

UNIVERSITE DE KINSHASA



FACULTE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

Département de Chimie et Industries Agricoles

B.P. 117 Kinshasa XI

ETUDE DES RESIDUS LIGNOCELLULOSIQUES A KINSHASA

**Identification, quantification et valorisation par les "white-rot fungi"
(champignons de pourriture blanche)**

Thèse soutenue publiquement en vue de l'obtention du grade de

Docteur en Sciences Agronomiques

Daniel-Bienvenu Bangala Mada

Ingénieur Agronome / Diplômé d'Etudes Approfondies

Composition du jury

Professeur Sumbu Zola	:	Président
Professeur Dibaluka Mpulusu	:	Secrétaire
Professeur Masimango Ndyanabo	:	Promoteur
Professeur Kalonji Mbuyi	:	Membre
Professeur Lumpungu Kabamba	:	Membre
Professeur Kizungu Vumilia	:	Membre suppléant
Professeur Luyindula Ndiku	:	Membre suppléant

Année académique 2015-2016

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	V
REMERCIEMENTS	VI
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS	XI
RESUME.....	XIII
ABSTRACT	XIV
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. Contexte et justification.....	1
2. Objectifs du travail	2
3. Hypothèses du travail	2
4. Originalité et intérêt du sujet	3
5. Méthodologie.....	3
CHAPITRE 1. REVUE DE LA LITTERATURE.....	4
1.1. PRINCIPALES METHODES DE VALORISATION DES RESIDUS LIGNOCELLULOSIQUES	5
1.1.1. Généralités sur les résidus lignocellulosiques	5
1.1.2. Constituants de la paroi cellulaire secondaire de la plante	6
1.1.3. Origine et gestion des résidus lignocellulosiques	10
1.1.4. Prétraitements des résidus lignocellulosiques	13
1.1.5. Quelques points essentiels sur la valorisation de la lignocellulose	17
1.2. ASPECTS PRATIQUES DE LA VALORISATION DES RÉSIDUS LIGNOCELLULOSIQUES PAR LES "WHITE-ROT FUNGI"	18
1.2.1. Généralités sur les "white-rot fungi"	18
1.2.2. Dégradation de la lignocellulose par les wrf et mode d'action des enzymes lignolytiques	23
1.2.3. Culture des white-rot fungi sur la lignocellulose.....	27
1.2.4. Eléments essentiels sur la valorisation fongique de la lignocellulose	32

CHAPITRE 2. INVESTIGATIONS ET EVALUATION DES RESULTATS.....	33
2.1. MILIEU D'ETUDE ET DESCRIPTION DES SITES DE RECHERCHE.....	34
2.1.1. Milieu d'étude	34
2.1.2. Description des sites de récolte des échantillons des champignons	38
2.2. GESTION DES RESIDUS AGRICOLES ET AGRO-INDUSTRIELS	45
2.2.1. Introduction	45
2.2.2. Matériel et méthodes	45
2.2.3. Résultats	49
2.2.4. Discussion	57
2.2.5. Conclusion.....	59
2.3. EVALUATION DES QUANTITÉS DES RÉSIDUS DE RÉCOLTE ET DE TRANSFORMATION DES PRODUITS AGRICOLES.....	60
2.3.1. Introduction	60
2.3.2. Collecte des données et méthode de calcul	61
2.3.3. Résultats	62
2.3.4. Discussion	72
2.3.5. Conclusion.....	74
2.4. RECHERCHE DES MACROMYCETES SAPROTROPHES LIGNICOLES	76
2.4.1. Introduction	76
2.4.2. Matériel et Méthodes.....	76
2.4.3. Résultats	80
2.4.4. Discussion	91
2.4.5. Conclusion.....	93
2.5. TEST DE DEUX ESPECES DE "WHITE-ROT FUNGI" SUR LA DEGRADATION DE DEUX TYPES DE RESIDUS LIGNOCELLULOSIQUES	94
2.5.1. Introduction	94
2.5.2. Matériel et Méthodes.....	94
2.5.3. Résultats	97
2.5.4. Discussion	105

2.5.5. Conclusion.....	108
DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALES.....	110
DISCUSSION GENERALE	111
CONCLUSION GENERALE	114
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	117
ANNEXES	i
Fiche 2/1 Questionnaires pour les producteurs agricoles	ii
Fiche 2/2 Questionnaires pour les agro-industriels	v
Tableau 3/1. Production agricole et agro-industrielle à Kinshasa et en RDC de 2009 à 2011.....	vii
Tableau 3/2. Répartition de la production agricole par commune agricole dans la ville de Kinshasa	viii
Tableau 3/3. Productions de l'industrie du bois en RDC de 2009 à 2011	ix
Tableau 3/4. Produits de la sylviculture en RDC de 2009 à 2011	x
Tableau 3/5. Valeurs des RPR et des capacités calorifiques de quelques résidus végétaux trouvées dans la littérature	xi
Figures 4/1. Macromycètes récoltés à la Station Phytotechnique de la Faculté des Sciences Agronomiques de Ndjili Brasserie	xiii
Figures 4/2. Macromycètes récoltés dans la Forêt du Lac de Ma Vallée	xv
Figures 4/3. Macromycètes récoltés au Jardin Botanique de Kisantu	xix
Figures 4/4. Mise en culture sur substrat gélosé (PDA, SDA et MA2) des macromycètes récoltés dans les différents sites.....	xxi
Figures 4/5. Mise en culture sur blanc final des macromycètes récoltés sur les trois sites de recherche	xxiii
Figures 5/1. Perte de masse sèche enregistrée au cours de la dégradation des résidus lignocellulosiques causée par quelques espèces de white-rot fungi	xxv
Publications 6/1 Les articles scientifiques relatifs à la thèse.....	xxviii

DEDICACE

Au Seigneur Jésus-Christ,

Son sacrifice parfait qui a expié mes péchés et purifié ma conscience de toute œuvre morte (Hébreux 9.13-15) a été ma principale source d'inspiration sur cette recherche de valorisation des résidus végétaux.

D-B Bangala Mada

REMERCIEMENTS

Je voudrais, par ces quelques lignes, exprimer ma gratitude envers tous ceux qui m'ont aidé à réaliser cette thèse de doctorat.

Je remercie tout d'abord le Professeur Masimango Ndyanabo, Promoteur de cette thèse, pour avoir accepté de superviser mes travaux de recherche et pour ses conseils et le temps passé à m'aider à mieux faire en dépit de son emploi de temps chargé.

Je témoigne, ensuite, ma reconnaissance aux Professeurs membres du Comité d'Encadrement de ces recherches doctorales : Dibaluka Mpulusu, Kizungu Vumilia, Lumpungu Kabamba, Luyindula Ndiku, Sumbu Zola et Ngombe Kabamba. Ils n'ont ménagé aucun effort pour m'accompagner dans ce travail et je les remercie sincèrement.

Mes remerciements s'adressent aussi à la Coopération Technique Belge pour son soutien financier sans lequel la réalisation de ces recherches doctorales n'aurait pas été possible.

Je ne manquerai pas de présenter ma gratitude à Monsieur le Commissaire Général au Commissariat Général à l'Energie Atomique, le Professeur Vincent Lukanda, pour m'avoir accordé l'autorisation d'effectuer mes travaux de recherche dans les laboratoires de biochimie et de biologie du CGEA/CRENK.

Par cette même occasion, je présente mes sincères remerciements à toute l'équipe du CGEA/CRENK pour m'avoir accepté et surtout pour avoir toujours été prête à m'assister en cas de besoin.

Je remercie le Professeur Patrick Gerin de l'Université Catholique de Louvain pour avoir accepté de m'accueillir dans son laboratoire, ainsi que pour tous les conseils pratiques qu'il m'a prodigués au cours des séjours que j'ai effectués à Louvain-la-Neuve dans le cadre de ces recherches.

Je remercie tous les Professeurs, Chefs de Travaux, Assistants et Administratifs de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa pour tout service et conseil dont j'ai bénéficié de leur part.

J'exprime ma gratitude à mes parents, mon père, Bangala Basila et ma mère, Mada Anne, ainsi qu'à tous mes frères et sœurs pour leur soutien tant moral que financier qui m'a été très utile dans cette recherche doctorale.

Je remercie le couple Joseph et Elisabeth Olangi qui m'ont beaucoup soutenu par leurs prières et conseils aux moments où je faisais face aux difficultés liées à cette recherche doctorale ;

Ma reconnaissance concerne aussi tous mes frères et sœurs de la Jeunesse Chrétienne Combattante, ainsi que mes amis et connaissances. Ne pouvant vous citer nommément tous, je vous assure que j'apprécie à sa juste valeur tout soutien que vous m'avez apporté pour réaliser ce travail de recherche.

Je termine par toi, Thérèse Bangala Biselele, mon épouse, tu es arrivée dans ma vie au moment où j'étais déjà plongé dans mes recherches doctorales et ta présence m'a apporté un réconfort incommensurable, car tu as très bien joué ton rôle d'aide semblable, ta place dans mon cœur sera toujours énorme.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1. Evolution de la contribution de la Chine dans la production mondiale des champignons comestibles (Chang, 2005) (p23)

Tableau 3-1 Estimation de la production annuelle moyenne des résidus des cultures vivrières à Kinshasa entre 2009 et 2011 (p62)

Tableau 3-2. Production des résidus agricoles à Kinshasa et en RDC (p71)

Tableau 3-3. Estimation de la production annuelle moyenne des résidus dans l'industrie du bois en RDC de 2009 à 2011 (p72)

Tableau 4-1. Liste des macromycètes selon les sites de leur récolte (p82)

Tableau 4-2. Position systématique des espèces fongiques récoltées dans les trois sites (p84)

Tableau 4-3. Comportement sur différents substrats des macromycètes récoltés dans la FLMV (Forêt du Lac de Ma Vallée) (p87)

Tableau 4-4. Comportement sur différents substrats des macromycètes récoltés au JBK en 2013 (p89)

Tableau 4-5 : Allure de la croissance mycélienne des espèces fongiques sur différents milieux ou substrats de culture (p90)

Tableau 5-1 : Composition biochimique de la sciure de bois avant son inoculation par les wrf (p97)

Tableau 5-2. Composition biochimique des balles de riz avant leur inoculation par les wrf (p101)

Tableau 5-3. Variation hebdomadaire moyenne des constituants biochimiques de la sciure de bois et des balles de riz dégradées par *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju* (p105)

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Liaisons β -(1,4) D-glucopyranoses (p6)

Figure 1.2. Représentation schématique du glucuronoarabinoxylan (p7)

Figure 1.3. Phenylpropanes constituant la structure de base de la lignine (p8)

Figure 1.4. Structure de la lignine chez les gymnospermes (p9)

Figure 1.5. Lignocellulose formée par liaisons covalentes et non covalentes entre cellulose, hémicelluloses et lignine (Bidlack et *al.*, 1992) (p9)

Figure 1.6. Classification phylogénétique du règne des Fungi (p19)

Figure 1.7. Classification phylogénétique de l'embranchement des Ascomycota (p20)

Figure 1.8. Classification phylogénétique de l'embranchement des Basidiomycota (p21)

Figure 1.9. Oxydation des sous-unités phénoliques de la lignine par la laccase (p25)

Figure 1.10. Oxydation des sous-unités non phénoliques de la lignine par le système des médiateurs-laccase (p25)

Figure 1.11. Cycle catalytique de la lignine peroxydase (p26)

Figure 2.1. Occupation du sol de la Station de Ndjili Brasserie (p39)

Figure 2.2. Une vue de la station de Ndjili Brasserie (p40)

Figure 2.3. Vue du Lac de Ma Vallée (p41)

Figure 2.4. Occupation du sol du site du lac de Ma Vallée (p42)

Figure 2.5. Entrée principale du JBK (p43)

Figure 2.6. Occupation du sol dans le JBK (p44)

Figure 2.7. Localisation des milieux d'enquête (p46)

Figure 2.8. Répartition de la population d'enquête par site (p47)

Figure 2.9. Répartition de la population d'enquête par niveau d'étude (p48)

Figure 2.10. Répartition des cultures par site d'enquête (p49)

Figure 2.11. Nombre de plates-bandes par site d'enquête (p50)

Figure 2.12. Types d'engrais chimiques utilisés pour la production agricole dans les sites d'enquête (p52)

Figure 2.13. Lieux de vente de la production (p52)

Figure 2.14. Parche de café entassée à côté d'une rivière à Kinshasa Kingabwa (p55)

Figure 2.15. Sciure et grumes de bois jonchant le sol, à côté du mur de la scierie SI à Kinshasa Kingabwa (p56)

Figure 2.16. Sacs contenant de la sciure de bois dans la scierie SSIa à Kinshasa Lemba (p56)

Figures 3.1 Production annuelle (T) des résidus de maïs dans cinq communes agricoles de Kinshasa (p64)

Figures 3.2 Production annuelle (T) des résidus de riz paddy dans quatre communes agricoles de Kinshasa (p64)

Figure 3.3. Production annuelle (T) des résidus de manioc dans quatre communes agricoles de Kinshasa (p65)

Figure 3.4. Production annuelle (T) des résidus de patate douce dans six communes agricoles de Kinshasa (p65)

Figure 3.5. Production annuelle (T) des résidus d'igname dans deux communes agricoles de Kinshasa (p66)

Figure 3.6. Production annuelle (T) des résidus de haricot dans cinq communes agricoles de Kinshasa (p66)

Figure 3.7. Production annuelle (T) des résidus de niébé dans les communes agricoles de Kinshasa (p67)

Figure 3.8. Production annuelle (T) des résidus de pois-cajan dans cinq communes agricoles de Kinshasa (p67)

Figure 3.9. Production annuelle (T) des résidus d'arachide dans six communes agricoles de Kinshasa (p68)

Figure 3.10. Production annuelle (T) des résidus de soja dans deux communes agricoles de Kinshasa (p68)

Figure 3.11. Production annuelle des résidus de banane douce dans cinq communes agricoles de Kinshasa (p69)

Figure 3.12. Quantités annuelles moyennes (T) de principaux types des résidus générés dans la production vivrière et agro-industrielle à Kinshasa (2009 à 2011) (p69)

Figure 3.13. Production annuelle moyenne (T) des résidus agricoles issus des cultures vivrières par commune agricole de Kinshasa (2009 à 2011) (p70)

Figure 3.14. Production annuelle moyenne (x1000 T) des résidus des cultures vivrières en RDC (p71)

Figure 4.1. *Pycnopus sanguineus* sur rameau de palmier (p80)

Figure 4.2. *Ganoderma sp.* croissant sur un tronc de *Pentaclethra sp.* (p81)

Figure 4.3. *Trametes versicolor* croissant sur un tronc d'arbre en décomposition (p82)

Figure 4.4. *Trametes versicolor* mise en culture sur MA2 (p85)

Figure 4.5. Blanc final de *Trametes versicolor* sur sciure de bois (p86)

Figure 5.1. Evolution de la matière sèche de la sciure de bois inoculée par *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju* (p98)

Figure 5.2. Evolution des teneurs en constituants biochimiques de la sciure de bois sous la dégradation de *Trametes versicolor* (p99)

Figure 5.3. Evolution des teneurs en constituants biochimiques de la sciure de bois sous la dégradation de *Pleurotus sajor-caju* (p100)

Figure 5.4 : Variation de la masse sèche des balles de riz au cours de leur dégradation par les wrf *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju* (p102)

Figure 5.5. Evolution des teneurs en constituants biochimiques des balles de riz au cours de leur biodégradation par *Trametes versicolor* (p103)

Figure 5.6. Evolution des teneurs en constituants biochimiques de la balle de riz au cours de sa biodégradation par *Pleurotus sajor-caju* (p104)

LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS

AC : Anciens Combattants

BCC : Banque Centrale du Congo

BI : Brasserie Industrielle

C/N : Ratio Carbone sur Azote

CBHs : Cellobiohydrolases

CECO : Cecomaf

CGEA : Commissariat Général à l'Energie Atomique

CRENK : Centre Régional d'Etudes Nucléaires de Kinshasa

DAP : Diammonium Phosphate

EAD : Entité Administrative Décentralisée

EC : Enzyme Commission

EGs : Endoglucanases

FAO : Food and Agricultural Organization

FLMV : Forêt du Lac de Ma Vallée

JBK : Jardin Botanique de Kisantu

KIMW : Kimwenza

Lac : Laccases

LHT/T : Latent Heat Value per Ton

LiP : Lignine peroxydase

LME : Lignin Modifying Enzymes

MnP : Manganèse peroxydase

NPK : Azote Phosphore et Potassium

pH : Potentiel d'hydrogène

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

PrC : Production d'une denrée C

RC : Résidus issus de C

RDC : République Démocratique du Congo

RPR : Residue to Product Ratio

SI : Scierie Industrielle

SmF : Submerged Fermentation

SPA : Station Phytotechnique de la Faculté des Sciences Agronomiques

SSF : Solid State Fermentation

SSIa : Scierie Semi-industrielle a

SSIb : Scierie Semi-industrielle b

TP : Travaux Publics

TRIVAC : Trier – Recycler - Incinérer - Valoriser - Communiquer

UDMC : Usine de Décorticage et de Mouture de Café

UDR : Usine de Décorticage de Riz

VP : Versatile Peroxydases

WRF : White-rot fungi

RESUME

Dans la ville de Kinshasa, les résidus végétaux non utilisés font une importante part dans la pollution environnementale, raison pour laquelle ce travail de recherche tente de les valoriser, particulièrement, ceux qui sont générés par l'agriculture urbaine et périurbaine, l'industrie du bois et l'agro-industrie, en utilisant des basidiomycètes appelés champignons de pourriture blanche ("white-rot fungi" ou wrf, en anglais) dotés des puissants enzymes lignolytiques. Ces derniers hydrolysent la lignine des parois cellulaires secondaires de ces résidus et rendent disponibles les glucides, la cellulose et les hémicelluloses, de cette paroi en vue de leur valorisation ultérieure, notamment, comme source énergétique.

Concernant ces résidus, la démarche expérimentale a consisté à (1) mener des enquêtes d'identification et de quantification de ceux qui sont abondants et éventuellement nuisibles à l'environnement de Kinshasa ; (2) explorer les forêts et savanes de Kinshasa et de ses périphéries pour collecter les champignons de la pourriture blanche ; (3) cultiver et conserver in vitro les macromycètes récoltés et évaluer le taux de délignification causée par ces champignons.

Les principaux résultats obtenus à la suite de ce travail de recherche sont :

- La mise en évidence de l'inexistence des statistiques officielles sur la production des résidus agricoles et agro-industriels, et de politique nationale de leur gestion en RDC ;
- La quantification des résidus issus de la production agricole et de la transformation de ces produits à Kinshasa et l'identification de principales communes génératrices. Sept communes de Kinshasa produisant ces résidus en proportion plus importante ont été identifiées, il s'agit de : Maluku, Nsele, Mont-Ngafula, Ngaliema, Ndjili, Masina et Kimbaseke. La quantité annuelle de ces résidus a été évaluée à environ 43.690 T dont plus de 48% sont disponibles pour une valorisation autre que la fertilisation directe du sol ;
- Dans la recherche des macromycètes à fort pouvoir de délignification ou wrf, vingt-six espèces de macromycètes ont été récoltées dans les écosystèmes forestiers de Kinshasa et sa périphérie. Parmi celles-ci, douze ont été confirmées aptes à coloniser et à se conserver sur un substrat de sciure de bois ;
- Deux wrf, *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju* ont positivement délignifié la sciure de bois et les balles de riz en causant une perte de teneur en lignine variant de 6 à 18%. Cependant, des pertes plus faibles en glucides pariétaux ont aussi été observées.

En conclusion, à Kinshasa, la valorisation des résidus végétaux par usage des wrf est envisageable. Dans le cas des balles de riz et de la sciure de bois, *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju* se sont montrés efficaces dans, la délignification. Cependant, la rentabilité de l'opération nécessiterait un couplage avec la production des champignons comestibles et à usage thérapeutique, à cause de la perte en glucide observée.

Mots clés : environnement, quantification, délignification, valorisation, white-rot fungi, résidus agricoles

ABSTRACT

In Kinshasa, unused plant residues have an important part in environmental pollution. Thus this work try to valorize this category of waste, mainly those generated by urban and peri-urban agriculture, wood and agro industry, by using Basidiomycetes called white-rot fungi (or wrf) with powerful lignolytic enzymes. These hydrolyze secondary cell wall lignin of these residues and make available carbohydrates, cellulose and hemicelluloses, of this wall for subsequent recovery, in particular, as an energy source.

The experimental approach was to (1) conduct identification and quantification surveys of abundant plant residues and possibly harmful to the environment of Kinshasa; (2) explore the forests and savannas of Kinshasa and its peripheries to discover and harvest white-rot fungi; (3) implement the techniques of culture and preservation in vitro of harvested macro fungi, test the biodegradation of lignocellulosic residues and evaluate the delignification rate caused by these fungi.

The main results of this research work obtained are:

- The demonstration of the absence of official statistics on the production of agricultural and agro-industrial residues, or national policy management in the DRC;
- The quantification of residues from agricultural production and processing of these products in Kinshasa and the main municipalities implicated to their generation. Seven communes of Kinshasa have been identified as producing the largest portion of agricultural residues in this city (Maluku, Nsele, Mont Ngafula, Ngaliema, Ndjili, Masina and Kimbaseke). The annual quantity of these residues is about 43.690 T of which more than 48% are available for upgrading other than direct soil fertilization;
- In the search for macromycetes with high delignification capacity, twenty-six macrofungi species were harvested in forest ecosystems of Kinshasa and the outskirts. Among these, twelve were confirmed able to develop and colonize on the substrate consisting of sawdust;
- Two wrf, *Trametes versicolor* and *Pleurotus sajor-caju* positively délignify sawdust and rice husks causing a loss of lignin content ranging from 6-18%. However, smaller losses of cell wall carbohydrates have also been observed.

In conclusion, in Kinshasa, the valorization of plant residues by use of wrf is possible. In the case of the biodegradation of rice husks and sawdust by use of *Trametes versicolor* and *Pleurotus sajor-caju* delignification has been achieved, however, the profitability of the operation would require coupling with the production of edible and therapeutic mushrooms because of the loss observed in carbohydrate.

Keywords: environment, quantification, delignification, valuation, white-rot fungi, agricultural residues

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte et justification

La République Démocratique du Congo (RDC) fait face à d'énormes difficultés pour mettre en œuvre sa politique nationale de protection environnementale. Cette situation a comme conséquence la destruction de la biodiversité (FAO, 2000 ; FAO & NEPAD, 2004, Pham et *al.*, 2010, Tollens, 2004, Mbungu et *al.*, 2004) et l'aggravation générale des problèmes environnementaux. C'est ainsi qu'à Kinshasa comme dans tout le reste du pays, l'absence de l'assainissement de l'espace public se traduit par la présence d'une pollution quasi permanente de l'air, des terres et des eaux. Parmi les principales causes, on peut citer notamment, des montagnes de résidus végétaux de diverses origines (Mbungu et *al.*, 2004 ; FAO, 2005).

Parmi ces divers types de résidus végétaux, les déchets agricoles et agro-industriels servent à la fertilisation organique du sol, à l'alimentation du bétail ou à la pisciculture et à la production énergétique. Cependant, il n'existe aucune politique cohérente de gestion de la portion non utilisée ou non accessible de ces résidus (Gonzaleza et *al.*, 2004). La conséquence de cette situation est que cette portion non utilisée constitue une nuisance pour l'environnement en alimentant l'eutrophisation des cours d'eau, l'encombrement des espaces libres ou encore la pollution de l'air par leur élimination par le feu qu'on y met.

Or, les résidus végétaux, autrement appelés résidus lignocellulosiques de par leur constitution de base faite de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine, possèdent une potentialité de conversion énergétique ou en divers produits utiles (Dermibas & Dermibas, 2007; Liming, 2009). Cela justifie l'intérêt que ces sous-produits suscitent de la part de nombreux chercheurs de nos jours.

En effet, le réchauffement climatique global, l'épuisement attendu des réserves de pétrole et de gaz naturel et les hausses des prix subséquents ont stimulé les recherches vers l'utilisation efficace des ressources énergétiques renouvelables (Gonzaleza et *al.*, 2004 ; Prasad, 2007). Parmi celles-ci, la biomasse lignocellulosique présente des perspectives intéressantes. Beaucoup d'auteurs ont confirmé l'aptitude de cette dernière à améliorer la disponibilité énergétique, à réduire la pollution de l'air et à diminuer l'accumulation du gaz carbonique dans l'atmosphère (Prasad et *al.*, 2007). En plus, la lignocellulose possède la potentialité d'être utilisée dans la fabrication des biopolymères substituables aux dérivés pétrochimiques (Thiébaud, 1995 ; Ashori & Nourbakhish, 2010).

D'où la valorisation des résidus lignocellulosiques, non seulement, résorberait une partie importante des résidus nuisibles à l'environnement, mais aussi réduirait la compétition existante entre la production alimentaire et celle des biocarburants de première génération (McKendry¹, 2002).

Cette valorisation passe par la conversion des résidus de plantes en ressources énergétiques et en d'autres produits utiles à l'homme, ce qui exige souvent un prétraitement de désagrégation de la matrice lignocellulosique des parois secondaires de ces débris végétaux (Kim & Dale, 2004 ; Dermibas & Dermibas, 2007). Dans ce complexe, la dégradation de la lignine peut se faire par la méthode chimique et biologique. Cette dernière, la plus respectueuse de l'environnement parce que n'utilisant pas des produits chimiques, est très difficile à réaliser par la majorité des organismes vivants et constitue de ce fait, un facteur limitant dans le cycle

du carbone (Ohkuma et *al.*, 2001). Cependant, les macromycètes dits champignons de pourriture blanche ou "white-rot fungi" (wrf) sont considérés comme les plus prometteurs parmi les micro-organismes eucaryotes capables d'effectuer la dégradation de la lignine, à cause de leur aptitude à produire des enzymes oxydatives extracellulaires, particulièrement la lignine-peroxydase, le manganèse-peroxydase, les peroxydases versatiles et les laccases. En raison de leur large spécificité par rapport aux substrats, ce groupe d'enzymes possède une très grande potentialité pour des rôles biotechnologiques dans plusieurs applications industrielles telles que la délignification des pâtes à papier, le blanchiment des fibres textiles, le traitement des eaux usées et la détoxification des substances dangereuses (Revankar & Lele, 2006).

Beaucoup d'espèces des champignons de pourriture blanche que l'on rencontre dans plusieurs écosystèmes, aussi bien tempérés que tropicaux, ont été étudiées en détail et énormément utilisées pour la désagrégation de la lignine, la dépollution des sites et des eaux (Vanhulle, 2006). La RDC en renferme un certain nombre de comestibles et de non comestibles. Etant donné les nombreux usages qu'on en fait sous d'autres cieux, il serait intéressant de tirer profit de différents avantages qui pourraient découler de la connaissance des espèces de wrf trouvées dans l'environnement de Kinshasa et de ses environs.

Ce travail intitulé « Etude des résidus lignocellulosiques à Kinshasa. Identification, quantification et valorisation par les "white-rot fungi" (champignons de pourriture blanche) » constitue une tentative d'utilisation de la flore fongique (wrf) de Kinshasa et de ses périphéries dans le processus de valorisation des résidus végétaux générés par l'agriculture, l'agro-industrie et de l'industrie du bois pratiquées dans cette ville.

2. Objectifs du travail

L'objectif principal étant la valorisation des résidus lignocellulosiques produits dans la ville de Kinshasa par leur traitement aux wrf, les objectifs spécifiques poursuivis sont :

- Répertorier, récolter, quantifier et caractériser les déchets lignocellulosiques d'origine agricole et agro-industrielle nuisibles à Kinshasa ;
- Répertorier, récolter, caractériser (classification systématique et autres caractéristiques) et cribler les souches de "white-rot fungi" de Kinshasa et de ses environs ;
- Identifier les types de résidus sur lesquels les souches de wrf récoltés s'adaptent le mieux et déterminer leurs meilleures conditions de culture ;
- Déterminer, en cas de développement positif, les modifications biochimiques provoquées sur la lignocellulose par la caractérisation de la biomasse résidus+wrf ;
- Etablir une échelle de biodégradation lignocellulose-wrf sur base de l'importance de la délignification observée expérimentalement.

3. Hypothèses du travail

Les objectifs ci-haut énoncés, appuyés par les travaux de recherche déjà réalisés dans la ville de Kinshasa apparentés à celui-ci nous amènent à émettre les hypothèses suivantes :

- La ville de Kinshasa dispose des moyens peu coûteux, mais efficaces de diminuer la pollution environnementale causée par les résidus végétaux de diverses origines ;
- Les champignons macromycètes dotés d'enzymes lignolytiques présents dans les écosystèmes forestiers de Kinshasa sont susceptibles de contribuer efficacement à la biodégradation et la valorisation des résidus lignocellulosiques de cette ville.

4. Originalité et intérêt du sujet

Cette recherche doctorale tire son originalité dans le fait qu'elle tente d'utiliser l'ensemble de la mycoflore de pourriture blanche de Kinshasa comestible comme non comestible, dans une démarche de la biodégradation de la lignine afin d'améliorer les possibilités d'usage des résidus lignocellulosiques riches en polysaccharides pariétaux.

L'intérêt de ce travail de recherche se situe à cinq niveaux :

- Environnemental : à Kinshasa, il y a de sérieux problèmes de pollution environnementale à cause de la mauvaise gestion des résidus de diverses origines, notamment végétales (encombrement des espaces, pollution des cours d'eau, etc.) ;
- Biologique: domestication de la flore fongique, comestible ou pas, menacée de disparition par la modification de l'écosystème kinois suite à la pression démographique ;
- Alimentaire et thérapeutique : production et disponibilisation des champignons comestibles et/ou thérapeutiques ;
- Energétique et économique : résolution partielle du problème d'électricité et de la dépendance vis-à-vis des sources énergétiques fossiles par l'utilisation des résidus végétaux ;
- Biotechnologique : la domestication des wwf ouvre la voie à l'extraction et l'utilisation des leurs enzymes lignolytiques. Ces derniers sont des puissants agents pouvant servir dans la bioremédiation environnementale (dépollution des sites pétroliers, dynamités, miniers, etc.).

5. Méthodologie

Les premières étapes de ce travail comprennent, outre la recherche bibliographique, des enquêtes sur terrain pour l'identification et la quantification des résidus végétaux, d'origine agricole et agro-industrielle, nuisibles à l'environnement de Kinshasa. Vient, ensuite, l'exploration des écosystèmes forestiers et savaniques de Kinshasa et de ses environs pour y trouver et récolter les macromycètes.

Enfin, le travail de laboratoire consistera à cultiver les macromycètes récoltés, tester la biodégradation des résidus lignocellulosiques et évaluer le taux de dégradation causée par les champignons.

CHAPITRE 1. REVUE DE LA LITTERATURE

1.1. PRINCIPALES METHODES DE VALORISATION DES RESIDUS LIGNOCELLULOSIQUES

1.1.1. Généralités sur les résidus lignocellulosiques

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 (Hall *et al.* ; Klass, 2004 ; Dermibas & Dermibas, 2007).

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 leur saisonnalité (Koopmans & Koppejan, 1997). Néanmoins, 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 (Weizhang *et al.*, 2011).

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) résumant les usages courants des résidus lignocellulosiques en 6 F : "Fuel, Fodder, Fertilizer, Fibre, Feedstock and Further uses" (combustible, fourrage, engrais, fibre, nourriture et autres). Bien qu'une grande portion des résidus lignocellulosiques est recyclée, la portion non utilisée reste importante. Cette dernière est soit abandonnée ou brûlée au lieu de sa production (Weizhang *et al.*, 2011), soit jetée dans des 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 des glucides, la cellulose et les hémicelluloses. 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 résistant à la dégradation et responsable de la protection structurale et fonctionnelle de la plante (Sanchez, 2009). 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 des 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 ici.

1.1.2. Constituants de la paroi cellulaire 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 cellulaire 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 cellulaire secondaire de la plante, est une substance très difficile à dégrader.

Cette paroi 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 (Gamauf *et al.*, 2007 ; Vermirris, 2008).

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, tandis que les lignines sont des polymères phénoliques et les protéines 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 de 30-60% de cellulose, 30% d'hémicelluloses, 15-30% de lignines et 5-10% de protéines (Malherbe & Cloete, 2002 ; Sanchez, 2009 ; Weirtz, 2010).

1.1.2.1. 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, pouvant 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 (Reddy & Yang, 2005 ; Balat, 2011).

La cellulose est considérée comme étant le biopolymère le plus abondant sur terre. Elle est constituée par des molécules de glucose formant des liaisons β -(1,4) D-glucopyranoses appelées microfibrilles (figure 1.1). Il compose 15-30 % de la paroi cellulaire primaire et 50-60% de la paroi cellulaire secondaire (Ding & Himmel, 2006 ; Vermirris, 2008).

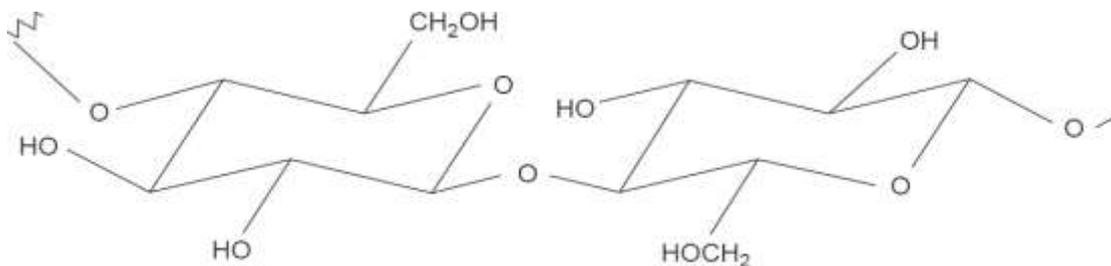


Figure 1.1. Liaisons β -(1,4) D-glucopyranoses (O'Sullivan, 1997).

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)-Dglucan. 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) (Lang et al., 1997). 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 (Pérez et al., 2002 ; Hibbett et al., 2007).

1.1.2.2. 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. Mécaniquement, les hémicelluloses ne contribuent que peu à la rigidité et à la solidité de la paroi cellulaire secondaire de la plante. Elles sont plus facilement hydrolysables en monosaccharides que la cellulose (Reddy & Yang, 2005).

Les hémicelluloses sont constituées des homo et hétéropolymères comprenant dans leurs structures un ou plusieurs de ces sucres : β -(1,4)-D-xylopyranose, mannopyranose, glucopyranose et galactopyranose au niveau de la chaîne principale où se greffent un certain nombre des substituants (Jeffries, 1994) pouvant être des acides 4-O-methyl-glucuroniques, D-galacturoniques et Dglucuroniques. Les oses sont liés entre eux par des liaisons osidiques β -1,4 et occasionnellement β -1,3 (Pérez et al., 2002). La figure 1.2 représente le glucuronoarabinoxylan qui est la principale molécule d'hémicellulose rencontrée chez les monocotylédones commelinoïdes tel que le palmier à huile (Vermirris, 2008).

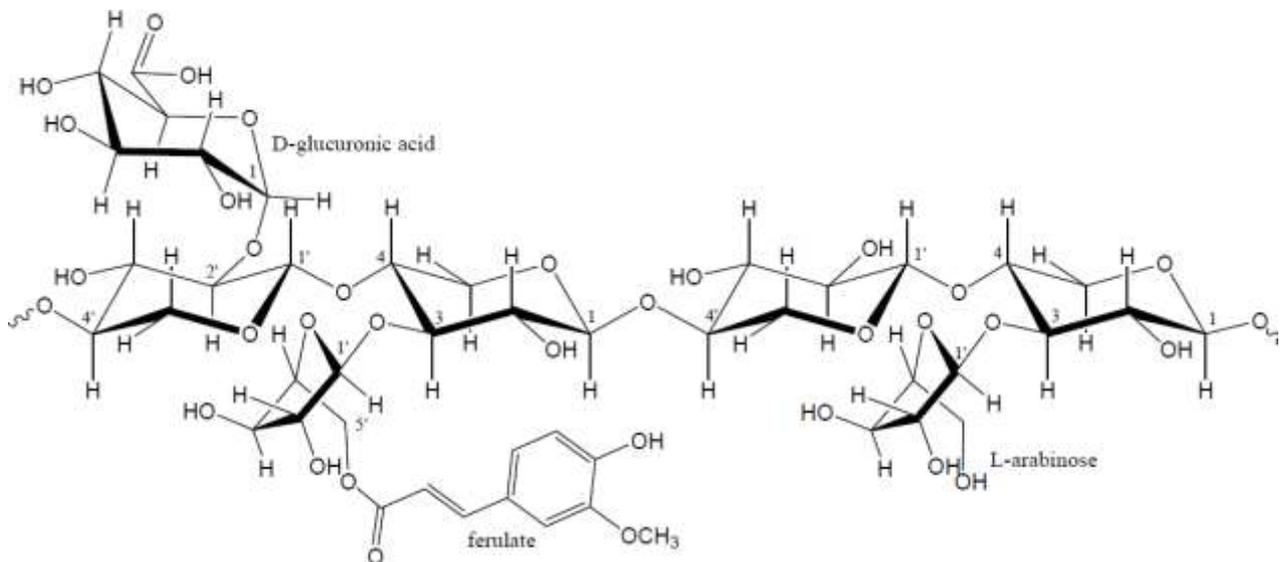


Figure 1.2. Représentation schématique du glucuronoarabinoxylan (Vermirris, 2008)

La principale différence avec la cellulose est que l'hémicellulose comporte des ramifications avec de courtes chaînes latérales constituées de différents oses. Contrairement à la cellulose, ces polymères sont facilement hydrolysables. Ils ne forment pas d'agrégats, même cocristallisés avec des chaînes de cellulose.

1.1.2.3. Structure et composition de la lignine

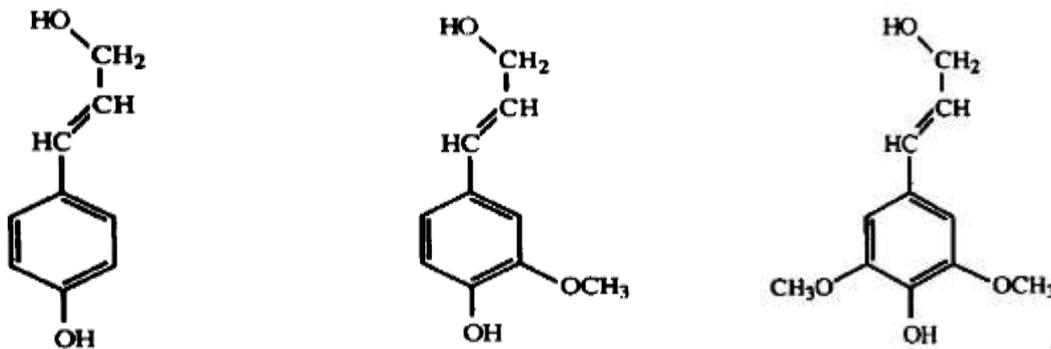
La lignine est présente dans les parois cellulaires des plantes dont elle constitue le support structural ; elle les raidit pour en protéger les hydrates de carbone des dommages chimiques et physiques, confère aux tissus des plantes et aux cellules individuelles la solidité, l'imperméabilité, la résistance contre les attaques microbiennes et le stress oxydatif (Pérez et al., 2002 ; Reddy & Yang, 2005).

D'une manière générale, elle est déposée au moment de la maturation des parois cellulaires, et certains hydrates de carbone s'y associent. Étant donné que sa constitution diffère de celle des hémicelluloses, les liaisons entre ces polymères diffèrent d'une plante à une autre et d'un tissu à un autre.

Sa teneur dans les matières lignocellulosiques influence leur structure, leurs propriétés, leur morphologie, leur flexibilité et leur vitesse d'hydrolyse.

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

La lignine est issue de la polymérisation des alcools *p*-coumarique (*p*-hydroxyphenyl), coniférylique (guaiacyl) et sinapylique (syringyl) qui sont des phenylpropanes (Figure 1.3.) (Jeffries, 1994).



Alcool *p*-coumarique

Alcool coniférylique

Alcool sinapylique

Figure 1.3. Phenylpropanes constituant la structure de base de la lignine (Jeffries, 1994)

Dans les bois tendres (Gymnospermes), la lignine comprend l'alcool coniférylique comme principal constituant ; celle des bois durs (Angiospermes ligneuses) est constituée des unités d'alcools guaiacyl et syringyl, tandis que celle des herbes (Graminées) est plutôt constituée des unités de guaiacyl, de syringyl et de *p*-hydroxyphenyl (Jeffries, 1994). Toutefois, aussi bien dans les bois tendres, dans les bois durs que dans les plantes herbacées, les liaisons entre les unités monomériques de la lignine sont identiques. La figure 1.4 représente les liaisons entre unités de phenylpropanoïde formant la lignine des gymnospermes. Cette dernière est très similaire à la lignine des Angiospermes à l'exception du fait que les unités de phenylpropane, dans ce dernier cas, possèdent deux groupes méthoxyle en position ortho par rapport à l'oxygène.

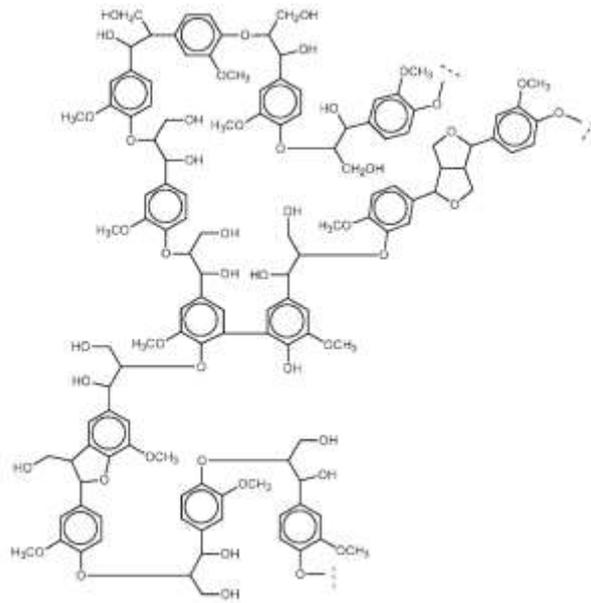


Figure 1.4. Structure de la lignine chez les gymnospermes (Perez et al., 2002)

La lignine ainsi synthétisée s'associe à la cellulose et aux hémicelluloses par des liaisons covalentes et non covalentes pour former la lignocellulose (Figure 1.5) responsable de la résistance de la paroi végétale aux divers stress. Paradoxalement, à la mort de la plante, la lignocellulose rend difficile l'élimination des résidus végétaux.

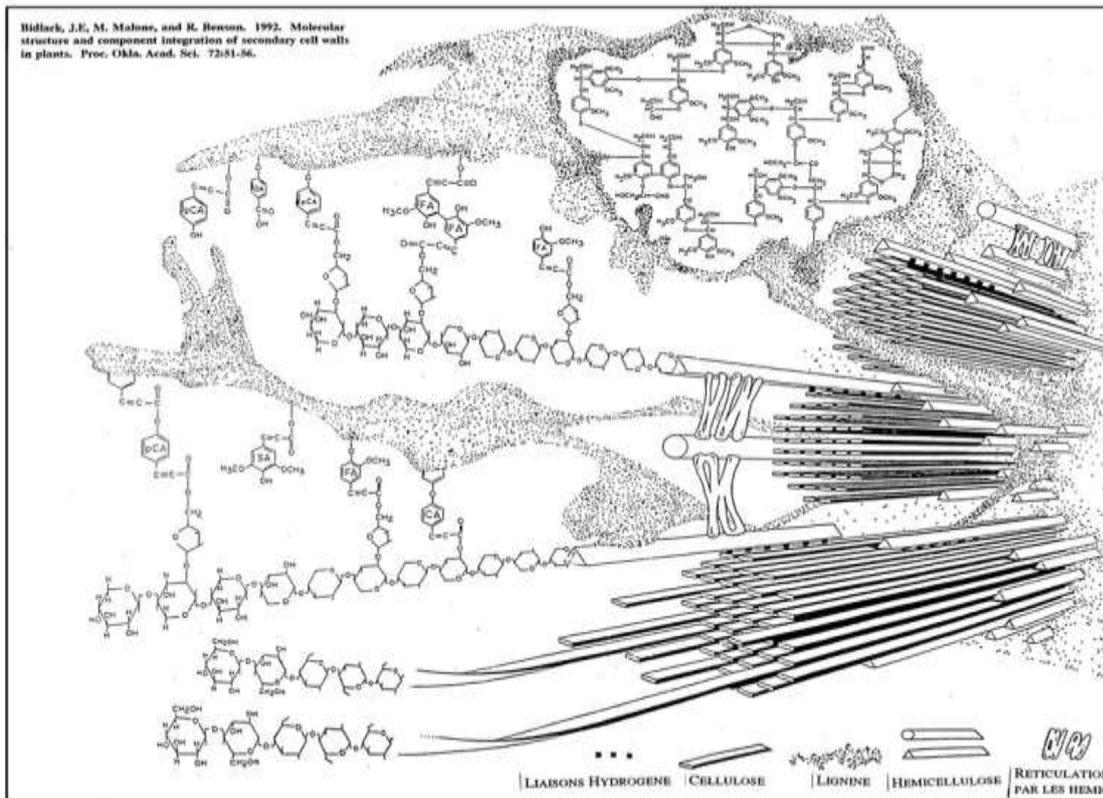


Figure 1.5. Lignocellulose formée par liaisons covalentes et non covalentes entre cellulose, hémicelluloses et lignine (Bidlack et al., 1992)

1.1.3. Origine et gestion des résidus lignocellulosiques

1.1.3.1. Origine

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.

De l'exploitation forestière et de l'industrie du bois, les principales productions à la base de la génération des résidus lignocellulosiques sont les grumes, les tranchages, les contreplaques, les bois sciés, le placage et le bois de chauffage (Koopmans & Koppejan, 1997 ; Banque Centrale du Congo, 2010). Elles produisent des copeaux et de la sciure de bois ainsi que d'autres fragments de bois de taille variable.

Quant à l'activité agricole, elle s'accompagne d'une importante production des résidus ou sous-produits. Une grande fraction 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 (Weizhang et al., 2011). Ces résidus lignocellulosiques sont très diversifiés selon les cultures qui les engendrent. On y dénombre de la paille (céréales), des tiges, des troncs, des feuilles, etc. (Nigam et al., 2009).

De l'usinage des produits agricoles, proviennent les résidus lignocellulosiques agro-industriels (Nigam et al., 2009). Parmi ces résidus, on compte les parches (café), les coques (arachides, palmier), les balles (riz), les rafles (maïs), la bagasse (canne à sucre), la drêche (orge) et les pulpes (fruits), etc. 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 ou artisanale.

Une autre caractéristique des résidus agro-industriels 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.

Une autre source des résidus lignocellulosiques sont les marchés et les ménages qui alimentent l'environnement en restes et déchets de légumes et fruits.

1.1.3.2. Gestion

La gestion est définie comme étant l'action ou la manière de gérer, d'administrer, de diriger, d'organiser quelque chose (Anonyme, 2010).

Dans le cas des résidus lignocellulosiques, ce terme se réfère à la manière d'organiser la prise en charge de ces résidus partant de leur production jusqu'à leur utilisation. Cette prise en charge comprend la localisation des sites où ils sont produits, leur identification et éventuellement leur caractérisation, leur quantification, leur collecte et transport jusqu'aux points d'usage.

La connaissance de la finalité à réserver à un stock de résidus lignocellulosiques disponibles est très importante dans la mise en œuvre d'un mécanisme de gestion de ce type de déchets.

Principaux usages

Dans les Pays en Voie de Développement, à cause du coût élevé des produits pétroliers et de l'électricité, la lignocellulose intervient pour environ 90% dans la production énergétique (Dermibas & Dermibas, 2007). Dans beaucoup de ménages kinois, la sciure de bois est utilisée dans la cuisson en remplacement du charbon de bois et 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 (Schure et al., 2011). Néanmoins, l'utilisation de la sciure de bois exige un brasier d'un type spécial.

Outre cet usage, plusieurs Pays en Voie de Développement étudient des mécanismes de valorisation des résidus agricoles, agro-industriels et de l'industrie du bois, notamment, dans la production énergétique domestique, alimentaire et industrielle (Amoo-Gottfried & Hall, 1999 ; Kusekwa, 2013).

Ces résidus lignocellulosiques peuvent être utilisés pour la production des biocarburants et des biogaz en remplacement des combustibles fossiles traditionnels. 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 (Dermibas & Dermibas, 2007). Les biocarburants de première génération sont produits à partir des denrées alimentaires pouvant être utilisées dans la nutrition humaine (riz, maïs, etc.).

Dans la production alimentaire, la lignocellulose constitue un bon substrat pour la production des champignons comestibles (Boa, 2006 ; Mshandete & Cuff, 2008 ; Dibaluka et al., 2010).

Dans la production industrielle, les différentes fractions de la lignocellulose, notamment, les hémicelluloses, la cellulose et la lignine, peuvent être valorisées séparément :

Les hémicelluloses entrent dans la fabrication des sucres, tels que le xylose, le glucose et l'arabinose par hydrolyse acide (Sanchez, 1990), la production d'alcool (éthanol, butanol) par fermentation de ces sucres (Saha, 2003) et la production d'acides organiques (butyrique, acétique, lactique) (Thiébaud, 1995 ; Saha, 2003).

