,01
Pectines, tanins, etc.	0,32	0,08	0,03	0,12	0,14

PAM : partie morphologique — *morphological part* ; mfPAM : matière fraîche des parties morphologiques — *fresh matter of morphological parts* ; msPAM : matière sèche des parties morphologiques — *dry matter of morphological parts* ; mfPE : matière fraîche de la plante entière — *fresh matter of the entire plant* ; mfPAM_T : matière fraîche totale des parties morphologiques — *total fresh matter of morphological parts* ; ESSE : extraits de sucres solubles dans l'eau — *solubles sugar extracts in water* ; ^a : Lassoudière, 2007 ; ^b : Subramanian et al., 1988 & Viswanathan et al., 1989 ; ^c : Oliveira et al., 2007 ; ^d : déduction de ^a, ^b, ^e — *deduction from ^a, ^b, ^e*.

Tableau 3. Composition chimique totale de la biomasse lignocellulosique des parties morphologiques du bananier appartenant au sous-groupe Cavendish : *Musa AAA* — Total chemical composition of lignocellulosic biomass of Cavendish sub-group banana's morphological parts: *Musa AAA*.

Composants chimiques	Teneur (%)	Total
Composition chimique totale des PAM étudiées (% msPAM_T)		100
ESSE	1,45	
Cellulose	26,09	
Hémicellulose	10,89	
Amidon	5,63	
Lignine	18,58	
Protéines	4,94	
Lipides	5,26	
Pectines et autres	7,73	
Cendres	19,43	
Monosaccharides^c (% sucre simple)		
Pentoses - Xyl	16,5	25,5
- Ara	9,0	
Hexoses - Glu	69,0	74,5
- Gal	2,5	
- Man	2,0	
- Rha	1,0	
Éléments minéraux^c (% cendres)		100
Si	34	
Ca	19	
K	40	
P	2	
Mg	3	
Autres	2	

Source : déduction de ^a, ^b et ^c du tableau 2 — deduction from ^a, ^b and ^c of table 2 ; ESSE : extraits de sucres solubles dans l'eau — soluble sugar extracts in water ; msPAM_T : matière sèche totale des parties morphologiques étudiées — total dry matter of studied morphological parts ; PAM : partie morphologique — morphological part ; ^a : Oliveira et al., 2007.

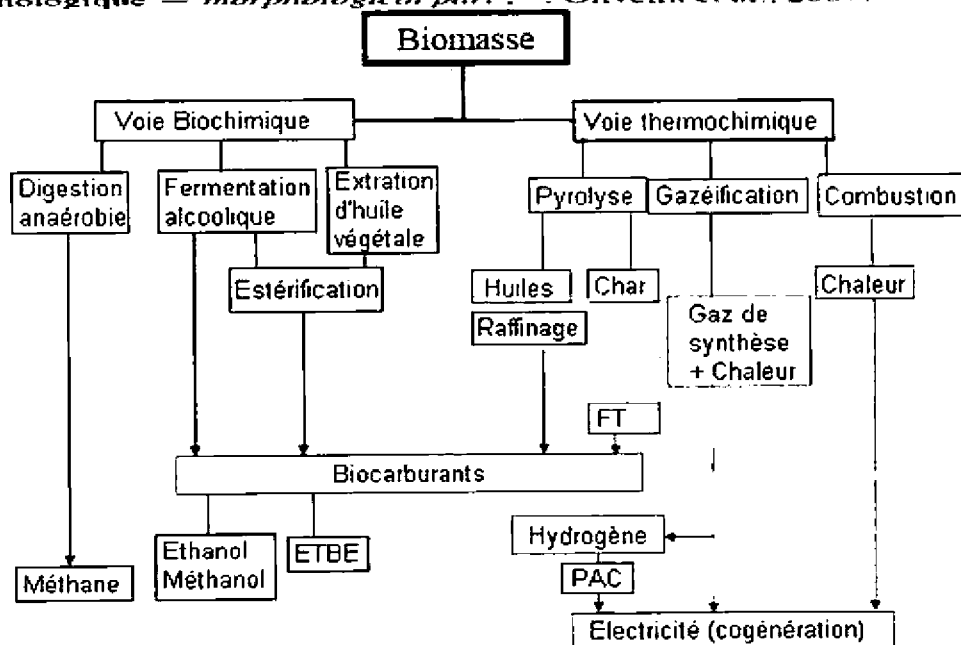


FIGURE XI/XV

à d'autres produits, comme du méthanol [25], le dimethyl-ether, du méthane, de l'éthanol [26] ou des hydrocarbures via le procédé Fischer-Tropsch.

Tableau 4. Conversion des données – Data conversion.

