

REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LES PRINCIPALES METHODES DE VALORISATION DES RESIDUS LIGNOCELLULOSIQUES

Bangala, M. ¹, Lumpungu, K. ¹, Sumbu, Z. ¹, Kizungu, V. ¹, Dibaluka, M. ²,
Ngombe, K. ³, Luyindula, N. ⁴, Gerin, P. ⁵, Masimango, N. ¹

- 1 : Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa
- 2 • Faculté des Sciences de l'Université de Kinshasa
- 3 : Faculté de Pharmacie de l'Université de Kinshasa
- 4 : Commissariat Général à l'Energie Atomique/Centre de Recherche Nucléaire de Kinshasa
- 5 : Faculté d'Ingénierie Biologique, Agronomique et Environnementale de l'Université Catholique de Louvain

Résumé :

Les résidus végétaux ou lignocellulosiques sont issus de la végétation naturelle, de l'activité agricole, agro-industrielle ou de l'industrie du bois. La lignocellulose constitue le support structural de la plante et la matrice qui la protège contre les stress de diverses natures. Elle est constituée essentiellement de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine. Produits en grandes quantités dans le monde, ces résidus sont généralement utilisés comme source énergétique, engrais organique ou fourrage.

Cependant, lorsqu'ils ne sont pas complètement utilisés, ils constituent une importante source de pollution environnementale, parce qu'ils sont difficilement dégradés à cause de la présence de la lignine très résistante aux méthodes courantes de dégradation physique, biologique et chimique. C'est la raison pour laquelle, la valorisation des résidus lignocellulosiques exige souvent la mise en œuvre d'une ou de plusieurs méthodes de prétraitement.

Dans cet article, les éléments devant faciliter la mise en place d'une bonne stratégie de valorisation de ces résidus, c'est-à-dire, la compréhension de structure de la lignocellulose, la connaissance de principales méthodes de prétraitement devant faciliter leur valorisation et la mise en place d'une politique adéquate de leur gestion sont revus dans cet article.

Mots clés : résidus, lignocellulose, pollution, environnement, cellulose, biologique

LITERATURE REVIEW ON THE MAIN METHOD OF LIGNOCELLULOSIC RESIDUES VALORISATION

Summary.'

Lignocellulosic residues come from natural vegetation, agricultural activity, agro-industry or the wood industry. Lignocellulose is the structural support for the plant and the matrix which protects it against the stress of various kinds.

It consists mainly of cellulose, hemicelluloses and lignin. Produced in large quantities in the world, these residues are generally used as an energy source, organic fertilizer or fodder. However, when they are not fully used, they are an important source of environmental pollution because they are not easily degraded due to the presence of lignin which is very resistant to common methods of physical, biological and chemical degradation. This is the reason why the recovery of lignocellulosic residues often requires the implementation of one or more pre-treatment methods. In this article, the elements to facilitate the establishment of a good strategy of recovery of such residues, that is to say, understanding of lignocellulose structure, knowledge of the main methods of pretreatment to facilitate their valorisation and the establishment of adequate management policies are reviewed in this article.

Keywords: residues, lignocellulose, pollution, environment, cellulose, organic

1. INTRODUCTION

Les résidus végétaux ont pour origine la végétation naturelle ou sauvage, les sous-produits de l'agriculture, l'agro-industrie, la sylviculture, la foresterie ainsi qu'une partie d'ordures ménagères solides. Ils sont aussi appelés résidus lignocellulosiques en raison de leur composition chimique dominée par la présence de trois constituants majeurs de la paroi secondaire de la cellule végétale : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine [1] [2].

Ces résidus sont abondamment produits dans le monde ; la détermination de leur quantité à l'échelle locale et nationale est pertinente dans la planification d'une stratégie de leur valorisation mais la faisabilité d'une telle opération est très faible à cause de la diversité de leurs sources ou provenances et de la saisonnalité de ces résidus [3]. Cependant, en ce qui concerne les résidus produits par l'agriculture et l'agro-industrie, plusieurs pays du monde tentent d'en déterminer la quantité produite annuellement, cela leur permet d'en planifier la valorisation. A titre d'exemple, en 2008, la Chine a estimé à 710.106 tonnes la quantité de paille de céréale produite sur son sol [4].

Les voies usuelles de valorisation des résidus lignocellulosiques sont la production énergétique, la fertilisation organique du sol et l'alimentation du bétail. Koopmans et Koppejan (1997) [3] résumant les usages courants des résidus lignocellulosiques en 6F : « Fuel, Fodder, Fertilizer, Fibre, Feedstock and Further uses » (carburant, fourrage, engrais, fibre, nourriture et autres). Bien qu'une grande portion des résidus lignocellulosiques est recyclée, la portion non utilisée est aussi importante. Cette dernière est soit abandonnée ou brûlée au lieu de leur production [4], soit jetée dans de cours d'eau causant un impact environnemental négatif. La lignocellulose renferme des composés facilement assimilables par les organismes vivants, micro ou macroscopiques. Il s'agit essentiellement de la cellulose et des hémicelluloses qui sont des glucides.