La cellulose peut intervenir dans la production de sucre (glucose) (McKendry², 2002), la fabrication des polymères spéciaux tels que la viscosse, le méthylcellulose, l'hydroxyméthylcellulose et le carboxyméthylcellulose (Thiébaud, 1995), la pâte à papier (Thiébaud, 1995 ; Sanchez, 2009), les additifs et liants utilisés dans la préparation des comprimés, gélules ou granulés (Taherzadeh & Karimi, 2008), la nitrocellulose utilisée dans l'industrie des explosifs (Thiébaud, 1995), la cellophane et la rayonne viscosse (Diamantidis & Koukios, 2000), les épaississants utilisés dans l'industrie des peintures (Thiébaud, 1995), les échangeurs d'ions (Thiébaud, 1995) et les matériaux thermoplastiques (Ashori & Nourbakhsh, 2010).

La lignine sert à la fabrication du méthanol par gazéification (Thiébaud, 1995), la production du diméthylsulfoxyde (DMSO) (Glasser, 1981), la synthèse du phénol, du catéchol, du benzène et de leurs dérivés (Ashori & Nourbakhsh, 2010), 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.

Ecueil et quantification des résidus lignocellulosiques

En dépit de diverses pistes de leur valorisation, les résidus lignocellulosiques présentent certains inconvénients. En effet, la disponibilité des résidus lignocellulosiques peut varier considérablement d'une saison à une autre ou d'un endroit à un autre. Cet aspect important des choses est à prendre en compte lors de la mise en œuvre d'un processus durable de valorisation de ces produits.

Aussi, toute démarche visant la valorisation en dehors de la fertilisation directe, doit tenir compte de la quantité des résidus disponibles en dehors de la portion devant être maintenue sur le sol (Fischer et al., 2010).

C'est à cette fin que plusieurs travaux d'évaluation qualitative et quantitative ont été effectués par quelques auteurs en vue de répertorier, classifier et quantifier les résidus lignocellulosiques disponibles. Koopmans et Koppejan (1997) 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 sous-produits.

Singh et al. (2008) 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 de valorisation. C'est le cas du Maroc où Rafrari et Kabil (2006), 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 (Jingura & Matengaifa, 2008 ; Fischer et al., 2010), mais ces informations peuvent aussi servir à d'autres types de valorisation de ces résidus tels que la production des biopolymères (Ashori & Nourbakhsh, 2010), 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 (SNSA, 2013), mais il n'existe pas encore des statistiques spécifiques aux résidus végétaux d'origine agricole et agro-industrielle même dans les statistiques établies par le Programme National d'Assainissement (PNA). 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 valorisation.

Processus de valorisation

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 biologiques pour obtenir un bon rendement (Agbor *et al.*, 2011).

A cet effet, la combinaison durée-moyens-rendement de traitement est très importante, car il est essentiel de mettre en œuvre des méthodes permettant d'obtenir un rendement acceptable avec des moyens et une durée raisonnables.

1.1.4. Prétraitements des résidus lignocellulosiques

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.

Pour être efficace, un prétraitement doit répondre à certaines exigences, notamment, il doit avoir un faible coût, être peu lourd ou sophistiqué, applicable à une large gamme et/ou grande quantité. En plus de cela, il doit être à mesure de rendre disponible les fractions désirées et surtout éviter de créer et de maintenir des inhibiteurs et autres substances indésirables.

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 (Agbor *et al.*, 2011).

1.1.4.1. Méthodes physiques

Les méthodes physiques sont divisées en traitements mécaniques, thermiques et par pressurisation.

Les traitements mécaniques consistent en la réduction grossière de dimension, la mouture, le déchetage et le broyage par usage d'une technologie artisanale (hachage) ou mécanisée (moulin). 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. En effet, la réduction de la taille facilite le transfert plus rapide de chaleur et de masse (vapeur, mycélium, etc.). Cependant, une réduction plus poussée du diamètre des résidus végétaux peut entraver la circulation d'air et bloquer la circulation d'eau.

L'explosion à la vapeur consiste à pressuriser les résidus avec la vapeur pendant une période de temps, puis décompresser rapidement. 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 acide uronique et en acide acétique (Singh *et al.*, 2008).

Le traitement hydrothermique consiste à traiter le substrat lignocellulosique à l'eau bouillante ou à 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 (Singh et *al.*, 2008).

L'usage des rayons gamma est une autre méthode physique dont l'utilisation prend de l'ampleur. Ce sont des rayonnements électromagnétiques ionisants obtenus par la désintégration d'un noyau atomique. Ils provoquent la rupture des liaisons osidiques beta-1,4, ce qui augmente la surface de contact et diminue la cristallinité (Agbor et *al.*, 2011 ; Balat, 2011). Les rayons gamma sont surtout utilisés en médecine (radiothérapie), dans l'industrie (stérilisation et désinfection) et dans le secteur nucléaire. Leur usage requiert un dispositif de protection de l'utilisateur car ils diffusent une grande énergie et peuvent pénétrer la matière, ce qui représente un danger pour les cellules vivantes.

1.1.4.2. Méthodes chimiques

Les méthodes chimiques peuvent être divisées en traitements alcalin, neutre et acide. Parmi les divers produits utilisés, certains causent la délignification ou la perturbation de la structure de la lignine (Agbor et *al.*, 2011 ; Balat, 2011).

Les alcalis

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

Les acides

Les acides concentrés ne sont pas utilisés parce qu'ils sont corrosifs. Ils doivent être neutralisés ou enlevés à la fin du traitement. Les solutions de H₂SO₄, HCl (inférieurs à 4% 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 carbone qu'avec les hydrates de carbone entre eux (Singh et *al.*, 2008).

1.1.4.3. Méthodes biologiques

Les méthodes biologiques comprennent des traitements par des micro-organismes et par des enzymes préalablement extraits de ces derniers.

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'une certaine épaisseur ; ils sont ensuite fréquemment humidifiés et retournés. Ce traitement favorise l'invasion du substrat lignocellulosique par la microflore naturelle qui effectue le compostage. Tuomela et al. (2000) ont effectué une étude sur la succession naturelle de différentes espèces de la microflore au cours du processus de compostage. En raison de sa complexité structurale et chimique, la désagrégation biologique complète de la lignocellulose exige un équipement enzymatique tout aussi complexe.

Dans le fait, 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 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 (Gamauf et al., 2007). Dès lors, lorsque la matrice lignocellulosique devient désorganisée, suite à la dégradation de la lignine, celle de la dégradation de la cellulose et des hémicelluloses en devient facilitée. La cellulolyse est réalisée par des organismes appartenant 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.

Ces différents organismes cellulolytiques sont capables de créer des interactions avec les organismes non cellulolytiques aboutissant à une dégradation complète de la cellulose avec libération de gaz carbonique et de l'eau en présence de l'air. En anaérobiose, il y a plutôt libération du gaz méthane, du gaz carbonique et de l'eau (Béguin & Aubert, 1994).

Les micro-organismes cellulolytiques produisent plusieurs types d'enzymes, avec diverses spécificités, mais agissant ensemble.

Les cellulases hydrolysent les liaisons glucosidiques β -1,4 de la cellulose. Traditionnellement, ces enzymes sont divisés en deux classes : les endoglucanases (endo-1,4- β -glucanases, EGs) capables d'hydrolyser les liaisons intramoléculaires (dans les régions amorphes de la cellulose préférentiellement) aboutissant à de nouvelles terminaisons de la molécule et les cellobiohydrolases.

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. Ces enzymes sont tous capables de dégrader la cellulose sous forme amorphe, sauf certaines exceptions. Mais, par contre, seules les CBHs sont capables d'hydrolyser la cellulose sous forme cristalline. Dans leur action, les CBHs et EGs libèrent les molécules de cellobiose qui nécessitent d'être hydrolysées, à leur tour.

C'est ainsi qu'une hydrolyse effective de la cellulose requiert aussi la présence des β -glucosidases qui hydrolysent la cellobiose en deux molécules de glucose.

Les produits de la cellulolyse sont des sources d'énergie et de carbone aussi bien pour les organismes cellulolytiques que pour les autres organismes microscopiques vivant dans le milieu où cette réaction catalytique se produit. Les sucres assimilables provenant de la cellulolyse constituent le principal moteur d'interaction existant entre micro-organismes et autres organismes vivant dans leur environnement. Pour fonctionner correctement, les endoglucanases, exoglucanases et les β -glucosidases doivent être stables dans l'environnement extracellulaire (Pérez et *al.*, 2002).

La dégradation de l'hémicellulose aboutit à la formation des sucres monomères et de l'acide acétique. Les hémicellulases, responsables de cette dégradation, 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) qui 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. Il faut tout de même, noter que dans le processus de sa dégradation, l'hémicellulose requiert aussi des enzymes accessoires telles que la xylane estérase, les estérases feruliques et le p -coumarique, l' α -l-arabinofuranosidase, et l' α -4-O-methyl glucuronosidase agissant dans l'hydrolyse des xylanes et des mannanes (polymère de mannose de haut poids moléculaire) du bois (Jeffries, 1994).

La dégradation de la lignine, dans la nature, est généralement effectuée par les "white-rot fungi", qui sont des Basidiomycètes, et plus rarement, des Ascomycètes. Le point 1.2 exposera avec plus de détails les principaux embranchements de ces organismes et les mécanismes par lesquels ils interviennent dans la désagrégation de la lignine.

1.1.4.4. Méthodes mixtes

Elles comprennent le couplage des traitements physiques tels que la chaleur et la pression avec des traitements biologiques ou chimiques. Leur relative efficacité tient au fait qu'elles prennent en compte les avantages et les inconvénients (dont il sera question au point 1.1.4.5.) des méthodes couplées.

1.1.4.5. Avantages et inconvénients de différentes méthodes de prétraitement de la lignocellulose

Sur le plan technico-économique, les méthodes physiques (mécaniques, thermiques, pression, etc.) sont, généralement, énergivores et nécessitent souvent 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.

Concernant les prétraitements chimiques, ils 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 adaptés 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 leur neutralisation.

Quant aux méthodes biologiques, elles sont préférables sur le plan environnemental, énergétique et économique. Parmi elles, l'usage des micro-organismes présente un intérêt économique certain parce que ne coûtant pas cher. Son principal écueil, c'est la lenteur du processus de désagrégation de la lignocellulose, ce qui limite son usage à des fins commerciales.

Au delà de ceci, elle a l'inconvénient d'hydrolyser, outre la lignine, les polysaccharides de la matrice lignocellulotique. Ces écueils pourraient être contournés par les enzymes purifiés, susceptibles de résoudre la difficulté liée à la vitesse du processus et à l'hydrolyse des polysaccharides, mais l'obtention de ces enzymes purifiés coûte cher et n'est pas économiquement rentable.

Comme on peut le constater, chaque méthode présente des avantages et des inconvénients. Aussi, il est rare qu'une méthode soit appliquée seule dans le processus de la valorisation de la lignocellulose. Généralement, la démarche la plus pertinente consiste à trouver l'équilibre entre les aspects environnementaux, économiques et la durée de traitement.

1.1.5. Quelques points essentiels sur la valorisation de la lignocellulose

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 de base, ces résidus peuvent être valorisés comme engrais organique, fourrage, source d'énergie et d'autres produits utiles à l'homme.

La mise en place d'une procédure efficace pour leur valorisation nécessite dans un premier temps, de connaître les principaux usages auxquels ils peuvent servir, ensuite, il faudrait localiser les sites où ces résidus sont produits, les identifier et les quantifier. Enfin, organiser leur collecte et transport jusqu'aux lieux de leur utilisation.

La nature résistante de la lignine qui imprègne la cellulose et les hémicelluloses dans la paroi cellulaire secondaire des plantes rend difficile tout processus de valorisation de ces résidus. Très souvent, il importe que les résidus végétaux soient soumis à des prétraitements de désagrégation de la lignine, avant la mise en place de différents mécanismes de leur valorisation.

Les prétraitements peuvent être de nature physique, chimique, biologique ou une combinaison des trois. Chaque méthode présentant des avantages et inconvénients, c'est pourquoi, il est rare qu'une méthode soit appliquée seule dans le processus de la valorisation de la lignocellulose.

L'analyse des aspects techniques, économiques et environnementaux est très importante dans le choix du type de prétraitement à appliquer aux résidus à valoriser.

1.2. ASPECTS PRATIQUES DE LA VALORISATION DES RÉSIDUS LIGNOCELLULOSIQUES PAR LES "WHITE-ROT FUNGI"

Pour mieux comprendre le processus de biodégradation des résidus lignocellulosiques par les wrf, quelques généralités utiles à la connaissance des wrf et une discussion sur les principaux paramètres nécessaires à la réussite de leur culture sur substrat solide (Solid State Fermentation ou SSF, en abrégé) en conditions contrôlées, en vue d'obtenir une opération réussie, sont données dans les lignes qui suivent.

1.2.1. Généralités sur les "white-rot fungi"

En parlant des "white-rot fungi", il s'agit beaucoup plus d'un groupe physiologique que taxonomique. Ce groupe comprend les fungi ou mycètes, capables de dégrader intensivement la lignine d'un substrat lignocellulosique. Le nom de "white-rot fungi" ou wrf provient de l'aspect que le bois acquiert lorsqu'il est attaqué par ces champignons. Après l'élimination de la lignine, le bois prend une apparence blanchie (Blanchette et *al.*, 1988 ; Pointing, 2001).

Ces mycètes sont capables de digérer leur nourriture à l'extérieur de leur corps en hydrolysant, au moyen des puissants enzymes, les molécules complexes en composés simples qu'ils peuvent alors absorber et utiliser. Ils sont soit saprotrophes, soit parasites des végétaux ou d'animaux. Un très grand nombre d'espèces réalisent, en outre, des symbioses avec des végétaux, des protistes ou des procaryotes (Arms & Camps, 1989).

1.2.1.1. Classification des wrf

La méthode de classification phylogénétique qui est un système de classification des êtres vivants basé sur des concordances généalogiques entre un certain nombre de gènes a pour objectif de rendre compte des degrés de parenté entre les espèces. Elle permet l'analyse discriminante des espèces et indique si les populations fongiques effectuent des échanges de gènes dans la nature et, partant de cela, de comprendre leur histoire évolutive ou phylogénie (Blackwell, 2011).

Dans la classification phylogénétique, le règne des fungi est subdivisé en 5 phyla ou embranchements qui sont présentés dans la Figure 1.6. Il s'agit de : Ascomycota, Basidiomycota, Chytridiomycota, Glomeromycota et Zygomycota (Lutzoni et *al.*, 2004). Les wrf se retrouvent particulièrement aux embranchements des Ascomycota et des Basidiomycota.

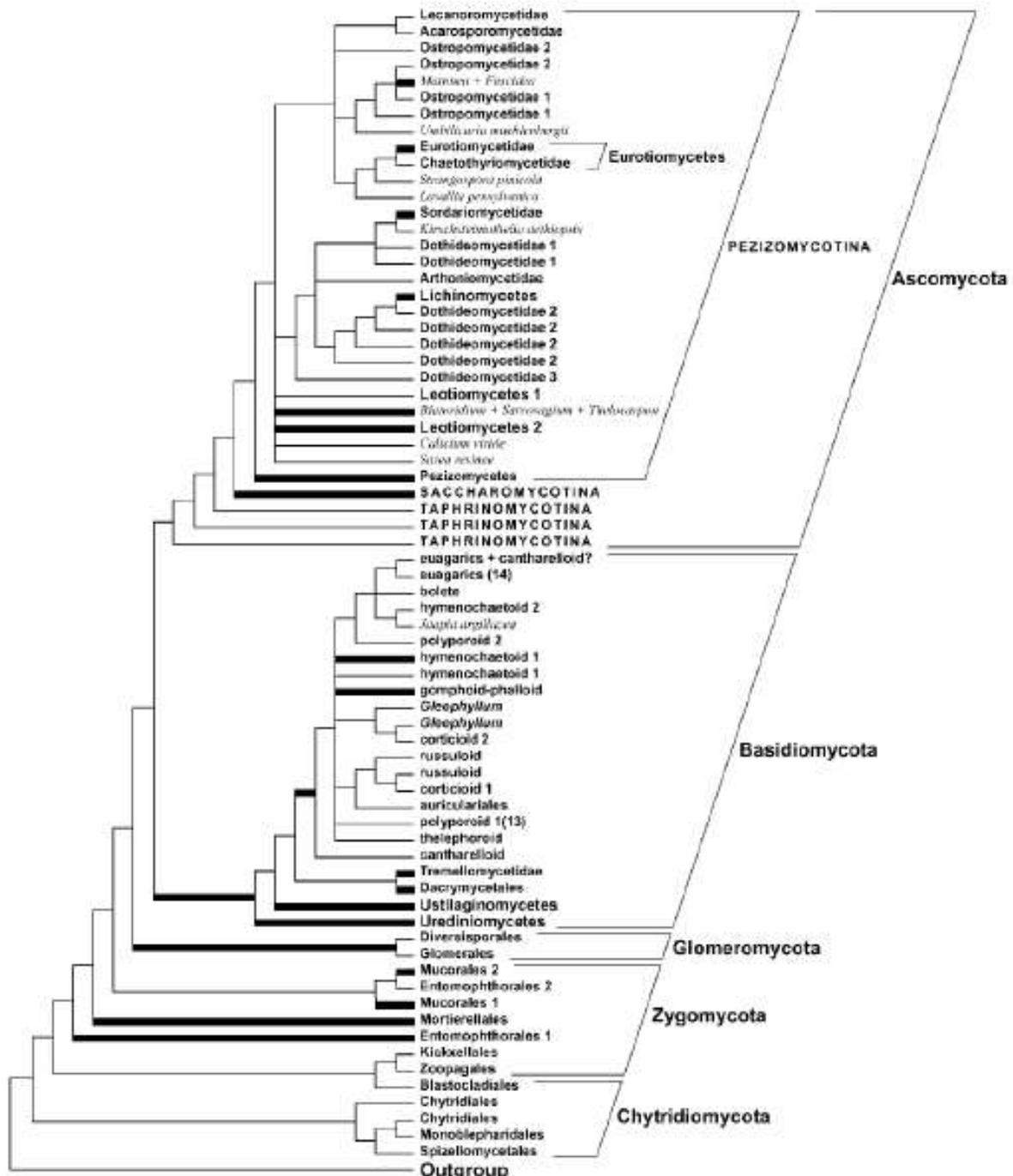


Figure 1.6. Classification phylogénétique du règne des Fungi (Lutzoni et al., 2004)

Parlant des Ascomycota, bien que cet embranchement soit divisé en trois sous-embranchements monophylétiques que sont Taphrinomycotina, Saccharomycotina et Pezizomycotina, comme cela est représenté dans la figure 1.7, la grande majorité des champignons filamenteux parmi lesquels on trouve des wwf tels que *Xilaria hypoxylon* et *Daldinia concentrica* se retrouvent dans Pezizomycotina.

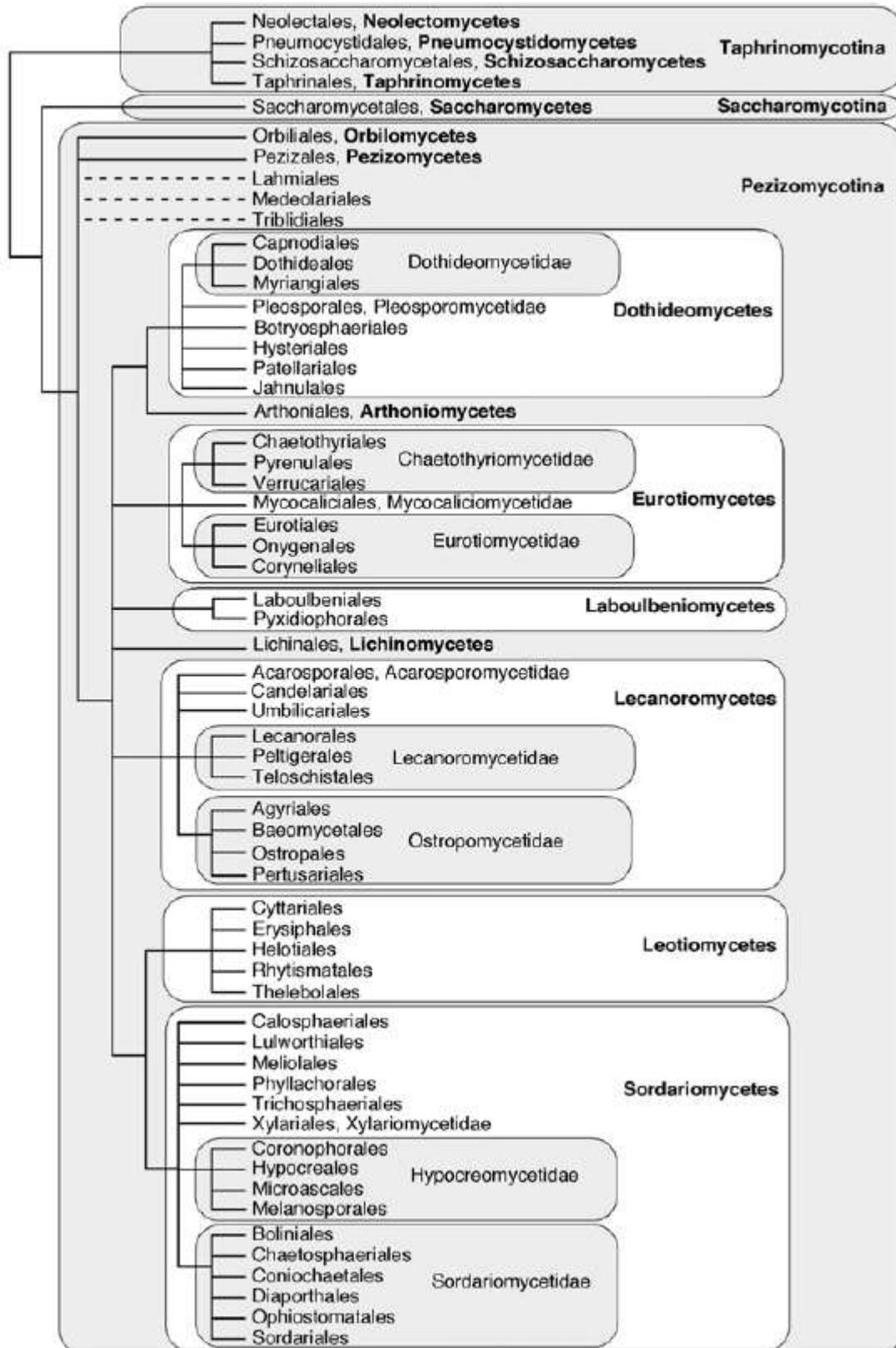


Figure 1.7. Classification phylogénétique de l'embranchement des Ascomycota (Hibbett et al., 2007)

L'embranchement des Basidiomycota, en ce qui le concerne, est subdivisé en trois sous-embranchements qui sont représentés dans la figure 1.8. Il s'agit de Pucciniomycotina, Ustilaginomycotina et Agaricomycotina.

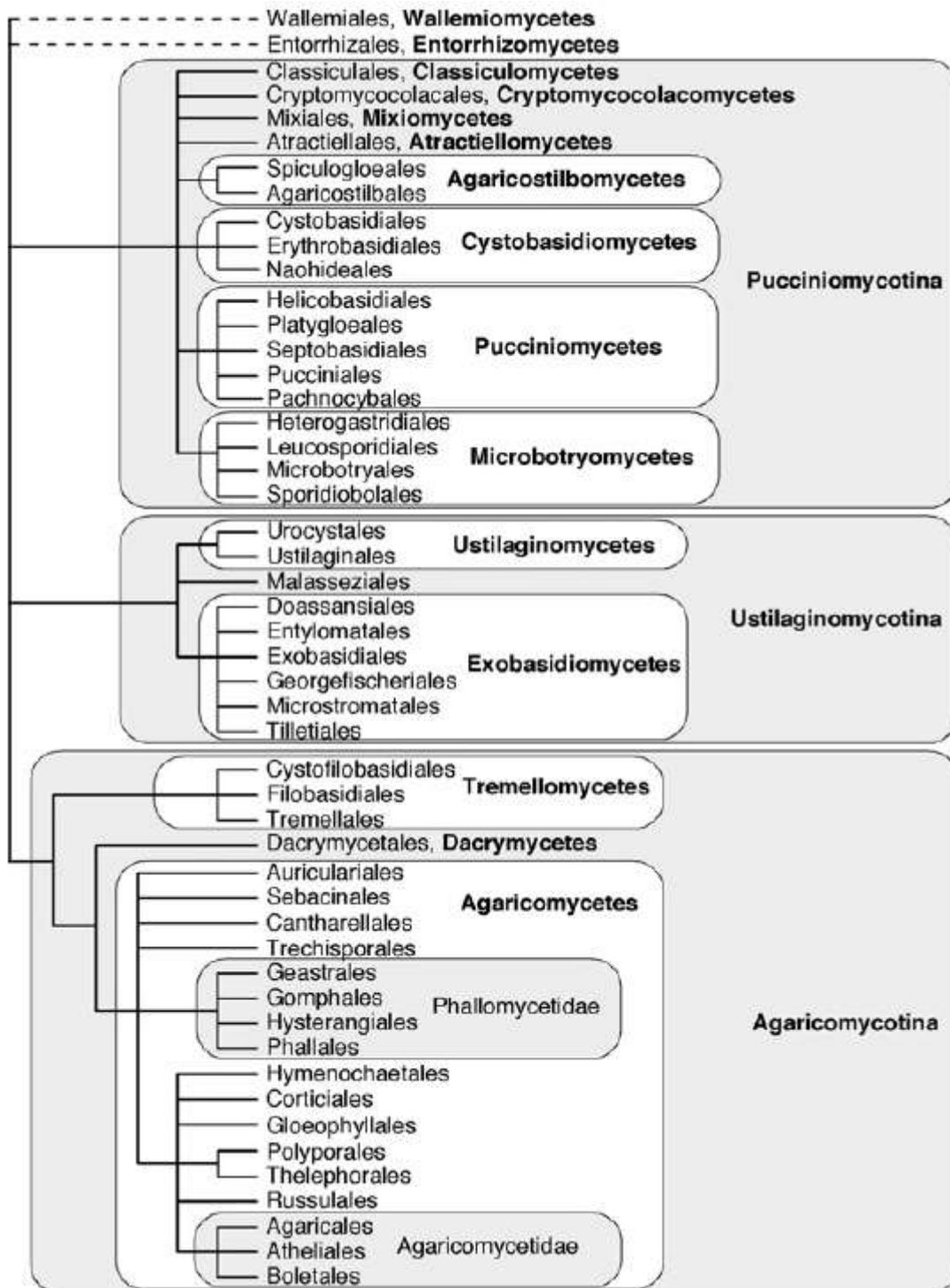


Figure 1.8. Classification phylogénétique de l'embranchement des Basidiomycota (Hibbett et al., 2007)

Le sous-embranchement des Agaricomycotina renferme tous les wrf appartenant aux Basidiomycotina. C'est dans cet embranchement que se retrouvent près de deux tiers des basidiomycètes connus, y compris la grande majorité des champignons formant des fructifications (sporophores) (James et al., 2006).

Dans le sous-embranchement des Pucciniomycotina, on trouve principalement des champignons responsables de la rouille (environ 7000 espèces) qui sont essentiellement des agents pathogènes des plantes terrestres.

Les Ustilaginomycotina, quant à eux, comprennent environ 1.500 espèces de champignons responsables du charbon et des levures dont la plupart causent des infections systémiques chez leurs hôtes angiospermes.

1.2.1.2. *Importance et rôle des wrf*

Les wrf ont plusieurs rôles connus dont le principal et le plus important est la décomposition de la matière organique d'origine végétale morte. Cette décomposition en facilite la désagrégation et en rend possible l'utilisation par eux-mêmes et par d'autres organismes vivants.

Parmi eux, figurent plusieurs champignons à importance alimentaire, sanitaire et technologique. Pour certaines espèces de ces champignons, l'appartenance à un groupe d'utilité est nette, tandis que pour d'autres, la distinction entre les différentes catégories n'est pas toujours évidente (Chang, 2003). En voici quelques exemples :

- Champignons alimentaires : plusieurs genres dont le genre *Pleurotus* (*P. florida*, *P. cystidiosus*, etc.) et le genre *Auricularia* (*A. cornea*, *A. delicata*, etc.) (Mshigeni, 2003 ; Chang, 2003 ; Boa, 2006) ;
- Champignons à importance thérapeutique, intervenant notamment dans la prévention des maladies cardiovasculaires, tels que *Trametes versicolor* et ceux du genre *Ganoderma* (Wasser & Weis, 1999 ; Boa, 2006 ; Lau et al., 2004 ; Rai et al., 2005 ; Donatini₁, 2010 ; Danatini₂, 2010) ;
- Champignons à importance technologique tel que *Pycnoporus cinnabarinus*, non comestible, qui produit des arômes de grande valeur en agro-industries et en industries cosmétiques (Gross et al, 1990) ;
- Champignons utilisables dans la dépollution, plus respectueux de l'environnement et moins coûteux par rapport aux méthodes chimiques (Wesenberg et al, 2003 ; Hamman, 2004 ; Karas et al, 2011).

Les bénéfices qu'on peut tirer des wrf sont de nos jours fortement menacés de disparaître simultanément avec ces organismes. En effet, plusieurs espèces de wrf sont en danger d'extinction suite à leur mauvaise exploitation et à la destruction des écosystèmes forestiers qui les renferment par la pression démographique. C'est la raison pour laquelle quelques chercheurs à travers le monde, s'étant rendu compte de ce drame, se sont investis dans le développement de l'activité de culture de certaines espèces de ces champignons dont beaucoup sont comestibles (Chang, 2003 ; Mshigeni, 2003 ; Boa, 2006 ; Dibaluka, 2010).

Les espèces ayant un bon rendement sont cultivées sur une variété de substrats organiques avec des technologies qui sont bien établies. Cette production fongique présente le double avantage de mettre à la disposition des consommateurs une denrée alimentaire de grande valeur nutritive et de lutter contre la pollution environnementale causée par des résidus végétaux jonchant divers endroits.

Des industries de champignons à succès sont aujourd'hui établies dans beaucoup de pays avec une énorme augmentation de la production ces dernières années, surtout suite à une capacité accrue en Chine (Chang, 2003). Ce pays a accru, de manière spectaculaire, sa production des champignons comestibles qui est passée de 5,7% de la production mondiale en 1978, à 70% de celle-ci en 2002 tel que cela est illustré dans le tableau 1-1.

Tableau 1-1. Evolution de la contribution de la Chine dans la production mondiale des champignons comestibles (Chang, 2005)

Année	Production mondiale (x1000 tonnes)	Production chinoise (x1000 tonnes)	Contribution de la Chine (%)
1978	1.060,00	60,00	5,70
1983	1.453,00	174,50	12,00
1986	2.176,00	585,00	26,80
1990	3.763,00	1.083,00	28,80
1994	4.909,30	2.640,00	53,80
1997	6.158,40	3.918,00	63,60
2002	12.250,00	8.760,00	71,50

En République Démocratique du Congo (RDC), les espèces les plus cultivées sont comestibles (Dibaluka et al., 1999 ; Dibaluka et al., 2009 ; Dibaluka et al., 2010). Cela revêt beaucoup d'intérêt dans la mesure où la culture fongique permet de résorber les résidus lignocellulosiques produits en grande quantité, mais aussi de lutter contre l'insécurité alimentaire et la malnutrition par la fourniture à la population d'une alimentation de bonne qualité (les champignons comestibles). Malheureusement, la quantité des champignons produits est encore insuffisante pour avoir un impact significatif sur l'ensemble de la population et le coût de production est relativement élevé, ce qui a un impact sur le prix de vente de cette denrée alimentaire.

1.2.2. Dégradation de la lignocellulose par les wrf et mode d'action des enzymes lignolytiques

Dans la nature, la dégradation de la lignine est généralement effectuée par les wrf appartenant à l'embranchement des Basidiomycota et plus rarement à celui des Ascomycota, capables de dégrader la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Il en existe de deux types, ceux à action « simultanée » et ceux à action « séquentielle ». Les wrf « simultanés » dégradent les hydrates

de carbone et la lignine quasiment à la même vitesse, tandis que les wrf « séquentiels » dégradent d'abord la lignine et les hémicelluloses ; ce qui laisse un substrat enrichi en cellulose (Smith, 1988).

C'est ainsi que les modifications provoquées au cours de la désagrégation de la lignocellulose dépendent de l'espèce ou de la catégorie du wrf, des types de substrat ou matière végétale en dégradation et des conditions environnementales (Martinez et al., 2005).

Dans ce processus de dégradation, 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. La principale conséquence en est que ce catabolisme n'est pas considéré comme un facteur limitant dans le cycle du carbone.

Ceci n'est pas le cas en ce qui concerne le catabolisme de la lignine. Cette substance qui est extrêmement résistante à la dégradation est minéralisée par les wrf dans un processus oxydatif aérobic strict (Pointing, 2001). A cet effet, les wrf sécrètent différemment un ou plusieurs enzymes extracellulaires qui sont essentiels pour sa dégradation et qui se combinent avec d'autres mécanismes pour la minéraliser. La synthèse de ces enzymes, le mécanisme d'action extracellulaire et non spécifique de ces enzymes permet à ces organismes de s'attaquer à la lignine, vu sa taille et sa nature (Waldner, 1987 ; Hatakka, 1994 ; Agrios, 2005 ; Hamman, 2005), mais aussi de dégrader les polluants organiques dont les structures avoisinent celle de la lignine. Parmi ces molécules, on trouve des pesticides, des colorants synthétiques, des hydrocarbures aromatiques polycycliques, les biphényles polychlorés et des produits conservateurs de bois (Pointing, 2001).

Certaines de ces substances sont impliquées dans la pollution environnementale en RDC. En effet, dans ce pays, il y a une pollution environnementale due à l'usage abusif et non contrôlé des pesticides et des colorants textiles (azoïques, etc.), à la mauvaise gestion des résidus agricoles, des déchets miniers et à la présence des résidus d'explosifs provenant de la répétition des guerres civiles à répétition dans le pays. C'est ainsi que, parallèlement aux travaux de biodégradation de la lignocellulose dans le but de la production des champignons comestibles, le développement et la promotion de la recherche sur la production énergétique (biogaz et bioéthanol) ainsi que sur la bioremédiation tirant profit du mode d'action de ces biocatalyseurs des wrf pour dégrader ces polluants, ont besoin d'être initiés et soutenus.

Ces enzymes sont souvent appelés Enzymes Modifiant la Lignine ou LME (Lignin Modifying Enzymes). Les principaux LME sont :

- Les laccases (Lac, benzènediol oxygen oxidoreductase (EC 1.10.3.2) : Ce sont des phénoloxidasés dont le site actif contient quatre atomes de cuivre. Ils catalysent l'oxydation directe des composés phénoliques par enlèvement d'un électron, suivi par la création d'un groupe phénoxy générateur des radicaux libres. L'oxydation des parties non phénoliques de la lignine exige la présence d'un médiateur tel que le ABTS (2,2'-azinobis-3-éthylthiazoline-6-sulfonate) (Jeffries, 1994 ; Wong, 2009). Le mécanisme d'action des Lac est schématisé dans les figures 1.9 et 1.10.

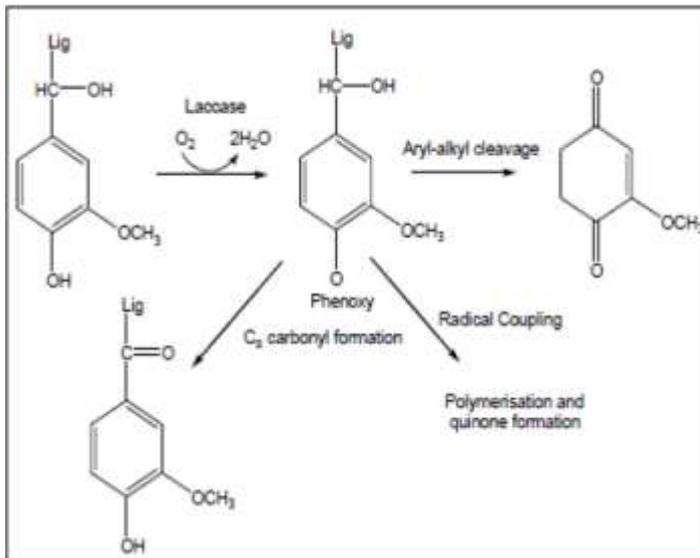


Figure 1.9. Oxydation des sous-unités phénoliques de la lignine par le laccase (Gochev, 2007)

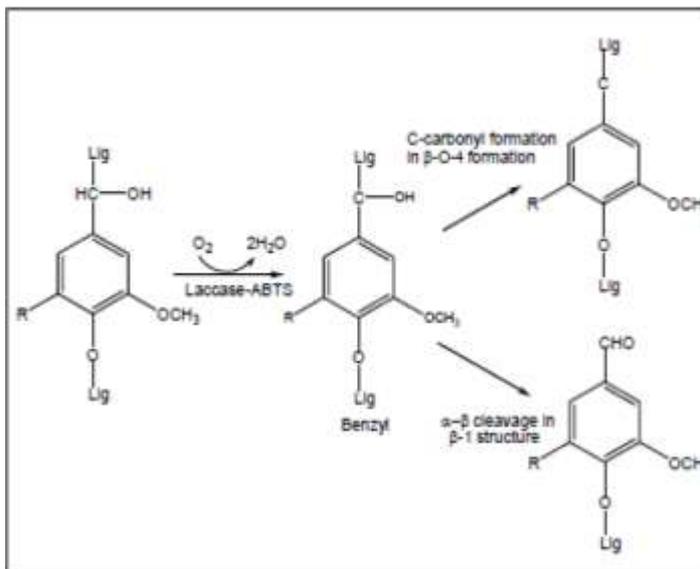


Figure 1.10. Oxydation des sous-unités non phénoliques de la lignine par le système des médiateurs-laccase (Gochev, 2007)

- Les Peroxydases de la lignine (LiP, diarylpropane peroxydases (EC 1.11.1.14) : Ce sont des glycoprotéines à hème. Ils jouent un rôle crucial dans la biodégradation de la lignine. Ils catalysent, à partir du peroxyde d'hydrogène, la dépolymérisation oxydative des composés non phénoliques (diarylpropane), et de nombreux composés phénoliques de la lignine (Blackwell, 2011). La figure 1.11 schématise le mode d'action de la LiP.

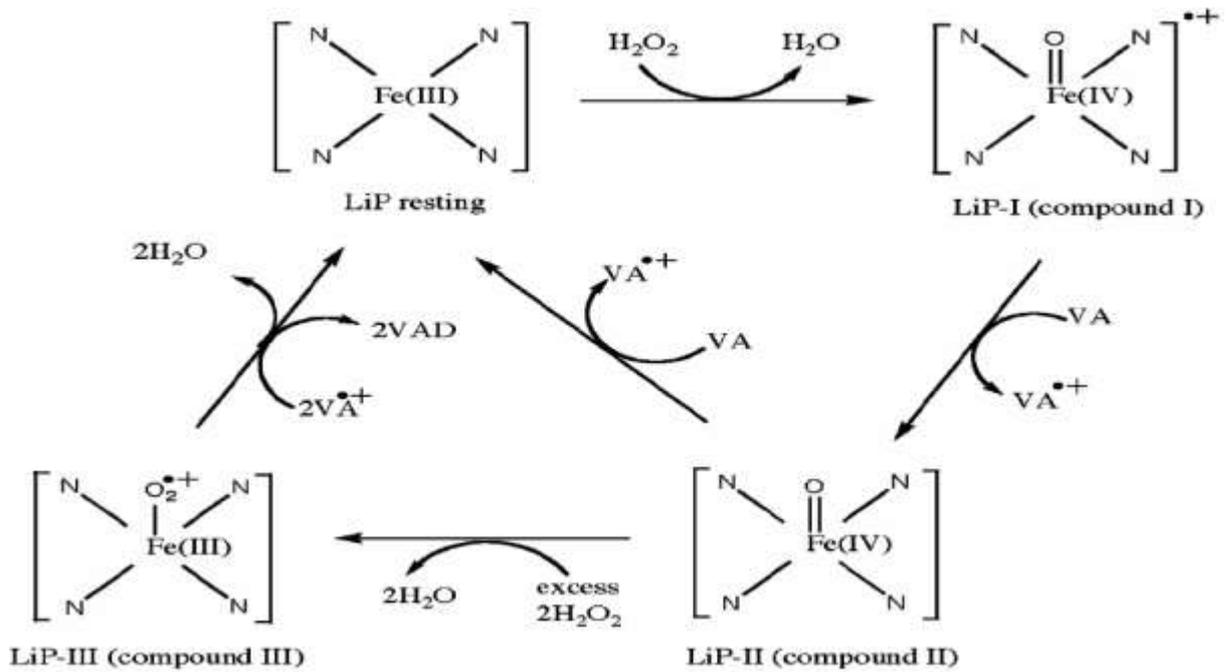


Figure 1.11. Cycle catalytique de la lignine peroxydase (Wong, 2009)

La LiP est oxydée en LiP(I) en présence du peroxyde d'hydrogène. La LiP(I) oxyde une molécule d'alcool veratrylique (VA) en cation radical correspondant (VA^{•+}) et devient LiP(II). Cette dernière oxyde une autre molécule de VA et retrouve la forme native de la LiP. Les cations radicaux VA^{•+} produits sont des oxydants très puissants des structures phénoliques et non phénoliques de la lignine.

- Les Manganèses peroxydases (MnP, E.C. 1.11.1.13) : Ce sont des glycoprotéines extracellulaires ; ils sont sécrétés en de multiples isoformes qui contiennent une molécule d'hème sous forme de protoporphyrine IX de fer (Wong, 2009 ; Blackwell, 2011). Les manganèses peroxydases utilisent le Mn(II) comme substrat réducteur. Ces enzymes oxydent la Mn(II) en Mn(III), qui est ensuite libérée de l'enzyme en complexe avec l'oxalate ou avec d'autres agents de chélation. Le complexe de Mn(III) chélaté agit comme un médiateur redox réactif dans l'oxydation de substrats phénoliques tels que les simples phénols, les amines, les colorants, les sous structures phénoliques de lignine et les dimères. Le potentiel d'oxydation du complexe Mn(III) est seulement limité aux structures phénoliques de lignine. Pour l'oxydation des substrats non phénoliques par Mn(III), des radicaux réactifs doivent être formés en présence d'un second médiateur. Des acides organiques, tels que malonate et oxalate, sont les composés primaires qui agissent comme médiateurs secondaires dans la production de radicaux réactifs.

- Les Peroxydases versatiles (VP, EC 1.11.1.16) : Ils constituent une catégorie des manganèses peroxydases montrant des activités sur les substrats aromatiques similaires aux peroxydases de lignine. Ce groupe d'enzymes est non seulement capable d'oxyder Mn(II) en Mn(III) comme avec les manganèses peroxydases, mais aussi des substrats phénoliques et non phénoliques qui sont typiques des peroxydases de lignine. La caractérisation moléculaire des peroxydases versatiles révèle des structures qui sont plus proches des peroxydases de lignine que des isozymes de manganèse peroxydases.
- Les Enzymes accessoires : Outre les ligninases, d'autres enzymes extracellulaires fongiques, qui agissent comme enzymes accessoires, sont impliquées dans la dégradation de la lignine (Blackwell, 2011). Ces enzymes incluent des oxydases générant du peroxyde d'hydrogène, nécessaire aux peroxydases, et des déshydrogénases qui réduisent les composés dérivés de la lignine. Les oxydases générant du peroxyde d'hydrogène comprennent l'aryl alcool oxydase et la glyoxal oxydase. De plus, des aryl alcool déshydrogénases et des quinones réductases sont aussi impliqués dans la dégradation de la lignine. Enfin, la cellulose déshydrogénase est aussi impliquée dans la dégradation de la lignine en présence de peroxyde d'hydrogène et d'ions de fer chélatés.

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

En considérant les divers groupes de wrf, chaque groupe produit l'un ou l'autre type d'enzymes lignolytiques cités plus haut. Mais, néanmoins, le groupe produisant la LiP et le MnP ainsi que le groupe de MnP et de Lac semblent plus grands dégradeurs que les groupes produisant la LiP et le Lac, sans doute à cause du rôle de la MnP dans la délignification (Hatakka, 1994 ; Tuomela et al., 2000).

1.2.3. Culture des white-rot fungi sur la lignocellulose

Le processus de dégradation de la lignocellulose par des wrf peut être effectué à l'état solide ou à l'état immergé.

La fermentation à l'état solide ou SSF (Solid State Fermentation) qui s'oppose à la fermentation à l'état immergé ou SmF (Submerged Fermentation) est définie comme étant la fermentation obtenue à partir du développement des micro-organismes sur la matière solide en absence de l'eau libre. Dans ce cas, le substrat doit contenir suffisamment d'humidité pour ne pas entraver le développement de l'organisme qui favorise la fermentation (Pandey, 2003).

L'utilisation des résidus lignocellulosiques comme substrats dans le processus de SSF peut constituer une valorisation efficace pour ces sous-produits (Singhania et al., 2009). Parfois, il est nécessaire de faire subir un prétraitement au substrat, avant la culture fongique, pour en faciliter la colonisation mycélienne (Oei, 2005 ; Taherzadeh & Karimi, 2008).

Ceci s'explique par le fait qu'en dépit du type et de l'origine des résidus lignocellulosiques, le préalable à leur colonisation mycélienne est que l'organisme cultivé y trouve un minimum de conditions physico-chimiques et nutritives appropriées à son développement. Dans la nature, le processus de colonisation est lent, mais cela peut être accéléré en culture contrôlée. Il importe pour cela qu'un certain nombre des paramètres expérimentaux soit pris en compte. Ces facteurs comprennent, notamment, la température, le pH, l'aération, l'humidité, l'activité de l'eau, les propriétés du bioréacteur et la nature du substrat solide utilisé (Singhania et al., 2009).

D'où les avantages offerts par la SSF qui permet une simulation des conditions naturelles de croissance de fungi mis en culture. Elle facilite la croissance de ces organismes sur des résidus lignocellulosiques et permet d'atteindre un certain nombre des finalités : le blanchiment et la réduction en pâtes des résidus lignocellulosiques, leur enrichissement en sucre et/ou réduction de la teneur en lignine, la réduction de la pollution environnementale organique, la production des aliments pour bétail et pour hommes, et l'obtention des produits chimiques et pharmaceutiques. En outre, elle n'exige que peu ou pas d'apport d'eau et des sources d'énergie, ne produit pas beaucoup de résidus et est efficace pour la résorption des résidus (Pandey, 2003 ; Holker & Lenz, 2005).

D'une manière schématique, le déroulement de la SSF fait intervenir un certain nombre d'éléments à catégoriser dans ces 3 ensembles : les "inputs", le processus avec ses conditions opératoires et les "outputs". Les caractéristiques des "inputs" et les conditions opératoires détermineront la nature et le rendement des "outputs".

1.2.3.1. "Inputs"

Selon Larousse (www.larousse.fr), on appelle inputs, l'ensemble des facteurs entrant dans une production donnée (matières premières, énergie, main-d'œuvre, etc.).

Dans une opération de SSF, ces inputs peuvent être constitués par les résidus végétaux provenant de la végétation naturelle (généralement graminéenne), de l'activité agricole (paille de céréales, fane d'arachide, etc.), des agro-industries (balle de riz, parche de café, coques d'arachide, etc.), de l'industrie du bois (copaux et sciure de bois) et d'une partie d'ordures ménagères. Chaque type de ces résidus possède ses caractéristiques propres, notamment sa teneur en cellulose, hémicelluloses, lignine et en divers portions solubles de la paroi cellulaire. Ces caractéristiques intrinsèques à chaque substrat avec les conditions opératoires détermineront les types de fungi, le taux de dégradation, la durée de la fermentation. La croissance des fungi, par exemple, décroît en présence d'une faible teneur d'azote ou de carbone et ce n'est que dans ces conditions que s'active l'activité lignolytique qui est donc un métabolisme secondaire (Pointing, 2001).

Dans les "inputs" peuvent s'ajouter diverses substances requises, variables selon les finalités, pour la fermentation. Celles-ci pouvant être des alcalis, acides ou tampons imposant une valeur de pH favorable à une transformation souhaitée (Balat, 2011 ; Agbor et al., 2011), des inducteurs divers favorisant la production des enzymes lignolytiques (Blackwell, 2011), des éléments nutritifs requis par les fungi pour leur bonne croissance (Smith et al., 1988), d'une ou des injections des gaz pour maintenir une ambiance gazeuse sélective vis-à-vis des organismes non désirés, etc.

La connaissance des exigences culturales des organismes d'intérêt est très importante, en ce qui concerne les fungi par exemple, d'une manière générale la plupart d'entre eux préfèrent un environnement acide, mais les Basidiomycètes peuvent tolérer une large gamme de pH. Ces derniers ont une croissance très limitée aux pH supérieurs à 7,5 ; les espèces du genre *Coprinus* sont les seuls Basidiomycètes préférant un substrat alcalin.