Production du biogaz ¹ contenant en moyenne 60 % de CH ₄ (conditions normales de température et de pression)	
Molécules	Biogaz contenant en moyenne 60 % de CH ₄ (l kg ⁻¹)
Protéines	700
Lipides	1250
Sucres fermentescibles	746
Production du bioéthanol ² en l ou kg (par kg de sucre)	
1 kg de sucre (hexoses et pentoses)	0,49 ³ kg ou 0,62 ⁴ l de bioéthanol
Production des pellets ⁵ en kg (par kg de biomasse sèche)	
1 kg de biomasse hémocellulosique sèche	1,11 kg de pellets
Conversion énergétique	
Molécules	Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) en J·kg ⁻¹ ou J·m ⁻³
Glycides	18,72 × 10 ⁶ J·kg ⁻¹
Protéines	16,92 × 10 ⁶ J·kg ⁻¹
Lipides	37,69 × 10 ⁶ J·kg ⁻¹
Lignine	26,64 × 10 ⁶ J·kg ⁻¹
CH ₄ gazeux	35,78 × 10 ⁶ J·m ⁻³
Biogaz (contenant en moyenne 60 % de CH ₄)	21,46 × 10 ⁶ J·m ⁻³
EiOH	21,28 × 10 ⁶ J·kg ⁻¹

¹ Heico, 2007. ² Daldren et al., 2008. ³ Naessens, 2008. ⁴ production moyenne des autres herbacées (paille⁶ et Miscanthus⁷) – average production of other herbaceous (straw⁶ and Miscanthus⁷).

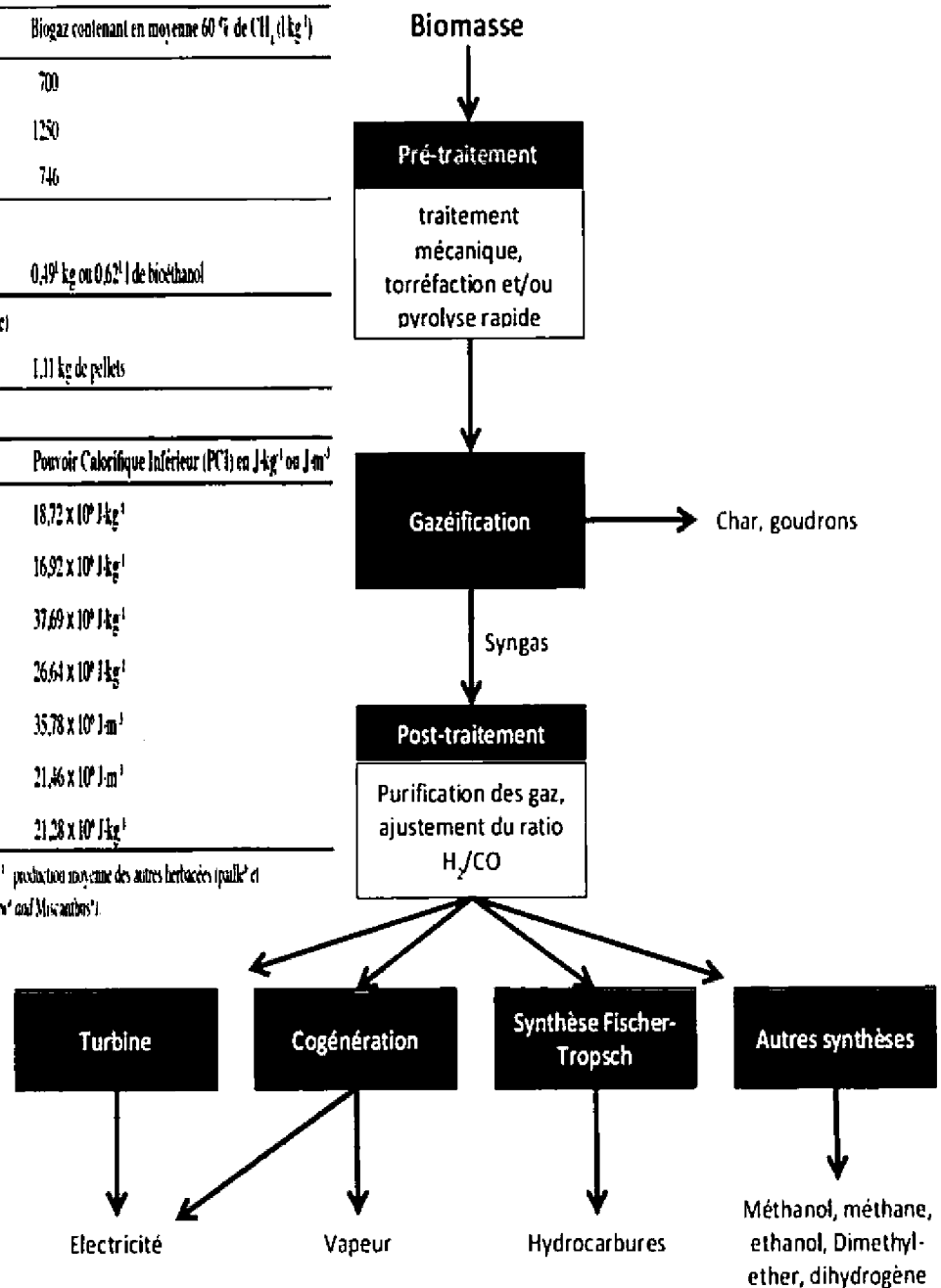
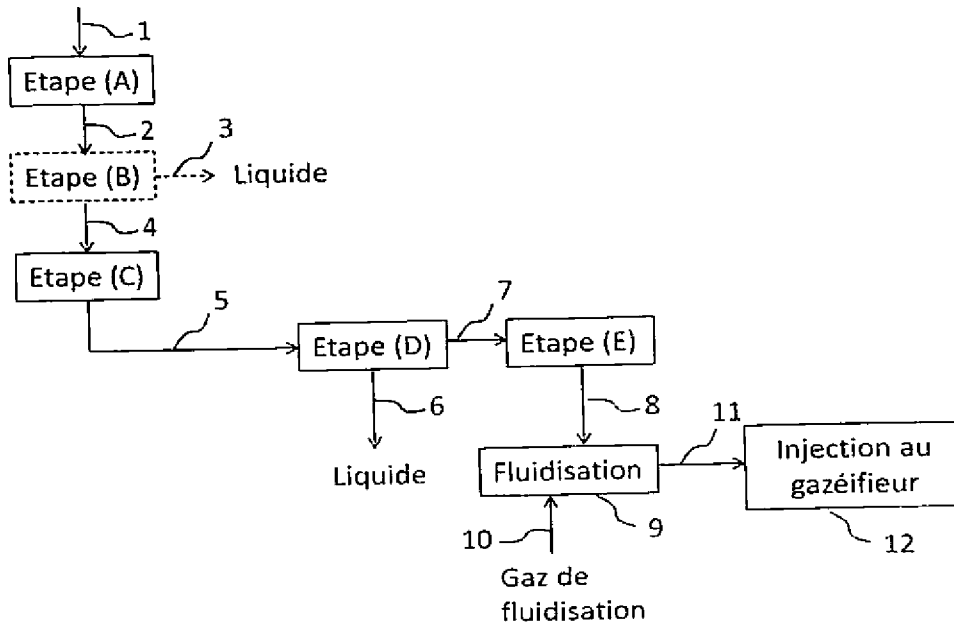