Dans la paroi secondaire des plantes ces glucides, et d'autres composés facilement biodégradables qui leur sont associés, sont rendus indisponibles ou résistantes aux attaques des diastases de la plupart des organismes prédateurs grâce aux liaisons covalentes et non covalentes qui les attachent à la lignine pour former la lignocellulose, complexe très résistante à la dégradation et responsable de la protection structurale et fonctionnelle de la plante [5]. A la mort de la plante, ce complexe devient la principale difficulté de la minéralisation des plantes mortes et de l'utilisation des résidus lignocellulosiques. Ceux-ci peuvent même arriver à résister à une désagrégation physique et chimique non drastiques.

Les questions importantes relatives à la gestion de résidus lignocellulosiques issus de la végétation naturelle, de l'agriculture, de l'agro-industrie et de l'industrie du bois ainsi que les principales méthodes de leur prétraitement, en vue d'en tirer profit, sont revues dans ce document.

II. Constituants de la paroi secondaire de la plante

Il existe des méthodes physiques, chimiques et biologiques de prétraitement des résidus de plantes. La compréhension de l'importance de la lignocellulose et des prétraitements à faire subir à cette dernière passe par la connaissance de la composition de la paroi secondaire de la plante. Généralement la cellulose et les hémicelluloses sont assez facilement affectés par ces moyens, mais la lignine, matrice imprégnant les deux précédents polymères dans la paroi secondaire de la plante, est une substance très difficile à dégrader.

La paroi cellulaire est l'élément majeur déterminant la forme de la cellule, c'est par elle que la plante communique avec son environnement. Elle protège la plante contre les organismes pathogènes, les stress biotiques et abiotiques ainsi que d'autres nuisances, elle participe aussi au transport de l'eau et des éléments nutritifs [6] [7].

Elle est principalement constituée des molécules de cellulose, des hémicelluloses, de lignine, de pectine et des protéines végétales. La Cellulose, les hémicelluloses et la pectine sont des polysaccharides, les lignines sont des polymères phénoliques et les protéines sont des polymères d'acides aminés.

La proportion relative de ces polymères varie selon l'espèce, le type cellulaire et l'étape de développement de la plante. Mais en moyenne, la paroi cellulaire est constituée par 30-60⁰/0 de cellulose, 30⁰/0 des hémicelluloses, 15-30⁰/0 des lignines et 5-10⁰/0 des protéines [51] [8] [9].

11.1 Constitution de la cellulose

La cellulose est le principal composant structural fournissant la force et la stabilité aux parois cellulaires des plantes. La quantité de cellulose, l'orientation des liaisons osidiques et l'importance des ponts hydrogènes entre molécules dans les matières lignocellulosiques influencent leurs propriétés, celles-ci peuvent être exploitées pour certaines applications industrielles.

Par exemple, des fibres contenant beaucoup de cellulose seront préférées pour la fabrication de papier, de textiles ou d'autres applications de ce type [10] [11].

La cellulose est considérée comme étant le bio polymère le plus abondant sur terre. Elle est constituée par des molécules de glucose formant des liaisons D-glucoyranoses appelées microfibrilles. Il compose 1530⁰/0 de la paroi cellulaire primaire et 50-60⁰/0 de la paroi cellulaire secondaire [6] [12].

La microfibrille est l'unité structurale de la cellulose, elle est constituée des fibrilles élémentaires d'un nombre moyen d'environ 36 chaînes de β -(1,4)D-glucan. Elles se maintiennent ensemble par des ponts hydrogènes. Ainsi, elles peuvent aussi s'associer aux polysaccharides non celluloses.

A l'échelle des microfibrilles, la cellulose peut apparaître sous forme cristalline (cellulose cristalline), mais un petit pourcentage des chaînes de cellulose est non organisé (cellulose amorphe) [13]. La cellulose cristalline est très récalcitrante à la dégradation enzymatique tandis que la cellulose amorphe y est plus sensible, en raison de la meilleure accessibilité qu'elle offre aux enzymes [14] [15].

11.2 Constitution des hémicelluloses

Le terme hémicellulose désigne un groupe hétérogène de chaînes glucidiques pas ou très peu cristallisées et dont le nombre d'unités glucidiques est de l'ordre de 300. Leur structure semble favoriser une orientation parallèle aux

microfibrilles de cellulose, créant parfois des liens hydrogènes très forts avec celle-ci. C'est pourquoi les hémicelluloses sont typiquement solubilisées dans des solvants capables d'hydrolyser ces liens comme des traitements alcalins croissants.

Les hémicelluloses sont constituées des homo et heteropolymères comprenant dans leurs structures un ou plusieurs de ces sucres : du β -(1,4)-D-xylopyranose, du mannopyranose, glucopyranose et du galactopyranose au niveau de la chaîne principale où se greffent un certain nombre des substituants [16]. Ces substituants pouvant être des acides 4-O-méthylglucuroniques, D-galacturoniques et D-glucuroniques. Les oses sont liés entre eux par des liaisons osidiques [3-1,4 et occasionnellement β -1,3 [15]

11.3 Structure et composition de la lignine

La lignine est présente dans les parois cellulaires des plantes dont elle constitue le support structural ; elle les raidit pour en protéger les hydrates de carbone des dommages chimiques et physiques, confère aux tissus des plantes et aux cellules individuelles la solidité, l'imperméabilité, la résistance contre les attaques microbiennes et le stress oxydatif [11] [15].