1.2.3.2. Conditions opératoires

Dans la SSF, d'une manière générale, et dans la valorisation de la lignocellulose par les wrf en particulier, deux cas de figure peuvent se présenter (Pandey, 2003 ; Oei, 2005) :

Premièrement, un ou plusieurs types de substrat peuvent être disponibles en présence d'un certain nombre d'agents de fermentation, ceux-ci pouvant être des wrf. Il s'agira alors de trouver les wrf appropriés et les meilleures conditions culturales pour une valorisation efficace. Il serait aussi important de déterminer à l'avance le type de valorisation (le produit final à obtenir).

Dans le second cas, la recherche d'un produit ou d'un résultat final spécifique peut être à la base de la SSF. Il est évident que dans ce cas, il faudra déterminer les substrats, les fungi et les conditions opératoires adéquates.

La principale difficulté qui se pose avec la SSF est la maîtrise de l'opération pouvant conduire à une reproductibilité des résultats et à l'établissement d'une standardisation, car le processus est très susceptible et fort dépendant des conditions de température, d'humidité, de la concentration de divers éléments du substrat, des stress divers sur l'agent biologique. Ces éléments peuvent fluctuer au cours de la fermentation (Holker & Lenz, 2005).

Du point de vue pratique, le premier élément important pour le processus de la SSF est le réacteur dans lequel la fermentation se déroulera. Celui-ci est appelé également bioréacteur, fermenteur ou propagateur. C'est un appareil dans lequel on multiplie des micro-organismes (levures, bactéries, champignons microscopiques, algues), ou des cellules animales et végétales pour la production de biomasse, la production d'un métabolite ou encore la bioconversion d'une molécule d'intérêt.

Dans le bioréacteur le « lit de la fermentation ou du substrat » destiné à supporter l'opération de fermentation est l'élément clé. Celui-ci doit répondre à un certain nombre des critères :

Il doit être fabriqué avec un matériel résistant à la corrosion et au poids de la biomasse, ne pas être toxique et de prix raisonnable. Il doit faciliter la circulation d'air et de vapeur d'eau, ne pas favoriser la contamination, ni entraver le développement mycélien et enfin, ne pas entraver la récupération du produit final (Pandey, 2003 ; Holker & Lenz, 2005).

Les bioréacteurs utilisables en SSF peuvent être de forme et de dimension aussi variables que possible. Ils partent de l'échelle de laboratoire (pouvant contenir quelques grammes à quelques kilogrammes) jusqu'à l'échelle industrielle (contenant plusieurs kilogrammes à plusieurs tonnes). Plusieurs types de matériaux entrent dans leur fabrication : verre pyrex, métallique, etc. (Durand, 2003).

Par rapport au mode d'alimentation, en SSF, il y a trois principaux types de bioréacteurs : les bioréacteurs de type "batch" une fois chargeable, les bioréacteurs de type "batch" avec possibilité d'alimentation en cours du processus (mode d'alimentation par "fed batch") et les bioréacteurs à alimentation continue (Raghavarao et al., 2003). Les bioréacteurs de type "batch" sont les plus utilisés avec ou sans mélange des substrats au cours de la fermentation. L'opération de mélange doit être conduite avec beaucoup d'attention parce que les cisaillements subis par le mycélium peuvent influencer sur son métabolisme et le résultat final.

Au niveau de la RDC, dans presque toute la littérature relative à la valorisation des résidus lignocellulosiques par la production des champignons comestibles, en guise des bioréacteurs, des sacs de polypropylènes pouvant contenir de 500 à 1000 g de substrat et des bocaux en verre pouvant en contenir en moyenne 300 g ont été utilisés dans le recherche et la production des champignons comestibles (Dibaluka et al., 2009 ; Dibaluka et al., 2010). Ce matériel présente l'avantage d'une bonne résistance mécanique, d'être bon marché et de résister au traitement thermique de pasteurisation ou de stérilisation appliqué. Cependant, l'exploitation du processus à l'échelle industrielle, dans ce pays, est encore un terrain peu exploré.

Quelque soit le type de bioréacteur disponible, il est important de souligner qu'en SSF la culture des fungi peut se faire en condition non stérile ou au contraire, le substrat peut subir une stérilisation préalable avant d'être inoculé par ces organismes.

En culture non stérile, il sied de recourir aux types y adaptés. Smith et al (1988) distinguent trois catégories des wrf :

- a. les wrf capables de croître sur le substrat de culture sans prétraitement préalable. Ils ont permis la culture extensive des champignons colonisateurs du bois tels que *Lentinula edodes* (sur *Quercus spp.*), *Auricularia spp.*, *Tremella edodes* et *T. fuciformis* (sur les troncs des feuillus) pratiquée depuis plusieurs siècles. La durée d'incubation, d'une manière générale, varie de 6 à 12 mois et la production s'échelonne sur plusieurs années. Le prétraitement du bois n'est pas indispensable lorsque le ratio C/N est au-dessus de 100/1 et le système enzymatique des wrf lignolytiques colonisateurs est très efficace. Dans ce cas, le développement de la microflore naturelle concurrente est limité à cause de la carence en azote.
- b. les wrf nécessitant un prétraitement physique ou chimique du substrat. Ce prétraitement pouvant consister en un hachage, entassement et humidification de la paille tel que fait pour la culture du *Volvariella volvacea*, un court compostage après mélange des substrats pour l'*Agaricus bisporus*, une pasteurisation de la paille entassée à 70°C ou 80°C, pendant 24h pour *Pleurotus spp.*, etc.
- c. les wrf exigeant une longue et lente période de compostage avant de coloniser le substrat lignocellulosique. L'*Agaricus bisporus*, le *Coprinus spp.* en sont des exemples.

Culture des wrf sur substrat stérile.

En condition stérile, la stérilisation du substrat offre plusieurs avantages, notamment, l'élimination de toute compétitivité d'autres organismes et la réduction du cycle de vie des fungi par fragmentation de la structure complexe du bois.

Cependant la méthode présente aussi certains inconvénients : son coût est relativement élevé et son applicabilité très difficile pour des grandes quantités de substrat. Elle est, néanmoins, très souvent pratiquée pour des petites quantités de substrat ou par soucis d'obtenir une croissance rapide des fungi en culture en éliminant la compétition d'autres micro-organismes car ces derniers peuvent influencer sur les paramètres physico-chimiques et biologiques de la fermentation.

A ce sujet, il y a lieu d'examiner les différents phénomènes se déroulant au cours de cette opération :

- Le transfert de masse : au cours de la SSF, il se produit le transfert de masse au niveau microscopique et au niveau macroscopique (Smith et al., 1988).

Le transfert microscopique de masse est relatif à la croissance du micro-organisme et dépend de la diffusion inter et intra particules des gaz (O_2 , CO_2), des enzymes, des nutriments et des produits du métabolisme.

Le transfert macroscopique est relatif au flux massique d'air, d'eau et de tout autre produit en cours de fermentation dans et hors du bioréacteur. Ce transfert engendre des variations d'humidité, de température, de concentration des gaz (O_2 , CO_2). Il concerne aussi les effets de cisaillement provoqués par le mélange dans le bioréacteur, comprenant les dommages au micro-organisme ou l'intégrité des particules de substrat.

- Le transfert d'énergie : en général, lors de SSF, une quantité considérable de chaleur se dégage, conséquence des activités métaboliques des micro-organismes.

Au début de la fermentation, la température et la teneur en oxygène sont les mêmes en tout emplacement du lit du bioréacteur. Comme la fermentation progresse, l'oxygène diffuse et est consommé par les activités métaboliques. Il y a libération des gaz (CO_2 et autres gaz issus du métabolisme des fungi) et de la chaleur. Il se produit donc une augmentation de la température et une réduction de la teneur en O_2 .

La température est l'un des plus importants facteurs dont dépend la réussite de la SSF (Tuomela et al., 2000). La majorité des fungi sont mésophiles ayant des températures de croissance dans la gamme $5^\circ C$ à $37^\circ C$, l'optimum se situant entre 25 et $30^\circ C$. Il existe aussi des wrf fungi thermophiles agissant principalement au cours du compostage, leurs températures optimum de croissance se situent entre $40^\circ C$ et $50^\circ C$ (Tuomela et al., 2000).

Les températures élevées affectent la germination des spores, la croissance, la formation du produit et la sporulation, tandis que les basses températures ne sont pas favorables à la croissance des micro-organismes et pour les autres réactions biochimiques. Vu la faible teneur en humidité et la mauvaise conductivité du substrat, il est difficile d'atteindre un bon transfert thermique dans SSF.

1.2.3.3. "Outputs"

Ce terme s'applique à l'ensemble des flux sortant d'une transformation donnée. Les "outputs" sont constitués de tous les produits utiles et/ou les transformations métaboliques pour lesquels l'opération de SSF est mise en œuvre. A ceux-ci s'ajoutent les substances secondaires qui peuvent ne pas être directement désirées, mais qui résultent du métabolisme de l'organisme en culture.

Les produits attendus de la SSF peuvent être aussi variés que possible. Parmi ceux-ci figurent des substrats lignocellulosiques fortement délignifiés et plus enrichis en cellulose et hémicelluloses. Ces derniers sont souvent utilisés pour la production énergétique sous forme de biogaz ou de bioéthanol (Müller & Trösch, 1986 ; Salvachúa et al., 2011). Il y a aussi la production des denrées alimentaires tels que les sporophores produits par les mycéliums des champignons comestibles (Oei, 2005 ; Dibaluka, 2010), des agents pharmacologiques bénéfiques pour la santé telle que la lovastatine, une substance pouvant baisser la cholestérolémie, trouvée dans le mycélium de quatre espèces de champignons du genre *Pleurotus* (Wasser & Weis, 1999) et des enzymes oxydatives utilisables pour la bioremédiation des sites pollués (Rigas et al., 2009), etc.

1.2.4. Eléments essentiels sur la valorisation fongique de la lignocellulose

Les résidus lignocellulosiques qui sont produits en abondance, sont, généralement, utilisés comme source de chaleur, par combustion directe, comme fertilisants organiques, fourrage ou litière animale. Cependant la portion non utilisée constitue souvent une source de pollution environnementale. Or, étant essentiellement constituée de cellulose, hémicellulose et lignine, cette portion constituée de lignocellulose peut être valorisée autrement, notamment par la production de biogaz, bioéthanol, des champignons comestibles et d'autres produits utiles à l'homme.

Néanmoins, son utilisation efficace exige, très souvent, un ou plusieurs prétraitements dont le biologique efficacement effectué par les champignons de pourriture blanche. Ces derniers disposent d'un puissant équipement en enzymes oxydatifs constitués des oxydases et peroxydases, extracellulaires et non spécifiques dont le spectre d'activité s'étend aussi aux structures similaires à la lignine.

Dans la nature, la dégradation naturelle des résidus végétaux par ces champignons est très lente. Cependant, elle peut être accélérée en conditions contrôlées en imitant les conditions naturelles de croissance. Le succès de l'opération est alors fonction de la connaissance et du respect des exigences culturelles des champignons et des finalités attendues de l'opération de la valorisation de la lignocellulose.

En RDC, ce succès nécessite aussi l'appui, par des capitaux publics et privés, aux producteurs locaux des champignons comestibles ; il y a aussi un besoin de la mise en place des technologies de production à grande échelle mais avec des coûts de production relativement raisonnables.

La RDC a aussi besoin d'étendre la biodégradation fongique des résidus lignocellulosiques au niveau de la production bioénergétique et d'envisager la bioremédiation à partir des wrf.

CHAPITRE 2. INVESTIGATIONS ET EVALUATION DES RESULTATS

2.1. MILIEU D'ETUDE ET DESCRIPTION DES SITES DE RECHERCHE

2.1.1. Milieu d'étude

Les différentes investigations ont été réalisées essentiellement dans la ville de Kinshasa, notamment en ce qui concerne la gestion des résidus agricoles et agro-industriels, l'évaluation de la quantité des résidus de récolte et de transformation des produits agricoles. Cependant, en ce qui concerne la recherche des macromycètes, en plus de Kinshasa, Kisantu s'était ajoutée aux investigations, en raison de la présence d'un important jardin botanique dans cette ville.

2.1.1.1. Localisation de la ville de Kinshasa

A la fois ville et province dotée d'une personnalité juridique par la loi fondamentale de la République Démocratique du Congo (RDC), en son deuxième article (Journal Officiel, 2006), la Ville-Province de Kinshasa s'étend sur 9.965 km², soit 0.42% de la superficie du territoire national. Elle est située à l'ouest du pays, entre 3°09'00'' et 5°01'00'' de latitude Sud, et entre 15°02'00'' et 16°06'00'' de longitude Est.

Kinshasa est limitée au Nord-Est et à l'Est par la Province du Bandundu, au Sud par celle du Kongo Central, au Nord-Ouest et à l'Ouest par la République du Congo, sur une frontière naturelle, formée par une partie du fleuve Congo.

Le centre géographique de la ville province de Kinshasa se situe dans la commune de Maluku, l'une de ses 24 communes. Plus précisément, il se situe en aval de la rive droite de la rivière Bombo, à 11 km, aux points de coordonnées 16°01'00'' ; 4°37'00'', à l'extrême Nord-ouest dans le domaine de réserve du domaine de chasse de Bombo-Lumene (Bolia, 2014).

2.1.1.2. Relief

Le relief de Kinshasa est formé d'un grand plateau, d'une chaîne de collines, d'une plaine et de marécages aux abords du Fleuve Congo (PNUD, 1998 ; Ndembo, 2009).

Le plateau faisant partie de la ville, appelé Plateau des Bateke, fait partie du massif du Plateau du Kwango, de 600 à 700 m d'altitude, dominant complètement la partie Est de la Ville. Cette portion, située dans la Ville, totalise une superficie d'environ 7.500 km², soit 75,3% de l'ensemble de l'étendue de la ville.

La chaîne de collines, peu escarpées (350 à 675 m d'altitude) où l'on trouve les Monts Ngaliema, Amba et Ngafula, constitue la frontière commune avec le Kongo Central et forme la partie Sud de la ville, jusqu'au Sud-Est, où se trouve le Plateau des Bateke. Ces collines, y compris les hauteurs de Binza et de Kimwenza, seraient issues du démantèlement de ce Plateau.

Quant à la plaine, elle suit le lit du Fleuve Congo et est enfermée entre le Fleuve Congo, le Plateau des Bateke et des collines. Elle n'a qu'une largeur moyenne de 5 à 7 km et a la forme d'un croissant. Cette plaine, d'à peu près 100 km², se situe entre 300 et 320 m d'altitude. Elle se divise en deux parties :

- la plaine de Lemba, légèrement ondulée, à l'Ouest de la rivière Ndjili, et

- la plaine de l'Est de la Ndjili. Plus plane, elle s'étend vers la rivière Nsele et est entrecoupée par plusieurs rivières qui coulent presque parallèlement du Sud-Est vers le Nord-Ouest, pour se jeter dans le Fleuve Congo.

En bordure du Fleuve Congo, s'étendent des marécages qui s'amplifient à l'Ouest autour du Pool Malebo et y forment ainsi une plaine alluviale.

2.1.1.3. Climat

Le climat de la ville de Kinshasa est de type Aw₄, selon la classification de Köppen, c'est-à-dire un climat tropical chaud et humide. Il est caractérisé par la présence d'une grande saison des pluies d'une durée de 8 mois, soit de mi-septembre à mi-mai (souvent entrecoupée d'une petite période sèche à cheval sur janvier et février), et d'une saison sèche de 4 mois, soit de mi-mai à mi-septembre (PNUD, 1998 ; Lele et *al.*, 2015).

Du point de vue pluviométrique, sur base des données météorologiques enregistrées de 1961 à 2007 (soit 46 ans) au niveau de la station de Binza, située à l'Ouest de la région, il apparaît que le module pluviométrique moyen est de 1450 mm pour 112 jours des pluies. L'année 1978 a été la moins pluvieuse avec moins de 1000 mm, tandis que l'année 1999, la plus arrosée avec plus de 2000 mm. Le mois de novembre est celui au cours duquel, la pluviométrie mensuelle est généralement la plus élevée (avec en moyenne 257 mm). Environ 40 % des précipitations tombent au courant des mois d'octobre, novembre et décembre. Le mois d'avril est également très pluvieux, avec un pic de 210 mm et 18 jours de pluies (Ndembo, 2009).

La pluviométrie est très faible en saison sèche, avec des moyennes mensuelles de 5,5 ; 2,0 ; 5,8 et 31,8 mm, respectivement pour juin, juillet, août et septembre, le mois qui annonce la reprise des pluies.

La température moyenne s'élève à 25°C, la minimale étant de 21,2°C au cours du mois de juillet, et la maximale de 30°C, en avril.

L'humidité relative à Kinshasa est fonction de la température, de l'évaporation et de la convection des vapeurs d'eau en provenance du Pool Malebo et de l'océan Atlantique. De manière générale, l'humidité relative de l'air présente une moyenne de 79 % avec des valeurs extrêmes de 84%, entre novembre et mai avec une légère baisse en février et mars, pour la maximale et de 71 %, essentiellement en septembre, pour la minimale (PNUD, 1998).

Le climat de Kinshasa est influencé par deux grands courants de vents soufflant pendant toute l'année sur la ville, aussi bien en altitude qu'au niveau de basses couches.

Sur les hauteurs, il y en a deux grands : (i) les alizés, très chauds et secs, du Nord-Est qui proviennent d'Egypte et (ii) un courant équatorial très humide, presque permanent au-delà de 300 m d'altitude, en provenance de l'Est.

Les basses couches reçoivent en permanence le courant de Bengwela, un courant très humide en provenance du Sud-Ouest.

2.1.1.4. *Hydrographie*

L'hydrographie de la Ville-Province de Kinshasa comprend, outre quelques mares et lacs de dimensions très réduites, dont le Lac de Ma Vallée et le Lac Vert, le Fleuve Congo et ses affluents de diverses dimensions qui prennent leurs sources principalement des collines et coulent du Sud vers le Nord. Ces derniers baignant la plaine se jettent dans le fleuve, notamment au niveau du Pool Malebo (PNUD, 1998 ; Biloso, 2008). Ces rivières sont soit de sources locales comme Kalamu, Gombe, Makelele et Funa, soit de sources allogènes comme Ndjili, Nsele, Maïndombe, Bombo et Lumene.

Au niveau de la Ville-Province de Kinshasa, le Fleuve Congo prend de l'extension et atteint à certains endroits plus de 20 km de largeur. C'est sa dernière partie dans la Cuvette Centrale, avant les rapides de Kinsuka, à l'Ouest de Kinshasa.

2.1.1.5. *Sols*

Les sols de Kinshasa, comme ceux de toute la RDC, consistent principalement de sols fortement altérés, développés dans les dépôts de recouvrement et dans les matériaux d'altération des roches dures du soubassement précambrien et des roches tendres mésozoïques (Ngongo et *al.*, 2007).

Les caractéristiques des sols de la Ville-Province de Kinshasa sont fonction de la structure géomorphologique de l'endroit où l'on se trouve. Ainsi, elles sont différentes sur le massif du Plateau des Bateke, sur les collines, dans les plaines ou dans les marécages (PNUD, 1998 ; Ngongo et *al.*, 2007 ; Ndembo, 2009).

Ces sols qui sont essentiellement sablonneux avec quelques éléments particuliers, ont une faible capacité de rétention d'eau et présentent par conséquent une utilité marginale pour les activités agricoles.

Sur le Plateau des Bateke qui est à deux heures de route du centre de la Ville vers l'Est, on trouve (i) d'arénoles et des ferralsols, à profil de type AC, types de sols que l'on trouve aussi sur les collines et (ii) de podzols, comme dans les zones planes et dans les mares asséchées.

Vers les collines du Sud-Ouest, il y a, par endroits, mélange d'arénoles et d'acrisols, sols à tendance kaolinitique ou ferrallitique. Globalement, ce sont des sols minéraux récents, développés sur du sable kalaharien. Ils sont caractérisés par une teneur en argile de moins de 20% sur au moins 100 cm de profondeur, une faible réserve de minéraux altérables et une faible capacité de rétention d'eau.

Dans les plaines, il y a deux types de sols : (i) le sol organique dans le Pool Malebo et (ii) les podzols dans certaines parties planes. Les sols organiques sont caractérisés par la présence de la matière organique dans la première couche (à une trentaine de centimètres de la surface). En fait, ce sont des sols alluvionnaires à texture variable. Ils sont des substrats argileux et argilo-sableux. Leur forte teneur en eau entraîne de mauvaises conditions d'aération et d'oxydation. Ils ont un taux de saturation déficitaire en base (9 %) et une faible capacité d'échange cationique. Ainsi, ils sont des sols de faible valeur agricole qui sont essentiellement couverts de forêts marécageuses.

2.1.1.6. *Végétation*

La ville de Kinshasa était jadis occupée par la forêt caducifoliée subéquatoriale dénommée « savane boisée ». Sa végétation naturelle avait été décrite comme étant des forêts denses et humides semi-circulaires subéquatoriales et péri-guinéennes, en galerie ou à l'état de massifs isolés dans les savanes guinéennes. Cette végétation s'est développée sur des sols sableux et sablo-argileux des systèmes Bateke en fonction de la géomorphologie du site (Devred, 1959 in Ndembo, 2009).

Actuellement, à cause de l'avancée urbanistique, cette végétation est constituée en règle générale de savanes parsemées d'arbustes et entrecoupées de galeries forestières de faibles densités et superficies (Ndembo, 2009).

Des forêts secondaires semi caducifoliées subéquatoriales et des savanes arbustives de type guinéen sont observées au sud ouest de la ville. Par ailleurs, au nord-ouest, pousse, sur du sable argileux, une mosaïque de savane et de savanes arbustives à *Loudetia demeusei* (De Wild.) C.E. Hubb, plante herbacée qui peut atteindre 1,70 m de hauteur.

Dans la région des collines, la strate herbacée, bien représentée, atteint 2 à 4 m et est dominée par les espèces suivantes : *Hymenocardia acida* Tul., *Syzyglum macrocarpum* Bahadur & R.C.Gaur, *Anona arenaria* Schumach. & Thonn, *Nauclea latifolia* Sm. et *Crossopterix febrifuga* (Afzel. ex G.Don) Benth. La strate herbacée supérieure est dominée par le *Loudetia demeusei*. La strate herbacée inférieure, quant à elle, a une hauteur moyenne de 0,40 m et est représentée par le *Sporobolus sp.*, le *Rhynchelytrum roseum* (Nees) Stapf & C.E. Hubb. et le *Digitaria brazzae* (Franch.) Stapf.

La forêt naturelle a complètement disparu à ce jour au niveau de la partie intra urbaine de Kinshasa, laissant la place à des habitations, des industries, des fermes, des espaces maraîchers, etc. Les versants des collines sont cependant couverts de forêts secondaires issues des actions de reboisement et de culture des arbres fruitiers. La végétation marécageuse pousse dans le Pool Malebo.

2.1.1.7. *Organisation politique et administrative*

Selon l'organisation politico-administrative, la Ville de Kinshasa répond à trois vocations (Journal Officiel, 1988 ; Ministère du Plan-RDC, 2005 ; Journal Officiel, 2006) :

- Celle d'une Ville-Province, à coté de vingt-cinq autres provinces de la République Démocratique du Congo ;
- Celle de la Capitale Administrative, Politique et Economique du pays, et
- Celle d'une Ville Cosmopolite.

Sa subdivision administrative est régie par les prescrits du Décret-loi n° 081 du 22 juillet 1998 (Journal Officiel, 1988) portant organisation territoriale et administrative de la République Démocratique du Congo qui, en ses articles 3 et 5, donne la qualité de Ville-Province à Kinshasa et le statut de Capitale du pays dans son article 4. Ce Décret-loi confère aux communes de la Ville de Kinshasa le statut d'entités décentralisées (EAD), avec personnalité juridique. Celles-ci sont administrées par des Bourgmestres et des Bourgmestres Adjoints.

Conformément aux dispositifs des articles 7.1 et 7.2 de ce Décret-loi, la Ville de Kinshasa est subdivisée :

- en vingt-quatre (24) communes, et
- environ quatre cents (400) quartiers.

La Ville de Kinshasa est reliée directement aux Provinces de l'ancienne Bandundu, du Kongo Central et de l'ancienne Equateur, par route, eau et air. Au Kongo Central, elle est reliée aussi par voie ferrée, particulièrement vers la Ville Portuaire de Matadi. C'est un carrefour national, par où passent, pour la consommation de sa population, en importation, en exportation ou en transit, plusieurs marchandises de la République Démocratique du Congo destinées aux transactions nationales ou internationales.

Le Fleuve Congo, avec ses affluents qui baignent aussi la Ville de Kinshasa, constitue la toile de fond du réseau national des transports intégré, eau-rail-route qui est complété par la voie aérienne mettant en liaison cette Ville avec toutes les autres provinces du pays.

2.1.2. Description des sites de récolte des échantillons des champignons

2.1.2.1. Station phytotechnique de Ndjili Brasserie à Kinshasa

Localisation

La station phytotechnique de Ndjili Brasserie est localisée dans la commune de Mont-Ngafula, district de Lukunga, Ville-Province de Kinshasa. Elle se situe, en coordonnées géographiques, entre 4°29' et 4°32' de latitude sud et 15°20' et 15°23' de longitude Est.

Création

Cette station a été créée sous l'autorité coloniale belge en 1959 pour la recherche agronomique. Elle a connu une paralysie des activités en 1973 après le transfert de la Faculté d'Agronomie de l'Université de Kinshasa à Yangambi.

La reprise des activités a eu lieu en 2000, après la réouverture de la Faculté d'Agronomie à l'Université de Kinshasa en 1994. La figure 2.1 donne un aperçu sur l'occupation du sol de la station de Ndjili Brasserie, dont la superficie est de 402 ha.

Hydrographie :

Elle est principalement formée de la rivière Ndjili qui limite la station dans sa partie Est, la rivière Mati au Sud-Est et la rivière Mitindi au Nord, alors que la rivière Mambakambaka, affluent de la rivière Ndjili, la parcourt du Sud-Ouest vers le Nord-Est.

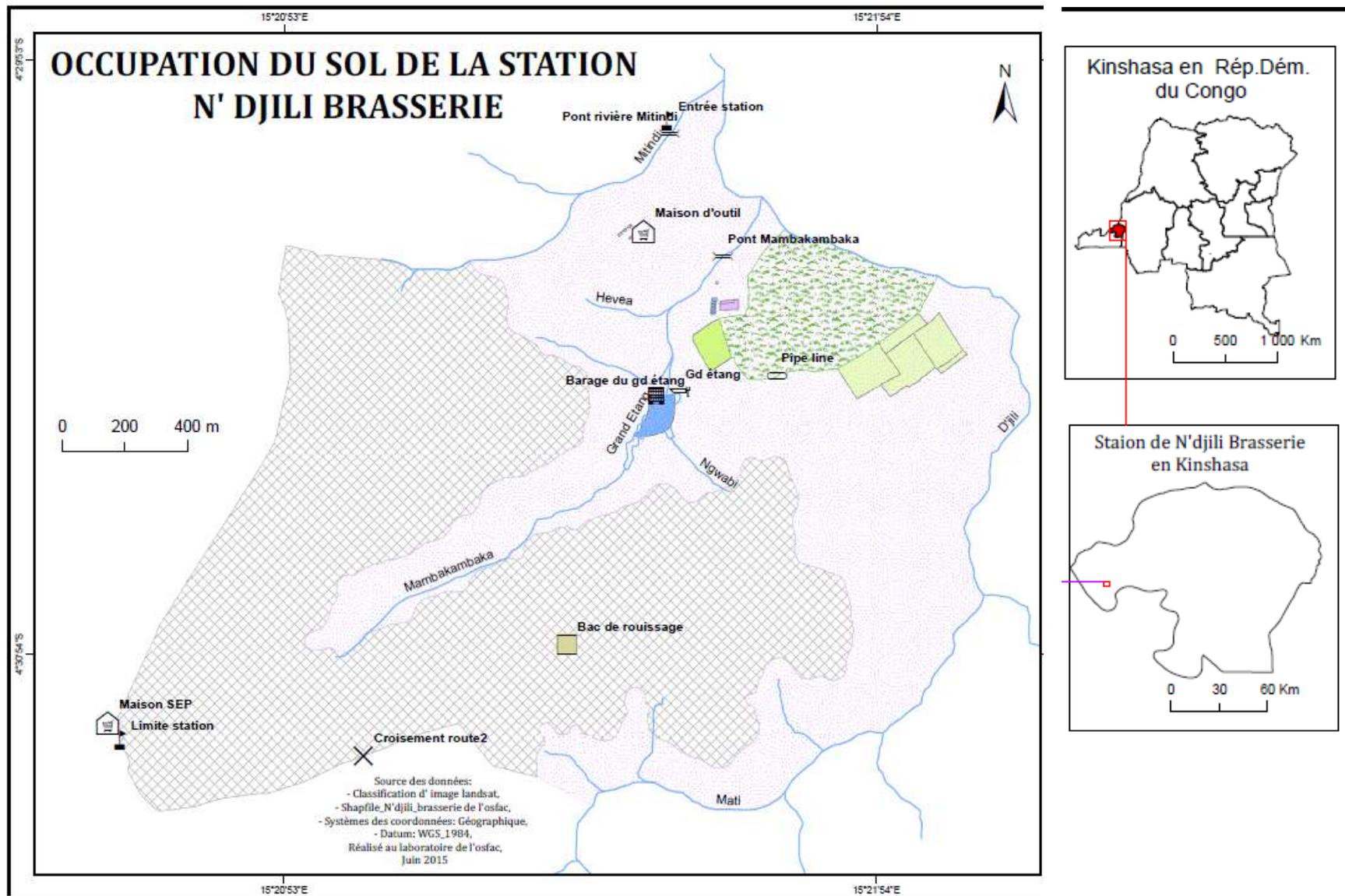


Figure 2.1. Occupation du sol de la Station de Ndjili Brasserie (Osfac, 2015)

Climat :

Le climat est du type AW₄, selon la classification de Köppen. Il s'agit d'un climat tropical chaud et humide avec 4 mois de saison sèche. La moyenne des précipitations annuelles est de 1529 mm, la température moyenne de 24,3°C, l'humidité relative de l'air de 79% et l'évaporation moyenne de 183,3mm.

Sols

Les sols sont à texture essentiellement sablonneuse et assortie de quelques éléments grossiers. Ce sont des sols à faible capacité de rétention d'eau avec une utilisation marginale pour l'agriculture.

Végétation

Sur ce site, on dénombre quatre types d'écosystèmes :

Forêts : forêt secondaire jeune, jachère pré-forestière et lambeau forestier à *Alchornea cordifolia* (Schumach. & Thonn.) Müll.Arg., *Bambusa vulgaris* Schrad. ex J.C.Wendl, *Chaetocarpus africanus* Pax, *Anthocleista schweinfurthii* Gilg, *Oncoba welwitschii* Oliv., *Dracaena nitens* Welw. Ex Baker, *Albizzia adianthifolia* (Schumach.) W.Wight, *Bosgueopsis gillettii*, *Manilkara obovata* (Sabine & G.Don) J.H.Hemsl., etc.

Savanes : savane post-culturale, savane herbeuse et jachère herbeuse à *Anisophyllea quangensis* Engl. ex Henriq., *Indigofera hirsuta* L., *Setaria barbata* (Lam.) Kunth, *Aframomum alboviolaceum* (Ridl.) K.Schum., *A. melegueta* K.Schum., *Hymenocardia acida* Tul., *Hyparrhenia* sp. Andersson ex E. Fourn., *Digitaria brazzae* (Franch.) Stapf, *Chromolaena odorata* (L.) R.M.King & H.Rob., *Panicum maximum* Jacq., etc.

Végétation de transition entre la savane et la forêt : *Albizzia adianthifolia*, *Dracaena nitens* Welw. ex Baker, *Milletia laurentii* De Wild, *M. drastica* Welw. ex Baker, etc.

Végétation des sols hydromorphes à *Alchornea cordifolia* (Schumach. & Thonn.) Müll.Arg., *Pteridium aguiliunum* (L.) Kuhn, *Elaeis guineensis* Jacq., etc.



Figure 2.2. Une vue de la station de Ndjili Brasserie (photo prise par D-B Bangala Mada)

2.1.2.2. *La forêt du lac de Ma Vallée*

Le site du Lac de Ma Vallée est un domaine protégé, d'une superficie de 240 hectares. Il appartient à la Conférence Episcopale Nationale de la République Démocratique du Congo et est situé au Sud-Ouest de la ville de Kinshasa, dans la commune de Mont-Ngafula, localité de Kimwenza, à 30 km du centre ville.

Dans ce site, le lac de Ma Vallée occupe une superficie évaluée à 18,37 Ha. Il est alimenté par plusieurs cours d'eau, dont le principal est la Ngombesi. Ses eaux se jettent dans la rivière Lukaya, un affluent de la Ndjili.

La végétation de la concession du Lac de Ma Vallée est caractérisée par deux types de formation :

- Une formation herbeuse peu étendue, principalement vers le Nord, installée sur un plateau de plus de 350 m d'altitude. Celle-ci est dominée par deux espèces des graminées : *Hyparrhenia diplandra* (Hack) Stapf. et *Hyparrhenia familiaris* (Steud.) Stapf.
- Une formation forestière plus étendue sur toute la station. Il s'agit d'une forêt secondaire âgée, dominée par *Pentaclethra macrophylla* Benth., *Pentaclethra eetveldeana* De Wild. et *Hymenocardia ulmoides* Oliv.

La figure 2.3 donne une vue du Lac de Ma Vallée, tandis que la figure 2.4 représente l'occupation du sol du site.



Figure 2.3. Vue du Lac de Ma Vallée (photo prise par D-B Bangala Mada)

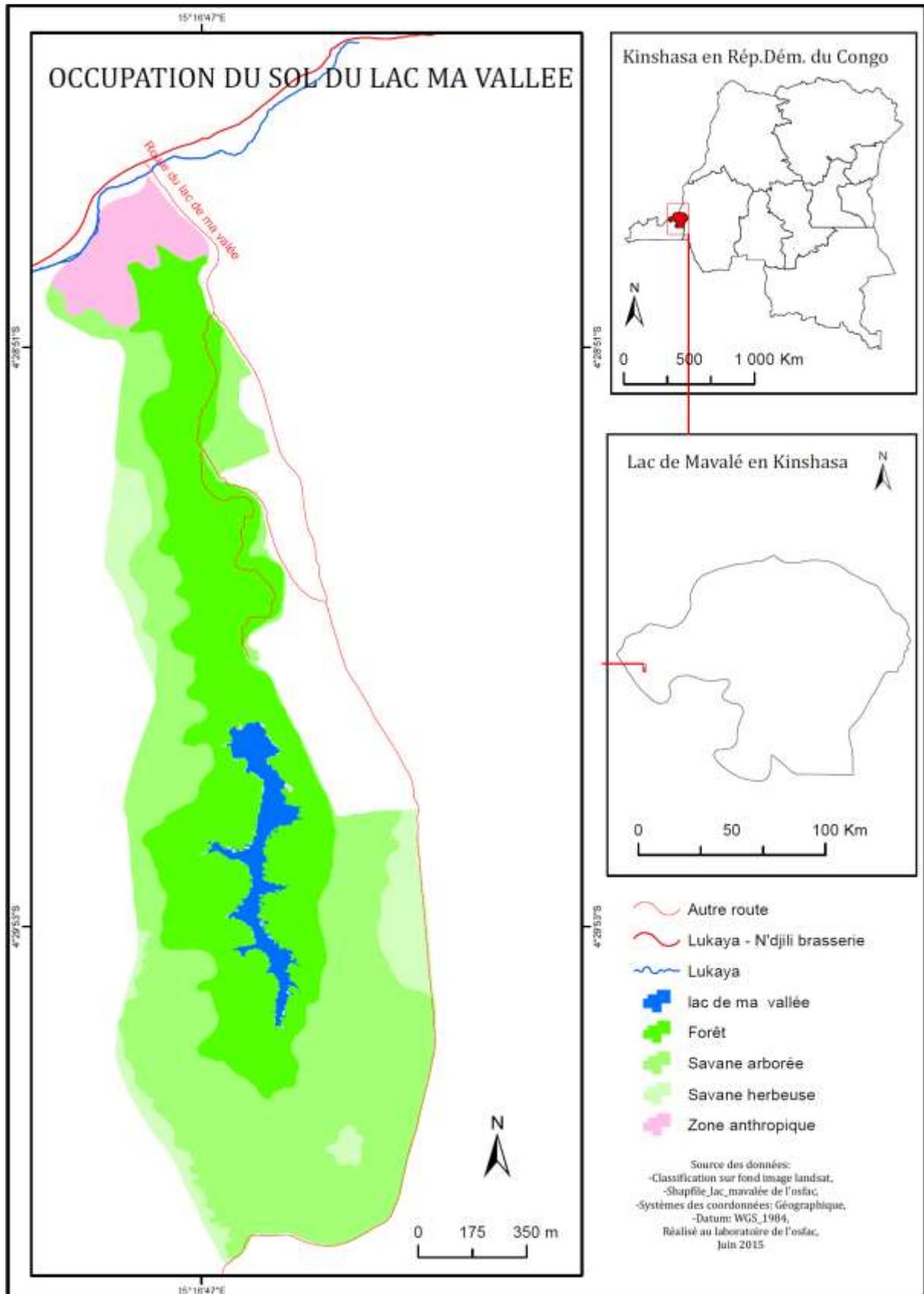


Figure 2.4. Occupation du sol du site du Lac de Ma Vallée (Osfac, 2015)

2.1.2.3. *Le Jardin Botanique de Kisantu*

Le Jardin Botanique de Kisantu (JBK), dont les coordonnées géographiques sont 05°08'S et 15°06'E, se trouve dans la cité de Kisantu, territoire de Madimba, district de la Lukaya dans la province du Kongo Central.

Il a été créé en 1900 par le frère Jésuite, Justin Gillet qui y introduisit plus de 3500 espèces végétales rares et exotiques à des fins alimentaires et scientifiques sur une superficie de 225 hectares.

Il fut dirigé, dès sa création par son fondateur jusqu'en 1943, année de sa mort. Ensuite, la compagnie des Jésuites dirigea le jardin jusqu'en 1976, année où la gestion fût cédée à la Présidence de la République du Zaïre.

A partir de février 1977, le jardin fut rattaché au Ministère de l'Environnement Conservation de la Nature et Tourisme, et à ce jour, la gestion du JBK est du ressort de l'Institut des Jardins Zoologiques et Botaniques du Congo (IJZBC). Ses activités sont orientées vers :

- La protection et la conservation des espèces végétales ;
- L'étude des plantes et champignons de la RD Congo ;
- Le partage des connaissances scientifiques en systématique et en botanique ;
- La formation et l'organisation des séminaires scientifiques, et
- Le tourisme.

La figure 2.5 donne une vue partielle du JBK, tandis que l'occupation du sol est illustrée dans la figure 2.6.



Figure 2.5. Entrée principale du JBK (Djambo, 2015)

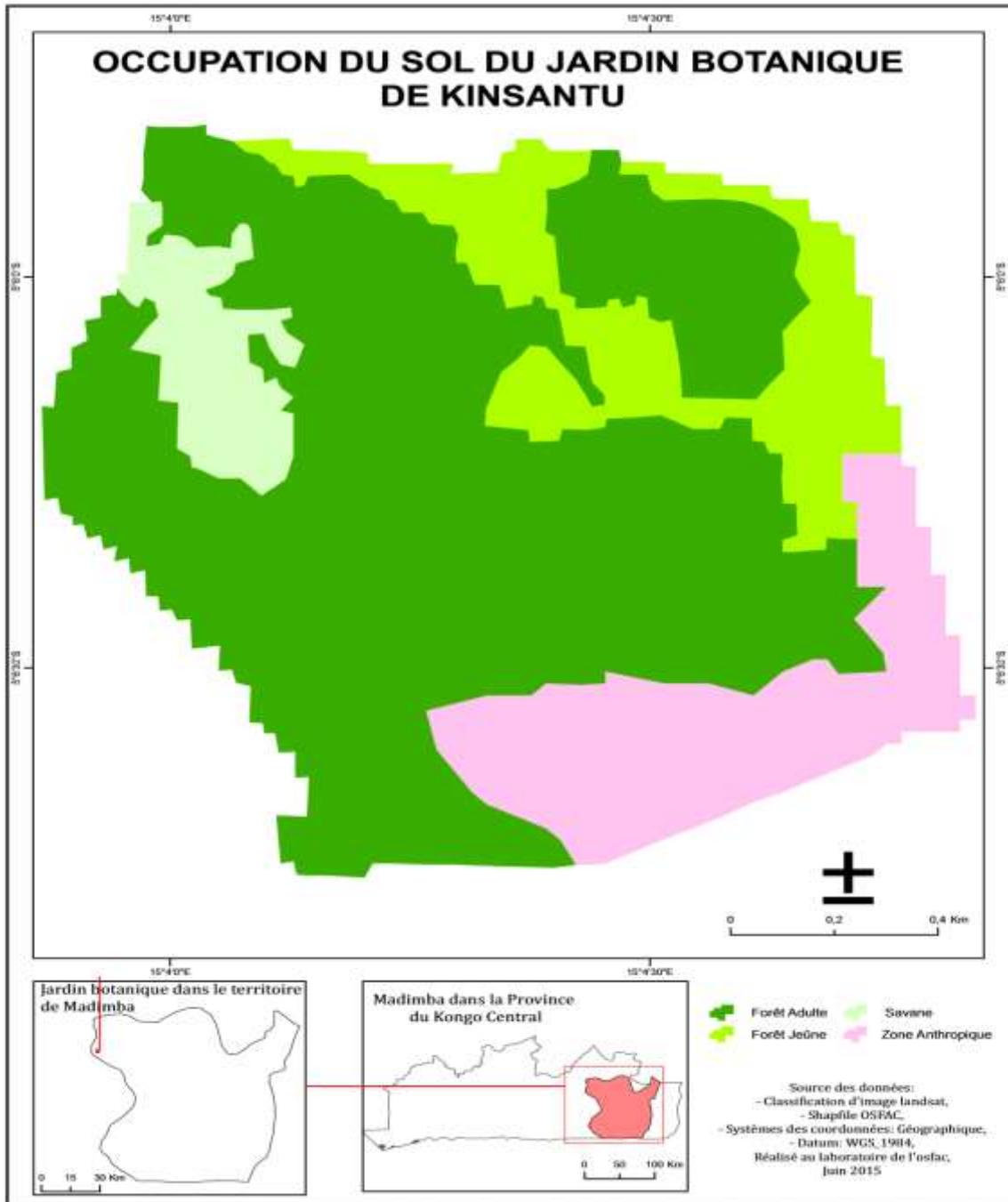


Figure 2.6. Occupation du sol dans le JBK (Osfac, 2015)

2.2. GESTION DES RESIDUS AGRICOLES ET AGRO-INDUSTRIELS

2.2.1. Introduction

A Kinshasa, l'accumulation des déchets de toute nature (matière plastique, épaves de véhicules, débris de végétaux, etc.) dans les lieux publiques et dans les cours d'eau cause une détérioration de l'environnement (Lelo, 2008 ; Lelo, 2011 ; Koyazibo, 2012), alors qu'il existe plusieurs possibilités de recyclage de ces résidus qu'ils soient biodégradables ou pas.

Parmi ces différents types de déchets, les résidus végétaux possèdent une très grande potentialité d'être recyclés en ce qu'ils peuvent servir soit de matière de base pour la production énergétique ou alimentaire (Müller & Trösch, 1986 ; Bangala & Masimango, 2014), soit de matière première pour la fabrication d'autres produits dérivés (Thiébaud, 1995).

C'est ainsi que dans cette ville, la valorisation d'abondants résidus végétaux présenterait donc le double avantage de réduire l'incidence de ces derniers sur la pollution environnementale et de fournir à la population de l'énergie bon marché ou des matériaux dérivés de la lignocellulose.

Pour y arriver, la mise en œuvre d'une politique efficace de leur gestion doit, dans un premier temps, intégrer les principaux acteurs à la base de leur production, c'est-à-dire, les producteurs agricoles et agro-industriels (Koopmans & Koppejan, 1997, Koyabizo, 2012). Ensuite, elle doit passer par une démarche de détermination de leur diversité, de leur caractérisation et de leur quantification (Koopmans & Koppejan, 1997 ; Jölli & Giljum, 2005, Cooper & Laing, 2007 ; Singh et al., 2008).

Pour évaluer le mode de gestion des résidus lignocellulosiques générés par les producteurs agricoles et agro-industriels et les scieries de Kinshasa, une étude diagnostique a été menée dans la période entre janvier 2011 et décembre 2012.

Spécifiquement, ce travail a poursuivi les objectifs suivants :

- Identifier et quantifier les principaux résidus agricoles, agro-industriels produits dans quelques quartiers de Kinshasa à fortes activités agricoles et agro-industrielles ;
- Evaluer le mode de gestion de ces sous-produits auprès de leurs principaux générateurs, c'est-à-dire, les producteurs agricoles et agro-industriels ;
- Déterminer les impacts éventuels, positifs et négatifs, liés à la présence de ces résidus ;
- Vérifier la capacité des producteurs d'utiliser les résidus générés par leurs activités.

2.2.2. Matériel et méthodes

La méthodologie adoptée a été celle des investigations sur terrain sous forme d'enquête, accompagnée des observations visuelles. Les informations sur les principaux sites d'agriculture intense de Kinshasa ont été obtenues au niveau de la Direction de Production et de Protection Végétale du Ministère de l'Agriculture de la RDC. Les listes des grandes agro-industries et scieries de Kinshasa ont été fournies par la Cellule de Planification Industrielle

du Ministère de l'Industrie, tandis que les scieries semi-industrielles ont été sélectionnées au hasard parmi celles qui sont disséminées dans les communes d'étude.

La ville de Kinshasa étant très vaste (9.965km²), ce travail s'est limité à cinq communes à forte production de ces résidus, sélectionnées sur base de leur accessibilité partant de l'Université de Kinshasa d'où l'étude a été lancée (Figure 2.7).

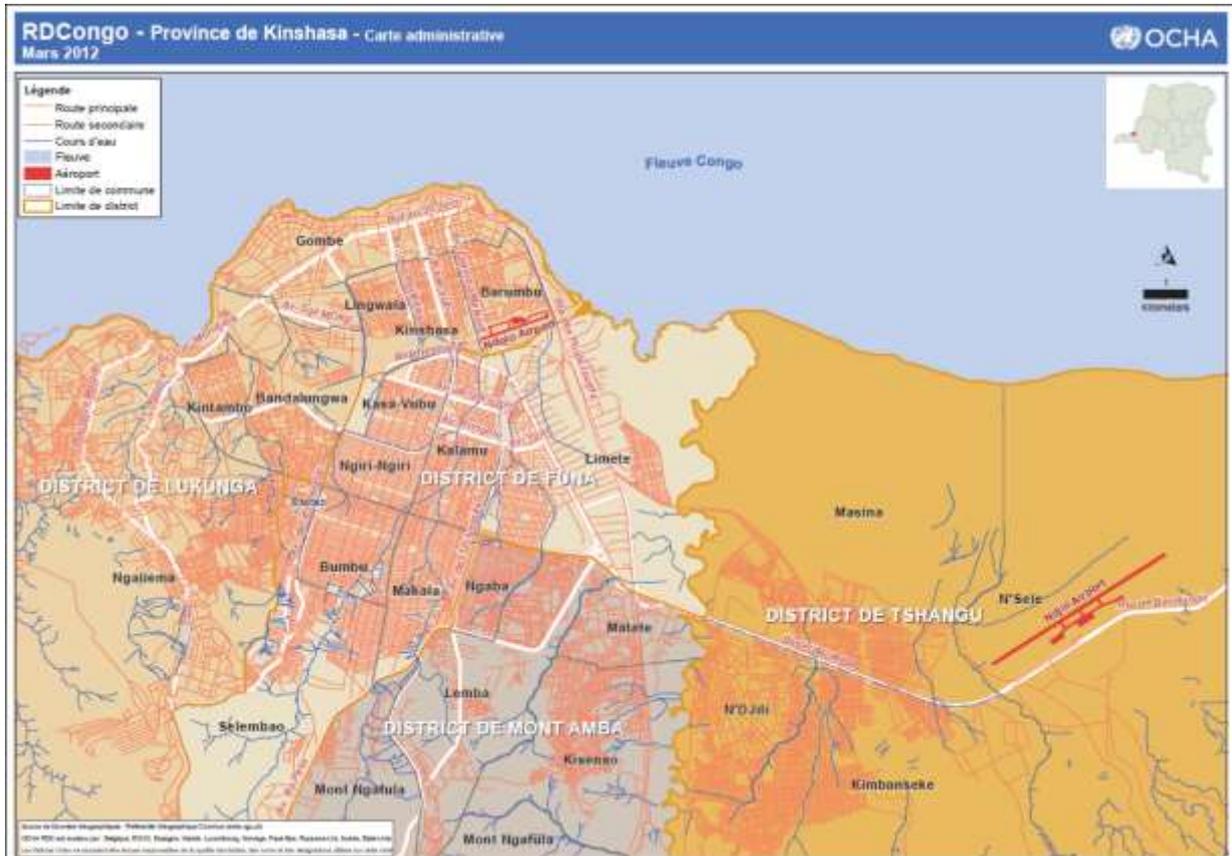


Figure 2.7. Localisation des communes d'enquête (UN OCHA, 2012)

Les communes concernées par cette enquête occupent la partie centrale et Ouest de cette carte. Il s'agit des communes de Lemba, de Limete (quartier industriel), de N'djili, de Kinsenso, et de Mont-Ngafula.

