



Effets calorique, agronomique et environnemental d'une ligne de biochar dans les usines de transformation du bois des concessions forestières d'Afrique centrale

Rapport de synthèse



EticWood

Octobre 2023

www.eticwood.com

Avenue de Tervueren, 204/1
1150 Bruxelles - Belgium



Rapport réalisé avec l'appui technique du bureau d'étude Sense Engineering





Table des matières

1. Introduction	12
2. Principales activités réalisées	13
2.1. Recherche documentaire	13
2.2. Rencontres avec les principaux acteurs	14
2.3. Visite des sites forestiers des entreprises partenaires	19
3. Description des technologies permettant la production de biochar et d'énergie	20
3.1. Pyrolyse	21
3.2. Pyrogazéification	23
4. Élaboration des solutions techniques	24
4.1. Rappel des définitions, notions et unités	24
4.1.1. Puissance et énergie	24
4.1.2. Pouvoir calorifique	24
4.1.3. Charge de base	25
4.1.4. Plaquettes forestières	25
4.1.5. Volume de bois, volume apparent et foisonnement	25
4.1.6. Masse volumique et densité	25
4.1.7. Broyeur	25
4.1.8. Séchoir à plaquettes	26
4.2. Approche utilisée pour l'élaboration des solutions techniques	27
4.2.1. Établissement des scénarios	27
4.2.2. Schéma de base des flux de bois et d'énergies	29
4.2.3. Hypothèses et choix stratégiques	32
4.2.4. Sélection des constructeurs	37
4.3. Description des solutions techniques par site	38
4.3.1. CIB - Enyéllé	39
4.3.2. CEB - Bambidie	44
4.3.3. GSEZ - Lambaréné	49
4.3.4. Pallisco - Mindourou	55
5. Certification carbone	62
5.1. Certification carbone biochar	62
5.1.1. Le certificat européen de biochar (EBC)	63
5.1.2. Standard Puro	66
5.1.3. Verra VCS	70
5.1.4. Etat des lieux du marché	73
5.2. Certification CDM	75
5.2.1. Informations générales	75
5.2.2. Autorités nationales désignées	75
5.2.3. Entité opérationnelle désignée	75
5.2.4. Méthodologie CDM sélectionnée	76
6. Analyse financière	81
6.1. Hypothèses et choix stratégiques	81
6.1.1. Capex	81
6.1.2. Opex	86
6.1.3. Revenus	89
6.1.4. Indicateurs financiers	90
6.2. Résultats par solution et par site	92
6.2.1. CIB-Enyéllé	92
6.2.2. CEB - Bambidie	95
6.2.3. GSEZ – Lambaréné	98
6.2.4. Pallisco - Mindourou	101



6.3.	Investisseurs.....	104
6.3.1.	Les fonds d'investissement.....	104
6.3.2.	La génération et la vente de crédits carbone.....	110
7.	Débouchés du biochar.....	116
7.1.	Synthèse des connaissances.....	116
7.1.1.	Généralités.....	116
7.1.2.	Avantages du biochar pour l'action climatique.....	117
7.2.	Le biochar dans les Agrosystèmes.....	119
7.2.1.	Modalité de mélange du biochar avec des engrais et application.....	119
7.2.2.	Calcul du rayon d'utilisation.....	121
7.2.3.	Bénéficiaires potentiels.....	122
7.2.4.	Perspectives de développement.....	122
7.3.	Autres débouchés.....	126
7.4.	Contribution du biochar aux objectifs des certifications FSC et PAFC.....	127
7.4.1.	FSC.....	127
7.4.2.	PAFC.....	129
8.	Conclusions.....	130
9.	Bibliographie.....	131
10.	Annexes.....	138



FIGURES

Figure 1 – Températures pour les réactions thermiques de pyrolyse et pyrogazéification	20
Figure 2 – Curseur production d'énergie - production de biochar et technologies associées	20
Figure 3 - Le procédé de pyrolyse et ses produits (European Biochar Industry [2])	21
Figure 4 – Schéma du cycle organique de Rankine (crédit image : Enogia)	22
Figure 5 – Mécanismes de la gazéification [5]	23
Figure 6 – Schéma des deux scénarios envisagés	28
Figure 7 – Schéma de base du procédé industriel de pyrolyse	30
Figure 8 - Schéma de base du procédé industriel de pyrogazéification	31
Figure 9 - Flux de bois et consommations de gasoil du site de la CIB à Enyéllé, situation future	39
Figure 10 - Schéma de la solution 3R Systems du site d'Enyéllé – Scénario A	41
Figure 11 – Schéma de la solution Arti du site d'Enyéllé – Scénario A	42
Figure 12 - Schéma de la solution Energy&+ du site d'Enyéllé – Scénario B	43
Figure 13 - Flux de bois et consommations de gasoil du site de la CEB à Bambidie	44
Figure 14 – Schéma de la solution 3R Systems du site de la CEB – Scénario A	46
Figure 15 – Schéma de la solution Arti du site de la CEB – Scénario A	47
Figure 16 – Schéma de la solution Energy&+ du site de la CEB – Scénario B	48
Figure 17 - Flux bois et gasoil du site de GSEZ à Lambaréné.....	49
Figure 18 - Schéma de la solution 3R Systems du site le Lambaréné – Scénario A.....	51
Figure 19 – Schéma de la solution Arti du site de Lambaréné – Scénario A	52
Figure 20 - Schéma de la solution Arti du site de Lambaréné – Scénario B	53
Figure 21 – Schéma de la solution Energy&+ du site de Lambaréné – Scénario B	54
Figure 22 - Flux bois et gasoil du site de Pallisco à Mindourou.....	55
Figure 23 - Schéma de la solution 3R Systems du site de Pallisco – Scénario A.....	58
Figure 24 - Schéma de la solution Arti du site de Pallisco – Scénario A.....	59
Figure 25 - Schéma de la solution Arti du site de Pallisco – Scénario B	60
Figure 26 - Schéma de la solution Energy&+ du site de Pallisco – Scénario B	61
Figure 27 – Limites évaluation du cycle de vie (ACV)	67
Figure 28 – Graphique des achats des CDR par volume annuel et méthode (gauche et droite respectivement), extraits du site cdr.fyi.....	73
Figure 29 – Graphique des émissions de CDR par volume annuel et méthode (gauche et droite respectivement), extraits du site cdr.fyi.....	73
Figure 30 – Crédits carbone de projets biochar délivrés sur la plateforme de Carbonfuture.	74
Figure 31 – Évolution du nombre de crédits carbone Puro.earth délivrés par année.....	74
Figure 32 – Diagramme d'un développement de projet de la conception jusqu'à l'inscription [31] ...	76
Figure 33 – Schéma du scénario de base et du scénario du projet (brochure des méthodologies CDM, p149 [32]).....	77
Figure 34 – Diagramme des VAN en fonction des différentes options pour chaque solution du site d'Enyéllé de la CIB	94
Figure 35 - Diagramme des VAN en fonction des différentes options pour chaque solution du site de Bambidie de la CEB	97
Figure 36 - Diagramme des VAN en fonction des différentes options pour chaque solution du site de Lambaréné de GSEZ	100
Figure 37 - Diagramme des VAN en fonction des différentes options pour chaque solution du site de Pallisco	103
Figure 38 – Bienfaits du biochar au niveau du sol et au niveau atmosphérique	117
Figure 39 –Parcelles de maïs en agriculture de conservation, photo prise après 2 mois (4 tonnes biochar/ha, biochar localisé par pied) par rapport à une référence à Kaoma, Ouest de la Zambie (photo de Gijs Breedveld).....	118
Figure 40 – Epandeur à buse	120

Figure 41 – Photographie des modules de pyrogazéification installés à Yangambi (crédit image : Energy&+)	142
Figure 42 - Carte mondiale des mécanismes de crédits carbone. En rouge, mécanisme en application ; en bleu, mécanisme en cours de développement.	191



TABLEAUX

Tableau 1 – Liste des échanges avec différents acteurs	15
Tableau 2 – Comparatif entre pyrolyse et pyrogazéification	20
Tableau 3 – Masses volumiques moyennes du bois frais hypothétiques des sites	33
Tableau 4 – Résultat du processus de sélection des différents constructeurs	37
Tableau 5 – Détail des scénarios A et B du site de la CIB à Enyéllé.....	40
Tableau 6 – Détails des scénarios A et B site de la CEB.....	45
Tableau 7 – Détails des scénarios A et B du site de la GSEZ à Lambaréné.....	50
Tableau 8 – Scénarios A et B site de Pallisco.....	56
Tableau 9 – Comparatif des différents standards de certification carbone.....	62
Tableau 10 - Coûts relatifs à chaque étape menant à l'obtention des labels EBC et C-Sink.....	64
Tableau 11 - Producteur "Mash Energy India Private Limited" certifié EBC	65
Tableau 12 - Producteur "Corigin Solutions Inc." certifié EBC	65
Tableau 13 - Coûts relatifs à chaque étape menant à l'obtention de la certification Puro	68
Tableau 14 - Projet « NetZero » certifié Puro.earth.....	69
Tableau 15 - Projet « Biochar from Nutshell and Wood Waste » certifié Puro.earth	69
Tableau 16 – Tableau de coûts de certification avec le standard Verra	71
Tableau 17 - Projet "Exomad Green's Riberalta" en cours de certification Verra VCS	72
Tableau 18 - Tableau de coûts de certification CDM	79
Tableau 19 - Projet "Wood waste-to-energy project at sawmill-25"	80
Tableau 20 – Prix d’achat (2022/2023) des machines de pyrolyse/pyrogazéification	81
Tableau 21 – Prix d’achat des broyeurs	83
Tableau 22 – Documents nécessaires à la mise en conformité de l’installation.....	85
Tableau 23 – Résultats à 20 ans de la solution 3R Systems à Enyéllé, broyeur Zhangsheng ZSGS-218, certification EBC.....	92
Tableau 24 - Résultats à 20 ans de la solution Arti à Enyéllé, broyeur Zhangsheng ZSGS-218, certification EBC.....	93
Tableau 25 - Résultats à 20 ans de la solution Energy&+ à Enyéllé, broyeur Zhangsheng ZSGS-218, certification Puro.earth	93
Tableau 26 - Résultats à 20 ans de la solution 3R Systems à la CEB, broyeur Jenz BA615E, certification Verra	95
Tableau 27 - Résultats à 20 ans de la solution Arti à la CEB, broyeur Jenz BA615E, certification EBC .	95
Tableau 28 - Résultats à 20 ans de la solution Energy&+ à la CEB, broyeur Zhangsheng ZSGS-218, certification Puro.earth	96
Tableau 29 - Résultats à 20 ans de la solution 3R Systems à Lambaréné, broyeur Jenz BA615D, certification Verra.....	98
Tableau 30 - Résultats à 20 ans de la solution Arti scénario A à Lambaréné, broyeur Jenz BA615D, certification Verra.....	98
Tableau 31 - Résultats à 20 ans de la solution Arti scénario B à Lambaréné, broyeur Jenz HE561, certification Verra.....	99
Tableau 32 - Résultats à 20 ans de la solution Energy&+ à Lambaréné, broyeur Zhangsheng ZSGS-218, certification Verra.....	99
Tableau 33 - Résultats à 20 ans de la solution 3R Systems à Pallisco, broyeur ZhangSheng ZSGS-218, certification EBC.....	101
Tableau 34 - Résultats à 20 ans de la solution Arti scénario A à Pallisco, ZhangSheng ZSGS-218, certification EBC.....	101
Tableau 35 - Résultats à 20 ans de la solution Arti scénario B à Pallisco, ZhangSheng ZSGS-218, certification EBC.....	102
Tableau 36 - Résultats à 20 ans de la solution Energy&+ à Lambaréné, broyeur Zhangsheng ZSGS-218, certification Puro.earth	102



Tableau 37 - Comparaison des différentes sources de financements	104
Tableau 38 - Fiche de présentation de Mirova	105
Tableau 39 - Fiche de présentation du fond SouthBridge.....	106
Tableau 40 - Fiche de présentation du fonds Proparco	107
Tableau 41 - Fiche de présentation du fonds FISEA.....	109
Tableau 42 - Prix minimum attendu des crédits carbone pour un retour sur investissements à 8 ans	110
Tableau 43 - Fiche de présentation de South Pole.....	111
Tableau 44 - Fiche de présentation de Forliance	113
Tableau 45 - Fiche de présentation de ENI	114
Tableau 46 - Fiche de présentation de Total Energie.....	115
Tableau 47 - Données disponibles sur les surfaces agricoles à Pallisco, à la CIB et à la CEB et nombre de ménages agricoles	122
Tableau 48 - Prix et rendement du manioc par pays (République du Congo – CIB, Gabon – CEB et Cameroun – Pallisco) avec et sans utilisation de biochar.....	123
Tableau 49 - Prix et rendement du cacao et du manioc par pays (République du Congo – CIB, Gabon – CEB et Cameroun – Pallisco) avec utilisation de biochar	123
Tableau 50 – Comparaison du FDL et du revenu additionnel grâce à l’utilisation de biochar	124
Tableau 51 – Nombre d’années de production de biochar pouvant être absorbé sur les surfaces agricoles rurales pour les solutions de pyrolyse rentables	124
Tableau 52 – Estimation des surfaces non brûlées en conséquence de l’amélioration de la fertilité des sols par application du biochar.....	125
Tableau 53 - Frais de service applicables en fonction du volume des CORCs générés annuellement et de leur prix de vente.....	159
Tableau 54 – Valeurs des coefficient c et m en fonction de la température du sol	160
Tableau 55 – Compte de résultats de la solution Arti, scénario A, broyeur Zhangsheng - ZSGS-218, certification biochar EBC	166
Tableau 56 - Compte de résultats de la solution Arti, scénario A, broyeur Jenz -BA615E, certification biochar EBC.....	168
Tableau 57 - Compte de résultats de la solution 3R Systems,, broyeur Jenz -BA615D, certification biochar Verra	170
Tableau 58 - Compte de résultats de la solution Arti, scénario A, broyeur Zhangsheng - ZSGS-218, certification biochar EBC	172
Tableau 59 - Coûts relatifs à l'analyse des rapports d'étude d'impact et à la catégorisation des installations classées.....	175
Tableau 60 - Récapitulatif des taxes et redevances pour l'exploitation d'une installation classée	176
Tableau 61 – Nomenclature des installations classées de la Loi N°003/91 sur la protection de l’environnement, relative aux centrales thermiques	176
Tableau 62 - Coûts de soumission/dépôt d'une EIE.....	184
Tableau 63 - Frais d'inspection et de contrôle des établissements de classe 1 et 2.....	185
Tableau 64 - Prix du droit de délivrance de l'autorisation d’exploitation ou du récépissé de déclaration.	186
Tableau 65 - Coefficient multiplicateur de la taxe annuelle à la pollution en fonction de la typologie et la quantité des rejets.....	186
Tableau 66 - Options pour les financements climat et carbone proposées dans la CDN du Gabon ..	190



ANNEXES

ANNEXE 1 : Présentation des constructeurs de pyrolyseurs.....	138
ANNEXE 2 : Présentation des constructeurs de Pyrogazéfiçiateurs.....	142
ANNEXE 3 : Comparatif des constructeurs de broyeurs	144
ANNEXE 4 : Calendrier de la mission	145
ANNEXE 5 : Questionnaire de collecte de données	147
ANNEXE 6 : Exigences additionnelles et modalités de calcul des crédits carbone des différentes certifications.....	152
ANNEXE 7 : Analyse financière – Compte de résultats (€)	166
ANNEXE 8 : Analyse des lois environnementales et réglementations nationales	174



Abréviations

ACV :	Analyse du Cycle de Vie
AND:	Autorité Nationale Désignée
AR:	Arrêté Royal
ARR:	Afforestation, Reforestation & Revegetation
ATG:	Analyse ThermoGravimétrique
CAB:	Cabinet
CAFI :	Initiative pour la Forêt d’Afrique centrale
CAISTAB:	Caisse de Stabilisation et de Péréquation
CAPEX :	Capital Expenditure
CCB:	Climate, Community & Biodiversity
CCNUCC:	Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CDM :	Clean Development Mechanism
CDN:	Contributions Déterminées Nationales
CDR :	Carbon Dioxyde Removal
CEC:	Capacité d’Echange Cationique
CENAREST :	Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique
CEO:	Chief Executive Officer
CER:	Carbon Emission Reduction
CFAD:	Concession Forestière sous Aménagement Durable
CFC:	Congo Forest Company
CFO:	Chief Finance Officer
CORC :	CO ₂ Removal Certificates
DGE :	Direction Générale de l’Environnement
EBC :	European Biochar Certificate
EES :	Évaluation Environnementale Stratégique
EFSA:	European Food Safety Authority
EIE(S) :	Études d’Impact Environnemental (et Social)
EOD:	Entité Opérationnelle Désignée
EPA:	Environmental Protection Agency
ESG:	Environnemental, Social and corporate Gouvernance
FAO:	Food & Agriculture Organization
FBA:	Fixation Biologique de l’Azote
FM:	Forest Management
FNC :	Forest Neutral Congo
FRCG:	Facilité de Renforcement des Capacités de Gouvernance
FSC :	Forest Stewardship Council
GES :	Gaz à Effet de Serre
GIEC:	Groupe d’Expertise Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat
HSE:	Hygiène, Sécurité, Environnement
HT :	Hors Taxe
IBI :	International Biochar Initiative
ICROA :	International Carbon Reduction and Offset Alliance
ISO:	International Organization for Standardization
I-TEQ:	Système d’Equivalence Toxique International
JNC:	Juridictions Non Coopératives
LCFP:	Luangwa Community Forests Project
LMR:	Lambaréné
MDDEFE:	Ministère du Développement Durable, de l’Environnement et d’Économie Forestière
MDP:	Mécanisme de Développement Propre



MEF:	Ministère des Eaux et Forêts/Ministère de l'Économie Forestière
MEFEPEPN :	Ministère de l'Économie Forestière, des Eaux, de la Pêche, chargé de l'Environnement et de la Protection de la Nature
MIME:	Ministère de l'Industrie Minière et de l'Environnement
MS:	Matière Sèche
NCS:	Natural Climate Solution
NIE :	Notice d'Impact Environnemental
OIT:	Organisation Internationale du Travail
OMS:	Organisation Mondiale de la Santé
ORC:	Organic Rankine Cycle
PAFC :	Pan-African Forest Certification
PAH:	Polycyclic Aromatic Hydrocarbon
PARSA:	Projet d'Appui à la Relance du Secteur Agricole
PCB:	PolyChlorinated Biphenyls
PCDD:	PolyChlorinated Dibenzodioxins
PCDF:	PolyChlorinated Dibenzofurans
PCI:	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS:	Pouvoir Calorifique Supérieur
PDD :	Project Design Document
PEFC:	Programme for the Endorsement of Forest Certification
PFBC :	Partenariat pour les Forêts du Bassin du Congo
PME:	Petites et Moyennes Entreprises
PR:	Présidence de la République
QA:	Quality Assurance
QC:	Quality Control
RDF:	Refuse Derived Fuel
REDD:	Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts
RSE:	Responsabilité Sociétale des Entreprises
SFI :	Sustainable Forestry Initiative
SGFD :	Système de Gestion Forestière Durable
TDR:	Termes De Référence
TNBS :	Total Nature Based Solution
VAN :	Valeur Actuelle Nette
VCS :	Verified Carbon Standard
VCUs:	Verified Carbon Units
VVB :	Validation & Verification Body
ZSGS :	Zhangsheng



1. INTRODUCTION

Le projet « Biochar for new forest concession model » (contrat C243) a pour objet d'évaluer la faisabilité de mise en place d'un projet de valorisation des déchets ligneux d'entreprises de première transformation de bois en Afrique Centrale, par la transformation par pyrolyse en biochar avec une production d'énergie.

Ce rapport de synthèse, marquant l'aboutissement de ce projet, se compose de six sections :

1. Une description de l'ensemble des activités menées dans le cadre de la convention ;
2. Une description des technologies permettant la production associée de biochar et d'énergie ;
3. L'élaboration des solutions techniques pour chacune des entreprises partenaire, intégrant :
 - a. Un rappel des principales définitions, notions et unités utilisées ;
 - b. La définition des scénarios « production de biochar » et « production d'énergie » ;
 - c. Le détail explicatif des schémas industriels de base ;
 - d. La présentation, pour chaque site et pour chaque scénario (« biochar » et « énergie »), des différentes solutions retenues par les entreprises partenaires sur la base du rapport intermédiaire, avec la quantification des flux à chaque étape (bois, électricité, chaleur) et les quantités obtenues en sortie pour les différents flux, accompagnés des paramètres, hypothèses, formules et conversion d'unités utilisées ;
4. La présentation du potentiel de certification carbone incluant les principaux standards, avec leurs exigences et feuilles de route respectives ;
5. Une analyse financière complète intégrant :
 - a. La présentation des différentes hypothèses et choix stratégiques au niveau CAPEX, OPEX et revenus ;
 - b. Les résultats obtenus par solution et par site ;
 - c. La présentation de plusieurs investisseurs potentiels ;
6. Une analyse des opportunités de débouchés pour le biochar dans les agrosystèmes et de sa contribution aux objectifs des certifications forestières FSC et PAFC.



2. PRINCIPALES ACTIVITÉS RÉALISÉES

2.1. RECHERCHE DOCUMENTAIRE

Ce travail repose sur une importante recherche documentaire transversale et approfondie sur l'ensemble des sujets prévus relatifs au biochar. Un résumé succinct des recherches effectuées sur les différents sujets est présenté ci-dessous :

- **Propriétés des bois (densité, humidité...)**

En amont de l'étude, une revue des principales propriétés des bois et des essences concernées a été menée. L'objectif principal étant d'affiner les connaissances relatives à la densité et à l'humidité des déchets de bois nécessaires aux conversions d'unités (chapitre 4.2.3) et à la sélection des technologies industrielles (chapitre 4.2.4).

- **Technologies de production de biochar et énergie**

La recherche documentaire s'est ensuite focalisée sur les technologies permettant la valorisation des déchets de scierie en biochar et/ou en énergie électrique. Parmi celles-ci, les procédés de pyrolyse (chapitre 3.1) et de pyrogazéification (chapitre 3.2) ont été étudiés en détail. Les autres technologies existantes de production d'énergie à partir de biomasse, ne permettant pas la production de biochar, ont été exclues car en dehors du champ d'application de cette étude.

- **Identification de constructeurs de pyrolyseurs et pyrogazéificateurs**

Sur la base des technologies sélectionnées, la recherche s'est focalisée sur les différents constructeurs de pyrolyseur et de pyrogazéificateurs. Cette récolte d'information s'est déroulée à la fois par la consultation des sites internet des constructeurs, mais également par des échanges directs d'emails et de réunions (chapitre 2.2). Ce travail a permis de mieux comprendre les différentes technologies et systèmes utilisés par les constructeurs mais également d'obtenir les spécifications techniques des modèles proposés. Celles-ci sont reprises en ANNEXE 1 et ANNEXE 2. La teneur des échanges avec chaque constructeur est résumée au Tableau 1.

- **Identification de constructeurs de broyeurs**

Les unités de pyrolyse et pyrogazéification sont dimensionnées pour transformer des déchets bois d'une certaine granulométrie, impliquant donc le broyage des connexes de scierie tels que dosses, délignures et chutes d'éboutage.

En conséquence, et afin de pouvoir proposer une solution technique complète aux entreprises forestières partenaires, des renseignements complémentaires ont été recherchés auprès de plusieurs constructeurs de broyeurs (chapitre 2.2). Ces recherches ont permis d'une part de rencontrer et d'échanger avec plusieurs entreprises et d'autre part, d'identifier les constructeurs présentant des modèles adaptés aux exigences des unités de pyrolyses/pyrogazéification (en termes de granulométrie) et aux caractéristiques des déchets de scierie en Afrique centrale (volume, densité, humidité).

La synthèse des informations collectées sur les modèles et constructeurs de broyeur est présentée en ANNEXE 3.



- **Revue bibliographique des publications liées au biochar**

Depuis quelques années, la recherche sur les potentielles utilisations du biochar, tant au niveau agronomique qu'industriel est en plein essor. Afin de mieux comprendre et appréhender les possibles utilisations finales du biochar, un ensemble de publications scientifiques a été consulté. Une attention particulière a été portée sur les aspects agronomiques en lien avec le potentiel de valorisation au niveau des systèmes agricoles observés dans et autour des concessions forestières des entreprises partenaires. Les résultats de cette analyse seront détaillés dans le rapport de synthèse.

- **Certification Biochar, exigences, contraintes et opportunités financières**

La certification du biochar et sa valorisation sous forme d'intrant agricole ou sous forme de crédit carbone constituent la clé de voute de la rentabilité économique de cette étude. Dans ce but, les différents standards de certification du Biochar ont été analysés avec leurs contraintes et exigences respectives. En complément, les opportunités de valorisation du biochar à travers les crédits carbone ont été décryptées, tant du point de vue des méthodologies applicables que du fonctionnement et de l'évolution du marché. Les résultats de cette recherche seront valorisés dans le rapport de synthèse.

- **Méthodologie CDM et marché carbone associé**

Au regard de l'orientation complémentaire axée sur l'énergie donnée à cette étude, les méthodologies CDM associées et le marché carbone associé ont également été ciblés par des recherches documentaires. Les résultats seront, à l'instar des aspects relatifs à la certification biochar, présentés dans le rapport de synthèse.

2.2. RENCONTRES AVEC LES PRINCIPAUX ACTEURS

En complément de la recherche documentaire, et, outre les visites auprès des entreprises partenaires, de nombreux acteurs ont été contactés. Une partie d'entre eux a pu être rencontrée, que ce soit lors de la mission de terrain, de salons dédiés au biochar, ou encore lors de diverses réunions.

Le Tableau 1 ci-dessous reprend, pour chaque acteur, les noms des personnes rencontrées et les thématiques principales des échanges. Les informations récoltées qui ne sont pas capitalisées dans les différents chapitres de ce rapport seront présentées dans le rapport de synthèse.

Tableau 1 – Liste des échanges avec différents acteurs

Type d'acteur	Nom	Personne(s) rencontrée(s)	Modalité de rencontre	Date de rencontre	Thématiques abordées
Centre de recherche	CENAREST	Alfred Ngomanda (Commissaire général)	Mission de terrain	23/11/22	Propriété des crédits carbone issus d'un projet biochar
Projet Appui à la relance du secteur agricole pour les cacaoculteurs	PARSA -volet cacao	Pierre Etoa et Maurice Ombambi	Mission de terrain	04/11/22	Intérêt éventuel pour le biochar
	PARSA – volet maraichage	Marcia Kibendo	Mission de terrain	08/11/22	
Agence de coopération	GIZ	Didier Bastin (Conseiller technique senior pour les projets forêt et environnement)	Mission de terrain	29/11/22	
Sociétés forestières	Rougier	Éric Chezeaux (directeur RSE et certifications)	Mission de terrain	15/11/22	Présentation du projet, intérêt éventuel pour l'étude
	SEFECCAM	Honorable Mathurin (président), Arnaud Tchokomeni (directeur des aménagements et de la certification)	Mission de terrain	30/11/22	
	Alpicam	Emmanuel Bon (directeur général) et Samuele Vitali (responsable production)	Mission de terrain	01/12/22	
Bureau d'études en foresterie et agroforesterie	FRM	Michel Gally (directeur exécutif Congo)	Mission de terrain	08/11/22	Intérêt éventuel pour le biochar
Société Agroalimentaire - Plantations de palmiers à huile	OLAM	Quentin Meunier (Vice-Président RSE et Développement Durable)	Mission de terrain	10/11/22	
Société minière – extraction de manganèse	COMILOG	Safi Virginius (direction générale)	Mission de terrain	15/11/22	
Négoce et distribution de produits chimiques pour	La Gabonaise de Chimie	Charlie Gillot (directeur général)	Mission de terrain	22/11/22	

Type d'acteur	Nom	Personne(s) rencontrée(s)	Modalité de rencontre	Date de rencontre	Thématiques abordées
l'industrie, l'agriculture et de l'élevage					
Distribution de fruits et légumes au Gabon et Cameroun	La clé des champs	Yane et deux maraîchers partenaires	Mission de terrain	11/11/22	
Production, transport et distribution de fruits et légumes au Cameroun	Compagnie fruitière	Gabriel Berges	Échange téléphonique	05/12/22	
Constructeurs de pyrolyseurs	Pyreg	Philipp Reichardt (directeur commercial)	Échanges emails		Spécifications techniques des modèles disponibles, précisions sur les prix et coûts d'opérations pour 3R Systems et Arti
	Pyrocore	Gilles Godissart (directeur commercial régional), Yves Désiront (CFO)	Salon BIO360, réunion à Bruxelles, échanges emails.	09/02/23, 23/02/23	
	Beston	Alicia Wen et Ava Zheng (consultantes de projets)	Visioconférence, échanges emails	13/12/22	
	3R Systems	Egbert Hellwig (consultant technique)	Salon BIO360, échanges emails	09/02/23 06/2023	
	Arti	Juan Marcos Cueva (directeur des ventes), Martina Leon (responsable des ventes)	Salon BIO360, visioconférence, échanges emails	09/02/23, 07/03/23, 07/04/23, 06-07/2023	
Constructeurs de de pyrogazéificateurs	Energy&+	Adrien Haller (CEO)	Visioconférence, salon BIO360, échanges emails	12/12/22, 11/04/23, 09/02/23,	Spécifications techniques des modèles disponibles, précisions sur les prix et coûts d'opérations pour Energy&+
	Syncraft	Marcel Huber (CEO), Fabian Isele (développeur de projets)	Visioconférence, salon BIO360, échanges emails	04/01/23, 08/02/23	
Constructeurs de broyeurs	China Foma	Jason Guo (directeur général adjoint de la division outre-mer)	Échanges emails	02-06/2023	Spécifications techniques des modèles recommandés, coûts de transport pour les constructeurs retenus.
	Kompotech	Christian Kulmer (directeur des ventes régionales)	Échanges emails	02-03/2023	

Type d'acteur	Nom	Personne(s) rencontrée(s)	Modalité de rencontre	Date de rencontre	Thématiques abordées
	Morbark	James Kamau (commercial Afrique)	Échanges emails	02/2023	
	Ropa	Bastien Leclercq (technico-commercial)	Salon BIO 360, échanges emails	08/02/23	
	Rotochopper	Andy Bulson	Échanges emails	02/2023	
	Van Laecke Group	Geoffrey Verzele (vendeur)	Visioconférence, échanges emails	17/02/23 06/2023	
	Vecotrade	Robert Königs (directeur)	Réunion à Bruxelles, téléphone, échanges emails	02/2023 20/04/23 06/2023	
	ZhangSheng	Aria Li (commerciale département outre-mer)	Échanges emails	02-06/2023	
Standard certification biochar	EBC	Julia Winter (responsable opérationnelle)	Visioconférence, Salon BIO360, échanges emails	03/10/22, 08/02/23	Exigences, fonctionnement et procédure de certification
Standard certification biochar et plateforme de vente de crédits carbone	Puro.earth	Arnaud Defrance (vice-président)	Salon BIO360, échanges emails	08/02/23	Exigences, fonctionnement, procédure de certification et modalités de mise en vente
Vente de crédits carbone	Carbonfuture	Berta Moya (spécialiste élimination carbone, zéro émission nette et économie circulaire)	Visioconférence, Salon BIO360	03/10/22, 09/02/23	Fonctionnement et modalités de mise en vente
Investisseur en projets carbone	South Pole	Hannes Etter (responsable projets biochar), Adam Siphorpe (responsable portefeuille de projets)	Visioconférence, Salon BIO360, échanges emails	17/10/22, 08/02/23	Vision du marché, panel de projets, profil d'investisseurs, potentiel de cofinancement
Bureaux d'audit de certification biochar et CDM	Tüv Nord	Gregor Kochaniewicz (consultant et auditeur), Anna Kröger (auditrice)	Visioconférence, échanges emails	14/12/22	Processus de validation et vérification pour la certification biochar et CDM
	Applus	Agustín Calle de Miguel (responsable technique CDM)	Échanges emails	12/2022	

Type d'acteur	Nom	Personne(s) rencontrée(s)	Modalité de rencontre	Date de rencontre	Thématiques abordées
Standard de certification biochar	Verra	Karina Bautista (Directrice de programme, innovation des systèmes alimentaires)	Échanges emails	07/2023	Prix, fréquence des vérifications, précisions sur les exigences de la méthodologie
Vendeur d'ORC	ENOGIA	Nasser Ben Bachir (Responsable du développement commercial pour les Amériques et l'Afrique)	Échanges téléphoniques et emails	06/2023	Dimensionnement, prix et rendements
Logistique transport	IGS Logistics Congo	Zephirin Nguimbi (CEO)	Échanges emails	07/2023	Taxes douanières Congo
	Bolloré	Hélène Chancelle Messie (Responsable Département Distribution)	Échanges emails et téléphoniques	07-08/2023	Taxes douanières Gabon et coûts transport maritime
	Global Logistics LTD	Nsangou Zounedou Mbombo (directeur général)	Échanges emails	08/2023	Taxes douanières Cameroun



2.3. VISITE DES SITES FORESTIERS DES ENTREPRISES PARTENAIRES

Une mission de terrain a été organisée entre le 31/10/2022 et le 01/12/2023 auprès des entreprises partenaires (CIB, CEB, GSEZ et Pallisco). Cette mission a été l'occasion pour ETICWOOD de visiter les sites, mais également de rencontrer l'ensemble des personnes ressources des différents sociétés impliquées dans le projet. Sur chaque site ont été rencontrés, dans la mesure du possible :

- Le directeur de site, à propos de la stratégie globale de l'entreprise, de ses projets et de ses attentes ;
- Le responsable industriel concernant la stratégie énergétique et les niveaux de consommation ;
- Le(s) directeur(s) scierie pour la visite des installations et pour les informations relatives aux flux de bois, rendements scierie, types et volumes de déchets et essences concernées ;
- Le responsable cartographie et aménagement pour les volumes exploités par type d'essences et la cartographie du site ;
- Le responsable exploitation forestière pour le fonctionnement global des chantiers et du parc à bois ;
- Le/la responsable social externe pour les projets de développement local de l'entreprise.

Les visites de sites et les échanges avec les différents personnes ressources ont été appuyées par un questionnaire (chapitre 4.3). Celui-ci intégrait en particulier des informations sur (i) les rendements scierie, (ii) les volumes et flux de bois, comprenant les déchets totaux et déchets disponibles, (iii) les besoins énergétiques, (v) les consommations de gasoil par les groupes électrogènes ou encore (vi) les essences principales exploitées.

De nombreuses autres informations complémentaires ont été obtenues au cours des différentes discussions tels que les niveaux de consommation de gasoil pour les engins sur site et le transport routier, le coût du gasoil, de la main d'œuvre, de terrassement, etc. Celles-ci seront utilisées dans les chapitres concernés du rapport de synthèse.

Le calendrier de mission et le questionnaire utilisé se trouvent en ANNEXE 4 et ANNEXE 5.



3. DESCRIPTION DES TECHNOLOGIES PERMETTANT LA PRODUCTION DE BIOCHAR ET D'ÉNERGIE

Les technologies permettant la production, en parallèle, de biochar et d'énergie sont la pyrolyse et la pyrogazéification, toutes deux basées sur des procédés thermiques décrits aux chapitres 3.1 et 3.2.

D'autres technologies pour la production d'énergie à partir de biomasse existent, telles que des combinaisons « chaudière / turbine à vapeur ». Etant donné que celles-ci ne produisent pas de biochar, elles n'ont pas été considérées dans le cadre de cette étude.

Comme illustré à la Figure 1, la pyrolyse est un traitement thermique, se produisant en absence d'oxygène à des températures généralement comprises entre 350 et 650°C tandis que la pyrogazéification (également appelée gazéification) se produit en présence d'une faible quantité d'oxygène à des températures généralement comprises entre 900 et 1200°C [1].

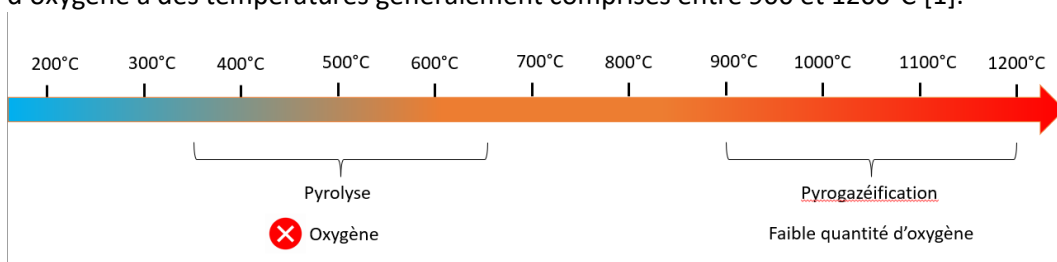


Figure 1 – Températures pour les réactions thermiques de pyrolyse et pyrogazéification

Si la pyrolyse a pour principal objectif la production de biochar avec, en bonus, la production d'énergie thermique, la pyrogazéification a un objectif inverse. Cet aspect est illustré à la Figure 2 qui indique que le « curseur » peut être positionné sur une technologie ou une autre en fonction de l'objectif souhaité (biochar vs énergie).

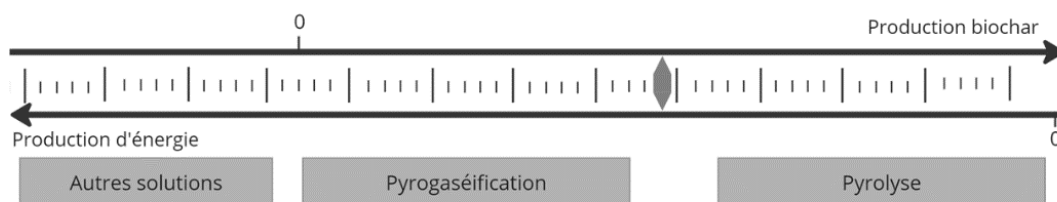


Figure 2 – Curseur production d'énergie - production de biochar et technologies associées

Les principales caractéristiques de ces deux technologies sont comparées au Tableau 2.

Tableau 2 – Comparatif entre pyrolyse et pyrogazéification

Paramètre	Pyrolyse	Pyrogazéification
Objectif principal	Production de biochar	Production d'énergie
Rendement Biochar	~25% en masse de la biomasse en entrée	~5% en masse de la biomasse en entrée
Teneur en carbone du biochar (%C)	Jusqu'à 90% de carbone pour le biochar produit à partir de plaquettes forestières.	Environ 50% de carbone. L'autre partie étant constituée de matière inerte (cendres).
Températures	350-650°C	900-1200°C
Apport en oxygène	Absent	Faible quantité



3.1. PYROLYSE

La pyrolyse est un procédé thermique sans oxygène permettant de décomposer la biomasse en trois composants (Figure 3) :

- Un gaz combustible (syngas) ;
- Un liquide (huile végétale ou mélange d'hydrocarbures) ;
- Un résidu solide à forte teneur en carbone : le biochar.

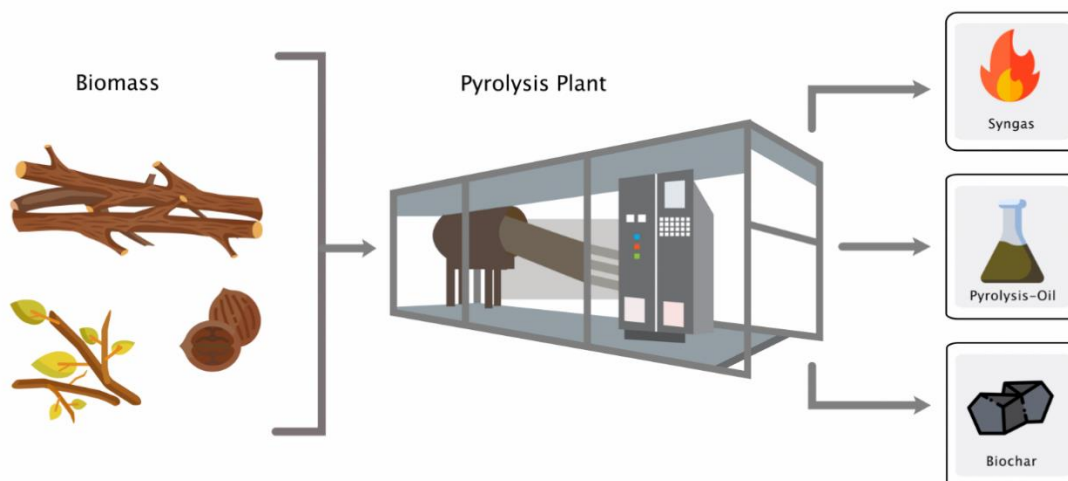


Figure 3 - Le procédé de pyrolyse et ses produits (European Biochar Industry [2])

La composition initiale de la matière et les conditions de carbonisation (température et temps de séjour notamment) influencent le rendement et la proportion des co-produits. Il est d'ailleurs possible, selon certaines modalités, de ne produire que du biochar et du gaz de synthèse (donc sans production d'huile végétale).

Le biochar contient ainsi la fraction minérale de la matière entrante et le « carbone fixe », c'est-à-dire le carbone qui ne s'est pas transformé en gaz ou liquide. Au sein des technologies de pyrolyse, on estime que la production de biochar représente 20 à 25% de la masse de matière en entrée et que le biochar issu de bois contient une teneur en carbone pouvant s'élever jusqu'à 90%.

Le gaz combustible est composé de gaz incondensables (CO , H_2 , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10}) et de gaz condensables (eau, goudrons).

Le gaz est brûlé dans une chambre de combustion. Cette chaleur est ainsi réinjectée dans le procédé de pyrolyse permettant à ce dernier d'être autoalimenté et dès lors autosuffisant au terme de la phase de démarrage. Une chaleur résiduelle devient donc disponible et peut être utilisée directement en tant que chaleur sur le site (pour alimenter des séchoirs par exemple) ou bien être transformée en électricité via un dispositif ORC.



Un ORC (*Organic Rankine Cycle*) est un dispositif permettant de convertir de la chaleur en électricité. Comme représenté à la Figure 4, ce dispositif est constitué d'un évaporateur, d'une turbine, d'un condenseur et d'une pompe de circulation. Le cycle fonctionne grâce à un fluide organique condensable. Ce fluide de travail est liquide à une certaine pression et température. Il se comprime et se vaporise par échange thermique avec la source chaude. La vapeur produite actionne une turbine pour la production d'énergie électrique grâce à un alternateur. La vapeur détendue est ensuite refroidie dans le condenseur. Le cycle thermodynamique fonctionne en cycle fermé. Le fluide de travail choisi a généralement un point d'ébullition plus bas que l'eau. Le choix du fluide est effectué sur la base de la température de la source chaude et du débit de l'effluent constituant la source chaude. Le rendement est compris entre 10 et 20% [3], [4].

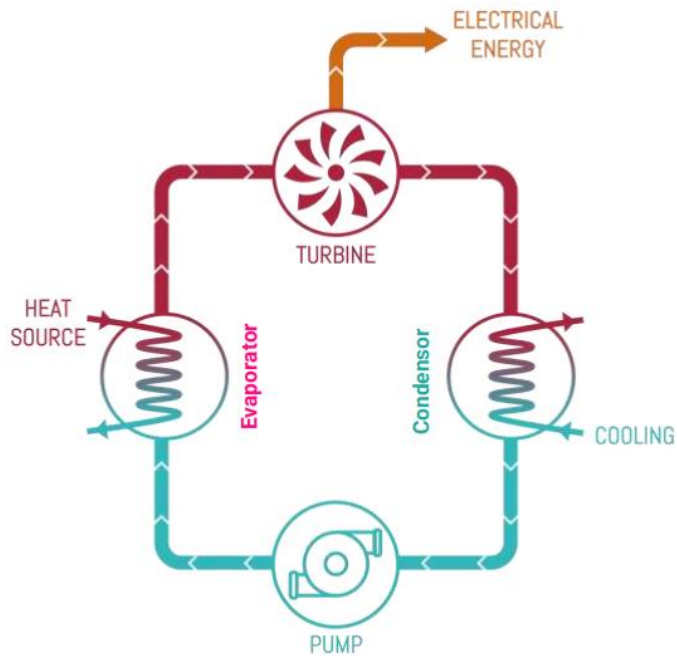


Figure 4 – Schéma du cycle organique de Rankine (crédit image : Enogia)



3.2. PYROGAZÉIFICATION

La pyrogazéification constitue un ensemble de procédés thermiques permettant de transformer la biomasse en énergie. Lorsque la biomasse est gazéifiée :

- L'ensemble de la biomasse est décomposé, sous l'action de la chaleur et d'une faible quantité d'oxygène (ou autre agent oxydant) en gaz de synthèse (syngas), excepté la fraction minérale de la biomasse et une petite quantité de carbone fixe constituant le résidu solide. Ce syngas est principalement constitué de monoxyde de carbone (CO), de dihydrogène (H₂) et d'une fraction mineure de méthane (CH₄). Selon les procédés, il se compose également d'une proportion plus ou moins importante de dioxyde de carbone (CO₂) et d'azote (N₂). Enfin, le syngas contient également une faible quantité de chaînes hydrocarbonées longues appelées goudrons qui doivent être éliminées. Le gaz de synthèse issu de ce procédé est transformé en électricité et chaleur grâce à un moteur à gaz.
- Le biochar constitue, dans ce cas, un sous-produit représentant environ 5% de la masse en entrée du processus avec une teneur en carbone avoisinant les 50% (et 50% de matière inerte).

Le processus de gazéification est composé de quatre grandes étapes (Figure 5) :

- 1) Phase de séchage
- 2) Phase de pyrolyse
- 3) Phase de combustion

Cette étape, appelée également oxydation partielle, grâce à l'injection d'un agent oxydant (souvent, de l'oxygène), oxyde les matières volatiles produites durant la phase de pyrolyse et une partie du charbon (ou biochar). Cette étape fournit la chaleur nécessaire au procédé.

- 4) Phase de gazéification

Cette étape, appelée également réduction, convertit le carbone du biochar en un gaz combustible riche en CO et H₂, le syngas.

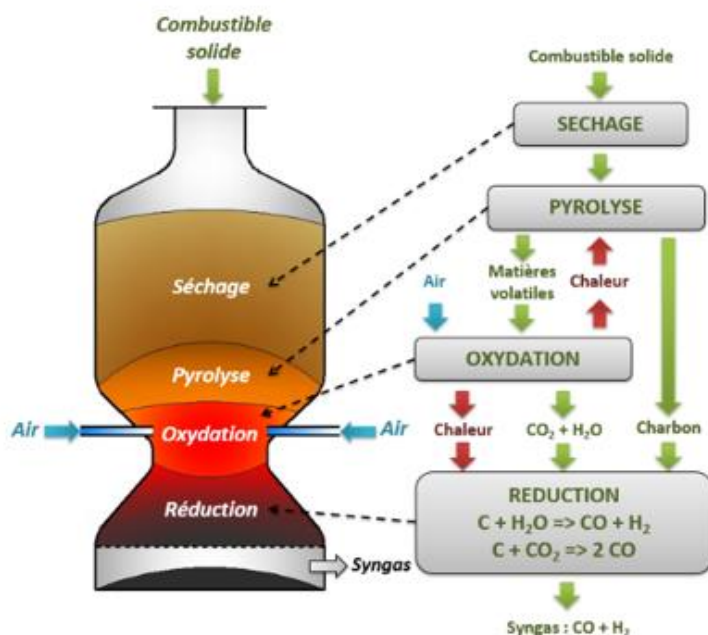


Figure 5 – Mécanismes de la gazéification [5]



4. ÉLABORATION DES SOLUTIONS TECHNIQUES

4.1. RAPPEL DES DÉFINITIONS, NOTIONS ET UNITÉS

4.1.1. Puissance et énergie

Puissance et énergie sont parfois confondues, or elles sont bien distinctes.

La **puissance** est une quantité d'énergie fournie par unité de temps : $Puissance = \frac{Energie}{temps}$. Elle est exprimée en watt (W) ou en voltampère (VA) :

1. Le watt est l'unité qui représente la puissance d'un système dans lequel une énergie d'un joule est fournie pendant une seconde ($1W = \frac{1J}{1s}$). Elle est aussi appelée puissance active (ou puissance utile).
2. Dans le cas de groupes électrogènes, la puissance du groupe, exprimée en kVA (kilovoltampères), correspond à la puissance apparente, autrement dit, à la valeur maximale de l'installation. La puissance active, exprimée en [kW] est obtenue en multipliant la puissance apparente [kVA] par un facteur de puissance, généralement fourni par le constructeur et mentionné sur le groupe.

L'**énergie** peut se manifester sous différentes formes. Les deux énergies principales utilisées dans ce rapport seront l'énergie électrique et l'énergie thermique.

L'énergie électrique sera utilisée, dans le cadre de ce rapport, pour évaluer les consommations électrique des sites, les consommations électriques des composants des solutions techniques et l'énergie électrique finale disponible en sortie des systèmes. Pour ce faire, pour chaque composant, sa puissance électrique, exprimée en [kW_{éi}], sera multipliée par le nombre d'heures de fonctionnement moyen sur un an afin d'obtenir l'énergie électrique annuelle exprimée en [kWh_{éi}/an].

L'énergie thermique s'exprime sous forme de chaleur. Pour une unité de pyrolyse, la puissance thermique, exprimée en [kW_{th}] est généralement communiquée par le constructeur. L'énergie thermique pouvant être fournie par la machine, correspondra, dans cette étude, à sa puissance multipliée par le temps de fonctionnement annuel de la machine exprimé en [kWh_{th}/an].

4.1.2. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est défini comme la quantité maximale d'énergie dégagée sous forme de chaleur d'un combustible par la réaction de combustion, sous pression atmosphérique normale. En général, le pouvoir calorifique fait référence au pouvoir calorifique inférieur (PCI), qui est l'énergie dégagée lors de la réaction de combustion, et plus rarement au pouvoir calorifique supérieur (PCS) qui prend également en compte l'énergie dégagée par la condensation de la vapeur d'eau.

À titre d'exemple, le gasoil a un pouvoir calorifique inférieur (PCI) de 10 kWh/L [6]. En ce qui concerne le bois, son pouvoir calorifique dépend de son taux d'humidité et de la densité. Un bois de feuillus à 10% d'humidité aura un pouvoir calorifique moyen de ~4,5 kWh/kg [7] alors que ce même bois, à 50% d'humidité, disposera d'un pouvoir calorifique moyen de ~2,2 kWh/kg [8].

4.1.3. Charge de base

La charge de base d'un site industriel, sera considérée, dans cette étude, comme la quantité d'énergie minimale consommée en tout temps par ce site et correspondra, dans notre cas, au niveau minimum de la demande permanente d'énergie électrique. La détermination de la charge de base peut être faite à partir d'un graphique de profil de puissance consommée. Sur la majorité des sites des partenaires du projet, la charge de base est atteinte aux périodes d'arrêt du ou des usine(s), généralement la nuit et les weekends. Elle correspond, dans la plupart des cas, aux besoins en alimentation des camps de base, des bureaux et des éventuels séchoirs à bois.

4.1.4. Plaquettes forestières

Les plaquettes forestières sont obtenues par broyage ou déchiquetage de résidus forestiers. Bien que les notions de plaquettes et de copeaux soient souvent utilisées comme synonymes, les plaquettes désignent généralement des morceaux de bois de taille plus importante. Si le terme copeau est souvent utilisé pour le paillage, le terme plaquette fait plutôt référence à son utilisation en tant que combustible [8]–[11].

4.1.5. Volume de bois, volume apparent et foisonnement

Dans la totalité du rapport, le volume de bois correspondra systématiquement au volume « réel ». Pour une chute d'éboutage parallélépipédique, son volume « réel » correspondra donc au produit de sa longueur * sa largeur * son épaisseur.

Néanmoins, lorsque seront abordés les broyeurs, la capacité de production de ces derniers, exprimée en volume de plaquettes produites, fait référence à un volume apparent, incluant le volume « réel » des plaquettes additionnée du volume d'air (appelé aussi volume vide) entre celles-ci. La conversion d'un volume « réel » vers un volume « apparent » passe par l'utilisation d'un facteur de foisonnement.

4.1.6. Masse volumique et densité

La masse volumique est définie comme la masse d'un matériau par unité de volume ($\rho = \text{masse/volume}$).

La densité est définie comme le rapport de la masse volumique d'un corps par rapport à la masse volumique d'un corps de référence. Dans le cas de matières solide et liquide, le corps de référence est l'eau. Il s'agit donc d'une valeur adimensionnelle.

À titre d'exemple, une essence de bois frais d'une masse volumique de 700 kg/m^3 a une densité telle que définie par la formule ci-dessous :

$$\text{Densité essence de bois frais} = \frac{\rho_{\text{essence}}}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{700 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,7 .$$

4.1.7. Broyeur

Les broyeurs sont alimentés en bois par une trémie ou goulotte d'alimentation. Le système d'entrée pousse le bois vers le rotor. Celui-ci est actionné par le moteur principal. Ce rotor est équipé de couteaux permettant de broyer le bois en entrée. Le nombre de couteaux et la vitesse du rotor sont fonction du design du broyeur. Pour des raisons de sécurité, certains broyeurs sont adaptés afin d'éviter l'éjection vers l'usager des morceaux de bois trop court, telles les chutes d'éboutage.