La lignine est déposée au moment de la maturation des parois cellulaires, et certains hydrates de carbones s'y associent. Etant donné que la constitution en lignines et en hémicelluloses diffèrent, les liaisons entre ces polymères diffèrent d'une plante à une autre et d'un tissu à un autre.

Le contenu en lignine des matières lignocellulosiques influence leurs structures, leurs propriétés, leurs morphologies, leurs flexibilités et leurs vitesses d'hydrolyse.

Les fibres avec un contenu en lignine important semblent plus fines et sont moins flexibles

La lignine comprend 3 principaux constituants de base l'alcool pcoumarique (p-hydroxyphenyl propanol), l'alcool coniferylique (guaiacyl propanol), et l'alcool synapylique (syringyl propanol) [16].

La lignine des bois tendres a l'alcool coniferylique comme principal constituant ; celle des bois durs est constituée des unités d'alcools guaiacyl et syringyl, tandis que celle des herbes est plutôt constituée des unités de guaiacyl, de syringyl et de p-hydroxyphenyl [16].

Les liaisons entre les unités monomériques de la lignine sont identiques pour les bois durs, les bois tendres et les plantes herbacées.

La lignine ainsi synthétisée s'associe à la cellulose et aux hémicelluloses par des liaisons covalentes et non covalentes rendant ainsi la paroi végétale résistante aux divers stress mais paradoxalement cela devient aussi un facteur rendant difficile la minéralisation et l'élimination de ces résidus.

III. L'origine et la gestion des résidus lignocellulosiques

Origine des résidus lignocellulosiques

Les résidus lignocellulosiques proviennent principalement de la végétation naturelle ou sauvage, l'industrie du bois, l'activité agricole et agroindustrielle

La végétation naturelle herbacée, essentiellement graminéenne, croissant vigoureusement en saison pluvieuse et qui s'assèche en saison sèche constitue une importante source des résidus lignocellulosiques. Cette catégorie de résidu est généralement brûlée pendant la saison sèche et est souvent à la base de la pollution atmosphérique.

Les principales productions de l'exploitation forestière et de l'industrie du bois à la base de la génération des résidus lignocellulosiques sont : les grumes, les tranchages, les contreplaques, les bois sciés, le placage, le bois de chauffage [3] [17]. Elles produisent des copeaux et de la sciure de bois ainsi que d'autres fragments de bois de taille variable.

La production agricole s'accompagne d'une importante portion des résidus ou sous-produits. Une importante part de ces derniers retourne directement en terre comme engrais organique et l'usage réservé au reste est déterminant dans la gestion environnementale du site de production [4]. Les résidus lignocellulosiques issus de la production agricole sont très diversifiés selon les cultures qui les engendrent, il y a de la paille (céréales), des tiges, des troncs, des feuilles, etc. [18]

Les résidus lignocellulosiques agro-industriels proviennent de l'usinage d'un produit agricole particulier [18]. Ces sous-produits sont obtenus, d'une manière générale, en grande quantité à l'échelle industrielle. Cependant, il existe aussi des productions à petite échelle, familiales ou artisanales.

Une autre caractéristique de ces résidus est leur délocalisation par rapport au lieu de production des cultures qui les engendrent ; la conséquence est que contrairement aux résidus provenant directement de l'agriculture, ils n'interviennent pas directement dans la fertilisation organique du sol et sont donc, soit plus disponibles en vue d'une autre forme de valorisation ou alors ils sont impliqués dans la pollution environnementale, dans le cas où ils ne

trouvent aucun usage. Ces résidus sont constitués de : parches (café), coques (arachides, palmier), balles (riz), des rafles (maïs), bagasses (canne à sucre), drêches (orge), pulpes (fruits), etc.

Une dernière source des résidus lignocellulosiques est une partie d'ordure ménagère provenant directement des marchés des légumes et fruits.

Principaux usages

Production énergétique : Dans les pays en voie de développement, à cause du coût élevé des produits pétroliers et de l'électricité, la lignocellulose intervient pour environ 90⁰/0 dans la production énergétique [1]. C'est ainsi que plusieurs pays en voie de développement étudient des mécanismes de valorisation des résidus agricoles, agro-industriels et de l'industrie du bois.

La sciure de bois, sous-produit provenant de l'industrie du bois, est parfois utilisée en remplacement des braises, mais cela exige un brasier d'un type spécial. Dans la ville de Kinshasa, l'utilisation de la sciure de bois dans la cuisson peut servir au remplacement, au niveau des ménages, du charbon de bois ou du bois de chauffe qui seraient responsables de la déforestation intense de la périphérie de la ville de Kinshasa, selon une étude menée en 2011 [19].

Les résidus lignocellulosiques peuvent être utilisés pour la production des biocarburants et des biogaz en remplacement aux combustibles traditionnels fossiles. Cette démarche devient d'autant plus urgente qu'actuellement, il se pose le double problème du réchauffement climatique global et d'épuisement attendu des réserves de pétrole. Les biocarburants issus de la lignocellulose, appelés biocarburants de deuxième génération, possèdent aussi l'avantage d'éviter la compétition qui existe entre les biocarburants de première génération et l'alimentation humaine [11].

D'autres utilisations :

La lignocellulose constitue un bon substrat pour la production des champignons comestibles[20][21]

Les différentes fractions de la lignocellulose peuvent être valorisées séparément .