Après la collecte des données, les logiciels Excel et R ont été utilisés pour la saisie et l'analyse des données. Dans ce cas, il s'agissait des statistiques descriptives (fréquences, valeurs limites et moyennes).

Les investigations ont concerné les résidus lignocellulosiques issus de la production agricole, agro-industrielle et des scieries. Les fiches de questionnaires correspondant à chaque catégorie de résidu sont consignées dans les annexes (Fiches 2/1 et 2/2) et les principales questions qui ont fait l'objet de ces investigations sont résumées ci-dessous :

2.2.2.1. Questionnaire concernant les producteurs agricoles

Trente agriculteurs ont été questionnés dans quatre sites de production agricole intense de Kinshasa. Il s'agit des quartiers Kingabwa TP, dans la commune de Limete ; Anciens Combattants à Kisenso ; Cecomaf à Ndjili, et Kimwenza à Mont-Ngafula.

L'échantillonnage a été effectué au hasard et en fonction de la disponibilité des agriculteurs. La répartition des producteurs en fonction des sites d'enquête est donnée par la figure 2.8 ci-dessous.

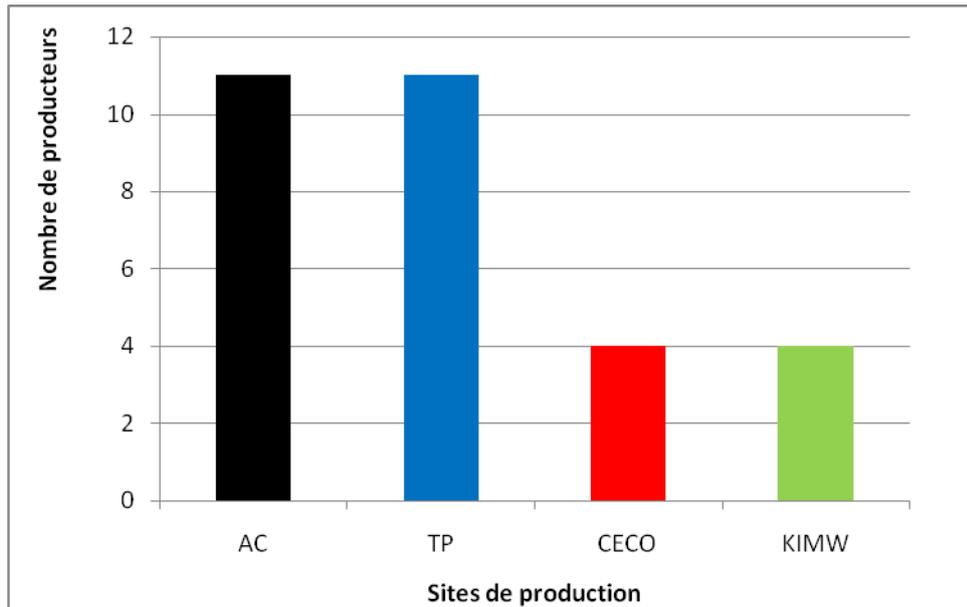


Figure 2.8. Répartition de la population d'enquête par site

Légende

- AC : Anciens Combattants
- CECO : Cecomaf
- KIMW : Kimwenza
- TP : Kingabwa TP

La population d'enquête était constituée d'individus de deux sexes, mais les hommes étaient plus nombreux (80%). Parmi ces personnes, la majorité (75%) avait un âge inférieur à 38 ans, le moins âgé avait 22 ans, le plus âgé, 53 ans, tandis que la moyenne d'âge était de 34 ans.

En ce qui concerne le niveau d'études, la figure 2.9 donne la répartition de la population d'enquête en fonction de cette information.

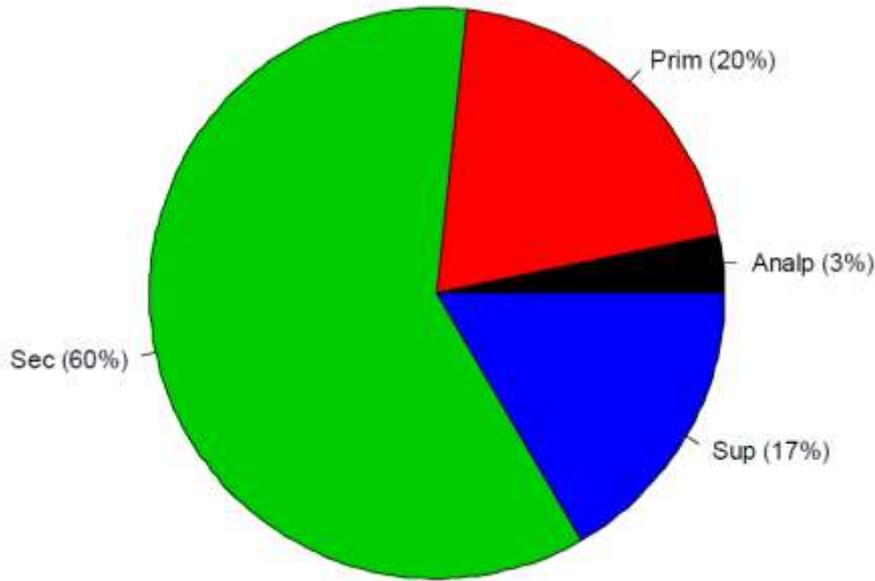


Figure 2.9. Répartition de la population d'enquête par niveau d'étude

Légende

- Analp : Analphabètes
- Prim : Niveau primaire
- Sec : Niveau secondaire
- Sup : Niveau supérieur

Les interviews se sont déroulées en langues française et lingala, les questions posées à ces agriculteurs concernaient, outre l'identité et l'activité principale :

A. La production :

Les espèces végétales cultivées ; le nombre de plates-bandes emblavées par culture ; le nombre de semis par mois ou par an ; le type et la quantité de fertilisants par plate-bande ; le nombre de récoltes par mois ou par an et le lieu de vente de la production.

B. La gestion des résidus produits :

L'existence des résidus de cultures après récolte ; les usages des restes de cultures ; la finalité des résidus de cultures non utilisés ; le type de nuisance due à la présence des résidus et les connaissances sur l'usage des résidus végétaux.

2.2.2.2. *Questionnaire concernant les agro-industries*

Chez cette catégorie, une attitude de réserve a été observée sur la livraison des informations jugées sensibles à cause de la concurrence. Il n'a pas été aisé d'obtenir des informations de la part des brasseries et de l'usine de torréfaction de café par crainte des agents espions de la sécurité et/ou des entreprises concurrentes.

Nos investigations ont concerné trois scieries dont l'une était industrielle (abrégée par SI), située dans la commune de Limete, quartier Kingabwa et les deux autres, semi-industrielles (abrégées par SSIa et SSIb), situées toutes dans la commune de Lemba, quartier Salongo Nord. En plus des scieries, une usine de décortilage et de mouture de café (abrégée par

UDMC) et une brasserie industrielle (abrégée par BI), situées toutes à Limete Kingabwa, ainsi qu'une usine de décorticage de riz (abrégée par UDR), située dans la commune de Ndjili ont été soumises à l'enquête.

Les questions posées concernaient :

A. L'identité et les principales productions de l'entreprise :

Catégorie ou type d'agro-industrie ; localisation ; principales productions ; types et origine de la matière première.

B. La gestion des résidus :

La nature et la quantité des résidus produits par jour (semaine, mois, an...) ; la proportion résidus sur production utilisable obtenue de la matière première ; les usages réels des résidus ; les autres usages connus des résidus obtenus ; la quantité de résidus non utilisés ; les principales difficultés dans la gestion des résidus.

2.2.3. Résultats

2.2.3.1. Les producteurs agricoles

A. Production

A1. Sites et types de cultures

Théoriquement, les sites de culture sont aussi les premiers endroits où les résidus agricoles exercent leurs impacts après la récolte, tandis que les types de cultures pratiquées peuvent donner un renseignement sur la nature des résidus générés.

Les agriculteurs rencontrés aux sites des Anciens Combattants (abrégé par AC) et de Cecomaf (abrégé par CECO) sont tous producteurs des cultures maraichères (amarantes, aubergines, gombo, oseille, ail, oignons, etc.) tel que cela est révélé dans la figure 2.10.

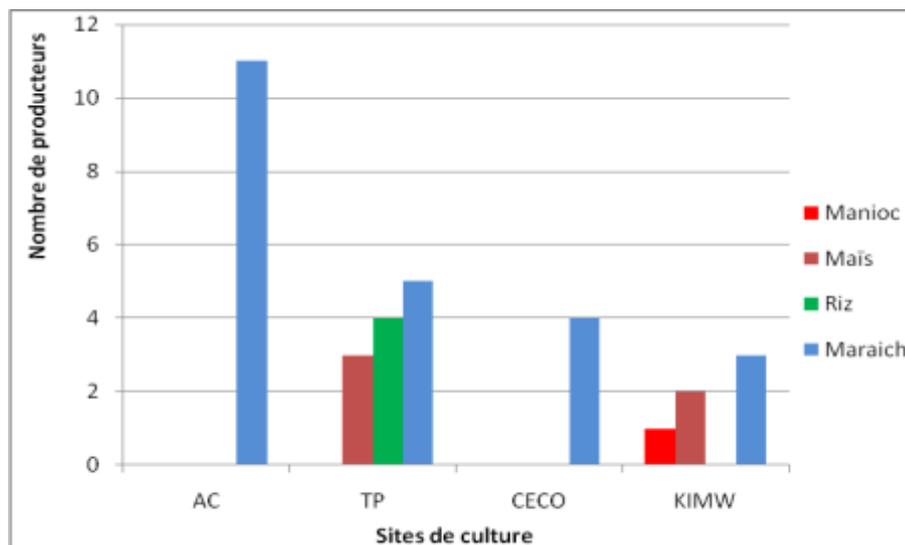


Figure 2.10. Répartition des cultures par site d'enquête

Au niveau de Kimwenza (abrégée par KIMW), en plus de quatre producteurs des cultures maraichères questionnés, cette enquête a concerné deux producteurs de maïs et un de manioc, tandis que les agriculteurs questionnés au niveau de Kingabwa TP (abrégé par TP), en plus d'être producteurs des légumes (5), d'autres étaient aussi producteurs de riz paddy (4) et de maïs (3).

En considérant les quatre sites, 70% de la population des enquêtés pratique le maraîchage. Cela laisse supposer qu'au moment de la récolte, la quantité des résidus générés par cette activité culturale devrait quantitativement être plus grande dans les quatre sites agricoles enquêtés. La section sur la gestion des résidus apportera la précision sur cette question.

A2. Nombre des plates-bandes emblavées et cycle végétatif des cultures pratiquées

Le nombre et les dimensions des plates-bandes emblavées constituent des informations importantes sur la capacité des producteurs agricoles à générer des résidus végétaux sur un site donné.

Les nombres des plates-bandes emblavées sont variables suivant les producteurs questionnés et les types de culture qu'ils pratiquent. Le plus petit producteur enquêté emblave une plate-bande tandis que le plus grand en emblave cinquante ; 75% de producteurs ont moins de dix-huit plates-bandes, parmi eux, 25% en ont moins de cinq. La figure 2.11 renseigne sur la répartition des plates-bandes par site d'enquête :

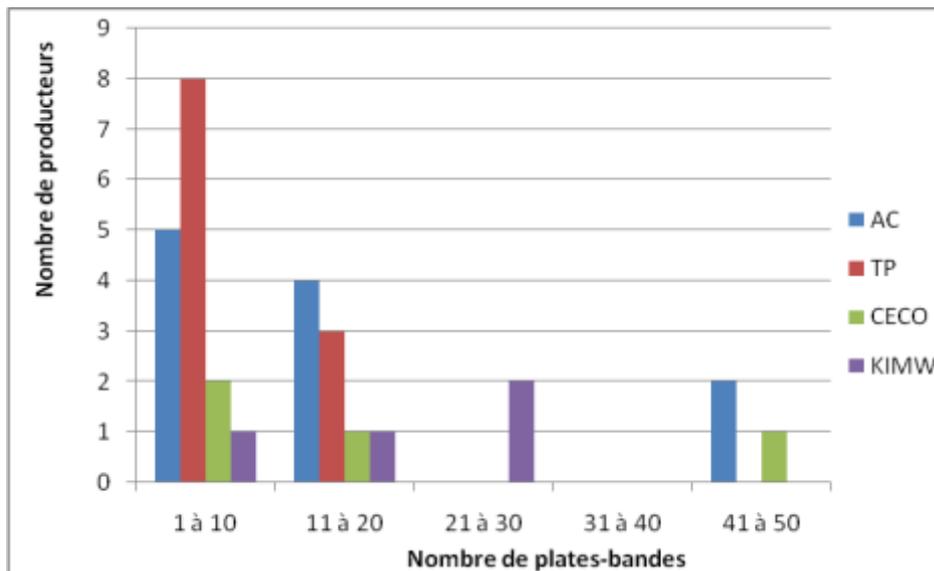


Figure 2.11. Nombre de plates-bandes par site enquêté

La figure ci-dessus nous informe que le site des TP renferme les plus petits producteurs de cette enquête (une à vingt plates-bandes), tandis que le site de CECO est le seul qui englobe les producteurs emblavant entre vingt-et-un et trente plates bandes. Les producteurs emblavant jusqu'au delà de quarante plates-bandes se retrouvent dans deux sites, AC et KIMW. Théoriquement, la quantité des résidus que ces derniers génèrent devrait être tout aussi importante. A titre d'information, les aires occupées par la plupart des plates-bandes emblavées dans ces différents sites varient de 18 à 30 m² à TP, 15 à 28 m² à CECO, 15 à 25 m² à AC et 15 à 16 m² à KIMW.

La connaissance du cycle végétatif est importante pour déterminer la période où une culture donnée est susceptible de générer des résidus. Ce moment arrive à la fin du cycle végétatif, au moment de la récolte.

Selon les producteurs interrogés, à part le gombo dont le cycle végétatif varie de trois à quatre mois, les autres cultures maraîchères ont un cycle mensuel, elles sont cultivées et récoltées douze fois par an.

Le maïs est cultivé deux fois l'an (septembre et mars) pour être récolté respectivement en février et en juillet. Quant à la culture du manioc, elle est faite en septembre et en février-mars pour être récoltée douze mois plus tard. Le riz est cultivé une fois par an et est récolté entre mai et juin.

Utilisation d'engrais ou matières fertilisantes

L'information concernant l'utilisation d'engrais peut être pertinente en ce que les agriculteurs de Kinshasa utilisent les restes de cultures comme engrais organiques. Cette donnée renseigne sur la capacité de ces producteurs agricoles d'utiliser partiellement ou totalement les résidus agricoles qu'ils génèrent.

Deux types d'engrais sont utilisés par tous les producteurs : les engrais organiques et les engrais chimiques.

Engrais organiques

Pratiquement tous les producteurs questionnés utilisent directement les restes de la culture précédente pour fertiliser les nouvelles plates-bandes emblavées. D'autres y ajoutent des herbes mortes, du compost qu'ils fabriquent ou achètent, du lisier de porcs et de la fiente de poules.

Engrais chimiques

Les agriculteurs interrogés utilisent trois types d'engrais chimiques (Figure 2.12.). Il s'agit du NPK, de l'urée et de l'hydrogenophosphate d'ammonium (qu'ils appellent ammoniaque). Selon les producteurs questionnés, ils recourent aux engrais chimiques à cause de l'insuffisance d'engrais organiques dont ils ont besoin pour leur activité culturale.

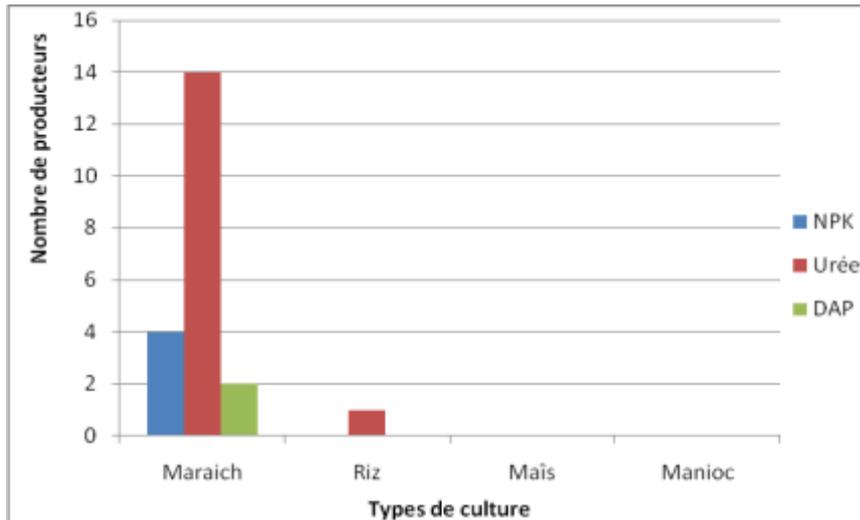


Figure 2.12. Types d'engrais chimiques utilisés pour la production agricole dans les sites enquêtés

Légende.

DAP = diammonium phosphate ou hydrogenophosphate d'ammonium

A la lumière de cette figure, le NPK est utilisé par 17% des producteurs maraîchers, l'urée par 61% des producteurs maraîchers et 25% des producteurs de riz, tandis que le DAP est utilisé par 8% des producteurs maraîchers.

B. Lieu de vente de la récolte

L'information relative au lieu de vente de la récolte permet d'étendre le diagnostic sur la production des résidus agricoles au delà du lieu et du moment de la récolte. En effet, par l'opération de vente, la production végétale est exportée hors du champ et peut occasionner la production des résidus dans un environnement qui n'est pas sous le contrôle du producteur.

La préférence des enquêtés en ce qui concerne les lieux de vente de leur récolte, se présente comme suit (figure 2.13) :

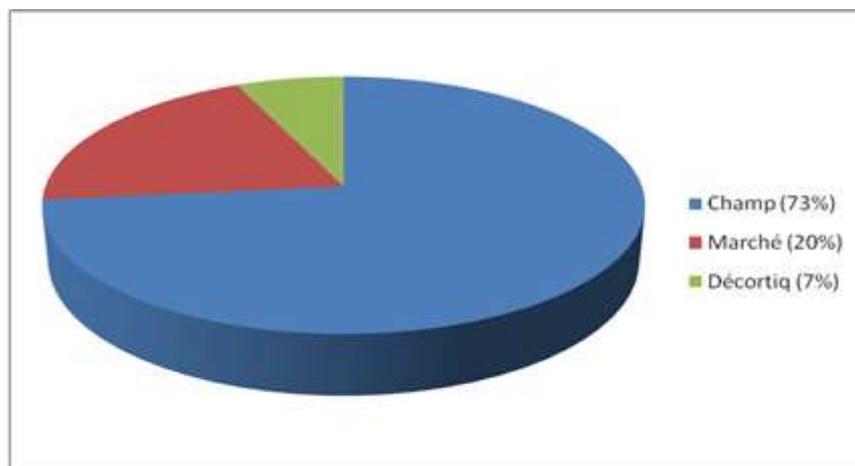


Figure 2.13. Lieux de vente de la production

Il ressort de la figure 2.13 que 73% d'enquêtés vendent leur production au champ, 20% transportent leur production au marché, tandis que 7%, les producteurs de riz, emportent leur production à la décortiqueuse.

Le mode de vente varie d'une culture à une autre. En maraîchage, le producteur laisse à l'acheteur le soin de récolter les plantes arrivées à maturité. Généralement, celui-ci emporte toute la production qu'il achète, en laissant très peu de résidus. Les riziculteurs abandonnent leurs récoltes dans le champ jusqu'à ce qu'elles sèchent. Ensuite, ils battent les tiges sèches de riz pour en récupérer le riz paddy. Ce dernier est directement vendu ou alors transporté à la décortiqueuse. Les producteurs de maïs et de manioc vendent leurs productions directement après la récolte.

Lorsque l'agriculteur vend sa production, il peut être confronté à la gestion des résidus issus de son travail agricole. Les lignes qui suivent donnent les informations relatives à la manière dont la population enquêtée arrive à gérer les résidus générés par son travail agricole.

C. Gestion des résidus de culture

Tous les producteurs questionnés reconnaissent qu'il reste des résidus au champ après la récolte, cependant aucun parmi eux n'a de précision sur la quantité de ces résidus.

Concernant l'usage de ces résidus, en culture maraîchère, 82% des producteurs questionnés recyclent complètement leurs résidus en les utilisant au cours de la fertilisation en vue des nouvelles cultures. Néanmoins, 8 % parmi ceux-ci, essentiellement les producteurs de Gombo, attestent qu'il reste encore des résidus qui sont écartés ou brûlés. Tous les producteurs de riz et 20% des producteurs de maïs avouent également l'existence des résidus inutilisés après la récolte. Ces derniers sont abandonnés à côté des champs ou alors brûlés.

Quelques uns parmi ces producteurs reconnaissent que les résidus qu'ils abandonnent ou brûlent à côté de leurs champs ont un impact négatif sur l'environnement. Ils estiment que ces résidus devraient plutôt être affectés à l'alimentation animale.

2.2.3.2. *Les producteurs agro-industriels*

A. Matière première et Production

L'UDMC (Usine de Décorticage et Mouture du Café) utilise le café parche (variété robusta) comme matière première. Toute la production vient de l'intérieur de la RDC, notamment des ex provinces de l'Equateur, du Kongo Central, de Bandundu et du Kasai-Oriental. Le rythme de réception de cette matière est variable au cours de l'année, toutefois c'est aux mois de mai, juin, septembre, octobre et novembre que l'offre est la plus importante.

La principale production de cette agro-industrie est le café décortiqué, torréfié et moulu. Ce dernier est conditionné dans des petits sacs en plastique de 25g et vendu dans les boutiques et marchés de Kinshasa. L'UDMC n'a fourni aucune information sur la production journalière ou mensuelle du café commercialisable.

La BI (Brasserie Industrielle) utilise le malt ou l'orge germé et le riz décortiqué importés de l'étranger comme principales matières premières. Outre les matières premières, d'autres

constituants mineurs sont aussi ajoutés à la fabrication de la bière. La fréquence de leur réception et la quantité du produit fini obtenu en fonction du temps n'ont pas été révélées.

L'UDR reçoit sa matière première, le riz paddy, provenant de différents producteurs de Kinshasa. Sa fréquence de réception qui n'est pas enregistrée est variable au cours de l'année. Néanmoins, l'usine est plus ravitaillée autour du mois de mai.

La principale production de l'UDR de Ndjili est le riz décortiqué. La production journalière de ce dernier oscille entre 500kg et 8000 kg par jour.

La SI reçoit comme matière première les grumes de bois (Kambala ou *Milicia excelsa*, Afrombosa ou *Pericopsis elata*, bois rouge ou lifaki qui est une Meliacée, bois noir ou *Millettia laurentii*, iroko ou *Milicia excelsa* et autres) provenant de la province Orientale, de Bandundu, de l'Equateur et du Kasai-Occidental. Le rythme de réception de la matière première est variable mais, en moyenne, elle est de 250 à 300 m³ de grumes par mois.

La SI produit du bois scié selon le souhait des clients, à partir des grumes qu'elle reçoit. La production journalière est variable.

La SSIa se charge de raboter, réduire de dimension ou donner une forme particulière à tout objet en bois, selon la demande de sa clientèle, constituée des menuiseries et des particuliers localisés dans ses environs. La fréquence de réception est très variable et fluctue quotidiennement entre 2 et 50 pièces.

La SSIb est destinée à approvisionner une boulangerie locale en lattes de bois. Ces dernières servent de combustible dans les fours utilisés pour la cuisson des pains. Elle reçoit des fragments de bois de coffrage provenant de différentes scieries industrielles de Kinshasa au rythme hebdomadaire. La livraison de ces morceaux de bois est assurée par un camion de marque MAN d'une capacité de 7 m³. La production quotidienne des buchets est d'environ 50 articles en 8 heures de service.

B. Gestion des résidus

Types et quantités journalières de résidus produits

L'UDMC : le café parche produit comme principal résidu la parche dont la quantité moyenne hebdomadaire est de l'ordre de 24 sacs cylindriques en polypropylène de 110 cm de hauteur et 45 cm de diamètre. Ces derniers sont stockés à côté de l'entrée principale de l'usine. Bien que n'ayant pas été pesés au cours de l'enquête, nous estimons à un peu plus de 50 kg chacun de ces sacs remplis de parches. La quantité de café engendrant cette quantité de résidus n'a pas été révélée.

Ces résidus de café sont à la base de la production, après les pluies, des eaux stagnantes qui contribuent énormément à la formation des boues et la pullulation des moustiques. Pour faire face à la difficulté engendrée par la présence de ces résidus, une importante quantité est offerte gratuitement aux femmes productrices des légumes, tandis que le reste, de 10 à 12 sacs par semaine, est déversé dans la rivière passant à côté de cette entreprise (figure 2.14).



Figure 2.14. Parche de café entassée au bord de la rivière à côté de l'usine de torréfaction et de mouture de café, à Kinshasa Kingabwa (Photo prise par D-B Bangala Mada)

La BI : la drêche constitue le principal résidu solide engendré par la brasserie. La quantité quotidienne de drêche produite par la BI ne nous a pas été donnée. Toutefois, concernant le ratio résidu/production, il nous a été signalé qu'environ 17% de drêche sont produites par la quantité d'orge (non précisée) donnant un brassin de 580 hectolitres.

Concernant son utilisation, la brasserie vend à très vil prix (50 CDF par chargement d'un camion MAN de 12 à 17 tonnes) la drêche aux éleveurs de porcs et de poissons, ainsi qu'aux producteurs de légumes. Pour éviter toute nuisance pouvant être causée par la quantité de drêche non vendue, celle-ci est déversée dans le fleuve Congo.

L'UDR : Les sons et balles sont les principaux résidus issus du décorticage du riz. L'UDR produit quotidiennement une quantité des balles de riz variant entre 2 et 10 sacs en polypropylène (de même type que ceux utilisés pour les parches de café), en période de faible activité et entre 50 et 100 sacs lorsqu'il y a abondance de la clientèle, aux mois de juin, juillet et août. Le ratio résidu/produit fini du décorticage est de 30 à 40 % (son et balles de riz), il est de 17 à 25% pour les balles seules.

La SI : la SI génère trois types de résidus, la sciure, les lattes et les dos de bois. La quantité moyenne de ces résidus produits quotidiennement est d'environ 30 sacs de sciure (sacs de même type que ceux utilisés pour les parches de café et les balles de riz), quarante (40) à cinquante (50) lattes de bois des tailles variables, et une quantité non déterminée de dos de bois. Cent (100) kg de grumes génèrent, après leur traitement, environ 15 kg de résidus. Ils sont utilisés pour la fabrication des tabourets, des cercueils ou distribués aux mamans maraîchères. La portion de la sciure non évacuée est entassée à côté du mur de la scierie (Figure 2.15). Quand il pleut, il se forme à cet endroit une abondante boue.



Figure 2.15. Sciure et grumes de bois jonchant le sol, à côté du mur de la scierie SI à Kinshasa Kingabwa (Photo prise par D-B Bangala Mada)

La SSIa : cette scierie produit quotidiennement une quantité de 3 à 10 sacs en polypropylène, de même type que ceux cités précédemment (Figure 2.16), de sciure et copeaux de bois. Le ratio résidus sur produit utile n'est pas calculé. Généralement, ces résidus sont donnés gratuitement aux mamans des environs qui les utilisent comme fertilisant organique, combustible ou litière dans l'élevage des volailles.



Figure 2.16. Sacs contenant de la sciure de bois dans la scierie SSIa à Kinshasa Lemba (Photo prise par D-B Bangala Mada)

En dépit de cela, la SSIa éprouve encore des difficultés pour se débarrasser totalement de tous les sacs de résidus stockés dans son enceinte comme cela est révélé sur la photo ci-dessus. Il s'ensuit l'encombrement de l'espace, la formation des eaux stagnantes et le pullulement des moustiques.

La SSIB : produit quotidiennement environ 3 sacs de sciure et copeaux de bois. Le ratio quantité des résidus sur quantité de production utile n'est pas connu. Par ailleurs, ces résidus qui sont à la base de la formation des boues après les pluies et du pullulement des moustiques, sont d'une manière générale, vendus aux femmes des quartiers environnant cette scierie.

2.2.4. Discussion

Au cours de cette enquête, il a été noté qu'en culture légumière, il y a régulièrement production de quelques résidus, ce sont des plantes déracinées, tiges cassées, feuilles et racines tombant au moment des récoltes. Cependant, en dépit du nombre des plates-bandes qui donnent ces légumes et du caractère mensuel de la production, la quantité de ces résidus demeure insuffisante pour couvrir le besoin en fertilisants organiques requis pour les prochaines cultures. Le même constat a été fait chez la majorité des producteurs de maïs. Par contre, tous les producteurs de riz paddy disposent des résidus non quantifiés, inutilisables après la récolte.

Mulaji (2011) estime que la carence en résidus végétaux nécessaires à la fertilisation organique du sol concerne la pratique agricole dans toute la ville de Kinshasa. Cette situation serait exacerbée, estime-t-il, par la nature altérée, acide et pauvre en nutriments des sols de cette ville. Pour faire face à cette situation de carence, il recommande la valorisation de la matière organique des déchets solides ménagers par leur recyclage en agriculture sous forme de compost.

La question de recyclage et de valorisation des résidus agricoles est assez délicate et préoccupe la communauté scientifique même au delà de nos frontières nationales. Au Sénégal, en guise d'illustration, le groupe Ingenosahel (1998) avait entrepris une enquête sur la disponibilité et la valorisation des résidus agricoles et agro-industriels. Sur base des résultats obtenus, ce groupe recommanda le maintien en terre d'une bonne portion des résidus agricoles pour la préservation de la fertilité des sols et la prévention des érosions dans ce pays. Parmi ces résidus figurent les pailles de maïs et de riz.

En tenant compte des résultats de la présente enquête auprès des producteurs agricoles ainsi que d'autres travaux relatifs à la valorisation de la matière organique d'origine végétale (Ingenosahel, 1988 ; Mulaji, 2011 ; Mindele, 2016), le scénario envisageable pour la valorisation des résidus agricoles à Kinshasa consisterait à localiser les sites où ces résidus sont excédentaires, identifier et quantifier ces derniers, déterminer les besoins chez les producteurs en carence et envisager les moyens d'approvisionner ceux-ci en engrais organiques.

En analysant les informations récoltées auprès des agro-industries concernées par cette enquête, les observations suivantes se dégagent :

Concernant la quantification, parmi les agro-industries enquêtées, l'UDMC, l'UDR, la SI, la SSIA et la SSIB ne procèdent pas rigoureusement à la quantification de leurs résidus, mais elles disposent des données qui peuvent servir à déterminer, plus ou moins, la quantité des résidus que leurs activités génèrent. Ces données peuvent constituer un point de départ pour la mise en place d'une filière de leur valorisation. Mais, il est très difficile de tenter cette estimation avec les données obtenues de la BI.

Toutes ces agro-industries évacuent leurs résidus en les fournissant gratuitement ou en les vendant à vil prix aux producteurs maraîchers ou aux éleveurs de volailles. En dépit de cela, il reste généralement une quantité résiduelle qui est déversée dans les cours d'eau, fleuve ou rivière, passant à proximité de certaines de ces entreprises. Nous estimons que cette situation est en grande partie due à l'absence d'une politique provinciale de valorisation des résidus végétaux comme les attestent Lelo (2008), Holy et *al.* (2013) et Holy et *al.* (2014).

En effet, à l'heure actuelle, contrairement à la situation que nous vivons en RDC, les résidus végétaux ne sont plus considérés comme nuisance dans plusieurs pays d'Afrique et d'autres continents. Plusieurs états s'adonnent à l'élaboration des statistiques annuelles de tous les types de résidus agricoles et agro-industriels produits dans l'ensemble de leurs territoires nationaux. Ces informations leur permettent de planifier des politiques de valorisation de ces sous-produits (Amoo-Gottfried & Hall, 1999 ; McKendry¹, 2002 ; Jingura & Matengaifa, 2008 ; Sing et al., 2008 ; Kusekwa, 2013).

C'est ainsi que nous croyons qu'aujourd'hui, la ville de Kinshasa dispose de tous les éléments devant lui permettre de s'accaparer du raisonnement moderne qui sous-tend la mise en œuvre des méthodes de valorisation de la lignocellulose donnée par Koopmans & Koppejan (1997) et Thioune (2009). En effet, en plus de leur usage comme combustible, les résidus végétaux excédentaires et polluants sur certains sites de production agricoles peuvent avoir plusieurs usages. Parmi ceux-ci, ils peuvent servir comme substrat pour la production des champignons comestibles, la fabrication des produits biobasés ou du compost pouvant être utilisé comme fertilisant dans d'autres sites de production agricole qui manquent des matières fertilisantes (Sivrikaya & Peker, 1999 ; Carmen, 2010, Binod et *al.*, 2010).

Cette enquête s'est limitée à la production et la gestion des résidus végétaux générés au niveau des champs et des agro-industries dans quelques communes de Kinshasa. Concernant la production et la gestion de ces résidus dans les circuits de commercialisation au niveau des marchés et dans les ménages consommateurs finaux, les travaux de quelques auteurs se sont intéressés à la gestion des déchets solides produits dans la ville de Kinshasa (Lelo, 2008 ; Lelo, 2011 ; Holy et al., 2013 ; Holy et al., 2014).

Parmi ceux-ci, Lelo (2008) déplore le mode de gestion des déchets à Kinshasa, il démontre les faiblesses des autorités et des populations kinoises en ce qui concerne la gestion rationnelle des ordures ménagères ; il présente aussi les différents modes non hygiéniques d'évacuation des déchets à Kinshasa. Par ailleurs, il recommande que la gestion des déchets solides à Kinshasa s'effectue suivant la logique TRIVAC, c'est-à-dire, Trier, Recycler, Incinérer, Valoriser, Communiquer comme cela se fait sous d'autres cieux. Holy et al. (2014) proposent quelques pistes de valorisation des déchets produits à Kinshasa, ils préconisent la subdivision de cette ville en zones fédérales de gestion des déchets et la création des sites potentiels des décharges finales.

Nous pensons que la gestion des résidus agricoles et agro-industriels dans la ville de Kinshasa devrait présenter moins de difficultés que celles qui sont observées et décriées concernant les autres types de résidus, dans la mesure où les étapes de tri et d'incinération peuvent aisément être évitées. En effet, contrairement aux déchets ménagers et d'autres ordures urbaines, les résidus agricoles et agro-industriels présentent l'avantage d'être générés par des activités s'exerçant sur des sites bien localisés. C'est ainsi que la démarche de leur valorisation doit partir de la localisation, l'information (communication) et la formation des producteurs afin que ceux-ci arrivent à mieux collecter, stocker ces résidus et à les quantifier. Ensuite, il s'agira mettre en leur disposition des technologies simples et peu coûteuses de valorisation et

enfin, il faudra envisager la faisabilité de chaque méthode de valorisation sur base des atouts et contraintes se présentant dans chaque cas.

2.2.5. Conclusion

L'enquête menée auprès des 30 producteurs agricoles (maraîchers, riz, maïs et manioc) et six agro-industriels (producteurs de café, bois scié, riz cargo et bière) dans cinq communes de Kinshasa (Lemba, Kinsenso, N'djili, Limété et Mont-Ngafula) a révélé que :

Au niveau de la production agricole, la paille de riz constitue le résidu végétal en surplus, alors qu'il y a carence des matières végétales devant servir à la fertilisation en culture maraîchère. Les résidus issus du maraîchage causent leur pollution au niveau des marchés et ménages consommateurs finaux. Ceci serait essentiellement dû à l'absence d'une politique efficace de gestion des déchets dans la ville de Kinshasa.

Les agro-industries enquêtées, produisent beaucoup de résidus végétaux, mais ne procèdent pas rigoureusement à leur quantification. Ne pouvant les valoriser sur place, elles s'en débarrassent rapidement. Ces résidus sont alors vendus à vil prix, distribués gratuitement ou éliminés dans les cours d'eau les plus proches de leurs entreprises.

La présence de ces résidus agricoles et agro-industriels présente plusieurs impacts négatifs, principalement, l'encombrement de l'espace, la formation des flaques d'eau et boues, la prolifération des mouches et moustiques, l'apparition des maladies dues à l'insalubrité (malaria, fièvre typhoïde, etc.), l'apparition des odeurs nauséabondes, etc.

La production des déchets végétaux à Kinshasa est une conséquence normale des activités agricoles et agro-industrielles de la population kinoise. Leur bonne gestion implique la prise de conscience de la part des producteurs, des chercheurs et des décideurs politico-administratives des potentialités de leur utilisation.

La situation généralement rencontrée est la présence de ces résidus en excès et causant la pollution dans certains quartiers de la ville tandis que dans d'autres quartiers, il en manque. Dans ces derniers, ces résidus seraient utiles soit comme source énergétique, soit comme fertilisant organique.

La résolution de la question de la pollution par les résidus végétaux, spécifiquement agricoles et agro-industriels, doit nécessairement passer par une stratégie comprenant d'abord leur localisation, quantification et caractérisation depuis leur production. Ensuite, il importe d'en déterminer les principaux usages possibles à l'état brut ou après une ou quelques transformations. Enfin, il faudrait en déterminer les besoins dans les sites où ces sous-produits peuvent être utilisés.

C'est dans cette optique que nous avons entrepris, dans la suite de la recherche sur la valorisation des résidus lignocellulosiques agricoles et agro-industriels générés à Kinshasa, des investigations sur les techniques de quantification de ces types de résidus afin de pouvoir les appliquer dans cette métropole.

2.3. EVALUATION DES QUANTITÉS DES RÉSIDUS DE RÉCOLTE ET DE TRANSFORMATION DES PRODUITS AGRICOLES

2.3.1. Introduction

Dans plusieurs villes du monde, des mécanismes de valorisation des résidus végétaux sont mis en place afin de prévenir toute pollution environnementale dont ils peuvent être la cause. C'est ainsi qu'à Kinshasa, comme dans d'autres provinces de la RDC, une valorisation des résidus lignocellulosiques peut sérieusement réduire toute forme de nuisance sur le plan environnemental que ces restes de plantes peuvent générer mais peut aussi être une opportunité pour combler divers types des besoins de la population (Koopmans & Koppejan, 1997 ; Hwang, 2010).

Pour ce faire, une bonne gestion des résidus végétaux doit passer par une démarche d'identification de principaux types (Bangala₁ et *al.*, 2015), de leur quantification et caractérisation et de la mise en place des filières de valorisation. Parmi les voies de valorisation, il y a lieu de penser à la production alimentaire (Chang, 2005 ; Sanchez, 2009) et de l'énergie par combustion directe ou après prétraitement physique, biologique ou chimique (Hemstock et *al.*, 1995 ; Agbor et *al.*, 2011 ; Bangala₂ et *al.*, 2015).

C'est dans cette optique que Cooper et Laing (2007) suggèrent aux pays africains qui ont des difficultés d'accès aux sources d'énergie fossiles et à l'électricité de produire de l'énergie à partir des résidus agricoles et des déjections des animaux d'élevage, ce qui contribuerait à réduire l'utilisation de charbon de bois et de bois de chauffe nuisant gravement à l'environnement en ce qu'elle est responsable d'une forte déforestation.

Ces deux auteurs ont estimé les quantités des résidus générés par les principales productions agricoles commercialisables de plusieurs pays d'Afrique. Pour ce faire, ils ont utilisé les statistiques de la FAO de production agricole de ces pays et un facteur de conversion, appelé "Residue to Product Ratio" dont le mode de calcul sera exposé dans le point suivant.

A l'instar des travaux entrepris dans d'autres pays qui ont permis de planifier la valorisation efficace des résidus agricoles et agro-industriels, le présent travail tente de contribuer à l'atténuation des impacts négatifs causés par les résidus agricoles. Il a pour principaux objectifs :

- Evaluer la quantité des résidus végétaux, générés à Kinshasa, issus des cultures vivrières, de la sylviculture, de la foresterie et de l'industrie du bois ;
- Etablir une comparaison entre la production provinciale (Kinshasa) et nationale de ces résidus quantifiés ;
- Proposer quelques voies de valorisation de ces résidus quantifiés.

2.3.2. Collecte des données et méthode de calcul

La méthodologie employée dans cette recherche est celle décrite par Koopan & Koppejan (1997), Cooper & Laing (2007) et Singh *et al.* (2008). Dans celle-ci les quantités des résidus sont obtenues à partir des statistiques officielles nationales de productions agricoles et agro-industrielles auxquelles s'appliquent un facteur de conversion appelé Residue to Product Ratio, RPR en abrégé.

Dans notre cas, les données de base qui ont permis le travail de quantification des résidus agricoles et agro-industriels ont été tirées de :

- Statistiques officielles provinciales et nationales sur les productions vivrières de la RDC (disponibilité de 2009 à 2011). Elles ont été fournies par la Direction des Statistiques Agricoles du Ministère de l'Agriculture (Tableaux 3/1 et 3/2 en Annexes) ;
- Productions nationales des cultures commerciales, forestières, de la sylviculture et de l'industrie du bois de la RDC. Ces informations ont été pourvues par les statistiques de la Banque Centrale de la RDC, BCC en abrégé (Tableaux 3/2, 3/3 et 3/4 en Annexes) ;
- Facteurs de conversion ou RPR (Residue to Product Ratio) sélectionnés dans la littérature sur base de travaux réalisés dans certains pays africains et d'autres continents (Tableau 3/5 en Annexes).

Le RPR se définit comme étant la quantité de chaque type de résidus générés lors de la récolte et/ou la transformation d'une tonne de la production utile ou désirée d'une culture. Plusieurs travaux expérimentaux de détermination de ces facteurs ont été entrepris pour la plupart des produits agricoles et forestiers et peuvent être trouvés dans la littérature (Koopmans & Koppejan, 1997 ; Jölli & Giljum, 2005).

Le recours au RPR, dans la plupart de travaux de quantification des résidus agricoles, agro-industriels et forestiers qui sont générés dans une contrée est dû à la difficulté d'accès et de détermination stricte de la quantité réelle de ces résidus. La littérature fournit les principaux types de résidus générés par ces activités ainsi que leurs RPR correspondants (Koopmans & Koppejan, 1997 ; Jölli & Giljum, 2005).

Suivant cette approche d'évaluation, si la valeur RPR du résidu à quantifier est connue, alors la production annuelle des résidus de type i d'une culture C est obtenue par la relation :

$$(RC)_i = (RPR)_i \times (PrC)_i \quad (\text{Singh et al., 2008})$$

Où $(RC)_i$ est la quantité (en tonnes) du résidu i généré, $(RPR)_i$ est la valeur RPR relative aux résidus i à quantifier (elle est fournie par la littérature), tandis que $(PrC)_i$ correspond à la production agricole à la base de la génération du résidu i .

Le tableau 3/5, aux annexes, donne quelques valeurs des RPR trouvées dans la littérature. Généralement, ces valeurs sont associées aux capacités calorifiques (Latent Heat Value per ton ou LHV/T) de ces résidus, très importantes dans leur valorisation comme source énergétique. Pour nous, à défaut de calculer les valeurs des résidus végétaux générés à Kinshasa chaque année, le calcul a été fait sur la moyenne des productions des trois années (de 2009 à 2011) afin d'obtenir une valeur annuelle moyenne de résidus de chaque type de

résidus générés. Aussi, entre plusieurs valeurs de RPR se rapportant au même type de résidu d'une production donnée, nous avons privilégié la valeur de RPR la plus faible.

Les principaux produits de la sylviculture, de l'exploitation forestière et de l'industrie du bois à la base de la production des résidus lignocellulosiques sont : les bois de chauffe, les charbons de bois ou braise, les grumes, les tranchages, les contreplaqués, les bois sciés et le placage (Koopmans & Koppejan, 1997 ; BCC-RDC, 2012). La production des bois de chauffe, des braises et des grumes engendrent des feuilles, des branches d'arbres, tandis que l'industrie du bois produit des copeaux, de la sciure de bois, ainsi que d'autres fragments de bois de taille variable.

2.3.3. Résultats

2.3.3.1. Estimation de la production annuelle moyenne des résidus des cultures vivrières générés à Kinshasa entre 2009 et 2011

A. Estimation de la production globale annuelle des résidus des cultures vivrières générés à Kinshasa entre 2009 et 2011

En utilisant les valeurs de production agricole et forestière fournies par les statistiques officielles de la RDC (Minagri, 2012, BCC-RDC 2013) et les valeurs de RPR trouvées dans la littérature, les quantités annuelles moyennes (entre 2009 et 2011) des résidus, issus des cultures vivrières et de leur transformation, générés à Kinshasa sont données dans le tableau 3-1.

Tableau 3-1. Estimation de la production annuelle moyenne des résidus des cultures vivrières à Kinshasa entre 2009 et 2011

Origine	Type de résidus	RPR	Production (x1000T/an)	
			Moyenne annuelle denrée (de 2009 à 2011)	Production résidus
Maïs (<i>Zea mays</i> L.)	Paille	1,4	13,28	18,59
	Raffles	0,27		3,63
	Spathes	0,2		2,66
Riz paddy (<i>Oriza sativa</i> L.)	Paille	1,76	2,15	3,78
	Balles	0,27		0,57
Manioc (<i>Manihot esculanta</i> Crantz)	Tiges	0,06	10,57	0,66
	Epluchures	0,03		0,35
Patate douce (<i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.)	Feuilles et tiges	0,4	1,63	0,65
Igname (<i>Dioscorea</i> spp.)	Feuilles et tiges	0,4	0,3	0,12

Haricot sec (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	Gousses et fanes	1,4	0,14	0,17
Niébé (<i>Vigna unquiculata</i> subsp. <i>unquiculata</i> L.) Walp.)	Gousses et fanes	1,4	1,26	1,76
Pois cajan (<i>Cajanus cajan</i> L.)	Gousses et fanes	1,4	0,29	0,41
Voandzou (<i>Vigna subterranea</i> L.) Verdc.)	Gousses et fanes	1,4	0,002	0,028
Arachide (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	Coques	0,48	2,67	1,27
	Fanes	2,3		6,14
Soja (<i>Glycine max</i> L.) Merr.)	Fanes	2,1	0,54	1,13
	Gousses	1		0,54
Banane douce (<i>Musa spp.</i>)	Feuilles et racines	1,2	1,08	1,3

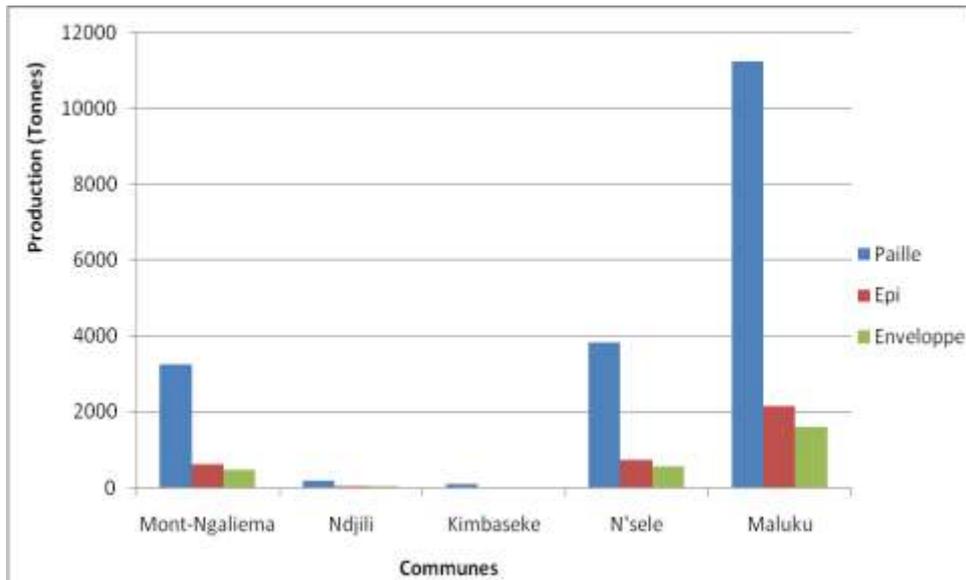
L'analyse du tableau 3-1 révèle que pour certaines denrées, deux à trois valeurs RPR sont données, selon les types de résidus ou parties des plantes générés. Il s'agit des valeurs correspondant aux résidus générés au moment de la récolte au champ et celle correspondant aux résidus issus de la transformation après la récolte. Ces denrées sont notamment, le maïs, le riz paddy, le manioc, le haricot, le niébé (valeurs RPR des haricots utilisées), l'arachide et le soja. La transformation peut être un pelage manuel ou l'usinage mécanisé de ces produits pouvant se faire sur les lieux de production ou ailleurs.