4.1.8. Séchoir à plaquettes

Les séchoirs considérés dans cette étude sont spécifiques pour le séchage de plaquettes forestières et intégrés dans les solutions par les constructeurs des unités de pyrolyse/pyrogazéificateurs. Le design de ces séchoirs permet un fonctionnement en continu, par opposition au système « batch » des cellules de séchage utilisées pour les débités. Le temps de séchage des plaquettes forestières est relativement court, au vu de leur petite taille, par rapport à celui des débités de scierie.



4.2. APPROCHE UTILISÉE POUR L'ÉLABORATION DES SOLUTIONS TECHNIQUES

Les différentes solutions techniques proposées dans ce rapport sont le résultat d'un processus méthodologique mené depuis le début de la convention sur la base des étapes suivantes :

- Une visite des différents sites industriels. Cette étape a permis de récolter les informations relatives aux flux de matières bois, aux consommations de gasoil concernées, aux puissances installées mais également d'échanger avec les responsables de sites quant à leurs attentes et leur éventuelles remarques et recommandations en lien avec le projet ;
- Une sélection de technologies à même de répondre d'une part à la production de biochar et d'autre part afin de prendre en compte l'intérêt et les besoins exprimés par les entreprises partenaires en ce qui concerne la production d'énergie ;
- Une identification des constructeurs capables de fournir les différentes installations requises pour le design industriel. Les échanges menés au cours des derniers mois ont permis de récolter un ensemble de données techniques afférentes aux différents modèles proposés, de sonder la maturité ou la volonté des constructeurs à s'implanter sur le marché africain mais également d'approfondir les principaux avantages et limites de chaque solution. Les analyses ont ensuite permis d'établir une première sélection parmi les marques et modèles à même de répondre aux besoins de ce projet.
- Une sélection de deux scénarios de dimensionnement afin d'apporter des réponses à la fois sur l'aspect biochar et sur l'aspect énergétique, respectivement :
 - ✓ Un scénario maximisant l'utilisation de la ressource bois du site ;
 - ✓ Un scénario permettant de répondre à la charge de base du site.
- La définition de plusieurs hypothèses de travail en réponse d'une part, à la non-disponibilité de certaines données (tant sur les sites qu'au niveau des constructeurs) et d'autre part aux besoins de standardisation des méthodes de calcul.

Sur la base de l'ensemble de ces éléments, la société Sense-Engineering [12], spécialisée dans la gestion de projets industriels et d'optimisation énergétique, a été sollicitée pour apporter son appui dans l'élaboration des design industriels et valider les solutions retenues.

4.2.1. Établissement des scénarios

Tels que mentionné dans la méthodologie, deux scénarios, schématisés à la Figure 6, ont été envisagés pour le développement de solutions industrielles sur les sites : un scénario utilisant 100% des déchets bois disponibles pour la production de biochar, et un scénario permettant d'atteindre 100% de la charge de base des sites.

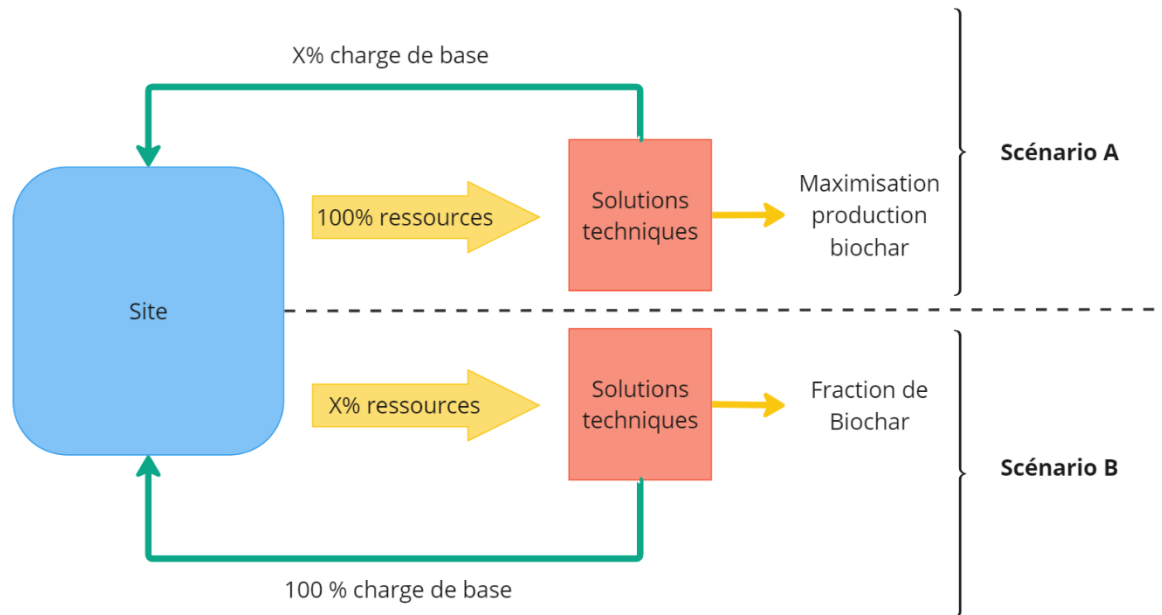


Figure 6 – Schéma des deux scénarios envisagés

Les flux matières et énergie sont schématisés de façon simplifiée pour chacun des sites à la section 4.2.3. Les solutions techniques pour chacun des deux scénarios y sont présentées par site.

Il est à noter que les aspects financiers ne sont pas abordés à ce stade. Seul un ordre de grandeur pour le coût d'achat des équipements est fourni à titre indicatif. Les aspects financiers seront abordés dans le rapport de synthèse et la rentabilité du projet en fonction des solutions techniques présentées sera étudiée à cette occasion.

Scénario A : Production de biochar avec bonus énergie

Ce scénario vise un dimensionnement des installations de pyrolyse à même de maximiser la production de biochar par la valorisation de l'ensemble des déchets de scierie disponibles. Dans ce scénario, la production d'électricité à partir de l'énergie thermique résiduelle du procédé est considérée comme une plus-value, à partir de l'énergie fatale produite. Les données des constructeurs relatives à l'énergie thermique résiduelle de pyrolyseurs permettent de quantifier l'apport potentiel aux besoins énergétiques électriques du site à travers l'utilisation d'un dispositif ORC.

Scénario B : Production de l'énergie avec bonus biochar

Ce scénario vise un dimensionnement des installations pour fournir la quantité d'énergie correspondant à la charge de base du site. En effet, un dimensionnement supérieur nécessiterait de gérer l'énergie excédentaire soit via un réseau électrique externe ou l'utilisation de batteries. Ces solutions ne sont pas retenues dans le contexte étudié, le réseau n'étant souvent pas présent et l'utilisation de batteries se révélant être peu opportune pour des raisons d'encombrement, d'entretien et d'impact environnemental potentiel. Ce scénario ne couvrant que la charge de base, les pics de consommation du site devront donc continuer à être couverts par systèmes en place actuellement.

Les différentes solutions obtenues avec ce scénario permettront de déterminer la réduction potentielle de la consommation de gasoil mais également la proportion de la ressource bois disponible qui sera utilisée.



4.2.2. Schéma de base des flux de bois et d'énergies

Les Figure 7 et Figure 8 schématisent les flux bois, eau et énergies au travers des différents composants des designs industriels de pyrolyse et de pyrogazéification respectivement. Le texte ci-dessous doit être lu en parallèle de ces figures pour une meilleure compréhension.

La quantité de bois frais disponible sur les sites, X_1 , issue des déchets de scierie, et valorisable par pyrolyse ou pyrogazéification est connue et exprimée en [m^3 /an].

Afin de pouvoir alimenter les pyrolyseurs/pyrogazéificateurs, les déchets bois doivent respecter une certaine granulométrie et un taux d'humidité maximal, spécifique à chaque modèle. Un prétraitement est dès lors requis à travers un broyeur et un séchoir à plaquettes éventuel.

Considéré sans perte de matière, le broyage permet la transformation des déchets bois en plaquettes forestières, les quantités de plaquettes en sortie de broyeur, X_2 , sont converties en [t /an] par application de la masse volumique. Le fonctionnement du broyeur engendre une consommation électrique, Z_2 , exprimée en [kWh_{el} /an].

Ces plaquettes, encore vertes (humidité supposée de 50%), doivent ensuite être séchées pour atteindre l'humidité requise par les pyrolyseurs/pyrogazéificateurs. Ce séchage peut être réalisé à l'air libre ou par l'utilisation d'un séchoir à plaquettes. La masse de bois disponible en sortie de séchage, X_3 , est exprimée en [t /an], après soustraction de la masse d'eau perdue. Pour son fonctionnement, le séchoir à plaquettes consomme une énergie électrique, Z_3 , exprimée [kWh_{el} /an] et une énergie thermique, Y_2 , exprimée en [kWh_{th} /an].

Les plaquettes sèches entrent alors dans l'unité de pyrolyse ou de pyrogazéification.

Pour la pyrolyse, les caractéristiques des modèles fournies par les constructeurs permettent de calculer la quantité de biochar produite, X_4 , exprimée en [t /an]. Pour leur fonctionnement, le pyrolyseur consomme une énergie électrique, Z_4 , exprimée en [kWh_{el} /an]. Comme précisé dans l'établissement des scénarios, une certaine quantité d'énergie thermique, Y_1 , exprimée en [kWh_{th} /an] peut être récupérée. : après déduction de l'énergie thermique nécessaire pour le séchoir, Y_2 , l'énergie thermique résiduelle, Y_3 , peut être valorisée par un ORC afin de fournir une quantité Z_1 d'énergie électrique, exprimée en [kWh_{el} /an]. L'énergie électrique finale disponible, Z_5 , s'obtient par déduction de consommations électriques du broyeur (Z_2), du séchoir à plaquette (Z_3) et du pyrolyseur (Z_4).

Pour la pyrogazéification, la quantité de biochar produite, X_4' , est obtenu à partir des rendements fournis par le constructeur. Au contraire de la pyrolyse, la pyrogazéification permet d'obtenir directement de l'énergie sous forme électrique à travers un ORC, Z_1' , exprimée en [kWh_{el} /an], et thermique, Y_1' , exprimée en [kWh_{th} /an]. Les énergies électrique et thermique finales disponibles, Z_5' et Y_3' , s'obtiennent, comme pour la pyrolyse, par déduction des consommations respectives des composants du système.

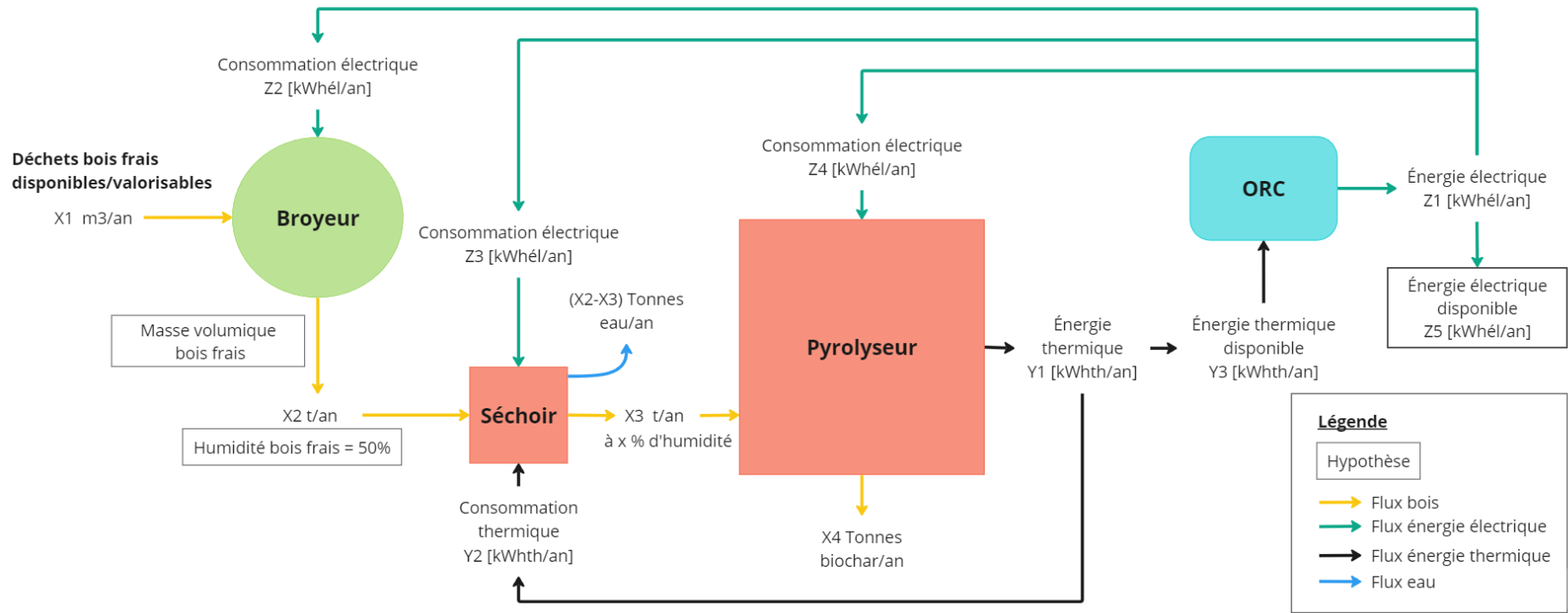


Figure 7 – Schéma de base du procédé industriel de pyrolyse

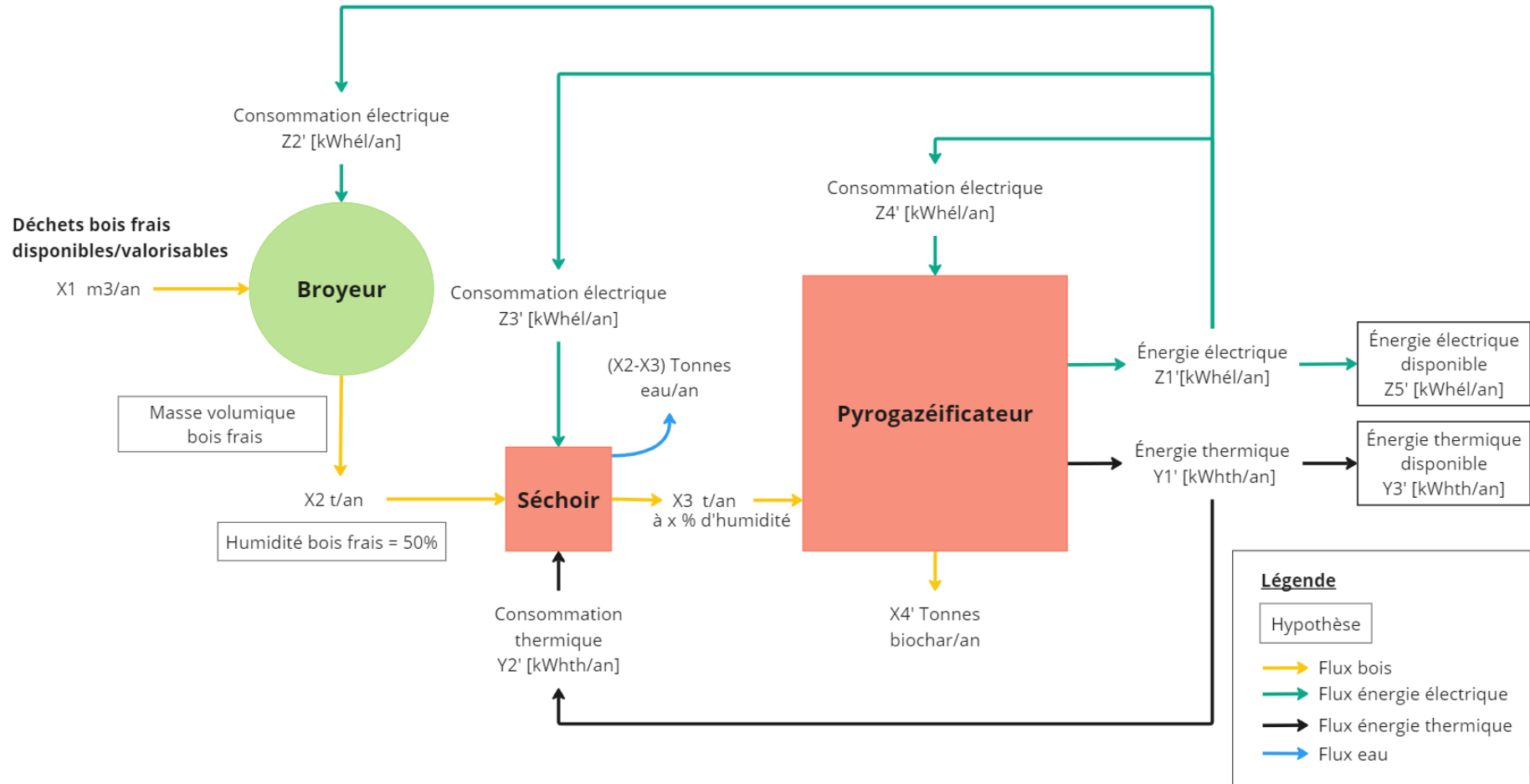


Figure 8 - Schéma de base du procédé industriel de pyrogazéification

4.2.3. Hypothèses et choix stratégiques

L'élaboration des solutions techniques s'est déroulée en plusieurs étapes. Cette section présente, pour chacune d'entre elles, les hypothèses posées, les choix stratégiques effectués ainsi que les calculs réalisés.

Caractéristiques du site

Consommation en gasoil

La consommation de gasoil annuelle d'un site est utilisée pour calculer l'électricité produite grâce aux groupes électrogènes (GE). Pour ce faire, les hypothèses suivantes ont été posées :

- Rendement du groupe électrogène de 35%¹.
- Pouvoir calorifique du gasoil utilisé par les sites de 10 kWh/litre [13].

L'électricité produite a donc été calculée par l'équation suivante :

$$\text{Electricité produite par GE} \left[\frac{kWh_{el}}{an} \right] = \frac{\text{Litres de gasoil}}{an} \times 10 \frac{kWh}{\text{litre de gasoil}} \times 0,35$$

Cette équation et hypothèses seront également utilisées pour déterminer les économies potentielles de gasoil en regard l'énergie électrique disponible au sortie des solutions présentées plus haut.

Charge de base

La charge de base d'un site est déterminée à partir de l'analyses de profils de consommations ou sur la base des informations fournies par le site, lorsque ceux-ci étaient disponibles. Lorsque la puissance minimale requise était fournie, la charge de base annuelle a été calculée en considérant un temps de fonctionnement de 7.500 h/an. Dans le cas contraire, la charge de base a été fixée à 30% de l'énergie électrique annuelle consommée par le site, correspondant à la moyenne inférieure observée sur les sites pour lesquels la valeur de la charge de base était disponible.

Déchets bois disponibles

La quantité de déchets bois (X_1) est déterminée pour chaque site en fonction des informations collectées auprès des entreprises. En complément, plusieurs choix ont été effectués :

- Les déchets bois considérés sont les déchets bois de scierie (les déchets d'exploitation ne font pas partie du cadre de l'étude) ;
- Les sciures, difficilement valorisables par pyrolyse ou pyrogazéification n'ont pas été considérées comme déchet disponible valorisable ;
- Les volumes considérés prennent en compte les déductions faites des dons, ventes locales ou usages pour d'autres projets (cogénération...) ;
- Les déchets disponibles et valorisables ont été scindés en fonction de leur nature : dosses, délignures et chutes d'éboutages, afin de tenir compte des spécificités des différents broyeurs (certains pouvant broyer les chutes d'éboutage, d'autres non) ;
- Au niveau du transport des déchets bois, il est considéré que la distance de transport des déchets bois jusqu'au broyeur et l'installation de production de biochar est équivalente à la distance parcourue actuellement jusqu'à l'emplacement du brasier actuel. Il est dès lors considéré que la consommation de gasoil par les engins du site ne s'en trouve pas impactée.

¹ Valeur recommandée par les CEO de Sense Engineering et Energy&+



Broyeurs

La capacité de production du broyeur, fournie par les constructeurs, est exprimée en m³ de plaquettes (volume apparent) produites à l’heure. Afin de déterminer le volume horaire de bois en entrée, un facteur de foisonnement de 3 a été appliqué (3 m³ apparents de plaquettes sont produits pour chaque m³ de déchets bois introduit) [14].

Ce facteur est uniquement utilisé pour le calcul du nombre d’heures de fonctionnement du broyeur à travers l’équation ci-dessous :

$$\text{Heures de fonct.} \left[\frac{h}{an} \right] = \frac{\text{Volume bois frais} \left[X_3 \frac{m^3}{an} \right]}{\text{capacité broyeur} \left[\frac{m^3 \text{ apparent}}{h} \right]} \times \text{fact. foisonnement} \left[\frac{m^3 \text{ apparent}}{m^3} \right]$$

La consommation électrique du broyeur est calculée en posant l’hypothèse que la consommation totale correspond à 100% de la puissance du moteur principal multipliée par le temps de fonctionnement du broyeur :

$$\text{Consommation broyeur} \left[Z_2 \frac{kWh_{él}}{an} \right] = \text{puissance moteur principal} [kW] \times \text{heures fonct.} \left[\frac{h}{an} \right]$$

En regard des caractéristiques des différentes marques et modèles, les solutions techniques proposées intégreront toutes le modèle BA615 du constructeur Jenz, à même de broyer tous les types de déchets considérés et permettant la meilleure performance énergétique. Pour les solutions Arti, une granulométrie inférieure à 25 mm est nécessaire. Le design intègre un petit broyeur permettant d’atteindre la granulométrie souhaitée. Sa consommation électrique est prise en compte dans l’étude.

Séchoirs à plaquettes

L’énergie nécessaire au séchage des plaquette et proportionnelle à la masse d’eau à évaporer. Les quantités de matière en entrée des séchoirs doit donc être exprimé en unité de masse. Pour convertir le volume de bois frais en masse de bois frais en entrée des séchoirs, la masse volumique du bois frais a été estimée pour chaque site en fonction des principales essences y étant transformées (Tableau 3).

Tableau 3 – Masses volumiques moyennes du bois frais hypothétiques des sites

Sites	Masse volumique moyenne du bois frais [t/m³]	Essences majoritaires
CIB - Pokola et Enyéllé	0,80	Sapelli, Sipo
CEB - Bambidie	0,72	Okoumé, Okan, Azobé
GSEZ - Nkok et LMR	0,70	Okoumé
Pallisco - Mindourou	0,80	Sapelli

Cette masse volumique permet la conversion d’une unité de volume à une unité de masse à travers l’équation suivante :

$$\text{Masse bois frais} \left[X_2 \frac{t}{an} \right] = \text{volume bois frais} \left[X_1 \frac{m^3}{an} \right] \times \text{masse volumique bois frais} \left[\frac{t}{m^3} \right]$$



Concernant la consommation thermique du séchoir à plaquettes, il a été estimé que :

- Le taux d'humidité moyen du bois frais en sortie broyeur/entrée séchoir a été fixé à 50%. Cette valeur tient compte des pertes d'humidité liées au stockage sur parc, à la transformation et au broyage.
- L'énergie thermique nécessaire pour évaporer une tonne d'eau d'un broyat de plaquettes, est de 972,2 kWh_{th} (une hypothèse d'un rendement de 0,7 a été appliqué à une énergie d'évaporation de l'eau de 2450 kJ/kg d'eau [15]).

La consommation thermique est donc calculée comme suit :

$$\text{Consommation thermique séchoir} \left[Y_2 \frac{\text{kWh}_{th}}{\text{an}} \right] = 972,2 \left[\frac{\text{kWh}_{th}}{\text{tonne eau}} \right] \times \frac{\text{tonnes d'eau}}{\text{an}}$$

Concernant la consommation électrique du séchoir à plaquettes du constructeur d'unités de pyrolyse Arti, il a été estimé que :

- Le temps de fonctionnement du moteur du séchoir est le même que celui pour l'installation de pyrolyse.
- La puissance maximale du moteur étant connue et le moteur ne fonctionnant pas en continu au maximum de sa puissance, un facteur de puissance, conservateur, de 0,8 a été appliqué.

La consommation électrique du séchoir à plaquette est donc calculée via la formule ci-dessous :

$$\text{Conso. électrique séchoir} \left[Z_3 \frac{\text{kWh}_{\text{él}}}{\text{an}} \right] = \text{Puissance max. [kW]} \times 0,8 \times \text{heures fonc. machine}$$

Concernant la consommation électrique du séchoir à plaquettes du constructeur d'installation de pyrogazéification Energy&+ :

- La consommation électrique du séchoir est fournie par le constructeur comme un pourcentage de l'énergie électrique produite (2,5%).

La consommation électrique du séchoir peut dès lors être calculée de la façon suivante :

$$\text{Conso. électrique séchoir} \left[Z_3' \frac{\text{kWh}_{\text{él}}}{\text{an}} \right] = 0,025 \times \text{énergie électrique produite} \left[Z_1' \frac{\text{kWh}_{\text{él}}}{\text{an}} \right]$$

Le constructeur 3R Systems proposant des unités permettant de pyrolyser de la matière humide (à 40% d'humidité), il n'est dès lors pas nécessaire de prévoir un séchoir à plaquettes. Il a été considéré que les plaquettes broyées devront être stockées à l'air libre pour passer de 50 à 40% d'humidité. En absence de disponibilité de plaquettes sur les sites et de possibilité de mener des tests *in situ*, la durée de séchage nécessaire n'a cependant pas pu être estimée dans le cadre de cette étude.



Pyrolyse et ORC

Les informations communiquées par les constructeurs de pyrolyseurs concernent les paramètres suivants :

- Le nombre d'heures de fonctionnement maximal [h/an]
- La capacité massique maximale [tonnes biomasse/an] à un certain taux d'humidité (x%)
- La quantité maximale de biochar produite [tonnes/an].
- La capacité thermique maximale [kW],

La capacité thermique des modèles est fonction du débit maximal de biomasse en entrée (tonnes de biomasse max./an). Étant donné que la quantité de bois disponible par site ne correspond pas exactement au débit maximal en entrée de la machine, la capacité thermique réelle du modèle a été considérée comme directement proportionnelle au débit réel de biomasse en entrée :

$$\text{Capacité th. réelle [kW]} = \frac{X_3 \text{ tonnes biomasse entrée machine}}{\text{tonnes maximales biomasse entrée machine}} \times \text{capacité th. maximale [kW]}$$

En considérant que les pyrolyseurs ne fonctionnent jamais à leur puissance maximale, et sur conseil du bureau Sense Engineering, un facteur de 0,8 est appliqué pour le calcul de la consommation électrique:

$$\text{Conso. él. pyrolyseur} \left[Z_4 \frac{\text{kWh}_{\text{él}}}{\text{an}} \right] = \text{Puissance max. [kW]} \times 0,8 \times \text{heures fonctionnement} \left[\frac{\text{h}}{\text{an}} \right]$$

Il est important de signaler que la consommation de gasoil ou de propane nécessaire au démarrage initial de l'installation est jugée comme négligeable par rapport à l'énergie produite par la pyrolyse.

Toujours sur la base des recommandations du bureau Sense Engineering, il a été considéré que les ORC couplés aux machines de pyrolyses présentent :

- Un rendement moyen de 12%²
- Un temps de fonctionnement équivalent à 80% de celui du pyrolyseur

La quantité d'énergie électrique pouvant être produite à partir de l'énergie thermique disponible est donc calculée par l'équation ci-dessous :

$$\text{Énergie él.} \left[Z_1 \frac{\text{kWh}_{\text{él}}}{\text{an}} \right] = \text{Énergie th. dispo.} \left[Y_3 \frac{\text{kWh}_{\text{th}}}{\text{an}} \right] \times 0,12 \times 0,8$$

² [Cycle ORC \(recuperation-chaaleur.fr\)](http://Cycle ORC (recuperation-chaaleur.fr))



Pyrogazéification

Les informations communiquées par les constructeurs de pyrogazéificateurs concernent les paramètres suivants :

- Le nombre d’heures de fonctionnement maximal [h/an]
- La capacité massique maximale [tonnes biomasse/an] à un certain taux d’humidité (x%)
- La quantité maximale de biochar produite [tonnes/an]
- La capacité thermique maximale [kW_{th}]
- La capacité électrique maximale [kW_{él}].

La capacité thermique réelle est calculée de la même façon que pour les installations de pyrolyse présentées plus haut.

La capacité électrique réelle a été calculée en suivant la même logique, proportionnellement à la quantité de biomasse en entrée, telle que décrite par la formule suivante :

$$\text{Capacité él. réelle [kW]} = \frac{X_3 \text{ tonnes biomasse entrée machine}}{\text{tonnes maximales biomasse entrée machine}} \times \text{capacité él. maximale [kW]}$$

La consommation électrique de la machine a été communiquée par le constructeur comme correspondant à 2,5% de l’énergie électrique produite. La consommation se calcule donc comme suit :

$$\text{Conso. él. pyrogazéificateur} \left[Z_4' \frac{\text{kWh}_{\text{él}}}{\text{an}} \right] = 0,025 \times \text{énergie él. produite} \left[Z_1' \frac{\text{kWh}_{\text{él}}}{\text{an}} \right]$$

A l’instar des unités de pyrolyse, la consommation de gasoil ou de propane nécessaire pour le démarrage de l’installation est considérée négligeable par rapport à l’énergie produite par la pyrogazéification.

Énergie finale disponible

Pour la **pyrolyse** (Figure 7), seule une énergie thermique est directement disponible. La génération d’énergie électrique n’est possible que par l’utilisation d’un ORC. L’énergie électrique finale disponible est donc calculée en deux temps. Tout d’abord, l’énergie thermique nécessaire au fonctionnement du séchoir (Y₂) est déduite de l’énergie thermique disponible (Y₁) en sortie de pyrolyseur.

L’énergie thermique résiduelle (Y₃) peut ensuite être convertie en énergie électrique à travers l’ORC.

L’énergie électrique finale disponible (Z₅) est calculée à partir de l’énergie électrique disponible en sortie d’ORC (Z₁) après déduction des consommations électriques du broyeur (Z₂), du séchoir (Z₃) et du pyrolyseur (Z₄).

Ces modalités de calcul sont reprises dans les équations ci-dessous :

$$\text{Énergie th. dispo.} \left[Y_3 \frac{\text{kWh}_{\text{th}}}{\text{an}} \right] = \text{Énergie th.} \left[Y_1 \frac{\text{kWh}_{\text{th}}}{\text{an}} \right] - \text{Conso. th. séchoir} \left[Y_2 \frac{\text{kWh}_{\text{th}}}{\text{an}} \right]$$

$$\text{Énergie él. dispo.} \left[Z_5 \frac{\text{kWh}_{\text{él}}}{\text{an}} \right] = \text{Énergie él.} \left[Z_1 \frac{\text{kWh}_{\text{th}}}{\text{an}} \right] - \text{Conso. broyeur} \left[Z_2 \frac{\text{kWh}_{\text{él}}}{\text{an}} \right] - \text{Conso. séchoir} \left[Z_3 \frac{\text{kWh}_{\text{él}}}{\text{an}} \right] - \text{Conso. pyrolyseur} \left[Z_4 \frac{\text{kWh}_{\text{él}}}{\text{an}} \right]$$



Pour la **pyrogazéification** (Figure 8), les énergies thermiques (Y_3') et électriques (Z_5') disponibles en parallèle sont obtenues pour la première après déduction de consommation thermique du séchoir (Y_2') et, pour la seconde, après déduction des consommation électrique du broyeur (Z_2'), du séchoir (Z_3') et du pyrogazéificateur (Z_4'), à travers les équations suivantes.

$$\text{Énergie th. dispo.} \left[Y_3' \frac{kWh_{th}}{an} \right] = \text{Énergie th.} \left[Y_1' \frac{kWh_{th}}{an} \right] - \text{Conso. th. séchoir} \left[Y_2' \frac{kWh_{th}}{an} \right]$$

$$\text{Énergie él. dispo.} \left[Z_5' \frac{kWh_{él}}{an} \right] = \text{Énergie él.} \left[Z_1' \frac{kWh_{th}}{an} \right] - \text{Conso. broyeur} \left[Z_2' \frac{kWh_{él}}{an} \right] - \text{Conso. séchoir} \left[Z_3' \frac{kWh_{él}}{an} \right] - \text{Conso. pyrogazéificateur} \left[Z_4' \frac{kWh_{él}}{an} \right]$$

4.2.4. Sélection des constructeurs

Plusieurs constructeurs de pyrolyseurs, pyrogazéificateurs et broyeurs ont été pris en compte dans le cadre de cette étude. Cependant, au regard du contexte, tous les marques/modèles n'ont pas été retenus. Les résultats de ce processus de sélection pour chaque technologie sont présentés dans le Tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 – Résultat du processus de sélection des différents constructeurs

Technologie	Constructeur	Retenu	Raison
Pyrolyseur	Pyreg	Non	N'accepte que de la matière sèche en entrée sans proposer d'option de séchoir intégré.
	Pyrocore	Non	Dimensionnement trop faible au vu des volumes disponibles des sites. N'accepte que de la matière sèche en entrée sans proposer d'option de séchoir intégré.
	Beston	Non	Les capacités thermiques des modèles sont inconnues par le constructeur.
	3R Systems	Oui	Propose une large gamme de dimensionnement
	Arti	Oui	Annonce des rendements thermiques intéressants
Pyrogazéificateurs	Energy&+	Oui	Très bon rendement énergétique
	Syncraft	Non	Technologie très complexe, peu adaptée à l'environnement de l'Afrique centrale. Constructeur peu intéressé par le marché africain.
Broyeurs	China Foma*	Oui	Prix intéressant
	Jenz	Oui	Capacité élevée, performance énergétique intéressante
	Zhangsheng*	Oui	Prix intéressant
	Vecotrade*	Oui	Prix et performance adaptés
	Komptech	Non	Moteur CAT génération 5, demandant une qualité de diesel spécifique. Les concessionnaires CAT dans la région n'ont pas les compétences nécessaires pour entretenir un tel moteur. Prix élevé.
	Morbak	Non	Trop peu d'informations fournies.
	Albach	Non	Trop peu d'informations fournies et prix très élevé.

*Ces constructeurs n'ont pas été retenus dans le dimensionnement industriel présenté dans ce rapport (section 4.3), leur performance énergétique étant moindre que celle du broyeur de la marque Jenz. Cependant, le broyeur proposé dans la solution technique pourrait être adapté à la lumière du plan financier.

Les spécifications techniques détaillées des composants de chaque solution présentée dans ce rapport sont fournies ANNEXE 1, ANNEXE 2 et ANNEXE 3. Les spécifications des constructeurs non retenus y sont également présentées.



4.3. DESCRIPTION DES SOLUTIONS TECHNIQUES PAR SITE

Comme précisé en introduction, seules les solutions techniques retenues par les entreprises sur la base des résultats du rapport intermédiaire présenté en mai 2023 sont présentées dans cette section. Pour chaque site, un récapitulatif des déchets disponibles, consommations gasoil et charge de base est d'abord présenté. Les différentes solutions techniques et performances respectives sont ensuite comparées à travers un tableau synthétique.

Pour les solutions correspondant au scénario A, l'objectif étant la production de biochar, le volume réel de bois frais nécessaire pour la production d'une tonne de biochar et la quantité d'énergie électrique pouvant être produite pour cette quantité de bois sont indiquées dans les différents tableaux synthétiques. La production d'énergie n'étant pas l'objectif principal, la quantité de bois nécessaire pour la production d'un kWh_{el} ne sera pas indiquée.

Pour les solutions correspondant au scénario B, l'objectif étant la production d'énergie, le volume réel de bois frais nécessaire pour la production d'un kWh_{el} et la quantité de biochar pouvant être produite pour cette quantité de bois sont indiquées dans les tableaux synthétiques. A l'inverse du scénario A, la production de biochar n'étant pas l'objectif principal, la quantité de bois nécessaire pour la production d'une tonne de biochar ne sera pas précisée.

Chaque solution est finalement décrite par un schéma explicatif, reprenant l'ensemble des valeurs, hypothèses et flux de bois et énergie à chacune des étapes. Pour des raisons de visibilité, les valeurs présentées dans les formules ou les résultats ont été arrondies à l'unité.



4.3.1. CIB - Enyélé

Flux de bois et d'énergie du site

Les valeurs de consommation de gasoil et de flux de bois du site d'Enyélé sont reprises à la Figure 9. Les proportions entre les différents types de déchets bois sont similaires à celles de Pokola, site initialement prévu pour l'étude. Ce dernier n'est pas retenu par la CIB pour le projet énergie et biochar, une extension de la cogénération étant validée. Après déduction des dons, le volume de déchets disponibles et valorisables à Enyélé est estimé à 39.400 m³ annuellement. Le site prévoit une augmentation de ses besoins énergétiques d'ici à 2025. La consommation de gasoil attendue a été extrapolée à partir de la consommation actuelle, fournie par le site.

La charge de base a été calculée à partir de la valeur de la puissance minimale nécessaire estimée (320 kW_{él}), fournie par la CIB.

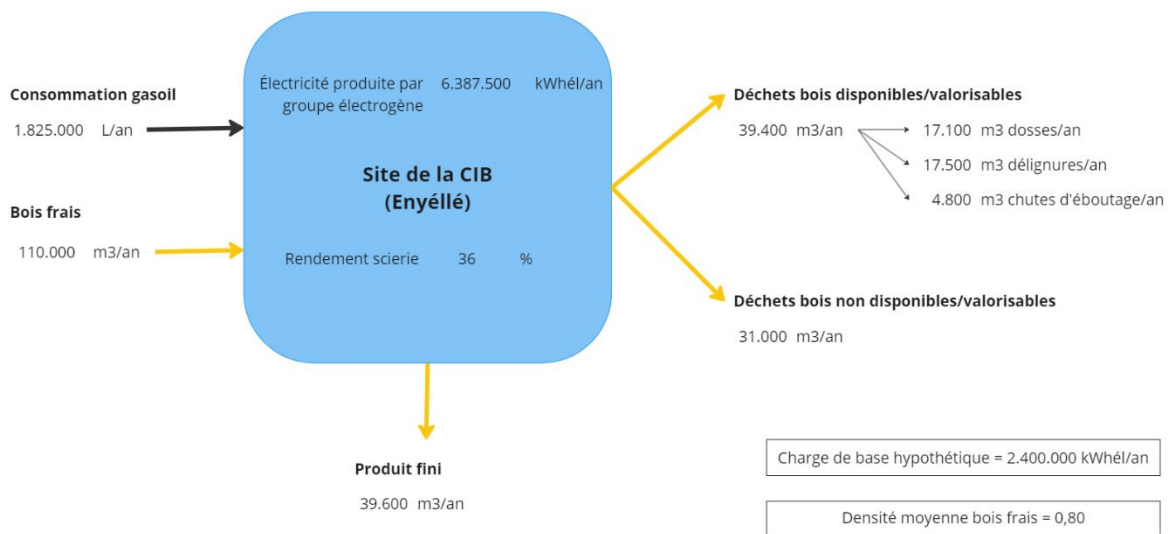


Figure 9 - Flux de bois et consommations de gasoil du site de la CIB à Enyélé, situation future

Solutions techniques envisageables

Pour le site d'Enyéllé, les constructeurs 3R Systems avec 4 modules « 8000-B » (Figure 10), et Arti avec 1 module « 5 trains » et 1 module « 3 trains » ont été retenus pour le scénario A (Figure 11)³. Energy&+ et son module « 300 kW » ont été retenus pour le scénario B (Figure 12).

Les résultats obtenus des configurations proposées pour le site de d'Enyéllé pour les scénarios A et B sont détaillés au Tableau 5.

Tableau 5 – Détail des scénarios A et B du site de la CIB à Enyéllé

Enyéllé	Scénario A		Scénario B
Constructeur	3R Systems	Arti	Energy&+
Modèle	Module 8000-B	5 trains + 4 trains	Module 300 kW
Nombre de machines	4	1 + 1	1
Technologie	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrogazéification
Énergie disponible sous forme Électrique [kWhél/an] Thermique [kWhth/an]	Z5 = 771.900 Et Y3 = 15.209.150	Z5 = 2.122.950 Et Y3 = 10.509.550	Z5' = 2.125.150 Et Y3' = 2.504.750
Biochar [T/an]	X4 = 5.670	X4 = 3.190	X4' = 80
Volume des déchets valorisés [m³/an] (Proportion du volume disponible [%])	X1 = 39.400 (100%)	X1 = 39.400 (100%)	X1 = 3.750 (10%)
Pourcentage de la production électrique par les GE théoriques⁴	12%	34%	34%
Pourcentage de la charge de base	32%	88%	89%
Litres de gasoil économisés [L/an]	220.500	606.600	607.200
Volume bois nécessaire pour la production d'une tonne de biochar [m³]	6,9	12,4	
Énergie électrique produite par tonne de biochar produite [kwhél]	136,1	665,5	
Volume bois nécessaire pour la production d'un kwhél [m³]			0,002
Quantité de biochar produit par kwhél produit [kg]			0,04

Pour le scénario A, le design de 3R Systems permet la maximisation de la production du biochar (près de 1,8 fois plus par rapport au système Arti). Le design de Arti permet de valoriser l'entièreté des déchets bois et de produire suffisamment d'électricité que pour couvrir 88% de la charge de base.

Pour le scénario B, un module « 300 kW » d'Energy&+ permettrait, en consommant seulement 10% des déchets bois disponible, de couvrir 89% de la charge de base nécessaire, correspondant à une économie annuelle en gasoil estimée à près de 607.200 litres. L'investissement dans un deuxième module pour couvrir les 11% restant de la charge de base ne semble pas pertinent car ce dernier ne fonctionnerait qu'à 13% de sa capacité.

³ Les modules sont décrits en ANNEXE 1

⁴ Le pourcentage de la production électrique par les groupes électrogènes est calculé à partir de la production électrique qui serait fournie par les groupes électrogènes théoriques nécessaires pour combler le besoin supplémentaire futur.

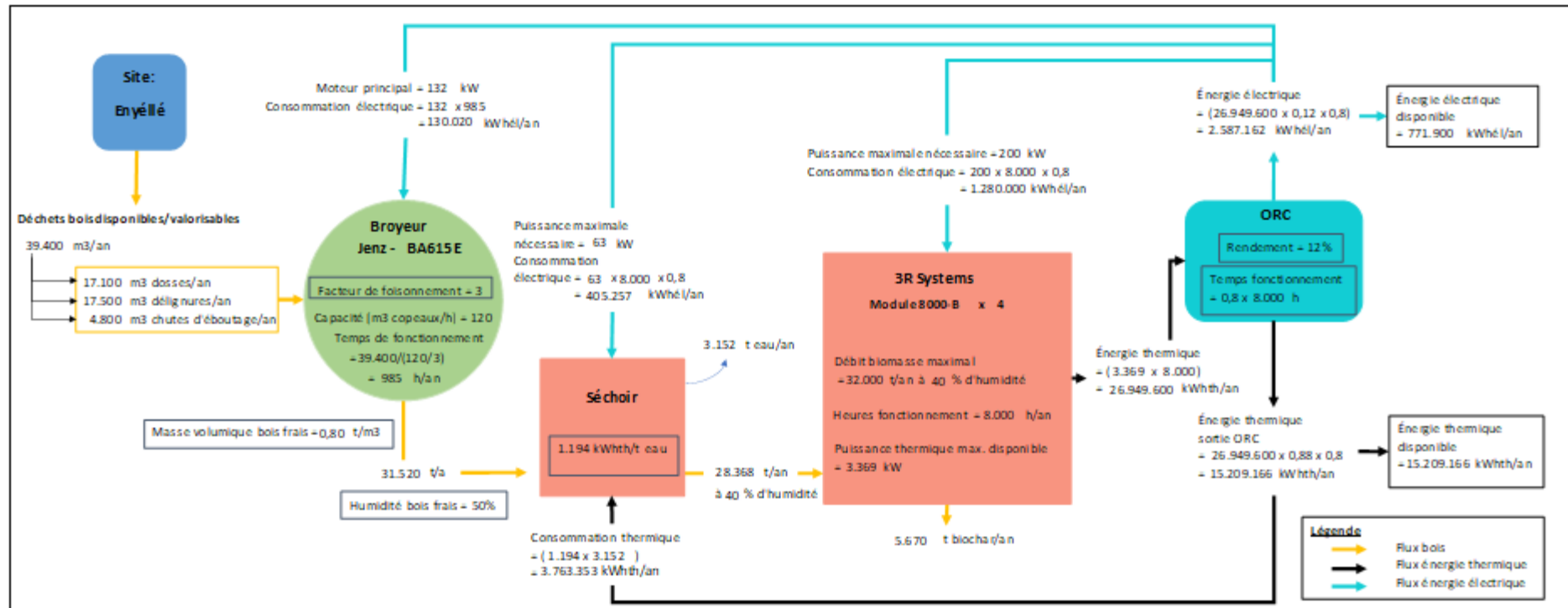


Figure 10 - Schéma de la solution 3R Systems du site d'Enyéllé – Scénario A

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$Puissance\ thermique\ maximale\ dispo. = 3 \times 950\ kW + 1 \times \left(\frac{28.368 - 24.000}{8.000} \right) \times 950\ kW = 3.369\ kW$$

Où 950 est la puissance thermique d'un module 8000-B [kW],

Où 28.368 est le nombre de tonnes annuelles en entrée pyrolyseurs [t/an]

Et où 8.000 est le débit maximal annuel d'un module 8000-B [t/an maximales]

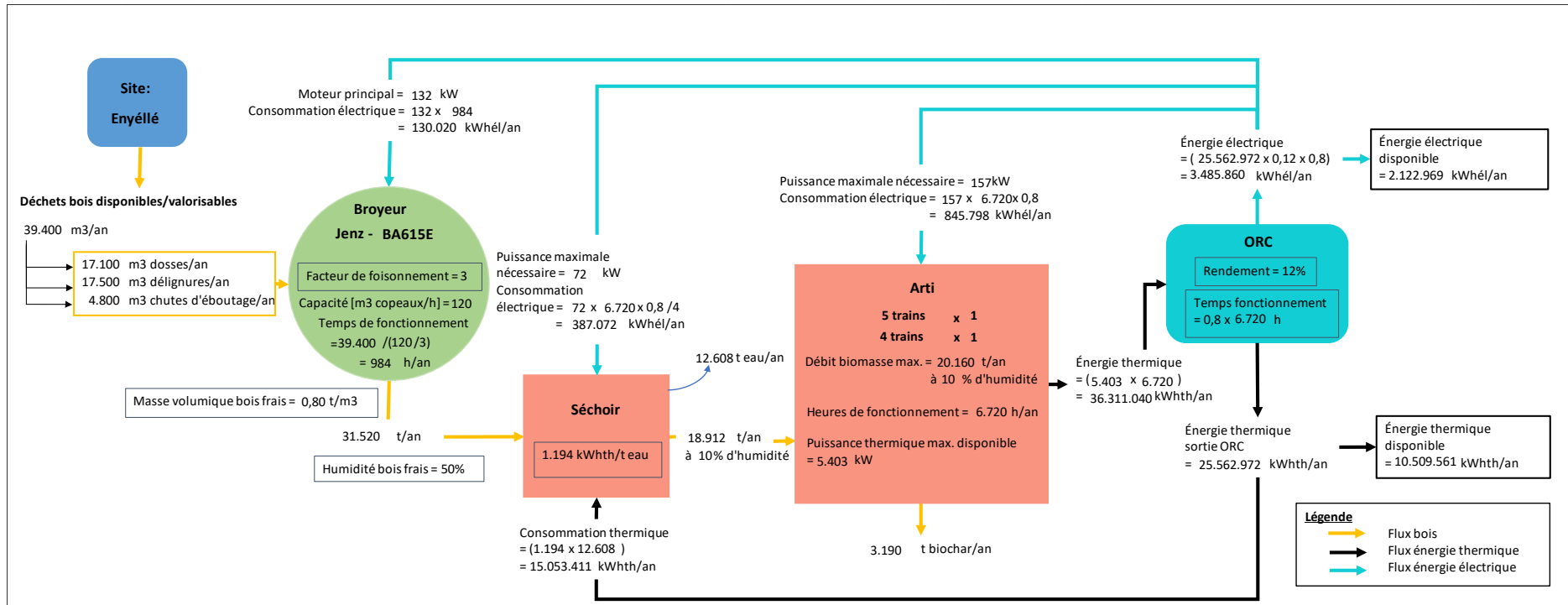


Figure 11 – Schéma de la solution Arti du site d'Enyéllé – Scénario A

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$P_{\text{thermique max. dispo.}} = 1 \times 3.200 \text{ kW} + 1 \times \frac{(18.912 - 11.200)}{8.960} \times 2.560 \text{ kW} = 3.200 \text{ kW} + \frac{7.712}{8.960} \times 2.560 \text{ kW} = 5.403 \text{ kW}$$

Où 3.200 et 2.560 sont les puissances thermiques d'un module 5 trains et d'un module 4 trains respectivement [kW]

Où 18.912 (11.200 + 7.712) est le nombre de tonnes annuelles en entrée pyrolyseurs [t/an]

et où 11.200 et 8.960 sont les débits totaux annuels maximaux des modules 5 trains et 4 trains respectivement [t/an maximales]

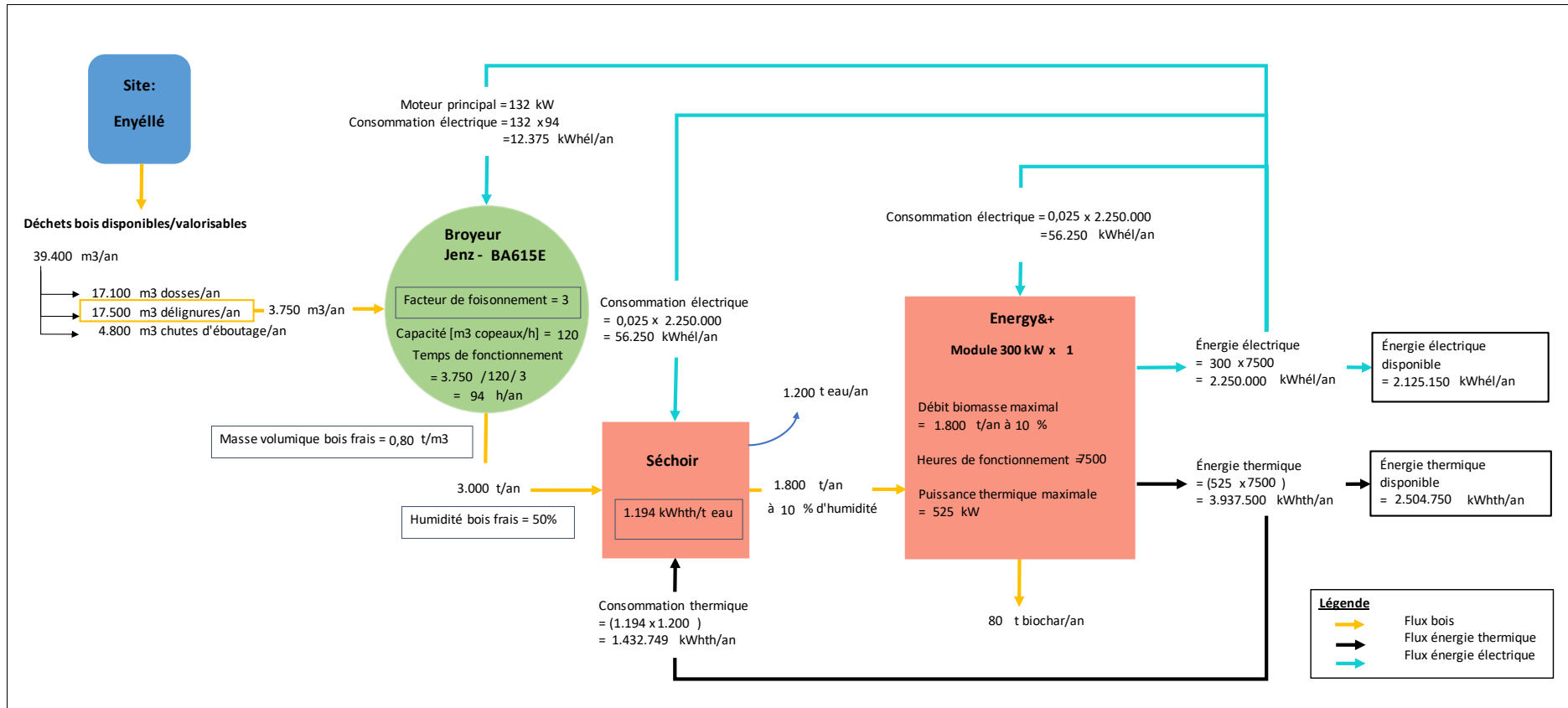


Figure 12 - Schéma de la solution Energy&+ du site d'Enyéllé – Scénario B

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$Puissance\ thermique\ maximale\ dispo. = 1 \times 525\ kW$$

Où 525 est la puissance thermique d'un module 300 kW [kW]



4.3.2. CEB - Bambidie

Flux de bois et d'énergie du site

Sur le site de Bambidie, la situation du site présentée à la Figure 13 devrait rester stable dans les années à venir tant au niveau de volume de bois scié que les consommations en gasoil. Les volumes de déchets disponibles et valorisables ont été validés par la direction et s'élèvent à 51.300m³. La puissance minimale requise sur le site, utilisée pour le calcul de la charge de base annuelle, a été fournie directement par le directeur technique et est équivalente à 352 kW_{él}.