La cellulose et les hémicelluloses : production des alcools et acides organiques [23];

La cellulose peut intervenir dans la production de sucre (glucose) [24], la fabrication des polymères spéciaux tels que la viscose, le méthylcellulose, l'hydroxyméthylcellulose et le carboxyméthylcellulose [23], la pâte à papier les additifs et liants utilisés dans la préparation des comprimés, gélules ou

granulés [26], la nitrocellulose utilisée dans l'industrie des explosifs [25], la cellophane et la rayonne viscosse [27], les épaississants utilisés dans l'industrie des peintures [25], les échangeurs d'ions [25], les matériaux thermoplastiques [23], etc.

Les hémicelluloses entrent dans la fabrication des sucres, tels que le xylose, le glucose, l'arabinose par hydrolyse acide [5], la production d'alcool (éthanol, butanol) par fermentation de ces sucres [28], la production d'acides organiques (butyrique, acétique, lactique) [28][25].

La lignine sert à la fabrication du méthanol par gazéification [25], la production du diméthylsulfoxyde (DMSO) [29], la synthèse du phénol, du catéchol, du benzène et de leurs dérivés [23], la préparation de résines du type phénol-formaldéhyde, l'obtention de polyuréthanes à partir de polyols obtenus par hydroxyalkylation de la lignine avec différents oxydes d'alkyles, la fabrication de plastiques thermostables par copolymérisation avec des oxydes d'alkyles, etc.

Disponibilité :

La disponibilité des résidus lignocellulosiques peut varier considérablement d'une saison à une autre ou d'un endroit à un autre. Cet aspect des choses important est à prendre en compte lors de la mise en œuvre d'un processus de la valorisation des résidus.

Toute démarche visant la valorisation en dehors de la fertilisation directe, doit tenir compte de la quantité des résidus disponibles et de la portion devant être maintenue sur le sol [30].

C'est à cette fin que plusieurs travaux d'évaluations qualitatives et quantitatives ont été effectués par quelques auteurs en vue de répertorier, classier et quantifier les résidus lignocellulosiques disponibles. Koopmans et Koppejan (1997) [3] ont tenté d'estimer, partant de statistiques officielles et de certaines approximations, la production des résidus végétaux issus de diverses origines agro-forestières et agro-industrielles dans certains pays d'Asie. Ils ont en outre donné les principaux usages réservés à ces sousproduits.

Singh et al. (2008) [133] ont tenté d'évaluer la quantité totale des résidus agricoles produits et leur localisation spatiale, dans l'état de Punjab en Inde. Pour ce faire, ils ont utilisé les statistiques officielles de production agricole et le système d'information géographique.

Quelques pays africains se sont aussi investis dans cette démarche de quantification et valorisation. C'est le cas du Maroc où Rafrari et Kabil (2006)

[34] préoccupés par la lutte contre la réduction du taux en matière organique dans les sols, qui pourrait être accompagnée de la dégradation de la structure du sol et de la détérioration de sa fertilité chimique mettant ainsi en cause la durabilité des systèmes de production, ont estimé la quantité des résidus agricoles produits au Maroc pouvant être utilisés pour le compostage.

Généralement, des telles évaluations sont faites dans l'objectif principal d'utiliser ces résidus pour la production énergétique [30], mais ces informations peuvent aussi servir à d'autres types de valorisation de ces résidus tels que la production des biopolymères [31], l'établissement d'un circuit permanent de production des champignons comestibles, etc.

En RDC, les statistiques de la production agricole et de l'industrie du bois sont disponibles au niveau provincial et national [32] mais il n'existe pas encore des statistiques de production des résidus. Or ces données sur la quantification des résidus, en cas de leur surabondance, peuvent être utiles pour la mise en place d'une politique visant leur gestion.

A cause de la nature résistante de la matrice lignocellulosique, il est conseillé qu'en amont des opérations impliquant la production des bioproduits ou de l'énergie à partir des résidus végétaux, en dehors de la combustion directe, de recourir d'abord aux prétraitements physiques, chimiques ou biologique pour obtenir un bon rendement [35].

Les résidus étant des sous-produits ou « déchets », la combinaison duréemoyens-rendement de traitement est très importante. Il est essentiel de mettre en œuvre des méthodes permettant d'obtenir un rendement acceptable avec des moyens et une durée raisonnables. IV. Prétraitements des résidus lignocellulosiques

IV. 1. Principales méthodes

Les prétraitements des résidus de végétaux ont pour principal objectif de désagréger la matrice lignocellulosique et rendre accessibles les constituants de la paroi secondaire des plantes afin qu'ils soient ultérieurement valorisables.

L'efficacité d'un prétraitement ou traitement est fonction de certaines exigences : faible coût, peu lourd ou sophistiqué, applicable à une large gamme et une grande quantité, rendant disponible les fractions désirées, ne créant, ni ne maintenant des inhibiteurs, etc.

Les méthodes de traitement (ou de prétraitement de la lignocellulose) sont catégorisables en 4 principaux groupes : les méthodes physiques, chimiques, biologiques et les méthodes mixtes [35].

Les méthodes physiques sont divisées en traitements mécaniques, par la température, par la pression, etc.