B. Répartition de la production moyenne annuelle des résidus de cultures vivrières par commune à Kinshasa

La production des résidus agricoles et agro-industriels issus des cultures vivrières dans les communes agricoles de Kinshasa est inégalement répartie. Les figures 3.1 à 3.11 donnent, avec plus de détails, les quantités de ces résidus générés au niveau de chaque commune agricole concernée. Dans l'ordre, il sera présenté les résidus de maïs, riz, manioc, patate douce, igname, haricot, niébé, pois cajan, voandzou, arachide, soja et banane douce.

a. Résidus de maïs

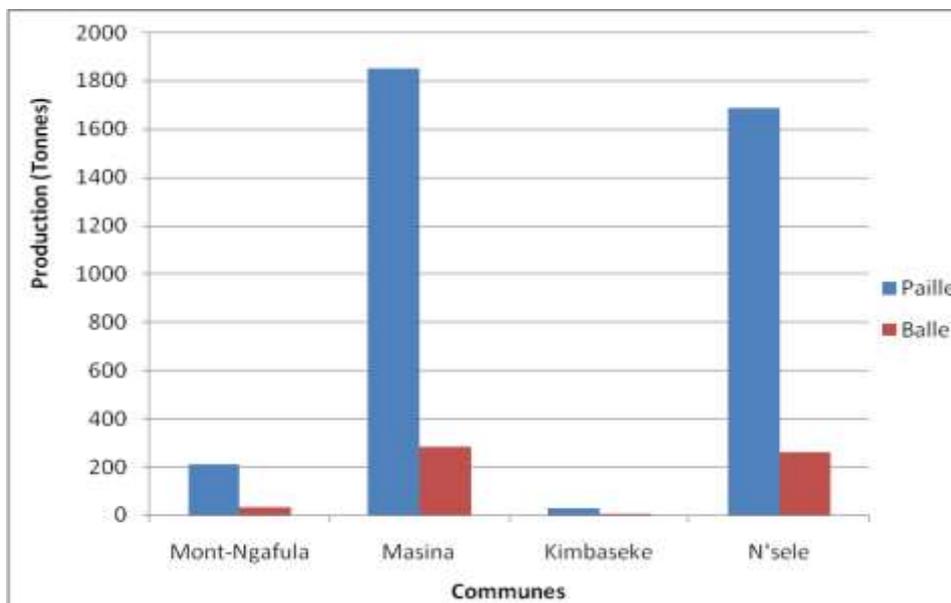
Les communes agricoles de Kinshasa produisant les plus importantes quantités des résidus de maïs (déchets des cultures) sont répertoriées dans la figure 3.1.



Figures 3.1 Production annuelle (T) des résidus de maïs dans cinq communes agricoles de Kinshasa

D'après les résultats de la figure 3.1, la commune de Maluku produit la plus grande quantité des résidus de maïs (15.022,33T/an) tandis que Kimbaseke vient en dernière position (108,46T/an).

b. Résidus de riz



Figures 3.2 Production annuelle (T) des résidus de riz paddy dans quatre communes agricoles de Kinshasa

La Figure 3.2 renseigne que la commune de Masina produit la plus grande quantité des résidus de riz paddy (52.135,56T/an), la commune de Kimbaseke donne la plus faible production (32,48T/an), tandis que la commune de Maluku, contrairement aux autres types de résidus, n'en produit pas, du fait de l'absence de la culture de cette plante céréalière.

c. Résidus de manioc

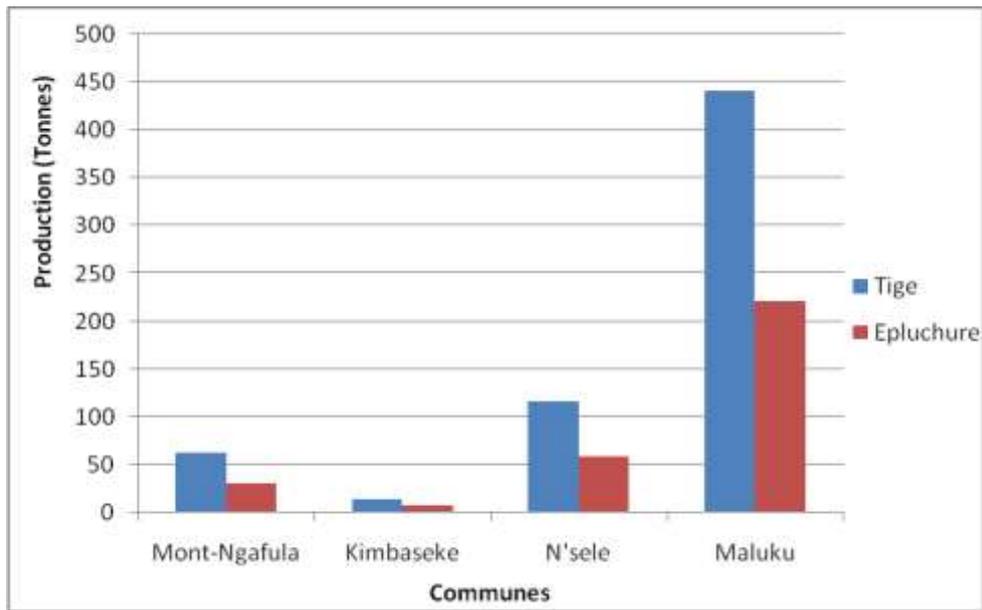


Figure 3.3. Production annuelle (T) des résidus de manioc dans quatre communes agricoles de Kinshasa

La figure 3.3 nous renseigne que quatre communes de Kinshasa sont plus impliquées dans la production des résidus de manioc. Parmi celles-ci, la commune de Maluku vient en première position, tandis que celle de Kimbaseke est en dernière position. Elles produisent respectivement 662,10T/an et 21,33T/an de résidus de manioc.

d. Résidus de patate douce

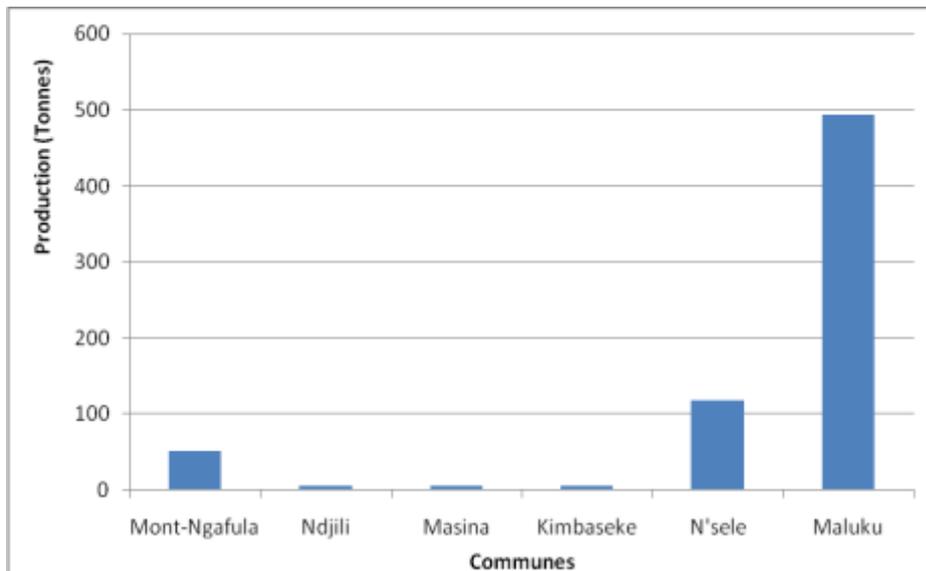


Figure 3.4. Production annuelle (T) des résidus de patate douce dans six communes agricoles de Kinshasa

D'après cette figure, dans six communes de Kinshasa, sont produites d'importantes quantités de résidus de patate douce. Parmi elles, la commune de Maluku en produit la plus importante proportion qui atteint environ 500T/an.

e. Résidus d'igname

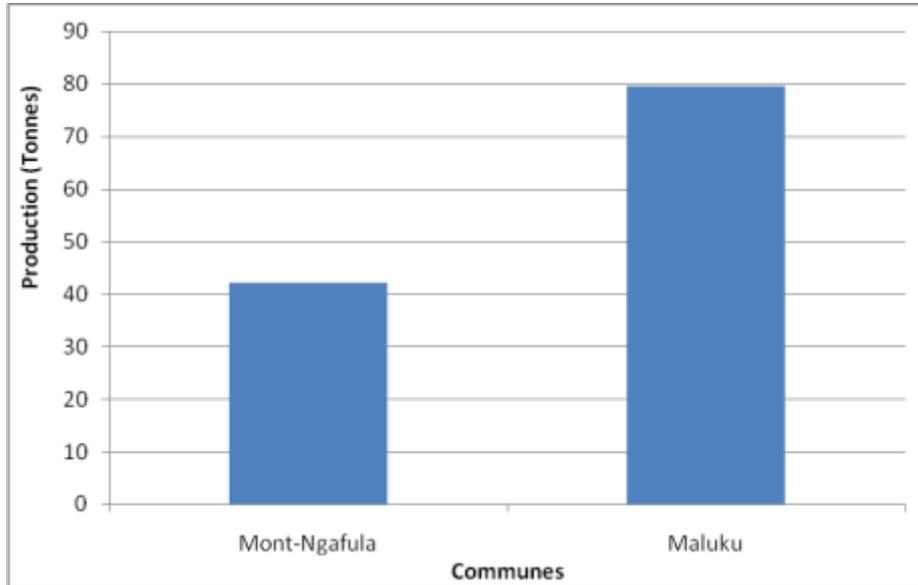


Figure 3.5. Production annuelle (T) des résidus d'igname dans deux communes agricoles de Kinshasa

Les résidus d'igname se retrouvent essentiellement dans deux communes de Kinshasa, nous renseigne cette figure. Il s'agit des communes de Maluku et de Mont-Ngafula.

f. Résidus de haricot

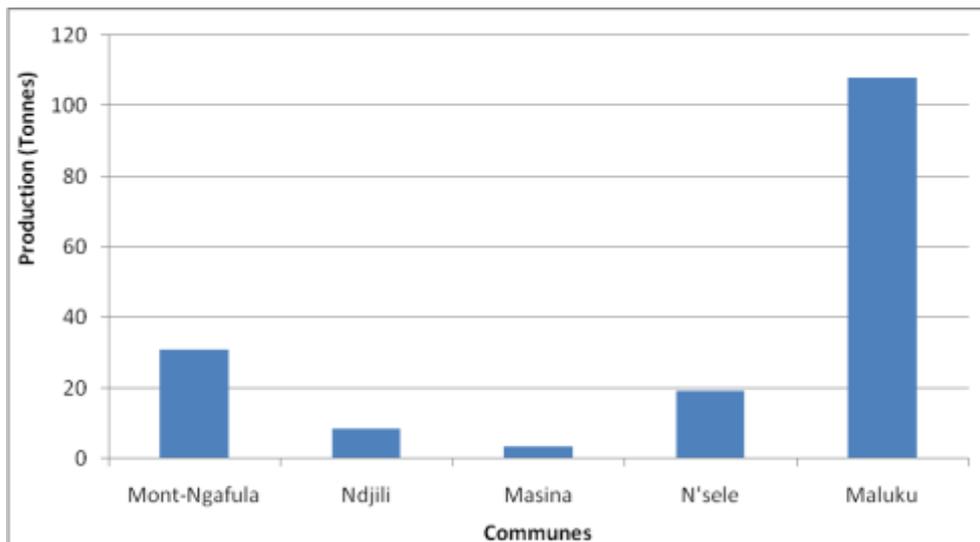


Figure 3.6. Production annuelle (T) des résidus de haricot dans cinq communes agricoles de Kinshasa

La figure 3.6 nous informe que cinq communes de Kinshasa produisent les plus importantes quantités de résidus de haricot. La commune de Maluku, plus grande productrice, génère

environ 110T/an des résidus issus de la récolte des haricots et celle de Masina, plus petite productrice, en génère 3,20T/an.

g. Résidus de niébé

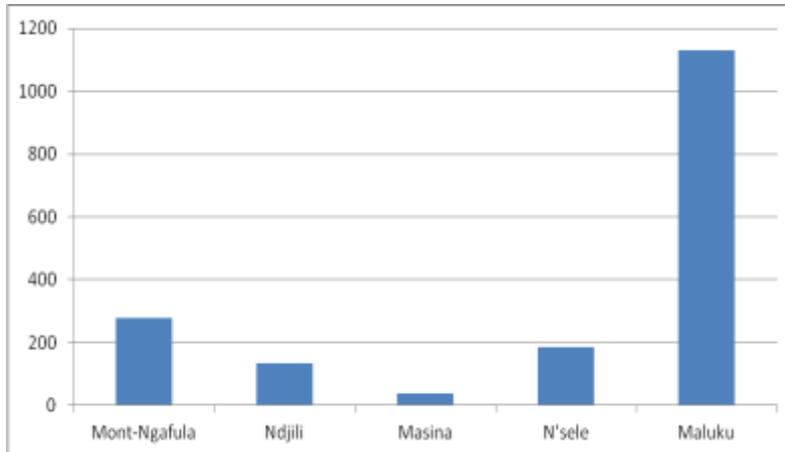


Figure 3.7. Production annuelle (T) des résidus de niébé dans les communes agricoles de Kinshasa

La commune de Maluku produit le plus des résidus de niébé (1128,40T/an) à Kinshasa que les autres communes agricoles.

h. Résidus de pois-cajan

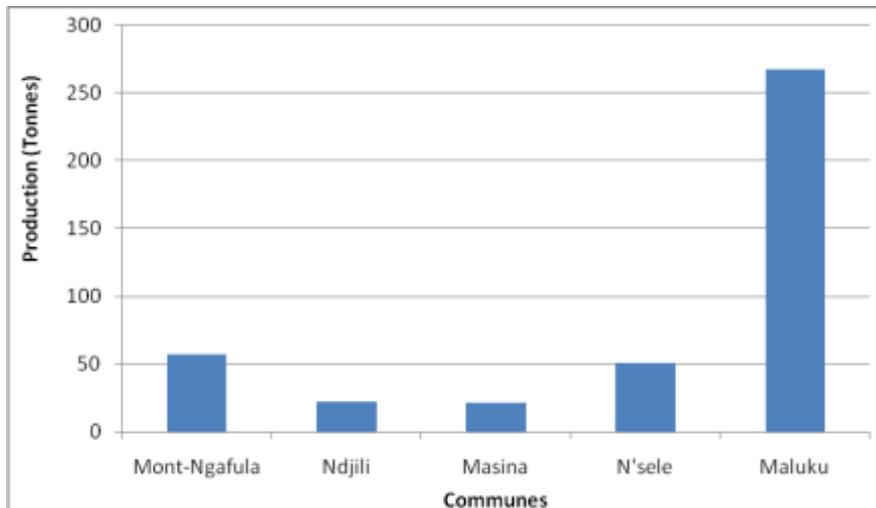


Figure 3.8. Production annuelle (T) des résidus de pois-cajan dans cinq communes agricoles de Kinshasa

D'après cette figure, à Kinshasa, la commune de Maluku produit annuellement, la plus importante quantité de résidus de pois-cajan (267,40T/an).

i. Résidus de voandzou

En ce qui concerne le voandzou, 2,8 Tonnes de résidus sont produit annuellement dans la commune de Maluku, principale productrice de ce type de résidus.

j. Résidus d'arachide

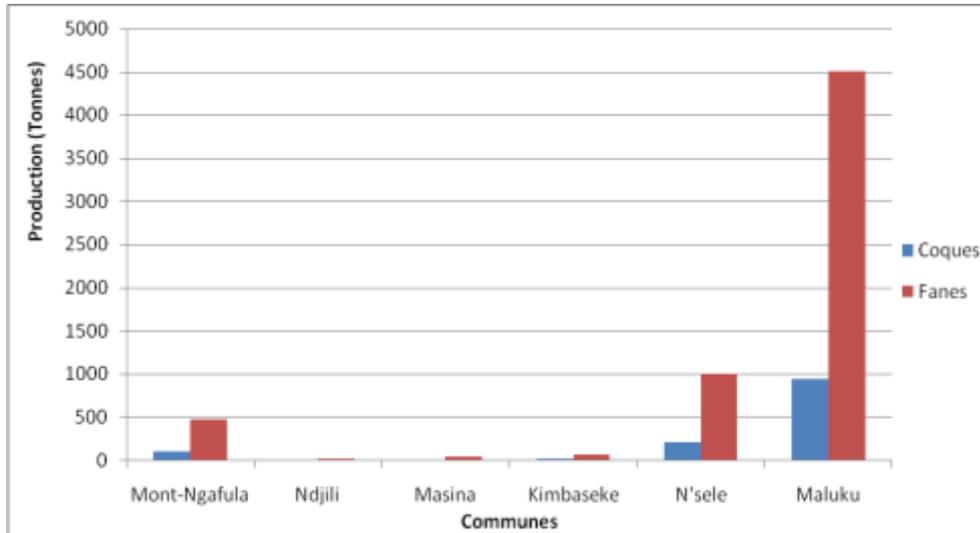


Figure 3.9. Production annuelle (T) des résidus d'arachide dans six communes agricoles de Kinshasa

Dans la commune de Maluku, il y a production de plus de résidus d'arachide (5.454,36T/an), nous renseigne la figure 3.9.

k. Résidus de soja

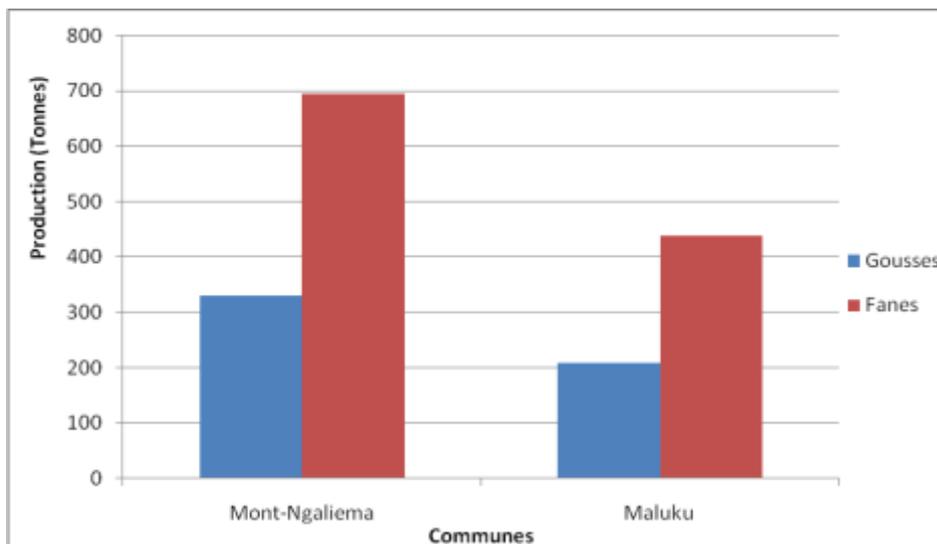


Figure 3.10. Production annuelle (T) des résidus de soja dans deux communes agricoles de Kinshasa

A Kinshasa, principalement, deux communes produisent des résidus de soja. Il s'agit de Maluku et Ngaliema. Parmi celles-ci, la commune de Ngaliema en produit plus.

1. Résidus de banane

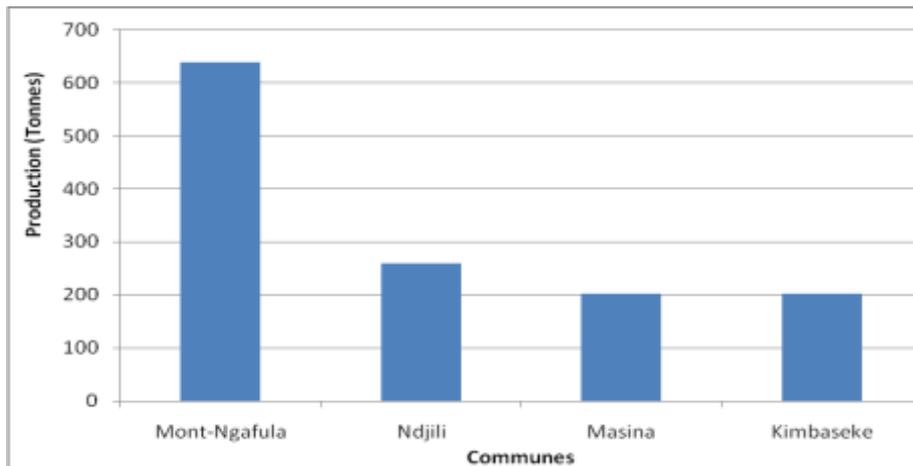


Figure 3.11. Production annuelle des résidus de banane douce (ou dessert) dans cinq communes agricoles de Kinshasa

La commune de Mont-Ngafula génère annuellement la plus grande quantité des résidus de banane douce (638,40T) à Kinshasa.

C. Bilan global de la production annuelle de principaux types des résidus agricoles et agro-industriels à Kinshasa

a. Production globale

Ce bilan, tiré du tableau 3-1, est présenté dans la figure 3.12.

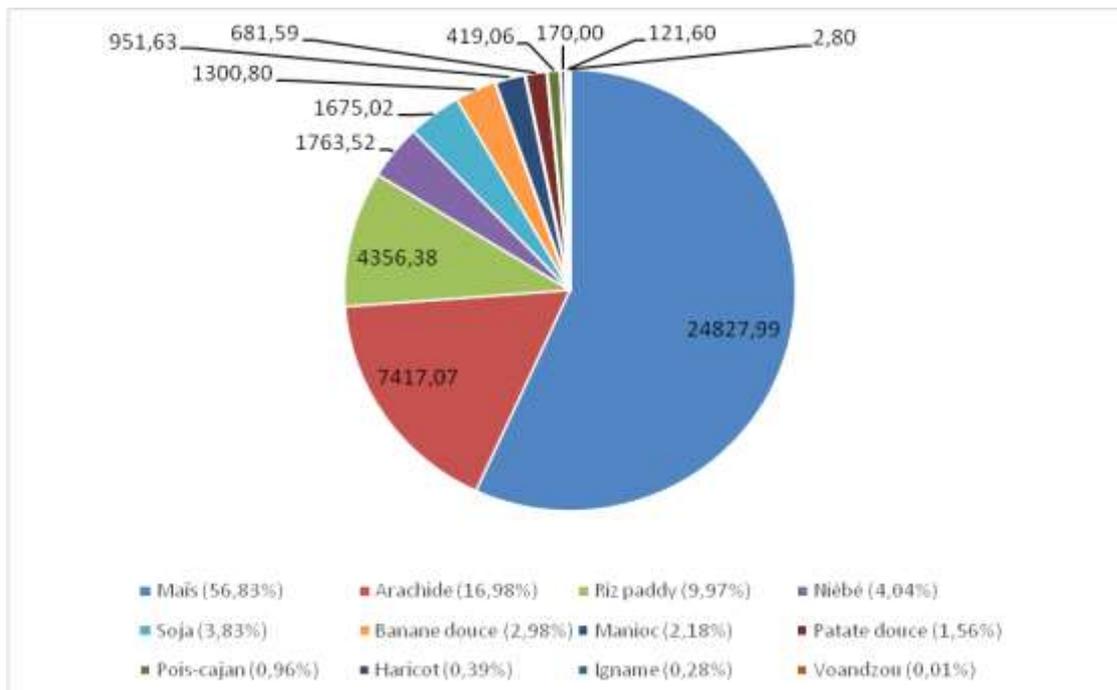


Figure 3.12. Quantités annuelles moyennes (T) de principaux types des résidus générés dans la production vivrière et agro-industrielle à Kinshasa (2009 à 2011)

En faisant le bilan, par type de résidu (figure 3.12), la quantité totale moyenne des résidus agricoles et agro-industriels générés annuellement à Kinshasa, entre 2009 et 2011, est de 43.687,47T. Parmi ceux-ci, les résidus de maïs représentent 56,83%, tandis que ceux de Voandzou sont les moins représentés (0,01%).

b. Production par commune

Le bilan par commune agricole est donné par la figure 3.13.

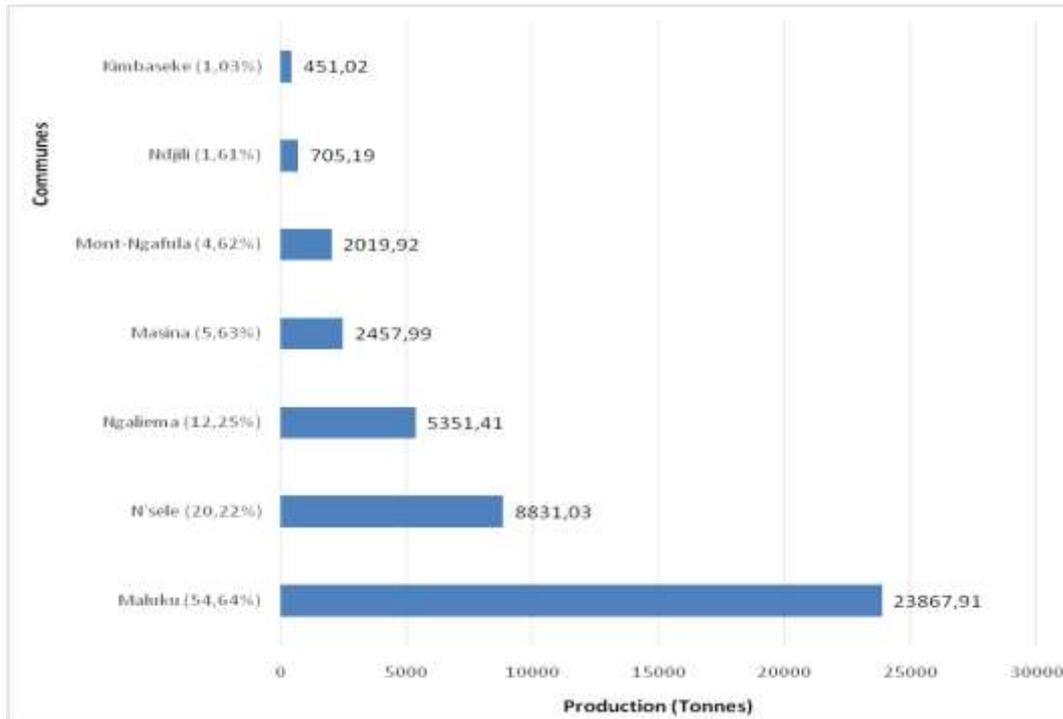


Figure 3.13. Production annuelle moyenne (T) des résidus agricoles issus des cultures vivrières par commune agricole de Kinshasa (2009 à 2011)

En établissant ce bilan par commune, la figure 3.13 indique que la commune de Maluku est la plus grande génératrice des résidus provenant de la production vivrière. Annuellement, elle en produit 23.867,91T, soit 54.64%, tandis que la commune de Kimbaseke ne produit que 451,02T soit 1,03% du total.

c. Comparaison avec la production nationale

Lorsque les productions kinoises de ces résidus agricoles sont comparées aux quantités générées à l'échelle nationale, la figure 3.14 et le tableau 3-2 révèlent que la ville de Kinshasa ne produit que 0,04% des résidus de même type produits dans le pays.

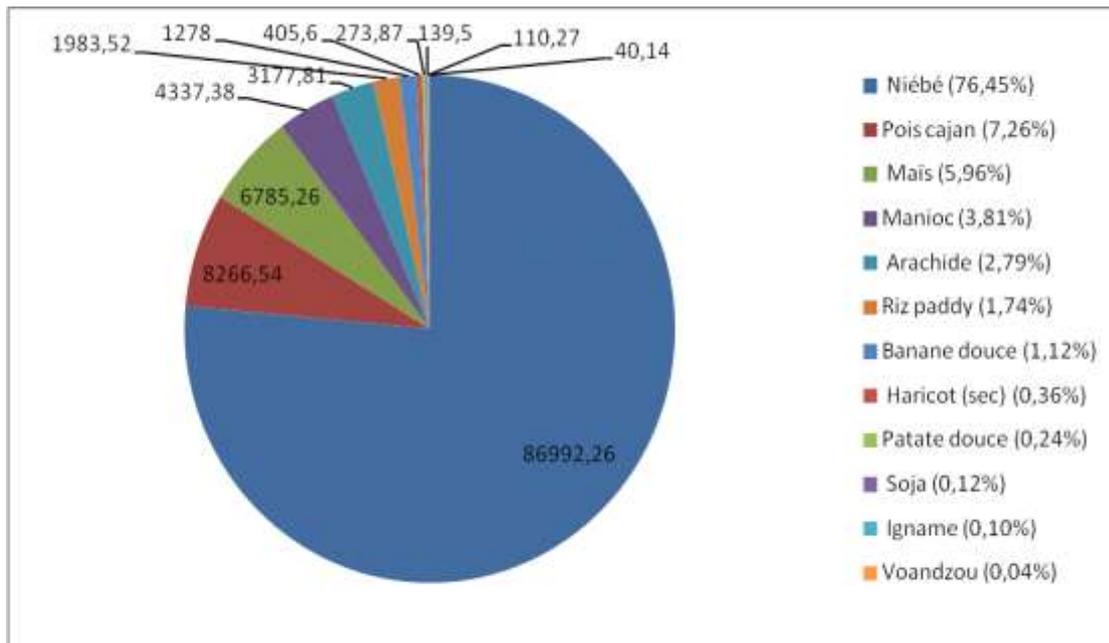


Figure 3.14. Production annuelle moyenne (x1000 T) des résidus des cultures vivrières en RDC

Le niébé vient en première position et génère annuellement à lui seul 86.992.260T de ces résidus (76,45% de la production nationale des résidus des cultures vivrières de la RDC).

Tableau 3-2. Production des résidus agricoles à Kinshasa et en RDC

Produits générateurs des résidus	Production (x1000T)	
	Kinshasa	RDC
Maïs	24,83	6785,26
Riz paddy	4,36	1983,52
Manioc	0,95	4337,38
Patate douce	0,68	273,87
Igname	0,12	110,27
Haricot	0,17	405,60
Niébé	1,76	86992,26
Pois-cajan	0,42	8266,54
Voandzou	0	40,14
Arachide	7,42	3177,81
Soja	1,68	139,5
Banane douce	1,3	1278
Total	43,69	113790,15

La production des résidus issus de l'agriculture vivrière représente à Kinshasa 0,04% de celle de l'ensemble du pays. Ceci est, il est vrai, très insignifiant par rapport aux autres provinces de la RDC, mais sans valorisation, cela peut constituer une importante source de pollution au niveau local.

2.3.3.2. Estimation de la production moyenne annuelle des résidus issus de l'industrie du bois

Concernant la production des résidus issus de l'industrie du bois, les seules données de base disponibles dans les statistiques officielles sont relatives à la production nationale (tableau 3-3).

Tableau 3-3. Estimation de la production annuelle moyenne des résidus dans l'industrie du bois en RDC de 2009 à 2011

Matière	% résidus	RPR	Production nationale (T)	Production résidus (T)
Tranchage	40%	0,40	732,31	292,93
Placages	Sciure 10%	0,10	140,86	14,09
Bois sciés	38% copaux	0,50	6594,64	3297,32
	12% sciure			
Contreplaqués	45% copaux	0,50	140,86	70,43
	5% sciure			
Grumes	40%	0,40	73065,20	29226,08

Les grumes sont produites à l'intérieur du pays et à partir de là, une partie est exportée et l'autre alimente l'industrie du bois à Kinshasa (BCC-RDC, 2012)

2.3.4. Discussion

Dans la démarche de quantification des résidus agricoles produits à Kinshasa, sept communes, sur les vingt-quatre que compte la ville, sont énormément impliquées dans la production de ces résidus en raison de leur intense activité dans le domaine. Parmi elles, celle de Maluku, suivie de celle de la N'sele, qui sont les plus vastes et les plus rurales de la ville, produisent, à elles deux, près de 75% de ces résidus. Théoriquement, dans ces deux communes, il devrait se poser, avec plus d'acuité, le problème de gestion de ces résidus. Mais, comme il s'agit des produits agricoles, une part importante est exportée vers les marchés et ménages des autres communes, les plus peuplées, suite à la commercialisation des denrées agricoles.

A ces résidus végétaux agricoles produits à Kinshasa, s'ajoutent ceux provenant de l'intérieur et de l'extérieur du pays dont la quantification peut être plus difficile à cause du manque de maîtrise de flux des produits agricoles à travers les frontières provinciales. Leurs restes, non consommables, viennent contribuer à la pollution environnementale à Kinshasa.

En considérant les résidus produits à Kinshasa, ceux de maïs représentent, à eux seuls, plus de 50% du total, ils sont suivis par les résidus d'arachide (16,98%) et de riz (9,97%).

Concernant les résidus de maïs, en vue de leur valorisation, Dibaluka et al. (1999) recommandent leur utilisation dans la production des champignons comestibles, particulièrement les rafles. Quant aux fanes d'arachide, elles sont, d'une manière générale, utilisées comme engrais organiques à cause de leur richesse en azote, tandis que les pailles et balles de riz produits à Kinshasa ont réellement besoin d'un procédé de valorisation selon Bangala₁ et al. (2015). Ces dernières peuvent aussi être utilisées valablement comme substrat de production pour les champignons comestibles.

A ce sujet, dans la valorisation des résidus agricoles et agro-industriels générés à Kinshasa, deux filières de valorisation paraissent prometteuses en comparaison avec les expériences vécues dans d'autres provinces de la RDC et d'autres pays. Il s'agit de la production des champignons comestibles et des charbons de matières organiques (biocharbon ou biochar, en anglais).

Parlant de la production des champignons comestibles, en guise d'illustration, la Chine produit annuellement environ 181.891.000T de paille de riz et 847.566.000T de paille de maïs (Cuiping et al., 2004).

L'impact environnemental de cette importante quantité de paille a été l'un de principaux facteurs ayant motivé la production des champignons comestibles et à importance thérapeutique en Chine. S'inspirant de cette expérience chinoise, il y a certains pays d'Afrique qui ont initié des projets d'utilisation des résidus agricoles, notamment, pour la production des champignons comestibles (Mshigeni, 2003 ; Mshandete & Cuff, 2008).

La RDC peut s'inspirer de ces exemples pour mettre en place une filière de valorisation des résidus de l'agriculture par la production de ces champignons abondamment présents dans nos écosystèmes (Dibaluka et al., 2009 ; Dibaluka et al., 2010, Eyi Ndong et al., 2011 ; Murthy & Naidu, 2012 ; Bangala & Masimango, 2014).

Concernant la fabrication de charbon de matière organique, aussi appelé briquettes combustibles de la matière organique non carbonisée (Ingenosahel, 1998 ; PERACOD, 2009 ; Wherter et al., 2010), cette filière serait particulièrement intéressante à Kinshasa où les activités de production des bois de chauffe et des charbons de bois ou braises sont énormément impliquées dans la déforestation de la ville (Schure et al., 2011).

Cette technologie tire son avantage du fait que les résidus végétaux posent le problème de stockage et de transport à cause de leur grande quantité et de leur faible densité. Leur transformation en charbon apporte une solution à ce problème en ce que la matière est densifiée.

Le charbon de matières organiques fait partie de la famille des combustibles domestiques alternatifs. La technique de sa fabrication, appelée briquetage, consiste en un moulage sous pression avec ou sans préchauffage des matériaux de base (résidus) afin d'en réduire le volume, augmenter la densité et donner la forme d'une briquette. C'est un moyen de la valorisation de toute biomasse inutilisée telle que les herbes sauvages, les résidus agricoles et agro-industriels, déjà mis en œuvre dans certaines provinces de la RDC.

Dans l'ancienne province de Kivu, à l'Est de la RDC, le parc de Virunga a subi une forte déforestation due aux activités de recherche de bois de chauffe par les populations environnantes. En vue de lutter contre ce phénomène, un projet de fabrication de briquettes de matière organique a été initié en 2010. Ce projet est le fruit d'une collaboration entre le Parc national de Virunga (PNVi), l'Institut Congolais pour la Conservation de la Nature (ICCN) et le Réseau Environnement Ressources Naturelles et Développement (ERND) qui vulgarisent ces briquettes appelées 'makala ya sasa' (ce qui signifie nouvelle braise, en langue swahili) comme une alternative à l'utilisation du bois de chauffe et de braise. Ces briquettes de matière organique sont fabriquées à partir de feuilles, d'écorces et de pelures de fruits ou d'autres déchets agricoles tels que les résidus du riz, du haricot, du maïs et de la canne à sucre. Le projet a été favorablement accueilli par la population (Bio Energie International, 2010).

A Kinshasa, cette technologie, non encore vulgarisée, peut être salutaire pour les forêts de la ville. En effet, une enquête a révélé que le volume de bois énergie vendu à Kinshasa s'élevait à 4.800.000 m³, soit 12 fois plus que la production nationale des grumes (Schure et al., 2011 ; BCC-RDC, 2012).

La nécessité de lutter contre la pollution environnementale en RDC implique la création d'une agence nationale et provinciale de valorisation des résidus végétaux et d'autres types. Celle-ci aura pour tâche de transformer les "déchets" en "richesse", c'est-à-dire, de mettre en œuvre une ou des politiques de localisation, identification, quantification, collecte et valorisation de la matière organique.

Cette initiative est d'autant plus pertinente que la production kinoise des résidus agricoles ne représente que 0,04% (43690T) de la production nationale de ces types de résidus. Autrement dit, dans le reste de la RDC, une quantité de résidus agricoles d'environ 2500 fois supérieure à celle de Kinshasa est produite annuellement. Il importe que la gestion d'une telle quantité de résidus préoccupe le pouvoir public, le monde scientifique et la population de ce pays, car elle constitue une menace pour l'environnement. Aussi, pensons-nous qu'une valorisation planifiée de ces résidus serait bénéfique pour l'ensemble du pays.

La valorisation des résidus agricoles doit se faire dans une perspective de maintien de la fertilité du sol. En effet, une partie des résidus issus de l'activité agricole doit impérativement retourner à la terre. Selon Cooper & Laing (2007), 65% des résidus de culture doivent être maintenus sur le site de production afin de ne pas affecter sa fertilité, alors que Cuiping et al. (2004) estiment qu'environ 15% des résidus agricoles doivent rentrer au sol pour le maintien de la fertilité. Nous pensons néanmoins que la proportion à rentrer au sol, peut largement dépendre de la culture.

En RDC, compte tenu de la texture sableuse et de la faible capacité de rétention d'eau des sols de Kinshasa, nous estimons qu'environ 52% (22571T) des résidus agricoles seraient indispensables pour le maintien de leur fertilité. Au-delà de cet usage, le reste des résidus, qui peut être très important doit être valorisé autrement pour soustraire l'environnement au danger de pollution potentiel.

2.3.5. Conclusion

Kinshasa est caractérisée par une grande insalubrité. Le fait que, dans cette ville, la population ait comme principale préoccupation la survie entraîne que la présence, dans les places publiques et dans les cours d'eau, des ordures de toutes sortes soit vécu comme un fait normal.

Or, le recyclage ou la valorisation de ces différents types des déchets, notamment des résidus végétaux par la lutte contre l'insécurité alimentaire et énergétique est possible. L'expérience a été tentée avec succès dans d'autres pays et régions (Mshigeni, 2003 ; Chang, 2005).

Par conséquent, il est très important que ces genres de travaux de transformation de restes agricoles et agro-industriels en richesses s'intègrent dans les principales préoccupations vitales des Kinois. Pour ce faire, l'identification, la localisation et la quantification de ces résidus est capitale.

En recourant aux statistiques de production agricole et aux facteurs de conversion donnant la quantité de résidus générés par unité de masse de production attendue, les résidus de la production agricole de Kinshasa et de la RDC ont été évalués. Les principales communes de la capitale à la base de la génération de ces résidus aussi.

La quantité des résidus générés par la récolte et de transformation de douze importantes productions vivrières à Kinshasa est évaluée à 43.690T/an. Ils sont répartis dans sept communes semi-rurales situées au Sud et à l'Est de la ville (Maluku, N'selé, Ngaliema, Mont-Ngafula, Masina, Kimbaseke et Ndjili). La commune de Maluku produit la plus grande portion de ces résidus. Ces derniers sont subdivisés en résidus non disponibles devant rester sur le sol pour en maintenir la fertilité et en résidus valorisables. A Kinshasa, ces derniers représentent annuellement 21.000T.

Lorsque la production annuelle des résidus issus de l'agriculture vivrière à Kinshasa est comparée à celle du reste de la RDC, Kinshasa ne représente que 0,04% de la portion de ces résidus.

En outre, deux voies de valorisation de ces résidus sont préconisées, il s'agit de la fabrication des briquettes combustibles pour lutter contre la déforestation de la ville et la création des filières de production des champignons comestibles ou pouvant éventuellement servir à d'autres finalités.

C'est dans cette dernière optique que nous avons mené, dans la suite de ce travail de recherche, des investigations dans trois écosystèmes forestiers, dont deux sont situés à Kinshasa et un à Kisantu. Le but était de découvrir, identifier et mettre en culture des champignons saprotrophes lignicoles pouvant être utilisés dans la résorption des résidus lignocellulosiques nuisibles pour l'environnement de Kinshasa.

2.4.RECHERCHE DES MACROMYCETES SAPROTROPES LIGNICOLES

2.4.1. Introduction

La flore de la République Démocratique du Congo renferme plusieurs espèces des champignons dont seulement une partie est connue. Les informations disponibles dans la littérature font état d'un grand déficit sur l'étude floristique et écologique des champignons du pays. Dans le contexte actuel, la compilation des données rassemblées sur la RDC lors de la consultation des documents disponibles fait état de 41 familles, 154 genres, 582 espèces pour les seuls Basidiomycètes (Han de Koeijer, 2009). Mis en rapport avec l'immensité du territoire national et la diversité des sites écologiques, ces chiffres semblent être nettement inférieurs à la réalité, dans la mesure où des nombreuses contrées n'ont pas encore fait l'objet de récolte des champignons supérieurs, d'une part, et un certain nombre de spécimens récoltés reste encore à étudier, d'autre part (Ndong, 2011 ; Dibaluka, 2012).

Ce déficit de la connaissance de la microflore congolaise continue à inciter des chercheurs congolais et étrangers à poursuivre les travaux de recherche sur le sujet (Dibaluka, 2005 ; Dibaluka, 2012).

C'est dans ce cadre que ce travail entrepris dans les limites de Kinshasa et ses environs, s'est assigné l'objectif de récolter, décrire, identifier et mettre en culture les espèces de macromycètes pouvant être utilisées dans la biodégradation des résidus lignocellulosiques. Des excursions ont été organisées dans 3 écosystèmes forestiers présentant de fortes probabilités de contenir des fungi, dans la région de Kinshasa et à Kisantu.

La méthodologie adoptée pour cette étude a consisté à :

- L'observation et la photographie des macromycètes sur leur substrat de croissance ;
- La récolte et la description des champignons trouvés en vue de les identifier et de les classer ;
- La mise en culture des champignons trouvés par la méthode de la sporée sur le lieu de récolte ou par la méthode tissulaire au laboratoire sur milieu gélosé, et
- Le repiquage et la conservation des mycéliums sur sciure de bois.

2.4.2. Matériel et Méthodes

La récolte des champignons et leur mise en culture ont été effectuées selon les méthodes décrites par Oei (2005), Van Nieuwenhuijzen (2007) et Dibaluka et *al.* (2010). Les principales étapes ont été :

- La collecte et l'identification des espèces de champignons lignicoles sauvages ;
- La production de culture pure des mycéliums des souches des champignons récoltés sur milieu gélosé, en conditions axéniques ;

- La préparation et la production des cultures de semis constituées de blancs mères (sur grains de céréales) et du semis final (sur sciure de bois).

En effet, dans la nature, les champignons se multiplient en produisant des millions et des millions de spores. Lorsqu'une de ces spores atterrit dans un milieu favorable, elle germe et se ramifie pour former un mycélium. Quand certaines substances nutritives du substrat s'épuisent, le mycélium tend vers une phase différente, celle de la reproduction sexuée. Alors, deux mycéliums compatibles du point de vue sexuel se rencontrent, ils fusionnent pour former ce qu'on appelle un mycélium secondaire capable de produire des fructifications qui donneront de nouvelles spores (Oei, 2005).

C'est ainsi qu'en culture artificielle, on essaie d'imiter les conditions physico-chimiques et nutritionnelles naturelles favorisant le développement des fungi. Mais en plus, on travaille avec des substrats stérilisés, ce qui présente l'avantage d'éliminer toute concurrence avec d'autres organismes en matière de consommation du substrat. Concrètement, les spores étaient recueillies dans un milieu gélosé favorable à leur germination en mycélium, comme il sera expliqué au point 4.2.2.

Ensuite, les souches fongiques qui ont poussé sur agar étaient soumis à une étape de screening par rapport à leur capacité de coloniser, au laboratoire, un substrat constitué essentiellement de sciure de bois (semis final).

2.4.2.1. Collecte et identification de champignons lignicoles sauvages

Trois sites dont deux à Kinshasa et un à Kisantu, ont été explorés. Il s'agit de :

- Site 1 (S1) : La Station Phytotechnique de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa (**SPA**). Elle est située dans la commune de la Nsélé, entre 04°29' et 04°32' de latitude sud et 15°20' et 15°23' de longitude Est. Plusieurs descentes y ont été organisées de juin 2010 à décembre 2011 ;
- Site 2 (S2) : La Forêt du Lac de Ma Vallée (**FLMV**) à Kinshasa. Ce site est localisé dans la Commune de Mont-Ngafula, entre 04°28' et 04°29' de latitude sud et entre 15°16' et 15°17' de longitude Est. Il a été visité en avril et mai 2012 et en mai 2014 ;
- Site 3 (S3) : Le Jardin Botanique de Kisantu (**JBK**), ses coordonnées géographiques se situent entre 05°07' et 05°09' de latitude Sud et entre 15°03' et 15°06' de longitude Est. C'est un site localisé dans la ville d'Inkisi au Kongo Central, il a été visité en octobre et novembre 2013.

Les dates des recherches des champignons à la FLMV et au JBK ont été inspirées par un travail d'investigation mené en 2005 sur l'apparition mensuelle des macromycètes dans la FLMV (Dibaluka, 2005). Ce travail démontre que les mois d'avril, mai et novembre sont favorables à l'apparition des sporophores des macromycètes dans ce site.

Les spécimens récoltés étaient identifiés, dans la mesure du possible sur le site avec l'aide d'un mycologue. Ensuite, ils étaient photographiés et mis en culture sur agar.

2.4.2.2. *Obtention de culture pure du mycélium de la souche du champignon en conditions axéniques*

Dans la littérature, deux méthodes sont utilisées pour l'obtention d'une culture pure de mycélium fongique, le démarrage à partir des spores ou à partir de la culture de tissu (Oei, 2005 ; Mshandete & Cuff, 2008 ; Dibaluka and al., 2009 ; Dibaluka and al., 2010).

Démarrage de la culture à partir des spores

L'isolement des souches à partir des spores a été réalisé suivant la méthode décrite par Dibaluka et al. (2010). Cette méthode consiste à coller l'hyménophore d'un sporophore à maturité (adulte) sur l'ouverture d'un tube à essai à l'aide d'un papier parafilm afin de recueillir les spores du champignon sur le milieu nutritif. Cette opération dure environ 12h. Ensuite, le morceau de chapeau est enlevé et le tube à essai rebouché en conditions aseptiques au-dessus de la flamme d'une lampe à alcool. Le tube inoculé est placé dans un incubateur (32 °C, 48 h) afin d'accélérer la germination des spores, puis incubé (~ 25 °C, 10 j). La culture pure ou *starter* est ensuite conservée au réfrigérateur (de marque LG) à 4° C lorsqu'elle n'a pas servi immédiatement pour la réalisation de l'étape suivante.

Démarrage de la culture à partir de tissus

Cette technique expliquée par Oei (2005) a été légèrement modifiée, les sporophores n'ont été ni lavés ni désinfectés à l'alcool.

Les souches de champignons jeunes et vigoureuses étaient sélectionnées et la surface de leur sporophore essuyée avec un pinceau pour enlever la saleté. Après, le sporophore était fendu en deux, à la main, au niveau du pied, afin de prélever un morceau de chair interne à l'aide d'un scalpel désinfecté à la flamme d'une lampe à alcool. De ce morceau du sporophore, on a prélevé aseptiquement un fragment d'environ 4x4 cm qui a été transféré à l'aide d'une aiguille montée, sur le milieu nutritif dans un tube à essai.

Toutes les cultures ont été incubées à 28°C. Elles étaient régulièrement inspectées pour l'appréciation du développement mycélien.

Préparation des milieux gélosés de démarrage des cultures

L'isolement a été réalisé à partir de 3 types de milieu gélosé : (1) PDA (filtrat de cuisson de 200 g patate douce + 20 g d'agar-agar + 20 g dextrose dans 1 l d'eau déminéralisée, réajustée à 1 l), (2) MA2 (cuisson de 20 g d'extrait de malt et de 20 g d'agar-agar dans 1 l d'eau déminéralisée, réajustée à 1 l) et (3) SDA (filtrat de cuisson de 18 g de son de riz + 18 g d'agar-agar + 18 g de dextrose dans 1 l d'eau déminéralisée, réajustée à 1 l). Ces mélanges ont été chauffés pendant environ 15 minutes jusqu'à la dissolution des ingrédients et l'obtention de mélanges homogènes qui étaient répartis dans des tubes à essai. Ces derniers étaient bouchés avec un tampon d'ouate coiffé d'un morceau de papier aluminium avant d'être stérilisés (120 °C, 15-20 min, pression 1 atmosphère).

Après la stérilisation, les tubes étaient placés en position inclinée, afin de maximiser la surface de contact du milieu de culture après refroidissement.

Repiquage des cultures fongiques

Lorsque les mycéliums des souches mises en culture eurent envahi totalement les tubes dans lesquels ils étaient cultivés, ils étaient repiqués dans d'autres tubes contenant un des milieux PDA, SDA ou MA2 rendu sélectif par ajout d'antibiotiques. La double finalité visée par cette opération était d'obtenir des volumes importants de mycéliums des espèces de champignon sous étude et de conserver des cultures ou alors de les purifier.