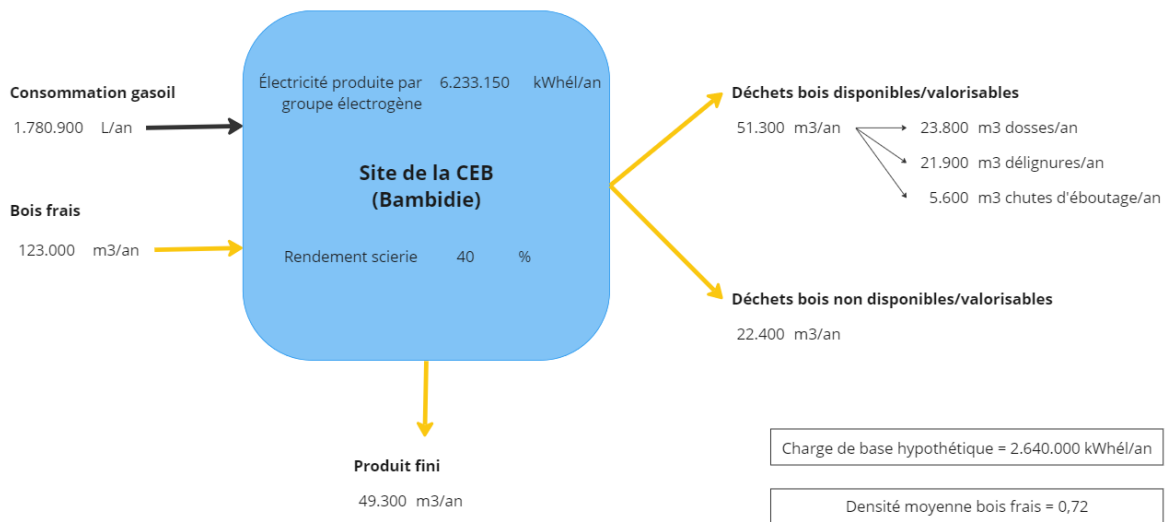


Figure 13 - Flux de bois et consommations de gasoil du site de la CEB à Bambidie

Solutions techniques envisageables

Pour le site de Bambidie, les constructeurs 3R Systems avec le module « intermédiaire » et Arti avec 2 unités du modèle « 5 trains » ont été retenus pour le scénario A. Les détails de ces designs sont schématisés aux Figure 14 et Figure 15 respectivement. Le constructeur Energy&+ et son module « 300 kW » ont été retenus pour le scénario B (schématisé à la Figure 16). Les résultats obtenus pour les configurations proposées pour le site de la CEB sont présentés au Tableau 6.

Tableau 6 – Détails des scénarios A et B site de la CEB

CEB	Scénario A		Scénario B
Constructeur	3R Systems	Arti	Energy&+
Modèle	Module échelle intermédiaire (1 réacteur)	5 trains	Module 300 kW
Nombre de machines	1	2	1
Technologie	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrogazéification
Énergie disponible sous forme			
Électrique [kWh_{él}/an]	Z5 = 467.550	Z5 = 2.562.500	Z5' = 2.123.750
Thermique [kWh_{th}/an]	Et Y3 = 17.822.500	Et Y3 = 12.315.400	Et Y3' = 2.504.750
Biochar [T/an]	X4 = 6.650	X4 = 3.740	X4' = 80
Volume des déchets valorisés [m³/an]	X1 = 51.300	X1 = 51.300	X1' = 4.170
(Proportion du volume disponible [%])	(100%)	(100%)	(8%)
Pourcentage de la production électrique par les GE	8%	41%	34%
Pourcentage de la charge de base	18%	97%	80%
Litres de gasoil économisés [L/an]	133.600	732.100	606.800
Volume bois nécessaire pour la production d'une tonne de biochar [m³]	7,7	13,7	
Énergie électrique produite par tonne de biochar produite [kWh_{él}]	70,3	685,2	
Volume bois nécessaire pour la production d'un kWh_{él} [m³]			0,002
Quantité de biochar produit par kWh_{él} produit [kg]			0,04

Au vu de la quantité de déchets disponibles sur le site de la CEB, le module de 3R Systems permet une production de près du double (~1,8) de biochar comparé au système Arti. L'énergie électrique disponible pour ce dernier permettrait de couvrir 97% de la charge de base. La solution d'Energy&+ dans le scénario B devrait permettre de couvrir environ 80% de la charge de base nécessaire sur le site de Bambidie avec une économie annuelle en gasoil estimée à près de 607.000 litres, tout en consommant 9% des déchets disponibles. Pour pouvoir couvrir l'entièreté de la charge de base, un deuxième module serait nécessaire. Cette option n'a pas été retenue car le deuxième module ne fonctionnerait qu'à 24% de sa capacité.

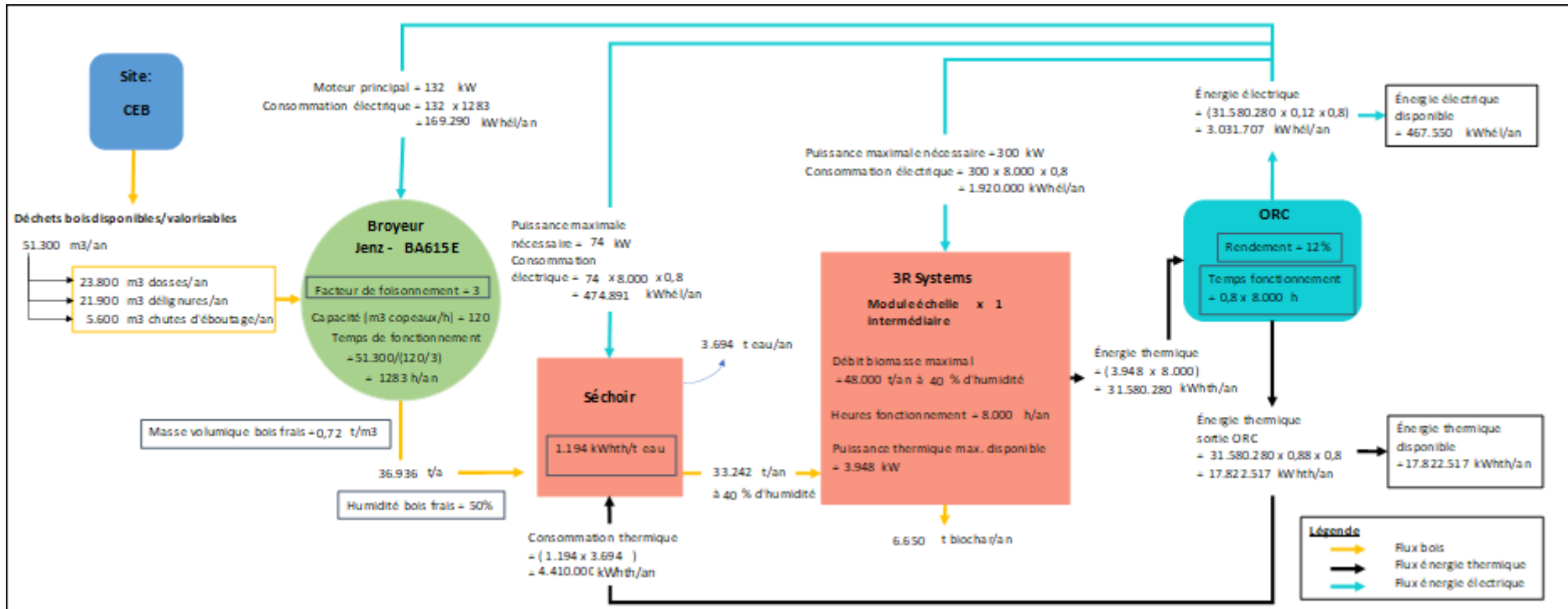


Figure 14 – Schéma de la solution 3R Systems du site de la CEB – Scénario A

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$Puissance\ thermique\ maximale\ dispo. = 1 \times \left(\frac{33.242}{48.000} \right) \times 5.700\ kW = 3.948\ kW$$

Où 5.700 est la puissance thermique d'un module intermédiaire [kW],
 Où 33.242 est le nombre de tonnes annuelles en entrée pyrolyseurs [t/an]
 et où 48.000 est le débit total annuel maximal [t/an maximales]

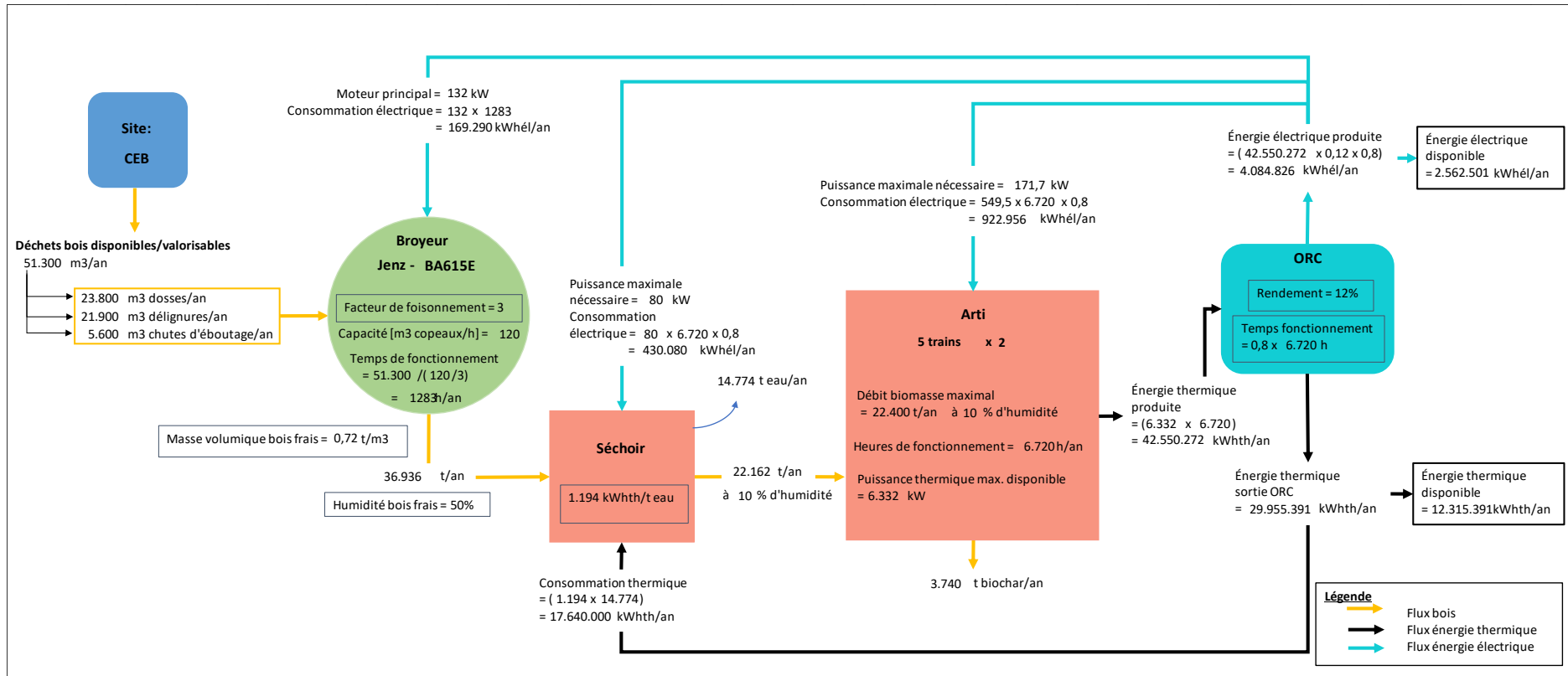


Figure 15 – Schéma de la solution Arti du site de la CEB – Scénario A

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$Puissance\ thermique\ maximale\ dispo. = 1 \times 3.200\ kW + 1 \times \left(\frac{22.162 - 11.200}{11.200} \right) \times 3.200\ kW = 6.332\ kW$$

Où 3.200 est la puissance thermique d'un module 5 trains [kW]

Où 22.162 (11.200 + 10.962) est le nombre de tonnes annuelles en entrée pyrolyseurs [t/an]

et où 11.200 est le débit total annuel maximal d'un module 5 trains [t/an maximales]

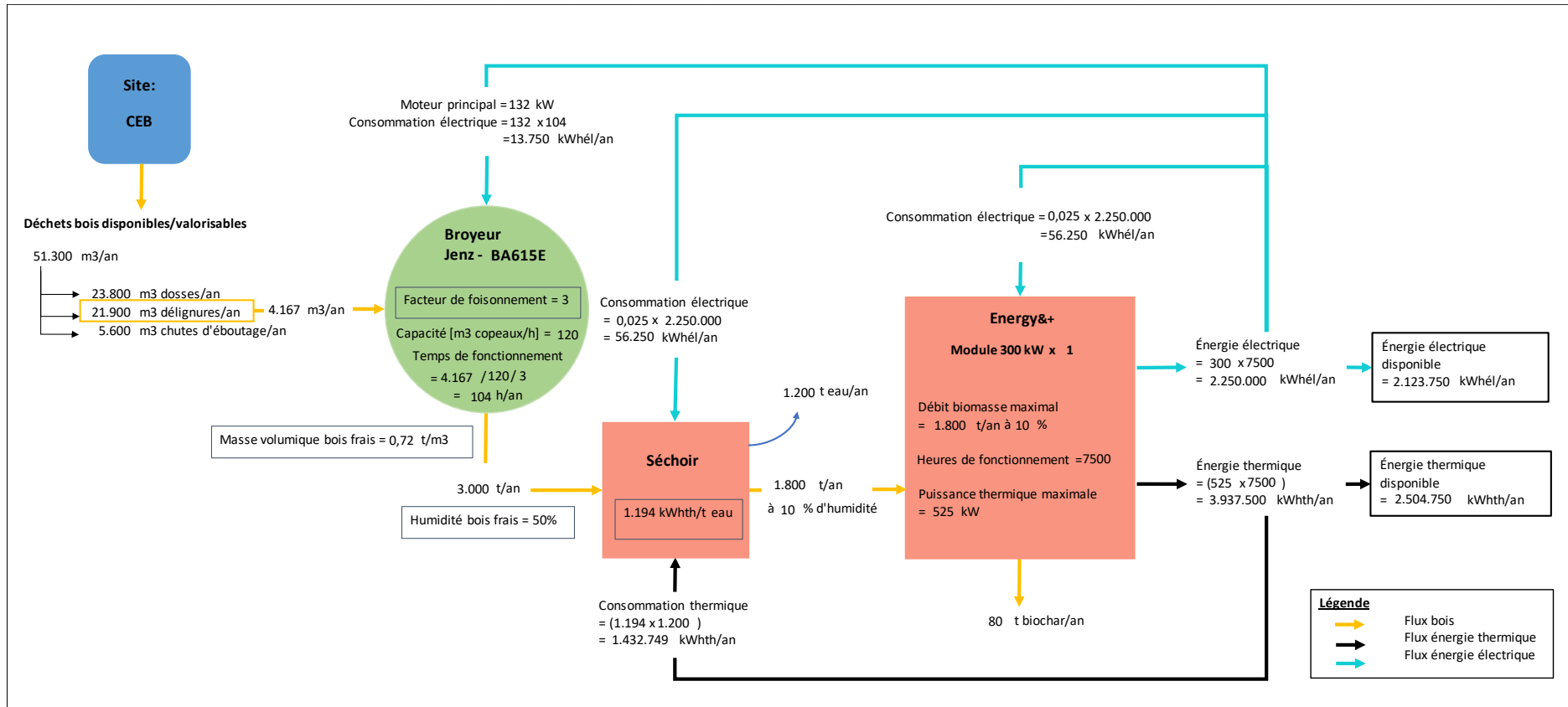


Figure 16 – Schéma de la solution Energy&+ du site de la CEB – Scénario B

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

Puissance thermique maximale dispo. = 1 x 525 kW

Où 525 est la puissance thermique d'un module 300 kW [kW]



4.3.3. GSEZ - Lambaréné

Flux de bois et d'énergie du site

Le site de Lambaréné, contrairement au site de Nkok, a été retenu par GSEZ pour le projet énergie avec un bonus en biochar. En effet, le site d'Ikolo à Lambaréné, constitué en zone économique spéciale et approvisionné en gasoil est en pleine expansion, et voit l'implantation régulière de nouvelles industries. Les calculs de dimensionnement sont basés sur la projection 2025 qui estime à 650.000 m³/an le volume de grumes qui entrera dans la zone économique spéciale. La consommation de gasoil n'étant pas connue, celle-ci a été extrapolée à partir de la consommation d'un autre site (celui de la CEB). La charge de base n'étant pas connue, celle-ci a été estimée à 30% de la valeur de la consommation énergétique annuelle. Ces différentes valeurs sont reprises à la Figure 17.

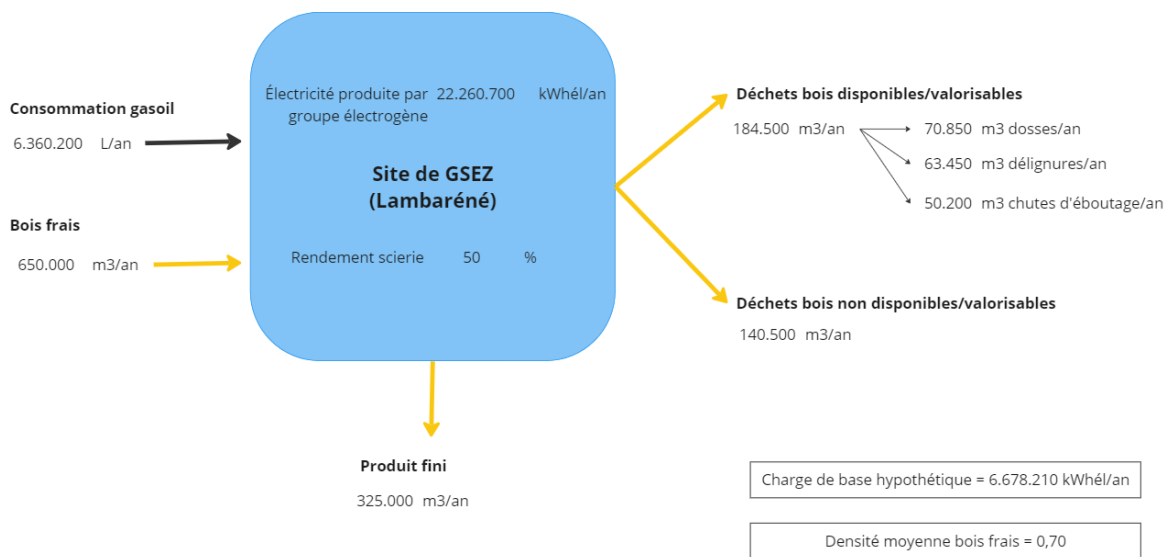


Figure 17 - Flux bois et gasoil du site de GSEZ à Lambaréné

Solutions techniques envisageables

Les constructeurs 3R Systems avec le module « grande échelle » et 3 modules « 8000-B » ainsi que Arti avec 7 unités du modèle « 5 trains » ont été retenus pour le scénario A. Les constructeurs Arti avec 5 unités du modèle « 5 trains » et Energy&+ avec 3 modules « 300 kW » ont été retenus pour le scénario B. Ces dimensionnements sont schématisés de la Figure 18 à la Figure 21. Les résultats de ces configurations sont détaillés au Tableau 7.



Tableau 7 – Détails des scénarios A et B du site de la GSEZ à Lambaréné

Lambaréné	Scénario A		Scénario B	
Constructeur	3R Systems	Arti	Arti	Energy&+
Modèle	Module grande échelle + Modules 8000-B	5 trains	5 trains	Module 300 kW
Nombre machines	1+3	7	5	3
Technologie	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrogazéification
Énergie disponible :				
Electrique [kWh_{él}/an]	Z5 = 3.531.300	Z5 = 8.939.050	Z5 = 6.495.050	Z5' = 6.370.050
Thermique [kWh_{th}/an]	Et Y3 = 62.318.000	Et Y3 = 43.061.850	Et Y3 = 30.426.750	Et Y3' = 7.514.250
Biochar [T/an]	X4 = 23.250	X4 = 13.080	X4 = 9.240	X4' = 240
Volume des déchets valorisés [m³/an] (Proportion du volume disponible [%])	X1 = 184.500 (100%)	X1 = 184.500 (100%)	X1 = 114.697 (71%)	X1' = 12.860 (7%)
Pourcentage de la production électrique par les GE théoriques	16%	43%	29%	29%
Pourcentage de la charge de base	53%	134%	97%	95%
Litres de gasoil économisés [L/an]	1.008.900	2.554.000	1.855.726	1.820.000
Volume bois nécessaire pour la production d'une tonne de biochar [m³]	7,2	12,7		
Énergie électrique produite par tonne de biochar produite [kWh_{él}]	151,9	683,4		
Volume bois nécessaire pour la production d'un kWh_{él} [m³]			0,021	0,002
Quantité de biochar produit par kWh_{él} produit [kg]			1,45	0,04

Au vu de la quantité de déchets disponibles sur le site de Lambaréné, le module grande échelle de 3R Systems en combinaison de trois modules « 8000-B » permettent de produire une quantité de biochar de ~1,8 fois supérieure est obtenue par rapport au système Arti. Le design Arti permettant d'absorber l'intégralité des déchets bois couvrirait largement la charge de base. Seule une partie l'énergie thermique en sortie de pyrolyse devrait dans ce cas être envoyée vers le dispositif ORC afin de ne pas excéder cette charge de base.

La solution Arti dans le scénario B permet de couvrir 97% de la charge de base en valorisant 71% des déchets du site avec une économie annuelle en gasoil estimée à 1.855.726 litres. La solution Energy&+ quant à elle devrait permettre de couvrir 95% de la charge de base estimée nécessaire sur le site avec une économie annuelle en gasoil estimée à près de 1.820.000 litres et une consommation de 7% des déchets disponibles.

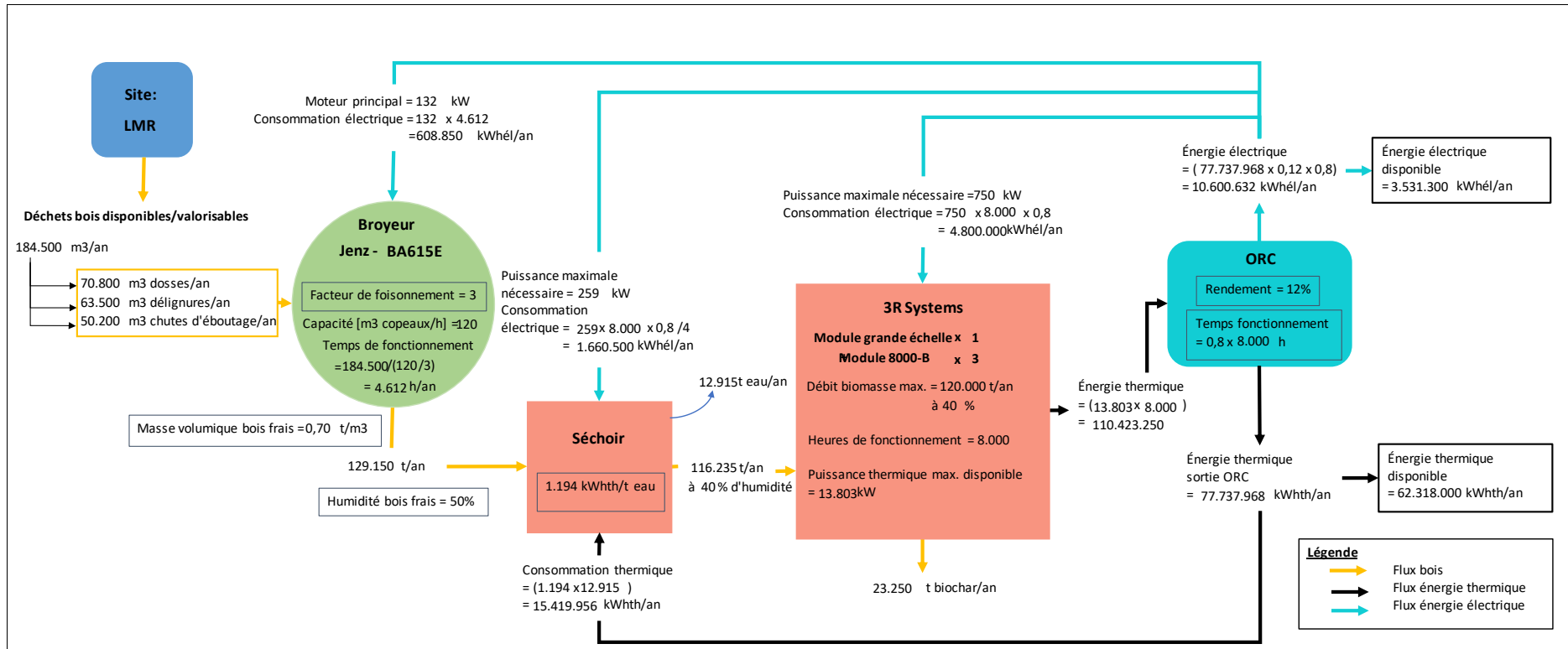


Figure 18 - Schéma de la solution 3R Systems du site le Lambaréné – Scénario A

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$P_{\text{puissance thermique maximale dispo.}} = 1 \times 11.400 \text{ kW} + 2 \times 950 \text{ kW} + 1 \times \left(\frac{116.235 - 96.000 - 16.000}{8.000} \right) \times 950 \text{ kW} = 13.803 \text{ kW}$$

Où 11.400 et 950 sont les puissances thermiques du module grande échelle et du module 8000-B respectivement [kW],

Où 116.235 (96.000 + 2 x 8000 + 4.235) est le nombre de tonnes annuelles en entrée pyrolyseurs [t/an]

et où 96.000 et 8.000 sont les débits totaux annuels maximaux du module grande échelle et du module 8000-B respectivement [t/an maximales]

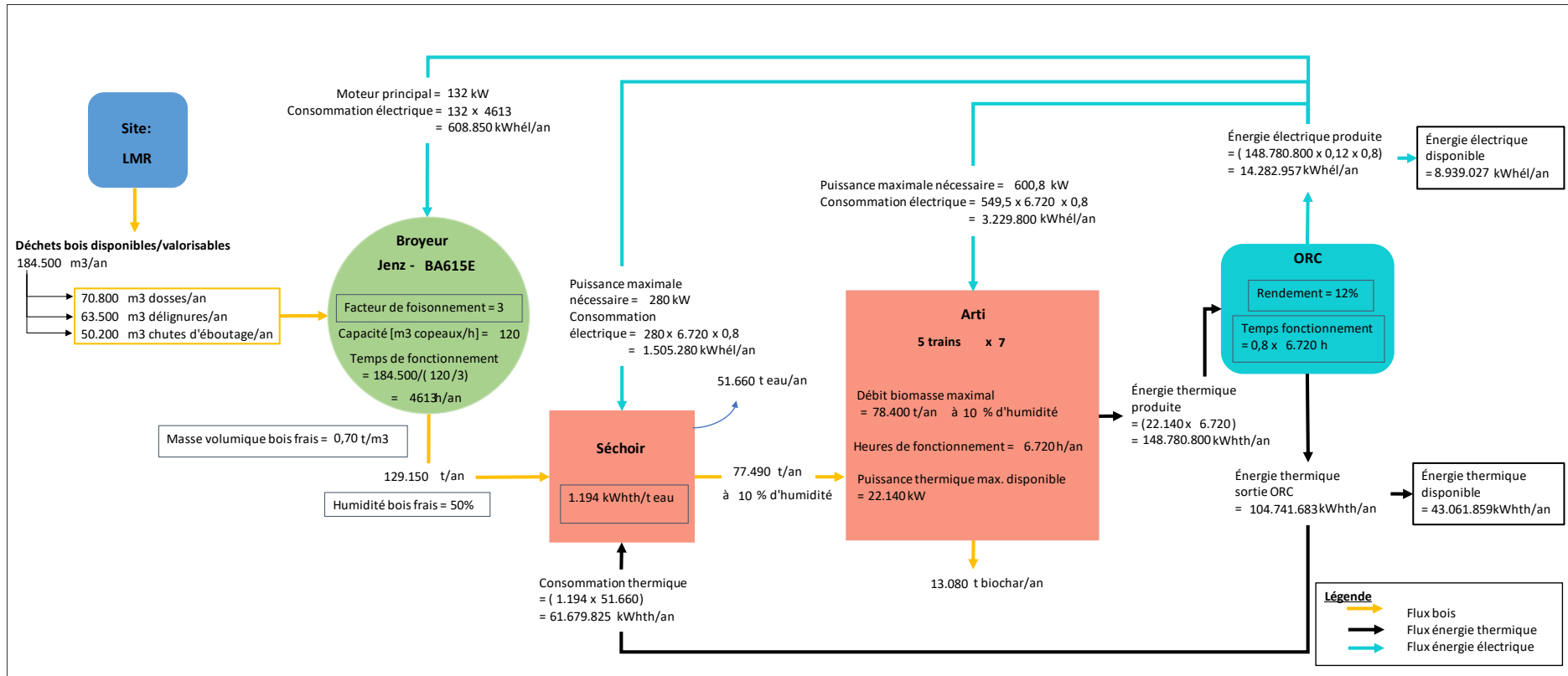


Figure 19 – Schéma de la solution Arti du site de Lambaréné – Scénario A

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$Puissance\ thermique\ maximale\ dispo. = 6 \times 3.200\ kW + 1 \times \left(\frac{77.490 - (6 \times 11.200)}{11.200} \right) \times 3.200\ kW = 22.140\ kW$$

Où 3.200 est la puissance thermique d'un module 5 trains [kW]

Où 77.490 est le nombre de tonnes annuelles en entrée pyrolyseurs [t/an]

et où 11.200 est le débit total annuel maximal d'un module 5 trains [t/an maximales]

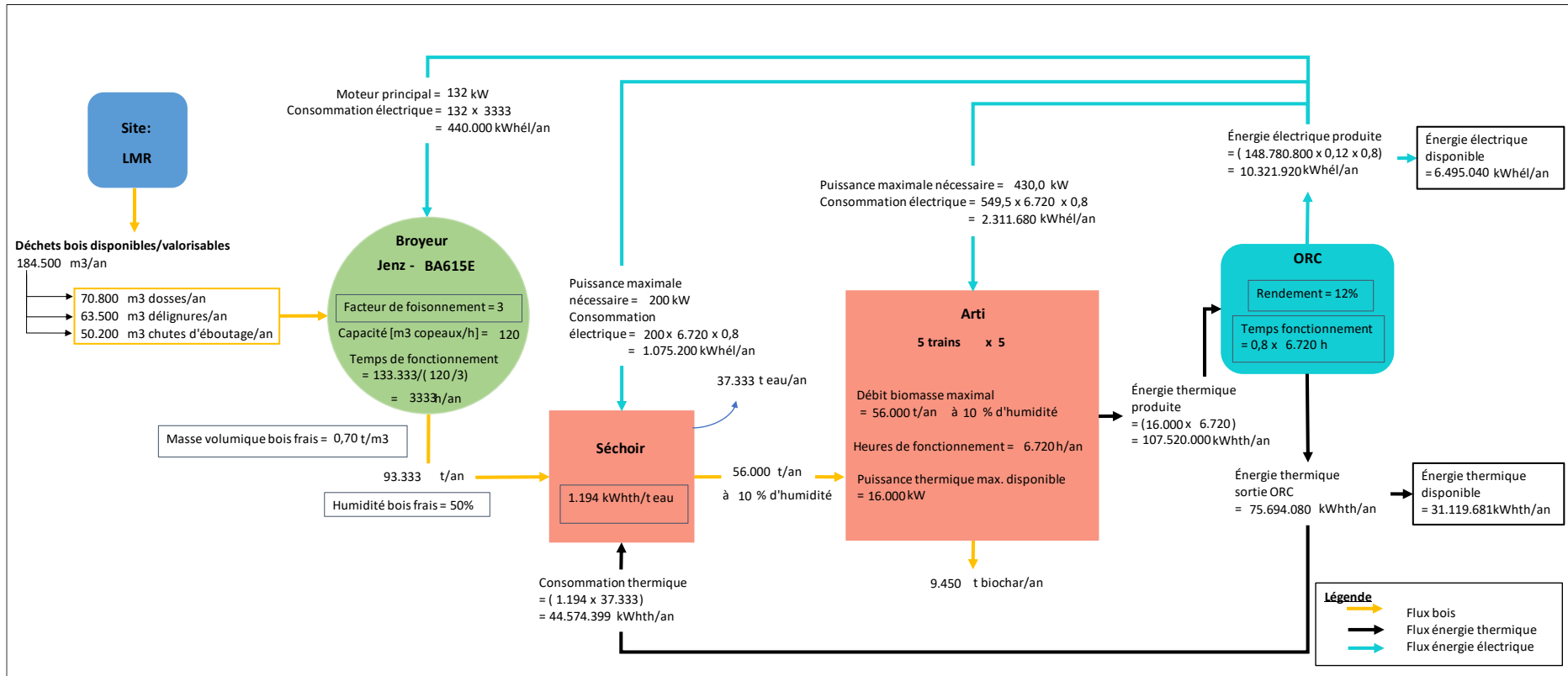


Figure 20 - Schéma de la solution Arti du site de Lambaréné – Scénario B

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$Puissance\ thermique\ maximale\ dispo. = 4 \times 3.200\ kW + 1 \times \left(\frac{54.753 - (4 \times 11.200)}{11.200} \right) \times 3.200\ kW = 15.644\ kW$$

Où 3.200 est la puissance thermique d'un module 5 trains [kW]

Où 54.753 est le nombre de tonnes annuelles en entrée pyrolyseurs [t/an]

et où 11.200 est le débit total annuel maximal d'un module 5 trains [t/an maximales]

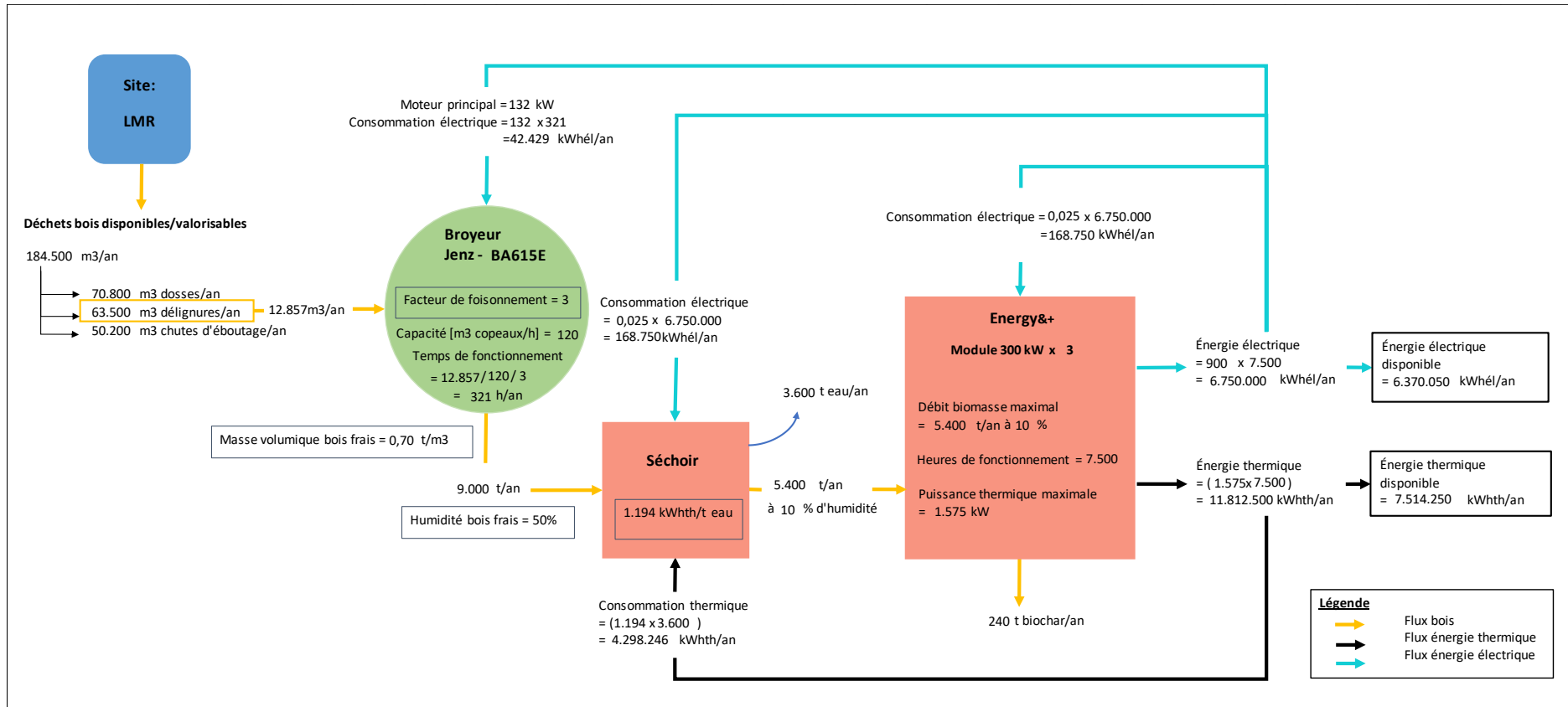


Figure 21 – Schéma de la solution Energy&+ du site de Lambaréné – Scénario B

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$\text{Puissance thermique maximale dispo.} = 3 \times 525 \text{ kW} = 1.575 \text{ kW}$$

Où 525 est la puissance thermique d'un module 300 kW [kW], multiplié par le nombre de modèles

Où 5.400 est le nombre de tonnes annuelles en entrée pyrolyseurs [t/an]

et où 5.400 (3 x 1.800) est le débit total annuel maximal [t/an maximales]



4.3.4. Pallisco - Mindourou

Flux de bois et d'énergie du site

Sur le site de Pallisco, la situation présentée à la Figure 22 devrait rester stable dans les années à venir tant au niveau de volume de bois scié que les consommations en gasoil. Les proportions de déchets bois ont été validés par le responsable du site d'exploitation de Pallisco. Le volume de déchets disponibles et valorisables s'élève à 32.300 m³/an. La charge de base a été déterminée sur la base d'un graphique du profil de puissance du site fourni lors de la visite de terrain.

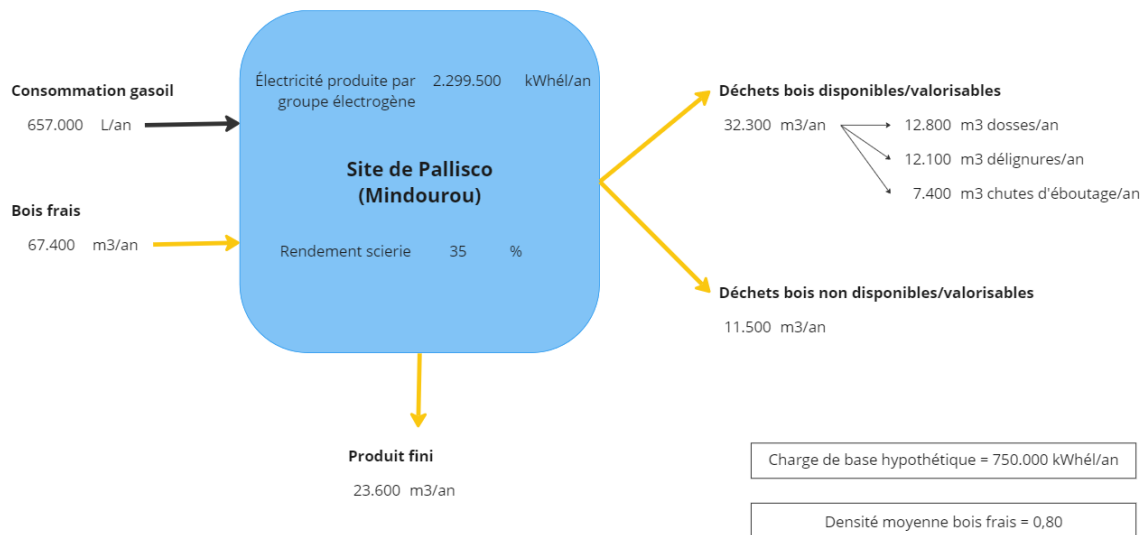


Figure 22 - Flux bois et gasoil du site de Pallisco à Mindourou

Solutions techniques envisageables

Pour le site de Pallisco, les constructeurs 3R Systems avec 3 modules « 8000-B » et Arti avec 1 unité du modèle « 5 trains » et 1 unité du modèle « 2 trains » ont été retenus pour le scénario A (Figure 23 et Figure 24). Pour le scénario B, 1 unité du modèle « 4 trains » de Arti et 1 module « 300 kW » d'Energy&+ ont été retenus (Figure 25 et Figure 26). Les résultats des configurations proposées pour le site de Pallisco sont présentés au Tableau 8.

Tableau 8 – Scénarios A et B site de Pallisco

Pallisco	Scénario A		Scénario B	
Constructeur	3R Systems	Arti	Arti	Energy&+
Modèle	Module 8000-B	5 trains+ 2 trains	4 trains	Module 300 kW
Nombre machines	3	1+1	1	1
Technologie	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrogaz
Énergie disponible sous forme				
Électrique [kWhél/an]	Z5 = 722.200	Z5 = 1.747.100	Z5 = 750.000	Z5' = 750.000
Thermique [kWhth/an]	Et Y3 = 12.468.400	Et Y3 = 8.615.700	Et Y3 = 4.080.100	Et Y3' = 883.950
Biochar sec [T/an]	X4 = 4.650	X4 = 2.620	X4 = 1.240	X4' = 30
Volume des déchets valorisés [m³/an]	X1 = 32.300	X1 = 32.300	X1 = 15.296	X1' = 1.320
(Proportion du volume disponible [%])	(100%)	(100%)	(47%)	(4%)
Pourcentage de la production électrique par les GE	31%	76%	33%	33%
Pourcentage de la charge de base	96%	233%	100%	100%
Litres de gasoil économisés [L/an]	206.300	499.200	214.300	214.300
Volume bois nécessaire pour la production d'une tonne de biochar [m³]	7,0	12,3		
Énergie électrique produite par tonne de biochar produite [kWhél]	155,3	666,8		
Volume bois nécessaire pour la production d'un kWhél [m³]			0,031	0,002
Quantité de biochar produit par kWhél produit [kg]			1,65	0,04



Au vu de la quantité de déchets disponibles sur le site de Pallisco, le module de 3R Systems permet une production de biochar près de ~1,8 fois supérieure comparé au système Arti. Au vu des besoins énergétiques, l'énergie électrique produite par la solution Arti excède la charge de base. En cas de sélection du scénario A par l'entreprise, seule une partie l'énergie thermique en sortie de pyrolyse devra dans ce cas être envoyée vers le dispositif ORC afin de ne pas excéder cette charge de base.

Dans le scénario B, les solutions Arti et Energy&+ permettent de couvrir entièrement la charge de base nécessaire sur le site avec une économie annuelle en gasoil estimée à près de 214.300 litres pour une valorisation de 47% et 4% des déchets bois disponibles respectivement.

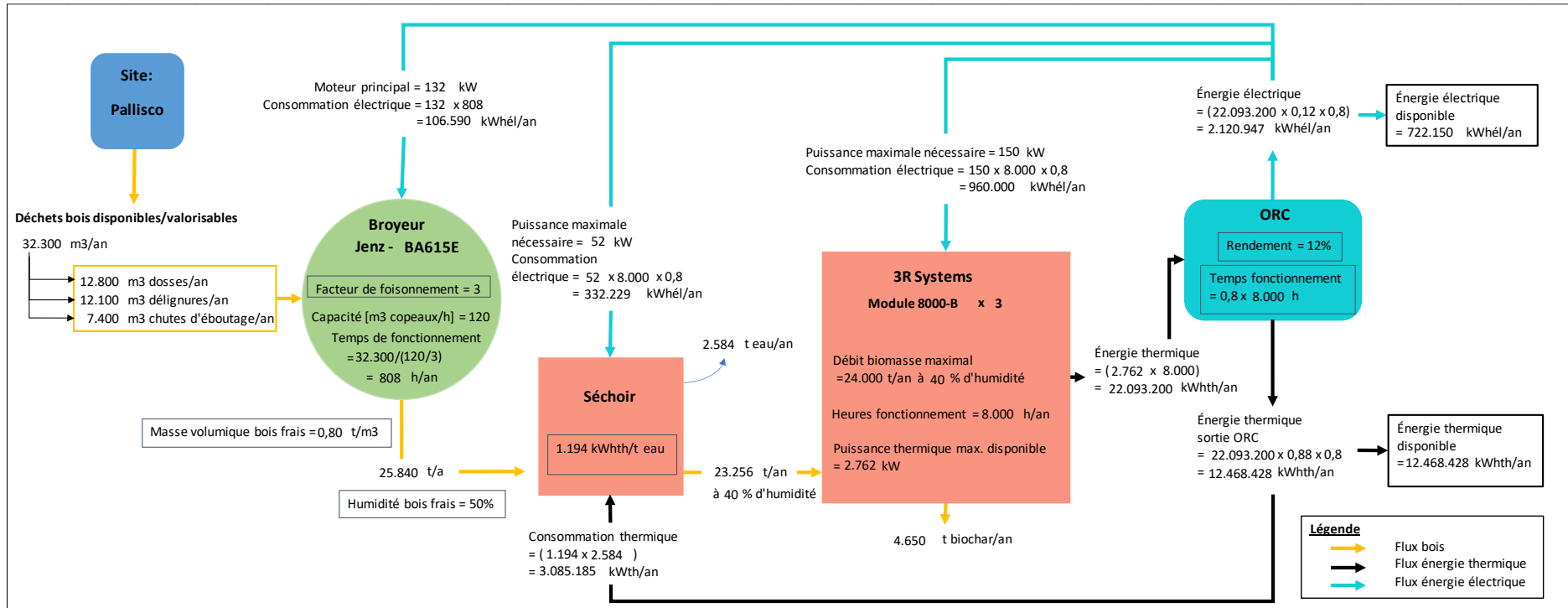


Figure 23 - Schéma de la solution 3R Systems du site de Pallisco – Scénario A

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$Puissance\ thermique\ maximale\ dispo. = 2 \times 950\ kW + 1 \times 950 \times \frac{23.256 - 8.000}{8.000} = 2.762\ kW$$

Où 950 est la puissance thermique d'un module 8000-B [kW],

Où 23.256 est le nombre de tonnes annuelles en entrée pyrolyseurs [t/an]

et où 8.000 est le débit total annuel maximal d'un module 8000-B [t/an maximales]

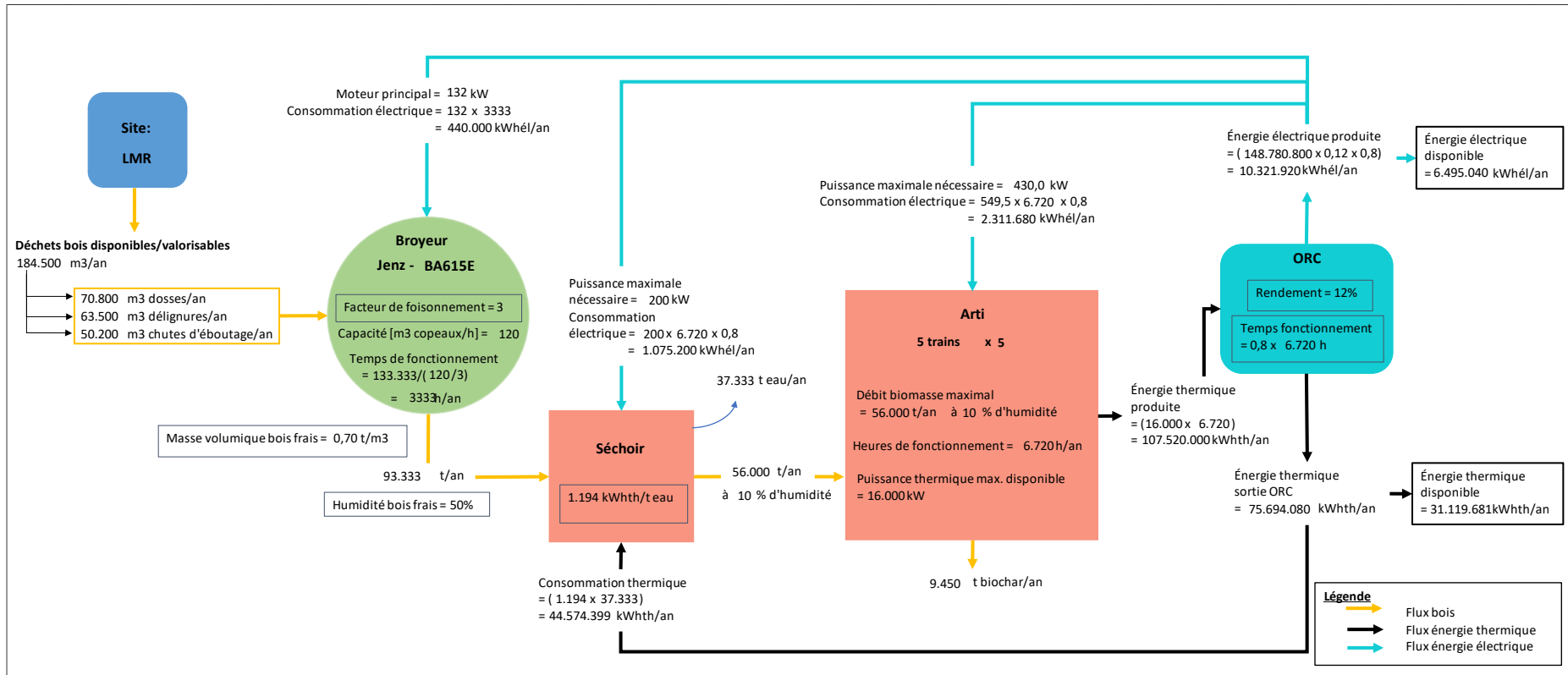


Figure 24 - Schéma de la solution Arti du site de Pallisco – Scénario A

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$Puissance\ thermique\ maximale\ dispo. = 1 \times \frac{11.200}{11.200} \times 3.200\ kW + 1 \times \frac{(15.504 - 11.200)}{4.480} \times 1.280\ kW = 3.200\ kW + \frac{4.304}{4.480} \times 1.280\ kW = 4.430\ kW$$

Où 3.200 et 1.280 sont les puissances thermiques d'un module 5 trains et d'un module 2 trains respectivement [kW]

Où 15.504 (11.200 + 4.304) est le nombre de tonnes annuelles en entrée pyrolyseurs [t/an]

et où 15.680 (11.200 + 4.480) est le débit total annuel maximal des modules 5 trains et 2 trains [t/an maximales]

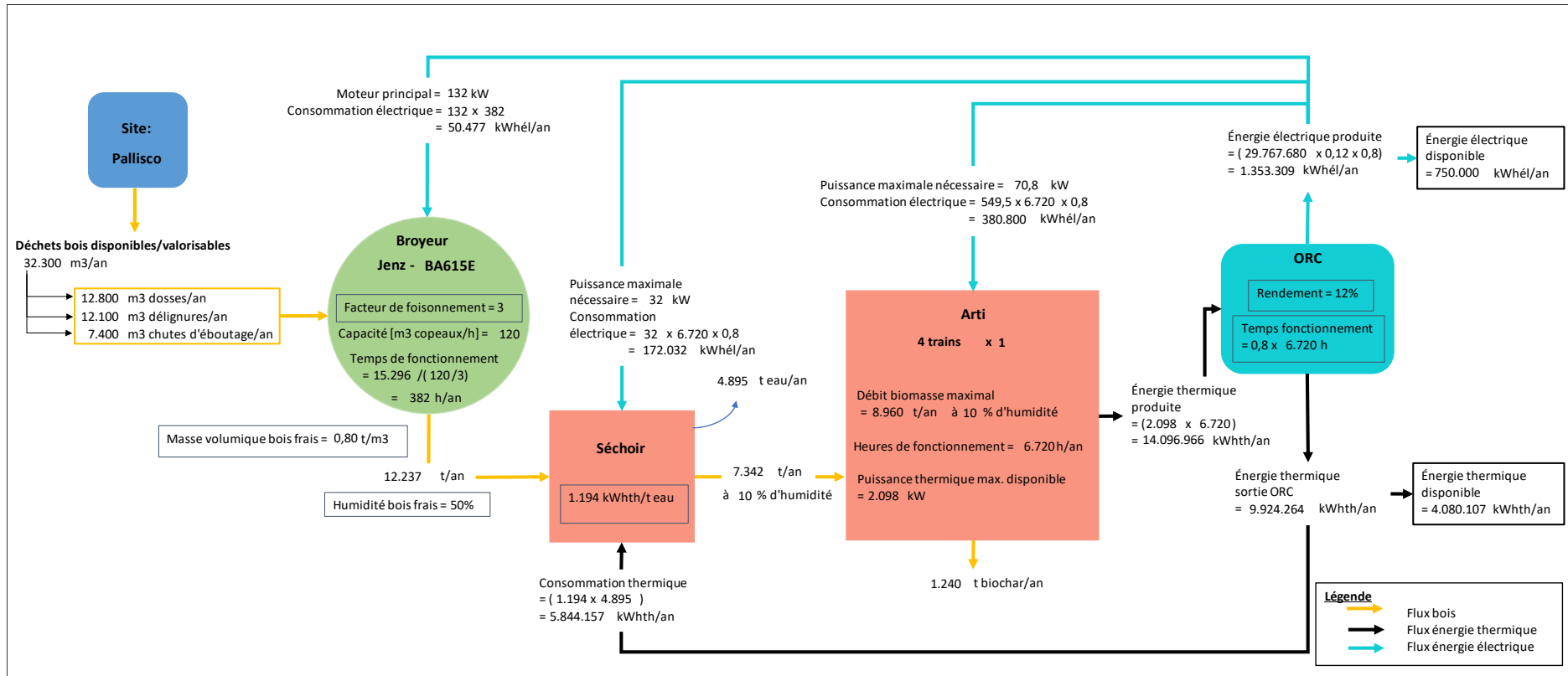


Figure 25 - Schéma de la solution Arti du site de Pallisco – Scénario B

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$Puissance\ thermique\ maximale\ dispo. = 1 \times \frac{7.044}{8.960} \times 2.560\ kW = 2.013\ kW$$

Où 2.560 est la puissance thermique d'un module 4 trains [kW]

Où 7.044 est le nombre de tonnes annuelles en entrée pyrolyseurs [t/an]

et où 8.960 est le débit total annuel maximal d'un module 5 trains [t/an maximales]

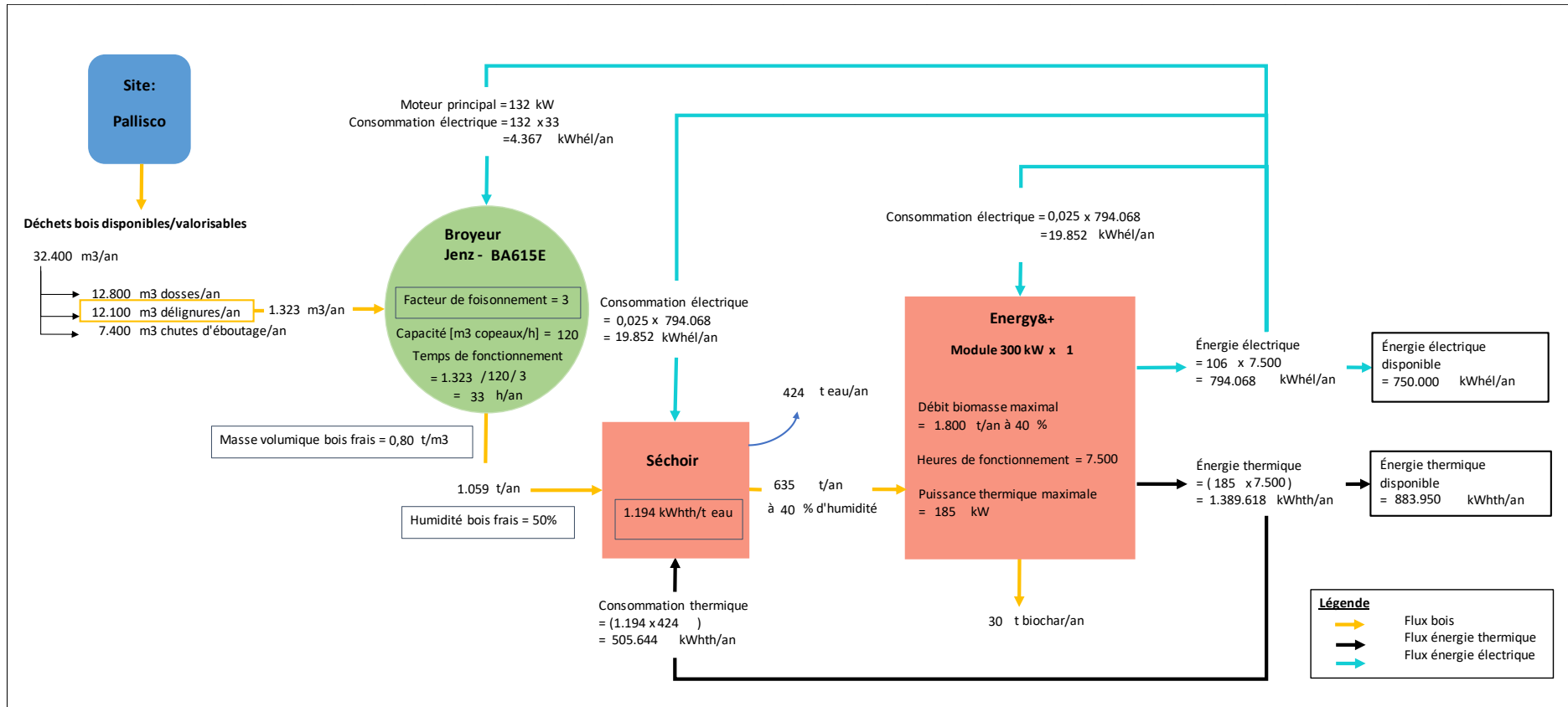


Figure 26 - Schéma de la solution Energy&+ du site de Pallisco – Scénario B

La puissance thermique maximale disponible est calculée de la façon suivante :

$$Puissance\ thermique\ maximale\ dispo. = 1 \times 525\ kW \times \frac{635}{1.800} = 185\ kW$$

Où 525 est la puissance thermique d'un module 300 kW [kW], multiplié par le nombre de modèles

Où 635 est le nombre de tonnes annuelles en entrée pyrolyseurs [t/an]

et où 1.800 est le débit total annuel maximal [t/an maximales].