Quelques méthodes physiques :

Les traitements mécaniques : réduction grossière de dimension, mouture, déchiquetage, broyage. Ces méthodes réduisent la taille des fibres, augmentent la digestibilité des produits lignocellulosiques, parce qu'elles augmentent la surface spécifique disponible, réduisent le degré de polymérisation et le degré cristallin de la cellulose. La réduction de taille facilite le transfert plus rapide de chaleur et de masse (vapeur, mycélium, etc.). Cependant, une réduction de biomasse plus poussée peut entraver la circulation d'air et bloquer la circulation d'eau.

L'explosion à la vapeur : dans celle-ci, les résidus sont pressurisés avec la vapeur pendant une période de temps ; ensuite, survient une décompression rapide. Il se produit alors une réaction explosive qui agit sur la structure de la lignocellulose. Cette opération est effectuée sous une haute pression et à haute température (180 à 240 °C). La structure de la lignocellulose est désorganisée et les 3 polymères se séparent, il peut se produire une décomposition des quelques molécules d'hémicellulose en acides uroniques et en acides acétiques [33].

Traitement hydrothermique : le substrat lignocellulosique est traité par l'eau bouillante ou par la vapeur d'eau. Ce traitement intervient dans la séparation des constituants lignocellulosiques en ce qu'il cause un certain nombre d'effets dont l'hydrolyse partielle de l'hémicellulose et la modification des propriétés de la lignine et de la cellulose [33].

Une autre méthode physique est l'usage des rayons gamma qui rompent les liaisons osidiques beta-1,4 ; ce qui augmente la surface de contact et diminue la cristallinité, mais la méthode coûte chère et suscite des craintes pour l'environnement [10] [35]...

Prétraitement chimique : les méthodes chimiques peuvent être divisées en traitements alcalines, traitements neutres et traitements acides.

Certains produits chimiques causent la délignification ou la perturbation de la structure de la lignine [10] [35] :

Alcali : les solutions de NaOH, KOH, Ca(OH)₂, NH₃ causent le gonflement de la lignocellulose, la surface interne augmente, le degré de polymérisation et de cristallinité de la cellulose diminue, perturbent la structure de la lignine et brisent les liaisons lignines-polysaccharides dans la biomasse. L'opération consomme une grande quantité de réactif et n'est pas efficace pour des produits très lignifiés

Acide : les acides concentrés ne sont pas utilisés parce qu'ils sont corrosifs et doivent être neutralisés ou enlevés à la fin du traitement. Les solutions de l' H_2SO_4 , l' HCl (inférieurs à 4⁰/0 pondéral) sont utilisées pour hydrolyser les hémicelluloses et rendre la cellulose plus disponible. Ils doivent être neutralisés à la fin.

Les solvants organiques : la lignocellulose est parfois traitée par des solvants organiques liquides tels que l'éthanol, le butanol, le phénol ou d'autres, en présence d'un catalyseur. Il se produit alors l'hydrolyse des liaisons aussi bien entre la lignine et les hydrates de carbones qu'avec les hydrates de carbones entre eux [33].

Les traitements biologiques : les méthodes biologiques comprennent les traitements par les microorganismes et les traitements enzymatiques.

Dans la nature, c'est la dégradation par la voie biologique qui s'impose. Le premier traitement biologique le plus pratiqué, et cela depuis des siècles, est le compostage. Dans ce cas, les résidus lignocellulosiques sont tassés en couches d'environ 65 à 75 cm d'épaisseur ; ils sont ensuite humidifiés et retournés. Ce traitement favorise l'invasion du substrat lignocellulosique par la microflore naturelle qui effectue le compostage. Tuomela et al. (2000) [36] a effectué une étude sur la succession naturelle de différentes espèces de la microflore au cours du processus de compostage.

Une désagrégation biologique complète de la lignocellulose, vue sa complexité structurale et chimique exige un équipement enzymatique tout aussi complexe. Elle s'opère par une succession d'organismes partant de ceux qui sont capables d'attaquer les organismes vivants, c'est-à-dire, les pathogènes ou parasites, ensuite de ceux qui peuvent coloniser directement la lignocellulose non modifiée et enfin de ceux qui s'attaquent aux résidus de la désagrégation de la matrice lignocellulosique [7].

Lorsque la matrice lignocellulosique devient désorganisée, suite à la dégradation de la lignine, la dégradation de la cellulose et des hémicelluloses est facilitée.

La plupart des organismes cellulolytiques appartiennent au groupe des Eubactérie et des Fungi. Cependant il y a aussi quelques protozoaires anaérobies et les moules de boue (*Physarum leucophaeum*) qui sont capables de dégrader la cellulose.

Dans les déchets riches en cellulose, les organismes cellulolytiques sont capables de créer des interactions avec les organismes non cellulolytiques. Ces interactions aboutissent à une dégradation complète de la cellulose avec une libération de gaz carbonique et de l'eau en présence de l'air. En anaérobiose, il y a libération du gaz méthane, du gaz carbonique et de l'eau [37].

Les microorganismes capables de dégrader la cellulose produisent plusieurs types d'enzyme, avec diverses spécificités, mais agissant ensembles. Les

cellulases hydrolysent les liaisons glucosidiques p-1,4 de la cellulose. Traditionnellement, ces enzymes sont divisés en deux classes : Les endoglucanases et les cellobiohydrolases. Les endoglucanases (endo-1,4- β glucanases, EGS) peuvent hydrolyser les liaisons intramoléculaires (dans les régions amorphes de la cellulose préférentiellement) ce qui aboutit à de nouvelles terminaisons de la molécule.