La technique employée était celle décrite par Oei (2005) et Nieuwenhijzen (2007) qui a consisté à repiquer le mycélium des cultures d'origine dans d'autres tubes contenant le milieu nutritif préparé à cet effet, ensuite, à partir de ces nouveaux tubes, en repiquer dans d'autres et ainsi de suite.

2.4.2.3. Préparation et production de la culture de semis

La culture de semis, encore appelée blanc de semis, consiste à favoriser le développement du mycélium sur un substrat adéquat et stérile. Le produit obtenu à l'issue de cette opération est appelé « blanc-mère » et est destiné à ensemercer (ou larder) ultérieurement le substrat de fructification. Dans le cas où les mycéliums sont destinés à une autre finalité, la culture de semis constituera une réserve des mycéliums pour l'étude envisagée.

Outre le blanc mère, il y a le blanc final provenant du blanc mère sur substrat constitué de sciure de bois qui permet de maintenir le mycélium actif pendant une longue durée.

Préparation du substrat pour l'obtention du blanc mère

Les grains de maïs ou de millet, qui en constituent la base, sont traités comme suit : trempage (24 h), cuisson (7-10 minutes pour le millet et 25 minutes pour le maïs), égouttage et essorage au soleil, ajustement du pH à 7 avec de la chaux éteinte (~ 1 %), répartition du milieu (~ 300 g) dans des bocaux fermés avec un tampon d'ouate sous un couvercle vissé, stérilisation (120 °C, 1 h, 1 atm)

Préparation du substrat pour l'obtention du blanc final

Pour éviter la difficulté de conservation au froid que nécessite la semence sur les grains de céréales, on recourt souvent à la sciure de bois comme support de semis qui peut conserver la culture pendant plusieurs mois en dehors du froid. La sciure de bois achetée à différentes scieries de Kinshasa a été d'abord tamisée (maille de 4 mm) puis pesée avant d'être trempée dans l'eau de cuisson des grains de céréales enrichis avec du son de blé et du sucre (saccharose) selon les proportions proposées par Dibaluka (2005). Le pH a été corrigé à une valeur de 7 par l'ajout de l'hydroxyde de calcium.

Inoculation et incubation

L'inoculation du substrat de semis avec du mycélium de la culture pure provenant de chacun des milieux gélosés PDA, SDA ou MA2 a été réalisée dans des conditions de stricte asepsie, dans une boîte d'inoculation où le matériel de prélèvement et de transfert de l'inoculum a été stérilisé à la flamme d'une lampe à alcool. L'incubation des grains de maïs à 27°-29 °C pendant 15 jours et de la sciure de bois pendant 30 jours a été réalisée à l'obscurité, dans une armoire aérée.

2.4.3. Résultats

2.4.3.1. Récolte des macromycètes

Ce travail s'est réalisé en trois sites, à la SPA (S1), de juin 2010 à décembre 2011, à la FLMV (S2), en avril et mai 2012, puis mai 2014 et au JBK (S3) en octobre et novembre 2014.

A la SPA

Les descentes à la SPA de N'djili Brasserie ont permis la récolte de sept lots de macromycètes qui rentraient dans nos préoccupations. Après leur identification, ils appartenaient aux espèces suivantes :

Pycnoporus sanguineus sur un tronc mort d'*Elaeis guineensis* Jacq., (figure 4.1), *Lentinus sajor-caju* sur *Hallea stipulosa* (DC.) J.-F.Leroy, *Neonothopanus hygrophanus* sur un tronc de *Mangifera indica* L., *Leucocoprinus cretaceus*, *Earliella scabrosa*, *Auricularia cornea* et *Trametes versicolor* croissant sur des troncs d'arbres en décomposition poussée. Il y avait aussi des champignons humicoles, des ectomycorhiziens et des Termitomyces qui n'intéressaient pas notre étude. En annexes, se trouvent quelques images (Figures 4/1) relatives à cette récolte des macromycètes effectuée à la SPA.



Figure 4.1. *Pycnoporus sanguineus* sur rameau de palmier (photo D-B Bangala Mada)

Dans la FLMV

La recherche des champignons dans la forêt du Lac de Ma Vallée s'est effectuée en trois descentes qui nous ont permis de récolter dix-neuf lots de macromycètes qui, après identification appartenaient aux espèces suivantes :

Ganoderma sp. sur un tronc de *Pentaclethra macrophylla* (figure 4.2), *Trametes versicolor* sur stipe de *Dracaena mannii* Baker, *Pycnoporus sanguineus* sur tronc de palmier, *Marasmius inoderma* sur *Elaeis guineensis* Jacq. et *Musa paradisiaca* L., *Daldinia concentrica* sur tronc de *Dialium pachyphyllum* Havars en décomposition, *Neonothopanus hygrophanus*, *Schizophillum commune*, *Auricularia cornea*, *Marasmius subruforotula*, *Gymnopilus junionus*, *Trametes hirsuta*, *Trametes sp.*, *Gymnopilus sp.*, *Lentinus villosus*, *Leucocoprinus cretaceus*, *Agaricus sp.*, *Lentinus squarrosulus*, *Tremella fuciformis* et *Clitocybe sp.* sur des troncs d'arbres en décomposition poussée. Les autres images relatives à cette récolte se trouvent en annexes (Figures 4/2).



Figure 4.2. *Ganoderma sp.* croissant sur un tronc de *Pentaclethra macrophylla* (photo D-B Bangala Mada)

A Kisantu (JBK)

Au cours d'une excursion de quatre jours au Jardin Botanique de Kisantu, en octobre et novembre 2013, six lots de macromycètes ont été récoltés. Leur identification a permis de les rattacher aux espèces suivantes :

Lentinus squarrosulus, récoltée sur un tronc de *Terminalia superba* Engl. & Diels, 1900 ; *Pleurotus tuber-regium* sur un tronc de *Cocos plumosa* Hook.f. ; *Lentinus cladopsus* sur un tronc de *Lagerstroemia speciosa* (L.) Pers. ; *Trametes sp.* sur un tronc de *Musanga cecropioides* R.Br. & Tedlie ; *Marasmius sp.*, *Trametes versicolor* (Figure 4.3) et *Ganoderma sp.* sur des troncs d'arbres fortement en décomposition. Les autres images relatives à cette récolte se trouvent en annexes (Figures 4/3).



Figure 4.3. *Trametes versicolor* croissant sur tronc d'arbre en décomposition (photo D-B Bangala Mada)

Parmi ces différents macromycètes qui viennent d'être présentés, certains ont été trouvés dans des sites spécifiques, tandis que d'autres ont été trouvés dans plus d'un site. Le tableau 4-1 présente un bilan sur les vingt-six espèces des macromycètes récoltés en fonction de leur site d'origine.

Tableau 4-1. Liste des macromycètes selon les sites de leur récolte

Numéro	Espèces	Sites de récolte ou origine
1	<i>Agaricus sp.</i>	FLMV ou S2
2	<i>Auricularia cornea</i> Ehnreb.	S1, S2
3	<i>Auricularia delicata</i> (Mont.) Henn.	SPA ou S1
4	<i>Clitocybe sp.</i>	S2
5	<i>Daldinia concentrica</i> (Bolton) Cesati & de Notaris	S2
6	<i>Earliella scabrosa</i> (Pers.) Gilb. & Ryvarde	S1
7	<i>Ganoderma sp</i>	S2
8	<i>Gymnopilus junionus</i> (Fr.) P.D. Orton	S2
9	<i>Hexagonia tenuis</i> (Hook.) Fr.	S2
10	<i>Lentinus cladopus</i> Lév.	JBK ou S3
11	<i>Lentinus sajor-caju</i> (Fr.) Fr.	S1
12	<i>Lentinus squarrosulus</i> Mont.	S3
13	<i>Lentinus villosus</i> Klotzsch	S2

14	<i>Leucoagaricus sp.</i>	S2
15	<i>Leucocoprinus cretaceus</i>	S1, S2
16	<i>Marasmiellus inoderma</i> (Berk. et Br.)	S2
17	<i>Marasmius subruforotula</i> (buyk baert.)	S2
18	<i>Microporus sp.</i>	S2
19	<i>Neonothopanus hygrophanus</i> (Mont). Singer	S1, S2, S3
20	<i>Pleurotus tuber-regium</i> (Rumph. ex Fr.) Singer 1951	S3
21	<i>Pycnoporus sanguineus</i> (L.) Murrill	S1, S2
22	<i>Schizophyllum commune</i> Fr.	S2
23	<i>Trametes hirsuta</i>	S2
24	<i>Trametes sp.</i>	JBK
25	<i>Trametes versicolor</i> (L.) Lloyd ou <i>Coriolus versicolor</i> (L.) Quéf.	S1, S2, S3
26	<i>Tremella fuciformis</i> Berk	S2

Légende :

SPA (S1) : Station Phytotechnique de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Unikin (Site 1)

FLMV (S2): Forêt du Lac de Ma Vallée (Site 2)

JBK (S3) : Jardin Botanique de Kisantu (Site 3)

Le Tableau 4-1 renseigne que les fungi récoltés dans les trois sites appartiennent à vingt-six espèces de ce règne. La FLMV a fourni le plus grand nombre d'espèces (dix-neuf). Vingt et une espèces ont été trouvées exclusivement dans l'un ou l'autre site, tandis que cinq espèces ont été trouvées dans plus d'un site. Il s'agit de *Trametes versicolor* et *Neonothopanus hygrophanus* retrouvées dans les trois sites et de *Pycnoporus sanguineus*, *Auricularia cornea* et *Leucocoprinus cretaceus* dans deux sites (SPA et FLMV).

2.4.3.2. Classification des espèces de champignons récoltés sur les trois sites

Celle-ci est présentée dans le tableau 4-2 ci-après.

Tableau 4-2. Position systématique des espèces fongiques récoltées dans les trois sites

Embranchement	Sous-embranchement	Ordre	Familles	Nombre d'espèces	Noms des espèces
Basidiomycota	Agaricomycotina	Agaricales	Tricholomataceae	1	<i>Clitocybe Sp.</i>
			Strophariaceae	1	<i>Gymnopilus junionus</i>
			Marasmiaceae	3	<i>Marasmiellus inoderma, Marasmius subruforotula, Neonothopanus hygrophanus</i>
			Agaricaceae	3	<i>Agaricus sp., Leucoagaricus sp., Leucocoprinus cretaceus</i>
			Pleurotaceae	1	<i>Pleurotus tuber-regium</i>
			Schizophyllaceae	1	<i>Schizophyllum commune</i>
		Polyporales	Ganodermataceae	1	<i>Ganoderma sp.</i>
			Polyporaceae	11	<i>Trametes hirsuta, Trametes sp., T.versicolor, Earliella scabrosa, Hexagonia tenuis, Lentinus sajor-caju, L.cladopus, L.squarrosulus, L.villosus, Microporus sp., Pycnoporus sanguineus</i>
		Auriculariales	Auriculariaceae	2	<i>Auricularia cornea, A.delicata</i>
		Tremellales	Tremellaceae	1	<i>Tremella fuciformis</i>
Ascomycota	Pezizomycotina	Xylariales	Xylariaceae	1	<i>Daldinia concentrica</i>

De manière synthétique, ces différentes espèces de macromycètes appartiennent à deux embranchements :

1. Basidiomycota ou Basidiomycètes avec un sous-embranchement, Agaricomycotina, quatre ordres et dix familles ;
2. Ascomycota ou Ascomycètes, représentés par une seule espèce, *Daldinia concentrica*, appartenant à la famille des Xylariaceae, ordre des Xylariales et sous-embranchement des Pezizomycotina.

La famille des Polyporaceae a fourni le plus grand nombre d'espèces des macromycètes qui ont servi dans cette recherche.

2.4.3.3. *Mise en culture des macromycètes récoltés*

A ce niveau, l'objectif était de mettre en culture les espèces de macromycètes récoltées pour la production de blanc sur des substrats adéquats et stérilisés.

Parmi les vingt-six espèces de champignons récoltées dans les trois sites, vingt-quatre ont été mises en culture sur milieu gélosé. Deux espèces, *Microporus sp.* et *Hexagonia tenuis*, n'ont pu être mis en culture, notamment à cause de la dureté et de la faible épaisseur de leur sporophore qui n'ont pas permis l'accès à la chaire interne. Pour les autres, la mise en culture a été effectuée soit par la méthode de sporée, soit par la tissulaire, selon la consistance et l'épaisseur des sporophores de ces espèces. Le tableau 4-3 donne les détails de l'opération de leur mise en culture, tandis que la figure 4.4 présente une culture de *Trametes versicolor*. Les figures 4/4 en annexes donnent les images se référant à la mise en culture de quelques uns des macromycètes.



Figure 4.4. *Trametes versicolor* mise en culture sur MA2

Après avoir complètement envahi les surfaces des milieux gélosés dans les tubes à essai, les mycéliums ont été inoculés sur substrat constitué de grains de céréales pour la production des blancs de semis avant d'être conservés sur substrat constitué de sciure de bois (blanc final). Ce dernier substrat est préféré parce qu'il minimise les risques de contamination par rapport aux grains de céréales

La Figure 4.5 représente un blanc final sur sciure de bois complètement envahi par le mycélium de *Trametes versicolor* récolté dans la FLMV.

Les images relatives aux autres espèces mises en culture se trouvent dans les annexes (Figures 4/5).



Figure 4.5. Blanc final de *Trametes versicolor* sur sciure de bois

La synthèse de comportement des macromycètes récoltés en différents lieux et moments sur différents substrats de culture est donnée dans les tableaux 4-3 et 4-4.

Chaque tableau donne brièvement, en fonction de chaque site, le comportement des espèces fongiques sur les différents substrats de culture.

Ces tableaux ne concernent pas les échantillons récoltés à la SPA, car tous les macromycètes récoltés sur ce site n'ont pas pu pousser en milieux gélosés suite au manque de maîtrise de l'opération, raison pour laquelle nous avons recouru à l'expertise d'un mycologue dans la suite de notre recherche sur les deux autres sites.

Tableau 4-3. Comportement, sur différents substrats, des macromycètes récoltés dans la FLMV (Forêt du Lac de Ma Vallée)

Espèces de champignons	Substrat	Méthode d'isolement	Date de récolte	Durée d'incubation (jours)			
				Starter sur gélose d'agar	Subculture sur gélose d'agar	Culture sur maïs	Culture sur sciure de bois
<i>Agaricus sp.</i>	- (<i>Non identifiée</i>)	Sporée	29 mai 2012	15	11	x	x
<i>Auricularia cornea</i>	-	Sporée	Idem	15	20	14	Au moins 30
<i>Clitocybe sp.</i>	-	Sporée	Idem	61	x	x	x
<i>Daldinia concentrica</i>	<i>Dialium pachyphyllum</i>	Tissulaire	Idem	15	20	14	≥30
<i>Ganoderma sp.</i>	-	Tissulaire	29 mai 2012	15	11	x	x
<i>Gymnopilus junionus</i>	-	Sporée	29 mai 2012	15	x	x	x
<i>Lentinus squarrosulus</i>	-	Sporée	Idem	15	14	13	≥30
<i>Lentinus villosus</i>	-	Sporée	29 mai 2012	19	x	x	x
<i>Marasmiellus inoderma</i>	Palmier et bananier	Sporée	26 avril 2014	15	14	13	≥30
<i>Marasmius subrufotula</i>	-	Sporée	19 avril 2012	~	~	~	≥30
<i>Marasmius subrufotula</i>	-	Sporée	29 mai 2012	15	11	x	x
<i>Neonothopanus hygrophanus</i>	<i>Pentaclethra macrophylla</i>	Sporée	19 avril 2012	15	14	13	≥30
<i>Neonothopanus</i>	-	Sporée	29 mai 2012	15	14	13	≥30

<i>hygrophanus</i>							
<i>Pycnoporus sanguineus</i>	-	Tissulaire	29 mai 2012	19	x	x	x
<i>Pycnoporus sanguineus</i>	<i>Pentaclethra macrophylla</i>	Sporée	26 avril 2014	15	20	14	≥30
<i>Schizophyllum commune</i>	-	Sporée	19 avril 2012	~	~	~	≥30
<i>Trametes hirsuta</i>	-	Sporée	26 avril 2014	14	15	x	x
<i>Trametes hirsuta</i>	-	Tissulaire	26 avril 2014	14	x	x	x
<i>Trametes sp.</i> '	<i>Dracaena manii</i>	Tissulaire	29 mai 2012	15	14	x	x
<i>Trametes versicolor</i>	<i>Elaies guineensis</i>	Tissulaire	29 mai 2012	15	11	15	≥30
<i>Trametes versicolor</i>	-	Tissulaire	26 avril 2014	14	7	14	≥30
<i>Tremella fuciformis</i>	-	Sporée	Idem	15	11	15	≥30

Légende :

x : culture non effectuée ou croissance arrêtée (contamination ou autre cause)

- : espèce non identifiée à cause de son état de décomposition poussée

~ : pas de précision sur la durée

Concernant les souches de champignons récoltées dans la FLMV, le tableau 4-3 nous renseigne que sur dix-sept espèces de macromycètes mises en culture sur substrats gélosés, dix ont pu se conserver sur support de semis de sciure de bois. Concernant la méthode d'isolement, sur six espèces cultivées par la méthode tissulaire, trois seulement ont pu connaître le développement jusqu'à être conservés sur support de semis de sciure de bois tandis que six espèces sur treize cultivées par sporée ont pu être conservés sur ce support.

Tableau 4-4. Comportement, sur différents substrats, des macromycètes récoltés au JBK 2013

Espèces champignons	Substrat	Méthode d'isolement	Date de récolte	Durée d'incubation (jour)			
				Starter sur gélose d'agar (T1)	Subculture sur gélose d'agar (T2)	Culture sur maïs	Culture sur sciure de bois
<i>Trametes sp.</i>	<i>Musanga cercoproides</i>	Sporée	1 novembre 2013	~	~	~	≥30
<i>Lentinus squarrosulus</i>	<i>Terminalia superba</i>	Sporée	31 octobre 2013	15	14	13	≥30
<i>Ganoderma sp.</i>	-	Tissulaire	31 octobre 2013	x	x	x	x
<i>Pleurotus tuber-regium</i>	<i>Cocos plumosa</i>	Sporée	31 octobre 2013	~	~	~	≥30
<i>Neonothopanus hygrophanus</i>		Sporée	1 novembre 2013	15	14	13	≥30
<i>Lentinus cladopus</i>	<i>Lagerstroemia speciosa</i>	Tissulaire	31 octobre 2013	~	~	~	≥30

Le tableau 4-4 nous renseigne que les six souches récoltées au JBK, dont chacune appartenait à une espèce de macromycètes, ont été mises en culture sur substrats gélosés. Cinq ont pu être conservées sur support de semis de sciure de bois. En ce qui concerne la méthode culturale, sur deux souches mises en culture par la méthode tissulaire, une seule s'est développée, tandis que toutes les souches cultivées par sporée ont pu être conservées sur support de semis de sciure de bois.

En résumé, l'allure de la croissance mycélienne de différentes espèces de macromycètes récoltées dans différents sites sur différents substrats de culture est donnée dans le tableau 4-5.

Tableau 4-5. Allure de la croissance mycélienne des espèces fongiques sur différents milieux ou substrats de culture

Numéro	Espèces récoltées	Espèces mises en culture	Substrat		
			Culture sur milieu gélosé	Culture sur maïs	Culture sur sciure de bois
1	<i>Agaricus sp.</i>	+	+	+	-
3	<i>Auricularia cornea</i>	+	+	+	+
2	<i>Auricularia delicata</i>	+	+	-	-
4	<i>Clitocybe sp.</i>	+	+	+	-
5	<i>Daldinia concentrica</i>	+	+	+	+
6	<i>Earliella scabrosa</i>	+	+	-	-
7	<i>Ganoderma sp</i>	+	+	-	-
8	<i>Gymnopilus junionius</i>	+	+	-	-
9	<i>Hexagonia tenuis</i>	x			
10	<i>Lentinus cladopus</i>	+	+	+	+
11	<i>Lentinus sajor- caju</i>	+	+	-	-
12	<i>Lentinus squarrosulus</i>	+	+	+	+
13	<i>Lentinus villosus</i>	+	+	-	-
14	<i>Leucoagaricus sp.</i>	+	+	-	-
15	<i>Leucocoprinus cretaceus</i>	+	+	-	-
16	<i>Marasmiellus inoderma</i>	+	+	+	+
17	<i>Marasmius subruforotula</i>	+	+	-	-
18	<i>Microporus sp.</i>	x			
19	<i>Neonothopanus hygrophanus</i>	+	+	+	+

20	<i>Pleurotus tuber-regium</i>	+	+	+	+
21	<i>Pycnoporus sanguineus</i>	+	+	+	+
22	<i>Schizophyllum commune</i>	+	+	+	+
23	<i>Trametes hirsuta</i>	+	+	-	-
24	<i>Trametes sp.</i>	+	+	+	+
25	<i>Trametes versicolor</i>	+	+	+	+
26	<i>Tremella fuciformis</i>	+	+	+	+

Légende :

X : pas mis en culture

+ : croissance réussie jusqu'à l'envahissement total

- : croissance non entamée, contamination ou envahissement partiel

Le tableau 4-5 renseigne que sur les vingt-six espèces récoltées, vingt-quatre ont été mises en culture sur milieu gélosé. Ici, seulement quatorze ont colonisé complètement le milieu, et dix n'ont pas pu le faire ; soit parce qu'il y a eu contamination ou que le temps de leur croissance était très long (plus d'un mois).

Enfin, les espèces qui ont été repiquées sur substrat de semis à base de sciure de bois et qui ont pu la coloniser sont au nombre de douze. Ces espèces sont : *Auricularia cornea*, *Trametes sp.*, *Trametes versicolor*, *Daldinia concentrica*, *Lentinus cladopsus*, *Lentinus squarrosulus*, *Marasmiellus inoderma*, *Neonothopanus hygrophanus*, *Pleurotus tuber-regium*, *Pycnoporus sanguineus*, *Schizophyllum commune*, *Tremella fuciformis*. Ces espèces fongiques sont saprotrophes lignicoles.

2.4.4. Discussion

Nous aimerions faire remarquer, ici, que les sept espèces de macromycètes récoltées à la SPA n'ont pas réussi en culture sur milieu gélosé, plusieurs raisons peuvent en être les causes. Parmi celle-ci figurent la mauvaise qualité des sporophores récoltés ou la mauvaise conduite de l'étape d'isolement sur substrat gélosé. Aussi, pensons-nous, qu'il n'est pas exclu qu'il soit possible de trouver d'autres espèces de champignons pouvant présenter un intérêt pour la recherche dans ce site. C'est ainsi qu'il serait intéressant d'y relancer les recherches pour y découvrir d'autres espèces.

En plus de cela, parmi les échantillons de champignons récoltés dans les deux autres sites de recherche, la FLMV et le JBK, deux espèces n'ont pas été mises en culture à cause de la dureté de leur sporophore qui n'a pas permis l'accès facile, sans risque de contamination, à la chair interne non en contact avec l'atmosphère. Il s'agit de *Hexagonia tenuis* et *Microporus sp.*

Cinq espèces ont été mises en culture sur milieu gélosé, mais n'ont pas pu être conservées sur blancs finaux à cause des contaminations, il s'agit de : *Auricularia delicata* ; *Clitocybe sp.* ; *Trametes sp.* *Lentinus villosus* et *Marasmius subrufotula*. Plusieurs causes, notamment, la qualité des sporophores récoltés ou les conditions de mise en culture ou d'incubation peuvent être à la base de cette situation. Il importe aussi d'améliorer l'opération en vue de réduire les échecs.

En dépit des difficultés susmentionnées, il faudra noter que ce travail de recherche a le mérite d'avoir mis en culture, pour la première fois en RDC, les wrf à sporophore coriace, il s'agit de l'Ascomycète *Daldinia concentrica* et des polypores *Ganoderma sp.*, *Pycnoporus sanguineus* et *Trametes versicolor*

Il est aussi important de noter que trois espèces de wrf récoltées sur des troncs d'arbre en décomposition poussée dans la FLMV ont été identifiées comme étant des wrf secondaires, selon Smith and al. (1988). Ces macromycètes ne se développent que sur le bois ayant atteint un stade de dégradation plus ou moins important. Il s'agit d'*Agaricus sp.*, *Leucoagaricus sp.* et *Leucocoprinus sp.*

Par ailleurs, la conservation des mycéliums des wrf sur substrat constitué essentiellement de sciure de bois permet leur longue conservation dans le temps, même à T° ambiante (Dibaluka et al., 2010) en vue de leur utilisation ultérieure pour la production de sporophores comestibles.

Cependant, en plus de leur utilité précitée, plusieurs recherches ont confirmé l'importance de certaines de ces espèces dans la prévention d'un certain nombre de maladies chez l'homme ; ils ont des effets anti cancérogène, anticholestérique, antidiabétique, anti VIH probable, hépato protecteur et régulateurs dans la sexualité (Wasser et Weis, 1999 ; Smith et al., 2002 ; Tidke et Wasser, 2005 ; Rai, M et al., 2005 ; Lee et al., 2006).

Elles interviennent aussi dans la dépollution environnementale par deux principaux mécanismes, soit par la transformation et la minéralisation des organopolluants ayant des similitudes structurales avec la lignine tels que les déchets de munitions, les pesticides, les biphényles polychlorés, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les colorants synthétiques, soit par bioaccumulation des métaux lourds dans la dépollution des sites miniers (Pointing, 2001 ; Zulfadhly et al., 2001 ; Wesenberg et al., 2003 ; Vanhulle et al., 2007 ; Guerra et al, 2008 ; Vanhulle, 2008 ; Hamman, 2004 ; Karas et al., 2011).

Enfin, elles peuvent aussi servir à la délignification des résidus végétaux issus de la végétation sauvage, des sous-produits agricoles et agro-industriels (Müller & Trösch, 1986 ; Rahman et al., 2011).

Plus spécifiquement, parmi les champignons récoltés dans les trois sites, nous pouvons distinguer les catégories suivantes :

- Les champignons alimentaires ou comestibles : *Auricularia delicata*, *A. cornea*, *Lentinus squarrosulus*, *Marasmiellus inoderma*, *Neonothopanus hygrophanus* et *Pleurotus tuber-regium*, *Schizophyllum commune*, etc.
- Les champignons thérapeutiques ou médicinaux : *Trametes versicolor*, *Daldinia concentrica*, *Pycnoporus sanguineus*, *Schizophyllum commune*, *Tremella fuciformis*.

- Les champignons utilisables pour la rémédiation des sites et des effluents pollués : *Trametes versicolor*, *Ganoderma sp.*, *Pycnoporus sanguineus*, *Earliella scabrosa*, *Pleurotus spp.* , etc.
- Les champignons utilisables pour la délignification des résidus végétaux en vue de leur usage ultérieur comme fourrage, matière première dans la papèterie ou pour la production énergétique sous forme de biogaz ou bioéthanol. Pratiquement toutes les espèces qui ont été conservées sur blancs finaux peuvent être utilisées.

2.4.5. Conclusion

La recherche des macromycètes effectuée dans trois écosystèmes forestiers, dont deux à Kinshasa et un à Kisantu, a permis de récolter vingt-six espèces de ces organismes ayant une importance dans la biodégradation de la matière organique et intervenant dans le recyclage du carbone. Parmi ces macromycètes, vingt-trois espèces ont été identifiées comme étant lignicoles.

Dans la démarche de mise en culture, vingt-quatre espèces ont pu être isolées sur milieu gélosé ; parmi celles-ci, quatorze espèces avaient totalement envahi le milieu gélosé et avaient été inoculées sur substrat de semis à base de maïs.

Enfin, en vue de constituer une banque de semences pouvant être utilisée dans les études ultérieures, douze espèces, de l'ensemble de la collection avaient été semées sur un substrat essentiellement constitué de sciure de bois, capable de conserver les mycéliums de ces wrf jusqu'à six mois. Cette banque pourra fournir des semences, notamment, pour la culture des champignons comestibles et/ou à intérêt thérapeutique, utilisables dans la dépollution des eaux et/ou la réhabilitation des sites pollués par des colorants, des pesticides, des métaux lourds.

Au nombre des avantages qui peuvent découler de la culture et de la conservation de ces wrf, figure aussi la biodélignification des résidus végétaux dont il sera question dans la suite de ce travail de recherche.

2.5. TEST DE DEUX ESPECES DE "WHITE-ROT FUNGI" SUR LA DEGRADATION DE DEUX TYPES DE RESIDUS LIGNOCELLULOSIQUES

2.5.1. Introduction

Dans une optique de la valorisation des résidus lignocellulosiques produits à Kinshasa, au cours d'une première expérimentation dont les résultats sont consignés dans l'Annexe 5/1, nous avons testé les aptitudes de six espèces de basidiomycètes faisant partie du groupe des wrf (*Trametes versicolor*, *Pleurotus sajor-caju*, *Lentinus cladopsus*, *Lentinus squarrosulus*, *Trametes sp.* et *Neonothopanus hygrophanus*) à se développer sur des substrats constitués des résidus végétaux issus de l'activité agricole et des agro-industries de Kinshasa (la sciure de bois, les parches de café, les pailles et balles de riz et les coques d'arachide). Les courbes révélant les cinétiques de pertes en masses sèches subies par les biomasses résidu-wrf suite aux développements de ces derniers ont été tracées à cet effet (voir annexe 5/1).

Ensuite, la cinétique de la biodégradation de la cellulose, des hémicelluloses et de la lignine au cours de la biodégradation de la sciure de bois et des balles de riz par *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju* (souche 1259) a été suivie de la manière qui sera décrite dans la suite.

Le principal intérêt suscité par ces deux types de résidus est qu'ils appartiennent à la catégorie des résidus abondamment produits à Kinshasa et dont la gestion pose encore problème à la population. Quant aux deux espèces de wrf, *Trametes versicolor*, d'une part fait partie des wrf largement distribués dans les écosystèmes forestiers de Kinshasa et de ses périphéries mais très peu étudiés par les mycologues congolais et d'autre part, ce champignon, non comestible, présente plusieurs vertus, notamment, thérapeutiques. *Pleurotus sajor-caju* est un wrf exotique comestible qui, de nos jours, est très répandu dans la ville de Kinshasa. Il fait partie des champignons très appréciés par les consommateurs kinois mais n'a jamais été étudié dans une approche de délignification. Il présente aussi des vertus thérapeutiques (Reddy et al., 2003).

2.5.2. Matériel et Méthodes

2.5.2.1. Matériel

Résidus lignocellulosiques utilisés

Dans le cadre de ce travail, il a été fait usage des balles de riz et de la sciure de bois.

- Les balles de riz ont été récupérées dans l'enceinte du Programme National Riz (PNR), dans la commune de Ndjili ;
- La sciure de bois (mélange des sciures issues de plusieurs essences) a été obtenue de la scierie "Sekele ya libaya", dans la commune de Lemba, au quartier Cité Salongo Nord.

Après leur récolte, la sciure de bois et les balles de riz, étant déjà sèches, ont été conservées dans des sacs en polypropylène.

Espèces fongiques soumises à l'étude

Deux espèces de macromycètes ont été utilisées dans cette recherche, il s'agit de *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju*.

Trametes versicolor a été récoltée dans la Forêt du Lac de Ma Vallée où il croissait naturellement sur un tronc de *Dracaena manii*. Quant à *Pleurotus sajor-caju* (souche 1259, provenant de l'Université de Gent en Belgique), il a été pourvu par le laboratoire Kin-champignons du Département de Biologie de la Faculté des Sciences de l'Université de Kinshasa.

2.5.2.2. Méthodes

Préparation des résidus lignocellulosiques

En vue de la préparation de l'essai de biodégradation de nos résidus, les opérations suivantes ont été effectuées :

- Humidifier les résidus pour remonter leur teneur en eau à 50% avec l'eau distillée ;
- Placer les résidus par lots de 50 ± 1 g de produit dans des bocaux en verre d'environ 300 ml de contenance ;
- Visser d'un tampon d'ouate les bocaux, puis les autoclaver à 121°C, 1 atmosphère, pendant 1h15', puis
- Laisser refroidir les bocaux au moins cinq heures avant leur inoculation.

Préparation des cultures fongiques

Après isolement sur milieu gélosé, *Trametes versicolor* a été mis en culture, puis conservé sur substrat constitué de sciure de bois, selon la méthode décrite par Oei (2005).

Suivi de la dégradation des résidus

Le traitement fongique de la sciure de bois et des balles de riz a été effectué selon la méthode décrite par Pandey (2003), consistant à inoculer le substrat ayant 50% d'humidité avec les mycéliums des wrf (*Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju*) préparés à cet effet.

L'inoculation fongique se fait par ajout dans le réacteur contenant le résidu autoclavé d'une quantité de wrf qui correspond à environ 10% de son poids, dans une boîte à inoculer désinfectée avec de l'alcool dénaturé (70%) pour éviter toute contamination avec d'autres micro-organismes.

Après inoculation, les cultures ainsi effectuées ont été réparties en cinq lots, soumis chacun à une période d'incubation différente, allant de une à cinq semaines, à la température de 28°C.

En vue d'apprécier l'intensité de la dégradation des résidus soumis à l'étude, des analyses ont été effectuées sur les résidus non incubés et ceux soumis à l'incubation de différentes durées.

Les paramètres analysés étaient (1) la teneur en matière sèche (par étuvage), (2) la teneur en cendres (par calcination), (3) la teneur en hémicellulose, (4) en cellulose et (5) en lignine (selon la méthode par Fractionnement Séquentielle telle que développée par Datta, 1988).

Les résultats obtenus ont été soumis à l'analyse, à l'aide de deux logiciels statistiques. Il s'agit du logiciel Excel qui a servi aux statistiques descriptives (valeurs limites, moyennes et écart-types) et du logiciel R qui a permis de déterminer, à partir du modèle linéaire généralisé, la cinétique des transformations engendrées par la croissance des deux wrf sur ces résidus.

Matière sèche

Des échantillons d'au moins 1 gMF sont pesés précisément à 0.1 mg près dans des creusets en porcelaine préalablement tarés. Ces creusets sont ensuite placés dans une étuve (Heraeus) à 105 °C jusqu'à obtenir une masse constante. A la sortie de l'étuve, les échantillons sont refroidis dans un dessiccateur et ensuite pesés à 0,1 mg près. La teneur en matière sèche, exprimée en pourcent, est obtenue par la relation suivante :

$$MS [\%] = (M2 / M1) \times 100$$

Où M1 représente la masse de l'échantillon frais (MF) exprimée en grammes et M2, la masse de l'échantillon après séchage, exprimée en grammes.

Ces mesures ont été réalisées en triple.

Matière minérale ou cendres

Des échantillons, d'au moins 1 gMS à 0.1 mg près, sont placés dans des creusets en porcelaine préalablement tarés. Les creusets sont ensuite mis dans un four à moufle (marque HERAEUS), à 550 °C, pendant 3h00.

A la sortie du four, les échantillons sont refroidis dans un dessiccateur et ensuite repesés à 0,1 mg près. La teneur en cendres, exprimée en pourcent, est obtenue par la relation suivante :

$$\text{Cendres} [\%] = (M2 / M1) \times 100$$

Où M1 représente la masse de l'échantillon sec (MS) exprimée en grammes et M2 celle de l'échantillon après calcination, exprimée en grammes.

Ces mesures ont été réalisées en triple.

Fractionnement Séquentiel de la Lignocellulose

Le fractionnement séquentiel des matières lignocellulosiques a été réalisé selon la méthode décrite par Datta (1981).

Un g de résidu sec est maintenu en suspension dans 100 ml d'eau distillée, à 100 ° C sous reflux pendant 2 h. L'opération est suivie d'une filtration de la solution encore chaude sur un creuset filtrant taré. Le résidu obtenu est séché à 105 ° C jusqu'au poids constant ; la perte de masse concerne la partie soluble dans l'eau.

Ensuite, le résidu obtenu est mis en suspension dans 100 ml d'une solution d'H₂SO₄ 0,5 M. Après l'avoir maintenu pendant 2 heures à 100 ° C sous reflux, le contenu est filtré. La perte de poids du résidu après séchage représente la teneur en hémicelluloses. Pour la détermination des teneurs en cellulose et en lignine, 10 ml d'H₂SO₄ 72% (v/v) sont ajoutés au résidu séché, appauvri en hémicelluloses (issu de l'étape précédente) et maintenus à 30 ° C, pendant 4 h. Après incubation, le mélange est dilué jusqu'à 0,5 M de H₂SO₄ et maintenu pendant 2 h à 100 °C sous reflux. Ensuite, le contenu est filtré et traité comme à l'étape précédente. La réduction de masse est due à la perte de la cellulose, et le résidu récolté sur le creuset filtrant est constitué de lignine et de cendres. La teneur en cendres sera obtenue après calcination de ce résidu.

2.5.3. Résultats

Cette section regroupe les résultats suivants :

- Teneurs en lignine, cellulose et hémicelluloses de la sciure de bois et des balles de riz avant leur inoculation par les deux espèces de wrf ;
- Evolution hebdomadaire de la perte en masse sèche de ces résidus sous dégradation par *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju* pendant cinq semaines d'incubation ;
- Evolution hebdomadaire de la teneur en constituants biochimiques majeurs de ces résidus sous dégradation, pendant toute la période d'incubation.

2.5.3.1. Composition biochimique de la sciure de bois

Les teneurs en différents constituants biochimiques majeurs de la sciure non inoculée sont données dans le tableau 5-1 ci-dessous.

Tableau 5-1 : Composition biochimique de la sciure de bois avant son inoculation par les white-rot fungi

Constituant biochimique	Teneur moyenne (%)
Hydrosolubles	5,81±0,28
hémicelluloses	21,06±0,31
cellulose	37,92±0,37
lignine	30,99±0,95
cendres	4,22±0,03

La cellulose émerge comme le constituant majeur de ce substrat sur le plan pondéral, avec près de 38% des constituants et la lignine vient en deuxième position avec près de 31%.

Ces valeurs vont servir de base de comparaison avec les différents résidus, obtenus après biodégradation à différentes durées d'incubation.

2.5.3.2. Dégradation de la sciure de bois par *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju*.

Perte en masse sèche

La figure 5.1 présente l'évolution de la masse sèche de la sciure de bois dégradée, à différentes durées par les deux wrf.

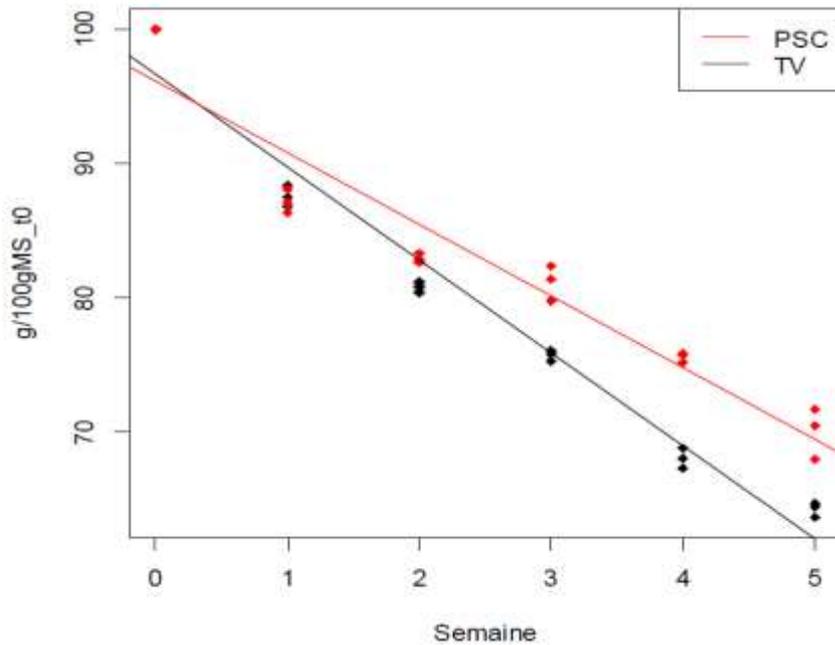


Figure 5.1. Evolution de la matière sèche de la sciure de bois inoculée par *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju*.

Légende :

- TV : sciure de bois inoculée avec *Trametes versicolor*
- PSC : sciure de bois inoculée avec *Pleurotus sajor-caju*

L'examen de cette figure révèle que *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju* croissant sur la sciure de bois, ont causé, au rythme hebdomadaire, des pertes de matière sèche représentant respectivement 6,92% et 5,314% de la masse sèche initiale (p=0), soient 34,6% et 26,57% de pertes en cinq semaines.

Les autres paramètres analysés (substances hydrosolubles à chaud, cellulose, hémicelluloses, lignines et cendres) sont présentés selon chaque espèce de wrf dans les lignes qui suivent.

A. Evolution des paramètres biochimiques de la sciure de bois sous dégradation par *Trametes versicolor*

La cinétique de variation de teneur en cellulose, hémicelluloses et lignine au cours de la dégradation de la sciure de bois par le wrf *Trametes versicolor* est donnée, dans la figure 5.2.

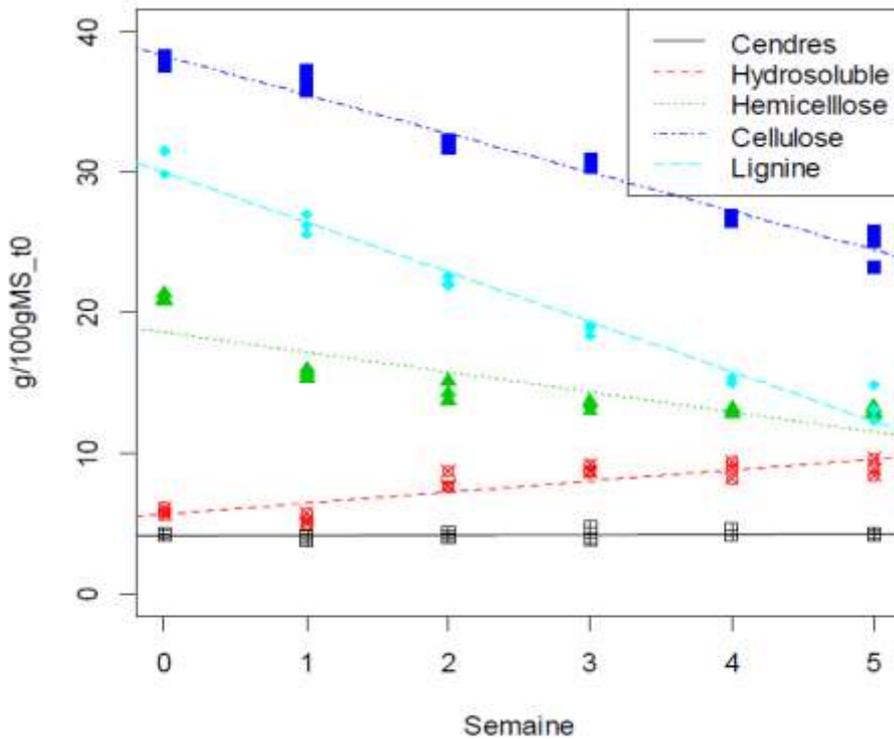


Figure 5.2. Evolution des teneurs en constituants biochimiques de la sciure de bois sous la dégradation de *Trametes versicolor*.

Comme nous pouvons le constater en examinant cette figure :

- La lignine de la sciure de bois, sous la dégradation de *Trametes versicolor*, a connu une décroissance significative de sa teneur. Cette réduction est de l'ordre de 3,57% par semaine ($p=0$), soit 17,85% après cinq semaines ;
- La teneur en cellulose a connu une décroissance de 2,77% par semaine ($p=0$), soit 13,85% après cinq semaines ;
- La teneur en hémicelluloses a diminué de 1,41% par semaine ($p=0$), soit 7,05% après cinq semaines ;
- La teneur en substances hydrosolubles à chaud a subi une croissance de 0,78% par semaine ($p=0$), soit 3,9% après cinq semaines ;
- La teneur en cendres n'a pas connu de variation significative en cinq semaines d'incubation ($p=0,35$).

B. Evolution des paramètres biochimiques de la sciure de bois sous dégradation par *Pleurotus sajor-caju*

La figure 5.3 donne la cinétique de variation de teneur en cellulose, hémicelluloses et lignine au cours de la dégradation de la sciure de bois par le wrf *Pleurotus sajor-caju*.

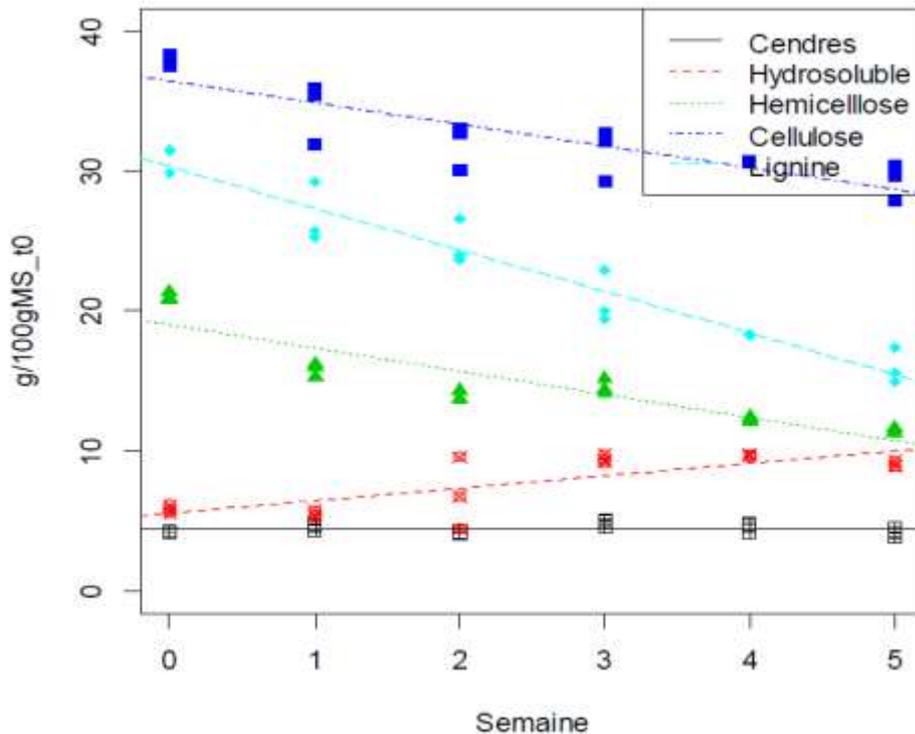


Figure 5.3. Evolution des teneurs en constituants biochimiques de la sciure de bois sous la dégradation de *Pleurotus sajor-caju* (PSC).

L'examen de la figure ci-dessus montre que :

- La sciure de bois, sous la biodégradation de *Pleurotus sajor-caju*, a connu une décroissance significative de sa teneur en lignine de 2,98% chaque semaine ($p=0$), soit 14,9% après cinq semaines ;
- La teneur en cellulose a connu une décroissance hebdomadaire de 1,56% ($p=0$), soit 7,8% après cinq semaines ;
- La teneur en hémicelluloses a diminué de 1,65% ($p=0$), soit 8,25% après cinq semaines ;
- La teneur en substances hydrosolubles à chaud a subi une croissance significative. Chaque semaine, celle-ci a été de 0,89% ($p=0$), soit 4,45% après cinq semaines ;
- La teneur en cendres n'a pas connu de variation significative en cinq semaines d'incubation ($p=0,88$).

2.5.3.3. Composition biochimique des balles de riz

Afin de pouvoir évaluer la tendance de l'évolution des différentes substances biochimiques dans les balles de riz soumises à la biodégradation, les teneurs en ces différents constituants ont été au préalable déterminées. Les résultats sont présentés dans le tableau 5-2 suivant.

Tableau 5-2. Composition biochimique des balles de riz avant leur inoculation par les white-rot fungi

Constituant biochimique	Teneur moyenne (%)
Hydrosolubles	9,89±0,20
hémicellulose	19,1±0,36
cellulose	30,45±0,29
lignine	21,44±0,30
cendres	19,16±0,49

A l'instar de la composition de la sciure de bois, la cellulose est le constituant majeur des balles de riz non biodégradées (près de 30,45%) et la lignine vient en deuxième position (près de 21,44%).

2.5.3.4. Dégradation de la balle de riz par *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju*

Perte en masse sèche

La figure 5.4 présente l'évolution de la masse sèche des balles de riz dégradée à différentes durées par les deux wrf.