5. CERTIFICATION CARBONE

Ce chapitre traite des deux pistes de certification carbone adaptées au projet et accessibles actuellement : Les certifications du biochar, associées à la production et la séquestration du biochar dans les sols, et la certification du Mécanisme de Développement Propre (CDM – *Clean Development Mechanism*), porté par les Nation Unies et adossé à la réduction de consommation d'énergies fossiles.

Pour rappel, l'objectif de la certification carbone est de pouvoir mettre en place des projets de réduction des émissions carbone et de générer des crédits carbone (un crédit équivaut à une tonne de CO₂éq) pouvant être revendus sur le marché volontaire (tant les crédits biochar que les crédits CDM) et générer un revenu pour les porteurs de projets. Les crédits biochar sont éligibles exclusivement pour le marché volontaire du carbone tandis que les crédits CDM sont éligibles pour le marché volontaire du carbone et le marché réglementé également[16].

5.1. CERTIFICATION CARBONE BIOCHAR

A l'heure actuelle, il existe trois standards de certification biochar : [EBC](#), [Puro Standard](#) et [VCS](#), permettant la génération de crédits carbone disposant pour certains, d'une plateforme de vente de crédits dédiée (Tableau 9). Ces différents standards et leurs exigences respectives pour la certification de même qu'une feuille de route sont présentés succinctement dans les sections 5.1.1 à 5.1.3. Les exigences additionnelles et modalités de calcul des crédits carbone pour chaque standard sont précisées en ANNEXE 6.

Tableau 9 – Comparatif des différents standards de certification carbone

Critère	EBC	Puro Standard	VCS
Certificat	Certificats EBC + C-Sink	Certificat Puro Standard	Certificat VCS
Plateforme vente crédits	CarbonFuture ⁵	Puro.earth	South Pole (entre autres)
Prix de vente des crédits carbone*	Minimum 100€. Actuellement, entre 120 \$USD et 250 \$USD (soit entre 109 et 227€) sur la plateforme Carbonfuture.	Choix du prix par le porteur de projet. Actuellement entre 105 et 535€ sur le registre Puro.earth.	Méthodologie publiée en août 2022. Aucun crédit carbone biochar émis à ce jour ⁶ .

* Les prix de vente indiqués sont ceux apparaissant sur les registres, une commission est à appliquer afin de connaître le prix de revient au porteur de projet.

⁵ Carbonfuture est une société qui travaille avec des producteurs de biochar dans plus de 15 pays, en Afrique notamment et avec différents standards et méthodologies.

⁶ La procédure de certification dure environ 1 an avant de générer des crédits carbone.

5.1.1. Le certificat européen de biochar (EBC)

[EBC](#) est un ensemble de [17] directives qui ont été développées par Carbon Standard International. L'objectif de ces lignes directrices est d'encourager et de garantir le contrôle de la production et de la qualité du biochar sur la base de procédés bien documentés, juridiquement fondés, économiquement viables et applicables dans la pratique.



Un certain nombre de classes de certification ont été mises en place en fonction de l'usage du biochar disposant chacune de requis spécifiques : EBC-Feed ; EBC-Agro and EBC-AgroOrganic ; EBC-Urban ; EBC-ConsumerMaterials et EBC-BasicMaterials.

Si le certificat EBC permet de garantir la qualité intrinsèque du biochar, la génération de crédit carbone nécessite d'obtenir également la certification [C-Sink](#) [17] qui certifie la quantité de CO₂ séquestré (puits carbone) par le projet. Cette certification complémentaire n'est envisageable que pour les projets biochar déjà certifiés EBC et selon une méthodologie [17] spécifique.

Exigences d'éligibilité

Les principales exigences d'éligibilité pour la certification EBC sont les suivantes :

1. Le biochar ne peut être produit à partir de bois forestier que si la gestion durable de la forêt correspondante peut être prouvée par des certificats PEFC ou FSC-FM ou par des certificats régionaux comparables ;
2. Tous les types de biomasse inclus dans la liste positive EBC [18] peuvent être utilisés individuellement ou en mélange comme approvisionnement pour la production de biochar EBC. Au sein d'un même lot, le type de biomasse ne peut pas être changé et les ratios des mélanges ne peuvent pas fluctuer de plus de **20%** ;
3. À l'exception de EBC-Feed, jusqu'à **10%** d'additifs minéraux présents dans la liste positive EBC peuvent être ajoutés ;
4. À l'exception du préchauffage du réacteur de pyrolyse, l'utilisation de combustibles fossiles pour chauffer le réacteur de pyrolyse est interdite ;
5. Les gaz de pyrolyse produits lors de la pyrolyse doivent être récupérés ou brûlés. Ils ne doivent pas s'échapper dans l'atmosphère ;
6. L'utilisation de chaleur excédentaire (au moins 70%) ou l'utilisation des produits de pyrolyse doit être garantie ;
7. Les valeurs limites d'émissions issues la combustion du gaz de synthèse (syngaz) définies au niveau national doivent être respectées ;
8. Différentes valeurs doivent être respectées pour certains paramètres intrinsèques du biochar, en fonction de sa classe de certification. De plus, le rapport O/C_{org} est également important pour caractériser le biochar et le différencier d'autres produits de carbonisation. La teneur en oxygène peut être calculée à partir des teneurs en C, H, N, S et cendres. Concernant les composés organiques volatiles, une analyse thermogravimétrique doit être réalisée la première année de contrôle de l'installation.



Les procédures visant l’obtention des labels C-Sink et EBC sont communes. Les étapes menant à la certification C-Sink et à la certification EBC sont identiques et contrôlées par les mêmes personnes/organismes. Cependant, les coûts associés à chacune des étapes différentes en fonction du label que le producteur cherche à obtenir (EBC, C-Sink ou les deux) :

1. Les producteurs de biochar doivent **s’enregistrer** sur le site [EBC](#). Le producteur reçoit ensuite ses identifiants pour accéder à la plateforme où il renseigne toutes les informations nécessaires sur la société et la technologie de pyrolyse utilisée ;
2. Carbon Standards International effectue une première **vérification des informations techniques** et prend contact avec le producteur. Les informations sont communiquées à l'organisme d'inspection et de certification accrédité : [CERES-CERT](#). Le producteur de biochar recevra ensuite, de CERES-CERT, une proposition de contrat pour la certification EBC ;
3. Une fois le contrat signé, un **pré-audit** est effectué en ligne par CERES-CERT. Un plan d'assurance qualité et d'échantillonnage spécifique à l'entreprise sera préparé et noté dans les fiches techniques d'inspection EBC. En outre, des instructions sont données concernant la méthodologie EBC et les protocoles à conserver pour l'inspection annuelle par CERES-CERT. Dans le but d’être certifié, le producteur de biochar désigne un manager qualité qui, sera le contact direct pour CERES-CERT, et gèrera l’entièreté du processus de certification ;
4. Le producteur reçoit une formation à l’échantillonnage. La certification EBC/C-sink impose en effet, un échantillonnage quotidien selon une méthodologie particulière détaillée en ANNEXE 6. Ces échantillons sont envoyés et contrôlés en laboratoire afin d’assurer un respect des normes détaillées précédemment.
5. Un audit initial du procédé de production par l’organisme CERES-CERT est réalisé en vue de permettre l’obtention du certificat européen du biochar.
6. Les procédés et le matériel de production de biochar sont contrôlés annuellement. Des coûts sont associés à cette inspection pour chacun des labels (EBC et C-Sink). Des dépenses sont également attribuées à une taxe annuelle de labélisation et à une taxe de production proportionnelle à la quantité de biochar générée. L’ensemble des exigences à respecter une fois le projet certifié sont disponibles en ANNEXE 6.

L’ensemble des coûts relatifs à chacune des étapes sont repris dans le Tableau 10.

Tableau 10 - Coûts relatifs à chaque étape menant à l'obtention des labels EBC et C-Sink

Type de frais		Coûts EBC (€)	Coûts C-Sink (€)	Récurrance
Enregistrement		300	300	La première année
Pré-audit technique		3500	300	La première année
Formation à l'échantillonnage		400		La première année
Inspection et certification		1900	1900	Par an (par audit)
Commission	1-5000 T	1	0.75	Par tonne biochar (EBC) Par tonne CO ₂ éq (C-Sink)
	5001+ T	0.2	0.75	Par tonne biochar (EBC) Par tonne CO ₂ éq (C-Sink)
Labélisation		300	300	Par an

Producteurs certifiés EBC

La liste des producteurs certifiés EBC est disponible en libre accès dans le registre en ligne [19]. Les tableaux ci-dessous en présentent deux à titre d'illustration (Tableau 11 et Tableau 12).

Tableau 11 - Producteur "Mash Energy India Private Limited" certifié EBC

Intitulé	MASH Energy India Private Limited
Continent	Asie
Localisation	Inde
Date de début du certificat	14 juillet 2022
Date de fin du certificat	31 décembre 2023
Prix du crédit	212 \$USD
Utilisation du biochar	Agriculture et Construction
Résumé	Mash Makes produit du biochar à partir de déchets agricoles et agro-industriels, par pyrolyse. L'entreprise vise à promouvoir l'application du biochar dans différents domaines tels que l'agriculture et la construction. Leur objectif est de travailler avec des partenaires locaux afin d'améliorer la qualité de vie des populations locales. La période de production de leur premier lot de biochar certifié EBC a duré du 16 décembre 2021 au 15 décembre 2022.

Tableau 12 - Producteur "Corigin Solutions Inc." certifié EBC

Intitulé	Corigin Solutions Inc.
Continent	Amérique du Nord
Localisation	Merced, Californie (Etats-Unis)
Date de début du certificat	07 décembre 2022
Date de fin du certificat	31 décembre 2023
Prix du crédit	/
Utilisation du biochar	Agriculture
Résumé	L'entreprise vise à promouvoir l'application d'amendements de sol à base de biochar dans les champs afin d'accroître leur rendement et la fertilité du sol. Ils produisent du biochar aux quatre coins du monde en utilisant principalement des résidus agricoles mais également forestiers. Jusqu'à ce jour, deux lots de production de biochar ont été certifiés EBC (<i>i.e.</i> , 01/06/2022 – 31/05/2023 et 01/06/2023 – 31/05/2024).

5.1.2. Standard Puro

Le Standard Puro [20], créé par Puro.earth, est la première norme d'élimination du carbone apparue pour les méthodes d'ingénierie qui éliminent le carbone de l'atmosphère sur le marché volontaire du carbone.



La norme Puro ne crédite pas les émissions de carbone réduites ou évitées, mais uniquement les suppressions nettes. Le biochar est une des méthodes d'élimination du carbone reconnue par Puro.

Depuis 1^{er} mars 2023, Puro.earth est reconnu par l'Alliance Internationale pour la Réduction et la Compensation des émissions de Carbone ([ICROA](#))⁷[21].

Exigences d'éligibilité

La méthodologie Puro.earth définit neuf exigences pour qu'une activité soit éligible à son label :

1. Le biochar doit être fabriqué à partir d'une **biomasse durable**. Une liste de biomasses admissibles pour la production de biochar peut être consultée dans les documents de l'EBC (liste positive) reconnue par Puro.earth. Il est nécessaire de garder les preuves de l'origine et de la durabilité de la matière première et qui devront être soumises à Puro dans le cadre de l'audit final. Dans le cas où la matière première vient de la biomasse de forêt :
 - Certification de gestion forestière du Forest Stewardship Council (FSC-FM) ; ou
 - Certification de gestion forestière de la Sustainable Forestry Initiative (SFI) ; ou
 - Programme de reconnaissance des certifications forestières (PEFC) - Norme de gestion forestière durable ; ou
 - D'autres programmes de certification forestière durable réputés, dotés de normes scientifiques élevées et reconnus par le marché, qu'ils soient de nature publique ou privée. Puro.earth se réserve le droit de déterminer l'admissibilité du programme de certification.
2. Le biochar doit être utilisé dans des applications **préservant sa capacité de stockage du carbone**. Le biochar ne peut pas être utilisé comme combustible ou réducteur, car cela détruirait son stockage de carbone.
3. La **neutralité nette** doit être démontrée grâce à une analyse du cycle de vie (qui doit respecter les principes généraux définis dans l'ISO 14040/44).

La délimitation du système est définie de la production de biomasse à l'utilisation du biochar (Figure 27). L'analyse du cycle de vie (ACV) doit donc inclure les informations détaillées sur les émissions générées aux différentes étapes (*i.e.*, production et approvisionnement de la biomasse, conversion de la biomasse en biochar, ainsi que distribution et utilisation du biochar), y compris les émissions liées à l'utilisation de combustibles fossiles pour le démarrage de l'installation. Les données permettant le calcul de l'ACV doivent être collectées et documentées. L'accent doit être mis sur la présentation détaillée de l'impact sur le changement climatique, en mettant en évidence la contribution spécifique des différentes étapes du cycle de vie, ainsi que la part de responsabilité des principaux gaz à effet de serre. Le scénario par défaut des émissions de référence pour la matière première de l'activité du projet est de zéro, ce qui est une hypothèse fort conservatrice. Cependant, le fournisseur peut soumettre des revendications d'émissions de référence non nulles si une démonstration scientifique suffisante est fournie et acceptée par Puro.earth.

⁷ Plus d'informations sur ICROA se trouvent à la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

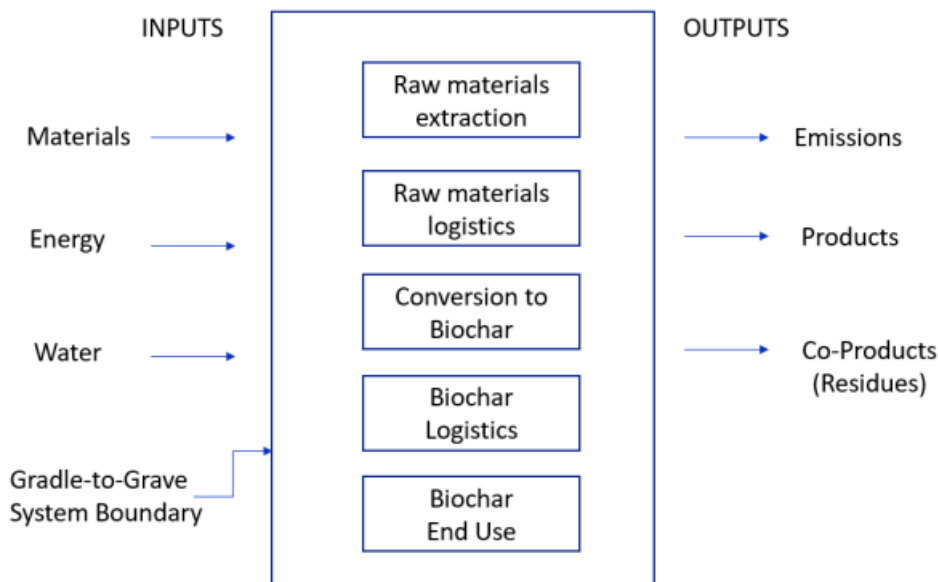


Figure 27 – Limites évaluation du cycle de vie (ACV)

4. L'utilisation de combustibles fossiles est autorisée pour l'allumage et le chauffage du réacteur de pyrolyse, mais la **co-combustion** avec de la biomasse est interdite.
5. Les **gaz de pyrolyse** doivent être soit brûlés, soit récupérés par un procédé technique qui élimine ou réduit les émissions de méthane dans l'atmosphère au minimum.
6. Le biochar produit doit avoir un **ratio H/C_{org} inférieur à 0,7**. En effet, les valeurs supérieures à 0,7 indiquent la non-stabilité du produit.
7. Le biochar produit doit **respecter les exigences de qualité du produit en vigueur dans la juridiction** où il est utilisé. Si aucune exigence spécifique n'est en place, le biochar doit être évalué selon des seuils de qualité définis par des normes volontaires telles que le Programme de Certification de l'International Biochar Initiative [22] (IBI) ou les Lignes Directrices du Certificat Européen du Biochar [23] (EBC). Les déviations par rapport à ces seuils doivent être justifiées, approuvées par l'organisme émetteur et rendues publiques.
8. Des mesures doivent être prises pour garantir un **environnement de travail sécurisé**, des principes de production plus propres et une manipulation et un transport sécurisés du biochar, afin de prévenir les risques d'incendie, de poussière et pour la santé.
9. L'éligibilité de l'installation de production est déterminée par l'audit de l'installation de production.

De plus, des exigences additionnelles propres à des aspects logistiques et techniques sont à respecter. Ces exigences, ainsi que les modalités de calcul des crédits carbone sont présentées en ANNEXE 6 et bénéficient d'une méthodologie dédiée [24].



La procédure pour la génération de crédits carbone avec le standard Puro est la suivante :

1. Le porteur de projet doit prouver, à ses frais, que son activité élimine du carbone de l’atmosphère grâce à une analyse de cycle de vie de l’activité de production de biochar.
2. La vérification de la quantité de CO₂ éliminé par le projet est réalisée par une tierce partie indépendante [25]. Puro.earth, couvre les frais d’enregistrement du projet et les frais d’audit par des vérificateurs tiers indépendants.
3. Si l’activité de suppression du CO₂ est conforme aux exigences de la méthodologie Puro standard, des certificats de suppression de CO₂ (« CO₂ Removal Certificates » ou CORCs, équivalent à une tCO₂e par CORC) sont délivrés.
4. Le porteur de projet peut mettre en vente les CORCs sur une plateforme de vente. Sur le registre Puro, le porteur de projet peut déterminer le prix de vente. Cependant, le porteur de projet n’est pas tenu de passer via le registre Puro.
5. Puro.earth facture des frais de service de 0.2 à 20 % du chiffre de vente dépendant à la fois du volume de production annuelle estimé des CORCs et de leur prix de vente (Tableau 53 en ANNEXE 6). Ils couvrent tous les coûts liés aux services Puro Standard et du registre. Ces frais sont déduits de la valeur totale de la transaction. Le standard pionnier ne touche donc pas d’argent avant que les CORCs soient générés et que les porteurs de projets perçoivent leurs revenus. De la sorte, Puro.earth sélectionne les projets les plus qualitatifs permettant de garantir au maximum la génération des crédits et couvrir son investissement (voir point 2) .
6. L’ensemble des coûts relatifs à chacune des étapes sont repris au Tableau 13 .
7. Le porteur de projet paye une cotisation de membre annuelle de 900€ qui inclut un compte dans le Puro Registry, permettant aux titulaires de gérer et de retirer des CORCs.
8. Le porteur du projet doit assurer un **échantillonnage représentatif et des tests fréquents** du biochar produit pour refléter la variabilité de la biomasse et des conditions de production. L’ensemble des exigences à respecter une fois le projet certifié sont disponibles en ANNEXE 6.

Tableau 13 - Coûts relatifs à chaque étape menant à l’obtention de la certification Puro

Type de frais	Coûts (€)	Récurrance
ACV	5.000	La première année
Frais d’inscription	900	La première année
Frais de maintenance du compte	900	La première année
Frais de service	Dépend du volume et du prix des CORCs	
ACV	5.000	La première année
Échantillon	2.300	Par an

Informations complémentaires

Puro.earth permet la mise en place de Pre-CORCs. Ceux-ci permettent aux porteurs de projet de toucher les revenus de leurs crédits plus tôt. Un Pre-CORC représente un CORC futur (endéans les 5 ans). Il ne s’agit donc pas d’un CORC et ne peut donc être utilisé comme une revendication environnementale. Il s’agit plutôt d’une façon de canaliser un prépaiement. Ce système permet de lever des fonds. L’obtention de cette pré-validation de la part de Puro rassure les acheteurs incitant à acheter les Pre-CORCs et facilitant la due-diligence.

Afin de mitiger les risques, une évaluation commerciale et technique a lieu avant la création d’un Pre-CORC, et la quantité de Pre-CORCs générés est limitée (20% de la quantité de CORCs ayant été déterminés par la vérification). Ainsi, 50% des frais de services estimés seront facturés à ce moment-

là. Le reste du montant sera payé lorsque le volume et le prix finaux seront connus et que la propriété des CORCs ou du crédit aura été transférée.

Puro a développé une assurance carbone, avec Kita [26], qui permet aux acheteurs de crédits carbone d'être couverts dans le cas d'une « sous-performance » des crédits et, indirectement, aux solutions d'élimination du carbone d'accéder à des flux de capitaux plus importants et cohérents afin d'atteindre leur impact plus rapidement.

Projets certifiés Puro.earth

Les projets certifiés Puro.earth sont disponibles en libre accès dans le registre en ligne [27]. Les Tableau 14 et Tableau 15 ci-dessous en présentent deux à titre d'information.

Tableau 14 - Projet « NetZero » certifié Puro.earth

Intitulé	NetZero - For climate and people, now
Continent	Afrique
Localisation	Nkongsamba, Cameroun
Date de début du projet	21 octobre 2022
Date de fin de projet	/
Prix du CORC	Prix sur demande
Utilisation du biochar	Utilisé par les agriculteurs locaux comme amendement et permettant ainsi leur dépendance aux fertilisants chimique.
Résumé	NetZero a construit la première usine de biochar en Afrique à Nkongsamba, au Cameroun, utilisant des parches de café comme matière première. Ils ont pour ambition d'étendre ce modèle dans d'autres pays tropicaux en développement (Brésil notamment). Leur objectif est de supprimer 2 millions de tonnes de CO ₂ par an d'ici 2030 et de poursuivre leur croissance exponentielle.

Tableau 15 - Projet « Biochar from Nutshell and Wood Waste » certifié Puro.earth

Intitulé	Biochar from Nutshell and Wood Waste
Continent	Oceania
Localisation	Wellcamp, Queensland, Australie
Date de début du projet	31 mars 2021
Date de fin de projet	/
Prix du CORC	100 €
Utilisation du biochar	Vendu par la marque Terix : <ul style="list-style-type: none"> • Aux sociétés d'agriculture et d'horticultures ; • Aux sociétés d'aménagement paysagères et de jardinage ; • Aux administrations locales pour une utilisation en horticulture d'agrément.
Résumé	Ce projet utilise des coques de noix provenant des régions environnantes pour produire du biochar. Ils valorisent les coques de noix en évitant de les jeter en décharge ou de les incinérer et contribuent ainsi à l'amélioration de la qualité des sols.

5.1.3. Verra VCS

Verra est une organisation à but non lucratif qui gère le très reconnu programme de crédits carbone « Verified Carbon Standard (VCS) ».

Verra a lancé sa nouvelle [30]méthodologie, spécifique pour l'utilisation de biochar en août 2022. Cette méthodologie quantifie l'élimination du carbone résultant de la conversion des déchets de biomasse en biochar dans les installations de production de biochar. Les avantages en matière de GES ne sont crédités que pour le biochar utilisé dans des applications admissibles sur le sol et hors sol, ce qui inclut les cultures et les prairies et les nouveaux produits hors sol tels que le béton et les matériaux de construction amendés au biochar.

Exigences d'éligibilité

1. Applicable pour tout biochar produit de déchets de biomasse éligibles, présents (ou non) dans la liste non-exhaustive proposée par VERRA.
 - La biomasse doit provenir de source durable, **sauf dans le cas les déchets issus de l'activité des scieries**. Les projets doivent s'efforcer d'utiliser des matières premières qui ne proviennent pas de sources impliquées dans la déforestation ou la dégradation.
 - La biomasse doit provenir de déchets et ne pas être cultivée pour cet objectif.
 - Ces déchets auraient été brûlés ou laissés à décomposer s'ils n'étaient pas utilisés comme matière première.
 - Les déchets ne proviennent pas d'un autre pays.
2. Le biochar ne doit pas être utilisé pour des objectifs énergétiques. Si le biochar est transformé en charbon actif, utilisé comme agent réducteur en sidérurgie, ou est brûlé comme carburant, ou encore qu'il y ait une perte de plus de 50% du produit de base, alors le projet n'est pas éligible.
3. Le biochar peut être appliqué sur le sol ou dans le sol. Le biochar doit être mixé avec des autres substrats tels que du composte ou du lisier s'il est appliqué sur le sol tandis qu'il peut être utilisé seul comme amendement ou bien mixé avec d'autres amendements s'il est utilisé dans le sol.
4. Si appliqué dans le sol, afin d'éviter toute contamination du sol par des métaux lourds ou autres éléments toxiques, il faut respecter les IBI « [Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is Used in Soils](#) » et/ou EBC « [Guidelines for a sustainable production of biochar](#) ». [31]
5. Le biochar produit à partir d'une matière première ou d'un mélange de matières premières doit respecter les exigences IBI ou EBC. Les additifs minéraux peuvent être présents tant qu'ils ne dépassent pas 10% de matière sèche.
6. Pour les applications autres que le sol, il doit être prouvé, sur la base de la littérature scientifique ou autre documentation fiable, qu'il est un puits de carbone stable et durable. Pour évaluer son taux de décomposition, des facteurs conservatifs doivent être utilisés en absence de documentation fiable.

De plus, des exigences additionnelles propres à des aspects logistiques et techniques sont à respecter. Ces exigences, ainsi que les modalités de calcul des crédits carbone sont présentées en ANNEXE 6 ainsi que dans la méthodologie dédiée. [30]

Feuille de route – Procédure et coûts relatifs

La procédure pour la génération de crédits carbone avec le standard Verra est la suivante⁸ :

1. Le promoteur de projet soumet la description du projet à Verra. Une période de 30 jours pour des commentaires publics est alors ouverte.
2. Ensuite, commence l'étape de validation par un organisme de validation/vérification (*Validation/Verification Body*, VVB) qui examine la description et les commentaires.
3. Une fois le projet validé, le promoteur de projet fait une demande d'enregistrement
4. Les réductions d'émissions de GES doivent être suivies, enregistrées.
5. Le VVB vérifie les réductions d'émission du projet.
6. Si la vérification est réussie, le promoteur du projet peut introduire une demande pour la génération de crédits carbone *Verified Carbon Units* (VCUs).
7. Une fois que les crédits ont été générés, le porteur de projet peut vendre ces crédits sur le marché volontaire du carbone.

VERRA maintient une position impartiale sur le marché, l'organisme n'achète pas, ne vend pas, et n'échange pas de crédits carbonés. Tout accord d'achat et négociation se font entre le porteur de projet et l'acheteur. Verra s'assure que les crédits vendus soient retirés du marché, sous instruction des développeurs de projets, pour éviter qu'ils ne soient utilisés plusieurs fois.

Le Tableau 16 ci-dessous reprend les coûts principaux des différentes étapes.

Tableau 16 – Tableau de coûts de certification avec le standard Verra

Frais	Prix (\$ USD)		Réurrence
Inscription sur VERRA*	500		La première année
Frais de maintenance du compte	500		Par an
Demande d'inscription au « pipeline listing »**	1.000		La première année
Demande d'enregistrement du projet	2.500		La première année
Taxe d'émission de crédit	0,20 / crédit		Par an
Organisme de validation/certification***	1 programme	5.000	Par an
	2 programmes	7.250	
	3 programmes ou +	9.000	
Frais liés à l'élaboration du PDD	Variable en fonction de qui élabore le PDD		La première année

* Un seul compte sur le registre Verra peut être utilisé pour gérer plusieurs projets, et pour gérer des projets qui participent à plus d'un programme Verra.

** Le registre Verra contient une réserve de projets qui répertorie les projets avant qu'ils ne soient enregistrés. Les projets peuvent être répertoriés dans le pipeline aux premiers stades de leur développement comme étant en cours de développement ou de validation lorsqu'ils sont prêts à entamer le processus de validation.

*** En ce qui concerne les redevances des organismes de validation/vérification (VVB), les nouveaux barèmes de redevances comprendront un système de redevances annuelles échelonnées en fonction du nombre de programmes Verra pour lesquels les VVB sont approuvés. L'objectif de ces redevances est de couvrir de manière plus adéquate les coûts de formation et de supervision des VVB par Verra.

Les VVB peuvent être choisis dans la liste de ceux accrédités par Verra [28]. La validation et la vérification du projet peuvent être réalisées par le même organisme VVB (section 4.1.4 du VCS Standard v4.4 [29]). La seconde vérification doit être réalisée par un VVB différent. Le VVB ayant réalisé la première vérification peut entreprendre une vérification supplémentaire pour le projet uniquement lorsqu'au moins 3 années de réductions ou d'absorptions d'émission de GES du projet ont été vérifiées par un autre VVB (section 4.1.23 du VCS Standard v4.4).

⁸ Plus d'informations concernant la procédure se trouvent dans le document [106].



Projets certifiés Verra VCS

Les projets certifiés Verra VCS sont disponibles en libre accès dans le registre en ligne [30]. Comme mentionné précédemment, il n’y a encore aucun projet disponible dans le registre, à ce jour, la méthodologie biochar étant très récente (août 2022). Cependant, le tableau ci-dessous présente un projet qui a récemment entamé la procédure de certification en avril 2023 (Tableau 17).

Tableau 17 - Projet "Exomad Green's Riberalta" en cours de certification Verra VCS

Intitulé	Exomad Green's Riberalta
Continent	Amérique du sud
Localisation	Riberalta, Bolivie
Date de début du projet	Mars 2023
Date de fin de projet	/
Prix du crédit	/
Utilisation du biochar	Redistribution gratuite aux peuples autochtones et aux communautés locales pour améliorer les rendements de leurs cultures et leurs revenus.
Résumé	Le projet vise à être le plus grand projet de biochar au monde avec une production de 30.000 tonnes de biochar par an. Le biochar est produit à partir de déchets issus de bois certifiés Forest Stewardship Council (FSC) et Autoridad Bosques y Tierra (ABT). Ce projet a entamé les démarches de certification en 2023 et les premiers crédits devraient être générés en décembre 2023



5.1.4. Etat des lieux du marché

La biochar fait partie des mécanismes retirant du CO₂ de l’atmosphère, appelés CDR (« Carbon Dioxide Removal ») regroupant également d’autres technologies telles que l’altération forcée⁹, le captage direct de l’air et la minéralisation. Toutes les données publiques disponibles de ces CDR qui ont été achetés ou délivrés jusqu’à présent sont disponibles sur le site cdr.fyi.

Au cours des trois dernières années, les achats et préachats des CDR ont augmenté de 533% et illustre de la croissance extrêmement rapide du marché des CDR, le biochar représentant près de 40% du volume des CDR achetés (Figure 28). Dans la plupart des projets, les investisseurs « préfinancent » en effet les activités en échange des futurs CDR qui sont dès lors considéré comme « vendus » avant même leur émission.

En parallèle, l’évolution des CDR délivrés sur la même période montre une hausse significative mais bien inférieure aux CDR achetés/préachetés (37k délivrés en 2022 vs 593k (pré)achetés¹⁰). La majeure fraction (~90%) des CDR délivrés (graphique de droite) sont issus de projets biochar soulignant une nouvelle fois l’important potentiel du biochar dans la finance climat.

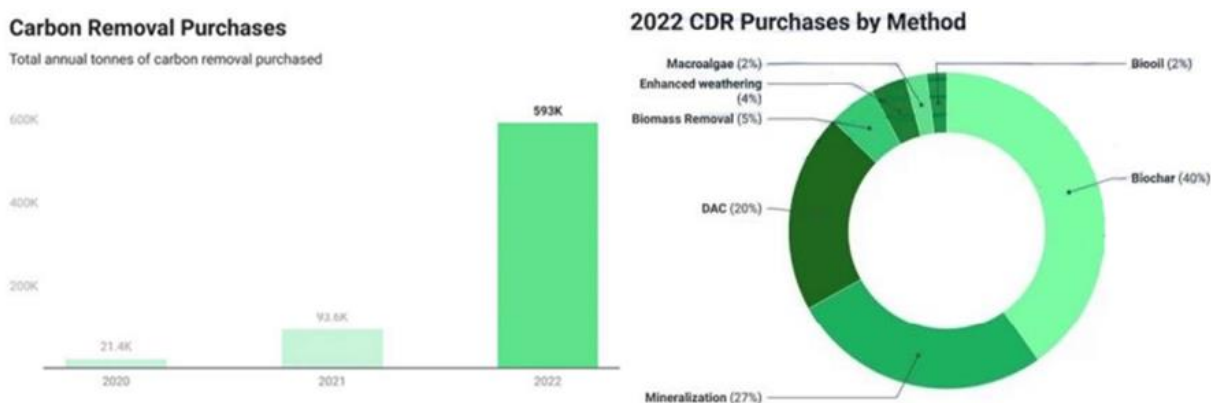


Figure 28 – Graphique des achats des CDR par volume annuel et méthode (gauche et droite respectivement), extraits du site cdr.fyi

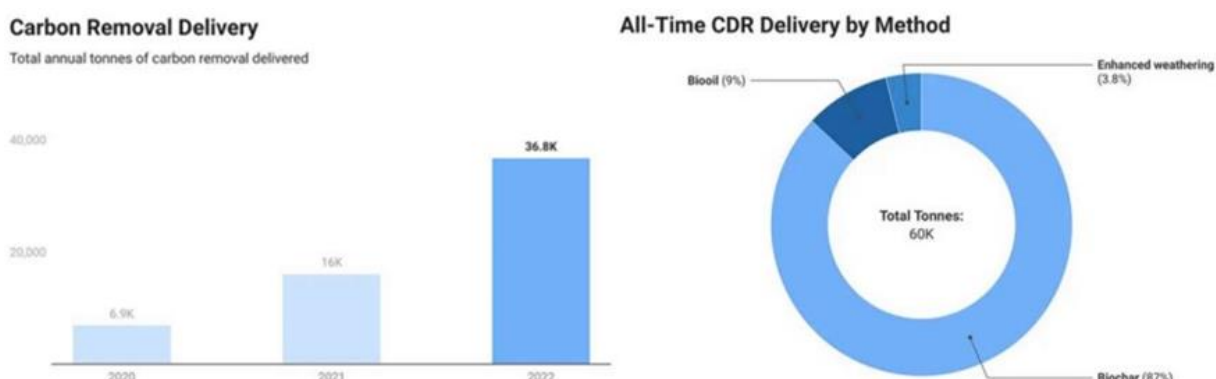


Figure 29 – Graphique des émissions de CDR par volume annuel et méthode (gauche et droite respectivement), extraits du site cdr.fyi

⁹ L’altération forcée est un processus qui vise à accélérer l’altération naturelle en répandant des roches silicatées finement broyées telles que le basalte, sur des surfaces, ce qui accélère les réactions chimiques entre les roches, l’eau et l’air. Elle permet également d’éliminer le dioxyde de carbone de l’atmosphère et de le stocker de manière permanente dans des minéraux carbonatés solides. Le CO₂ est en premier lieu retiré des océans, ce qui augmente son alcalinité (ou ralentit son acidification).

¹⁰ La majeure partie des CDR achetés ont été « préachetés », les CDR n’ont pas encore été délivrés.



Les analyses faites sur la plateforme de vente Carbonfuture, associée à la certification EBC/C-Sink montrent que ce sont environ 20.000 tonnes de CO₂ capturées par des projets biochar qui ont été émises sur la plateforme Carbonfuture depuis 2020 à la fin de l'année 2022 (Figure 30).

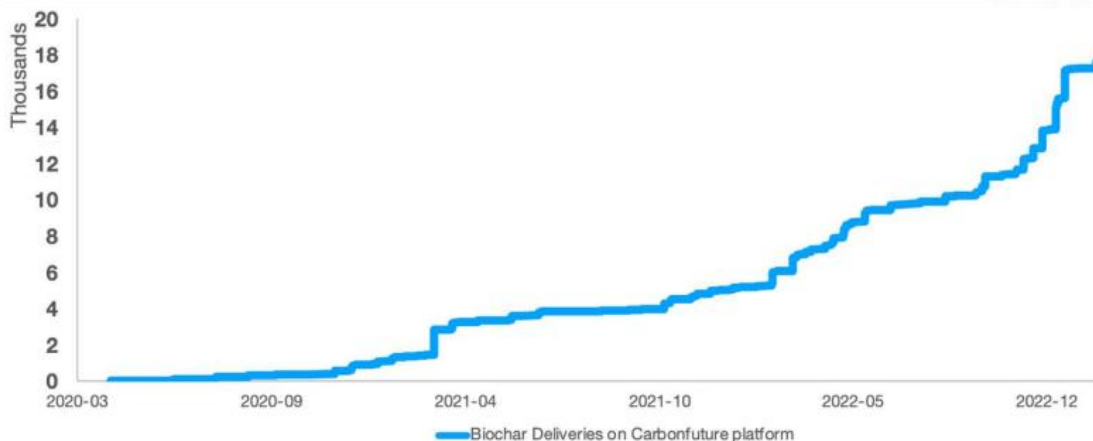


Figure 30 – Crédits carbone de projets biochar délivrés sur la plateforme de Carbonfuture.

Sur le registre de Puro.earth, le prix de vente des crédits carbone de projets biochar est également passé de 40€ en 2019 à 140€ début 2023. Le nombre de crédits carbone générés annuellement a presque quintuplé depuis 2019 (Figure 31).

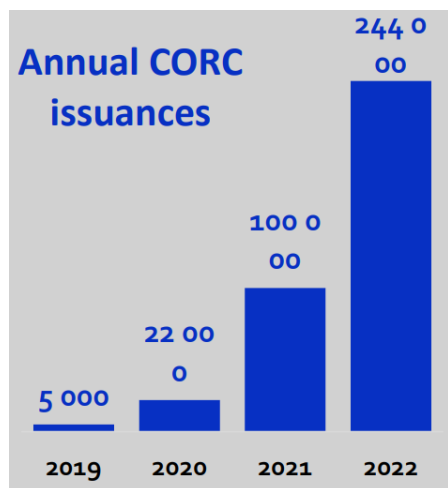


Figure 31 – Évolution du nombre de crédits carbone Puro.earth délivrés par année

Les projets biochar se développent à l'échelle mondiale, augmentant significativement les volumes de biochar produits chaque année. En parallèle, la technologie du biochar continue de se développer très rapidement. De nombreux projets de recherche dans le monde entier étudient les propriétés du biochar et son interaction avec d'autres substances, matériaux et l'environnement. Chaque année, de nouveaux fabricants d'équipements de pyrolyse arrivent sur le marché et les domaines dans lesquels le biochar et les produits à base de biochar sont utilisés augmentent rapidement.

Cependant l'accès à une technologie de pyrolyse abordable reste aujourd'hui un défi majeur. Le financement pour le montage d'un projet biochar peut représenter une difficulté. Des solutions émergent pour aider les projets à voir le jour et sont abordées à la section 6.3.



5.2. CERTIFICATION CDM

5.2.1. Informations générales

Le mécanisme de développement propre (CDM - *Clean Development Mechanism*) fait partie de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). En tant que plus grand mécanisme réglementaire basé sur des projets, le CDM offre aux secteurs public et privé des pays à revenus élevés la possibilité d'acheter des crédits de carbone issus de projets de compensation dans des pays à revenus faibles ou intermédiaires.

Les projets CDM génèrent des crédits d'émission appelés réductions certifiées d'émissions (CER – Certified Emission Reduction), qui sont ensuite achetés et échangés. Plusieurs programmes de conformité et normes volontaires reconnaissent et acceptent les CER. Ces programmes ou normes comprennent le système européen d'échange de quotas d'émission et le Verified Carbon Standard (VCS) de Verra. Le Gold Standard certifie les projets qui utilisent les méthodologies du CDM et qui se conforment également à des critères supplémentaires du Gold Standard. Les CER peuvent être acquises directement avec les porteurs de projet ou sur les plateformes telles que :

- EEX : Bourse européenne de l'énergie qui gère un marché au comptant pour les CERs.
- ICE : Plateforme pour l'échange des CER.
- CBL Markets : Bourse électronique pour les produits de base environnementaux, y compris les CERs.
- Carbon Trade Exchange (CTX) : Plateforme mondiale d'échange de crédits carbone.

5.2.2. Autorités nationales désignées

Une Autorité Nationale Désignée (AND) est l'organisation gouvernementale à laquelle est confiée la responsabilité d'autoriser et d'approuver la participation des porteurs de projet à des projets CDM. La mise en place d'une AND est l'une des conditions de participation au CDM.

La tâche principale de l'AND est d'évaluer les projets CDM potentiels afin de déterminer s'ils aideront le pays hôte (au sein duquel est mis en œuvre le projet) à atteindre ses objectifs de développement durable, et de fournir une lettre d'approbation aux porteurs de projets CDM. Cette lettre d'approbation doit confirmer que l'activité du projet contribue au développement durable dans le pays, que le pays a ratifié le protocole de Kyoto et que la participation au CDM est volontaire. Elle est ensuite soumise au Conseil exécutif du CDM pour appuyer l'enregistrement du projet.

5.2.3. Entité opérationnelle désignée

L'entité opérationnelle désignée est un auditeur indépendant accrédité pour certains champs d'application sectoriels en particulier et désigné par le conseil exécutif du CDM¹¹. L'EOD valide et demande l'enregistrement d'une activité de projet CDM proposée et vérifie les réductions d'émissions d'une activité de projet CDM enregistrée.

Le diagramme de ces mécanismes se trouve à la Figure 32.

¹¹ La liste des EOD est disponible à l'adresse : <https://cdm.unfccc.int/DOE/list/index.html>.

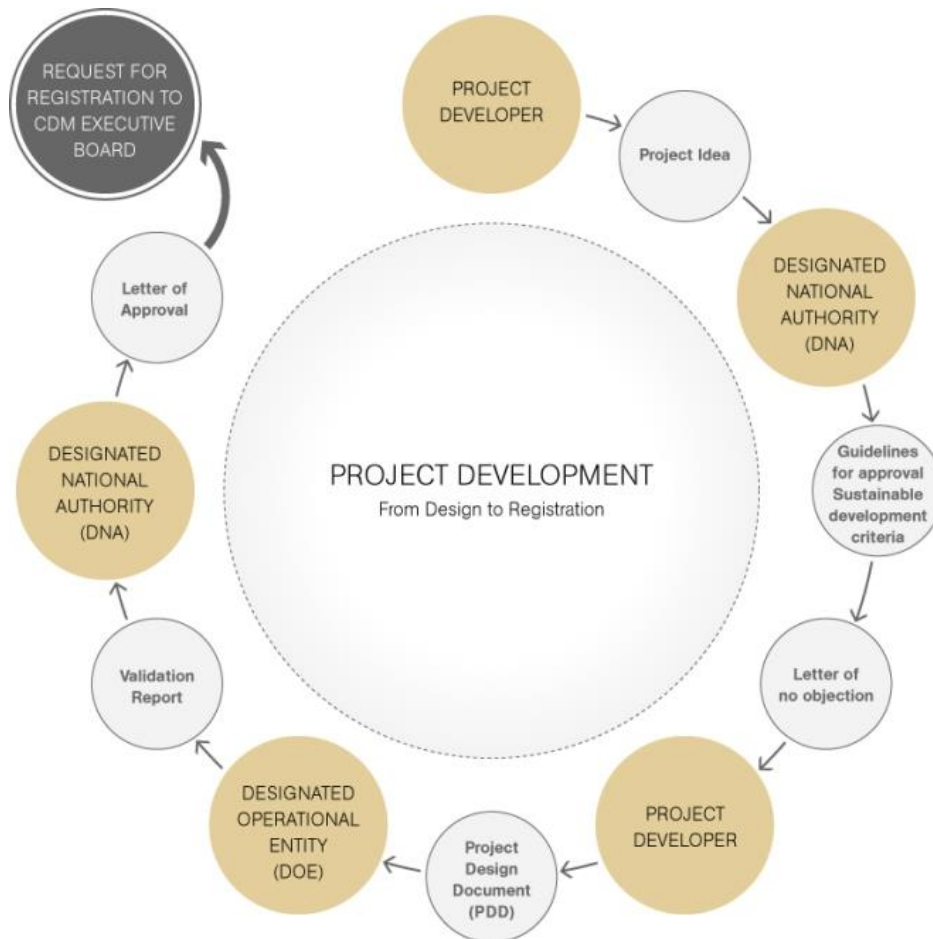


Figure 32 – Diagramme d'un développement de projet de la conception jusqu'à l'inscription [31]

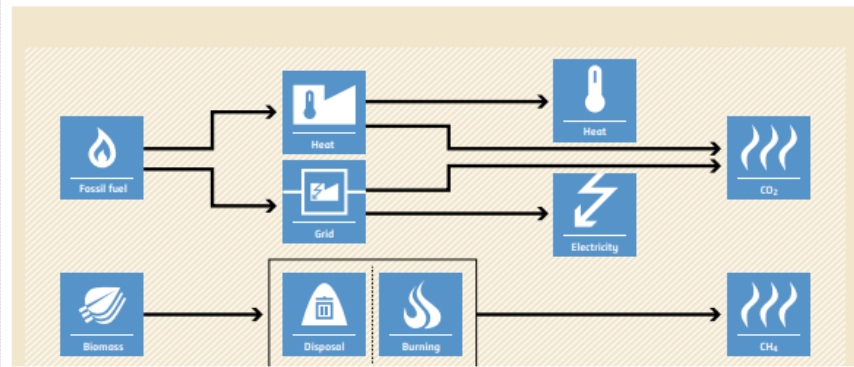
5.2.4. Méthodologie CDM sélectionnée

L'ensemble des méthodologies CDM existantes sont classées et résumées dans un [document de référence](#). La méthodologie pertinente dans le cadre de l'utilisation de biomasse renouvelable à la place d'énergie fossile dans les concessions forestières est la méthodologie « [ACM0006 : Génération d'électricité et de chaleur à partir de biomasse](#) » (Figure 33).



BASELINE SCENARIO

Electricity and heat would be produced by more-carbon-intensive technologies based on fossil fuel or less-efficient biomass power and heat plants. Biomass could partly decay under anaerobic conditions, bringing about methane emissions.



PROJECT SCENARIO

Use of biomass for power and heat generation instead of fossil fuel or increase of the efficiency of biomass-fuelled power and heat plants. Biomass is used as fuel and decay of biomass is avoided.

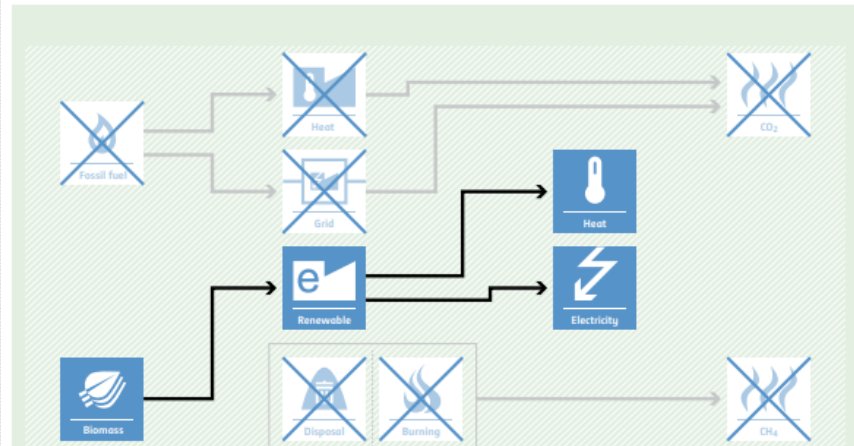


Figure 33 – Schéma du scénario de base et du scénario du projet (brochure des méthodologies CDM, p149 [32]).

Cette méthodologie est applicable aux activités de projet qui exploitent des centrales électriques et thermiques (co-)chauffées à la biomasse. L'activité de projets CDM peut inclure les activités suivantes ou, le cas échéant, des combinaisons de ces activités :

1. L'installation de nouvelles centrales sur un site où il n'y a actuellement aucune production d'électricité ou de chaleur ;
2. L'installation de nouvelles centrales sur un site où l'on produit actuellement de l'électricité ou de la chaleur. La nouvelle centrale remplace ou est exploitée à côté de centrales existantes (projets d'extension de capacité) ;
3. L'amélioration de l'efficacité énergétique des centrales électriques et thermiques à base de biomasse existantes (projets d'amélioration de l'efficacité énergétique), qui peut également conduire à une augmentation de la capacité, par exemple en modernisant la centrale existante ;
4. Le remplacement total ou partiel des combustibles fossiles par la biomasse dans les centrales électriques et thermiques existantes ou dans les nouvelles centrales électriques et thermiques qui auraient été construites en l'absence de projet (projets de changement de combustible), par exemple en augmentant la part de l'utilisation de la biomasse par rapport au niveau de référence, en modernisant une centrale existante pour qu'elle utilise la biomasse.