Les cellobiohydrolases (exo-1,4- β -glucanases, CBHs) exercent leur activité sur les terminaisons d'une chaîne de cellulose existant ou sur les nouvelles chaînes formées par les EGS. Toutes ces enzymes sont capables de dégrader la cellulose sous la forme amorphe, sauf certaines exceptions. Par contre, seules les CBHs sont des enzymes capables d'hydrolyser la cellulose sous la forme cristalline. Les CBHs et EGS libèrent les molécules de cellobiose.

C'est ainsi qu'une hydrolyse effective de la cellulose requiert aussi la présence des β -glucosidases qui hydrolysent la cellobiose en 2 molécules de glucose. Les produits de la cellulolyse sont les sources d'énergie et de carbone pour les organismes cellulolytiques et autres organismes microscopiques vivant dans le milieu où elle se produit. Ainsi la libération des sucres assimilables partant de la cellulose est le principal moteur d'interaction existant entre micro-organismes et autres organismes vivant dans ces environnements. Les endoglucanases, exoglucanases et les β glucosidases doivent être stables dans l'environnement extracellulaire pour fonctionner correctement, elles peuvent former un complexe ternaire avec le substrat [15].

L'hémicellulose est dégradée en sucres monomères et en acide acétique. Les hémicellulases sont généralement classifiées en fonction des types de substrats sur lesquels elles agissent, des types de liaisons qu'elles hydrolysent et des types de produits formés. Le xylane (polymère de β Xylose) est le principal hydrate de carbone trouvé dans l'hémicellulose. Sa dégradation complète requiert l'action concertée d'une variété d'enzymes hydrolytiques. Une importante distinction doit être faite entre l'endo-1,4- β xylanase (EC 3.2.1.8) et la 1,4- β -xylosidase (EC 3.2.1.37). La première génère des oligosaccharides à partir du clivage des xylanes tandis que la seconde produit des xyloses à partir des polysaccharides du xylane. La dégradation de l'hémicellulose requiert aussi des enzymes accessoires telles que la xylane estérase, les estérases feruliques et le p-coumariques, l'ct-larabinofuranosidases, et l'a-4-O-methyl glucuronosidases agissant pour l'hydrolyse des xylanes et des mannanes (polymère de mannose de haut poids moléculaire) du bois [16].

La dégradation de la lignine, dans la nature, est généralement effectuée par les white-rot fungi (champignons de pourriture blanche), qui sont des Basidiomycètes, et plus rarement, par des Ascomycètes. Ces white rot fungi

notés wrf, qui sont les plus fréquents organismes de pourriture du bois, sont capables de dégrader la cellulose, les hémicellulose et la lignine. Il en existe deux types, les wrf à action « simultanée » et les wrf à action « séquentielle ». Les WRF « simultanés » dégradent les hydrates de carbone et la lignine quasiment à la même vitesse. Les wrf « séquentiels » dégradent d'abord la lignine et les hémicelluloses, ce qui laisse un substrat enrichi en cellulose [38].

Les modifications provoquées au cours de la désagrégation de la lignocellulose par les wrf sont dépendantes de l'espèce ou de la catégorie du white-rot Basidiomycète, des types de substrat ou matière végétale en dégradation et des conditions environnementales [39].

La capacité de cataboliser la cellulose et les hémicelluloses fait partie du métabolisme primaire des fungi. Elle se déroule sous une variété de conditions environnementales avec comme conséquence que ce catabolisme n'est pas considéré comme un facteur limitant dans le cycle du carbone. La lignine, cependant, est extrêmement récalcitrante, résistante à la dégradation. Elle est minéralisée dans un processus oxydatif aérobie strict [140].

La dégradation de la lignine par les WRF est réalisée par des oxydoréductases extracellulaires secrétées par ces derniers. Les enzymes spécifiquement impliqués dans l'attaque de la lignine sont les laccases(Lac), la lignine peroxydase(LiP), les manganèses peroxydases(MnP) et les peroxydases versatiles(VP). D'autres enzymes interviennent également dans le mécanisme global de délignification. Ils sont souvent appelés Enzymes Modifiant la Lignine ou LME (Lignin Modifying Enzymes) [39].

Chaque groupe de wrf produit l'un ou l'autre type d'enzymes lygnolytiques cités plus haut. Les groupes produisant la LiP, la MnP ainsi que le VP semble plus grands dégradeurs que ceux produisant le Lac, sans doute à cause du rôle de la MnP dans la délignification [36] [41].

Les principales réactions catalysées par les enzymes lignolytiques peuvent être résumées en termes de dépolymérisation, démethoxylation, décarboxylation, hydroxylation et ouverture des cycles aromatiques.

Les méthodes mixtes comprennent le couplage des traitements physiques tels que la chaleur, la pression avec des traitements biologiques ou chimiques. Elles tiennent compte des avantages et inconvénients des méthodes couplées et ainsi sont souvent les plus efficaces.

IV.2. Comparaison des avantages et inconvénients de différentes méthodes de prétraitement de la lignocellulose

Sur le plan techno économique, les méthodes physiques (mécaniques, thermiques, pression, etc.) sont généralement énergivores et souvent nécessitent un travail supplémentaire de séparation des sous-produits obtenus. Cela entraîne l'augmentation du coût de traitement et peut influencer sur le rendement économique du produit final obtenu après prétraitement.