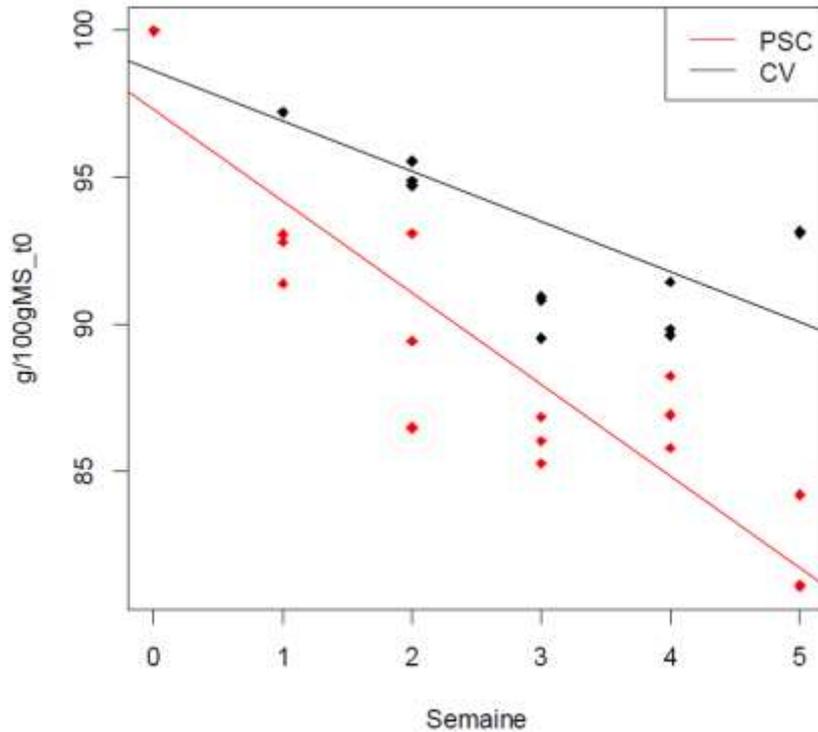


Figure 5.4 : Variation de la masse sèche des balles de riz au cours de leur dégradation par les wrf *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju*

Légende :

- CV : balles de riz inoculées avec *Trametes versicolor*
- PSC : balles de riz inoculées avec *Pleurotus sajor-caju*

Trametes versicolor et *Pleurotus sajor-caju* croissant sur les balles de riz ont causé des pertes de matière sèche représentant respectivement 1,71% et 3,13% par semaine ($p=0$), soit 8,55% et 15,65% en cinq semaines.

C. Evolution des paramètres biochimiques des balles de riz sous dégradation par *Trametes versicolor*

La cinétique de variation de la teneur en cellulose, hémicelluloses et lignine au cours de la dégradation des balles de riz par le wrf *Trametes versicolor* est donnée dans la figure 5.5.

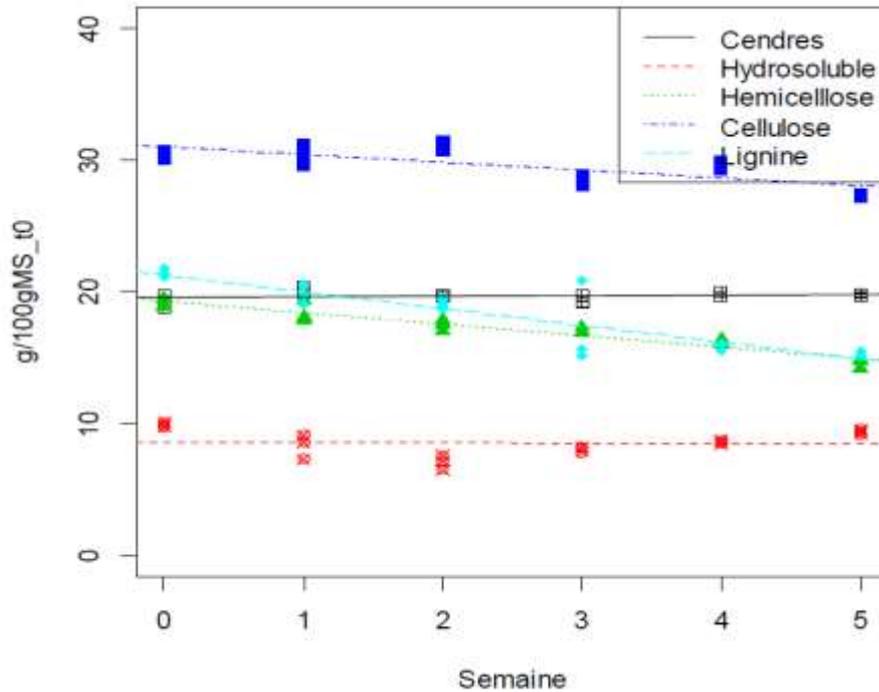


Figure 5.5. Evolution des teneurs en constituants biochimiques des balles de riz au cours de leur dégradation par *Trametes versicolor*.

L'examen des figure 5.5 révèle que :

- La lignine des balles de riz dégradées par *Trametes versicolor* a connu une décroissance significative de sa teneur, elle a baissé de 1,28% chaque semaine ($p=0$), soit 6,4% après cinq semaines ;
- La teneur en cellulose a connu la décroissance hebdomadaire de 0,59% ($p=0$), soit 2,95% après cinq semaines ;
- Les hémicelluloses ont été dégradées à la hauteur de 0,85% chaque semaine ($p=0$), soit 4,25% après cinq semaines ;
- Cependant, les teneurs en cendres et en substances hydrosolubles à chaud n'accusent pas de variations significatives de leurs valeurs (respectivement $p=0,38$ et $p=0,9$).

D. Evolution des paramètres biochimiques des balles de riz sous dégradation par *Pleurotus sajor-caju*

La cinétique de variation de teneur en cellulose, hémicelluloses et lignine au cours de la dégradation des balles de riz par le wrf *Pleurotus sajor-caju* est donnée dans la figure 5.6.

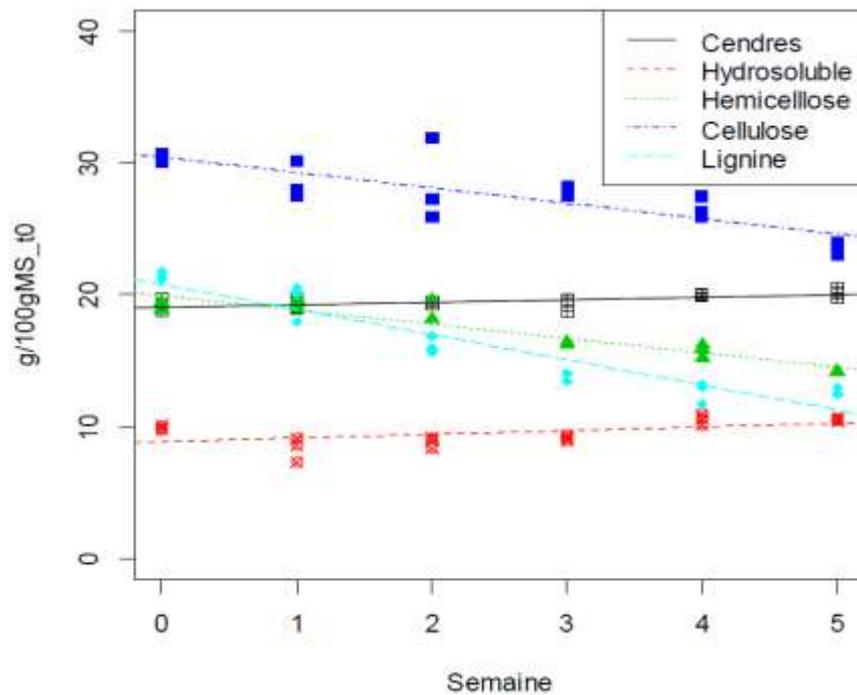


Figure 5.6. Evolution des teneurs en constituants biochimiques de la balle de riz au cours de sa biodégradation par *Pleurotus sajor-caju*.

L'analyse de la figure ci-dessus révèle que :

- La teneur en lignine des balles de riz dégradées par *Pleurotus sajor-caju* a connu une décroissance de l'ordre de 1,92% chaque semaine ($p=0$), soit 9,6% après cinq semaines ;
- La teneur en cellulose a connu une décroissance hebdomadaire de 1,17% ($p=0$), soit 5,85% après cinq semaines ;
- La teneur en hémicelluloses a baissé de 1,07% chaque semaine ($p=0$), soit 5,35% après cinq semaines ;
- La teneur en substances hydrosolubles à chaud a subi une croissance hebdomadaire significative de 0,29% ($p=0,02$), soit 1,45% après cinq semaines ;
- La teneur en cendres a connu une variation hebdomadaire significative de l'ordre de 0,2% ($p=0$), soit 1% après cinq semaines.

2.5.3.5. Synthèse des résultats obtenus au cours de la biodégradation de la sciure de bois et des balles de riz sous les deux espèces de wrf

Le tableau 5.3 donne une vue synoptique sur les variations de principaux constituants de la sciure de bois et des balles de riz après cinq semaines de dégradation par *TV* et *PSC*

Tableau 5-3. Variation hebdomadaire moyenne des constituants biochimiques de la sciure de bois et des balles de riz dégradées par *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju* (%)

	Matière sèche	Cendres	Substances hydrosolubles	Hémicelluloses	Cellulose	Lignine
SB-TV	-6,918***	+0,03 ns	+0,78***	-1,41***	-2,77***	-3,57***
SB-PSC	-5,314***	+0,01 ns	+0,89***	-1,56***	-1,56***	-2,98***
BR-TV	-1,706***	+0,05 ns	-0,02 ns	-0,85***	-0,59***	-1,28***
BR-PSC	-3,125***	+0,2***	+0,29*	-1,07***	-1,17***	-1,92***

Légende :

- SB-TV : sciure de bois dégradée par *Trametes versicolor*
- SB-PSC : sciure de bois dégradée par *Pleurotus sajor-caju*
- BR-TV : balles de riz dégradées par *Trametes versicolor*
- BR-PSC : balles de riz dégradées par *Pleurotus sajor-caju*
- + : variation positive (augmentation)
- - : variation négative (diminution)
- ns : variation non significative
- *** : variation hautement significative
- * : variation faiblement significative

L'examen de ce tableau révèle que :

- La SB dégradée par TV présente la plus grande réduction de la teneur en lignine, mais aussi la plus importante perte en cellulose et en matière sèche ;
- Les BR dégradées par TV ont connu la plus faible perte en matière sèche et en constituants biochimiques majeurs.

2.5.4. Discussion

Les résultats du tableau synoptique 5.3 nous révèlent que tous les deux types de résidus en dégradation ont subi une réduction de leur masse sèche, la sciure de bois plus que les balles de riz, sous les deux wrf.

L'un des éléments qui expliquerait ce résultat est la teneur en lignine de la sciure de bois, plus élevée que dans les balles de riz, qui est un important facteur favorisant l'activité lignolytique des wrf. En effet, Johnson (1990), Tuor (1995), Pointing (2001) et Martinez et al. (2005) expliquent que l'oxydation de la lignine se fait sans gain d'énergie nette, en sorte que la lignine n'est pas catabolisée au cours du métabolisme primaire des wrf. Ce n'est qu'au moment où un substrat riche en résidus végétaux s'appauvrit en nutriments assimilables que les wrf activent la ligninolyse afin d'accéder aux polysaccharides emprisonnés par la lignine dans la matrice que constitue la lignocellulose.

Cela a pour conséquence le fait qu'au début du métabolisme secondaire des wrf, la perte en lignine est plus importante que celle des autres constituants de la lignocellulose. Ces derniers sont digérés ensuite, au fur et à mesure que la teneur en lignine décroît.

C'est ainsi que nous constatons que tous les constituants biochimiques majeurs étudiés de la sciure de bois et des balles de riz ont été affectés, quoique dans différentes proportions et, dans tous les cas, la lignine est le constituant qui a subi les plus fortes réductions, quel que soit le wrf.

En comparant les deux wrf, *Trametes versicolor* a été plus actif dans la ligninolyse de ces deux résidus que le *Pleurotus sajor-caju*.

Ce résultat trouverait sa première explication dans le fait que la souche de *Trametes versicolor* utilisée venait directement de l'état sauvage contrairement au *Pleurotus sajor-caju* qui était issu d'une culture en milieu contrôlé. A ce sujet, Oei (2005) recommande qu'une souche de wrf ne doive pas être repiquée plus de sept fois, par crainte qu'elle perde son potentiel génétique, lorsqu'elle est cultivée en conditions contrôlées, soit au laboratoire, soit dans une utilisation de recherche ou commerciale.

La seconde raison est inhérente aux potentialités génétiques de ces espèces. A ce sujet, le *Trametes versicolor* se retrouve dans plusieurs travaux de biodégradation des résidus végétaux que le *Pleurotus sajor-caju* qui est généralement plus impliqué dans les travaux de production des sporophores comestibles.

Au regard des résultats obtenus, le fait que les principaux constituants de la lignocellulose soient désagrégés, à des proportions différentes, dans cette expérimentation, peut susciter la question sur la pertinence de valoriser la lignocellulose par une désagrégation fongique.

En effet, nous savons que les wrf sont utilisés dans la valorisation des résidus végétaux pour désagréger le réseau ou la matrice lignocellulosique qui entrave l'accès à la lignine, à la cellulose et aux hémicelluloses, en vue de les utiliser, lorsque la plante meurt.

La situation idéale serait donc que ces organismes désactivent les liens covalents et non covalents retenant les différents constituants de la lignocellulose ensemble en laissant plus ou moins inaltérés les composés libérés, c'est-à-dire, la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Ceux-ci peuvent alors être valorisés ultérieurement de façon indépendante.

Cependant, l'activité lignolytique des wrf sur les résidus végétaux, du fait qu'elle dégrade chacun de ces constituants précités, ramène cet objectif à obtenir une désagrégation maximale de la lignine en maintenant le plus possible les polysaccharides intacts.

Pour mieux comprendre la pertinence d'opérer la valorisation de la lignocellulose par sa digestion fongique, essayons d'analyser quelques travaux antérieurs dans lesquels les wrf ont été utilisés pour la dégradation des résidus végétaux.

Dans la production des champignons comestibles,

Plusieurs auteurs ont confirmé le rôle des wrf comestibles et à importance thérapeutique dans le recyclage des résidus végétaux (Das & Mukherjee, 2007 ; Mshandete & Cuff, 2008). En effet, les résidus agricoles et agro-industriels non utilisés et susceptibles de causer des pollutions environnementales peuvent être transformés en richesse par la production des champignons comestibles et médicinaux. D'une manière générale, la biomasse délignifiée résiduelle est utilisable comme fertilisant organique.

En plus de ce rôle environnemental, il est à noter que les champignons comestibles font partie des denrées alimentaires très préférées par beaucoup d'hommes. Ils sont très riches en nutriments comme le confirment Boa (2006) et Sánchez (2010) qui donnent les valeurs nutritives de quelques wrf comestibles sauvages et cultivés.

Dans la ration des polygastriques.

Dans l'utilisation des résidus végétaux comme fourrage, plusieurs travaux ont établi l'existence d'une corrélation négative entre la digestibilité gastrique de la lignocellulose et sa teneur en lignine (Jarrige et al., 1969 ; Rahman and al., 2011).

A ce sujet, Arora & Sharma (2009) estiment que les wrf à action simultanée, c'est-à-dire hydrolysant les constituants de la lignocellulose au même moment, sont utilisables dans la bio délignification des fourrages destinés aux polygastriques mais, pour tirer profit de cette démarche, il faudra que la perte en polysaccharides ne soit pas plus importante que celle de la lignine. En effet, au cours de leur expérimentation, ils ont mis en évidence une augmentation de la digestibilité gastrique de la paille de blé biodégradée par des wrf à action simultanée. Ils aboutirent à une conclusion similaire lorsqu'ils travaillèrent avec la paille de riz (Arora & Sharma, 2010).

Dans la production d'énergie,

Dans la littérature, la valorisation énergétique des résidus végétaux délignifiés par les wrf peut se faire sous forme de biogaz (méthane) ou de bioéthanol.

Concernant la production du méthane (par digestion anaérobie), l'opération nécessite, en plus du prétraitement physico-chimique ou biologique, un inoculum méthanogène capable de digérer le substrat mis à sa disposition pour produire le méthane (Bangala & Malakasa, 2008 ; Zhong et al., 2011).

A ce sujet, Muhler & Trosh (1988) ont tenté de produire du méthane à partir de la paille de blé dégradée par vingt-deux espèces de wrf. Dans leur démarche, le traitement de la paille de blé par le wrf *Pleurotus florida* (PF), un wrf à action séquentielle, a permis d'obtenir un volume de biogaz double par rapport au témoin non traité. Sur base de ce résultat, ils ont émis l'hypothèse que le PF, non seulement délignifie ce substrat mais aussi diminue la cristallinité de la cellulose de sa paroi, la rendant susceptible aux attaques des bactéries méthanogènes.

Dans le même ordre d'idée, Zong et al. (2011) après avoir délignifié la paille de maïs par la même espèce de wrf, arrivèrent à produire une quantité de biogaz 12,5 fois plus importante que le témoin non délignifié.

Concernant la production du bioéthanol, Salvachua et *al.* (2011) expliquent que la production du bioéthanol de seconde génération, c'est-à-dire, celui qui est issu des sources non alimentaires, notamment à partir des résidus lignocellulosiques, se fait en trois étapes : le prétraitement de délignification, l'hydrolyse enzymatique de la cellulose et des hémicelluloses et la fermentation alcoolique.

Dans leur expérimentation, ils ont tenté de remplacer la méthode de l'explosion à la vapeur, qui est un prétraitement couramment appliqué à la lignocellulose et devant en faciliter la production du bioéthanol, par la délignification fongique. Pour ce faire, ils ont prétraité la paille de blé avec une solution diluée de NaOH avant de tester sa dégradation par 21 espèces différentes de wrf pendant une durée de 21 jours.

Ils découvrirent, d'une part, que le taux de dégradation de la lignine était fonction de l'espèce de wrf utilisée, et d'autre part, que seulement quelques uns de ces wrf (huit espèces) avaient pu hydrolyser la cellulose en glucose sucre directement assimilable.

S'inspirant des résultats de tous les travaux mentionnés ci-dessus, nous estimons que les pertes des teneurs en lignine de la sciure du bois (17,85% et 14,9%) obtenues après cinq semaines de dégradation et des balles de riz (6,4% et 9,6%), qui ont été accompagnées des réductions simultanées de matière sèche et des teneurs en polysaccharides, n'entravent pas la possibilité de valoriser ces résidus.

Plusieurs possibilités de réutilisation de ces derniers existent. Notamment, dans la fertilisation organique du sol, dans la papeterie, dans la production énergétique comme biogaz et bioéthanol, dans l'alimentation des ruminants, etc.

En plus de ces usages probables, à Kinshasa, la valorisation fongique des résidus lignocellulosiques peut aussi être envisagée dans la double finalité de récupérer les substrats délignifiés mais aussi d'utiliser les mycéliums fongiques obtenus à la fin de l'incubation.

2.5.5. Conclusion

L'aptitude de deux espèces de wrf, *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju*, à dégrader la lignine des deux types de résidus végétaux, la sciure de bois et les balles de riz, a été testée pendant une période d'incubation de cinq semaines, à la température de 28°C. Il a été observé la réduction de la teneur en lignine aussi bien dans la sciure de bois que dans les balles de riz par les deux wrf dès la première semaine. Concomitamment à cela, la cellulose et les hémicelluloses ont été aussi consommées par ces wrf, mais dans des proportions plus faibles. Toutefois, la perte en masse sèche la plus élevée a été observée dans la dégradation de la sciure de bois par le wrf *Trametes versicolor* (34,6% en cinq semaines de dégradation).

La réduction de la teneur en lignine a été plus importante dans la dégradation de la sciure de bois par le wrf *Trametes versicolor* (17,85% en cinq semaines), celle en hémicellulose dans la biodégradation de la sciure de bois par *Pleurotus sajor-caju* (7,8% en cinq semaines), tandis que la réduction de la teneur en cellulose a été la plus importante dans la biodégradation de la sciure de bois par le wrf *Trametes versicolor* (13,85% en cinq semaines).

Ces pertes enregistrées risquent d'avoir un impact négatif sur le rendement de l'opération de bio délignification des résidus lignocellulosiques produits à Kinshasa. Pour faire face à l'impact économique de cette baisse de rendement, il est préconisé de recourir, aux wrf alimentaires, thérapeutiques ou à d'autres utilités technologiques, pour la biodégradation de ces résidus.

DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALES

DISCUSSION GENERALE

La ville de Kinshasa éprouve beaucoup de difficultés dans le domaine de gestion des résidus produits localement (Lelo, 2008 ; Holy et al, 2013). Cette situation est due au fait que dans toute cette ville, (1) il n'existe pas de système organisé de collecte et d'évacuation des déchets, (2) la population n'est pas préparée en matière de gestion des ordures et (3) il n'existe, dans le chef de cette population, que très peu de possibilités de recyclage de ces déchets.

Or, dans la vision moderne de grandes villes, la gestion des résidus est envisagée dans une démarche de leur valorisation, c'est-à-dire, la création d'une valeur ajoutée à ce qui semble ne plus être utile. La réussite d'une telle opération dépend de la connaissance des mécanismes de valorisation à mettre en œuvre, de leur vulgarisation et de l'action de divers acteurs impliqués.

Dans un soucis de répondre à cette exigence de modernité, ce travail explique dans son chapitre premier que les résidus végétaux, ayant une part importante dans la pollution environnementale à Kinshasa, sont constitués essentiellement de trois types de polymères, cellulose, hémicelluloses et lignine, rassemblés, par des liens covalents et non covalents, en un réseau appelée lignocellulose. Il est à noter que chacun de ces polymères peut servir de matière première dans d'autres industries (Sachetto et al., 1987 ; Zadrazil, 1987 ; Murthy & Naidu, 2012).

A cause de l'immobilité de la plante, la structure végétale s'est dotée de cette charpente, la lignocellulose, qui la protège des stress biotiques et abiotiques de diverses natures. Ces derniers peuvent être des organismes microscopiques et/ou macroscopiques pathogènes à la plante, des conditions météorologiques défavorables et autres (Martinez, 2005).

La désagrégation de la lignocellulose, à la mort de la plante, exige un prétraitement pour rendre possible la valorisation des résidus végétaux (Zhang et al., 2007 ; Nigam et al., 2009 ; Zhong et al., 2011). Les principales méthodes de prétraitement ont été parcourues, notamment physique, biologique, chimique et la combinaison de deux ou plusieurs méthodes.

D'une manière concrète, à Kinshasa, la stratégie de valorisation des résidus produits par diverses activités de la population nécessite la mise en place d'une organisation de leur gestion, la connaissance des possibilités de valorisation, l'existence des infrastructures adéquates et des moyens adaptés.

Dans le cas des résidus végétaux, ce travail s'est attelé à démontrer que pour la valorisation de la lignocellulose, il est impérieux de localiser les principaux sites de leur production, les identifier et les quantifier. Grâce aux investigations menées dans cinq communes de Kinshasa, ce travail a identifié quelques sites de productions agricoles intenses dans ces municipalités, en outre, il a été mis en lumière le fait que plusieurs agriculteurs et agro-industriels avaient des difficultés pour quantifier et se débarrasser de leurs résidus.

Pour apporter une solution aux difficultés précitées, cette recherche a entrepris une démarche d'identification, de localisation et de quantification des résidus agricoles et agro-industriels produits dans la ville, des statistiques agricoles et agro-industrielles fournies par les services des statistiques du Ministère de l'Agriculture et de la Banque Centrale du Congo ont servi de base pour ce travail. Ainsi, (1) les résidus les plus abondamment produits par l'activité agricole à Kinshasa sont issus, par ordre d'importance, des cultures suivantes, maïs, arachide, riz, niébé, soja, banane douce, pois-cajan, haricot, igname et voandzou ; (2) les principaux

sites de production locale des résidus issus de l'activité agricole se retrouvent essentiellement dans sept communes de Kinshasa, Maluku, N'sele, Ngaliema, Masina, Mont-Ngafula, Ndjili et Kimbaseke ; (3) les résidus agro-industriels sont essentiellement concentrés dans le secteur industriel de Limete ; (4) les sciures et copaux de bois peuvent être trouvés dans les diverses scieries disséminées dans la ville ; (5) les résidus issus des plantes maraichères sont plus présents dans les lieux de leur commercialisation, c'est-à-dire, les marchés, tandis que (6) les résidus végétaux ménagers et ceux issus des restaurants sont pratiquement répandus dans toute la ville (Lelo, 2008 ; Holy et al., 2013).

Pour arriver à quantifier les résidus agricoles produits à Kinshasa et en RDC, ce travail s'est inspiré des recherches de même nature effectuées dans d'autres pays d'Afrique et d'Asie préoccupés par la gestion de ces types de résidus. C'est ainsi que le recours à un facteur de conversion, "Residue to Product Ratio" a permis de quantifier les résidus agricoles et de l'industrie forestière de Kinshasa et de la RDC à partir des données fournies par les statistiques officielles.

Cette quantification a révélé qu'entre 2011 et 2013, une moyenne de 43.690 tonnes de résidus agricoles a été générée chaque année par la pratique agricole à Kinshasa (ce résultat ne tient pas compte des produits agricoles provenant d'autres provinces ou de l'extérieur de la RDC). Cette valeur ne représente que 0,04% de celle de l'ensemble du pays (113.790.150 tonnes par an). Une importante portion de ces résidus (environ 52%) retourne dans la terre pour le maintien de sa fertilité mais le reste (près de 48%, soit 21.000 tonnes par an) est susceptible de causer la pollution environnementale dans le cas où sa gestion ne fait pas l'objet d'une planification.

En plus de la fertilisation du sol, à Kinshasa, ces déchets végétaux servent à la cuisine comme combustibles, l'alimentation du petit bétail constitué des chèvres, moutons, porcs etc. En dépit de cela, une importante portion intervient dans la pollution environnementale, notamment, la pollution de l'air par brûlage, l'abandon sur les routes, la pollution des cours d'eau par eutrophisation, etc. Or, la connaissance des types de valorisation est importante étant donné qu'elle permettrait d'estimer la technologie à mettre en œuvre avec ses exigences.

C'est dans ce cadre que ce travail a préconisé la valorisation de ces résidus par la voie biologique, très respectueuse de l'environnement, par usage des macromycètes lignivores dits "white rot fungi" (wrf en abrégé), ou champignons de pourriture blanche, présents dans les écosystèmes forestiers de Kinshasa et de Kisantu, en périphérie de la capitale congolaise. Plusieurs raisons ont justifié cela, notamment, les faits que notre environnement renferme de très nombreuses espèces de ces organismes, ils disposent d'un équipement enzymatique capable d'hydrolyser complètement la lignine, contrairement à beaucoup d'autres organismes (Zang et al., 2007), ils sont moins dangereux et non polluants pour l'environnement contrairement aux méthodes chimiques.

Des investigations menées à la Station Phytotechnique de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa, dans la Forêt du Lac de Ma Vallée et au Jardin Botanique de Kisantu ont permis la récolte de vingt-six espèces de macromycètes dont au moins onze sont comestibles (*Agaricus sp.*, *Auricularia cornea*, *Auricularia delicata*, *Lentinus cladopus*, *Lentinus sajor-caju*, *Lentinus squarrosulus*, *Leucoagaricus sp.*, *Marasmiellus inoderma*, *Neonothopanus hygrophanus*, *Pleurotus tuber-regium*, *Schizophyllum commune*, etc.), au moins quatre à importance thérapeutique (*Daldinia concentrica*, *Ganoderma sp.*, *Schizophyllum commune.*, *Pycnoporus sanguineus*, etc.) et au

moins trois capables de désactiver des composés polluants pour l'environnement (*Pycnoporus sanguineus*, *Trametes versicolor*, *Ganoderma sp.*, etc.) . Cependant, cette richesse biologique est fortement menacée à cause de la disparition accélérée des écosystèmes forestiers due à l'urbanisation non planifiée de la ville de Kinshasa. Parmi ces macromycètes, douze espèces ont donné des résultats positifs lors de la mise en culture et leur conservation sur des supports de semis faits de sciure de bois. Sous ce conditionnement, les mycéliums peuvent être conservés plusieurs mois à température ambiante (Oei, 2005 ; Dibaluka et al., 2009).

La capacité de coloniser la sciure de bois, pour une espèce de macromycète, confirme que ce dernier dispose de l'équipement enzymatique nécessaire pour dégrader la lignine des résidus végétaux (Hatakka, 1994 ; Tuomela et al., 2000).

C'est la raison pour laquelle, ce travail de recherche s'est attelé à tester l'apport de deux espèces de wrf, très utilisés dans le monde scientifique, *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju*, dans la valorisation des balles de riz et de la sciure de bois. Ces deux types de résidus lignocellulosiques posent des problèmes de gestion dans certaines agro-industries de Kinshasa.

Au cours de leur traitement fongique, en cinq semaines de dégradation, il y a eu réduction de la teneur en lignine de la sciure de bois de 18% et de 15% causées respectivement par *Trametes versicolor* et *Pleurotus sajor-caju* et la réduction de 6% et de 10% de cette teneur sur les balles de riz causées par les mêmes espèces de wrf. La délignification de ces résidus est confirmée par ce travail, du moins à l'échelle de laboratoire.

Les deux espèces de champignons ayant servi dans ce travail ont aussi entraînés des faibles pertes des teneurs en cellulose (3% à 14%) et hémicelluloses (4% à 8%). A ce sujet, plusieurs chercheurs, à travers le monde, tentent de sélectionner les espèces de champignons qui hydrolysent essentiellement la lignine en maintenant plus ou moins inchangées les teneurs en cellulose et hémicelluloses qui peuvent être utilisées ultérieurement comme fourrage, dans la production énergétique ou d'autres produits biobasés.

La perte en polysaccharides constitutifs des parois secondaires des végétaux a entraîné la préoccupation relative à la rentabilité économique de ce type de valorisation pour ces résidus. C'est ainsi qu'en s'inspirant des travaux similaires entrepris par d'autres chercheurs, nous sommes arrivés à l'option selon laquelle la valorisation fongique des résidus lignocellulosiques générés à Kinshasa devrait utiliser essentiellement des wrf présentant d'autres vertus en plus de leur potentialité de délignification.

Avec une implication importante du monde scientifique, des décideurs et du pouvoir organisateur, l'acquisition des parcelles ou compartiments de valorisation des résidus pour la production des champignons, des briquettes combustibles, de compost, de biogaz ou bioéthanol peut devenir une opération réalisable à grande échelle. Chang (2005) explique comment il a pu transformer ses rêves en réalité par la transformation des résidus agricoles, nuisibles pour son environnement, en richesse, grâce aux macromycètes, jusqu'à hisser la Chine au rang de premier producteur mondial de champignons.

CONCLUSION GENERALE

Les macromycètes dits « champignons de pourriture blanche » présents dans la ville de Kinshasa et dans ses périphéries sont susceptibles de contribuer efficacement, à moindre coût, à la biodégradation et la valorisation des résidus lignocellulosiques produits dans cette ville. Ainsi peuvent être résumés les deux hypothèses qui ont été à la base de ce travail de recherche.

L'objectif principal en a été la valorisation des résidus végétaux issus de l'activité agricole et des agro-industries de Kinshasa par leur traitement aux wrf présents dans cette ville et dans ses périphéries. Spécifiquement, ce travail a visé à identifier, quantifier et caractériser parmi ces résidus agricoles et agro-industriels, ceux qui étaient les plus abondants et nuisibles à l'environnement local ; récolter, identifier et mettre en culture quelques souches de wrf présents dans les écosystèmes forestiers de Kinshasa et de ses périphéries ; provoquer la dégradation des substrats lignocellulosiques identifiés par les wrf récoltés dans le but de rendre disponibles les polysaccharides pariétaux qui pourraient être valorisés ultérieurement.

L'investigation menée auprès de trente producteurs agricoles et cinq agro-industriels localisés dans cinq communes de Kinshasa, dans le but d'évaluer le mode de gestion des résidus lignocellulosiques qu'ils génèrent par leurs activités, a révélé qu'aucun producteur agricole ni agro-industriel, ne dispose des outils d'estimation de la quantité des résidus produits par ses activités ; les producteurs maraichers utilisent presque tous les résidus de récolte pour la fertilisation des plates-bandes en vue de nouvelles cultures, tandis que les producteurs de riz ont des surplus de résidus. Les producteurs agro-industriels connaissent tous un problème d'élimination des résidus végétaux que leurs activités génèrent.

Lorsqu'on a tenté de trouver des solutions, concernant la quantification et la localisation de ces résidus, en consultant les archives officielles, aucune statistique de production de ces types de résidus n'a été trouvée. Cette situation, avions-nous estimé, traduisait l'absence ou le défaut d'application d'une politique nationale ou provinciale de la valorisation des déchets. C'est ainsi qu'on a fait recours aux statistiques de production agricole de la RDC et aux "Residue to Product Ratio" que sont les rapports existants entre les quantités de ces résidus et les types de produit agricole qui les génèrent.

Ces données nous ont permis de déterminer qu'à Kinshasa, la production annuelle moyenne des résidus agricoles issus des cultures vivrières a été de 43.690 tonnes entre les années 2011 et 2013, dont 48% étaient disponibles pour une valorisation en dehors de la fertilisation directe du sol.

Sept communes se sont distinguées par leur implication dans la génération des ces résidus. Parmi elles, la commune de Maluku était la plus impliquée parce que produisant, à elle seule, 54,64% de ces sous-produits parmi lesquels les résidus de maïs étaient les plus abondants à raison de 24.828T/an. Comparativement au reste de la RDC, Kinshasa n'a représenté que 0,04% de la proportion des résidus agricoles issus des cultures vivrières. L'utilisation des ces résidus dans la fabrication des briquettes de combustibles et la production des champignons comestibles ont été préconisées dans ce travail.

Ces recommandations ont été à la base des investigations menées à la recherche des macromycètes dans trois écosystèmes forestiers, la Station Phytotechnique de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa, la Forêt du Lac de Ma Vallée et le Jardin Botanique de Kisantu, dans une préoccupation d'en trouver ceux qui seraient à mesure

de synthétiser des enzymes lignolytique à fort pouvoir d'oxydation donc pouvant être utilisés dans la dégradation des résidus végétaux. Parmi les vingt-six espèces de macromycètes récoltées, douze de ces espèces se sont bien adaptées en culture et se sont conservées sur la sciure de bois dont elles ont été capables de dégrader la lignine. Elles peuvent ainsi être utilisées ultérieurement à des fins alimentaires, de dépollution environnementale ou pour la production des molécules bioactives pouvant prévenir certaines pathologies chez l'homme.

Parmi ces douze espèces, *Trametes versicolor*, auquel a été associé *Pleurotus sajor-caju* fourni par le laboratoire Kin-champignons, ont été utilisées pour la biodégradation, pendant une durée de cinq semaines, de la sciure de bois et des balles de riz pour en déterminer les modifications biochimiques que ces organismes étaient à même de provoquer sur la lignocellulose.

La culture fongique a été effectuée selon la méthode de la fermentation à l'état solide, à la température de 28°C. Les modifications causées par les champignons sur ces résidus ont été testées en dosant leur teneur en lignine, celluloses et hémicelluloses. En cinq semaines d'incubation, les réductions de teneur en lignine ont été plus importantes que celles des autres constituants de la lignocellulose lors de la biodégradation de ces deux types de résidus par les deux espèces de wrf.

En ce qui concerne la sciure de bois, ces pertes en lignine ont été de 18% sous la dégradation de *Trametes versicolor* et de 15% sous la dégradation de *Pleurotus sajor cajou* ; dans le cas des balles de riz, ces pertes ont été de 6% sous la dégradation *Trametes versicolor* et de 10% sous la dégradation de *Pleurotus sajor cajou*. Des réductions, plus faibles, des teneurs en cellulose et hémicelluloses ont été aussi enregistrées dans tous les tests.

Ce dernier constat nous a amené à conclure que la dégradation fongique des résidus lignocellulosiques à Kinshasa, en vue de les valoriser, serait profitable à la population si elle est combinée à la production simultanée des champignons comestibles et/ou à importance thérapeutique et technologique.

Sur base des résultats obtenus dans ce travail, nous émettons les suggestions suivantes :

Concernant la valorisation des résidus lignocellulosiques de Kinshasa par la culture des champignons :

- La poursuite de la recherche sur la biodégradation fongique des résidus lignocellulosiques de Kinshasa avec les autres wrf conservés sur blanc final ;
- La recherche des conditions culturelles optimales pour cette opération avec l'objectif de supprimer la stérilisation du substrat ;
- L'extrapolation du processus en dehors du labo ;
- La recherche des conditions optimales d'utilisation des résidus délignifiés.

Concernant la valorisation des ressources fongiques de Kinshasa :

- L'initiation des recherches sur les autres vertus des wrf de Kinshasa et de ses périphéries ;

- La création des centres de production des wrf comestibles, à importance thérapeutique et technologique à côté des zones agricoles et agro-industrielles où les résidus végétaux sont produits abondamment.

Concernant la lutte contre la pollution environnementale due à la mauvaise gestion des déchets organiques à Kinshasa :

Au niveau du pouvoir

- L'élaboration et l'application des lois réglementant la gestion des ordures organiques ;
- La mise en place d'une organisation structurée de leur gestion ;
- La création des infrastructures adéquates et la disponibilisation des moyens adaptés ;
- La mise en place de la stratégie de vulgarisation sur les dangers que représentent l'accumulation des résidus végétaux et les possibilités de leur recyclage à Kinshasa.

Au niveau de la communauté scientifique

- La réalisation des recherches sur les possibilités de recyclage des résidus organiques (et d'autres types) ;
- La vulgarisation des résultats obtenus, avec l'appui du pouvoir, au près de la population cible.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 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.
- Agrios, G.N. (2005). *Plant Pathology*. Elsevier Academic Press, Amsterdam, pp. 922.
- Amoo-Gottfried, K., Hall, D.O. (1999). A Biomass Energy Flow Chart for Sierra Leone. *Biomass & Bioenergy* 16, 361-376
- Anonyme (2002). Memento de l'agronome. CIRAD-gret, Ministère des Affaires Étrangères Française
- Anonyme. (2010). Le Petit Larousse électronique
- Arms, K. et Camps, P.S. (1989). *Biologie Tome I. de Boeck Université Editions Etudes Vivantes*, Montréal (Québec) Canada. (p 403-422).
- Arora, D.S. & Sharma, R.K. (2009). Comparative ligninolytic potential of *Phlebia* species & their role in improvement of in vitro digestibility of wheat straw. *Journal of Animal & Feed Sciences*, 18, 151–161.
- Ashori, A., Nourbakhsh, A. (2010). Bio-based composites from waste agricultural residues. *Waste Management*, 30, 680–684.
- Balat, M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion & Management*, 52, 858–875.
- Bangala, M., Malakasa, M.(2008). Valorisation des sous produits de l'agriculture par leur traitement avec les white-rot fungi. *Revue Congolaise des Sciences Nucléaires*. Volume XXIII, n°1, Pages 225-234.
- Bangala, D.B.M., Masimango N.T. (2014). Revue bibliographique sur les aspects pratiques de la valorisation des résidus lignocellulosiques par la digestion fongique. *Congo Sciences* Volume 2| Number 2| www.congosciences.org
- Bangala₁, M., Lumpungu, K., Sumbu, Z., Kizungu, V., Dibaluka, M., Ngombe, K., Luyindula, N., Gerin, P., Masimango, N. (2015). Revue de la Littérature sur les Principales Méthodes de Valorisation des Résidus Lignocellulosiques. *Revue Congolaise des Sciences Nucléaires*, Volume N° 30.
- Bangala₂, D.B.M., Kanyanga, P.M., Kabamba, N.N., Masimango, T.N. (2015). Nécessité d'une gestion des résidus agricoles et agro-industriels à Kinshasa. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 9(4): 2234-2248
- BCC-RDC (Banque Centrale du Congo) (2011). Rapport Annuel 2010
- BCC-RDC (2013). Rapport annuel 2012
- Béguin, P., Aubert, J. P. (1994). The biological degradation of cellulose. *Microbiology Review*, 13, 25-58. Biloso, M.A. (2008).
- Bidlack, J., Malone, M., Benson, R. (1992). Molecular Structure and Component Integration of Secondary Cell Walls in Plants. *Proc. Okla. Acad. Sci.* 72:51-56
- Biloso, M.A. (2008). Valorisation des Produits Forestiers Non Ligneux des Plateaux de Bateke en Périphérie de Kinshasa (RD Congo). Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences. Ecole Facultaire des Bioingénieurs, Université Libre de Bruxelles.

- Binod, P., Sindhu, R., Singhanian, R.R., Vikram, S., Devi, L., Nagalakshmi, S., Kurien, N., Sukumaran, R.K., Pandey, A. (2010). Bioethanol production from rice straw: An overview. *Bioresource Technology*. Volume 101, Issue 13, Pages 4767–4774.
- Bio Energie International. RDC : la brique de déchets de biomasse pour sauvegarder la forêt. <http://www.bioenergie-promotion.fr/3855/congo-rdc-la-brique-de-biomasse-pour-sauvegarder-lesforets-du-kivu/> le 10.05.2015
- Blackwell, M. (2011). The fungi: 1, 2, 3 ... 5.1 million species? *American journal of botany* 98(3): 426–438. Disponible sur <http://www.amjbot.org/>
- Blanchette, R.A., Obst, J.R., Hedges, J.I. & Weliky, K. (1988). Resistance of hardwood vessels to degradation by White rots Basidiomycetes. *Canadian Journal of Botany*, 66,1841-1847.
- 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.
- Bolia, I.B. (2014). Kinshasa, ma ville, ma capitale. L'Harmattan, Paris, 444p
- Carmen, S. (2010). Cultivation of *Pleurotus ostreatus* & other edible mushrooms. *Appl Microbiol Biotechnol.*, 85:1321–1337.
- Chang, S-T. (2003). Development of the Mushroom Industry in China, with a Note on Possibilities for Africa. *Discov. innov.*, 15 (3/4), pages 121-124
- Chang, S-T. (2005). Witnessing the Development of the Mushroom Industry in China. Fifth international conference on Mushroom Biology & Mushrooms Products. April 8-12, 2005, Shanghai China.
- Cooper, C.J. & Laing, C.A. (2007). A macro analysis of crop residue & animal wastes as a potential energy source in Africa. *Journal of Energy in Southern Africa* Vol 18, No 1
- Cuiping, L., Yanyongjie, Chuangzhi, W., Haitao, H (2004). Study on the distribution & quantity of biomass residues resource in China. *Biomass & Bioenergy* 27, pages 111 – 117
- Das, N., Mukherjee, M. (2007) .Cultivation of *Pleurotus ostreatus* on weed plants. *Bioresource Technology* 98, 2723–2726.
- Datta, R. (1981) Acidogenic fermentation of lignocellulose –acid yield & conversion of components. *Biotechnol Bioeng* 23, 2167–2170.
- De Saint Moulin, L., Kalombo, T.J.L. (2005). Atlas de l'organisation administrative de la RDC. CEPAS, Kinshasa.
- Dermibas, A.H. & Dermibas, I. (2007). Importance of rural bioenergy for developing countries. *Energy Conversion & Management*, Volume 48, Issue 8, Pages 2386-2398. Disponible sur : <http://www.sirtewater&energy.org/docs/reports/DRCongo-Rapport2.pdf> Lu le 13 avril 2010.
- Devred, R. (1959). Carte de la végétation du Congo-Belge et du Rwanda-Urundi, Soc. Roy. Forest. Belgique, Bruxelles.
- Diamantidis, N.D. & Koukios, E.G. (2000). Agricultural crops & residues as feedstocks for non-food products in Western Europe. *Industrial Crops & Products*, 11, 97–106.

- Dibaluka, M.S., Muambi, S., Taba, K.M., Kayembe, S.J., Sene, M., Kumbukana, B., Kibadi, J. (1999). Biodégradation des rafles de maïs par la culture d'une espèce de champignon comestible, *Lentinus tigrinus* (L. ex.Fr) Fr. Med. Fac. LANDbouw.Univ. Gent, 64/1.
- Dibaluka M.S.(2005). Inventaire des macromycètes de la forêt du Lac de Ma Vallée (Kinshasa) et essai de mise en culture de quelques espèces comestibles. Mémoire inédit : Faculté des Sciences, Université de Kinshasa.
- Dibaluka, M.S., Lukoki, L.F., De Kesel A., Degreef J. (2009). Culture de trois types de champignons sauvages indigenes comestibles de la région de Kimvula (Bas-Congo/R.D.Congo) : *Auricularia cornea* (Ehrenb. : fr.) Ehrenberg Ex Endlicher, *Pleurotus cystidiosus* O.K. Miller et *Pleurotus flabellatus* (Berk. & BR.) Sacc. Rev. Cong. Sci. Nucl. Vol. 23 N°2
- 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.
- Dibaluka, M.S. (2012). Etude des macromycètes de la cité de Kimvula et de ses environs (Bas-Congo/ RD Congo) : Diversité et productivité en forêt claire, ethnomycologie et mise en culture d'espèces saprotrophes comestibles. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa.
- Ding, S.Y. & Himmel, M.E. (2006). The maize primary cell wall microfibril: a new model derived from direct visualization. J. Agric. Food Chem. 54, 597–606.
- Donatini₁, B. (2010). Le *Trametes versicolor* : le plus puissant immunostimulant connu. Utilisation en cancérologie, contre les virus et pour toute stimulation immunitaire. Phytothérapie, 8, 255–258.
- Donatini₂, B. (2010). Prévention des récurrences d'herpès par l'association *Ganoderma lucidum* + *Trametes versicolor*. Phytothérapie, 8, 259–60.
- Durand, A. (2003). Bioreactor designs for solid state fermentation. Biochemical Engineering Journal 13 (2003) 113–125
- Eyi Ndong, G.H., Degreef, J. & De Kesel, A., 2011. Champignons comestibles de forêts denses d'Afrique centrale. Taxonomie et Identification. Abctaxa vol. 10. 262 p.
- FAO (2000). Rapport Spécial : RDC. Disponible sur : <http://www.fao.org/docrep/004/x8628F/x8628F00.HTM> Lu le 13 avril 2010
- FAO (2005). L'irrigation en Afrique en chiffres : la République Démocratique du Congo. Enquête AQUASTAT. Disponible en ligne, sur : http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries/congo_dem_r/congo_dem_c_p.pdf lu le 13.04.2010
- FAO, NEPAD. (2004). Rapport National d'Investissement République Démocratique Du Congo.
- Fischer, G., Prieler, S., Velthuisen, H. v., Berndes, G., Faaij, A., Londo, M., Wit M.D. (2010). Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated Land & pastures, Part II: LAND use scenarios. Biomass & bioenergy, 34, 173 – 187.

- Gamauf, C., Metz, B., Seiboth, B. (2007). Degradation of Plant Cell Wall Polymers by Fungi. In Environmental & Microbial Relationships, 2nd Edition (Kubicek C.P. & Druzhinina I. S.) Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Chap. 18, 325-340.
- Glasser, W.G. (1981). Potential role of lignin in tomorrow's wood utilization technologies. Forest Products Journal, 31(3), 24-29.
- Gochev V.K. and Krastanov A.I. (2007). Fungal Laccases (Review). Bulgarian Journal of Agricultural Science, 13, 75-83.
- Gonzalez, J.F., Gonzalez-Garcia, C.M., Ramiro, A., Gonzalez, J., Sabio, E., Ganan, J., Miguel, A. Rodriguez, M.A. (2004). Combustion optimization of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler. Biomass & Bioenergy, 27, 145 – 154.
- Gross, B., Yonnet G., Picque D., Brunerie P., Corrieu G., Asther M. (1990). Production of methylanthranilate by the basidiomycete *Pycnoporus cinnabarinus* (Karst.). Appl Microbiol Biotechnol, 34, 387-391.
- Guerra, G., O Domínguez, Ramos-Leal, M., Manzano, A.M., Sánchez, M.I., Hernández, I., Palacios, J., Arguelles, J. (2008). Production of laccase and manganese peroxidase by white-rot fungi from sugarcane bagasse in solid bed: Use for dyes decolourisation. Sugar Tech 10 (3) : 260-264
- GuidenR bois – énergie. L'information sur le bois énergie et la construction du bois. Disponible sur http://www.boisenergie.guidenr.fr/II_3_caracteristique-combustible-bois-energie-massevolumique. Consulté le 15 Avril 2015
- Hall, D.O., Rosillo-Calle, F., Williams, R.H., Woods, J. (1993). Biomass energy supply and prospects. In Renewable energy: sources for fuel and electricity. Johansson TB, Kelly H, Reddy AKN, Williams RH. (Editors). Island Press, Washington DC, pp. 593–651.
- Hamman, S (2004). Bioremediation capabilities of white rot fungi. BI570 – review article Spring 2004.
- Han de Koeijer, (2009). Flore et végétation de la RD Congo. Centre d'Echange d'Informations de la RD Congo (en ligne). Disponible sur : <http://cd.chm-cbd.net/implementation/docs/monographie/doc869373> lu le 31.10.2013
- Hatakka, A. (1994). Lignin-Modifying enzymes from selected white-rot fungi: production & role in lignin degradation. FEMS Microbiology Reviews, 13 (2-3), 125-135.
- Hemstock, S. L. & Hall, D. O. (1995). Biomass Energy Flows in Zimbabwe. Biomass & Bioenergy Vol. 8. No. 3. pp. 151-71 3.
- 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.
- Holker, U. & Lenz, J. (2005). Solid-state fermentation — are there any biotechnological advantages? Current Opinion in Microbiology Volume 8, Issue 3, Pages 301–306.
- Holy, H.M., Nedeff, V., Barsan, N. (2013). Integrated management and sustainable waste Kinshasa and management of urban space. Troisième Colloque

Francophone Pluridisciplinaire sur les Matériaux, l'Environnement et l'Electronique. Bacau (Roumanie). Disponible sur <http://www.pubs.ub.ro/dwnl.php?id=plumee201301v01s01a0024> consulté le 15.03.2015

- Holy, H.M., Nedeff, V., Kakese, K., Barsan, N., Mosnegutu, E., Tomozei, C. (2014). Municipal waste management in Limete, Mont-Amba district of Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *Journal of Engineering Studies & Research – Volume 20 No. 2*, 39- 45.
- Hwang, J.J. (2010). Promotional policy for renewable energy development in Taiwan. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 14, 1079–1087.
- Ingenosahel (Groupement d'Ingénieurs Conseil du Sahel). (1998). Etude de Faisabilité d'une Valorisation des Résidus Agricoles et Agro-industriels comme Combustibles Domestiques au Sénégal. Rapport de synthèse. Projet Sénégal-Allemand Combustibles Domestiques.
- 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
- Jardin Botanique de Kisantu. Disponible sur : <http://www.kisantu.net/> lu le 31.05.2015
- Jarrige, R., Thivend, P., Beaufort, M- T., Bouyon, B. (1969). Action d'une Cellulase Fongique sur les Membranes et son Intérêt pour prévoir la digestibilité des plantes fourragères. *Annales de biologie animale, biochimie, biophysique*, 1969, 9 (2), pp.171-190.
- Jeffries, T.W. (1994). Biodegradation of lignin and hemicelluloses. In *Biochemistry of Microbial Degradation* (Ratledge, C.). Kluwer Academic Publishers, Netherlands, Ch. 8, 233-277.
- Jingura, R.M., Matengaifa, R. (2008) The potential for energy production from crop residues in Zimbabwe. *Biomass & Bioenergy* 32 (2008)1287–1292
- Jölli, D. & Giljum, S. (2005). Unused biomass extraction in agriculture, forestry & fishery. Sustainable Europe Research Institute (SERI) Sustainable Europe Research Institute (SERI). Vienna, Austria
- Journal Officiel, RDC. (1998). Décret-loi N°081 du 02 juillet 1998 portant organisation territoriale et administrative de la République Démocratique du Congo (WWW.LEGANET.CD).
- Journal Officiel, RDC. (2006). Constitution de la République Démocratique du Congo.
- Karas, P.A., Perruchon, C., Exarhou, K., Ehaliotis, C., Karpouzas D.G. (2011). Potential for bioremediation of agro-industrial effluents with high loads of pesticides by selected fungi. *Biodegradation* 22:215–228
- Kim, S. & Dale, B.E. (2004). Global potential bioethanol production from wasted crops & crop residues. *Biomass & Bioenergy*, 26, 361-365.
- Klass, D. (2004). Biomass for renewable energy & fuels. *Encyclopedia of energy*. Elsevier Inc., New York.
- Koopmans, A & Koppejan, J. (1997). Agricultural & forest residues-generation, utilization & availability. In *Regional consultation on modern applications of biomass* (FAO). Kuala Lumpur, Malasya.