Exigences d'éligibilité

La méthodologie est applicable dans les conditions suivantes :

1. La biomasse utilisée est limitée aux **résidus de biomasse**, au biogaz, au combustible dérivé de déchets (RDF) et/ou de la biomasse provenant de plantations dédiées ;
2. Les combustibles fossiles peuvent être utilisés au sein de l'installation du projet. Toutefois, la quantité de combustibles fossiles ne dépasse pas 80 % du total des combustibles brûlés sur une base énergétique ;
3. Pour les projets qui utilisent des résidus de biomasse issus d'un processus de production, la mise en œuvre du projet n'entraîne pas d'augmentation de la quantité traitée de matière première ou d'autres changements substantiels (par exemple, un changement de produit) dans ce processus ;
4. La biomasse utilisée par l'installation du projet n'est pas stockée pendant plus d'un an ;
5. La biomasse utilisée par l'installation du projet n'est pas traitée chimiquement ou biologiquement avant combustion. Le séchage et le traitement mécanique, tels que le déchiquetage et la granulation, sont autorisés.

Les exigences additionnelles, ainsi que les modalités de calcul des crédits carbone sont présentées en ANNEXE 6 ainsi que dans la méthodologie dédiée [33].

Feuille de route – Procédure et coûts relatifs

La procédure pour un projet CDM est la suivante :

1. Choix de la méthodologie adaptée à la situation du projet.
2. Développement du projet conformément aux lignes directrices de la méthodologie sélectionnée.
3. Préparation d'un document de conception du projet [34] qui décrit les détails du projet, y compris les émissions de référence, l'additionnalité, la méthodologie utilisée, le plan de surveillance, ...
4. Le projet doit être approuvé par les AND du pays hôte dont le rôle est d'évaluer les projets CDM potentiels afin de déterminer s'ils aideront le pays à atteindre ses objectifs de développement durable, et de fournir une lettre d'approbation aux participants.
5. Le porteur de projet sélectionne l'Entité Opérationnelle Désignée (EOD) accréditée par la CCNUCC pour effectuer la validation et la vérification du projet. L'EOD évaluera la conformité du projet avec la méthodologie CDM et fournira des rapports de validation et de vérification.
6. Le porteur de projet soumet le PDD et les autres documents requis à l'EOD sélectionnée pour validation. L'EOD examine la documentation, effectue des visites sur place et évalue la conformité du projet avec la méthodologie et les exigences du CDM.
7. Le comité exécutif du CDM évalue le projet validé en vue de son enregistrement. Le projet enregistré ne signifie pas encore qu'il est certifié et générateur de CERs.
8. Une fois la validation achevée avec succès, le porteur de projet met en œuvre son projet et surveille les paramètres pertinents comme indiqué dans la méthodologie et le plan de surveillance. Il rassemble les données de surveillance nécessaires et les soumet à l'EOD pour vérification. L'EOD évalue les données rapportées, effectue des visites sur place si nécessaire et fournit un rapport de vérification.
9. Une fois que le projet a passé le processus de vérification, l'EOD soumet les rapports de validation et de vérification à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Si le projet est jugé éligible et conforme, il est enregistré et certifié en tant que projet CDM. La CCNUCC délivre alors des unités de réduction certifiée des émissions (CER) correspondant aux réductions d'émissions vérifiées.



Le Tableau 18 ci-dessous reprend les coûts relatifs à une certification CDM.

Tableau 18 - Tableau de coûts de certification CDM

Frais	Prix (\$ USD)
Inscription CDM [33]	<ul style="list-style-type: none">- Aucun droit d'enregistrement ne doit être payé pour les activités de projet CDM dont la réduction annuelle moyenne des émissions attendues au cours de la période d'attribution des crédits est inférieure à 15.000 tonnes d'équivalent CO₂.- La redevance d'enregistrement correspond à la part des recettes appliquée aux réductions d'émissions certifiées annuelles moyennes attendues pour l'activité de projet proposée au cours de sa période d'attribution de crédits, telle qu'identifiée dans le document de conception du projet et validée par l'entité opérationnelle désignée. (Ce qui revient à 0.20 * Un an de crédits carbone annuel moyen).- Aucun droit d'inscription ne doit être payé pour les projets dans les pays en voie de développement. L'application de cette exemption est basée sur le statut du pays à la date de publication de la demande de délivrance.
Taxe d'émission de crédit	<ul style="list-style-type: none">- 0.10 USD / crédit pour les premiers 15.000 CERs et 0.20 USD/ crédit après 15.000 CERs générés.- Aucune part des recettes n'est exigée pour les projets hébergés dans les pays les moins développés. L'application de cette exemption est basée sur le statut du pays à la date de publication de la demande de délivrance de réductions d'émissions certifiées.
Frais à payer à l'EOD pour la validation	Variables, dépend de l'EOD
Frais à payer à l'EOD pour la vérification	Variables, dépend de l'EOD
Frais liés à l'élaboration du PDD	Variable en fonction de qui élabore le PDD



Projets certifiés CDM

Les projets certifiés CDM sont disponibles en libre accès dans le registre en ligne [30]. Le tableau ci-dessous présente un projet de valorisation de déchets bois de scierie en énergie certifié sous la méthodologie ACM0006 (Tableau 19), certifié par le VCS.

Tableau 19 - Projet "Wood waste-to-energy project at sawmill-25"

Intitulé	Wood waste-to-energy project at sawmill-25
Continent	Europe
Localisation	Arkhangelsk, Russie
Date de début du projet	Juillet 2009
Date de fin de projet	Décembre 2030
Prix du crédit	/
Résumé	Le projet vise à accroître la quantité et l'efficacité de l'utilisation des écorces et des déchets de bois comme combustibles pour la production de chaleur et d'électricité, réduisant ainsi la consommation de combustibles fossiles coûteux et plus nocifs pour l'environnement, la quantité de déchets de bois mis en décharge et les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il est estimé que le projet génère 42.198 tonnes CO ₂ éq annuellement.



6. ANALYSE FINANCIÈRE

Ce chapitre relatif à l'analyse financière comporte plusieurs sections. La première présente les différentes hypothèses et choix stratégiques qui ont été posés posées au niveau des composantes CAPEX, OPEX et revenus ainsi que les indicateurs financiers utilisés pour évaluer l'intérêt et la rentabilité des différentes solutions. La seconde section comporte la synthèse des résultats financiers pour chaque solution dont le détail des comptes de résultats sont fournis en ANNEXE 7. Une feuille de calcul Excel dynamique a été élaborée sur la base de l'ensemble de ces paramètres. Cette feuille sera partagée aux entreprises qui pourront ainsi adapter différentes valeurs et obtenir des analyses financières ajustées. La dernière section offre un aperçu des différents investisseurs potentiels qui pourraient être contactés pour (pré)financer une partie des projets ou le processus de certification.

6.1. HYPOTHÈSES ET CHOIX STRATÉGIQUES

6.1.1. Capex

Machine de pyrolyse/pyrogazéification

Équipements

Le coût d'investissement relatif à la machine comprend le prix des équipements (Tableau 20). Ces données ayant été obtenues en 2022/2023, un taux d'inflation de 3% a été appliqué dans l'analyse financière[35]. Pour rappel, le dimensionnement des solutions est fonction de la capacité des modules et de la quantité de déchets des sites oscillant entre 30.000 m³ et 200.000 m³ pour les entreprises partenaires.

Tableau 20 – Prix d'achat (2022/2023) des machines de pyrolyse/pyrogazéification

Constructeur	Technologie	Modèle	Coût [€]
Arti	Pyrolyse	1 train ¹²	613.666
		2 trains	896.910
		3 trains	984.356
		4 trains	1.321.777
		5 trains	1.625.019
3R Systems	Pyrolyse	Module 8000-B	2.305.000
		Module de taille intermédiaire	8.500.000
		Module grande échelle	15.500.000
Energy&+	Pyrogazéification	Module 300 kW	2.500.000

Dans le cas de 3R Systems, le coût d'achat de séchoirs à plaquettes pour assurer une matière en entrée à maximum 40% d'humidité a été considéré. Il est à noter que de la matière dont l'humidité est supérieure à 50% peut être envoyée dans les machines 3R Systems, cependant, le rendement thermique s'en verra affecté et n'a pas été investigué dans le cadre de cette étude. Le coût d'investissement pour ces séchoirs à plaquettes a été estimé sur la base du prix des séchoirs à plaquettes d'Arti (à savoir 48,9k€ par réacteur, appelé train) permettant de sécher 10-15% d'humidité de la matière entrante. Étant donné qu'un tel séchoir Arti permet de sécher 2.240 tonnes de plaquettes humides par an, le nombre de séchoirs nécessaires a été déterminé en divisant la masse de plaquettes humides à valoriser avec la solution 3R Systems par 2.240 tonnes. Un facteur de sécurité de 20% a été appliqué.

¹² Un train Arti correspond à un réacteur. Un conteneur peut contenir jusqu'à 5 réacteurs (trains).



Installation

L'installation et la mise en service des équipements est prise en compte dans l'analyse financière. Ce montant, déjà inclus dans le prix des machines 3R Systems et Arti a été évalué par Energy&+ à 100.000€ pour un module 300 kW.

Il est à noter que pour la mise en œuvre, l'entreprise Arti propose et conseille de faire appel à leur service de test de la matière première sur leur site afin de déterminer la température et le temps de résidence optimaux et optimiser le dimensionnement de la solution. Le coût de ce service n'est pas pris en compte dans l'analyse financière.

Réseau de chaleur

Le renvoi de la chaleur fatale vers les séchoirs à plaquette nécessite l'adduction d'un réseau de distribution spécifique. Pour les solutions Arti, une approche conservatrice d'un système de chaleur par train a été considérée. Dans ce cadre, un montant de 37,8k€ par système a été fourni par le constructeur. Ce montant est utilisé pour les autres constructeurs selon les modalités suivantes :

- Pour Energy&+, un système de chaleur par module 300 kW ;
- Pour 3R Systems, le nombre de système de chaleur (et leur coût) est estimé proportionnellement à la chaleur nécessaire pour les séchoirs par rapport à la solution Arti.

Transport

Le coût de transport des équipements de pyrolyse/pyrogazéification a été décomposé en trois phases : le transport terrestre depuis le site du constructeur jusqu'au port le plus proche, le transport maritime jusqu'au port du pays de destination, le transport routier jusqu'au site industriel.

Pour les constructeurs 3R Systems et Energy&+, les coûts suivants ont été considérés :

- Le coût de transport des containers depuis le site du constructeur jusqu'au port d'Anvers pour 3R system et Nantes pour Energy&+ a été évalué sur la base d'une offre de service de transport de la société Van Damme d'un conteneur de 40 pieds. Le coût de transport au kilomètre a été estimé à 6,7€/km. Un forfait de 995€, également basé sur l'offre de transport reçue, a été ajouté pour la manutention du conteneur.
- Le coût de la traversée du port d'Anvers/Nantes vers les ports de Douala, Libreville et Pointe-Noire ont été considérés sur la base du coût de transport communiqué par la société Van Damme et la compagnie Bolloré pour le Gabon.

Le coût de la traversée tient compte des différents frais et taxes au port d'Anvers et revient par container à 4.320€, 4.400€, 4.468€ pour les ports de Pointe-Noire, Libreville et Douala respectivement, hors taxe douanière.

Pour le constructeur Arti, les coûts suivants ont été considérés :

- Le coût de transport des containers depuis le site du constructeur (Quito) jusqu'au port de Guayaquil a été calculé sur la base d'un coût au kilomètre par conteneur fourni par Arti (3,4€/km). Le forfait de 995€ a été appliqué également.
- Le coût de la traversée estimé par le transporteur Searates s'élève à environ 5.000€/container.

Des frais au port de destination de 2.900€ par conteneur ont été pris en compte pour couvrir les taxes de port et de chargement camion¹³. Les coûts de transport terrestre par container jusqu'aux sites des entreprises ont été estimés à 9.000 € pour le site d'Enyéllé, 2.700€ pour le site de Lambaréné et à 5.500 € pour les sites de la CEB et de Pallisco¹³. Un facteur de sécurité de 2% a été appliqué pour ces différentes phases. Enfin, le coût de la taxe douanière a été appliqué également. La taxe a été fixée à 33,45% pour le Congo¹⁴, 31,35% pour le Gabon¹⁵, et 35,06% pour le Cameroun¹⁶.

Broyeur

Équipement

Le coût d'investissement de l'équipement comprend le prix d'achat du broyeur, les bandes transporteuses éventuelles et le détecteur de métaux (Tableau 21). Ces données ayant été obtenues en 2022/2023, un facteur de sécurité de 2% a été appliqué dans l'analyse financière.

Tableau 21 – Prix d'achat des broyeurs

Constructeur	Modèle	Coût [€]
China Foma	BX2110	97.260
Zhangsheng	ZSGS-218	17.170
Jenz	BA615-E	297.480
	BA615-D	306.700
	HE651 sta	298.800
Vecotrade	Unique	259.900

Installation

L'installation et la mise en service des équipements est prise en compte dans l'analyse financière.

Pour les constructeurs chinois China Foma et Zhangsheng, le coût de montage et de mise en service est estimé sur la base du nombre de personnes venant sur place (2 personnes), le coût journalier par personne (200 \$ et 180\$ respectivement) et la durée de montage estimée à 2 semaines. Le coût total de voyage de ces personnes, incluant le billet d'avion et leur accueil sur site, a été estimé à 2.500€/personne pour chacun des sites.

Le constructeur Jenz a communiqué un forfait global pour chaque pays (compris entre 12.000 et 14.000€). Pour Vecotrade, il faut compter environ 1.000€/jour durant environ 2 semaines d'installation, soit 15.000€.

Transport

Le coût de transport d'un conteneur a été communiqué par les deux constructeurs chinois. Pour les constructeurs européens, le coût a été calculé sur la base des informations fournies par l'entreprise Van Laecke (revendeur de la marque Jenz de broyeurs). Pour Vecotrade, un conteneur de 40 pieds ainsi qu'un conteneur de 20 pieds sont à prévoir. Dans une approche conservatrice, les coûts ont été calculés pour deux conteneurs 40 pieds. Le coût de transport routier et maritime a été estimé identique au coût d'un broyeur de la marque Jenz.

Le coût de transport des containers jusqu'au site de l'entreprise a été estimé de la même façon que pour les pyrolyseurs/pyrogazéificateurs. Un facteur de sécurité de 2% a été appliqué et la taxe douanière également.

¹³ Ces frais de transport HT ont été communiqués par le transporteur AGL

¹⁴ Information communiquée par IGS Logistics Congo.

¹⁵ Information communiquée par Bolloré

¹⁶ Information communiquée par Global Logistics



ORC

Un ORC est nécessaire si l'on veut convertir la chaleur disponible en sortie des solutions de pyrolyse sous forme d'électricité.

Enogia, entreprise française proposant des ORC a été contactée et a communiqué tous les coûts relatifs à ses différentes solutions et dimensionnements (ORC, aérotherme, conteneur, conduites, raccords). Un facteur de sécurité de 10% est pris en compte pour assurer les connexions depuis le pyrolyseur vers l'ORC. Ce coût sera à ajuster avec le constructeur de pyrolyse correspondant à la solution choisie.

Il est à noter que Arti propose ses services pour l'installation d'un système ORC (75 kWél et 150 kWél). Les gammes de puissance thermique en entrée de ces dispositifs n'ont pas été communiquées. Il pourrait être intéressant d'investiguer ce point avec Arti dans le cas du choix de la solution de ce constructeur. En conséquence, dans l'analyse financière de cette étude, seule la solution d'Enogia a été étudiée, l'entreprise proposant un ORC de taille plus importante et le dimensionnement étant connu.

Enogia conseille de livrer la marchandise via le port d'Anvers plutôt que Marseille (plus rapide). Le coût de transport de Marseille à Anvers et le coût de la traversée ont été calculés de la même façon que précédemment.

Infrastructures

Les équipements doivent se trouver sur une dalle plane en béton et idéalement sous un hangar fermé pour protéger l'installation de la pluie et la poussière, et ainsi augmenter sa durée de vie, ou au moins sous toiture.

Grâce aux informations récoltées lors de la mission de terrain, le coût total de terrassement, pose de la dalle en béton et construction d'une toiture, est estimé à 80€/m².

La superficie nécessaire pour l'installation a été estimée de la façon suivante pour les différents constructeurs de pyrolyse/pyrogazéificateur :

- 3R Systems : l'entreprise n'était pas en mesure de donner une estimation de la surface nécessaire sans une étude plus approfondie. Sur la base d'un schéma dans leur portfolio où la longueur du module grande échelle est indiquée, la superficie a été estimée. La surface pour le module de taille intermédiaire et le module 8000-B a été considéré proportionnel par rapport à la capacité de biomasse en entrée pouvant être traitée. Un coefficient de 1,2 a été appliqué pour prendre en compte l'espace de stockage du biochar.
- Arti : Bien que les installations se trouvent dans des containers, il est considéré que celles-ci seront mises sous toiture afin de protéger au mieux le matériel. La surface au sol est calculée sur la base du nombre de containers nécessaires, multiplié par un facteur 3 pour tenir compte de l'espace nécessaire pour les systèmes d'alimentation et de sortie. Un coefficient de 1,2 a été appliqué pour prendre en compte le stockage du biochar.
- Energy&+ : tout comme Arti, bien que les installations se trouvent dans des containers, il est considéré que celles-ci seront mises sous toiture afin de protéger au mieux le matériel. L'entreprise a estimé une surface totale nécessaire de 400 m² pour un module 300 kW. Un coefficient de 1,2 a été appliqué pour prendre en compte le stockage du biochar.

La superficie nécessaire pour les différents broyeurs a été estimée grâce à leurs dimensions et en appliquant un facteur de 80% pour permettre de circuler autour du broyeur et une superficie de 25 m² pour les plaquettes en sortie broyeur.



Autres coûts

La mise en place de ces installations nécessitera une mise en conformité administrative. Dans ce but, une analyse du cadre juridique réglementaire a été réalisée pour les trois pays ciblés par le projet. Un résumé des documents nécessaires par pays figure au Tableau 22 tandis que l'analyse juridique détaillée est proposée en ANNEXE 8.

Tableau 22 – Documents nécessaires à la mise en conformité de l'installation

Critère	Congo	Gabon	Cameroun
Étude d'impact environnemental	Non	Non	Oui, de type sommaire.
Notice d'impact environnemental et social	Oui	Oui	Non
Déclaration	Oui	Oui	Oui
Permis environnement	Non	Non	Oui

Les coûts liés à la mise en conformité administrative ont été considérés à 0,2% du coût d'investissement (équipements et infrastructure).

Les coûts de certification biochar et CDM sont inclus si l'une et/ou l'autre certification est sélectionnée

6.1.2. Opex

Les coûts d'opérations et de maintenance (Opex) concernent les éléments suivants.

Machine de pyrolyse/pyrogazéification

Main d'œuvre

Le coût ouvrier a été calculé grâce aux informations récoltées sur les sites lors de la mission de terrain. Le coût employeur d'un salaire d'un ouvrier a été évalué à 200.000 FCFA/mois. Le coût horaire a été calculé en fonction du nombre de jours de travail (5,5 jours au Congo, 5 au Gabon et au Cameroun). Cela revient à 1,61€/h pour l'ouvrier Congolais et 1,77€/h pour l'ouvrier gabonais ou camerounais.

Cette valeur a été multipliée par le nombre d'heures d'opération estimées par le constructeur :

- 3R Systems : il faut compter 3,5 h/jour pour l'opération et la maintenance d'un module 8000-B. Le temps d'opération et de maintenance n'a pas été communiqué pour les deux autres modules. Il a été calculé de façon conservatrice linéairement par rapport à la quantité de biomasse traitée. Un facteur 6 et 12 a donc été appliqué pour les modules de taille intermédiaire et grande échelle respectivement.
- Arti : il faut compter 3 h/jour pour l'opération et la maintenance d'un conteneur pouvant contenir 1 à 5 trains.
- Energy&+ : un coût total d'opération et de maintenance comprenant le coût de personnel a été pris en compte (voir point ci-dessous).

Maintenance et autres coûts opérationnels

- Le constructeur 3R Systems, a communiqué un coût de maintenance et d'opération pour le module 8000-B sur le continent Africain. Ce coût a été estimé de façon proportionnelle à la quantité de biomasse en entrée de module pour les deux autres modules du constructeur. De même, dans une démarche conservatrice, ce coût a été calculé de façon directement proportionnelle pour les solutions nécessitant plusieurs modules identiques.
- Arti indique un coût de maintenance approximatif prenant en compte la venue sur place d'une personne pour une maintenance de deux jours, voyage inclus et couvrant 50% des pièces de rechange. Étant donné que le voyage se fait sur un autre continent et afin de couvrir les 50% restants, le prix a été multiplié par 1,5.
- Energy&+ communique un prix d'opération et de maintenance de 0,030€ du kWhél produit couvrant tous les coûts relatifs (main d'œuvre incluse).

Assurance

Une assurance pour la machine de pyrolyse a été comptée. Le montant de celle-ci sera à valider avec le constructeur. L'estimation prise dans cette étude est basée sur le pourcentage du montant de l'assurance du module 8000-B de 3R Systems par rapport au coût d'achat du module. Ce pourcentage (0,43%) a été appliqué pour toutes les solutions.

Surveillance du système et licence

Une licence d'utilisation et un dispositif de suivi ont été évalués dans les coûts, à nouveau grâce à un pourcentage par rapport au prix d'achat. L'estimation prise dans cette étude est basée sur le pourcentage du montant de la licence et du dispositif de suivi du module 8000-B de 3R Systems par rapport au coût d'achat du module. Ce pourcentage (1%) a été appliqué pour toutes les solutions.



Eau

Le coût de pompage ou d'approvisionnement de l'eau nécessaire pour les technologies de pyrolyse (pour le refroidissement du biochar) a été considéré négligeable.

Consommation de gasoil au démarrage

L'énergie thermique nécessaire pour le démarrage de l'installation est une donnée fournie par le constructeur. En fonction du nombre de démarrages annuels estimés par le constructeur et en prenant l'hypothèse qu'un litre de gasoil fournit 9,9 kWh, le nombre de litres de gasoil annuels peut être calculé.

Broyeur

Pour l'estimation des coûts opérationnels du broyeur, les coûts de main d'œuvre et de pièces d'usure ont été considérés.

Main d'œuvre

Lorsque le broyeur est en fonctionnement, il est estimé, à la suite des discussions avec différents constructeurs de broyeur, qu'il faut compter 3 personnes pour l'opération et la maintenance. Le nombre d'heures de fonctionnement annuelles du broyeur sélectionné a été multiplié par ce nombre d'employés et le coût horaire.

Pièces d'usure

Le coût annuel des pièces de rechange a été estimé grâce aux informations fournies par les constructeurs.

Certification carbone

Certification biochar

Les coûts opérationnels liés à la certification biochar ont été établis pour chaque standard, prenant en compte les coûts fixes et variables (ces derniers sont liés au nombre de crédits générés), mais également les coûts d'échantillonnage et de laboratoire lorsque requis. Dans le cas de la certification Verra où l'organisme d'audit vient pour la vérification maximum tous les 5 ans, le coût inhérent à la vérification a été amorti sur la période des 5 années. La fréquence des vérifications peut être plus régulière que tous les 5 ans. Cette variable peut être adaptée dans le fichier Excel « Outil Financier ».

Le biochar produit à partir de bois par pyrolyse a un taux de carbone compris entre 70 et 90%. En prenant une valeur de 70% et multipliant par le facteur 44/12 pour convertir ce taux de carbone en équivalent CO₂, le facteur de conversion à appliquer à la tonne de biochar est de 2,57 (valeur égale à 3,67 dans le cas parfait où le biochar est constitué à 100% de carbone). À cela, il faut déduire les émissions CO₂ liées au projet. Toutes déductions faites, une valeur relativement conservatrice de 2 tonnes CO₂éq stockées par tonne de biochar a ainsi été posée.

Dans le cas de biochar produit par pyrogazéification, la teneur de carbone est d'environ 50%. Le facteur de conversion est de 1,83. La même marge de sécurité que pour le biochar produit par pyrolyse a été appliqué. Le facteur final est dès lors été fixé à 1,43 tonnes CO₂éq par tonne de biochar.



Certification CDM

Les coûts liés à la certification CDM prennent en compte les coûts fixes et variables (ces derniers sont liés au nombre de crédits générés). De même que pour la certification Verra, l'organisme d'audit vient pour la vérification maximum tous les 5 ans, le coût inhérent à la vérification a été amorti sur la période des 5 années. La fréquence des vérifications peut être adaptée dans le fichier Excel « Outil Financier ».

La quantité de CER émis ne pourra être connue qu'au moment de l'étude de l'analyse du cycle de vie du projet. Cette quantité a été estimée par rapport à la quantité de gasoil annuelle pouvant être économisée. Pour cela, une valeur de 3,6 kg de CO₂ par litre de gasoil a été prise comme hypothèse[36].

La quantité de CO₂ évitée grâce au bois n'étant pas brûlé a également été prise en compte. Pour cela, la quantité de bois a été multipliée par son pouvoir calorifique inférieur à 50% d'humidité (2,15 kWh/kg) [37]. Le pouvoir calorifique total permet de déterminer la quantité de CO₂éq (22,4 gCO₂/kWh pour les bûches de bois)[38].

Un facteur de sécurité de 0,8 a été appliqué.

Supervision du projet

Un coordinateur à temps plein est pris en compte pour la mise en place du projet, le montage des documents de projet pour la/les certification(s) et le suivi de la production. Dans une approche conservatrice, le salaire d'un employé expatrié a été considéré (120.000€/an). Dans le cas où il y a la volonté de réaliser les certifications biochar et CDM, un employé à mi-temps supplémentaire a été considéré.

6.1.3. Revenus

Les revenus potentiels liés au projet sont issus de :

La vente du biochar comme amendement agricole

Le biochar en tant qu'amendement agricole a une valeur intrinsèque. Étant donné que le biochar constitue un produit encore relativement peu connu, des tests pour démontrer sa performance devront probablement être réalisés. C'est pourquoi, sa valeur de vente a été fixée à zéro dans les simulations. L'outil financier permet néanmoins de fixer un prix, notamment en regard de son potentiel auprès des grandes entreprises agroalimentaires (Olam) ou des projets de plantation à grande échelle (eucalyptus sud-est Gabon).

La vente de crédit carbone

Les crédits carbone générés par l'utilisation du biochar dans le sol par exemple peuvent être vendus sur le marché volontaire du carbone. Un prix de vente moyen de 175€/crédit a été posé. Selon les pays, une redevance à l'Etat hôte, d'une partie des crédits doit être estimée. Un facteur de 20% a été fixé dans le scénario présenté dans cette étude.

Le prix de vente des crédits carbone CER lié au changement de pratique (certification CDM) a été fixé à 10€ [39]. Le facteur pour les redevances à l'état a été fixé à 20% également.

Ces prix de ventes sont modifiables dans l'outil Excel de simulation financière.

L'économie de gasoil réalisée

Le gasoil économisé grâce au projet est pris en compte. Le prix a été déterminé sur la base des informations récoltées durant la mission de terrain et a été fixé à 600 FCFA pour le Congo, 1.145 FCFA pour le Gabon et 680 FCFA pour le Cameroun.

La plus-value sur les rendements agricoles, que peut apporter l'utilisation du biochar dans les cultures vivrières, imputable à la stratégie RSE de l'entreprise forestière, présentée à la section 7.2.4 n'est pas prise en compte dans l'analyse financière.

6.1.4. Indicateurs financiers

Afin d'identifier l'intérêt et de comparer les différentes solutions techniques, plusieurs indicateurs financiers ont été calculés et sont présentés ci-dessous.

Par défaut, les fonds propres et les fonds éventuels fournis par des investisseurs ou subsides ont été fixés à zéro. Un taux d'intérêt de 5,08% [40] (en prenant une marge de sécurité d'1% par rapport à la valeur Euribor¹⁷) et une durée d'investissement de 20 ans ont été fixés. Il est à noter que l'outil financier fourni permet de modifier la répartition « fonds propres » *versus* « crédit »..

Valeur actuelle nette

La valeur actuelle nette (VAN) mesure la rentabilité d'un investissement ou d'un projet sur une période donnée. Elle estime la différence entre les flux de trésorerie entrants (comme les revenus ou les gains) et les flux de trésorerie sortants (comme les coûts ou les dépenses), en prenant en compte la valeur temporelle de l'argent. En d'autres termes, la VAN calcule combien d'argent sera gagné ou perdu en investissant dans un projet, en tenant compte du fait que l'argent a plus de valeur aujourd'hui que dans le futur en raison de l'inflation et des opportunités d'investissement.

Si la VAN est positive, cela signifie que l'investissement ou le projet est rentable, car les revenus futurs sont plus importants que les coûts. Si la VAN est négative, cela indique que l'investissement est peu probable de rapporter suffisamment pour compenser les dépenses. Plusieurs projets peuvent ainsi être comparés entre eux. La VAN dépend principalement du taux d'actualisation, fixé par défaut à 7%.

La formule utilisée pour calculer la VAN est la suivante

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \text{Recettes nettes en année } i \times (1 + t)^{-i}$$

Où

I est le capital investi

t est le taux d'actualisation du flux de trésorerie [41]

Le taux d'actualisation est un taux utilisé en finance pour évaluer la valeur présente des flux de trésorerie futurs. Il peut aussi représenter le coût du capital ou le taux qui équilibre les investissements dans un projet. Le processus d'actualisation consiste à ajuster les flux de trésorerie futurs en fonction de leur valeur temporelle, en fonction du taux choisi.

La VAN est une fonction décroissante du taux d'actualisation. Plus le taux est élevé et plus la VAN est faible.

Autrement dit, si le taux d'actualisation est élevé, cela signifie que la somme des recettes divisées par leur taux cumulé actualisé (pour revenir à la valeur réelle de l'argent à l'instant des investissements), sur une période donnée, devient plus faible et l'investissement pourra devenir difficilement compensé. Au contraire, si le taux d'actualisation est faible, cela indique que le projet est plus robuste et est plus rentable.

¹⁷ « Euro Interbank Offered Rate » ou Euribor sont les taux basés sur les taux d'intérêt moyens auxquels un large panel de banques européennes s'emprunte des fonds entre elles.



Le choix du taux d'actualisation dépend du risque associé à l'investissement, des taux de rendement disponibles sur le marché, des opportunités alternatives d'investissement et des préférences personnelles de l'investisseur.

Taux rentabilité interne

Le taux de rentabilité interne (TRI) est un autre indicateur utilisé pour évaluer la rentabilité d'un investissement ou d'un projet. Il s'agit du taux d'intérêt perçu pour un investissement constitué de remboursements et de revenus à périodes régulières. Le taux de rentabilité interne correspond au taux pour lequel la VAN est nulle (c'est-à-dire que les revenus futurs sont exactement égaux aux coûts initiaux) et se calcule de manière itérative avec l'équation ci-dessous :

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \text{Recettes nettes en année } i \times (1 + t)^{-n} = 0$$

Cela signifie que le taux de rentabilité interne doit être supérieur au loyer de l'argent, pour que le projet soit rentable. Dans le cas contraire, il est plus facile et plus profitable de mettre le capital en banque.

6.2. RÉSULTATS PAR SOLUTION ET PAR SITE

Dans ce chapitre sont présentés les résultats pour chaque site et solution. Si le dimensionnement des pyrolyseurs/pyrogazéificateurs, séchoirs et ORC éventuels optimisés pour chaque site ne sont pas modifiables, d'autres valeurs peuvent être ajustées dans l'outil Excel par les entreprises en fonction de leur situation, tels que les fonds propres, le prix du gasoil, le coût salarial par exemple ou encore les prix de vente des crédits carbone. Les scénarios avec et sans certification carbone biochar sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Les scénarios avec une VAN négative n'ont pas fait l'objet d'un calcul du TRI. Également, les analyses de sensibilité réalisées ont souligné que la certification CDM ne semble pas avantageuse dans le contexte du projet. Cette dernière n'a donc pas été retenue dans les solutions présentées dans ce chapitre. Pour chaque site, un schéma décisionnel final permet de présenter l'évolution des VAN en fonction du scénario choisi et de comparer ces derniers entre eux. Les proportions de biochar et d'énergie produits pour chaque constructeur sont également fournies et illustrent le positionnement du « curseur » en fonction des solutions (voir Figure 2).

Les tableaux de compte de résultats détaillés et relatifs à la solution optimale pour chaque site se trouvent en ANNEXE 7.

6.2.1. CIB-Enyéllé

Enyéllé – Scénario A – 3R Systems

Pour la solution 3R Systems du site d'Enyéllé, le Tableau 23 montre que le projet n'est pas rentable sur la base des hypothèses posées et que la certification biochar n'est pas suffisante à la rentabilité du projet.

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	CAPEX	15.556.312 €	
	OPEX	11.047.050 €	
	Économie gasoil	2.962.004 €	
		VAN sans certification	TRI
	- 24.085.417 €	NA	
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	25.139 €	
	Charges certification (OPEX)	411.580 €	
	Revenus crédits carbone	30.164.400 €	
		VAN avec certification	TRI
	- 9.991.365 €	NA	

Tableau 23 – Résultats à 20 ans de la solution 3R Systems à Enyéllé, broyeur Zhangsheng ZSGS-218, certification EBC

Enyéllé – Scénario A – Arti

Pour la solution Arti du site d'Enyéllé, le Tableau 24 met en avant l'intérêt de la certification biochar. La solution utilisant le broyeur ZSGS-218 de la marque Zhangsheng couplé à un projet certifié EBC propose la VAN la plus élevée.

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	CAPEX	6.107.760 €	
	OPEX	8.478.470 €	
	Économie gasoil	9.926.919 €	
		VAN sans certification	TRI
	- 7.167.964 €	NA	
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	19.475 €	
	Charges certification (OPEX)	298.300 €	
	Revenus crédits carbone	16.970.800 €	
		VAN avec certification	TRI
	720.777 €	8%	

Tableau 24 - Résultats à 20 ans de la solution Arti à Enyéllé, broyeur Zhangsheng ZSGS-218, certification EBC

Enyéllé – Scénario B – Energy&+

Pour la solution Energy&+ du site d'Enyéllé, les résultats du Tableau 25 montrent que le projet avec Energy&+ n'est pas rentable avec les hypothèses posées (voir section 6.1), même si l'on y intègre les revenus carbone.

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	Production de biochar/énergie	3.796.332 €	
	OPEX	4.537.740 €	
	Économie gasoil	10.983.216 €	
		VAN sans certification	TRI
	- 1.710.184 €	NA	
Certification Carbone	Certification Carbone	12.002 €	
	Charges certification (OPEX)	127.940 €	
	Revenus crédits carbone	304.304 €	
		VAN avec certification	TRI
	- 1.646.663 €	NA	

Tableau 25 - Résultats à 20 ans de la solution Energy&+ à Enyéllé, broyeur Zhangsheng ZSGS-218, certification Puro.earth

Pour CIB Enyéllé, la solution Arti semble donc la meilleure option avec les hypothèses ici posées. Un tableau de compte de résultats relatif à cette solution se trouve au Tableau 55 en ANNEXE 7.

La Figure 34 représente de façon schématique les VAN (arrondies au multiple des milliers) pour les scénarios des différentes solutions (intégrant le choix du broyeur optimal) pour le site d'Enyéllé, tous les autres paramètres étant fixés égaux.

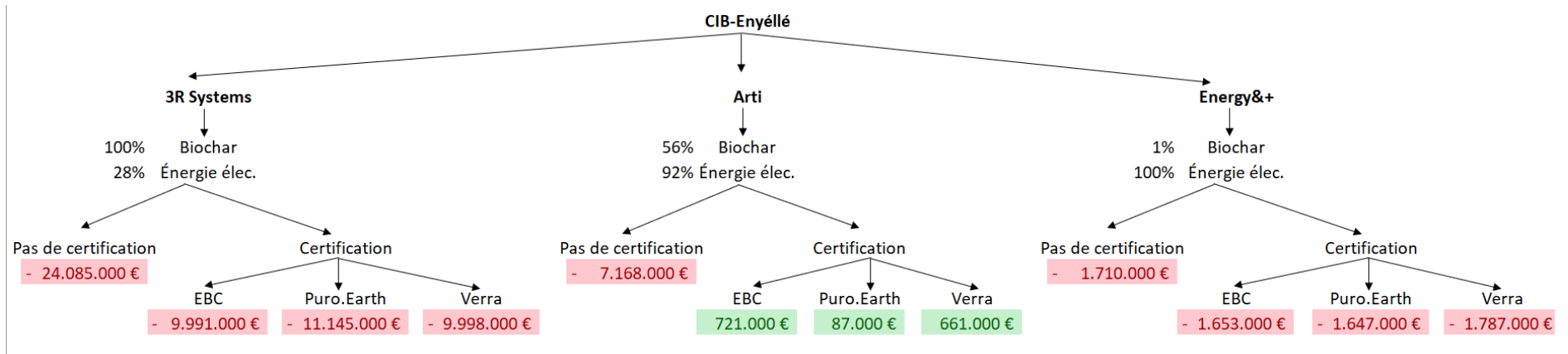


Figure 34 – Diagramme des VAN en fonction des différentes options pour chaque solution du site d’Enyéllé de la CIB

6.2.2. CEB - Bambioie

CEB – Scénario A – 3R Systems

Pour la solution 3R Systems du site de la CEB, le Tableau 26 permet de conclure que le projet n'est pas rentable, même en considérant les revenus de la certification carbone.

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	CAPEX	15.128.876 €	
	OPEX	11.365.951 €	
	Économie gasoil	4.376.068 €	
		VAN sans certification	TRI
		- 22.991.447 €	NA
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	46.989 €	
	Charges certification (OPEX)	352.305 €	
	Revenus crédits carbone	35.378.000 €	
		VAN avec certification	TRI
		- 6.430.442 €	NA

Tableau 26 - Résultats à 20 ans de la solution 3R Systems à la CEB, broyeur Jenz BA615E, certification Verra

CEB – Scénario A – Arti

Pour la solution Arti du site de la CEB, le Tableau 27 montre l'intérêt de la certification, le projet n'étant pas rentable sans celle-ci. La solution couplant le broyeur BA615E de la marque Jenz à la certification EBC présente la VAN la plus élevée et est présentée ci-dessous. Au niveau de la rentabilité, la certification Verra est équivalente (VAN très légèrement inférieure).

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	CAPEX	7.097.991 €	
	OPEX	9.524.954 €	
	Économie gasoil	25.120.507 €	
		VAN sans certification	TRI
		- 1.442.850 €	NA
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	20.850 €	
	Charges certification (OPEX)	325.800 €	
	Revenus crédits carbone	19.896.800 €	
		VAN avec certification	TRI
		7.820.738 €	18%

Tableau 27 - Résultats à 20 ans de la solution Arti à la CEB, broyeur Jenz BA615E, certification EBC

Pour la solution Energy&+ du site de la CEB, le projet est rentable sans certification et le Tableau 28 montre que la certification biochar n'influence ni la VAN, ni le TRI. En effet, la quantité de biochar produite par la pyrogazéification est très faible (80 t/an) et ne permet pas de générer suffisamment de crédit carbone pour influencer la rentabilité.

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	CAPEX	3.712.848 €	
	OPEX	4.537.740 €	
	Économie gasoil	20.926.238 €	
		VAN sans certification	TRI
	3.319.860 €	17%	
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	12.002 €	
	Charges certification (OPEX)	127.940 €	
	Revenus crédits carbone	304.304 €	
		VAN avec certification	TRI
	3.383.381 €	17%	

Tableau 28 - Résultats à 20 ans de la solution Energy&+ à la CEB, broyeur Zhangsheng ZSGS-218, certification Puro.earth

En ce qui concerne la CEB, la solution Arti semble donc la meilleure option avec les hypothèses ici posées. Un tableau de compte de résultats relatif à cette solution se trouve au Tableau 56 en ANNEXE 7.

La

Figure 35 représente de façon schématique les VAN (arrondies au multiple des milliers) pour les scénarios des différentes solutions (intégrant le choix du broyeur optimal) pour le site de la CEB, tous les autres paramètres étant fixés égaux.

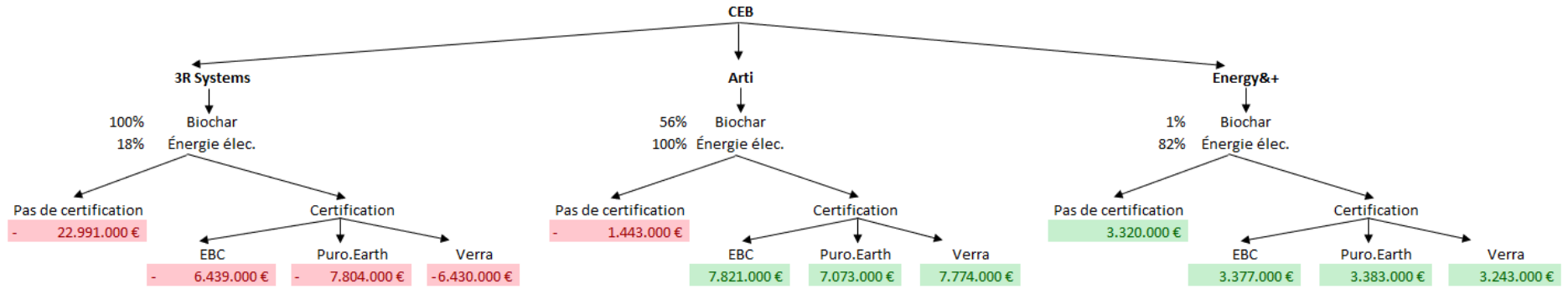


Figure 35 - Diagramme des VAN en fonction des différentes options pour chaque solution du site de Bambidie de la CEB

6.2.3. GSEZ – Lambaréné

Lambaréné – Scénario A – 3R Systems

Pour la solution 3R Systems du site de Lambaréné, le Tableau 29 montre que le projet n'est pas rentable sans la certification biochar. La solution utilisant le broyeur BA615D de la marque Jenz couplé à un projet certifié Verra propose la VAN la plus élevée.

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	CAPEX	19.672.838 €	
	OPEX	25.880.190 €	
	Économie gasoil	38.162.760 €	
		VAN sans certification	TRI
	- 19.316.847 €	NA	
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	53.025 €	
	Charges certification (OPEX)	473.020 €	
	Revenus crédits carbone	123.690.000 €	
		VAN avec certification	TRI
	39.136.469 €	25%	

Tableau 29 - Résultats à 20 ans de la solution 3R Systems à Lambaréné, broyeur Jenz BA615D, certification Verra

Lambaréné – Scénario A – Arti

Pour la solution Arti du scénario A du site de Lambaréné, le Tableau 30 montre l'intérêt de la certification biochar. La solution utilisant le broyeur BA615D de la marque Jenz couplé à un projet certifié Verra propose la VAN la plus élevée.

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	CAPEX	23.329.839 €	
	OPEX	30.234.353 €	
	Économie gasoil	91.354.339 €	
		VAN sans certification	TRI
	138.862 €	7%	
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	49.327 €	
	Charges certification (OPEX)	399.064 €	
	Revenus crédits carbone	69.585.600 €	
		VAN avec certification	TRI
	32.926.828 €	21%	

Tableau 30 - Résultats à 20 ans de la solution Arti scénario A à Lambaréné, broyeur Jenz BA615D, certification Verra

Lambaréné – Scénario B – Arti

Pour la solution Arti du scénario B du site de Lambaréné, le Tableau 31 montre que le projet n'est pas rentable sans la certification biochar. La solution utilisant le broyeur HE561 de la marque Jenz couplé à un projet certifié Verra propose la VAN la plus élevée.

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	CAPEX	16.645.017 €	
	OPEX	19.711.895 €	
	Économie gasoil	59.863.089 €	
		VAN sans certification	TRI
	- 1.611.692 €	NA	
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	47.931 €	
	Charges certification (OPEX)	371.139 €	
	Revenus crédits carbone	49.156.800 €	
		VAN avec certification	TRI
	21.485.523 €	20%	

Tableau 31 - Résultats à 20 ans de la solution Arti scénario B à Lambaréné, broyeur Jenz HE561, certification Verra

Lambaréné – Scénario B – Energy&+

Pour la solution Energy&+ du site de Lambaréné, le Tableau 32 montre que les deux scénarios disposent d'une VAN positive. Les revenus de certification carbone de cette solution n'influencent pas significativement cette VAN.

La solution utilisant le broyeur ZSGS-218 de la marque Zhangsheng couplé à un projet certifié Verra (EBC et Puro n'étant pas envisageables en absence de certification FSC) est présentée ci-dessous.

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	CAPEX	10.948.831 €	
	OPEX	8.699.740 €	
	Économie gasoil	62.750.728 €	
		VAN sans certification	TRI
	12.622.728 €	20%	
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	44.634 €	
	Charges certification (OPEX)	305.194 €	
	Revenus crédits carbone	912.912 €	
		VAN avec certification	TRI
	12.834.628 €	20%	

Tableau 32 - Résultats à 20 ans de la solution Energy&+ à Lambaréné, broyeur Zhangsheng ZSGS-218, certification Verra

Plusieurs solutions rentables se présentent pour GSEZ à Lambaréné. Cette rentabilité est possible par le volume très important de déchets permettant d'améliorer la répartition des coûts par unités de volume tout en proposant des revenus de vente de crédits carbone biochar et d'économies de gasoil importantes.

La solution 3R Systems apparaît comme la meilleure option avec les hypothèses ici posées. Un tableau de compte de résultats relatif à cette solution se trouve au Tableau 57 en ANNEXE 7.

La *Figure 36* représente de façon schématique les VAN (arrondies au multiple des milliers) pour les scénarios des différentes solutions (intégrant le choix du broyeur optimal) pour le site de Lambaréné de GSEZ, tous les autres paramètres étant fixés égaux. Pour le site de Lambaréné, les déchets bois disponibles n'étant pas tous certifiés FSC, la méthodologie Verra est la seule qui convient à la situation actuelle. Il est cependant intéressant de voir quelle aurait été la VAN dans le cas de déchets issus de forêts certifiées FSC.

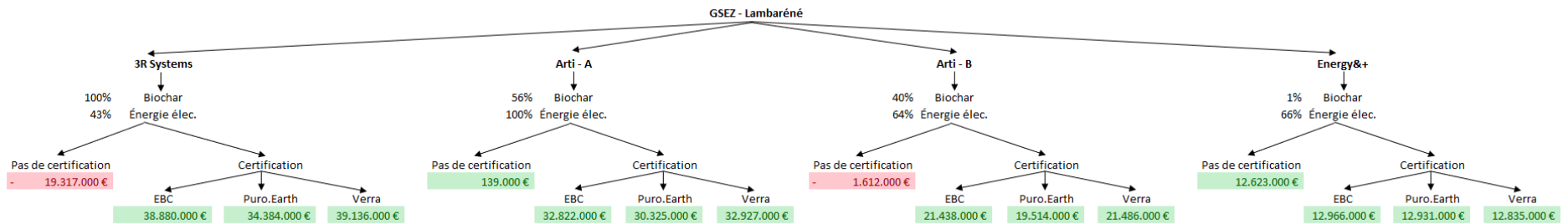


Figure 36 - Diagramme des VAN en fonction des différentes options pour chaque solution du site de Lambaréné de GSEZ

6.2.4. Pallisco - Mindourou

Pallisco – Scénario A – 3R Systems

Pour la solution 3R Systems du site de Pallisco, le Tableau 33 permet de conclure que le projet n'est pas rentable, même en considérant les revenus de la certification carbone.

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	CAPEX	11.683.142 €	
	OPEX	9.042.063 €	
	Économie gasoil	3.217.596 €	
		VAN sans certification	TRI
	- 17.966.126 €	NA	
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	23.125 €	
	Charges certification (OPEX)	371.300 €	
	Revenus crédits carbone	24.738.000 €	
		VAN avec certification	TRI
	- 6.427.790 €	NA	

Tableau 33 - Résultats à 20 ans de la solution 3R Systems à Pallisco, broyeur ZhangSheng ZSGS-218, certification EBC

Pallisco – Scénario A – Arti

Pour la solution Arti du scénario A du site de Pallisco, le Tableau 34 montre que le projet n'est pas rentable sans les revenus de la certification carbone. La solution utilisant le broyeur ZSGS-218 de la marque ZhangSheng couplé à un projet certifié EBC propose la VAN la plus élevée.

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	CAPEX	5.190.154 €	
	OPEX	7.489.802 €	
	Économie gasoil	9.313.841 €	
		VAN sans certification	TRI
	- 5.797.415 €	NA	
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	18.050 €	
	Charges certification (OPEX)	269.800 €	
	Revenus crédits carbone	13.938.400 €	
		VAN avec certification	TRI
	666.483 €	8,4%	

Tableau 34 - Résultats à 20 ans de la solution Arti scénario A à Pallisco, ZhangSheng ZSGS-218, certification EBC

Pallisco – Scénario B – Arti

Pour la solution Arti du scénario B du site de Pallisco, le Tableau 35 montre que le projet n'est pas rentable sans les revenus de la certification carbone. La solution utilisant le broyeur ZSGS-218 de la marque ZhangSheng couplé à un projet certifié EBC propose la VAN la plus élevée.

Résultats à 20 ans		Coûts/Revenus	
Production de biochar/énergie	CAPEX	2.780.419 €	
	OPEX	5.215.640 €	
	Économie gasoil	3.879.055 €	
		VAN sans certification	TRI
	- 4.251.146 €	NA	
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	16.225 €	
	Charges certification (OPEX)	233.300 €	
	Revenus crédits carbone	10.054.800 €	
		VAN avec certification	TRI
	387.954 €	8,5%	

Tableau 35 - Résultats à 20 ans de la solution Arti scénario B à Pallisco, ZhangSheng ZSGS-218, certification EBC

Pallisco – Scénario B – Energy&+

Pour la solution Energy&+ du site de Pallisco, le Tableau 36 montre que le projet avec Energy&+ n'est pas rentable avec les hypothèses posées avec ou sans certification carbone.

Résultats à 20 ans		Coût/Revenu	
Production de biochar/énergie	CAPEX	3.811.046 €	
	OPEX	3.811.046 €	
	Économie gasoil	4.392.983 €	
		VAN sans certification	TRI
	- 4.559.205 €	NA	
Certification Carbone	Investissement (CAPEX)	10.751 €	
	Charges certification (OPEX)	102.915 €	
	Revenus crédits carbone	114.114 €	
		VAN avec certification	TRI
	- 4.572.045 €	NA	

Tableau 36 - Résultats à 20 ans de la solution Energy&+ à Lambaréné, broyeur Zhangsheng ZSGS-218, certification Puro.earth

Pour Pallisco, la solution Arti pour le scénario A semble donc la meilleure option avec les hypothèses ici posées. Un tableau de compte de résultats relatif à cette solution se trouve au Tableau 58 en ANNEXE 7.

La Figure 37 représente de façon schématique les VAN (arrondies au multiple des milliers) pour les scénarios des différentes solutions (intégrant le choix du broyeur optimal) pour le site de Pallisco, tous les autres paramètres étant fixés égaux.

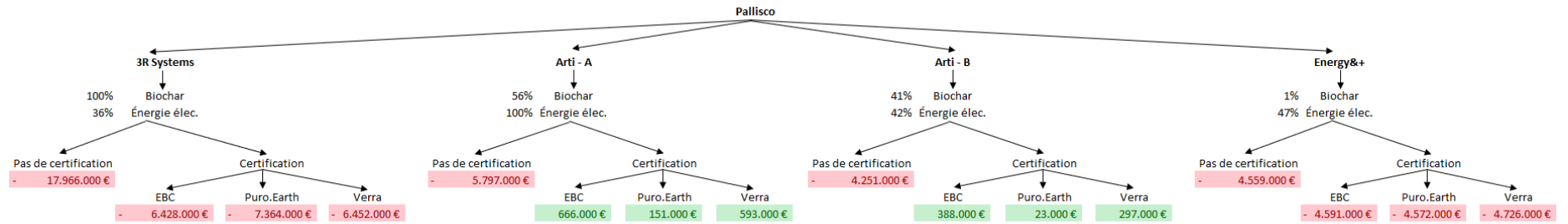


Figure 37 - Diagramme des VAN en fonction des différentes options pour chaque solution du site de Pallisco

6.3. INVESTISSEURS

Cette section traite des différents investisseurs potentiels identifiés et contactés dans le cadre de cette convention pour le financement et/ou la mise en place de projets carbone biochar. Il existe différentes sources et modalités de financements possibles. En fonction de la nature du projet, de ses porteurs et de ses objectifs il convient de s'adresser à des partenaires différents. Le Tableau 37 présente les différents financements possibles ainsi que les cas où ils peuvent être sollicités. Les fonds d'investissement et les porteurs de finance carbone présentés ci-dessous ne constituent qu'un échantillon du potentiel. Il reviendra à chaque entreprise partenaire d'entamer les démarches plus officielles avec ces différents entreprises en cas de mise en œuvre de leurs projets respectifs.