FIGURE XII/XV

Biomasse lignocellulosique de bananier



Biomasse lignocellulosique de bananier

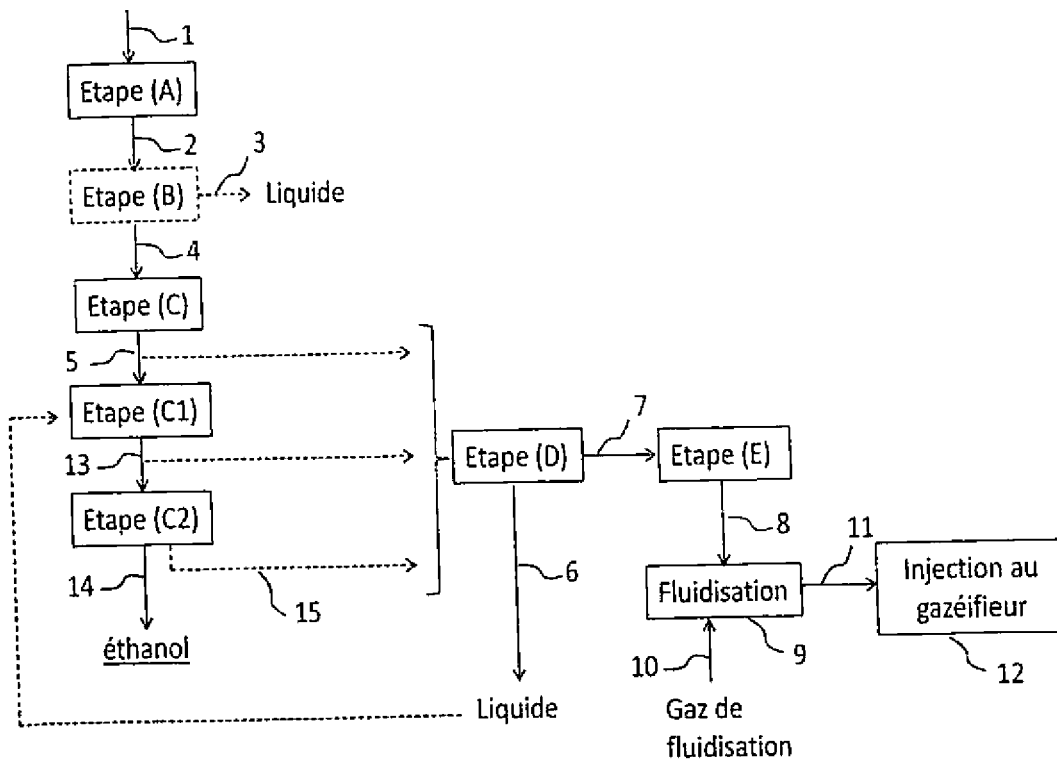


FIGURE XV/XV