- Koyazibo, A.Y.F. (2012). Kinshasa. La pollution urbaine et ses impacts sur la santé humaine. Exposé présenté à l'occasion de la journée mondiale de l'environnement. CERSA BYBLOS, Kinshasa.
- Kusekwa, M.A. (2013). Biomass Conversion to Energy in Tanzania: A Critique. In Arman., H., Yuksel, I. (2013). *New Developments in Renewable Energy*. 418 pages, Publisher: InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/52956>. Disponible sur <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/40651.pdf>
- Lang, E., Eller, G., Zadrazil, F. (1997). Lignocellulose decomposition & production of lignolytic enzymes during interaction of white rot fungi with soil microorganisms. *Microbial ecology*, 34, 1-10.
- Lau, C.B.S., Ho, C.Y., Kim, C.F., Leung, K.N., Fung, K.P., Tse, T.F., Chan, H.H.L., Chow M.S.S. (2004). Cytotoxic activities of *Trametes versicolor* (Yunzhi) extract on human leukemia & lymphoma cells by induction of apoptosis. *Life Sciences*, 75, 797–808.
- Lee, I-K., Seok, S-J., Kim W-G., Yun, B-S (2006). Diaporthin & Orthosporin from the Fruiting Body of *Daldinia concentrica*. *Microbiology* 34(1): 38-40.
- Lele, N.B., Kachaka, S.C., Lejoly, J. (2015). Effet de la fertilisation minérale, de l'épéage du manioc et des légumineuses à graines sur le rendement du manioc en culture associée et sur les propriétés d'un Arénoferralsols à Kinshasa/RDC. *Revue Scientifique et Technique Forêt et Environnement du Bassin du Congo*, 4, 24-35.
- Lelo, N.F. (2008). Kinshasa, Ville & Environnement. L'Harmattan, Paris.
- Lelo, N.F. (2011). Kinshasa, Planification & Aménagement. L'Harmattan, Paris.
- Liming, H. (2009). Financing rural renewable energy: A comparison between China & India. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13, 1096–1103.
- Lutzoni, F., Kauff, F., Cox, C.J., McLaughlin, D., Celio, G., Dentinger, B., Padamsee, M., Hibbett, D., James, T.Y., Baloch, E. (2004). Assembling the fungal tree of life: Progress, Classification, & Evolution of Subcellular Traits. *American journal of botany* 91(10): 1446–1480.
- Malherbe, S. & Cloete, T. E. (2002). Lignocellulose biodegradation: Fundamentals & applications. *Reviews in Environmental Science & Biotechnology*, 1 (2), 105-114.
- 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, & enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *International microbiology*, 8, 195-204.
- Mbungu, K.N., Mbo, A.J.B., Tunguni, D.M.J., Matenda, K.M., Leta, S.Z. (2004). *Etats des Lieux de l'Environnement en République Démocratique du Congo*. Ministère de l'environnement, Conservation de la Nature et Tourisme. Disponible en ligne sur : www.mecnt.cd/Download/TextesEnCours/DSRP.doc lu le 05.06.2011
- McKendry₁, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83, 37–46.
- McKendry₂, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): overview of biomass. *Bioresource Technology* 83, 47–54.

- Ministère du Plan-RDC. (2005). Monographie de la Ville de Kinshasa. 172p.
- Mshandete, A.M. & Cuff, J. (2008). Cultivation of three types of indigenous wild edible mushrooms: *Coprinus cinereus*, *Pleurotus flabellatus* & *Volvariella volvocea* on composted sisal decortications residue in Tanzania. African Journal of Biotechnology Vol. 7 (24), pp. 4551-4562. Available online at <http://www.academicjournals.org/AJB>
- Mshigeni, K.E. (2003). Africa's Mushrooms: A Neglected Bioresource whose Time has Come. *Discov. innov*, 15 (3/4).
- Mulaji, K.C. (2011). Utilisation des Composts de Biodéchets Ménagers pour l'Amélioration de la Fertilité des Sols Acides de la Province de Kinshasa (République Démocratique du Congo). Thèse de Doctorat. Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech.
- Müller, H. W. & Trösch, W. (1986). Screening of white-rot fungi for biological pretreatment of wheat straw for biogas production. *Appl Microbiol Biotechnol* 24: 180—185
- Murthy, P.S., Naidu MM. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products & value addition—A Review. *Resources, Conservation & Recycling*, 66. 45– 58.
- N'djambo. (2015). <http://www.espace-djambo.com/agence/circuits/circuit-jardin-botanique/>
- Ndembo, L.J. (2009). Apport des Outils Hydrogéo-chimiques et Isotopiques a la Gestion de l'Aquifère du Mont-Amba (Kinshasa / République Démocratique du Congo). Thèse de Doctorat. Université d'Avignon, 203p.
- Nigam, P., S., Gupta, N., Anthwal, A. (2009). Pre-treatment of Agro-Industrial Residues. In P. Singh nee' Nigam, A. Pandey (eds.), *Biotechnology for Agro-Industrial Residues*.
- O'Sullivan, A.C. (1997). Cellulose: the structure slowly unravels *CELLULOSE* 4, 173 - 207
- Oei, P. (2005). La culture des champignons à petite échelle : pleurotes, shiitakes et auriculaires. 1ère édition. Wageningen: Fondation Agromisa, CTA.
- Ohkuma, M., Meada, Y., Johjima, T. & Kudo, T. (2001). Lignin degradation & roles of white rot fungi: Study on an efficient symbiotic system in fungus-growing termites & its application to bioremediation. *Riken Review*, No. 42, 39–42.
- Osfac. (2015). Laboratoire de Cartographie Numérique de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa.
- Pandey, A. (2003). Solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13, 81–84.
- PERACOD. Le biocharbon, quelles stratégies choisir ? Vie n°11 Mai - Juin 2009.
- Pérez, J., Munoz-Dorado, J., Rubia, T., Martinez, J. (2002). Biodegradation & biological treatments of cellulose, hemicellulose & lignin: an overview. *International Microbiology*, 5, 53-63.
- Pham, P.N., Vinck, P., Weinstein, H. M. (2010). Human rights, transitional justice, public health & social reconstruction. *Social Science & Medicine*, 70, 98–105.

- PNUD/UNOPS, (1998). Monographie de la province de Kinshasa, République Démocratique du Congo.
- Pointing, S. B. (2001). Feasibility of bioremediation by white-rot fungi. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 57, 20-33
- Prasad, S., Singh, A., Joshi, H.C. (2007). Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial & urban residues. *Resources, Conservation & Recycling*, 50, 1–39.
- Province du Bas-Congo. Tourisme dans le Bas-Congo. Disponible sur : <http://www.kongocentral.net/tourisme-Bas-Congo.html> lu le 15.08.2015
- Rafrari, M. et Kabil, E.M. (2006). Design & Application of an Innovative Composting Unit for the Effective Treatment of Sludge & other Biodegradable Organic Waste in Morocco. Faculté des Sciences El Jadida, Université Chouaib Doukkali, Maroc.
- Raghavarao, K.S.M.S., Ranganathan, T.V., Karanth, N.G. (2003). Some engineering aspects of solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13, 127–135.
- Rahman, M.M., Lourenço, M., Hassim, H.A., Baars, J.J.P., Sonnenberg, A.S.M., Cone, J.W., Boever, J., Fievez, V. (2011). Improving ruminal degradability of oil palm fronds using white rot fungi. *Animal Feed Science and Technology*, 169, 157– 166.
- Rai, M., Tidke, G., Wasser, S. (2005). Therapeutic Potential of Mushrooms. *Natural Product Radiance*. Vol 4 (4).
- Reddy, G.V., Babu, P.R., Komaraiah, P., Roy, K.R.R.M., Kothari, I.L. (2003). Utilization of banana waste for the production of lignolytic and cellulolytic enzymes by solid substrate fermentation using two *Pleurotus* species (*P. ostreatus* and *P. sajor-caju*). *Process Biochemistry*, 38, 1457-1462.
- Reddy, N. & Yang, Y. (2005). Biofibers from a agricultural byproducts for industrial applications. *Trends in Biotechnology*, (23) 1. Faculty Publications - Textiles, Clothing & Design. Paper 28. Lu le 11.10.2011 au site web : http://digitalcommons.unl.edu/textiles_facpub/28
- Revankar, S.M. & Lele, S.S. (2006). Enhanced production of laccase using a new isolate of white rot fungus WR-1. *Process Biochemistry*. Volume 41 (3), 581-588.
- Rigas, F., Papadopoulou, K., Philippoussis A., Papadopoulou M., Chatzipavlidis J. (2009). Bioremediation of Lindane Contaminated Soil by *Pleurotus ostreatus* in Non Sterile Conditions Using Multilevel Factorial Design. *Water Air Soil Pollut* 197:121–129.
- Robert A., Blanchette, A.R., Burnes, A.T., Leatham, F. G., Effland, M. (1988). Selection of white-rot fungi for biopulping .*Biomass*. Volume 15, Issue 2, Pages 93–101.
- Sachetto, J.P., Armanet, J.M., Roman, A., Johansson, A. (1987). The Fractionation of Lignocellulosics for the Production of Chemicals. In Van Der Meer, J.M., Rijkens, B.A., Ferranti, M.P. *Degradation of Lignocellulosics in Ruminants & in Industrial Processes*. Elsevier Applied Sciences. London & New-York.
- Saha, B.C. (2003). Hemicellulose bioconversion. *LJ Ind Microbiol Biotechnol*, 30: 279–291.

- Salvachúa, D., Prieto, A., López-Abelairas, M., Lu-Chau, T., Martínez, Á. T., Martínez M. J. (2011). Fungal pretreatment: An alternative in second-generation ethanol from wheat straw. *Bioresource Technology* 102: 7500–7506
- Sanchez C. (2009). Lignocellulosic residues: Biodegradation & bioconversion by fungi. *Biotechnology Advances*, 27: 185–194.
- Sanchez, P. (1990). Procédé de production de sirop de xylose par hydrolyse acide de sorgho. Thèse de Doctorat INP Toulouse.
- 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
- Schure, J., Mvondo, S.A, Awono, A., Ingram, V., Lescuyer, G., Sonwa, D., Somorin, O. (2010). L'état de l'art du bois énergie en RDC : Analyse institutionnelle et socio économique de la filière bois énergie. CIFOR Bureau Regional Afrique Centrale, Yaoundé, Cameroun. <http://projets.cirad.fr/makala>
- Semeki, N., J. Impacts de l'agriculture itinérante sur brulis dans la station phytotechnique de N'djili Brasserie à Kinshasa : système d'évaluation environnementale de battelle. Disponible sur : http://www.sifee.org/static/uploaded/Files/ressources/actes-des-colloques/angers/theme-2-seance-1/4_Semeki_comm.pdf consulté le 14 avril 2014
- Sharma, R.K. & Arora, D.S. (2010). Changes in biochemical constituents of paddy straw during degradation by white rot fungi & its impact on in vitro digestibility. *Journal of Applied Microbiology* 109, 679–686.
- Singh, J., Panesar, B.S., Sharma, S.K. (2008). Energy potential through agricultural biomass using geographical information system—A case study of Punjab. *Biomass & Bioenergy*, 32, 301 – 307.
- Singhania, R.R., Patel, A.K., Soccol, C.R., Pandeya, A. (2009). Recent advances in solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 44, 13–18.
- Sivrikaya, H., Peker, H. (1999). Cultivation of *Pleurotus florida* on Forest & Agricultural Wastes By Leaves of Tree & Wood Waste. *Tr. J. of Agriculture & Forestry* 23, 585-596.
- Smith, J. F., Fermor, T. R. & Zadrazil, F. (1988). Pretreatment of lignocellulosics for edible fungi. In *Treatments of Lignocellulosics with White Rot Fungi* (Zadrazil, F., Reniger, P.). Elsevier Applied Science Publishers Ltd, London, Ch.1, 3-13.
- Smith, J.E., Rowan, N.J., Sullivan, R. (2002). Medicinal mushrooms: a rapidly developing area of biotechnology for cancer therapy & other bioactivities. *Biotechnology Letters* 24: 1839–1845.
- SNSA Ministère de l'Agriculture – RDC, 2013. Annuaire des Statistiques Agricoles de la RDC de 2006-2011
- Taherzadeh, M.J. & Karimi, K. (2008). Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol & Biogas Production: A Review. *Int. J. Mol. Sci.*, 9, 1621-1651.
- Thiébaud, S. (1995). Valorisation Chimique de Composés Lignocellulosiques : Obtention de Nouveaux Matériaux. Thèse de Doctorat. l'Institut National Polytechnique de Toulouse, p. 125.

- Thioune, L. (2009). Le biocharbon dans la politique énergétique du Sénégal. Programme pour la Promotion des Energie Renouvelables, de l'électrification rurale et de l'approvisionnement durable en combustibles domestiques. Vie N°11 Mai - Juin, 1-12. Disponible sur www.peracod.sn
- Tidke, G., Wasser, S.P. (2005). Therapeutic potential of mushrooms. *Natural Product Radiance*. Vol 4 (4), 246-257.
- Tollens, E. (2004). Les défis : Sécurité alimentaire et cultures de rente pour l'exportation. Table Ronde sur l'Agriculture en RDC. Kinshasa. Disponible sur www.rdfs.net/linked-docs/RDC/Annexe7_Tollens.doc Lu le 03 avril 2010
- Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., Itavaara, M. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*, 72, 169-183.
- Tuor, U., Winterhalter, K., Fiechter, A. (1995). Enzymes of white-rot fungi involved in lignin degradation & ecological determinants for wood decay. *Journal of Biotechnology* 41, 1-17.
- UN OCHA, (2012). RD Congo. Province de Kinshasa. Carte administrative. Disponible sur :
<http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/RDCongo%20Reference%20Map%20-%20Province%20de%20Kinshasa%20-%20Carte%20administrative%20%28Mars%202012%29.pdf>
- Vanhulle, S (2008). White Rot Fungi in Bioremediation of Dyes. Thèse doctorat. Faculté d'Ingénierie Biologique, Agronomique et Environnementale. Université Catholique de Louvain.
- Vanhulle, S., Radman, R., Parra, R., Cui, T., Bols, A-M., Tron, T., Sannia, G & Keshavarz, T (2007). Effect of mannan oligosaccharide elicitor & ferulic acid on enhancement of laccases production in liquid cultures of basidiomycetes. *Enzyme & Microbial Technology*, 40 (7). pp. 1712-1718.
- Vermirris, W. (2008). Composition & Biosynthesis of Lignocellulosic Biomass. In *Genetic Improvement of Bioenergy Crops* (Vermirris W.). Springer Science & Business Media, Florida Gainesville, Chap. 4, 89-142.
- Waldner, R. (1987). Lignolytic system of white-rot fungi. Thèse de doctorat, Eidgenössischem Technischem Hochschule, ZurichH, microfiche.
- Wasser, S. P, Weis, A. L. (1999). Medicinal Properties of Substances Occurring in Higher Basidiomycetes Mushrooms: Current Perspectives. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, Vol 1, 47-50.
- Wasser, S.P. & Weis A.L. (1999). Medicinal Properties of Substances Occuring in Higher Basidiomycetes Mushrooms: Current Perspectives (Review). *International Journal of Medicinal Mushrooms*, Vol. 1, 31-62.
- Weirtz, J.L. (2010). La Lignine. Note de synthèse. AgroBioTech, Gembloux.
- Weizhang, Z., Zhongzhi, Z., Wei, Q., Pengcheng, F., Man, L. (2011). Comparison of chemical & biological pretreatment of corn straw for biogas production by anaerobic digestion. *Renewable Energy*, 36, 1875-1879.
- Wesenberg, D., Kyriakides, I., Agathos, S.N. (2003). White-rot fungi & their enzymes for the treatment of industrial dye effluents. *Biotechnology Advances*, 22, 161-187

- Wong, W. S. D. (2009). Structure and action mechanism of ligninolytic enzymes. *Applied biochemistry & biotechnology*, 157, 174-209.
- Xiaoyu Zhang, X., Yu, H., Huang, H., Liu Y. 2007. Evaluation of biological pretreatment with white rot fungi for the enzymatic hydrolysis of bamboo culms *International Biodeterioration & Biodegradation* 60, 159–164.
- Zadrazil, F. (1987). White-rot Fungi & Mushrooms grown on cereal Straw: Aim of the Process, Final Products, Scope for the Future. In Van Der Meer, J.M., Rijkens, B.A., Ferranti, M.P. *Degradation of Lignocellulosics in Ruminants & in Industrial Processes*. Elsevier Applied Sciences. London & New-York.
- Zadrazil, F., Reniger, P. (1988). *Treatments of Lignocellulosics with White Rot Fungi*. Elsevier Applied Science Publishers Ltd, London, pp. 120.
- Zhang, X., Yu, H., Huang, H., Liu, Y. (2007). Evaluation of biological pretreatment with white rot fungi for the enzymatic hydrolysis of bamboo culms *International Biodeterioration & Biodegradation* 60 (2007) 159–164.
- Zhong, J-J., Xiao, J-H. (2009). Secondary Metabolites from Higher Fungi: Discovery, Bioactivity, & Bioproduction. *Advances in Biochemical Engineering / Biotechnology* Volume 113, pp 79-150.
- Zhong, W., Zhang, Z., Qiao, W., Fu, P., Liu, M. (2011) .Comparison of chemical & biological pretreatment of corn straw for biogas production by anaerobic digestion. *Renewable Energy* 36 (2011).
- Zulfadhly Z., Mashitah M.D., Bhatia S. (2001). Heavy metals removal in xed-bed column by the macro fungus *Pycnoporus sanguineus*. *Environmental Pollution* 112, 463.

ANNEXES

Fiche 2/1 Questionnaires pour les producteurs agricoles



UNIVERSITE DE KINSHASA

FACULTE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

QUESTIONNAIRE D'ENQUETE CONCERNANT LES EXPLOITANTS DU **DOMAINE
D'AGRICULTURE DANS LES DIFFERENTS QUARTIERS DE KINSHASA**

A. IDENTIFICATION DE L'EXPLOITANT

1. Sexe : Masculin Féminin
2. Etat-civil : Marié(e) Célibataire Divorcé (e) Veuf (ve)
3. Age :
4. Niveau d'études : Analphabète Primaire Secondaire Supérieur universitaire
5. Av (domicile) :.....
6. Quartier:.....
7. Commune :.....
8. Province :.....
9. Activité principale :.....Autres.....

B. ADRESSE D'ACTIVITE DE L'EXPLOITANT

10. Av :
11. Quartier :
12. Commune :

C. AGRICULTURE

13. Quel (s) types de production faites-vous ?.....
14. Quel matériel végétal utilisez-vous ? graine bouture
15. Quelle quantité des semences ou boutures utilisez-vous par plate bande par culture?.....
16. Combien faites-vous de plates-bandes par semis ?
17. Combien de fois semez-vous par an ?.....
18. Utilisez-vous les fertilisants du sol ? Oui Non
19. Si oui lesquels..... et en quelle quantité (par plate-bande
.....
20. Utilisez-vous aussi les engrais chimiques ? Oui Non. Si oui, lesquels.....
..... en quelle quantité.....
21. Comment procédez-vous à la fertilisation ?.....
22. Quelle est, généralement, la quantité de votre production par plate-bande et par culture ?.....
23. Combien de fois récoltez-vous par année et par culture.....
24. La production est-elle transportée au marché, à la maison ou vendue sur place ?.....
25. Après la récolte, la production est-elle emportée de la terre ou reste-t-il des résidus ?
.....

26. En quelle quantité par plate-bande, approximativement ?.....
27. A quoi servent ces résidus, généralement ?
28. Il y a aussi des résidus qui ne sont pas utilisés ? Oui Non
29. Lesquels et pouvez-vous en évaluer la quantité ?.....
30. Que faites-vous des résidus non
utilisés ?.....
31. Que penseriez-vous d'une initiative de collecte de ces résidus en vue de leur
revalorisation (**PETITE EXPLICATION SUR**
L'OBJECTIF)?.....
32. Selon vous que peut-on en faire de plus ?
33. Avez-vous enregistré quelques problèmes (d'espace, de maladie ou autre) à cause de
la présence de ces résidus ?.....

Merci pour votre collaboration

L'Enquêteur

Date : le...../...../2011

Fiche 2/2 Questionnaires pour les agro-industriels



UNIVERSITE DE KINSHASA

FACULTE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

QUESTIONNAIRE D'ENQUETE SUR L'UTILISATION DES RESIDUS AGRICOLES ET SYLVICOLES DANS LES ENTREPRISES AGRICOLES, AGROFORESTIERES ET INDUSTRIELLES DE KINSHASA

Cher(e) Monsieur/Madame, dans le cadre de la valorisation des résidus agricoles et sylvicoles produits dans la ville de Kinshasa et dans ses environs, il vous est prié d'apporter votre contribution à travers vos réponses aux questions posées ci-dessous. Nous vous remercions pour votre disponibilité.

Nom de l'entreprise :

Catégorie : ferme ----- agro-industrie ----- agroforesterie -----scierie -----autre (à préciser)

Adresse de l'entreprise :

Principales productions :

Principales matières premières d'origine agricole et sylvicole entrant dans les processus de production/manufacture :

Origines (pays, province) des matières premières :

Statistiques mensuelles ou annuelles (des 5 dernières années et selon la disponibilité) de réception de différents types de matière première

En période de forte et/ou faible production, quelle est la quantité de matière première, par jour, qui entre dans le processus de production ?

Au cours du processus de production/manufacture, y a-t-il production des résidus (déchets) ?

Pour 100 kg de matière première, combien de kg de résidus sont-ils produits, selon les étapes du processus de fabrication :

Concrètement, quelle est la quantité maximale, minimale et moyenne de résidus produits par jour ?

Principaux usages des résidus :

Pour 100 kg de résidus produits, environ combien de kg de résidus restent inutilisés :

Principales difficultés inhérentes à la gestion des résidus non utilisés :

Selon vous, existe-t-il une ou des possibilités de valorisation des résidus non inutilisés ?

Lesquelles ?

Merci pour votre collaboration

L'Enquêteur

Date : le...../...../2011

Tableau 3/1. Production agricole et agro-industrielle à Kinshasa et en RDC de 2009 à 2011

Denrée alimentaire	Quantité (x1000T)							
	Kinshasa				RD Congo			
	2009	2010	2011	Moyenne	2009	2010	2011	Moyenne
Maïs	13,27	13,28	13,28	13,28	3421	3705	3742	3622,67
Riz paddy	2,14	2,15	2,15	2,15	932	989	1019	980,00
Manioc	10,55	10,57	10,60	10,57	44267	46121	46582	45656,67
Patate douce	1,61	1,63	1,66	1,63	661	693	700	684,67
Igname	0,30	0,30	0,31	0,30	253	283	291	275,67
Haricot	0,14	0,14	0,14	0,14	321	345	348	338,00
Niébé (mbuéngi)	1,23	1,26	1,29	1,26	60625	62125	63662	62137,33
Pois cajan	0,29	0,29	0,30	0,29	5853	5904	5957	5904,67
Voandzou	2,00	2,00	2,00	2,00	27	29	30	28,67
Arachide	2,67	2,67	2,67	2,67	1065	1178	1190	1144,33
Soja	0,52	0,54	0,56	0,54	42	46	47	45,00
Banane douce	1,08	1,08	1,09	1,08	930,00	1116	1149	1065,00
*Café robusta					31,87	31,84	42,43	35,38

* plante commerciale non cultivée à Kinshasa mais dont le fruit (café) y est usiné

Tableau 3/2. Répartition de la production agricole par commune agricole dans la ville de Kinshasa

Commune	Production moyenne de 2009 à 2011 (T/an)												
	Maïs	Riz paddy	Manioc	Patate douce	Igname	Haricot	Niébé	Pois-cajan	Voandzou	Arachide	Soja	Banane douce	Total
Mont-Ngafula		120	1034	128,33	105	25,67	198,33	41		210,67		532	2395
Ngaliema	2313										331		2644
Ndjili	133			13		7	96	16		9,67		216	490,67
Masina		1052		14		3	27,33	15,33		18,67		168	1298,33
Kimbaseke	58	16	237	16,33						29		168	524,33
N'sele	2739,7	958	1946	297,33		16	132	36		438			6563,03
Maluku	8033,3		7356,67	1235	199	90	806	191	2	1962	209,33		20084,30

Source SNSA Ministère de l'Agriculture RDC, 2013

Tableau 3/3. Productions de l'industrie du bois en RDC de 2009 à 2011

Produit de la transformation du bois	Quantité par année (m ³)				Quantité par année (T)			
	2009	2010	2011	Moyenne	2009	2010	2011	Moyenne
Tranchages	3542,90	3649,20	3792,60	3661,57	708,58	729,84	758,52	732,31
Placages	683,00	703,50	726,40	704,30	136,60	140,70	145,28	140,86
Bois sciés	40538,10	24950,90	33430,60	32973,20	8107,62	4990,18	6686,12	6594,64
Contreplaqués	683,00	703,50	726,40	704,30	136,60	140,70	145,28	140,86
Grumes	238111,00	451167,00	406700,00	365326,00	47622,20	90233,40	81340,00	73065,20

See : BCC-RDC, 2012

Les valeurs de production des dérivés de l'industrie du bois sont fournies en m³/an, leur conversion en T/an est obtenue en multipliant par la masse spécifique apparent de 0,2T/m³ (map) (GuidenR bois-énergie, 2010).

Tableau 3/4. Produits de la sylviculture en RDC de 2009 à 2011

Produit de la sylviculture	Quantité (x1000T)							
	Kinshasa*				RDC ⁺			
	2009	2010	2011	Moyenne	2009	2010	2011	Moyenne
Bois de chauffage	-	490	-		66659	70991	73121	70257,00
Charbon de bois	-	60,83	-		2565	2778	2861	2734,67
Total								

⁺BCC-RDC, 2012

*Schure et al., 2010

En dépit de l'existence des produits de l'industrie du bois et de la sylviculture à Kinshasa, il n'a pas été possible de trouver les statistiques officielles de leurs productions au niveau provincial.

	12% sciure								
Contreplaqués	45% copaux 5% sciure								
Grumes	40%								

* valeur RPR des haricots secs parce que RPR du produit concerné non disponible

Les RPR ci-dessus ont été appliqués pour la quantification des résidus agricoles générés dans 16 pays asiatiques et au moins 46 pays africains. Ils permettent d'évaluer les quantités de résidus générés par l'activité agricole, agro-industrielle, forestière et de l'industrie du bois. Par ailleurs, parmi les rares auteurs qui ont tenté de quantifier les résidus agricoles produits en RDC, Cooper & Laing (2007) ont utilisé les valeurs de RPR données par Koopmans & Koppejan (1997) pour déterminer les quantités des résidus de riz, maïs et de la canne à sucre générés en 1998 en RDC.

Figures 4/1. Macromycètes récoltés à la Station Phytotechnique de la Faculté des Sciences Agronomiques de Ndjili Brasserie



Planche 1



Planche 2



Planche 3



Planche 4



Planche 5



Planche 6

Légende

N° Planche	Description	N° Planche	Description
1	Une vue de la Station Phytotechnique de la FACAGRO	4	Espèce non identifiée
2	<i>Pycnoporus sanguineus</i> sur rameau de palmier	5	<i>Auricularia cornea</i> sur tronc mort
3	<i>Leucocoprinus cretaceus</i>	6	<i>Marasmius subrufotula</i> sur planche en bois

Figures 4/2. Macromycètes récoltés dans la Forêt du Lac de Ma Vallée



Planche 1



Planche 2



Planche 3



Planche 4



Planche 5



Planche 6



Planche 7



Planche 8



Planche 9



Planche 10



Planche 11



Planche 12



Planche 13



Planche 14



Planche 15



Planche 16



Planche 17



Planche 18



Planche 19

Légendes

N° Planche	Description	N° Planche	Description
1	Foret du lac de Ma Vallée	11	<i>Clytocybe sp.</i>
2	<i>Neonothopanus hygrophanus</i> sur tronc mort	12	<i>Microporus sp.</i>
3	<i>Marasmius subruforotula</i> sur tronc de palmier	13	<i>Pycnoporus sanguineus</i>
4	<i>Gymnopulus junionus</i>	14	<i>Auricularia cornea</i>
5	<i>Lentinus villosus</i> après récolte	15	<i>Trametes sp.</i>
6	<i>Ganoderma sp</i> sur <i>pentaclethra sp.</i>	16	<i>Lentinus villosus</i>
7	<i>Leucoagaricus sp.</i> après récolte	17	<i>Marasmiellus inoderma</i>
8	<i>Hexagonia tenuis</i>	18	<i>Tremella fuciformis</i>
9	<i>Agaricus sp.</i> après récolte	19	<i>Daldinia concentrica</i>
10	<i>Leucocoprinus cretaceus</i>		

Figures 4/3. Macromycètes récoltés au Jardin Botanique de Kisantu



Planche 1



Planche 2



Planche 3



Planche 4



Planche 5



Planche 6

Légende

N° Planche	Description	N° Planche	Description
1	<i>Trametes versicolor</i> sur tronc en décomposition	4	<i>Pleurotus tuber-regium</i>
2	<i>Collybia sp.</i>	5	<i>Gymnopulus junionus</i>
3	<i>Lentinus squarrosulus</i>	6	<i>Lentinus villosus</i>

Figures 4/4. Mise en culture sur substrat gélosé (PDA, SDA et MA2) des macromycètes récoltés dans les différents sites



Planche 1



Planche 2



Planche 3



Planche 4



Planche 5



Planche 6



Planche 7



Planche 8



Planche 9



Planche 10



Planche 11



Planche 12

Légende

N° Planche	Description	N° Planche	Description
1	<i>Lentinus villosis</i> sur MA2	7	<i>Trametes</i> sp. sur MA2
2	<i>Pycnoporus sanguineus</i> sur MA2	8	<i>Ganoderma</i> sp. sur MA2
3	<i>Gymnopulus junionus</i> sur MA2	9	<i>Trametes versicolor</i> sur MA2
4	<i>Marasmius subruforotula</i> sur PDA	10	<i>Auricularia cornea</i> sur PDA et MA2
5	<i>Armillaria</i> sp. sur PDA	11	<i>Daldinia concentrica</i> sur PDA et MA2
6	<i>Agaricus</i> sp. sur PDA	12	<i>Pycnoporus sanguineus</i> sur PDA

Figures 4/5. Mise en culture sur blanc final des macromycètes récoltés sur les trois sites de recherche



Planche 1



Planche 2



Planche 3



Planche 4



Planche 5



Planche 6



Planche 7



Planche 8



Planche 9



Planche 10

Légende

N° Planche	Description	N° Planche	Description
1	<i>Schizophyllum commune</i>	6	<i>Pycnoporus sanguineus</i>
2	<i>Marasmius subruforotula</i>	7	<i>Marasmiellus inoderma</i>
3	<i>Neonothopanus hygrophanus</i>	8	<i>Daldinia concentrica</i>
4	<i>Trametes versicolor</i>	9	<i>Auricularia cornea</i>
5	<i>Lentinus squarrosulus</i>	10	Blancs fins de quelques mycéliums de wrf prêts pour la biodégradation

Figures 5/1. Perte de masse sèche enregistrée au cours de la dégradation des résidus lignocellulosiques causée par quelques espèces de white-rot fungi

Légende des tableaux :

Résidus :

- SB : sciure de bois ;
- CC : parche de café ;
- BR : balle de riz ;
- CA : coque d'arachide.

Champignons de pourriture blanche :

- CV : *Trametes versicolor* ;
- PSC : *Pleurotus sajor-caju* ;
- Lsp : *Lentinus cladopsus* ;
- L.Sq : *Lentinus squarrosulus* ;
- T.Sp : *Trametes sp.*
- NH : *Neonothopanus hygrophanus*

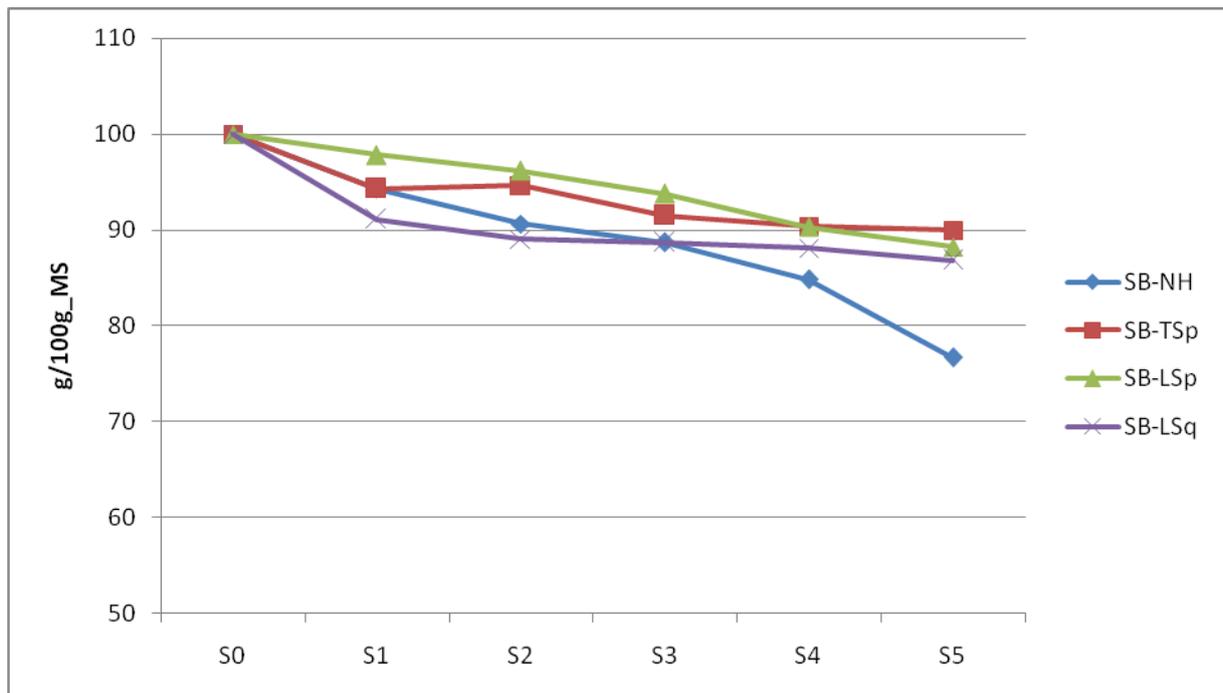


Figure 1 : Perte de masse sèche au cours de la dégradation fongique de la sciure de bois

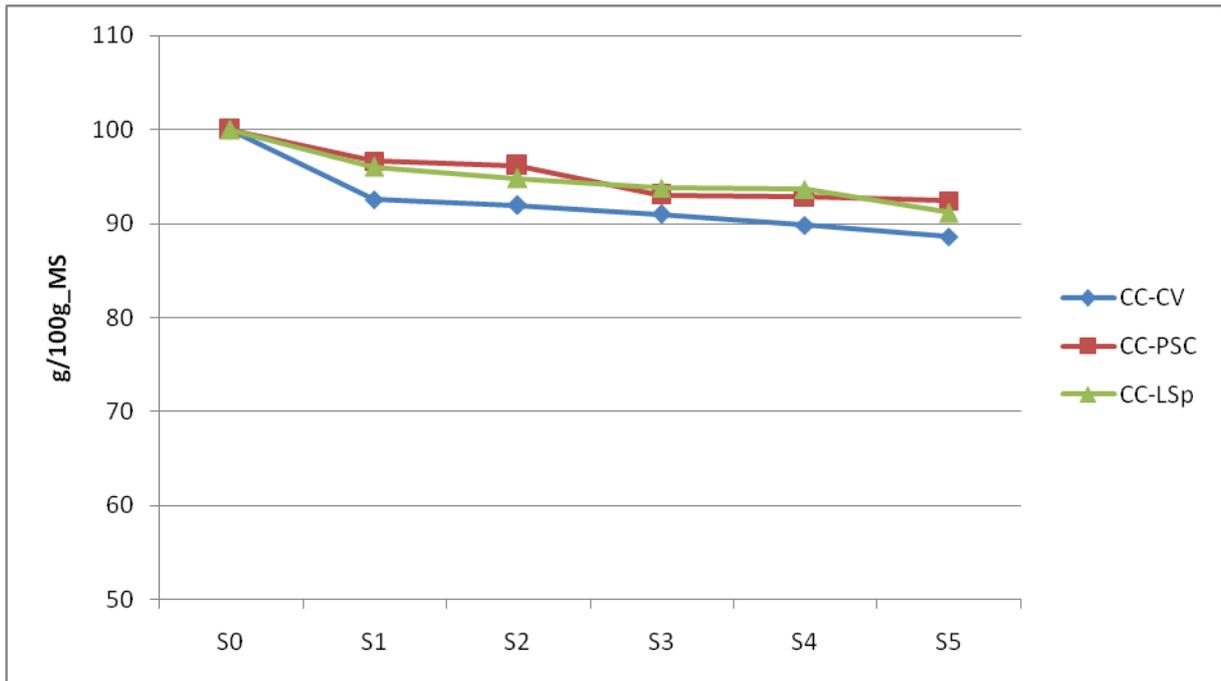


Figure 2 : Perte de masse sèche au cours de la dégradation fongique des parches de café

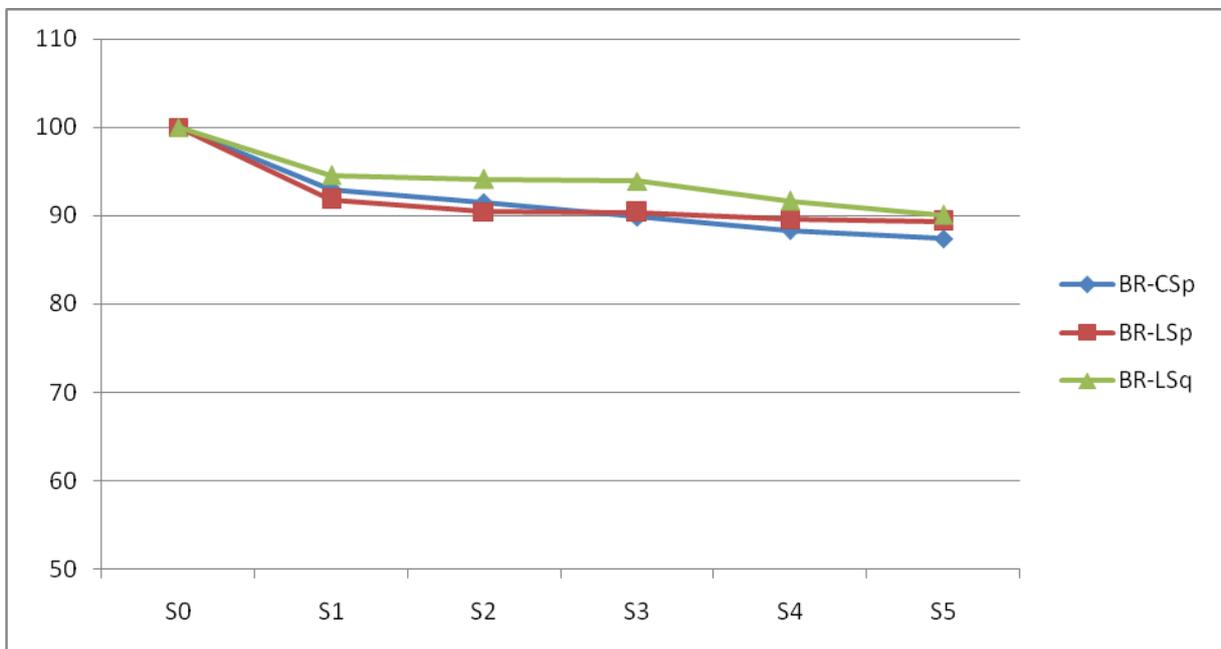


Figure 3 : Perte de masse sèche au cours de la dégradation fongique des balles de riz

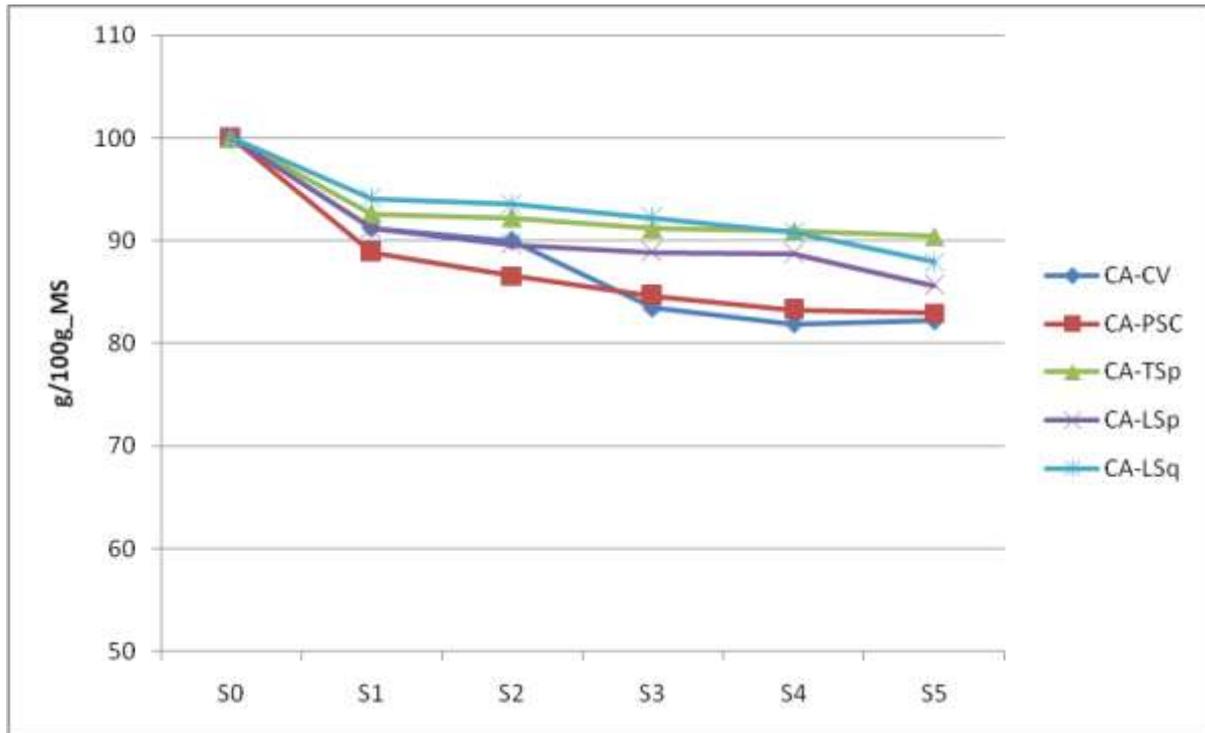


Figure 4 : Perte de masse sèche au cours de la dégradation fongique des gousses d'arachide

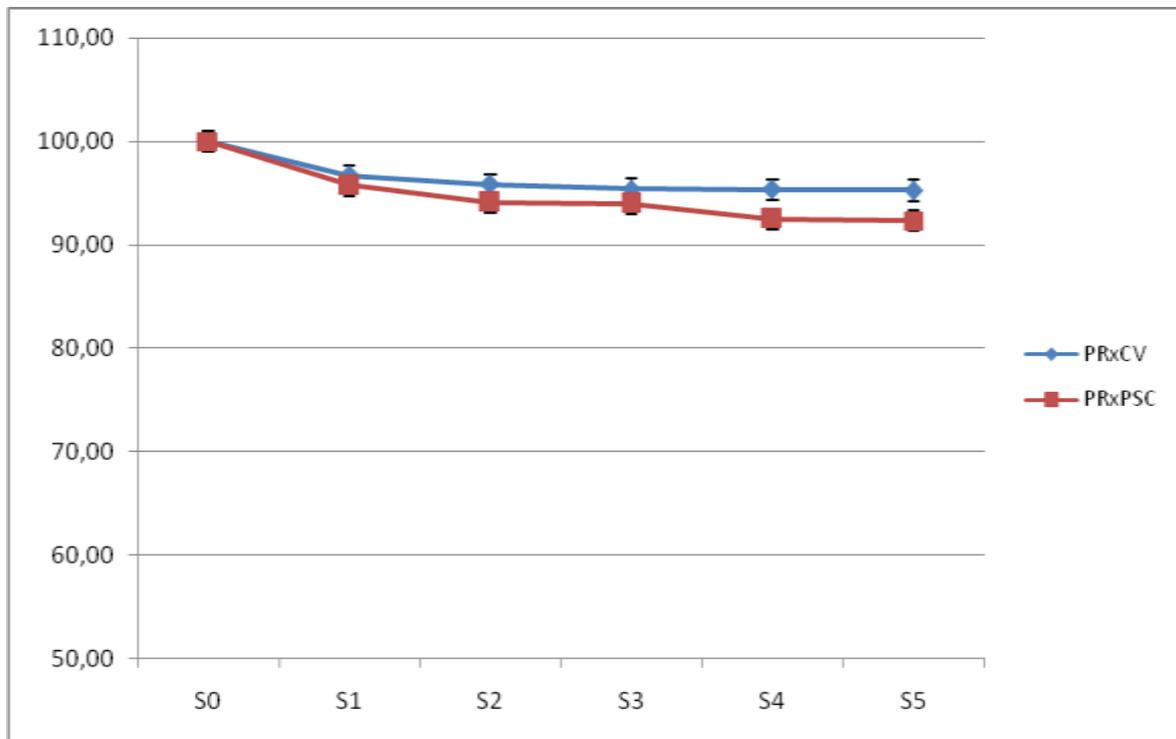


Figure 5 : Perte de masse sèche au cours de la dégradation fongique de la paille de riz

Publications 6/1 Les articles scientifiques relatifs à la thèse

1. Bangala, D.B.M., Masimango, N.T. (2014). Revue bibliographique sur les aspects pratiques de la valorisation des résidus lignocellulosiques par la digestion fongique. *Revue Congo Sciences*, 2(2), 61-74. Disponible sur : <http://www.congosciences.cd/congosciences2014/images/journal/journal/a0083.pdf>
2. Bangala, D.B.M., Kanyanga, M.P., Kabamba, N., Masimango, N.T. (2015). Nécessité d'une gestion des résidus agricoles et agro-industriels à Kinshasa. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 9(4), 2234-2248. Disponible sur : <http://www.ajol.info/index.php/ijbcs/article/view/127185>
3. Bangala, M., Lumpungu, K., Sumbu, Z., Kizungu, V., Dibaluka, M., Ngombe, K., Luyindula, N., Gerin, P., Masimango, N. (2015). Revue de la Littérature sur les Principales Méthodes de Valorisation des Résidus Lignocellulosiques. *Revue Congolaise des Sciences Nucléaires*, 28, 36-55.