Tableau 37 - Comparaison des différentes sources de financements

Source de financement	Type de financement	Montants	Nature du projet
Fonds d'investissement	Crédit à long terme Prise de capital	Plusieurs millions d'euros	Développement d'une nouvelle activité biochar avec impact E&S ¹⁸ fort
Finance carbone	Achat de crédits carbone	En fonction de la taille du projet	Renforcement de la conservation forestière, reboisement

6.3.1. Les fonds d'investissement

Les tableaux suivants (Tableau 38 à Tableau 41) présentent, de façon non exhaustive, différents fonds d'investissement contactés durant l'étude et pouvant être sollicités par une entreprise forestière pour le montage d'un projet biochar.

¹⁸ E&S : environnemental et social



Tableau 38 - Fiche de présentation de Mirova


 Mirova	
Organisme :	Fonds d'investissement et société de gestion de fonds.
Pays cible :	Partenaire : Orange Pologne, Slovaquie, Moldavie, Roumanie, Belgique, Luxembourg, France (métropolitaine et d'outre-mer), Espagne, Jordanie, Égypte, Tunisie, Maroc, Sénégal, Côte d'Ivoire, Liberia, Sierra Leone, Guinée Conakry, Cameroun, Botswana, Madagascar, Île Maurice.
Champ d'action :	Mirova est une société de gestion développant des solutions d'investissement innovantes visant à accélérer la transformation de l'économie vers un modèle durable. Mirova est le gestionnaire du fonds Orange Nature. En partenariat avec Orange, ils ont uni leurs forces pour former une entité visant à soutenir des solutions innovantes fondées sur la nature qui génèrent des crédits carbone et ont des impacts additionnels positifs (biodiversité et social). Il n'y a pas de date butoir pour la soumission de projet, Mirova examine les projets au fur et à mesure.
Type de financement possible :	Prise de participation directe.
Montant :	Jusqu'à 5 millions d'euros.
Type d'organisme visé :	Tout organisme développeur de projets de captation carbone.
Critères d'éligibilité :	Le biochar fait partie des types de projets que Mirova examinera, si toutefois le projet répond aux critères suivants : <ul style="list-style-type: none">- Doit être en fonctionnement (avec des résultats concrets, même s'ils sont préliminaires) ;- Doit impliquer les communautés locales avec des prestations sociales ;- Doit se trouver dans la liste suivante de pays : Pologne, Slovaquie, Moldavie, Roumanie, Belgique, Luxembourg, France (métropolitaine et d'outre-mer), Espagne, Jordanie, Égypte, Tunisie, Maroc, Sénégal, Côte d'Ivoire, Liberia, Sierra Leone, Guinée Conakry, Cameroun, Botswana, Madagascar, Île Maurice.- Doit être porté par un porteur de projet ayant fait ses preuves démontrant un ancrage local ;- Doit être à la recherche d'une proposition commerciale – le financement fourni ne sera pas des subventions, mais du capital d'investissement sous réserve de remboursement.
Site internet et contact :	https://www.mirova.com/fr




Tableau 39 - Fiche de présentation du fond SouthBridge

SouthBridge	
Organisme :	Fonds d'investissement et société de gestion de fonds
Pays cible :	Tous les pays africains.
Champ d'action :	Southbridge se définit comme la banque panafricaine de conseil et d'investissement
Type de financement possible :	Prises de participation directe ou indirecte. Assistance technique visant à renforcer les capacités de l'entreprise en termes de leadership et organisation, marketing, ressources humaines, gestion financière et fonctions techniques
Montant :	Plusieurs millions à centaines de millions. Southbridge divise ses activités en 4 piliers se concentrant sur les domaines clés directement liés au développement durable et à l'inclusion : <ul style="list-style-type: none"> - Croissance des PME et création d'emplois - Inclusion financière et autonomisation des femmes - Accélération de la digitalisation et de l'innovation - Résilience et adaptation face aux changements climatiques
Type d'organisme visé :	Un projet biochar s'intégrerait dans le quatrième pilier. Ce pilier devient de plus en plus conséquent en termes de fonds investis. SouthBirdge est conscient que l'Afrique sera en première ligne face au réchauffement climatique et cherche à mobiliser des mécanismes de finance verte sur le marché africain ainsi qu'à soutenir les pays dans leur transition énergétique. Celui implique des processus de décarbonisation avec la mise en place d'infrastructures vertes et résilientes. Lors d'un événement organisé par l'ATIBT à Paris en décembre 2022, Southbridge a évoqué son intérêt pour le biochar.
Critères d'éligibilité :	SouthBridge ne soutient que les projets ayant lieu sur le continent africain et s'inscrivant dans au moins un des quatre piliers mentionnés ci-dessus.
Site internet et contact :	https://www.southbgroup.com/fr/sbi/ emeryc.kpenou@southbgroup.com



Tableau 40 - Fiche de présentation du fonds Proparco

 Proparco	
Organisme :	Fonds d'investissement de finance mixte Partenaires : Agence Française de Développement, FMO, DEG Appui technique : FISEA, FRCG
Pays cible :	Tous les pays
Champ d'action :	L'objectif de Proparco est : <ul style="list-style-type: none"> - Favoriser l'émergence d'un secteur privé dynamique, innovant et responsable dans les pays en développement et émergents - Participer à la construction d'une croissance économique durable, à la création d'emplois - Participer à la réduction de la pauvreté et la lutte contre le changement climatique Proparco finance des sociétés dont l'activité participe à la création d'emplois et de revenus décents, à la fourniture de biens et de services essentiels, ainsi qu'à la lutte contre le changement climatique. Le biochar s'inscrit dans cette perspective.
Type de financement possible :	Prêts longue durée Prise de participation directe ou indirecte Accompagnement technique : financement d'études (par exemple de faisabilité) et d'audits. L'offre d'accompagnement technique de Proparco repose sur le principe de partage des coûts entre Proparco et le client L'accompagnement technique est réalisé : <ul style="list-style-type: none"> • Par la facilité d'accompagnement technique de FISEA (voir ci-après), destinée en priorité à renforcer les capacités des petites et moyennes entreprises en Afrique subsaharienne • Par la Facilité de Renforcement des Capacités de Gouvernance (FRCG), dédiée au financement de projets d'amélioration des performances Environnementales, Sociales et de Gouvernance (ESG) • Par ses propres budgets
Montant :	Prêts de 3 à 100 millions d'euros, en devise ou en monnaie locale sur des durées longues (jusqu'à 20 ans), avec un différé de remboursement du capital lorsqu'il se justifie Possibilité de syndiquer des montants importants grâce à des mécanismes de co-financement avec ses partenaires, notamment européens (FMO, DEG) Prises de participation minoritaires directes ou indirectes (via des fonds d'investissement) Le cofinancement accordé par le FRCG (appui technique) à chaque mission d'assistance est compris entre 10 000€ et 50 000€
Type d'organisme visé	Proparco appuie le développement d'entreprises actives sur les secteurs clés du développement (infrastructure, agriculture, industrie, finance, services sociaux, etc.) – aussi bien des acteurs locaux que des entreprises françaises implantées au Sud ou désireuses d'y développer des filiales
Critères d'éligibilité :	Pour Proparco, un « <i>bon projet</i> » est un projet rentable, en ligne avec son mandat et ses orientations stratégiques, porté par un client solide, qui aura des impacts sur le développement local, notamment en termes sociaux et environnementaux Conditions et principes d'investissement : <ul style="list-style-type: none"> - Additionalité : Proparco intervient en complément de l'offre des banques commerciales locales et internationales, en évitant toute perturbation sur le marché financier concurrentiel. Ses interventions se concentrent sur des



Proparco

secteurs où son aide est la plus nécessaire et où sa valeur ajoutée, notamment extra-financière (conseil et accompagnement sur les aspects ESG, rôle dans la structuration du projet, etc.), est la plus forte

- **Effet d'entraînement** : les financements ont vocation à démontrer la viabilité économique et financière des acteurs du secteur privé au Sud dans des activités et/ou des régions considérées à priori comme peu attractives par les investisseurs. En ce sens, les interventions visent un effet d'entraînement important en attirant et en mobilisant sur les projets de ses clients d'autres financements publics et privés
- **Fiabilité du client** : toute décision de financement repose sur un examen approfondi des différents facteurs de risque (financier, juridique et technique) liés au client et à son projet. Proparco s'attache également à évaluer la capacité des sociétés qu'elle finance à résister et à récupérer d'éventuels chocs
- **Rentabilité du projet** : la viabilité économique des sociétés et des projets constitue un critère important de sélectivité. En tant qu'établissement prêteur, le retour sur investissement est fondamental pour assurer la pérennité de Proparco
- **Effets sur le développement** : la contribution des sociétés qu'elle finance sur le développement local est au cœur de la démarche d'investissement. Selon la nature du client, elle s'attache, par exemple, à évaluer les effets de l'activité/du projet sur le maintien et la création d'emplois ; les problématiques de genre ; les pratiques environnementales (réduction des gaz à effet de serre, utilisation d'énergies renouvelables...), sociales (conditions d'emplois, hygiène et sécurité des travailleurs...) et de gouvernance ; l'amélioration de l'accès des populations défavorisées à des biens et services essentiels ; les recettes publiques générées ; le transfert de technologie et de savoir-faire, etc.

Procédure :

Chaque projet soumis à Proparco pour un financement fait l'objet d'un examen approfondi :

- Vérifications contre la corruption, la fraude, les pratiques anticoncurrentielles, le blanchiment des capitaux et le financement du terrorisme, conformément aux procédures internes de l'AFD en matière de sécurité financière – parmi les plus exigeantes au sein des bailleurs de fonds
- Critères rigoureux de lutte contre les paradis fiscaux dans les pays classés comme des Juridictions Non Coopératives (JNC)
- Evaluation des risques environnementaux, sociaux (conditions de travail, empreinte écologique...) et de gouvernance liés aux opérations financées, en adéquation avec les engagements de l'AFD en termes de responsabilité sociétale
- Une revue de gouvernance, pour les projets financés en fonds propres directement

Exemple de projet :

Pour renforcer les capacités locales de transformation, Proparco soutient avec un prêt de 11,2 millions d'euros la **construction d'une usine de traitement du cacao en Côte d'Ivoire**. Ce projet est porté par une filiale du groupe agro-industriel Olam International. Ce prêt contribuera à financer la construction d'une usine de traitement de cacao d'une capacité de 70 000 tonnes par an localisée à San Pedro.



Proparco

Ce projet contribuera à renforcer les capacités locales de transformation de la Côte d'Ivoire et au développement d'un secteur économique clé pour le pays. Il permettra de générer des recettes fiscales pour l'Etat ivoirien, de créer des emplois directs.

Site internet et contact :

<https://www.proparco.fr/fr>

proparco@proparco.fr

151, rue Saint Honoré

75001 Paris

+ 33 1 53 44 31 08

Tableau 41 - Fiche de présentation du fonds FISEA

FISEA

Organisme :

Fonds d'investissement de finance mixte et appui technique

Partenaires : Agence Française de Développement, Proparco

Pays cible :

Afrique sub-saharienne

Champ d'action :

Renforcement des capacités des entreprises, Assistance technique au **montage de projets**

Type de financement possible :

Prises de participation minoritaires (1 à 10 millions d'euros) directes ou indirectes (*via* des fonds d'investissement).

Prise de participation en capital, souscription à des émissions d'obligations, comptes courants d'actionnaires.

Assistance technique visant à renforcer les capacités de l'entreprise en termes de leadership et organisation, marketing, ressources humaines, gestion financière et fonctions techniques

Montant :

Fonds doté de **5 millions d'euros annuels** pour l'appui technique

Type d'organisme visé

Les entrepreneurs ou promoteurs opérant en Afrique subsaharienne et ayant besoin d'un appui financier pour développer leur activité

Critères d'éligibilité :

- Activité financée est située majoritairement en **Afrique subsaharienne** ;
- Structure bénéficiaire est dirigée par une **équipe expérimentée et de qualité** ;
- Projet est pérenne et dispose d'un **plan d'affaires rentable** à moyen terme ;
- Structure bénéficiaire **respecte les normes environnementales, sociales, de lutte anti-blanchiment** des standards internationaux ;
- Le **désengagement financier de FISEA est envisageable** à terme.

Site internet :

<https://www.proparco.fr/fr/page-thematique-axe/fisea>



6.3.2. La génération et la vente de crédits carbone

En plus des fonds d'investissement de finance mixte, une entreprise forestière peut également faire appel à la finance carbone pour appuyer ses projets. Deux solutions s'offrent à elle :

- Trouver une entreprise partenaire qui investit dans le projet. L'entreprise partenaire obtient alors la propriété des crédits carbone générés par le projet (en partie ou en totalité) et peut ainsi compenser ses propres émissions ;
- Vendre les crédits générés par le projet sur le marché volontaire. La limite de ce dispositif est que les crédits sont vendus une fois que le projet est mis en place ce qui ne permet pas le financement du projet en amont.

Dans ce cadre, le Tableau 42 propose différentes valeurs cibles de prix de vente minimum de crédit carbone qui devraient être fixés pour atteindre le remboursement des investissements (Capex et Opex) sur une durée de huit ans pour chacune des solutions « rentables » envisagées. Il apparaît que les prix de vente cibles sont compris entre 204 et 239 €/T, ils sont donc comparables et dans la « fourchette inférieure » des prix pratiqués sur le marché pour des crédits carbone liés au biochar (voir Tableau 9 à la section 5).


Tableau 42 - Prix minimum attendu des crédits carbone pour un retour sur investissements à 8 ans

Enterprise – Scenario - Constructeur	Capex et Opex sur 8 ans	Nombre de tonnes CO2eq séquestrées durant cette période	Prix vente CC biochar
CIB – A – Arti	9.237.062 €	40.832 T	226 €/T
CEB – A – Arti	10.625.840 €	47.872 T	222 €/T
LMR – A – Arti	34.115.493 €	167.424 T	204 €/T
Pallisco – A – Arti	8.006.229 €	33.536 T	239 €/T

Le répertoire suivant (Tableau 43 à Tableau 46) recense des partenaires ayant manifesté leur intérêt pour le rachat de crédits carbone issus de projets du secteur forestier en Afrique centrale et en Afrique de l'Ouest.



Tableau 43 - Fiche de présentation de South Pole

 South Pole	
Organisme :	Privé
Pays cible :	Monde entier
Champ d'action :	Tout projet à impact climatique positif
Type de financement possible :	South Pole peut fournir l'investissement initial nécessaire au développement d'un projet carbone. Cet investissement lui reviendra sous forme de crédits carbone.
Crédit carbone :	Les crédits sont vendus à des particuliers via le marché des crédits carbone volontaire. Southpole possède sa plateforme de vente de crédits.
Type d'organisme visé :	Aucune restriction sur les porteurs de projets visés.
Critères d'éligibilité	<p>South Pole ne travaille qu'avec les standards reconnus par une tierce partie, l'Alliance Internationale pour la Réduction et la Compensation des émissions de Carbone (ICROA). Cette alliance promeut les meilleures pratiques sur le marché volontaire du carbone. En effet, les normes de projets carbone admissibles à l'ICROA doivent garantir que les réductions d'émissions sont réelles, mesurables, permanentes, additionnelles, vérifiées de façon indépendante et uniques.</p> <p>L'ICROA accepte les normes suivantes : Mécanisme de développement propre/mise en œuvre conjointe, Climate Action Reserve, Gold Standard, Voluntary Carbon Standard (Verra), ACR et Plan Vivo. Depuis le 1^{er} mars 2023, Puro.earth est reconnu par ICROA. L'ICROA peut également utiliser des compensations provenant de programmes gouvernementaux approuvés.</p> <p>South Pole met actuellement la priorité aux projets Verra.</p> <p>En dehors de l'ICROA, South Pole met l'accent sur la documentation de l'utilisation finale du biochar. Un autre point d'attention de l'entreprise est la détermination du nombre de crédits carbone pouvant être générés, dépendant de la qualité du biochar dans le contexte de son application.</p>
Compétences :	<p>South Pole, en tant que développeur carbone, peut aider le porteur de projet à trois différents niveaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Développement de l'actif carbone : South Pole collabore avec le porteur de projet pour soutenir le développement d'une installation en tant que système de production d'actifs carbone. : - Gestion de projets d'action climatique : South Pole travaille avec des producteurs de biochar dans le cadre d'un partenariat à long terme avec l'objectif commun d'émettre continuellement des crédits. . - Financier des activités biochar : South Pole propose des services de solutions au niveau du financement. Notamment, South Pole commercialise les crédits carbone du projet à ses propres risques et prenant en charge le coûts des parties tierces. <p>South Pole souhaite mettre en place un accord de partenariat avec le porteur de projet où les deux parties s'y retrouvent, le porteur de projet en générant des crédits, et South Pole en assurant leur vente et en touchant une commission. Plus concrètement, le porteur de projet n'aurait pas de dépense pour développer, maintenir et commercialiser les crédits carbone. South Pole prendrait en charge les coûts de documentation du projet, d'audits pour la validation et vérification par un tiers indépendant, d'enregistrement du projet et d'émissions des crédits.</p>



Exemple de projets soutenus :

A ce jour, South Pole n'a encore développé aucun projet biochar mais s'est récemment engagé dans un partenariat avec Carbone Future, une plateforme de vente de crédits dit « removal » (c'est-à-dire qui sont de manière permanente supprimé de l'atmosphère, s'opposant aux projet de plantation ou de protection de la forêt possédant un une incertitude inhérente au projet). Southpole a également participé au développement de la méthodologie Verra relative "Methodology for Biochar Utilization in Soil and Non-Soil Applications". Ces initiatives témoignent des intentions de l'entreprise d'intégrer le biochar dans ses projets futurs.

Contact :

Roland Hunter : r.hunter@southpole.com



Tableau 44 - Fiche de présentation de Forliance

<h1>Forliance</h1>	
Organisme :	Privé
Pays cible :	Monde entier
Champ d'action :	Tout projet à impact climatique positif
Type de financement possible :	Forliance peut fournir l'investissement initial nécessaire au développement d'un projet carbone. Cet investissement lui reviendra sous forme de crédits carbone.
Crédit carbone :	Les crédits sont vendus à des particuliers via le marché des crédits carbones volontaire.
Type d'organisme visé :	Aucune restriction sur les porteurs de projets visés.
Critères d'éligibilité	Forliance effectue une analyse de risque. avant de décider d'investir dans un projet ou de choisir un mécanisme financier spécifique. De telles études sont souvent extrêmement complexes, avec de nombreux facteurs locaux et nationaux uniques en jeu. FORLIANCE aide à trouver et à évaluer toutes les informations pertinentes, facilitant ainsi votre prise de décision.
Compétences :	<p>A l'instar de South Pole, Forliance peut aider le porteur de projet à trois différents niveaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Développement de l'actif carbone : Forliance collabore avec le porteur de projet pour soutenir le développement d'une installation en tant que système de production d'actifs carbone. - Gestion de projets d'action climatique : Forliance travaille avec des producteurs de biochar dans le cadre d'un partenariat à long terme avec l'objectif commun d'émettre continuellement des crédits. . - Financier des activités biochar : Forliance propose des services de solutions au niveau du financement. Notamment, Forliance commercialise les crédits carbone du projet à ses propres risques et prenant en charge le coûts des parties tierces. <p>Forliance souhaite mettre en place un accord de partenariat avec le porteur de projet où les deux parties s'y retrouvent, le porteur de projet en générant des crédits, et Forliance en assurant leur vente et en touchant une commission. Plus concrètement, le porteur de projet n'aurait pas de dépense pour développer, maintenir et commercialiser les crédits carbone. Forliance prendrait en charge les coûts de documentation du projet, d'audits pour la validation et vérification par un tiers indépendant, d'enregistrement du projet et d'émissions des crédits.</p>
Exemple de projets soutenus :	Forliance n'a encore jamais développé de projet biochar mais a récemment participé au développement de la méthodologie Verra relative "Methodology for Biochar Utilization in Soil and Non-Soil Applications" avec South Pole. Cette initiative témoigne des intentions de l'entreprise d'intégrer le biochar dans ses projets futurs.
Contact :	andrea.vera@forliance.com https://forliance.com/




Tableau 45 - Fiche de présentation de ENI

ENI	
Organisme :	Privé, pétrolier
Pays cible :	Afrique (principalement) et Amérique latine
Champ d'action :	Pétrolier à la recherche de projets à impact positif sur le climat
Type de financement possible :	ENI investi de l'argent pour permettre à un porteur de projet de développer un projet générateur de crédits carbone VCS (Verra)
Crédit carbone :	Les crédits carbone sont partagés entre ENI, le porteur de projet carbone et éventuellement le pays d'accueil du projet.
Type d'organisme visé :	Aucune restriction sur les porteurs de projets visés.
Critères d'éligibilité	ENI ne finance que des projets carbone certifié ou visant la certification VCS (Verra)
Compétences :	ENI qui cherche la neutralité carbone en 2050. 95 % de l'objectif de l'ENI de parvenir à des émissions nettes nulles d'ici à 2050 sera atteint grâce à une série de solutions identifiées pour décarboniser ses activités et ses opérations. Des projets de compensation prévoient l'utilisation de NCS (Natural Climate Solution) pour compenser les 5% restants des émissions résiduelles de CO2, c'est-à-dire celles qui ne peuvent être réduites à l'aide des technologies actuelles. ENI a progressivement mis en place un solide réseau d'accords avec des promoteurs internationaux reconnus tels que BioCarbon Partners, Terra Global, Peace Parks Foundation, First Climate et Carbonsink.
Exemple de projets soutenus :	ENI a investi essentiellement dans des projets de protection de la forêt (REDD+) et de reforestation (ARR). Par exemple, le Luangwa Community Forests Project (LCFP) en Zambie : ENI a signé en 2019 un accord avec BioCarbon Partners par lequel ENI s'engage à acheter les crédits carbone générés jusqu'en 2038 et acquiert un rôle dans la gouvernance du projet. Celui-ci couvre environ 1 million d'hectares et implique plus de 200 000 bénéficiaires. C'est actuellement l'un des plus grands projets REDD+ en Afrique à avoir reçu la validation CCB "Triple Gold" pour son impact social et environnemental exceptionnel par Verra. ENI n'investissant que dans des projets Verra, il n'a pas encore financé de projet biochar. ENI a cependant déjà manifesté son intérêt depuis la sortie récente de la méthodologie "Methodology for Biochar Utilization in Soil and Non-Soil Applications".
Contact :	michael.ceruti@eni.com https://www.eni.com/en-IT/net-zero/natural-climate-solutions.html



Tableau 46 - Fiche de présentation de Total Energie

Total Energie	
 Organisme :	Privé, pétrolier
Pays cible :	Afrique (principalement) et Amérique latine
Champ d'action :	Pétrolier à la recherche de projets à impact positif sur le climat
Type de financement possible :	Total investi de l'argent pour permettre à un porteur de projet de développer un projet générateur de crédits carbone VCS (Verra)
Crédit carbone :	Les crédits carbone sont partagés entre Total, le porteur de projet carbone et éventuellement le pays d'accueil du projet.
Type d'organisme visé :	Aucune restriction sur les porteurs de projets visés.
Critères d'éligibilité	Total ne communique pas sur ses critères de sélection de projet carbone.
Compétences :	L'Ambition de Total Energies est d'atteindre la neutralité carbone pour ses émissions scope 1 & 2 d'ici 2050. Dans le cadre de son ambition climat et en complément des actions prioritaires d'évitement et de réduction de ses émissions, Total Energies collabore avec de nombreux partenaires locaux à travers le monde afin de développer et de conserver des puits naturels de carbone, tout en contribuant à la préservation de leur biodiversité.
Exemple de projets soutenus :	Total a investi essentiellement dans des projets NCS de protections de la forêt (REDD+) et dans des projets de plantation (ARR). Par exemple, le projet certifié VCS (Verra) de reboisement du plateau de Batéké (Nord Congo) où 40 millions d'arbres seront plantés en 10 ans pour séquestrer 500 000 tonnes de CO ₂ par an. Total n'a pas encore financé de projet biochar mais a manifesté son intérêt après la sortie de la méthodologie "Methodology for Biochar Utilization in Soil and Non-Soil Applications" pourrait convaincre ENI d'investir dans des projets carbone.
Contact :	Remi.duval@totalenergies.com



7. DÉBOUCHÉS DU BIOCHAR

Plusieurs débouchés s'offrent au biochar. Après une synthèse des connaissances, un focus est opéré sur son potentiel d'utilisation au sein des agrosystèmes et lien avec la fertilité des sols et l'amélioration des revenus des populations riveraines. D'autres pistes de débouchés sont ensuite évoquées avant de présenter le potentiel de contribution du biochar aux objectifs de certification FSC et PAFC.

7.1. SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES

7.1.1. Généralités

La population mondiale était estimée à 7,35 milliards en 2015 et elle devrait atteindre les 9,72 milliards d'ici 2050 [42], entraînant ainsi des pressions de plus en plus importantes sur les milieux naturels. La FAO estime que la production alimentaire devra augmenter de 70% d'ici 2050. En parallèle, les écosystèmes font face à de nombreuses problématiques dont la diminution de la fertilité des sols dû à un appauvrissement en matière organique, à un déséquilibre en nutriments, et bien entendu au dérèglement climatique mondial [44], [45].

Le continent africain est particulièrement concerné par ces enjeux. En effet, plus de la moitié des Africains seraient affectés par la dégradation de la qualité des sols et environ 42 milliards de dollars américains ainsi que 6 millions d'hectares sont perdus chaque année [46].

À l'heure actuelle, la grande majorité de la production alimentaire dépend des fertilisants synthétiques [47]. En 2010, 103 millions de tonnes d'intrants azotés étaient utilisées dans le monde [48] et la demande mondiale en engrais azoté risque d'augmenter d'environ 1,3% par an [47]. Bien que les fertilisants de synthèse ont joué un rôle essentiel dans l'amélioration de la productivité agricole durant les 50 dernières années, il semblerait que leurs efficacités aient touché à leur fin [49], [50]. En outre, il est devenu insuffisant d'utiliser uniquement des intrants synthétiques pour compenser la diminution des nutriments dans les sols subsahariens [51]. Toutefois, l'amélioration de la productivité des champs reste une priorité afin d'éviter l'expansion des surfaces agricoles au détriment des autres occupations du sol [52], [53].

Le biochar est un matériau solide obtenu par conversion thermochimique de la biomasse dans un environnement limité en oxygène. Bien que les différences ne soient pas encore universellement reconnues, le biochar ne doit pas être confondu avec le charbon de bois. En effet, ces deux matériaux diffèrent d'abord par leur utilisation. Le charbon de bois est utilisé principalement comme énergie contrairement au biochar qui est utilisé comme moyen de séquestration de carbone et de fertilisation des sols [54]. Par ailleurs, le charbon de bois est produit avec du matériel végétal pyrolysé à 400°C contre tout type de biomasse pyrolysés de 450°C à 650°C pour le biochar. Ainsi, le biochar possède une plus grande surface de contact et une porosité plus importante que le charbon de bois. Le pH du biochar se situe entre 4.6 et 9.3 contre 9 à 11 pour le charbon de bois [55].



7.1.2. Avantages du biochar pour l'action climatique

Du biochar se trouve dans les sols du monde entier à la suite d'incendies de végétation et de pratiques historiques de gestion des sols. L'étude intensive des terres sombres riches en biochar de l'Amazonie (*terra preta*) a permis de mieux apprécier les propriétés uniques du biochar en tant qu'agent d'amélioration des sols.

Le biochar peut être un outil important pour accroître la sécurité alimentaire et la diversité des terres cultivées dans les régions où les sols sont gravement appauvris, où les ressources organiques sont rares et où l'approvisionnement en eau et en engrais chimiques est inadéquat. Le biochar permet au sol de retenir le carbone, d'accroître la biodiversité du sol et décourager la déforestation. Le processus crée un charbon de bois à grain fin et très poreux qui aide les sols à retenir les nutriments et l'eau.

Le biochar améliore également la qualité et la quantité de l'eau en augmentant la rétention des nutriments et des produits agrochimiques dans le sol pour l'utilisation par les plantes et les cultures. Davantage de nutriments restent dans le sol au lieu d'être lessivés dans les eaux souterraines et de provoquer une pollution. Tous ces bienfaits sont illustrés à la Figure 38.

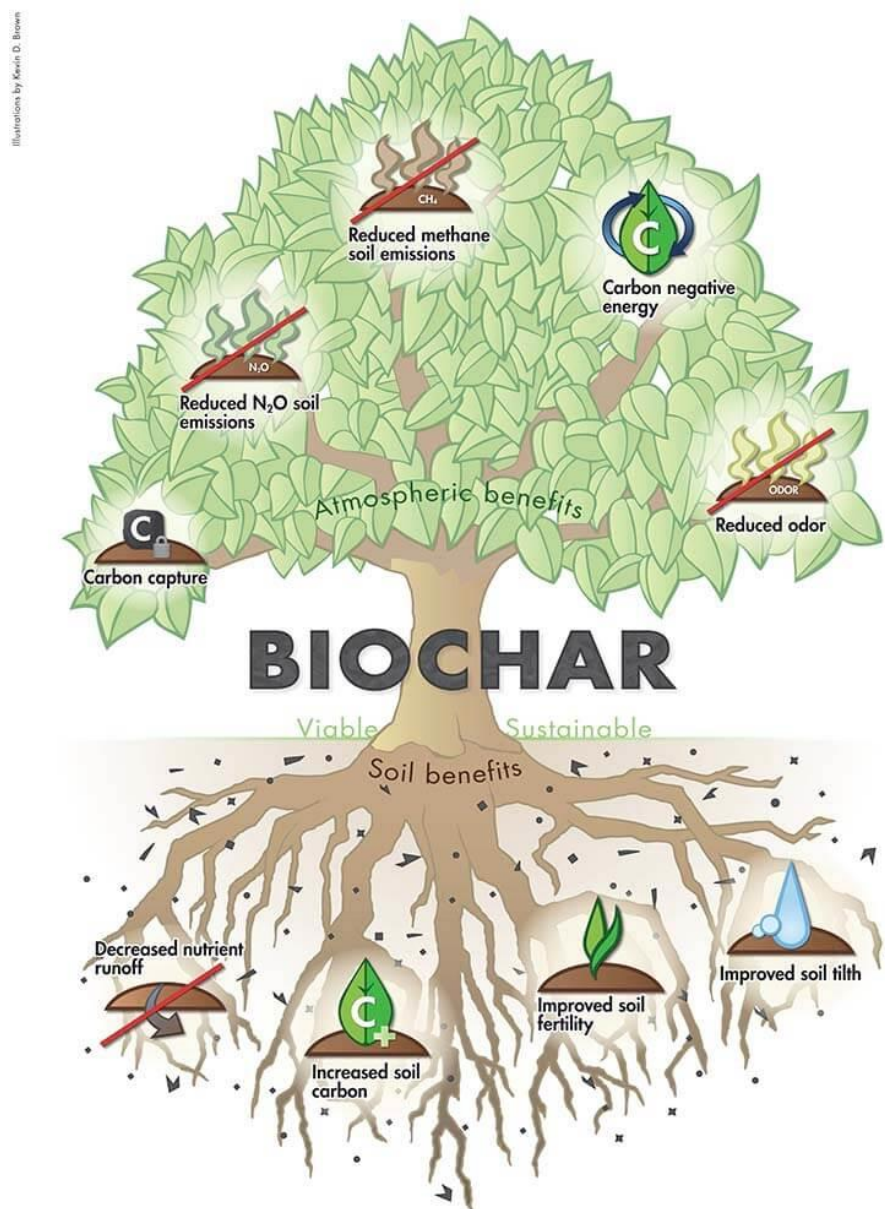


Figure 38 – Bienfaits du biochar au niveau du sol et au niveau atmosphérique



En plus d'améliorer le sol, les pratiques durables de biochar peuvent produire des sous-produits pétroliers et gazeux qui peuvent être utilisés comme carburant, fournissant ainsi une énergie propre et renouvelable. Lorsque le biochar est enfoui dans le sol pour l'améliorer, le système peut devenir « négatif en carbone ».

La coproduction de biochar et de bioénergie peut contribuer à lutter contre le changement climatique mondial en remplaçant l'utilisation de combustibles fossiles et en séquestrant le carbone dans des réservoirs de carbone stables du sol [56].

Les combustibles de biomasse ordinaires sont neutres en carbone ; le carbone capturé dans la biomasse par la photosynthèse serait finalement retourné dans l'atmosphère par le biais de processus naturels tels que la décomposition. Les systèmes durables de biochar peuvent être neutres en carbone en transformant le carbone de la biomasse en structures de carbone stables dans le biochar, qui peuvent rester séquestrées dans les sols pendant des centaines, voire des milliers d'années. Il en résulte une réduction nette du CO₂ dans l'atmosphère.

Au-delà du carbone séquestré dans le biochar lui-même, le biochar incorporé dans les sols offre également de nombreux autres avantages potentiels pour le climat [57].

1) **Fertilité des sols** : Grâce à l'augmentation de la capacité de rétention en eau et de la capacité d'échanges cationiques, la diminution du lessivage des nutriments et la modération de l'acidité des sols, le biochar améliore la fertilité des sols, stimule la croissance des plantes, qui consomment alors plus de CO₂ dans un effet de rétroaction positif. Cela permet de diminuer la pression anthropique sur les zones de forêt.

En outre, le biochar peut réduire le besoin d'engrais chimiques, ce qui entraîne une réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication des engrais.

La photo ci-dessous montre l'efficacité de l'utilisation du biochar sur le rendement agricole par rapport à une référence (sans biochar).



Figure 39 –Parcelles de maïs en agriculture de conservation, photo prise après 2 mois (4 tonnes biochar/ha, biochar localisé par pied) par rapport à une référence à Kaoma, Ouest de la Zambie (photo de Gijs Breedveld)

2) **Réduction des émissions de N₂O et de CH₄** : Le biochar peut réduire les émissions d'oxyde nitreux (N₂O) et de méthane (CH₄) - deux puissants gaz à effet de serre - provenant des sols agricoles.

3) **Amélioration de la vie microbienne du sol** : Le biochar peut accroître la vie microbienne du sol, ce qui permet de mieux stocker le carbone dans le sol.

4) **Réduction des émissions provenant des matières premières** : La conversion des déchets agricoles et forestiers en biochar permet d'éviter les émissions de CO₂ et de CH₄ générées par la décomposition naturelle ou l'incinération des déchets.

5) **Production d'énergie** : L'énergie thermique, ainsi que les bio-huiles éventuelles et les gaz de synthèse générés lors de la production de biochar, peuvent être utilisés pour remplacer l'énergie positive en carbone provenant des combustibles fossiles.



7.2. LE BIOCHAR DANS LES AGROSYSTÈMES

Par sa nature poreuse et le fait qu'il absorbe la matière organique soluble et les nutriments inorganiques [58], le biochar peut servir d'amendement efficace pour améliorer les propriétés physiques et chimiques des sols appauvris. En effet, il a été prouvé que lorsque du biochar est répandu sur un sol peu fertile, tel que les sols tropicaux, la densité apparente et la capacité de rétention d'eau du sol s'améliore [59]–[61]. Par ailleurs, les sols ayant reçu un amendement de biochar ont une haute capacité d'échange cationique (CEC), ce qui leur offre une meilleure capacité de rétention des cations et permet ainsi de mettre à disposition les nutriments nécessaires à la croissance des plantes cultivées [62]–[64]. Le biochar a la capacité d'améliorer la quantité de potassium (K), phosphore (P), zinc (Zn), calcium (Ca) et le cuivre (Cu) stocké dans le sol [65]–[67]. De même, l'ajout de biochar peut avoir des effets positifs sur le pH, sur le carbone organique, sur l'efficacité des engrais azotés et sur la toxicité de l'aluminium [65], [68], [69]. Cette amélioration du pH est particulièrement importante dans les sols acides souvent retrouvés en milieu tropical, réputés, par ailleurs, pour leur faiblesse en argile et humus, donc déficients en capacité d'échanges avec les plantes, et soumis au lessivage en profondeur des nutriments (d'où l'importance de l'agroforesterie, dans les agrosystèmes tropicaux, pour recycler en surface, les éléments nutritifs hors d'atteinte des cultures vivrières. . [70][71][65]

[68], [72], [73][74][75][65], [76], [77][63], [78][70], [79][80][65], [81]Par ailleurs, rappelons que le biochar peut jouer un rôle crucial dans la diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES) [82], [83]. En effet, le biochar pourrait aider à réduire de 1,8 Gt CO₂éq par an et un total de 130 Gt CO₂éq pour le siècle à venir [84]. Le biochar a également un effet sur les émissions de N₂O (GES 300 fois plus impactant que le CO₂) en réduisant la décomposition naturelle des matières organiques riche en azote dans les sols [47].

7.2.1. Modalité de mélange du biochar avec des engrais et application

Le biochar sert de support (fonction d'étagères) aux nutriments et d'abri aux micro-organismes. Avant de l'incorporer dans le sol, il est important de l'inoculer (par exemple avec de l'urine animale ou humaine), l'activer et le mélanger. Cela permet de remplir essentiellement les groupes fonctionnels de la surface du biochar avec des nutriments et des microbes pour initier des réactions de surface.

Préparation du biochar

Lorsqu'il est appliqué au sol, l'inoculation préalable du biochar est essentielle pour minimiser son potentiel d'immobilisation des nutriments qui ne seraient plus disponibles pour les plantes. Le remplissage des pores du biochar avec des nutriments, des engrais ou des substrats microbiologiquement actifs minimise ainsi la perte potentielle de rendement et améliore l'efficacité et le potentiel d'impacts positifs du biochar [85]. Le mélange du biochar avec du fumier, du compost ou d'autres amendements peut également améliorer l'efficacité de ces amendements [86]. De nombreuses sources différentes peuvent être utilisées pour inoculer le biochar, à savoir le compost, fumier, thé de compost, engrais, urine, inoculant microbien. Le choix d'une source dépend de la disponibilité, de l'échelle et des pratiques des agriculteurs en matière de fertilité.. Davantage d'informations à ce sujet sont disponibles dans le rapport sur la « *Sécurité alimentaire des bases vie et des populations riveraines des concessions forestières FSC – Etude de cas : Rougier Mokabi* » [87].

Le temps nécessaire à l'activation avant l'utilisation varie ; 1 à 3 semaines sont recommandées [88].

Les avantages de la charge des biochars ont conduit au développement d'engrais à base de biochars qui tirent parti de la possibilité de produire des biochars adaptés à des besoins spécifiques. Pour charger le biochar en nutriments, ils utilisent différentes méthodes de pré ou post-pyrolyse [89].



Fréquence des applications et quantités

Il n'y a pas de réponse unique quant à la quantité de biochar à appliquer. Les taux d'application sont spécifiques au site et doivent être déterminés pour corriger ou améliorer une contrainte de production ou un problème de ressources. Les sols varient en fonction de leurs déficiences et de leurs besoins, et les taux d'application sont déterminés au cas par cas pour répondre à un problème spécifique.

Comme le biochar résiste à la décomposition dans le sol, une seule application peut avoir des effets bénéfiques pendant de nombreuses saisons de croissance. Des taux d'application sur le terrain jusqu'à 8 t/ha montrent des effets positifs. Ainsi, le biochar n'a généralement pas besoin d'être appliqué annuellement, comme les fumiers, les composts, les engrais synthétiques et autres amendements.

Cependant, des applications répétées ou progressives peuvent être effectuées avec les pratiques de gestion actuelles (par exemple, l'application d'engrais ou de compost). Si l'on considère l'économie, la logistique ou la mécanisation dans les systèmes de semis direct, de plus petites quantités de biochar peuvent être appliquées plus fréquemment (0,5-2 t/ha) [85]. L'une des contreparties est que les modifications des propriétés du sol peuvent prendre plus de temps à se manifester.

L'application de biochar au moment de la plantation, directement dans la rangée de plantation, garantit l'incorporation dans le profil du sol et dans la zone racinaire. Pour les plantations existantes, des applications répétées en surface peuvent être effectuées dans les rangs ou entre les rangs, bien qu'il soit préférable de mélanger le biochar avec du compost ou de l'engrais pour réduire le risque de perte [90].

En cas de trous pour la plantation d'arbres, une application de 5 à 25 % en volume de biochar permet de maintenir une bonne performance des plantes [91].

Pour toutes ces applications, le concessionnaire forestier pourrait, une nouvelle fois, apporter un service logistique, notamment grâce à un épandeur d'engrais à buse (Figure 40).



Figure 40 – Epandeur à buse



7.2.2. Calcul du rayon d'utilisation

Le biochar, contenant un stock carbone pouvant être exprimé en équivalent CO₂, peut être utilisé dans le sol (ou autres applications hors sol) afin de garantir son stockage sur du long terme. Entre le lieu de production et le lieu d'utilisation, le biochar est transporté sur une certaine distance par véhicule. Ce dernier émet du CO₂. Le rayon d'application du biochar au sein duquel l'impact CO₂ du biochar est positif peut donc être calculé.

La méthodologie de l'outil CDM 12 propose deux options, l'une par un monitoring de la consommation réelle du véhicule de transport et l'autre, se basant sur une valeur de facteur d'émission conservatrice prise par défaut (129 gCO₂ /t km pour les véhicules lourds) [92].

A. Monitoring

Cette méthode nécessite le suivi de la consommation du véhicule de transport ainsi que de la distance parcourue. La quantité de gasoil est multipliée par un coefficient d'émission CO₂ [93].

Pour un transport de biochar uniquement, d'une charge de 6 tonnes et en considérant un facteur de conversion de la tonne de biochar vers la tonne de CO₂ de 2, la teneur CO₂ éq totale transportée est connue et vaut 12 tonnes. En prenant en compte un coefficient d'émission de 2,67 kgCO₂ par litre de gasoil pour l'exemple [94] et une consommation du véhicule de 70 litres aux 100 km (approche très conservatrice), la distance annulant l'impact positif du CO₂ du biochar transporté s'obtient grâce à l'équation suivante :

$$Distance\ AR\ [km] = \frac{12\ [tCO_2] / \frac{2,67}{1.000} \left[\frac{tCO_2}{l} \right]}{0,70 \left[\frac{l}{km} \right]} = 6.420\ km$$

La distance AR est la distance aller-retour parcourue par le véhicule. Le rayon d'utilisation du biochar s'obtient en divisant la distance AR par deux, soit 3.210 km.

B. Valeur conservatrice par défaut

L'émission CO₂ liée au transport du biochar (E_{TrCO₂}) est calculée par la formule suivante :

$$E_{TrCO_2} = Distance\ AR\ [km] \times Masse\ totale\ transportée\ [t] \times facteur\ d'émission\ \left[\frac{gCO_2}{t\ km} \right] \times 10^{-6}$$

La distance AR est la distance aller-retour parcourue par le véhicule. Il est considéré que le véhicule revient à vide. La masse totale transportée correspond à la cargaison complète, même si une partie de la cargaison n'est pas du biochar.

En considérant un facteur de conversion de la tonne de biochar vers la tonne de CO₂ de 2 et connaissant la quantité de biochar transportée, la teneur CO₂ éq totale transportée est connue. La distance annulant cette valeur divisée par deux donne le rayon d'utilisation du biochar.

Par exemple, pour un transport de biochar uniquement, d'une charge de 6 tonnes, la teneur en carbone correspondante est de 12 tonnes de CO₂eq. L'équation présentée ci-dessous devient :

$$Distance\ AR\ [km] = 12 / 6\ [t] / 129 \left[\frac{gCO_2}{t\ km} \right] / 10^{-6} = 15.504\ km$$

Le rayon d'utilisation de ces 6 tonnes de biochar est donc de 7.752 km.

Les différences obtenues montrent l'influence importante de la consommation du véhicule considérée ou du facteur d'émission CO₂. Dans les deux cas, la distance à parcourir pour annuler le stock carbone du biochar est extrêmement élevée. Le transport du biochar appliqué de façon locale n'aura que très peu d'incidence sur le puits carbone.

7.2.3. Bénéficiaires potentiels

Les bénéficiaires potentiels sont de plusieurs types. D'une part, les agriculteur locaux, vivant dans et à proximité directe des concessions forestières qui peuvent représenter une surface d'application importante particulièrement sur les sites avoisinant des zones fortement peuplées et au sein desquelles la forêt est soumise à une importante pression de l'agriculture sur brûlis. Plusieurs projets nationaux ou initiatives locales visent déjà à utiliser des engrais naturels (fientes de poulet, gadoues, composts) dans l'agriculture dans lesquels pourrait donc être incorporé directement le biochar. Cette catégorie de bénéficiaire doit être prioritaire pour une inclusion du projet dans la marque Fair & Precious portée par les différents partenaires.

D'autre part, les plantations industrielles (palmiers à huile de Olam, 80.000 ha d'eucalyptus par GSEZ...), les grands projet carbone de plantation (agro)forestières (Projet Total Energie sur les plateaux Batékés, Projet Eucalyptus à Pointe Noire...) ou les zones d'agriculture intensive (Ouest du Cameroun) pourraient également représenter de bénéficiaires particulièrement intéressés par les bienfaits du biochar. Les différents échanges avec les parties prenantes soulignent néanmoins que les bénéficiaires ont au préalable besoin d'être convaincus des avantages du biochar et qu'il faudra s'assurer que le coût d'achat restera abordable pour susciter l'intérêt et rendre possible la mise en œuvre.

7.2.4. Perspectives de développement

Dans le cadre de sa politique RSE, l'entreprise forestière pourrait, comme action locale de soutien aux populations riveraines, céder gratuitement son biochar et apporter un support logistique pour son utilisation dans les agro-systèmes vivriers. Ce support logistique peut comporter différents niveaux : (i) amener le biochar dans les zones agricoles, (ii) accompagner les populations au niveau des modalités de mélange avec le substrat, (iii) application du biochar dans le sol de façon mécanisée, avec l'aide d'un épandeur à buse, sur les champs ou un suivi pour l'application manuelle, etc.

Une simulation de l'effet du rendement engendré par l'utilisation du biochar en surfaces agricoles sur les revenus a été réalisée sur la base des données (surfaces agricoles rurales, nombre de ménages agricoles) à disposition pour la CIB, CEB et Pallisco (Tableau 47). Les données concernant la CIB sont issues du rapport socio-économique de l'UFA Mimbéli-Ibenga (2017 – 2018) [95]. Pour la CEB, les données proviennent du plan d'aménagement de la CFAD (2004) et des données de *Demographic and Health Survey Program* [96], [97]. Les données concernant Pallisco sont issues du rapport SECODEV [98].

Tableau 47 - Données disponibles sur les surfaces agricoles à Pallisco, à la CIB et à la CEB et nombre de ménages agricoles

Entreprise	Surface Rurale [ha]	Nombre de ménages agricoles
CIB	9.314	4.368
CEB	335	670
Pallisco	3.473	3.172



Deux cultures ont été prises en compte: la plantation de manioc et la plantation de cacao à partir de données rapportées et trouvées dans la littérature. Pour le cacao, les données relatives au prix au kilo et au rendement sont issues principalement du rapport SECODEV [98] pour la République du Congo, du projet Cacao AFD/Pallisco pour le Cameroun, alors que les données pour le Gabon proviennent d'estimations réalisées sur bases d'informations reçues de la Caisse de Stabilisation et de Péréquation (CAISTAB). Pour la manioc, une valeur conservatrice unique pour tous les pays a été retenue sur la base de plusieurs références [99]–[102]

Les Tableau 48 et Tableau 49 comparent les revenus estimés par ménage agricole avec ou sans application de biochar pour la culture de manioc et de cacao sur la totalité de la surface agricole (sole)rurale des concessions. Dans une démarche conservatrice, l'accroissement de rendement du biochar le plus faible trouvé dans la littérature a été utilisé, à savoir 20% [80]. Il est pour cela estimé que l'intégration du biochar se fasse sans frais pour le planteur.

Tableau 48 - Prix et rendement du manioc par pays (République du Congo – CIB, Gabon – CEB et Cameroun – Pallisco) avec et sans utilisation de biochar

Entreprise	Prix au kilo [FCFA/kg]	Manioc sans biochar [99]–[102]		Manioc avec biochar	
		Rendement annuel par hectare [t/ha.an]	Revenus par ménage agricole [x1000 FCFA/an]	Rendement annuel par hectare [t/ha.an]	Revenus par ménage agricole [x 1000 FCFA/an]
CIB	130	14,7	4.075,2	17,64	4.890,3
CEB	130	14,7	955,5	17,64	1.146,6
Pallisco	130	14,7	2.092,3	17,64	2.510,8

Tableau 49 - Prix et rendement du cacao et du manioc par pays (République du Congo – CIB, Gabon – CEB et Cameroun – Pallisco) avec utilisation de biochar

Entreprise	Prix au kilo [FCFA/kg]	Cacao sans biochar [98]		Cacao avec biochar	
		Rendement annuel par hectare [t/ha.an]	Revenus par ménage agricole [x1000 FCFA/an]	Rendement annuel par hectare [t/ha.an]	Revenus par ménage agricole [x1000 FCFA/an]
CIB	600	0,75	959,6	0,9	1.151,5
CEB	1.000	0,3	150	0,36	180
Pallisco	850	0,5	465,3	0,6	558,4

Le tableau 50 compare le revenu additionnel total généré grâce à l'utilisation du biochar sur les soles agricoles des villages riverains, aux contributions obligatoires des trois concessionnaires, au fonds de développement local (FDL) abondé par les entreprises forestières.

Au niveau de la CEB, disposant d'une faible surface agricole dans ses villages riverains, les revenus additionnels pour les plantations de manioc et de cacao correspondent respectivement à 70% et 10% des contributions au FDL. Mais, pour la CIB et Pallisco, disposant de surface agricoles beaucoup plus importantes, l'impact sur les revenus est sans commune mesure, puisque la mise à disposition gratuite du biochar aux riverains, pourrait multiplier les revenus des ruraux, par au moins 100 fois, ce qu'ils reçoivent du FDD.

Tableau 50 – Comparaison du FDL et du revenu additionnel grâce à l'utilisation de biochar

Entreprise	Manioc		Cacao
	FDL [x1000 FCFA/an]	Revenu additionnel grâce au biochar [x1000 FCFA/an]	Revenu additionnel grâce au biochar [x1000 FCFA/an]
CIB	26.000	3.559.811	838.260
CEB	184.000	128.037	20.100
Pallisco	20.000	1.327.381	295.205

En l'absence de données spécifiques concernant la quantité de biochar maximale à appliquer par hectare dans les sols tropicaux, la valeur de 8 tonnes/ha/an¹⁹ et la valeur cumulée maximale de 20 tonnes/ha au total²⁰ ont été considérées. Les tests agronomiques d'utilisation du biochar n'ayant que très peu d'années de recul, cette valeur maximale n'est pas assortie d'une valeur temporelle au terme de laquelle une quantité additionnelle pourrait être intégrée. Le Tableau 51 indique, en fonction de la surface actuelle des zones agricoles riveraines, la proportion pouvant être amendée annuellement à la valeur maximale cumulée et le nombre d'années nécessaires pour couvrir l'ensemble de la sole agricole à l'apport maxima (de 20 T/ha) pour les solutions les plus rentables du scénario A.

Tableau 51 – Nombre d'années de production de biochar pouvant être absorbé sur les surfaces agricoles rurales pour les solutions de pyrolyse rentables

Entreprise	Solution	Qté de biochar produite annuelle (T)	Surf. Agricole (Ha)	% de la sole disponible amendée annuellement	Temps nécessaire pour couvrir l'ensemble de la superficie agricole (an)
CIB	Scénario A – Arti	3.190	9.314	1,7%	58
CEB	Scénario A – Arti	3.740	335	50%	2
Pallisco	Scénario A - Arti	2.620	3.473	3,7%	27

Pour les sociétés CIB et Pallisco, les surfaces agricoles disponibles sont largement suffisantes pour accepter le biochar produit pendant plusieurs dizaines d'années. Pour CEB, un débouché alternatif devra être trouvé à partir de la deuxième année si l'on veut pouvoir continuer à générer des crédits carbone.

GSEZ n'a fourni aucune donnée quant aux surfaces agricoles présentes autour de la ville de Lambaréné. Cependant, au vu des quantités de biochar produites, il faudrait trouver annuellement environ 1.500ha pour absorber la production.

Au niveau de l'impact climatique, en complément de sa capacité de séquestration du carbone, l'utilisation du biochar dans les agrosystèmes pourrait exercer une influence non négligeable sur la dynamique du brûlis de forêt et un ralentissement de la dégradation des massifs forestiers par les fronts agricoles. En considérant une augmentation de 20% de la productivité des parcelles, on peut supposer que ce ratio peut également s'appliquer à la surface de forêts non brûlées. Le Tableau 52 quantifie ces surfaces forestières « épargnées » par concession.

¹⁹ Valeur recommandée par CSI

²⁰ Valeur recommandée par le CRA-W

Tableau 52 – Estimation des surfaces non brûlées en conséquence de l’amélioration de la fertilité des sols par application du biochar

Entreprise	CIB	CEB	Pallisco
Surface non brûlée annuellement (ha)	290 ha	20 ha	190 ha

Cela pourrait déclencher chez la KfW, la prise de conscience que les concessionnaires devraient assurer un rôle majeur, dans l’augmentation de la fertilité de paysannats riverains de leurs concessions, et ainsi protéger la filière bois, contributrice à 6 % environ du PIB des pays du Bassin du Congo. On pourrait alors espérer plaider pour un PPECF IV élargi à la zone riveraine des concessions et travailler sur des isolats agro-forestiers qui montreraient la voie d’une meilleure sécurité alimentaire, face au défi d’un doublement démographique des populations, dans les trente ans qui viennent.