Les prétraitements chimiques entraînent aussi un certain coût dû à l'acquisition et à la manipulation des réactifs. Ils nécessitent un minimum de conditions de sécurité pour les manipulateurs et l'usage des équipements assez sophistiqués pour résister à la corrosion. En plus, ils constituent un risque pour l'environnement étant donné que ces produits sont généralement utilisés en grande quantité en fonction de l'abondance des résidus et exigent de fois, l'usage d'autres produits chimiques pour la neutralisation.

Les méthodes biologiques sont préférables sur les plans environnemental, énergétique et économique. Parmi ces méthodes, l'usage des microorganismes présente aussi un intérêt économique parce que ne coûte pas cher mais paradoxalement, elle possède comme principale difficulté, la lenteur du processus de désagrégation de la lignocellulose, ce qui limite son usage à des fins commerciales.

Elle a l'inconvénient d'hydrolyser, en plus de la lignine, les polysaccharides de la matrice lignocellulotique. L'usage des enzymes peut résoudre la difficulté liée à la vitesse du processus et à l'hydrolyse des polysaccharides, mais l'obtention des enzymes purifiés coûte chère et n'est pas un processus économiquement exploitable.

Chaque méthode présentant des avantages et inconvénients, il est rare qu'une méthode soit appliquée seule dans le processus de la valorisation de la lignocellulose. La démarche la plus pertinente consiste à trouver l'équilibre entre les aspects environnementaux, économiques et de durée de traitement.

V. Conclusion

Les résidus lignocellulosiques sont produits en grande quantité à partir de la biomasse végétale. Lorsqu'ils sont mal gérés, ils constituent une importante source de pollution environnementale. Or, de par leur constitution, une bonne gestion de ces résidus permet de les valoriser comme engrais organique, fourrage, source d'énergie et d'en faire une source potentielle des produits utiles pour l'homme.

La démarche de l'identification et de la quantification des résidus végétaux produits dans un site est une exigence très pertinente dans la mise en place d'une procédure efficace de leur valorisation.

La nature résistante de la lignine qui imprègne la cellulose et les hémicelluloses dans la matrice lignocellulosique exige très souvent que les résidus végétaux soient soumis à des prétraitements divers avant la mise en place des mécanismes de valorisation précités. Les prétraitements peuvent être de nature physique, chimique, biologique ou une combinaison des trois ; l'analyse des aspects techniques, économiques et environnementaux est très importante dans le choix du type de prétraitement à appliquer aux résidus à valoriser.

VI. Références bibliographiques

1. Demirbas, A.H. and Demirbas I., (2007). Importance of rural bioenergy for developing countries. *Energy Conversion and Management*. Volume 48, Issue 8, 2386-2398
2. Klass, D (2004). Biomass for renewable energy and fuels. *encyclopedia of energy*. Elsevier Inc., New York.
3. Koopmans, A. and Koppejan, J. (1997). Agricultural and forest residues-generation, utilization and availability. In *Regional consultation on modern applications of biomass (FAO)*. Kuala Lumpur, Malasya.
4. Weizhang, Z., Zhongzhi, Z., Wei, Q., Pengcheng, F., Man, L. (2011). Comparison of chemical and biological pretreatment of corn straw for biogas production by anaerobic digestion. *Renewable Energy*, 36, 1875-1879.
5. Sanchez, C. (2009). Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi *Biotechnology Advances*, 27, 185—194.
6. Vermirris W. (2008). Composition and Biosynthesis of Lignocellulosic Biomass. In *Genetic Improvement of Bioenergy*

Crops (Vermirris W.). Springer Science and Business Media, Florida Gainesville, Chap. 4, 89-142.

7. Gamauf, C., Metz, B. , Seiboth, B. (2007). Degradation of Plant Cell Wall Polymers by Fungi. In Environmental and Microbial Relationships, 2nd Edition (Kubicek C.P. and Druzhinina I. S.) Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Chap. 18, 325-340.
8. Weirtz, JL. (2010). La Lignine. Note de synthèse. AgroBioTech, Gembloux.
9. Malherbe, S. and Cloete, T. E. (2002). Lignocellulose biodegradation: fundamentals
10. Balat M (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. Energy Conversion and Management, 52, 858—875.
11. Reddy, N. and Yang, Y. (2005). Biofibers from a agricultural byproducts for industrial applications. Faculty Publications Textiles, Clothing and Design. Paper 28. Lu le 11.10.2011 au site web • http://digitalcommons.unl.edu/textiles_facpub/28
12. Ding, S.Y. and Himmel, M.E. (2006) The maize primary cell wall microfibril: a new model derived from direct visualization. J. Agric. Food Chem. 54, 597-606.
13. Lang, E., Eller, G. , Zadrazil, F. (1997). Lignocellulose decomposition and production of lignolytic enzymes during interaction of white rot fungi with soil microorganisms. Microbial ecology, 34, 1-10.
14. Hibbett D. S., Bindera M., Bischoff J. F. , Blackwell M., Cannon P.F., Eriksson o.E., Huhndorf S., James T, Kirk P.M., Lucking R., Lumbsch H.T.. (2007). A higher-level phylogenetic classification of the fungi. Mycological research, 111, 509 — 547.
15. Pérez, J., Munoz-Dorado, J., Rubia, T., Martinez, J. (2002). Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. International Microbiology, 5, 53-63.
16. Jeffries, T.W. (1994). Biodegradation of lignin and hemicelluloses. In Biochemistry of Microbial Degradation (Ratledge, C.). Kluwer Academic Publishers, Netherlands, Ch. 8, 233-277.