7.3. AUTRES DÉBOUCHÉS

Comme précédemment mentionnés, le biochar peut également être utilisé dans d'autres applications telles que :

- L'enfouissement dans des carrières de latérite, qui permettrait de séquestrer du carbone et de générer des crédits carbone, ce qui engendrerait un avantage direct pour les entreprises forestières, mais sans co-bénéfice pour la fertilité .
- Au Gabon, une autre piste est envisageable. En effet, la COMILOG, société minière, est intéressée par l'utilisation de charbon de bois en substitut du coke. Ce dernier est importé et génère davantage de CO₂ que le charbon. Cette substitution du coke par du charbon de bois permettrait à la COMILOG de générer des crédits carbone. Elle serait donc intéressée à utiliser du biochar produit localement. Il est à souligner ici que le biochar vendu dans ce cas serait brûlé et n'engendrerait pas de crédits carbone pour la compagnie forestière produisant le biochar²¹.

²¹ Le coke a un PCS de 31 MJ/kg [107], le charbon de bois a un PCS de 28-32 MJ/kg [108] et le biochar a un PCS de 27-35 MJ/kg [109], [110].

7.4. CONTRIBUTION DU BIOCHAR AUX OBJECTIFS DES CERTIFICATIONS FSC ET PAFC

7.4.1. FSC

Les principes de la certification FSC sont les règles ou éléments essentiels d'une gestion forestière appropriée sur le plan environnemental, bénéfique sur le plan social et économiquement viable et sont repris dans un document listant différents critères [104]. Les principes auxquels le biochar contribue sont repris ci-dessous.

Principe 2 : Droits des travailleurs et conditions de travail

L'organisation certifiée doit respecter les conventions fondamentales de l'Organisation Internationale du Travail (OIT) et préserver ou accroître le bien-être social et économique des travailleurs.

L'implémentation d'une unité de production de biochar n'entache pas l'inclusivité mais au contraire, l'encourage (critère 2.2.). De plus, l'ensemble des règles RSE seront d'application (critères 2.3. à 2.6.).

Principe 4 : Relations avec les communautés

Les opérations de gestion forestière doivent maintenir ou améliorer le bien-être social et économique, à long terme des communautés locales.

Le bien-être des populations locales peut être amélioré par l'application du biochar dans leurs cultures vivrières et de rente. D'abord par une augmentation de la production (meilleur rendement) grâce à une amélioration des paramètres bio-physico-chimiques du sol et donc réduire les besoins en surface agricole. Par ailleurs, cette production de biochar, pourrait renforcer les relations entre les populations locales et la société forestière qui pourraient proposer un appui logistique à son emploi (transports, épandages, monitoring par drone des cultures amendées, etc.) (critères 4.3. et 4.4). Dans l'optique d'une certification carbone, il est nécessaire de pouvoir prouver l'enfouissement du biochar dans les champs. L'entreprise devra donc accompagner les villageois ou l'enfouir elle-même. Cependant, cette méthode pourrait être plus coûteuse.

Principe 5 : Bénéfices générés par la forêt

Les opérations de gestion forestière doivent encourager l'utilisation efficace des multiples produits et services de la forêt pour en garantir la viabilité économique ainsi qu'une large variété de services environnementaux et sociaux.

Le biochar est produit à partir de la valorisation de déchets bois issus des scieries. Dès lors, la production de biochar est un bénéfice indirect généré par la forêt permettant d'augmenter la rentabilité de l'utilisation des ressources. Comme déjà mentionné, la valorisation étant locale, elle renforce le critère 5.4. de ce principe.



Principe 6 : Valeurs et impacts environnementaux

La gestion forestière doit maintenir la diversité biologique et les valeurs et services écosystémiques qui y sont associés (ressources hydriques, sols, paysage, espèces et habitats patrimoniaux, etc.)

Une perspective d'utilisation du biochar pourrait être son enfouissement dans les carrières de la société forestière de manière à réenrichir le sol et alors permettre une meilleure régénération de la forêt mais également de renforcer l'accroissement la résilience économique et environnementale du paysage (critère 6.8.).

Dans une perspective d'utilisation du biochar dans les champs des communautés locales, une preuve de l'application du biochar dans le sol doit pouvoir être fournie.

De plus, la source d'approvisionnement de bois utilisés pour la production de biochar doit être durable et certifiée (standards EBC et Puro.earth). Même si le bois n'est pas initialement coupé pour la production de biochar, cette traçabilité assure alors une meilleure connaissance du réel impact environnemental engendré, et pourrait également renforcer la volonté d'une entreprise à être certifiée FSC.

Principe 10 : Mise en œuvre des activités de gestion

Les valeurs environnementales et sociales de la forêt sont protégées lors des prélèvements de bois ou d'autres produits forestiers, des travaux (plantations, lutte contre les espèces envahissantes, création de routes, etc.) ou de l'utilisation d'intrants (engrais, pesticides réglementés). L'organisation certifiée n'utilise par ailleurs aucun OGM.

L'enfouissement du biochar dans le sol des concessions permet de rétablir/régénérer le couvert végétal (critère 10.1).

7.4.2. PAFC

La certification panafricaine PAFC du bassin du Congo est une initiative régionale pour la certification de gestion durable de la forêt dans le Bassin du Congo qui promeut également la traçabilité du bois de la forêt jusqu'au produit final. Le schéma de certification est basé sur les critères et exigences internationales du PEFC, adapté au contexte local. Le biochar contribue aux principes décrits ci-dessous, tirés des exigences du document de Gestion durable des forêts relatif aux pays du Bassin du Congo [105].

Principe 6 : L'organisation exerce ses activités forestières de manière durable au sein de l'UGF.

Le critère 6.3 stipule que les activités d'exploitation forestière garantissent une production durable des produits forestiers exploités. Plus précisément, l'organisation optimise l'utilisation des produits qu'elle exploite et démontre qu'elle cherche à améliorer ses performances économiques en tenant compte des possibilités de nouveaux marchés et de nouvelles activités économiques en rapport avec tous les biens et services forestiers pertinents.

Principe 7 : L'organisation exerce ses activités de manière à minimiser ses impacts sur la biodiversité et sur les fonctions de protection de la forêt

Le biochar permet de contribuer à l'objectif de l'organisation devant mettre en œuvre des mesures spécifiques visant à diminuer les impacts directs et indirects de ses activités sur l'environnement (critère 7.2), car il constitue une mesure d'atténuation, d'évitement ou de compensation et est produit grâce à la mise en place d'un système de traitement des déchets produits.

Un projet de production de biochar permet donc à l'organisation de minimiser les impacts négatifs sur les stocks de carbone forestiers et les émissions de GES sur l'ensemble de ses activités dans le domaine d'application du système de gestion forestière durable (SGFD).

Principe 8 : L'organisation contribue à l'amélioration des conditions de vie des communautés locales et des peuples autochtones impactés

L'utilisation du biochar, au sein des communautés locales, permet à l'organisation d'atteindre l'objectif d'établissement et de respect des mesures spécifiques en faveur de l'amélioration du bien-être économique et social des peuples autochtones et les communautés locales impactés (critère 8.2). Plus précisément, l'organisation doit contribuer au développement local en accompagnant des initiatives de développement local et/ou micro-projets générateurs de revenus.



8. CONCLUSIONS

La présente étude confirme l'intérêt de la production de biochar à partir des connexes de scierie en Afrique centrale. Outre son intérêt majeur pour augmenter la fertilité des sols tropicaux, les économies possibles en carburant et les revenus liés à la vente de crédits carbone permettent d'obtenir des rentabilités acceptables, sans compter l'apport complémentaire aux politiques RSE des entreprises forestières.

Tant au niveau technique que financier, il semble que les solutions du constructeur Arti proposent les meilleurs VAN et TRI, mais ne sont rentables sans certification carbone qu'au Gabon en regard des économies liées au coût particulièrement élevé du gazoil dans ce pays. Le moindre coût du carburant au Cameroun et au Congo limite les « économies » et une certification carbone est indispensable pour permettre d'obtenir un rendement positif des investissements.

En termes de certification carbone, il semble que les certifications biochar garantissent les meilleurs revenus, comparées à la certification CDM qui n'apporte aucune réelle plus-value au regard des coûts et du prix de vente fixé. Le choix d'une certification biochar est également difficile à orienter en dehors de l'aspect financier. En effet, chaque schéma se vaut en termes de contraintes et de complexités. Il est important de noter que les certifications VERRA et EBC disposent de cout/revenus similaires avec un très léger avantage pour EBC. Puro.earth, présentant des frais plus importants, permet néanmoins au porteur de projet de définir son prix de vente mais également d'obtenir potentiellement un cash-flow issu de la génération de pre-CORC. Également, si EBC et Puro.earth exigent que la biomasse soit issue d'une gestion durable, Verra n'est pas aussi restrictif et permettrait donc à un plus large panel d'opérateurs de se certifier sur ce schéma. Verra dispose également d'une importante reconnaissance internationale, mais avec une exposition plus forte aux détracteurs de la finance climat. Le choix doit ainsi dépendre de chaque contexte et de la stratégie développée par les entreprises en lien également avec les exigences des potentiels investisseurs intéressés par le rachat de ces crédits.

Il est important de rappeler que ces analyses financières sont basées sur des valeurs valables au moment de la rédaction du présent rapport couplées à de nombreuses hypothèses et de paramètres ajustables dans la feuille de calcul fournie en parallèle à ce document. Néanmoins, l'ensemble des simulations financières réalisées l'ont été sur base de valeurs conservatives. Il serait dès lors plus qu'intéressant pour les sociétés forestières partenaires d'actualiser progressivement ces valeurs en fonction de leurs objectifs de développement et en vue de la mobilisation potentielle d'investisseurs externes qui pourraient se rembourser au travers de la finance carbone.

Du point de vue des agrosystèmes, les simulations effectuées plaident clairement pour une utilisation large du biochar en périphérie des concessions forestières en regards de l'impact important qu'il peut avoir, tant sur la productivité des champs et la sédentarisation des cultures (au travers la mise en place d'une gestion verticale de la fertilité des champs agricoles), que sur les revenus additionnels qui seraient générés pour les populations locales. La production de biochar par les entreprises forestières propose donc une évolution du modèle économique des sociétés forestières qui pourraient progressivement renforcer leur position de moteur de développement économique via un renforcement de l'agriculture dans leur zone d'influence tout en protégeant leurs ressources forestières et la filière bois, contributrice à 6 % environ du PIB des pays du bassin du Congo.

Les investissements restent cependant très importants et pourraient constituer un frein au développement de ce type de projet. La mise en relation des entreprises avec des fonds d'investissements et des partenaires privés, qui pourraient investir dans la technologie en contrepartie des crédits carbone générés, restent dans le contexte actuel la solution la plus réaliste.



9. BIBLIOGRAPHIE

- [1] “Les principes de la pyrolyse et gazéification – Ademe.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/passer-a-laction/valorisation-energetique/dossier/pyrolyse-gazeification/principes-pyrolyse-gazeification>
- [2] “The European Biochar Industry Consortium – We are fostering long-term success of biochar.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.biochar-industry.com/>
- [3] “Cycle ORC.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <http://www.recuperation-chaleur.fr/cycle-orc>
- [4] “Cours en ligne et simulateur de thermodynamique appliquée.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: https://dirensmines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/module_BasesThermo.html
- [5] “La Gazéification : Principes.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.gazeification.info/>
- [6] “Pouvoir calorifique : définition, calcul & différence entre PCI et PCS.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://selectra.info/energie/guides/comprendre/pouvoir-calorifique>
- [7] “Le bois énergie : définition, usages et chiffres clés.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/bois-energie>
- [8] “Plaquettes (bois déchiqueté) | FEBHEL.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.febhel.be/fr/filiere-bois-energie/combustibles-maitrises-et-certifies/plaquettes-bois-dechiquete>
- [9] “Plaquettes forestières - Bois de France.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://preferezlesboisdefrance.fr/produit-service/plaquette-forestiere/>
- [10] “COPEAUX : Définition de COPEAUX.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.cnrtl.fr/lexicographie/copeaux>
- [11] “REFERENTIEL COMBUSTIBLE BOIS ENERGIE : LES PLAQUETTES FORESTIERES DEFINITION ET EXIGENCES”, Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <http://www.ademe.fr>
- [12] “Sense Engineering - Home.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <http://www.sense-eng.be/en/>
- [13] “Pouvoir calorifique : définition, calcul & différence entre PCI et PCS.” Accessed: Aug. 02, 2023. [Online]. Available: <https://selectra.info/energie/guides/comprendre/pouvoir-calorifique>
- [14] “Les coefficients de conversion pour l’enquête sciage, rabotage et imprégnation du bois”.
- [15] “Water - Heat of Vaporization vs. Temperature.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d_1573.html
- [16] “Stantards-compensation_MTE”.
- [17] “Version_en_10_3_v2 | Enhanced Reader.”
- [18] “Positive list of permissible biomasses for the production of biochar”.
- [19] “EBC Producer.” Accessed: Aug. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.european-biochar.org/en/companies>
- [20] “Methods | Puro.earth.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://puro.earth/carbon-removal-methods/>



- [21] “ICROA endorses puro.earth and SOCIALCARBON standards | ICROA.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://icroa.org/icroa-endorses-puro-earth-and-socialcarbon-standards/>
- [22] “CERTIFICATION PROGRAM - International Biochar Initiative.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://biochar-international.org/standard-certification-training/certification-program/>
- [23] “EBC and WBC guidelines & documents.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-guidelines-documents>
- [24] S. Schimmelpfennig and B. Glaser, “One Step Forward toward Characterization: Some Important Material Properties to Distinguish Biochars,” *J Environ Qual*, vol. 41, no. 4, pp. 1001–1013, Jul. 2012, doi: 10.2134/jeq2011.0146.
- [25] “Supplier verification | Puro.earth.” Accessed: Aug. 03, 2023. [Online]. Available: <https://puro.earth/supplier-verification/#puro-methods-verified-by>
- [26] “Kita.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.kita.earth/>
- [27] “CORC Supplier Listing.” Accessed: Aug. 02, 2023. [Online]. Available: <https://puro.earth/CORC-co2-removal-certificate/page-3/>
- [28] “Validation and Verification - Verra.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://verra.org/validation-verification/>
- [29] “ABOUT VERRA”.
- [30] “Verra Search Page.” Accessed: Aug. 14, 2023. [Online]. Available: <https://registry.verra.org/app/search/VCS>
- [31] “CDM: Designated National Authorities (DNA).” Accessed: Aug. 23, 2023. [Online]. Available: <https://cdm.unfccc.int/DNA/index.html>
- [32] “CDM METHODOLOGY BOOKLET CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM United Nations Framework Convention on Climate Change,” 2022.
- [33] Unfccc, “CDM-Executive Board Annex 29 GUIDELINES ON THE REGISTRATION FEE SCHEDULE FOR PROPOSED PROJECT ACTIVITIES UNDER THE CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM (Version 02)”.
- [34] “PROJECT DESCRIPTION BASELINES METHODOLOGY AND ASSESSMENT OF ADDITIONALITY Developing the Project Design Document”.
- [35] “Macroeconomic projections.” Accessed: Aug. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.ecb.europa.eu/pub/projections/html/index.en.html>
- [36] “Enhanced Reader.”
- [37] “Enhanced Reader.”
- [38] “Emissions de polluants liées à la consommation énergétique - Energie Plus Le Site.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: https://energieplus-lesite.be/theories/consommation-energetique/les-emissions-de-polluants-liee-a-la-consommation-energetique/#Emissions_de_CO2
- [39] “CDM Cost.” Accessed: Aug. 01, 2023. [Online]. Available: <https://rema.gov.rw/dna/index.php?id=192#:~:text=Clean%20Development%20Mechanism%20Costs&text=The%20costs%20can%20be%20approximately,upfront%20by%20the%20project%20developer.>
- [40] “Euribor rates - all information on Euribor.” Accessed: Aug. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.euribor-rates.eu/en/>



- [41] “Calcul de la Valeur Actuelle Nette (VAN) : Définition, utilité.” Accessed: Aug. 04, 2023. [Online]. Available: [https://www.l-expert-comptable.com/a/6272-calcul-de-la-valeur-actuelle-nette-van-definition-utilite.html#:~:text=La%20valeur%20actuelle%20nette%20\(VAN\)%20est%20un%20indicateur%20financier%20qui,%C3%AAtre%20actualis%C3%A9s%20%C3%A0%20un%20taux.](https://www.l-expert-comptable.com/a/6272-calcul-de-la-valeur-actuelle-nette-van-definition-utilite.html#:~:text=La%20valeur%20actuelle%20nette%20(VAN)%20est%20un%20indicateur%20financier%20qui,%C3%AAtre%20actualis%C3%A9s%20%C3%A0%20un%20taux.)
- [42] UN, “World Population Prospects The 2015 Revision,” 2015.
- [43] FAO, “How to Feed the World in 2050,” 2009.
- [44] Pender, “The World Food Crisis, Land Degradation, and Sustainable Land Management: Linkages, Opportunities, and Constraints Food Crisis&Land,” 2009. [Online]. Available: www.worldbank.org
- [45] P. A. Sanchez, “Soil Fertility and Hunger in Africa,” 2002.
- [46] A. Bationo, O. Isaac Lungu, and M. Naimi, “Responsabilite Sociale des Entreprises View project Africa Soil Information Service View project Action for Integrated Rural Development,” 2006. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/40106705>
- [47] A. G. Jenberu, “Biochar, Compost and Biochar-Compost: Effects on crop Performance, Soil Quality and Greenhouse Gas Emissions in Tropical Agricultural Soils,” 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/328027292>
- [48] M. Zaman *et al.*, “Emissions of Nitrous Oxide (N₂O) and Di-Nitrogen (N₂) from the Agricultural Landscapes, Sources, Sinks, and Factors Affecting N₂O and N₂ Ratios,” in *Greenhouse Gases - Emission, Measurement and Management*, InTech, 2012. doi: 10.5772/32781.
- [49] P. Gruhn, F. Goletti, and M. Yudelman, *Governing the GM crop revolution : policy choices for developing countries*. International Food Policy Research Institute, 2000.
- [50] P. Rosset, “Lessons from the Green Revolution Do We Need New Technology to End Hunger?,” 2000.
- [51] Drechsel, “Soil Nutrient Depletion and Population Growth in Sub-Saharan Africa A Malthusian Nexus,” 2001.
- [52] C. J. Barrow, “Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture,” *Applied Geography*, vol. 34, pp. 21–28, 2012, doi: 10.1016/j.apgeog.2011.09.008.
- [53] X. Luo *et al.*, “Use of biochar-compost to improve properties and productivity of the degraded coastal soil in the Yellow River Delta, China,” *J Soils Sediments*, vol. 17, no. 3, pp. 780–789, Mar. 2016, doi: 10.1007/s11368-016-1361-1.
- [54] S. Jirka and T. Tomlinson, “State of the Biochar Industry 2014 A Survey of Commercial Activity in the Biochar Sector A report by the International Biochar Initiative (IBI) Copyright and Disclaimer,” 2014.
- [55] “Biochar vs Charcoal: 6 Key Differences You Should Know About – Rosy Soil.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://rosysoil.com/blogs/news/biochar-vs-charcoal>
- [56] “About Biochar - International Biochar Initiative.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://biochar-international.org/about-biochar/>
- [57] “SUSTAINABILITY & CLIMATE CHANGE - International Biochar Initiative.” Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://biochar-international.org/about-biochar/sustainability-climate-change/>
- [58] J. E. Thies and M. C. Rillig, “Characteristics of biochar: biological properties,” 2009. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/284041311>



- [59] S. Abel, A. Peters, S. Trinks, H. Schonsky, M. Facklam, and G. Wessolek, "Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil," *Geoderma*, vol. 202–203, pp. 183–191, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.geoderma.2013.03.003.
- [60] M. C. Andrenelli *et al.*, "Field application of pelletized biochar: Short term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil," *Agric Water Manag*, vol. 163, pp. 190–196, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.agwat.2015.09.017.
- [61] M. O. Omondi, X. Xia, A. Nahayo, X. Liu, P. K. Korai, and G. Pan, "Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data," *Geoderma*, vol. 274, pp. 28–34, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.geoderma.2016.03.029.
- [62] Y. Ding *et al.*, "Biochar to improve soil fertility. A review," *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 36, no. 2. Springer-Verlag France, Jun. 01, 2016. doi: 10.1007/s13593-016-0372-z.
- [63] B. Glaser, J. Lehmann, and W. Zech, "Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - A review," *Biology and Fertility of Soils*, vol. 35, no. 4. pp. 219–230, 2002. doi: 10.1007/s00374-002-0466-4.
- [64] D. Laird, P. Fleming, B. Wang, R. Horton, and D. Karlen, "Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil," *Geoderma*, vol. 158, no. 3–4, pp. 436–442, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.geoderma.2010.05.012.
- [65] J. Lehmann, J. Pereira da Silva Jr, C. Steiner, T. Nehls, W. Zech, and B. Glaser, "Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments," 2003.
- [66] C. Steiner *et al.*, "Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil," *Plant Soil*, vol. 291, no. 1–2, pp. 275–290, Feb. 2007, doi: 10.1007/s11104-007-9193-9.
- [67] X. Zhao, J. W. Wang, H. J. Xu, C. J. Zhou, S. Q. Wang, and G. X. Xing, "Effects of crop-straw biochar on crop growth and soil fertility over a wheat-millet rotation in soils of China," *Soil Use Manag*, vol. 30, no. 3, pp. 311–319, 2014, doi: 10.1111/sum.12124.
- [68] K. Y. Chan, L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph, "Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment," *Australian Journal of Soil Research*, vol. 45, no. 8, pp. 629–634, 2007, doi: 10.1071/SR07109.
- [69] S. P. R. Hewage, "Effect of charred digestate (biochar) and digestate on soil organic carbon and nutrients in temperate bioenergy crop production systems," 2016.
- [70] J. Lehmann, M. C. Rillig, J. Thies, C. A. Masiello, W. C. Hockaday, and D. Crowley, "Biochar effects on soil biota - A review," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 43, no. 9. pp. 1812–1836, Sep. 2011. doi: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022.
- [71] Giller, "Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems," 2001. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/40159031>
- [72] M. Yamato, Y. Okimori, I. F. Wibowo, S. Anshori, and M. Ogawa, "Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia," *Soil Sci Plant Nutr*, vol. 52, no. 4, pp. 489–495, Aug. 2006, doi: 10.1111/j.1747-0765.2006.00065.x.
- [73] P. Blackwell *et al.*, "Influences of Biochar and Biochar-Mineral Complex on Mycorrhizal Colonisation and Nutrition of Wheat and Sorghum," *Pedosphere*, vol. 25, no. 5, pp. 686–695, Oct. 2015, doi: 10.1016/S1002-0160(15)30049-7.



- [74] J. L. Deenik, T. McClellan, G. Uehara, M. J. Antal, and S. Campbell, "Charcoal Volatile Matter Content Influences Plant Growth and Soil Nitrogen Transformations," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 74, no. 4, pp. 1259–1270, Jul. 2010, doi: 10.2136/sssaj2009.0115.
- [75] S. Jeffery *et al.*, "Biochar boosts tropical but not temperate crop yields," *Environmental Research Letters*, vol. 12, no. 5. Institute of Physics Publishing, Apr. 25, 2017. doi: 10.1088/1748-9326/aa67bd.
- [76] S. Abiven, A. Hund, V. Martinsen, and G. Cornelissen, "Biochar amendment increases maize root surface areas and branching: a shovelomics study in Zambia," *Plant Soil*, vol. 395, no. 1–2, pp. 45–55, Oct. 2015, doi: 10.1007/s11104-015-2533-2.
- [77] J. W. Gaskin *et al.*, "Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield," *Agron J*, vol. 102, no. 2, pp. 623–633, Mar. 2010, doi: 10.2134/agronj2009.0083.
- [78] L. Qian, B. Chen, and D. Hu, "Effective alleviation of aluminum phytotoxicity by manure-derived biochar," *Environ Sci Technol*, vol. 47, no. 6, pp. 2737–2745, Mar. 2013, doi: 10.1021/es3047872.
- [79] J. Wang, Z. Xiong, and Y. Kuzyakov, "Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects," *GCB Bioenergy*, vol. 8, no. 3. Blackwell Publishing Ltd, pp. 512–523, May 01, 2016. doi: 10.1111/gcbb.12266.
- [80] J. Lehmann and M. Rondon, "Bio-Char Soil Management on Highly Weathered Soils in the Humid Tropics," 2006, pp. 517–529. doi: 10.1201/9781420017113.ch36.
- [81] G. C. Sigua, J. M. Novak, D. W. Watts, A. A. Szögi, and P. D. Shumaker, "Impact of switchgrass biochars with supplemental nitrogen on carbon-nitrogen mineralization in highly weathered Coastal Plain Ultisols," *Chemosphere*, vol. 145, pp. 135–141, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.11.063.
- [82] M. L. Cayuela, L. van Zwieten, B. P. Singh, S. Jeffery, A. Roig, and M. A. Sánchez-Monedero, "Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis," *Agric Ecosyst Environ*, vol. 191, pp. 5–16, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.agee.2013.10.009.
- [83] S. Shackley *et al.*, "AN ASSESSMENT OF THE BENEFITS AND ISSUES ASSOCIATED WITH THE APPLICATION OF BIOCHAR TO SOIL A report commissioned by the United Kingdom Department for Environment, Food and Rural Affairs, and Department of Energy and Climate Change," 2010.
- [84] D. Woolf, J. E. Amonette, F. A. Street-Perrott, J. Lehmann, and S. Joseph, "Sustainable biochar to mitigate global climate change," *Nat Commun*, vol. 1, no. 5, 2010, doi: 10.1038/ncomms1053.
- [85] H. P. Schmidt *et al.*, "Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses," *GCB Bioenergy*, vol. 13, no. 11, pp. 1708–1730, Nov. 2021, doi: 10.1111/GCBB.12889.
- [86] J. Major, "Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems," 2010.
- [87] egisbdpa, "SECURITE ALIMENTAIRE DES BASES DE VIE ET DES POPULATIONS RIVERAINES DES CONCESSIONS FORESTIERES FSC ETUDE DE CAS : ROUGIER MOKABI," 2014.
- [88] "Biochar Crop Application Guidelines | US Biochar Initiative." Accessed: Aug. 03, 2023. [Online]. Available: <https://biochar-us.org/biochar-crop-application-guidelines>
- [89] L. C. A. Melo, J. Lehmann, J. S. da S. Carneiro, and M. Camps-Arbestain, "Biochar-based fertilizer effects on crop productivity: a meta-analysis," *Plant Soil*, vol. 472, no. 1–2, pp. 45–58, Mar. 2022, doi: 10.1007/S11104-021-05276-2/METRICS.



- [90] L. Genesio, F. Miglietta, S. Baronti, and F. P. Vaccari, "Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: Results from a four years field experiment in Tuscany," *Agric Ecosyst Environ*, vol. 201, pp. 20–25, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.AGEE.2014.11.021.
- [91] S. Allaire and S. F. Lange, "HORTICULTURAL SUBSTRATES CONTAINING BIOCHAR PERFORMANCE AND ECONOMY Pharmacology of the tetracyclines View project Greenhouse gases View project Suzanne E Allaire GECA Environnement," 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.24054.80968.
- [92] "Methodological tool Project and leakage emissions from transportation of freight".
- [93] "Methodological tool 'Tool to calculate project or leakage CO 2 emissions from fossil fuel combustion'".
- [94] "Quel est le taux d'émissions de CO2 de votre voiture ?" Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.hellocarbo.com/blog/calculer/co2-voiture/>
- [95] CIB-Olam, "Etude socioéconomique de l'UFA Mimbéli-Ibenga Etude socioéconomique de l'UFA Mimbéli-Ibenga HISTORIQUE DU DOCUMENT," 2017.
- [96] "République Gabonaise Union-Travail-Justice Enquête Démographique et de Santé Gabon 2000 Juin 2001 Ministère de la Planification, de la Programmation du Développement et de l'Aménagement du Territoire Direction Générale de la Statistique et des Études Économiques Fonds des Nations Unies pour la Population ORC Macro", Accessed: Aug. 02, 2023. [Online]. Available: <http://www.measuredhs.com/>
- [97] J. N. B. Obame and M. A. Busamba, "CARACTÉRISTIQUES DES MÉNAGES ET DES ENQUÊTÉ".
- [98] R. Heymans, J. Philippart, J. Laporte, H. Havrez -Gembloux, A.-B. Tech, and B. Haurez, "PROJET SECODEV Valorisation des Services ECOSystémiques pour le DÉveloppement des populations riveraines des concessions certifiées." [Online]. Available: www.eticwood.com
- [99] "Comment les pluies font grimper le prix du manioc au Cameroun." Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.camerounweb.com/CameroonHomePage/business/Comment-les-pluies-font-grimper-le-prix-du-manioc-au-Cameroun-444150>
- [100] "Agripo." Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.agripo.net/shop/1/>
- [101] "Racines et Tubercules (Manioc, Igname, Pomme de Terre et Papate Douce) Adiel Mbabu, CIP Les résultats, conclusions et recommandations exprimés dans ce document sont proposés pour la discussion et ne reflètent pas nécessairement le point de vue de la Banque africaine de développement".
- [102] "Evolution des prix par spéculation." Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://atico-propac.org/b2b/site/prix>
- [103] H. Maljaee, R. Madadi, H. Paiva, L. Tarelho, and V. M. Ferreira, "Incorporation of biochar in cementitious materials: A roadmap of biochar selection," *Constr Build Mater*, vol. 283, p. 122757, May 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122757.
- [104] "FSC-STD-01-001 V5-2 FSC principles and criteria (P&C) for forest stewardship | FSC Connect." Accessed: Jul. 31, 2023. [Online]. Available: <https://connect.fsc.org/current-processes/fsc-std-01-001-v5-2-fsc-principles-and-criteria-pc-forest-stewardship>
- [105] "Gestion durable des forêts-Exigences", Accessed: Aug. 16, 2023. [Online]. Available: <https://pafc-certification.org/pafc-bassin->
- [106] "Registration and Issuance Process ABOUT VERRA".
- [107] "The Engineering ToolBox. Fuels - Higher and Lower Calorific Values."



- [108] A. Mencarelli, R. Cavalli, and R. Greco, “Variability on the energy properties of charcoal and charcoal briquettes for barbecue,” 2022.
- [109] K. M. Jiang, C. G. Cheng, M. Ran, Y. G. Lu, and Q. L. Wu, “Preparation of a biochar with a high calorific value from chestnut shells,” *New Carbon Materials*, vol. 33, no. 2, pp. 183–187, Apr. 2018, doi: 10.1016/S1872-5805(18)60333-6.
- [110] Lange SF., Allaire SE., Charles A., I. Auclair, and Bajzak CE., “Propriétés physicochimiques de 43 biochars,” 2018.



10. ANNEXES

ANNEXE 1 : PRÉSENTATION DES CONSTRUCTEURS DE PYROLYSEURS

Les différents constructeurs de pyrolyseurs sont présentés succinctement ci-dessous. Pour chacun, une illustration/photo/schéma de l'installation a été fourni à titre purement informatif. Un tableau de synthèse comparant les caractéristiques des différents modèles de chaque marque est également présenté.

Pyreg

[Pyreg](#) est une société allemande ayant conçu un procédé de pyrolyse autothermique ([Our Technology - PYREG GmbH](#)). Deux modèles sont actuellement proposés, le PX500 (770 t biomasse/an) et le modèle PX1500 (2.280 t biomasse/an), environ trois fois plus gros illustré ci-dessous. Ces modèles fonctionnent avec deux vis d'approvisionnement fonctionnant en parallèle. Selon les informations obtenus, Pyreg serait en train de développer un nouveau modèle, le PX6000 de taille quatre fois supérieure au PX1500 et prévu sur le marché en 2024.



Photographie du modèle PX1500 sur un site à Bâle en Suisse (crédit image : Pyreg)



Pyrocore

La société belgo-britannique, [Pyrocore](#) a développé un modèle unique de pyrolyseur, le Phoenix, illustré ci-dessous, pouvant traiter jusqu'à 3.750 tonnes de biomasse par an. À la différence de Pyreg, il n'y a ici qu'un réacteur composé d'une seule vis. Cela permettrait un ratio production biochar/consommation d'énergie intéressant.

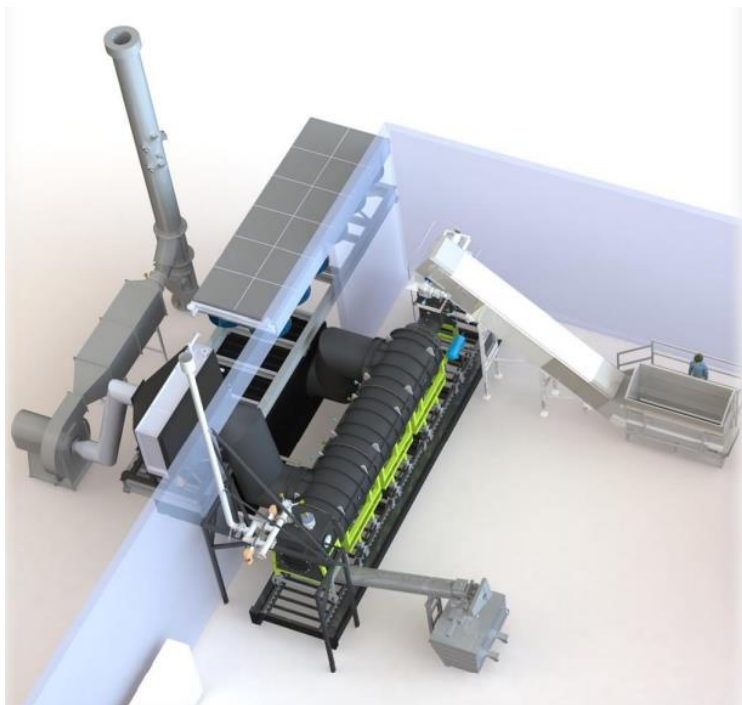


Schéma de l'unité de pyrolyse Pyrocore

Beston

[Beston](#) est une entreprise chinoise bien implantée sur le marché mondial proposant quatre modèles de pyrolyseurs allant de 2.250 tonnes/an à 37.500 tonnes/an en entrée. Le BST-50 constituant le plus grand modèle est illustré ci-dessous.

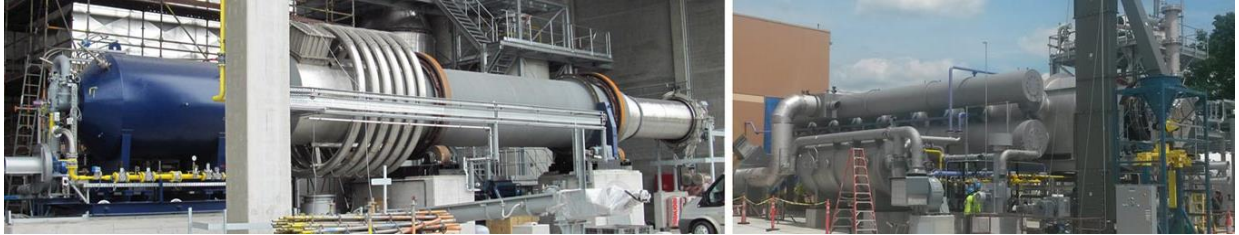


Photographie du modèle Beston BST-50.



3R Systems

[3R Systems](#) est une entreprise allemande qui propose des modules de pyrolyse pouvant traiter de la matière avec un taux d'humidité de 40%. Leurs modules offrent une large gamme de quantité de biomasse à valoriser, allant de ~8.000 tonnes de biomasse par an à maximum 96.000 t/an. Quelques photos de leurs installations sont disponibles en ligne et proposées ci-dessous.



Photos d'unités de pyrolyse 3R system

Arti

[Arti](#), société américaine, propose une technologie de pyrolyse avec un design modulaire. À chaque module, appelé « train », correspond un réacteur de pyrolyse illustré ci-dessous. Le nombre de modules peut aller de 1 à 5 par conteneur. Les séchoirs permettant de réduire l'humidité jusqu'à 20-30%, sont inclus dans le design.



Illustration d'un réacteur Arti

Pour se démarquer de ses concurrents, Arti propose à ses clients de tester la biomasse à pyrolyser dans leur centre (situé en Iowa - USA) sur un échantillon de 5 kg afin d'examiner l'humidité de la biomasse en entrée et de quantifier en laboratoire le ratio NPK, la teneur en carbone organique et le ratio molaire H/C_{org} du biochar obtenu. Des tests à grande échelle (plusieurs m^3) sont également proposés (voire préconisés) pour valider les premiers résultats obtenus

Tableau comparatif des constructeurs d'unités de pyrolyse

	Pyreg			Pyrocore	Beston			3R Systems			Arti				
	PX500	PX1500	PX6000	Phoenix	BST-10	BST-30	BST-50	module 8000-B	module échelle interm.	module grande échelle	1 train	2 trains	3 trains	4 trains	5 trains
Débit max biomasse humide [T/an]	770	2.280	9.120	3.750	6.000	18.000	30.000	8.000	48.000	96.000	2.240	4.480	6.720	8.960	11.200
Humidité maximale matière entrante	20%	20%	20%	30%	15%	15%	15%	40%	40%	40%	20%	20%	20%	20%	20%
Prod. biochar [T/an]	150	450	1.790	600	1.425	4.275	7.125	1.600	9.600	19.200	380	755	1.135	1.515	1.890
Capacité thermique maximale [kW]	170	600	2.400	1.800	/	/	/	950	5.700	11.400	640	1.280	1.920	2.560	3.200
Heures opération annuelles	7.500	7.500	7.500	7.500	6.000	6.000	6.000	7.500	7.500	7.500	6.720	6.720	6.720	6.720	6.720
Puissance électrique maximale [kW]	12	40	120	65	48	62	119	50	300	600	27	39	50	61	71
Granulométrie matière entrante	G30 (15% max < 3 mm)	G30 (15% max < 3 mm)	G30 (15% max < 3 mm)	G15 à G50	G2-G20	G2-G20	G2-G20	25-45, <60 mm	25-45, <60 mm	25-45, <60 mm	G25	G25	G25	G25	G25
Séchoir inclus	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Pas nécessaire	Pas nécessaire	Pas nécessaire	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

ANNEXE 2 : PRÉSENTATION DES CONSTRUCTEURS DE PYROGAZÉFICATEURS

Energy&+

[Energy&+](#) est un constructeur français qui a déjà mené un projet de mise en place d'un pyrogazéificateur (Figure 41) à Yangambi, en République Démocratique du Congo.



Figure 41 – Photographie des modules de pyrogazéification installés à Yangambi (crédit image : Energy&+)

Cette installation de cogénération favorise la production d'énergie plutôt que de biochar. Le design d'Energy&+ se présente sous forme de modules pouvant s'additionner. Cette spécificité présente l'avantage de pouvoir adapter au mieux le dimensionnement en fonction de la disponibilité en déchets bois du site.

Le module 300 kW, d'une capacité de 1.800 tonnes de biomasse par an permet la production d'électricité (puissance électrique de 300 kW_{el}) et la production de puissance thermique (525 kW_{th}).

Syncraft

[Syncraft](#) est un constructeur autrichien qui propose plusieurs modèles de pyrogazéification, présent sur le marché européen. Les trois modèles principaux de Syncraft permettent de traiter une large gamme de quantité de biomasse, de 2.000 à 5.000 tonnes annuellement. Les modèles peuvent également s'additionner pour s'adapter au mieux aux besoins du projet. Les installations Syncraft favorisent la production d'énergie, le biochar représente un co-produit.



Projet de 4 modèles CW1800x2-1000 à Frauenfeld en Suisse (crédit image : Syncraft)



Tableau comparatif des constructeurs d'unités de pyrogazéification

	Syncraft			Energy&+
	CW1200-400	CW1800-500	CW1800x2-1000	Module 300 kW
Débit max biomasse humide [T/an]	2.000	2.560	5.100	1.800
Humidité maximale matière entrante	10	10	10	10
Prod. biochar sec [T/an]	290	365	1.015	80
Capacité thermique maximale [kW]	570	740	1.400	525
Heures opération annuelles	7.500	7.500	7.500	7.500
Puissance électrique maximale [kW]	40	50	100	7,5
Granulométrie matière entrante	G50 (max. 20 m% < 8 mm)	G50 (max. 20 m% < 8 mm)	G50 (max. 20 m% < 8 mm)	P45S
Séchoir inclus	Oui	Oui	Oui	Oui

ANNEXE 3 : COMPARATIF DES CONSTRUCTEURS DE BROyeurs

Constructeur	Modèle	Mode	Moteur	Moteur principal [kW]	Diamètre max bois entrant [mm]	Capacité broyeur [m3 plaquettes/h]	Taille plaquettes [mm]	Vitesse châssis mobile [km/h]	Chutes éboutage
China Foma	BX218D	Fixe	Électrique	132	160	38	15	NA	OK
	BX2110	Fixe	Électrique	220	210	75	30	NA	OK
Van Laecke - Jenz	BA615E	Fixe / mobile	Électrique	132	600	120	50	6	OK
	BA615D	Mobile	Diesel	225	600	90	50	80	OK
	HE561	Fixe	Électrique	160	420	150	30,50 ou 100	NA	Pas OK
Zhangsheng	ZSGS-216	Fixe	Électrique	55	200	19,5	30	NA	OK
	ZSGS-218	Fixe	Électrique	110	300	33	30	NA	OK
Vecotrade	tbd	Fixe	Électrique	90	220	30	25	NA	OK
Komptech	Axtor 4510	Mobile	Diesel	340	500	170	25-40	2	Pas OK
Morbark	1821R	Mobile	Diesel	121	/	/	/	/	Pas OK
	1922R	Mobile	Diesel	/	/	/	/	/	Pas OK
Ropa -Albach	Diamant 2000	Mobile	Diesel	515	/	380	10-40	70	Pas OK

ANNEXE 4 : CALENDRIER DE LA MISSION

Date	Jour	Activités
31-10-22	Lundi	Arrivée Brazzaville à 19h15
01-11-22	Mardi	Rencontre Guy Roulette (Terea) et Eric Forny (CIRAD) ;
02-11-22	Mercredi	Transport vers le site de Pokola de la CIB ;
03-11-22	Jeudi	Rencontre de Vincent Istace, responsable RSE ; visite de l'installation de cogénération avec Teddy Milandou. Rencontre de Denis Dechenaud, directeur production forêt et visite des charbonniers locaux.
04-11-22	Vendredi	Rencontre de Pierre Etoa et de Maurice Obambi du Parsa (cacao) à Ouessou
05-11-22	Samedi	Rencontre de Laurent Duffard, responsable industries et visite du site.
06-11-22	Dimanche	Compilation et analyse des données ; préparation/débriefing des rencontres
07-11-22	Lundi	Départ vers Brazzaville
08-11-22	Mardi	Rencontre de Michel Gally (FRM) et Marcia Kibendo du Parsa (maraîchage)
09-11-22	Mercredi	Vol à 14h, arrivée Libreville à 16h
10-11-22	Jeudi	Kick-off meeting avec Sylvie Boldrini, responsable environnement et durabilité et Danièle Remanda, la responsable des projets carbone. Rencontre avec Quentin Meunier (OLAM) ;
11-11-22	Vendredi	Déplacement Libreville - Lambaréné ; Rencontre de Philippe Moussavou, responsable du site d'Ikolo. Rencontre de Yane de la "Clé des Champs" et de deux agriculteurs ;
12-11-22	Samedi	Visite du site de Lambaréné et retour Libreville ;
13-11-22	Dimanche	Compilation et analyse des données ; préparation/débriefing des rencontres
14-11-22	Lundi	Visite du site de Nkok; Rencontre de Ajay Jangid, directeur des opérations et de la maintenance.
15-11-22	Mardi	Rencontre de Safi Virginus, direction générale COMILOG ; Rencontre Eric Chezeaux, directeur RSE et certifications chez Rougier ;
16-11-22	Mercredi	Vol à 10h, arrivée Franceville à 11h30. Arrivée sur site dans l'après-midi. Rencontre d'Etienne Lacroix, directeur de site et de David Zakamdi, directeur gestion durable ;
17-11-22	Jeudi	Rencontre de Yanique Tchantchou, directeur technique industrie et de Luis Teixeira, directeur technique atelier. Rencontre du responsable cartographie et aménagement, Ghislain Mvong. Rencontre du responsable des programmes sociaux.
18-11-22	Vendredi	Visite des scieries okoumé et azobé/bois divers avec Benjamin Nke Ekomi et Nicolas Goni, les directeurs de scieries respectifs.

Date	Jour	Activités
19-11-22	Samedi	Réunion avec David Zakamdi et visite parc, carrières et déchets forêts avec Nicolas Zürcher, responsable exploitation.
20-11-22	Dimanche	Compilation et analyse des données ; préparation/débriefing des rencontres
21-11-22	Lundi	Compilation et analyse des données. Vol à 17h. Retour Libreville.
22-11-22	Mardi	Réunion avec Frédéric Ober, CEO, Fabian Leu, CTO et Markus Pfannkuch, CSO de Precious Woods et David Zakamdi ; Lunch avec Sylvie Boldrini, Danièle Remanda et Hiren Bhagat, spécialiste climat et durabilité ; Rencontre de Charlie Gillot, directeur général de la Gabonaise de Chimie.
23-11-22	Mercredi	Rencontre Alfred Ngomanda, Commissaire général du Cenarest. Aéroport vol à 14h45 ; Arrivée Aéroport de Yaoundé à 16h ;
24-11-22	Jeudi	Rencontre avec Richard Fétéké; Rencontre avec Romain Lorent; Départ Yaoundé vers site Pallisco;
25-11-22	Vendredi	Rencontre de Clément Mondragon, responsable maintenance et construction. Visite de la scierie avec Laurent Cossart
26-11-22	Samedi	Visite du parc de rupture avec le responsable HSE, compilation des données.
27-11-22	Dimanche	Compilation et analyse des données ; préparation/débriefing des rencontres ;
28-11-22	Lundi	Rencontre avec André Enyengue, responsable cartographie et aménagement ; Visite du projet Cacao (Kongo) ;
29-11-22	Mardi	Rencontre d'Elvis Njiasse Njimbouem, responsable aménagement social ; Déplacement vers Yaoundé ; Rencontre de Didier Bastin, Conseiller technique senior pour les projets forêt et environnement à la GIZ ;
30-11-22	Mercredi	Rencontre de Honorable Mathurin, président de la SEFECCAM et de Arnaud Tchokomeni, directeur des aménagements et de la certification de la SEFECCAM et de Gilles Ananfack et Pascal Kamnga, producteurs de biochar.
01-12-22	Jeudi	Rencontre d'Emmanuel Bon, directeur général d'Alpicam et de Samuele Vitali, responsable production ; Aéroport (vol à 23h45) ;

ANNEXE 5 : QUESTIONNAIRE DE COLLECTE DE DONNÉES

1. Informations générales		
Règlement du projet		
1.1	Le projet dispose-t-il d'un plan de gestion (environnementale, intégrée (sociale, biodiversité et forestière), communautaire, déchets, incendies et situations d'urgence) ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
1.2	Le projet est-il conforme à tous les programmes et règlements nécessaires ? (Législation et ambition nationales) Sélectionnez toutes les options applicables et fournissez la documentation disponible	<input type="checkbox"/> Programme de santé et de sécurité pour la protection des employés contre les polluants atmosphériques et autres dangers. <input type="checkbox"/> Conformité des installations de production de charbon bio avec toutes les lois et réglementations relatives à la qualité de l'air et à l'environnement qui peuvent s'appliquer dans la juridiction nationale ou infranationale. <input type="checkbox"/> Preuve de l'inclusion d'une documentation et/ou d'informations démontrant la conformité avec toutes les réglementations environnementales et légales applicables <input type="checkbox"/> Autres : _____
1.3	Quels sont les seuils d'émissions locaux, nationaux ou internationaux ?	
2. Informations spécifiques aux matières premières		
2.1.1	Utilisez-vous des matières premières homogènes plutôt qu'un mélange des types de matières premières indiqués ci-dessous ? (Oui si matériau homogène)	
2.1.2	Quelle est la distance envisagée pour le transport de la biomasse jusqu'au site de production ? [km]	
2.1.3	Nombre et types d'essence commercialisées	
2.1.4	Volume bois entrant [m3]	
2.1.5	Volume bois sortant [m3]	
2.1.6	Taux d'humidité [%]	



2.1.7	Rendement [%]	
2.1.8	Prévisions de l'exploitation et stratégie à long terme de l'entreprise (diversification des activités, etc.)	
Caractérisation des déchets		
2.2.1	Volume déchets par types [m3]	<input type="checkbox"/> Sciures <input type="checkbox"/> Délignures <input type="checkbox"/> Eboutages <input type="checkbox"/> Autres : _____
2.2.2	Volume déchets disponibles par types pour pyrolyse [m3]	<input type="checkbox"/> Sciures <input type="checkbox"/> Délignures <input type="checkbox"/> Eboutages <input type="checkbox"/> Autres : _____
Si les matières premières éligibles utilisées pour la production de biochar incluent la sylviculture et d'autres transformations du bois.		
2.2.1	Les matières premières éligibles sont-elles conformes aux critères de durabilité, le cas échéant ? Veuillez préciser	<p>Critères de durabilité : Disponibilité de plans de gestion durable approuvés par une autorité nationale ou régionale compétente ; ou système de certification forestière.</p> <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <p>Lorsque le bois transformé est utilisé comme matière première pour l'application au sol, il ne doit pas contenir de résidus de peinture, de solvants ou d'autres contaminants, y compris toute impureté potentiellement toxique pour des raisons de santé et de sécurité.</p> <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
3. Informations spécifiques à la production de biochar		



3.1	Espace disponible par type d'activité ?	<input type="checkbox"/> broyage <input type="checkbox"/> criblage <input type="checkbox"/> stockage <input type="checkbox"/> machine de pyrolyse <input type="checkbox"/> Autres: _____	
3.2	La teneur en carbone organique du biochar peut-elle être analysée régulièrement en laboratoire, conformément aux directives de l'IBI ou de l'EBC sur la production de biochar ?		
3.3	Quelle quantité d'énergie est utilisée pour faire fonctionner l'installation de production (c'est-à-dire pour le broyage des matériaux, l'initialisation et le fonctionnement de la pyrolyse) par an ?	Type d'énergie principale : <input type="checkbox"/> Électricité de réseau <input type="checkbox"/> Gaz <input type="checkbox"/> Diesel Quantité d'énergie utilisée : _____	
4. Utilisation du biochar			
4.1	Identification d'autres producteurs de biochar ou acteurs de la finance carbone		
4.2	Quelle est l'application finale du biochar produit ? Veuillez préciser toutes les options applicables		
4.3	Quelle est la distance moyenne de transport du produit final de biochar jusqu'au site d'application ?		km
4.4	Activités sociales menées en périphérie et à l'intérieur de la concession forestière (rencontre des responsables sociaux et villageois où des activités à caractère agricole ou agroforestier sont menées)		
4.5	Quantité de biochar qui serait utilisée [Tonnes]		
5. Demande actuelle et future d'énergie			
5.1	Consommation électrique		
5.2	Consommation gaz		
5.3	Consommation essence		
5.4	Puissance des groupes électrogènes [W]		
6. Coûts opérationnels			



6.1	Main d'œuvre (superviseur, ouvrier)	
6.2	Frais de traitement des déchets bois	
6.3	Coûts transport	
6.4	Consommation en carburant d'un bull (à l'heure)	
6.6	Hangar pour pyrolyseur et stockage biochar (coût au m ²)	
6.7	Coût terrassement, bétonnage (au m ²)	
7. Aménagement et logistique		
7.1	Logistique de transport interne (sur site) et externe (transport de la matière finie), certains transports se font à vide ?	
7.2	Plan du site et éventuels projets d'aménagement ou d'extension	
7.3	Disponibilité eau pour refroidissement du biochar	



EticWood



ANNEXE 6 : EXIGENCES ADDITIONNELLES ET MODALITÉS DE CALCUL DES CRÉDITS CARBONE DES DIFFÉRENTES CERTIFICATION

Le Certificat Européen de Biochar (EBC)

Propriétés des différents types de biochar

EBC - Classe de certification		EBC - FeedPlus	EBC - Feed	EBC - AgroOrganic	EBC-Agro	EBC-Urban	EBC - ConsumerMaterials	EBC-BasicMaterial
Analyse élémentaire		Déclaration de Ctot, Corg, H, N, O, S, cendre						
	H/ Corg	< 0,4		< 0,7				
Paramètres physiques		Teneur en eau, matière sèche (telle que reçue et à une taille de particule < 3 mm), densité apparente, Capacité de Rétention en eau, pH, teneur en sel, conductivité électrique du biochar solide.						
ATG		Doit être présenté pour le premier lot de production d'une unité de pyrolyse						
Nutriments		Déclaration de N, P, K, Mg, Ca, Fe						
Métaux lourds	Pb	10 g/t (88%MS)	10 g/t (88%MS)	45 g/t MS	120 g/t MS	120 g/t MS	120 g/t MS	déclaration, pas de valeurs limites pour la certification
	Cd	0,8 g/t (88%MS)	0,8 g/t (88%MS)	0,7 g/t MS	1,5 g/t MS	1,5 g/t MS	1,5 g/t MS	
	Cu	70 g/t MS	70 g/t MS	70 g/t MS	100 g/t MS	100 g/t MS	100 g/t MS	
	Ni	25 g/t MS	25 g/t MS	25 g/t MS	50 g/t MS	50 g/t MS	50 g/t MS	
	Hg	0,1 g/t (88%MS)	0,1 g/t (88%MS)	0,4 g/t MS	1 g/t MS	1 g/t MS	1 g/t MS	
	Zn	200 g/t MS	200 g/t MS	200 g/t MS	400 g/t MS	400 g/t MS	400 g/t MS	
	Cr	70 g/t MS	70 g/t MS	70 g/t MS	90 g/t MS	90 g/t MS	90 g/t MS	
	As	2 g/t MS	2 g/t MS	13 g/t MS	13 g/t MS	13 g/t MS	13 g/t MS	
Contaminants organiques	16 EPA PAH	6 ± 2.4 g /t MS	CSI -déclaration	6 ± 2.4 g /t MS	6 ± 2.4 g /t MS	CSI -déclaration		
	8 EFSA PAH					1 g/t MS	4 g/t MS	
	benzo[e]pyrene benzo[j]fluoranthene	< 1,0 g /t MS pour chacune des deux substances						
	PCB, PCDD/F	Voir chapitre 10		Une fois par unité de pyrolyse pour le premier lot de production. Pour les PCB : 0,2 mg kg MS, pour les PCDD/F : 20 ng/kg (I-TEQ OMS), respectivement				

Exigences additionnelles EBC

1. Une documentation complète des biomasses traitées et des additifs doit être conservée et archivée pendant au moins cinq ans.
2. La production journalière de biochar doit être documentée.
3. Fonctionnement de la production de biochar par lots :
 - Le producteur de biochar crée un lot en enregistrant le projet sur le site EBC. Le lot reçoit un ID et un QR code uniques.
 - Une production dure au max 365 jours en incluant toute interruption possible de la production.
 - Durant la production, la température de pyrolyse (en °C) ne doit pas varier de plus de **20%**. Ex : si la pyrolyse est à 600°, les fluctuations autorisées (à court terme) sont comprises entre 480°C et 720°C.
 - La composition de la biomasse ne doit pas changer de plus de **20%**.
 - La première fois qu'un producteur enregistre un lot, un échantillon représentatif doit être réalisé par un échantillonneur accrédité dans les 2 mois après l'enregistrement.