17. Banque Centrale du Congo. Rapport Annuel 2010
18. Poonam Singh nee' Nigam, Nutan Gupta and Ashish Anthwal (2009). Pre-treatment of Agro-Industrial Residues. In P. Singh nee' Nigam, A. Pandey (eds.), *Biotechnology for Agro-Industrial Residues*
19. Schure, J., Ingram, V., Akalakou-Mayimba, C. (2011). Bois énergie en RDC : Analyse de la filière des villes de Kinshasa et de Kisangani. Projet Makala/CIFOR
20. Dibaluka, M.S., Lukoki, L.F. , De Kesel A., Degreef J. (2010). Essais de culture de quelques champignons lignicoles comestibles de la région de Kinshasa (R.D. Congo) sur divers substrats lignocellulosiques. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 14(3), 417-422.
21. Mshandete, A.M., and Cuff, J. (2008). Cultivation of three types of indigenous Wild edible mushrooms: *Coprinus cinereus*, *Pleurotus flabellatus* and *Volvariella volvocea* on composted sisal decortications residue in Tanzania. *African Journal of Biotechnology*, vol. 7 (24), pp. 4551-4562.
22. Boa E. (2006). Produits forestiers non ligneux 17. Champignons comestibles sauvages. Vue d'ensemble sur leurs utilisations et leur importance pour les populations, <http://www.fao.org/docrep/009/y5489f/y5489f00.htm>. Consulté le 30.04.2011.23
23. James T.Y., Kauff F., Schoch C. L., Matheny P. B., Hofstetter V., Cox C. J., Celio G, Gueidan C. (2006). Reconstructing the early evolution of Fungi using a six-gene phylogeny. *Nature* Volume 443, 818-822
24. McKendry P .(2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology* 83 (2002) 37—46
25. Thiébaud, S. (1995). Valorisation Chimique de Composés Lignocellulosiques : Obtention de Nouveaux Matériaux. Thèse de Doctorat. l'Institut National Polytechnique de Toulouse
26. Taherzadeh, M.J. and Karimi, K. (2008). Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. *Int. J. Mol. sci.*, 9, 1621-1651. McKendry, 2002

PRINCIPALES METHODES DE VALORISATION DES RESIDUS

27. Diamantidis, N.D. and Koukios, E.G. (2000). Agricultural crops and residues as feedstocks for non-food products in Western Europe. *Industrial Crops and Products*, 11, 97—106.
28. Saha, B.C. (2003). Hemicellulose bioconversion. *LJ Ind Microbiol Biotechnol*, 30: 279-291.
29. Glasser, W.G. (1981). Potential role of lignin in tomorrow's wood utilization technologies. *Forest Products Journal*, 31 (3), 24-29.
30. Fischer, G. , Prieler, S. , Velthuizen, H. v. , Berndes, G., Faaij, A. , Londo, M. , Wit M.D. (2010). Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures, Part II: Land use scenarios. *Biomass and bioenergy*, 34, 173 — 187.
31. Ashori, A., Nourbakhsh, A. (2010). Bio-based composites from waste agricultural residues. *Waste Management*, 30, 680—684
32. Ministère de l' Agriculture de la République Démocratique du Congo. *Les Statistiques Agricoles de 2006 à 2009*
33. Singh, J., Panesar, B.S., Sharma, SK. (2008). Energy potential through agricultural biomass using geographical information system—A case study of Punjab. *Biomass and Bioenergy*, 32, 301 _307.
34. Rafrari, M. et Kabil, E.M. (2006). Design and Application of an Innovative Composting Unit for the Effective Treatment of Sludge and other Biodegradable Organic Waste in Morocco. *Faculté des Sciences El Jadida, Université Chouaib Doukkali, Maroc.*
35. Agbor, v.B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A., Levin, D.B. (2011). Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. *Biotechnology Advances*, Volume 29, Issue 6, Pages 675—685.
36. Tuomela, M. , Vikman, M., Hatakka, A., Itavaara, M. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*, 72, 169-183.
37. Béguin, P., Aubert, J. P. (1994). The biological degradation of cellulose. *Microbiology Review*, 13, 25-58
38. Smith, J. F. , Fermor, T. R. and Zadrazil, F. (1988). Pretreatment of lignocellulosics for edible fungi. In *Treatments of Lignocellulosics with White Rot Fungi* (Zadrazil, F., Reigner, P.). Elsevier Applied Science Publishers Ltd, London, Ch. 1, 3-13.

39. Martinez, T. A., Speranza, M., Ruiz-Duenas, J. F., Camarero, P., Guillen, F., Martinez, J. M., Gutierrez, A., Del Rio, C. J. (2005). Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *International microbiology*, 8, 195-204.
40. Pointing, S. B. (2001). Feasibility of bioremediation by white-rot fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57, 20-33
41. Wesenberg, D, Kyriakides, I., Agathos, S. N. (2003). White-rot fungi and their enzymes for the treatment of industrial dye effluents. *Biotechnology Advances*, 22, 161—187.