- L'échantillonneur peut être soit la même personne que le contrôleur envoyé par le corps d'inspection CERES-CERT ou provenir d'une compagnie interne ou externe qui a réussi le « sampling training » officiel d'EBC.
 - Après qu'un lot de production ait expiré, la production d'un nouveau lot doit être enregistré sur le site EBC.
 - Si les conditions de production du nouveau lot sont les mêmes que celles du précédent, l'analyse du précédent lot est validée jusqu'à ce qu'un échantillon du nouveau lot soit collecté et analysé.
 - La nouvelle production doit être réalisée dans l'année après le dernier échantillon et analyse du lot précédent. La collecte d'échantillon doit être finalisée durant la visite d'inspection.
 - Une unité de pyrolyse peut produire différents lots durant une période de référence d'un an si les conditions d'approvisionnement et/ou de production sont changées. L'interruption d'un lot doit être enregistrée avant de commencer ou recommencer un autre avec son propre ID. Il faut également mentionner si le lot précédent doit continuer ou être stoppé.
 - Le porteur de projet respecte la procédure d'échantillonnage.
 - Un échantillon représentatif d'un lot en production est collecté durant l'audit initial et ensuite chaque année durant l'inspection annuelle, par un échantillonneur accrédité, en accord avec le plan d'échantillonnage contractuel spécifié lors de l'audit initial et, envoyé à un laboratoire EBC accrédité.
 - L'échantillon doit être enregistré sur le site EBC où l'ID de l'échantillon et la demande d'analyses EBC pour le laboratoire sont générés.
 - L'échantillon scellé doit être envoyé avec son ID EBC et sa demande d'analyse à un laboratoire EBC accrédité.
 - La société de production doit s'assurer (quotidiennement) de l'échantillonnage et du stockage hermétique des échantillons retenus, en accord avec le plan d'échantillonnage et d'assurance qualité.
 - L'heure de l'échantillonnage quotidien doit être inscrite dans le registre de production. Les échantillons quotidiens doivent être collectés pendant un mois d'affilée dans un conteneur d'échantillonnage sous la forme d'un échantillon composite de 30 litres. Au bout d'un mois, l'échantillon composite est scellé. Les 30 échantillons suivants doivent être collectés dans un nouveau récipient d'échantillonnage jusqu'à ce que l'échantillon composite soit scellé et stocké. L'échantillon de rétention mensuel d'au moins 30 litres doit être conservé au sec et protégé pendant deux ans.
4. Le producteur doit déclarer les teneurs en nutriments (N, P, K, Mg, Ca, Fe) ainsi que le pH, teneurs en sels, densité apparente et la teneur en eau (si cette dernière est inférieure à 30%, les dangers inhérents et les mesures de précaution doivent être indiqués).
- Une fiche de prévention de sécurité doit être disponible.
 - Les ouvriers doivent signer un document mentionnant qu'ils ont été informés des dangers possibles sur le lieu de travail, lu la fiche de prévention et qu'ils disposent d'équipements de protection individuelle.
 - Les réglementations en matière de protection contre l'incendie et la poussière doivent être conformes aux réglementations locales et nationales tout au long de la chaîne de production, de transport et d'utilisation. Un permis d'exploitation officiel ou un document équivalent doit être présenté.
 - Le producteur doit respecter les règles d'étiquetage. Outre la classe de certification, les valeurs du Corg, du ratio H/Corg, pH, poids (sec) et volume, l'étiquette doit contenir le QR code donnant accès aux résultats d'analyse. La date de production du biochar doit être notée sur chaque unité d'emballage.



1. Le potentiel de puits de carbone d'une unité d'emballage²² de biochar est défini comme la quantité de carbone qu'elle contient moins la dépense en carbone de sa production, c'est-à-dire toutes les émissions de gaz à effet de serre causées par sa production. Il comprend donc l'empreinte carbone complète du biochar à la sortie de l'usine, c'est-à-dire lorsqu'il quitte le site de production. Pour cela, les émissions de GES durant la culture de biomasse, le processus de pyrolyse jusqu'à « l'emballage » du biochar doivent être quantifiées et enregistrées. Afin de pouvoir déterminer la valeur de marché du puits carbone, elles sont converties en CO₂éq par tonne de biochar. Cette valeur est soustraite à la teneur en carbone du biochar afin de déterminer la valeur du puits carbone de biochar. Sa valeur n'est calculée que jusqu'en sortie de l'unité de production.
2. Les contrôles nécessaires sur le site de production sont effectués par l'organisme de contrôle accrédité par l'État tel que CERES-CERT.
3. Le biochar ne peut devenir un puits carbone à long terme que lorsqu'il ne peut plus être brûlé ou quand il est utilisé dans des matériaux avec un long cycle de vie. Un système de traçabilité doit être mis en place pour pouvoir estimer l'ensemble des pertes de carbone entre la sortie de l'usine jusqu'à l'application du biochar dans le sol (ou dans un matériel de construction stable et durable). Le système de traçabilité peut être développé et mis en place par des « négociants C-sink » et/ou des plateformes de vente, afin d'être accrédité par EBC. Ces pertes doivent être soustraites à la valeur du puits C. La valeur finale du puits C est alors enregistrée par le négociant dans le registre EBC C-Sink.
4. Les fabricants de biochar peuvent également être « négociants C-sink » sous certaines conditions détaillées dans la méthodologie.
5. Lorsqu'on certifie un puits carbone, il faut s'assurer que le puits carbone certifié n'est pas créé aux dépens d'un autre puits.
6. Un trop long/mauvais stockage peut créer un réchauffement de la biomasse. Dès lors, une dégradation microbienne peut démarrer et émettre du CO₂, parfois même du CH₄ et/ou du N₂O. Par exemple, pour les piles de copeaux de bois de plus d'1 m³, une dégradation anaérobie peut être observée, émettant alors du méthane. Les émissions dues au stockage doivent être déduites du potentiel de puits C. Afin d'éviter efficacement les émissions dues au stockage, plusieurs mesures sont recommandées :
 - Les copeaux de bois utilisés lors de la pyrolyse doivent avoir été « coupés » au maximum quatre semaines avant la pyrolyse. Le stockage des grumes est considéré comme non-problématique (par rapport aux émissions de méthane) tant qu'elles sont stockées dans un lieu aéré et pas en contact de déchets verts.
 - Si le point précédent n'est pas possible, alors les copeaux (ou biomasse) doivent être séchés dès que possible avec la chaleur émanant de la pyrolyse. Ensuite, ils doivent être stockés séchés avec maximum de 20% d'humidité résiduelle, afin d'éviter au mieux la biodégradation.
7. Tout lot de biochar doit présenter ces informations :
 - Le QR code du batch issu de la certification EBC ainsi que le potentiel puits de carbone certifié ;
 - Poids sec du biochar (kg/m³ de biochar). Pour cela, pour tous les 10 m³ de biochar, 20 échantillons doivent être collectés, amenant au moins à un prélèvement de 10 L de biochar au total. L'échantillon est pesé avec une balance de précision de 1 g et ensuite séché à 110°C pour au moins 16 heures avant d'être pesé à nouveau, directement à la sortie de l'étuve.

²² Emballage réfère à un Big-bag ou un sac.



Modalité de calcul des crédits carbone

Une fois que le biochar entre dans un cycle de vie durable à long terme et définissable, le carbone du biochar représente un puits de C et est calculé selon :

1. La teneur en carbone du biochar est déterminée selon la méthode EBC indiquant la quantité de carbone organique stocké dans le biochar (% de masse sur base du poids sec du biochar).
2. Le potentiel de puits de C (exprimée en proportion massique par rapport à la masse sèche du biochar) résulte de la teneur en carbone dans le biochar à laquelle est soustraite la proportion de dépense carbone.

Toutes les émissions GES dues à la production du biochar sont enregistrées en CO₂eq pour l'entièreté du lot de biochar

Sont incluses les émissions :

- *Provenant de l'approvisionnement en biomasse*
 - La biomasse utilisée pour la génération d'un puits carbone est considérée comme neutre en C s'il s'agit soit du résidu d'une opération de transformation de la biomasse soit de l'extraction de la biomasse qui n'a pas conduit, pendant la période de référence, à la réduction du stock total de carbone dans le système.
 - Tout bois issu de forêts dont la régénération est supérieure au prélèvement, indépendamment de sa taille et de sa structure, est reconnu comme neutre en carbone pour la certification EBC du potentiel de puits C.
 - Les déchets bois issus de la transformation du bois sont également considérés comme neutres en carbone à condition qu'ils proviennent de bois/matériaux provenant d'une sylviculture durable et certifiée (e.g., PEFC, FSC, ...).
 - *Issues du stockage de la biomasse*
 - Il est important de pouvoir quantifier les émissions de méthane comme il a été reconnu en tant que gaz à effet de serre par le GIEC (2013). En effet, la conversion de l'effet du réchauffement climatique lié au méthane est équivalent à un facteur 86. C'est-à-dire que, 20 ans après émissions, l'effet du méthane est 86 fois plus important que le CO₂ sur une même période. Dès lors, les émissions de méthane doivent être mesurées selon une méthodologie détaillée avec des détails précis concernant outils de mesure, des intervalles et de précision. Ces informations doivent être soumises en avance à EBC pour revue.
 - *Produites lors du processus de pyrolyse et autres sur le site de production*
 - Les dépenses carbone (électricité et carburant) des différentes étapes doivent être calculées afin de les déduire du puits carbone :
 - Transport de la biomasse jusqu'à l'unité de pyrolyse ;
 - Broyage, homogénéisation et séchage de la biomasse ;
 - Traitement post-pyrolyse du biochar ;
 - Transport du biochar jusqu'au dépôt.
- Pour pouvoir être certifié, il est important de pouvoir quantifier ces dépenses.
- Si l'unité de pyrolyse génère en moyenne, annuellement, autant d'électricité que consommée pour la production de biochar, une quantité nulle de CO₂ eq peut être considérée pour la consommation électrique.



- La quantité de carburant utilisé pour le démarrage de l'unité de pyrolyse doit être renseignée par « batch » et est convertie en CO₂ eq selon le type de carburant.
 - La consommation de gasoil pour le transport, le broyage, *etc.* doit être convertie en CO₂eq selon le facteur de conversion de 2.7 kgCO₂ eq/L de diesel²³.
 - Si plus d'énergie électrique/thermique est produite que consommée, l'équilibre positif peut être crédité comme réduction d'émission mais pas sous la certification EBC. Dès lors, elle ne peut pas être comptée dans le puits C, ni dans la compensation des émissions liées au transport/transformation de la biomasse.
3. Une marge de sécurité de 10% de toutes les émissions de GES susmentionnés doit être appliquée afin d'inclure toutes les émissions non couvertes par le précédent point. Sont comprises dans la marge de sécurité les émissions indirectement liées à la biomasse/au biochar comme, mais pas limité à :
- La production de big bag ;
 - L'électricité nécessaire aux opérations et au refroidissement des serveurs informatiques ;
 - Les potentielles émissions de méthane durant les premiers mois de stockage de la biomasse ;
 - La consommation de carburant pour se rendre au lieu de travail ;
 - *Etc.*

²³ Juhrich, 2016 – Ministère allemand de l'Environnement



Exigences additionnelles

Audit de l'installation installation d'une unité de production de biochar

La production de biochar d'une installation est considérée comme éligible à l'émission de certificats de réduction de CO₂ une fois que l'installation a fait l'objet d'une vérification par un auditeur tiers selon une méthodologie spécifique pour le biochar. Cette vérification est effectuée lors d'un audit de l'installation de production. La vérification garantit que la réduction de CO₂ correspondante a eu lieu, que des mesures de sauvegarde environnementales et sociales appropriées sont en place et que la réduction de CO₂ est considérée comme permanente selon la définition de la méthodologie. Les exigences sont mentionnées ci-dessous.

1. L'auditeur vérifie la **conformité de l'installation de production** aux exigences selon les règles générales du standard Puro, ainsi qu'aux exigences spécifiques de cette méthodologie, et aux preuves et aux éléments de preuve requis du fournisseur de capture de CO₂.
2. Le porteur du projet doit être en mesure de démontrer que des **garanties environnementales et sociales** sont en place et que les activités de l'installation de production ne causent pas de préjudice significatif à l'environnement naturel ou aux communautés locales. Cela peut être réalisé par le biais d'une ou plusieurs des méthodes suivantes :
 - a. Évaluation de l'impact environnemental (EIE)
 - b. Permis environnemental
 - c. Autres documents approuvés par l'organisme émetteur portant sur l'analyse et la gestion des impacts environnementaux et sociaux
 - d. Lorsque cela est applicable, les activités de l'installation de production doivent être développées avec le consentement éclairé des communautés locales et des autres parties prenantes concernées, et une politique doit être mise en place pour traiter les éventuels griefs.
3. Le porteur du projet doit **prouver l'additionnalité** du projet, c'est-à-dire démontrer que les réductions de CO₂ sont directement attribuables au financement carbone. Même avec un soutien financier substantiel non lié au carbone, les projets peuvent être additionnels si un investissement est nécessaire, si le risque est présent et/ou si le capital humain doit être développé. Pour prouver l'additionnalité, le porteur du projet doit fournir des informations financières détaillées sur le projet et une analyse comparant la situation réelle à une situation hypothétique. De plus, il doit démontrer que le projet n'est pas exigé par des lois, des réglementations ou d'autres obligations contraignantes.
4. L'auditeur des installations de production s'assure que **l'installation est en mesure d'évaluer et de quantifier de manière fiable la production de biochar** pour estimer la capture de CO₂. Cela inclut la documentation précise de la quantité de biochar produite et vendue, l'utilisation de compteurs étalonnés, l'estimation des émissions liées à la culture, la récolte et le transport de la biomasse, la quantification de l'utilisation des matériaux et de l'énergie de l'installation, ainsi que l'estimation des émissions liées au post-traitement, au transport et à l'utilisation du biochar. L'auditeur guide également le porteur du projet dans le processus de quantification de la capture de CO₂ afin qu'il puisse le calculer de manière indépendante dans son rapport de sortie.
5. L'auditeur des installations de production collecte et vérifie les données de base de l'installation de production et du porteur du projet. Cela inclut l'enregistrement de l'installation par le porteur du projet, la confirmation de son existence légale, l'emplacement de l'installation, le volume de production de l'année précédente, les méthodes de capture éligibles, la date d'éligibilité, les éventuels soutiens publics et les documents sur les mesures de sauvegarde environnementales et sociales.



Contrôle qualité

Le contrôle qualité concerne la production du biochar, son utilisation et s'assure qu'il n'y ait pas double comptage. L'ensemble des éléments nécessaires à ce contrôle sont détaillés ci-dessous :

Production du biochar

1. Fournir les documents et les données liés à la quantité de biochar produit. Cela doit inclure, (i) la documentation de la production en continue sur l'entièreté de la période de production en prenant en compte toutes les modifications de production et (ii) les méthodologies utilisées pour le calcul de la matière sèche de biochar produite.
2. Les informations requises concernant la **quantité de biochar produite** comprennent :
 - a. Une mesure continue du poids à l'aide de cellules de charge pendant toute la durée de production ; et
 - b. Une mesure de la quantité d'eau utilisée.La masse sèche du biochar produit est calculée en soustrayant le poids de l'eau utilisée du poids mesuré du biochar sur les cellules de charge. L'opérateur peut également proposer un équipement de mesure supplémentaire pour une précision accrue.
3. Fournir et documenter les données de l'analyse du **cycle de vie** pour le processus de production du biochar. L'accent doit être mis sur la présentation détaillée de l'impact sur le changement climatique, en mettant en évidence la contribution spécifique des différentes étapes du cycle de vie, ainsi que la part de responsabilité des principaux gaz à effet de serre.
4. Les propriétés suivantes du biochar doivent être déterminées par des **analyses en laboratoire**, car elles sont nécessaires pour quantifier la séquestration du carbone par le biochar : le contenu total en carbone organique, le contenu total en hydrogène et le ratio calculé *H/C_{org}*. Les analyses doivent être effectuées dans des laboratoires accrédités par les autorités nationales et conformes aux normes internationales d'essai (*e.g.*, ASTM, ISO, AS, D).
5. Le biochar doit être analysé en laboratoire pour déterminer ses **propriétés supplémentaires** selon les exigences de qualité propres à chaque utilisation. Cela implique généralement des tests pour détecter les PAH et les métaux lourds. Les analyses doivent être réalisées dans des laboratoires accrédités par les autorités nationales et conformes aux normes internationales (*e.g.*, l'ASTM, l'ISO, l'AS et le D).
6. Le porteur du projet doit assurer un **échantillonnage représentatif et des tests fréquents** du biochar produit pour refléter la variabilité de la biomasse et des conditions de production.
7. Le porteur du projet doit se conformer aux **réglementations environnementales locales** concernant les émissions de polluants dans l'air, l'eau et le sol. Il doit également évaluer ces émissions, mettre en œuvre des mesures pour minimiser leur impact et s'engager à améliorer annuellement sa performance environnementale.

Utilisation du biochar

1. Les **données d'évaluation du cycle de vie** pour l'utilisation du biochar doivent être fournies et documentées. En particulier, l'impact sur le changement climatique doit être présenté de manière désagrégée, en exposant la contribution des différentes étapes du cycle de vie ainsi que la contribution des principaux gaz à effet de serre.
2. Il faut conserver des preuves démontrant que **l'utilisation finale du produit** ne provoque pas le rejet de CO₂ dans l'atmosphère, par exemple, en l'utilisant comme combustible ou agent réducteur. Ces preuves doivent être enregistrées, soumises à Puro et mises à disposition lors des audits de sorties.
3. Justification de la **température du sol** utilisé lors du calcul de la séquestration du carbone par le biochar.



Éviter le double comptage

1. Pour éviter la **double comptabilisation** du carbone, le Registre Puro utilise des identifiants uniques pour chaque CORC, assurant ainsi une utilisation exclusive. Le registre contient toutes les informations nécessaires, y compris l'enregistrement de l'installation de production, les dates de crédit, les vérifications, les transactions d'émission et d'annulation, ainsi que le titre et la propriété associés au fil du temps.
2. Le porteur du projet doit déclarer que le produit physique (biochar) dans lequel le CO₂ est stocké ne sera pas commercialisé comme étant "climatiquement positif" si le CORC associé est retiré du produit et vendu à un tiers.
3. Il faut vérifier l'emballage du produit pour s'assurer que celui-ci est en conformité si le CORC associé au produit physique (biochar) est retiré.
4. L'utilisateur final du biochar ne peut prétendre que le produit agit comme un puits de carbone si le CORC associé a été vendu à un tiers. Une preuve de cela peut être fournie par un accord d'achat ou une documentation de vente/transport du produit, indiquant les procédures pour réclamer le CORC.

Frais de service

Tableau 53 - Frais de service applicables en fonction du volume des CORCs générés annuellement et de leur prix de vente

Volume	Production annuelle de CORCs		Prix du CORC				
			Prix 1	Prix 2	Prix 3	Prix 4	Prix 5
	Min	Max	20-50€	51-100€	101-300€	301-600€	>600€
Volume 1	500	2.000	20,00 %	12,00 %	10,00 %	10,00 %	7,00 %
Volume 2	2.001	20.000	10,00 %	8,00 %	6,00 %	5,50 %	5,00 %
Volume 3	20.001	50.000	7,50 %	7,00 %	5,50 %	5,00 %	3,00 %
Volume 4	50.001	100.000	7,00 %	6,00 %	5,00 %	4,00 %	2,00 %
Volume 5	100.001	300.000	6,00 %	5,00 %	4,00 %	2,00 %	1,00 %
Volume 6	300.001	500.000	5,00 %	3,00 %	2,00 %	1,00 %	0,40 %
Volume 7	500.001	1 000.000	4,00 %	2,50 %	1,50 %	0,80 %	0,30 %
Volume 8	1.000.001	5.000.000	3,00 %	2,00 %	1,00 %	0,60 %	0,25 %
Volume 9	5.000.001	10.000.000	2,00 %	1,50 %	0,70 %	0,35 %	0,20 %



Modalité de calcul des crédits carbone

Le nombre de crédits carbone pouvant être générés par un projet se calcule selon l'équation décrite ci-dessous :

$$CORCs = E_{stored} - E_{biomass} - E_{production} - E_{use}$$

Description	Unit
Amount of net CO ₂ -eq removed over 100-year period by the biochar production activity	tonnes CO ₂ -eq
Amount of CO ₂ sequestered over a 100-year time horizon by the amount of biochar produced over the reporting period.	tonnes CO ₂ -eq
Life cycle greenhouse gas emissions arising from the production and supply of biomass to the production facility, including direct land use changes.	tonnes CO ₂ -eq
Life cycle greenhouse gas emissions arising from the transformation of the biomass into biochar, at the producing facility.	tonnes CO ₂ -eq
Life cycle greenhouse gas emissions arising from the use of the biochar, including its distribution up to the point of final use.	tonnes CO ₂ -eq

Où

E_{stored} décrit la quantité de dioxyde de carbone séquestrée sur un horizon de 100 ans par la quantité de biochar produit.

$E_{biomass}$ décrit les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie résultant de la production et de l'approvisionnement en biomasse de l'installation de production, y compris les modifications directes de l'utilisation des terres.

$E_{production}$ décrit le cycle de vie de gaz à effet de serre résultant de la transformation de la biomasse en biochar, dans l'installation de production.

E_{use} décrit les émissions de gaz à effet de serre liées au cycle de vie qui se produisent tout au long de la distribution du biochar jusqu'à son utilisation finale.

E_{stored} est calculé par la formule suivante :

$$E_{stored} = Q_{biochar} \times C_{org} \times F_p^{T_H, T_s} \times \frac{44}{12}$$

Où

$Q_{biochar}$ est la quantité de biochar sec produit sur la période étudiée, exprimée en tonnes.

C_{org} est la teneur en carbone organique du biochar produit

$F_p^{T_H, T_s}$ est le facteur de permanence du carbone organique du biochar sur un horizon temporel donné (T_H) et dans un sol à une température donnée (T_s)²⁴.

$$F_p^{T_H, T_s} = c + m \times H / C_{org}$$

Où c et m sont des coefficients dépendant de T_H (défini à 100 ans) et T_s

Tableau 54 – Valeurs des coefficient c et m en fonction de la température du sol

Soil temperature T_s	c	m
5°C	1,13	-0,46
10°C	1,1	-0,59
15°C	1,04	-0,64
20°C	1,01	0,65
25°C	0,98	-0,66
14.9°C	1,04	-0,64

²⁴ La température moyenne annuelle du sol peut être obtenue d'études statistiques nationales ou d'une cartographie globale des températures du sol telle que: [Global maps of soil temperature \(wiley.com\)](http://Global maps of soil temperature (wiley.com)).



Exigences additionnelles

1. L'approche utilisée par la méthodologie est standardisée pour démontrer l'**additionalité** d'un projet sur base d'une liste positive. Les projets mettant en œuvre des activités figurant sur la liste positive sont automatiquement considérés comme additionnels. La transformation de déchets de biomasse en biochar étant incluse dans la liste positive, tout projet biochar est donc additionnel.
2. Les promoteurs du projet doivent démontrer que le biochar et/ou les produits finaux ont une longue durée de vie à l'aide de preuves crédibles telles que des résultats de laboratoire, des articles de recherche examinés par des pairs ou toute autre évaluation du produit par une tierce partie. Les informations fournies doivent inclure la durée de vie du produit dans lequel le biochar est stocké à long terme. Le produit obtenu doit être conforme aux normes/spécifications nationales/internationales de qualité des produits, le cas échéant.
3. Le biochar peut être utilisé et comptabilisé sous la méthodologie seulement s'il est utilisé dans la première année de sa production.
4. Les producteurs de biochar doivent disposer d'un programme de santé et de sécurité pour protéger les travailleurs contre les polluants atmosphériques et autres dangers
5. L'unité de production doit être conforme aux lois et autres réglementations sur la qualité de l'air et l'environnement et être en mesure de le prouver ;
6. Des preuves tels que les plans d'aménagement, certificat (FSC, PEFC, ...) doivent être fournies pour démontrer que la biomasse provient de sources durables et ne participe pas à la déforestation et dégradation.
7. La baseline par défaut est considéré comme 0 pour la matière première (conservative value) mais le porteur de projet peut fournir des valeurs pour la baseline s'il en a à disposition (ex : taux de dégradation de lisier, émission de méthane, ...). Le promoteur du projet doit fournir des preuves crédibles du scénario de référence de la biomasse des déchets. Les exemples de preuves comprennent, sans s'y limiter, les registres annuels du gouvernement, les registres d'une installation d'élimination des déchets et les registres d'une installation de production, les registres d'une installation d'élimination des déchets et les registres d'une installation de production. En l'absence de registres, le promoteur du projet doit utiliser des données tirées de la littérature existante, des données d'enquêtes existantes sur des industries similaires dans la même région, ou mener sa propre enquête.
8. Le porteur de projet réalise une ACV (tenant compte de l'approvisionnement de la biomasse, de la production du biochar jusqu'à son utilisation).
9. La teneur $H/C_{org} < 0,7$
10. Le porteur de projet doit développer et appliquer un plan de monitoring pour permettre l'ACV et fournir des preuves suffisantes au vérificateur tiers indépendant.
Le contenu minimal du monitoring plan est le suivant :
 - a. Description des tâches et de leurs exigences techniques ;
 - b. Type de technologie utilisée pour produire du biochar ;
 - c. Carnet de suivi des opérations et maintenance du système ;
 - d. Les rôles, responsabilités et capacités de l'équipe de management et de monitoring.

Les procédures pour la collecte de données, les mesures et le suivi doivent être détaillés. Tout matériel utilisé doit être bien calibré et, si des analyses de laboratoire sont réalisées, il faut s'assurer qu'elles soient conformes aux normes ou standards internationaux. Ce plan doit détailler les procédures de saisie, de mesure et de déclaration des paramètres de données nécessaires pour l'ACV.



Le porteur de projet doit être capable de démontrer l'utilisation du biochar pour lequel il revendique des absorptions d'émissions.

11. Pour éviter le double-comptage, l'endroit d'utilisation du biochar doit être connu (au moins une donnée géodésique doit être fournie pour chaque instance).
12. Afin de renforcer la fiabilité des mesures et des calculs, l'intégrité des données, et une bonne formation du personnel, un plan qualité assurance/contrôle (QA/QC) doit être établi et contenir des mesures concernant, mais pas limité à :
 - a. La protection des équipements de mesures (sealed meters, data loggers) si applicable ;
 - b. La protection des sauvegardes de données (disque dur, stockage électronique) ;
 - c. La vérification régulière et périodique de l'intégrité des données (détection des valeurs remarquables, ...) ;
 - d. La comparaison des estimations actuelles par rapport aux précédentes estimations ;
 - e. La formation du personnel pour réaliser des activités liées à la source, la production et l'utilisation du biochar ;

L'ensemble des documents doivent être centralisés par le porteur de projet et disponible pour vérification à tout moment. Ces documents doivent être sérieusement gardés pour au moins 2 ans après la fin de la période de génération de crédits du projet.

Modalité de calcul des crédits carbone

L'ACV permet de quantifier et prouver les émissions de gaz à effet de serre du projet pour les trois étapes couvertes par cette méthodologie : approvisionnement de la biomasse, production et utilisation du biochar.

$$ER_y = ER_{SS,y} + ER_{PS,y} - PE_{AS,y} - LE_y$$

Où

ER_y = les émissions nettes de GES retirées de l'atmosphère au cours de l'année y (tCO₂éq)

ER_{SS,y} = la réduction des émissions de GES liées à l'approvisionnement de la biomasse au cours de l'année y (tCO₂éq)

ER_{PS,y} = la réduction des émissions de GES liées à la production du biochar au cours de l'année y (tCO₂éq)

PE_{AS,y} = les émissions de GES liées l'utilisation du biochar au cours de l'année y (tCO₂éq)

LE_y = les émissions liées au transport de la biomasse ou du biochar si la distance parcourue est supérieure à 200 km.

Les émissions du scénario de référence sont fixées par défaut, de façon conservatrice, à zéro.

Les émissions du projet sont calculées de la façon suivante :

1. Les émissions liées à l'approvisionnement de la biomasse sont estimées nulles, étant donné que ce sont des déchets qui sont utilisés.
2. Les émissions liées à la production du biochar sont calculées par la formule suivante :

$$ER_{PS,y} = \sum_t \left(\left(\sum_k CC_{t,k,y} \times \frac{44}{12} \right) - \left(\sum_p PE_{PS,t,p,y} \right) \right)$$

Où

ER_{PS,y} = les émissions de GES retirées de l'atmosphère durant la phase de production durant l'année y (tCO₂éq)

CC_{t,k,y} = la teneur en carbone organique du biochar (sec) de type t pour l'application de type k durant l'année y.

44/12 = coefficient de conversion du carbone organique en tCO₂éq



$PE_{PS,t,p,y}$ = les émissions du projet durant la phase de production du biochar de type t de l'installation p durant l'année y (tCO_{2eq})

Avec

$$CC_{t,k,y} = \sum_p (M_{t,k,p,y} \times F_{Cp,t,p} \times PR_{de,k})$$

Où

Dans le cas où le biochar est appliqué au sol, le temps de décomposition est défini par défaut à 100 ans.

$M_{t,k,p,y}$ = masse de biochar (sec) de type t pour l'application de type k produit à l'installation p durant l'année y (tonnes).

$F_{Cp,t,p}$ = teneur en carbone organique du biochar de type t produit à l'installation p, définie par analyse laboratoire.

$PR_{de,k}$ = Facteur de permanence dû à la décomposition du biochar pour l'application de type k. Il dépend de la température de production (si la température > 600°C, $PR_{de,k} = 0,89$ et si la température est comprise entre 450 et 600°C, $PR_{de,k} = 0,80$).

Avec

$$PE_{PS,p,y} = (P_{ED,p,y} + P_{EP,p,y} + P_{EC,p,y}) \times \frac{\sum_t \sum_k M_{t,k,p,y}}{M_{p,y}}$$

Où

$P_{ED,p,y}$ = Émissions liées au prétraitement de la biomasse à l'installation de production p durant l'année y (tCO_{2eq}). Si la production d'énergie liée au prétraitement est issue d'énergie renouvelable, la valeur est fixée à zéro.

$P_{EP,p,y}$ = Émissions liées à la conversion de la biomasse en biochar à l'installation de production p durant l'année y (tCO_{2eq}). Dans le cas d'une installation de haute technologie, la valeur est fixée à zéro.

$P_{EC,p,y}$ = Émissions liées à l'utilisation d'énergie auxiliaire pour l'installation de production p durant l'année y (tCO_{2eq}). Si l'énergie auxiliaire est renouvelable, la valeur est fixée à zéro, sinon, il s'agit de la somme des émissions liées aux énergies fossiles et énergie électrique du réseau éventuel.

$M_{p,y}$ = Masse totale de biochar (sec) produit à l'installation p durant l'année y (tonnes).

3. Les émissions liées à l'utilisation du biochar sont calculées par la formule suivante :

$$PE_{AS,y} = \sum_k \sum_t (E_{p,t,k,y} + E_{ap,t,k,y})$$

Où

$PE_{AS,y}$ = émissions liées à l'application du biochar durant l'année y (tCO_{2eq})

$E_{p,t,k,y}$ = émissions liées au traitement éventuel du biochar de type t pour l'application k au cours de l'année y (tCO_{2eq}), tel que criblage, broyage, etc.²⁵. Si l'énergie utilisée est renouvelable, la valeur est nulle, sinon, il s'agit de la somme des émissions liées aux énergies fossiles et énergie électrique du réseau éventuel.

$E_{ap,t,k,y}$ = émissions liées à l'utilisation du biochar de type t pour l'application k au cours de l'année y (tCO_{2eq}). Les émissions liées à la combustion de carburant fossile ou au mélange du biochar avec des fertilisants sont considérées négligeables. La valeur est donc définie à zéro.

Les émissions liées au transport de la biomasse ou du biochar doivent être prises en compte si la distance de transport est supérieure à 200 km.

²⁵ Si le biochar est mélangé avec d'autres matières, les émissions liées à leur production n'est pas prise en compte dans la méthodologie.



Certification CDM

Exigences additionnelles

1. Le porteur de projet doit documenter la situation spécifique de l'activité du projet CDM (PDD). La sélection du scénario de référence (baseline) et la démonstration de l'additionalité doivent être effectuées en suivant le [TOOL02](#) à l'aide des orientations suivantes. Doivent être renseignés les éléments suivants :
 - a. Comment l'énergie électrique serait produite en l'absence de l'activité de projet CDM ;
 - b. Comment la chaleur serait produite en l'absence de l'activité de projet CDM ;
 - c. Si l'activité de projet CDM génère de l'énergie mécanique par le biais de turbine(s) à vapeur, comment l'énergie mécanique serait générée en l'absence de l'activité de projet MDP ;
 - d. Si l'activité de projet CDM utilise des résidus de biomasse, ce qu'il adviendrait des résidus de biomasse en l'absence de l'activité de projet MDP (scénarios B) ;
 - e. Si l'activité de projet CDM utilise de la biomasse cultivée dans des plantations dédiées, quelle serait l'utilisation des terres en l'absence de l'activité de projet MDP ; et
 - f. Si l'activité de projet CDM utilise du biogaz provenant des eaux usées du site, ce qu'il adviendrait du biogaz en l'absence de l'activité de projet MDP.
2. Les paramètres décrits dans la méthodologie doivent être documentés dans le PDD ainsi que toutes les dispositions relatives au suivi contenues dans les outils CDM visés dans la méthodologie s'appliquent.
3. Décrire et spécifier dans le PDD toutes les procédures de surveillance, y compris le type d'instrument de mesure utilisé, les responsabilités en matière de surveillance et les procédures AQ/CQ qui seront appliquées. Les instruments de mesure seront régulièrement calibrés.

Modalité de calcul des crédits carbone

La réduction des émissions est calculée par la formule suivante :

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y$$

Où

ER_y = les réductions d'émissions au cours de l'année y (tCO₂)

BE_y = les émissions du scénario de base au cours de l'année y (tCO₂)

PE_y = les émissions du projet au cours de l'année y (tCO₂)

LE_y = les émissions de fuite au cours de l'année y (tCO₂)²⁶

Où les émissions du scénario de base sont calculées par une approche conservatrice par la formule suivante :

$$BE_y = EL_{BL,GR,y} \times EF_{EG,GR,y} + \sum_f FF_{BL,HG,y,f} \times EF_{FF,y,f} + EL_{BL,FF/GR,y} \times \min(EF_{EG,GR,y}, EF_{EG,FF,y}) + BE_{BR,y}$$

Où

$EL_{BL,GR,y}$ = l'électricité de base provenant du réseau au cours de l'année y (MWh)

$EF_{EG,GR,y}$ = facteur d'émission du réseau au cours de l'année y (tCO₂/MWh)

²⁶ Calculées selon l'outil 16 CDM : [am-tool-16-v4.pdf \(unfccc.int\)](#)



$FF_{BL,HG,y,f}$ = demande de base de combustibles fossiles pour la chaleur industrielle au cours de l'année y (GJ)

$EF_{FF,y,f}$ = facteur d'émission CO₂ du type f de combustible fossile au cours de l'année y (tCO₂/GJ)

$EL_{BL,FF/GR,y}$ = énergie électrique incertaine de référence dans le réseau ou sur site ou hors site au cours de l'année y (MWh)

$EF_{EG,FF,y}$ = facteur d'émission CO₂ pour la génération d'électricité de base sur site ou hors-site au cours de l'année y (tCO₂/MWh)

$BE_{BR,y}$ = les émissions de base liées à l'élimination des résidus de biomasse au cours de l'année y (tCO₂éq)

f = type de carburant fossile

La procédure de détermination des émissions de référence peut être résumée comme suit :

- Étape 1 : Déterminer les capacités de production de référence de chaleur, d'électricité et les contraintes de capacité, ainsi que les rendements ;
- Étape 2 : Déterminer la quantité d'électricité de référence provenant du réseau (et indirectement du réseau) hors-réseau ainsi que les facteurs d'émission liée
- Étape 3 : Déterminer la production de référence de chaleur et d'électricité à partir de la biomasse ;
- Étape 4 : Déterminer la demande de référence en combustibles fossiles pour assurer l'équilibre entre la chaleur et la production d'électricité correspondante ;
- Étape 5 : Déterminer les émissions de référence dues à la combustion ou à la décomposition incontrôlée des résidus de biomasse.

Les calculs détaillés relatifs à chacune des étapes susmentionnées se trouvent dans la méthodologie.

Et où les émissions du projet sont calculées par la formule suivante :

$$PE_y = PE_{Biomass,y} + PE_{FF,y} + PE_{GR1,y} + PE_{GR2,y} + PE_{CBR,y} + PE_{BG2,y}$$

Où

$PE_{biomass,y}$ = les émissions du projet liée à la biomasse et aux résidus de biomasse au cours de l'année y (tCO₂)

$PE_{FF,y}$ = les émissions du projet dues à la consommation de combustible fossiles sur le site du projet au cours de l'année y (tCO₂)

$PE_{GR1,y}$ = les émissions dues à l'importation de l'électricité du réseau électrique vers le site au cours de l'année y (tCO₂)

$PE_{GR2,y}$ = les émissions liées à la réduction de génération d'électricité sur le site du projet au cours de l'année y (tCO₂)

$PE_{CBR,y}$ = les émissions liées à la combustion de biomasse au cours de l'année y (tCO₂)

$PE_{BG2,y}$ = les émissions liées à la production de biogaz (dans le cas d'activité de projet utilisant du biogaz) au cours de l'année y (tCO₂)

ANNEXE 7 : ANALYSE FINANCIÈRE – COMPTE DE RÉSULTATS (€)
CIB-Enyélé
Tableau 55 – Compte de résultats de la solution Arti, scénario A, broyeur Zhangsheng - ZSGS-218, certification biochar EBC

COMPTE DE RÉSULTATS	Année 0	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Produits d'exploitation		496.346	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546
Chiffre d'affaires HT Biochar		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Économie gasoil		496.346	496.346	496.346	496.346	496.346	496.346	496.346	496.346	496.346	496.346
Chiffre d'affaires HT vente de CC biochar		-	893.200	893.200	893.200	893.200	893.200	893.200	893.200	893.200	893.200
Chiffre d'affaires HT vente de CC CDM		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges d'exploitation	6.127.235	443.398	438.598	438.598	438.598	438.598	438.598	438.598	438.598	438.598	438.598
CAPEX (sans certification)	6.107.760	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OPEX (sans certification)		423.923	423.923	423.923	423.923	423.923	423.923	423.923	423.923	423.923	423.923
Investissement certification carbone biochar	19.475										
Investissement certification CDM	-										
Charges certification carbone biochar		19.475	14.675	14.675	14.675	14.675	14.675	14.675	14.675	14.675	14.675
Charges certification carbone CER		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Excédent Brut d'Exploitation	- 6.127.235	52.947	950.947	950.947	950.947	950.947	950.947	950.947	950.947	950.947	950.947
Dotations aux amortissements		- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201
Résultat d'exploitation		- 187.254	710.746	710.746	710.746	710.746	710.746	710.746	710.746	710.746	710.746
Produits financiers		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges financières		311.264	301.929	292.121	281.815	270.984	259.604	247.646	235.080	221.876	208.001
Résultat financier		- 311.264	- 301.929	- 292.121	- 281.815	- 270.984	- 259.604	- 247.646	- 235.080	- 221.876	- 208.001
Résultat courant avant impôts		- 498.517	408.817	418.625	428.932	439.762	451.142	463.101	475.666	488.871	502.746
Impôts sur le bénéfice	28%	-	114.469	117.215	120.101	123.133	126.320	129.668	133.187	136.884	140.769
Bénéfice ou perte (résultat net)		- 498.517	294.348	301.410	308.831	316.629	324.822	333.432	342.480	351.987	361.977

COMPTE DE RÉSULTATS	Année 11	Année 12	Année 13	Année 14	Année 15	Année 16	Année 17	Année 18	Année 19	Année 20	Total
Produits d'exploitation	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546	1.389.546	26.897.719
Chiffre d'affaires HT Biochar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Économie gasoil	496.346	496.346	496.346	496.346	496.346	496.346	496.346	496.346	496.346	496.346	9.926.919
Chiffre d'affaires HT vente de CC biochar	893.200	893.200	893.200	893.200	893.200	893.200	893.200	893.200	893.200	893.200	16.970.800
Chiffre d'affaires HT vente de CC CDM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges d'exploitation	438.598	438.598	438.598	438.598	438.598	438.598	438.598	438.598	438.598	438.598	8.776.770
CAPEX (sans certification)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.107.760
OPEX (sans certification)	423.923	423.923	423.923	423.923	423.923	423.923	423.923	423.923	423.923	423.923	8.478.470
Investissement certification carbone biochar											19.475
Investissement certification CDM											-
Charges certification carbone biochar	14.675	14.675	14.675	14.675	14.675	14.675	14.675	14.675	14.675	14.675	298.300
Charges certification carbone CER	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Excédent Brut d'Exploitation	950.947	950.947	950.947	950.947	950.947	950.947	950.947	950.947	950.947	950.947	18.120.949
Dotations aux amortissements	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 240.201	- 4.804.021
Résultat d'exploitation	710.746	710.746	710.746	710.746	710.746	710.746	710.746	710.746	710.746	710.746	13.316.928
Produits financiers	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges financières	193.421	178.100	162.002	145.085	127.309	108.630	89.002	68.377	46.704	23.931	3.772.880
Résultat financier	- 193.421	- 178.100	- 162.002	- 145.085	- 127.309	- 108.630	- 89.002	- 68.377	- 46.704	- 23.931	- 3.772.880
Résultat courant avant impôts	517.326	532.646	548.745	565.661	583.437	602.116	621.744	642.369	664.042	686.816	9.544.048
Impôts sur le bénéfice	28%	144.851	149.141	153.649	158.385	163.362	168.593	174.088	179.863	185.932	2.811.918
Bénéfice ou perte (résultat net)	372.474	383.505	395.096	407.276	420.075	433.524	447.656	462.506	478.110	494.507	6.732.130

CEB
Tableau 56 - Compte de résultats de la solution Arti, scénario A, broyeur Jenz -BA615E, certification biochar EBC

COMPTE DE RÉSULTATS	Année 0	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Produits d'exploitation		1.256.025	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225
Chiffre d'affaires HT Biochar		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Économie gasoil		1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025
Chiffre d'affaires HT vente de CC biochar		-	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200
Chiffre d'affaires HT vente de CC CDM		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges d'exploitation	7.118.841	497.098	492.298	492.298	492.298	492.298	492.298	492.298	492.298	492.298	492.298
CAPEX (sans certification)	7.097.991	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OPEX (sans certification)		476.248	476.248	476.248	476.248	476.248	476.248	476.248	476.248	476.248	476.248
Investissement certification carbone biochar	20.850										
Investissement certification CDM	-										
Charges certification carbone biochar		20.850	16.050	16.050	16.050	16.050	16.050	16.050	16.050	16.050	16.050
Charges certification carbone CER		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Excédent Brut d'Exploitation	- 7.118.841	758.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928
Dotations aux amortissements		- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555
Résultat d'exploitation		475.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372
Produits financiers		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges financières		361.637	350.792	339.397	327.422	314.840	301.618	287.724	273.124	257.783	241.663
Résultat financier		- 361.637	- 350.792	- 339.397	- 327.422	- 314.840	- 301.618	- 287.724	- 273.124	- 257.783	- 241.663
Résultat courant avant impôts		113.735	1.176.580	1.187.975	1.199.950	1.212.533	1.225.755	1.239.648	1.254.248	1.269.589	1.285.710
Impôts sur le bénéfice	30%	34.121	352.974	356.393	359.985	363.760	367.726	371.895	376.274	380.877	385.713
Bénéfice ou perte (résultat net)		79.615	823.606	831.583	839.965	848.773	858.028	867.754	877.974	888.712	899.997

COMPTE DE RÉSULTATS	Année 11	Année 12	Année 13	Année 14	Année 15	Année 16	Année 17	Année 18	Année 19	Année 20	Total
Produits d'exploitation	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225	2.303.225	45.017.307
Chiffre d'affaires HT Biochar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Économie gasoil	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	1.256.025	25.120.507
Chiffre d'affaires HT vente de CC biochar	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200	1.047.200	19.896.800
Chiffre d'affaires HT vente de CC CDM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges d'exploitation	492.298	492.298	492.298	492.298	492.298	492.298	492.298	492.298	492.298	492.298	9.850.754
CAPEX (sans certification)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.097.991
OPEX (sans certification)	476.248	476.248	476.248	476.248	476.248	476.248	476.248	476.248	476.248	476.248	9.524.954
Investissement certification carbone biochar											20.850
Investissement certification CDM											-
Charges certification carbone biochar	16.050	16.050	16.050	16.050	16.050	16.050	16.050	16.050	16.050	16.050	325.800
Charges certification carbone CER	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Excédent Brut d'Exploitation	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	1.810.928	35.166.553
Dotations aux amortissements	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 283.555	- 5.671.107
Résultat d'exploitation	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	1.527.372	29.495.446
Produits financiers	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges financières	224.723	206.923	188.219	168.565	147.912	126.210	103.406	79.443	54.263	27.803	4.383.468
Résultat financier	- 224.723	- 206.923	- 188.219	- 168.565	- 147.912	- 126.210	- 103.406	- 79.443	- 54.263	- 27.803	- 4.383.468
Résultat courant avant impôts	1.302.649	1.320.449	1.339.153	1.358.807	1.379.460	1.401.162	1.423.967	1.447.929	1.473.110	1.499.569	25.111.978
Impôts sur le bénéfice 30%	390.795	396.135	401.746	407.642	413.838	420.349	427.190	434.379	441.933	449.871	7.533.593
Bénéfice ou perte (résultat net)	911.854	924.314	937.407	951.165	965.622	980.813	996.777	1.013.551	1.031.177	1.049.698	17.578.385

GSEZ - Lambaréné
Tableau 57 - Compte de résultats de la solution 3R Systems,, broyeur Jenz -BA615D, certification biochar Verra

COMPTE DE RÉSULTATS	Année 0	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Produits d'exploitation		1.908.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138
Chiffre d'affaires HT Biochar		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Économie gasoil		1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138
Chiffre d'affaires HT vente de CC biochar		-	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000
Chiffre d'affaires HT vente de CC CDM		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges d'exploitation	19.725.863	1.347.035	1.316.999	1.316.999	1.316.999	1.316.999	1.316.999	1.315.799	1.315.799	1.315.799	1.315.799
CAPEX (sans certification)	19.672.838	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OPEX (sans certification)		1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009
Investissement certification carbone biochar	53.025										
Investissement certification CDM	-										
Charges certification carbone biochar		53.025	22.989	22.989	22.989	22.989	22.989	21.789	21.789	21.789	21.789
Charges certification carbone CER		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Excédent Brut d'Exploitation	-19.725.863	561.103	7.101.139	7.101.139	7.101.139	7.101.139	7.101.139	7.102.339	7.102.339	7.102.339	7.102.339
Dotations aux amortissements		- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764
Résultat d'exploitation	-	29.660	6.510.376	6.510.376	6.510.376	6.510.376	6.510.376	6.511.576	6.511.576	6.511.576	6.511.576
Produits financiers		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges financières		1.002.074	972.024	940.447	907.267	872.401	835.763	797.265	756.810	714.301	669.632
Résultat financier	-	1.002.074	- 972.024	- 940.447	- 907.267	- 872.401	- 835.763	- 797.265	- 756.810	- 714.301	- 669.632
Résultat courant avant impôts	-	1.031.734	5.538.352	5.569.928	5.603.109	5.637.975	5.674.613	5.714.311	5.754.765	5.797.275	5.841.944
Impôts sur le bénéfice 30%		-	1.661.506	1.670.979	1.680.933	1.691.393	1.702.384	1.714.293	1.726.430	1.739.182	1.752.583
Bénéfice ou perte (résultat net)		- 1.031.734	3.876.846	3.898.950	3.922.176	3.946.583	3.972.229	4.000.018	4.028.336	4.058.092	4.089.361

COMPTE DE RÉSULTATS	Année 11	Année 12	Année 13	Année 14	Année 15	Année 16	Année 17	Année 18	Année 19	Année 20	Total
Produits d'exploitation	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	8.418.138	161.852.760
Chiffre d'affaires HT Biochar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Économie gasoil	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	1.908.138	38.162.760
Chiffre d'affaires HT vente de CC biochar	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000	6.510.000	123.690.000
Chiffre d'affaires HT vente de CC CDM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges d'exploitation	1.315.799	1.315.799	1.315.799	1.315.799	1.315.799	1.315.799	1.315.799	1.315.799	1.315.799	1.315.799	26.353.210
CAPEX (sans certification)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19.672.838
OPEX (sans certification)	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	1.294.009	25.880.190
Investissement certification carbone biochar											53.025
Investissement certification CDM											-
Charges certification carbone biochar	21.789	21.789	21.789	21.789	21.789	21.789	21.789	21.789	21.789	21.789	473.020
Charges certification carbone CER	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Excédent Brut d'Exploitation	7.102.339	7.102.339	7.102.339	7.102.339	7.102.339	7.102.339	7.102.339	7.102.339	7.102.339	7.102.339	135.499.550
Dotations aux amortissements	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 590.764	- 11.815.270
Résultat d'exploitation	6.511.576	6.511.576	6.511.576	6.511.576	6.511.576	6.511.576	6.511.576	6.511.576	6.511.576	6.511.576	123.684.280
Produits financiers	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges financières	622.694	573.372	521.544	467.083	409.855	349.720	286.531	220.131	150.359	77.042	12.146.314
Résultat financier	- 622.694	- 573.372	- 521.544	- 467.083	- 409.855	- 349.720	- 286.531	- 220.131	- 150.359	- 77.042	- 12.146.314
Résultat courant avant impôts	5.888.882	5.938.204	5.990.032	6.044.493	6.101.721	6.161.855	6.225.045	6.291.444	6.361.217	6.434.534	111.537.966
Impôts sur le bénéfice 30%	1.766.665	1.781.461	1.797.010	1.813.348	1.830.516	1.848.557	1.867.513	1.887.433	1.908.365	1.930.360	33.770.910
Bénéfice ou perte (résultat net)	4.122.217	4.156.743	4.193.023	4.231.145	4.271.204	4.313.299	4.357.531	4.404.011	4.452.852	4.504.174	77.767.056

Pallisco
Tableau 58 - Compte de résultats de la solution Arti, scénario A, broyeur Zhangsheng - ZSGS-218, certification biochar EBC

COMPTE DE RÉSULTATS	Année 0	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Année 7	Année 8	Année 9	Année 10
Produits d'exploitation		465.692	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292
Chiffre d'affaires HT Biochar		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Économie gasoil		465.692	465.692	465.692	465.692	465.692	465.692	465.692	465.692	465.692	465.692
Chiffre d'affaires HT vente de CC biochar		-	733.600	733.600	733.600	733.600	733.600	733.600	733.600	733.600	733.600
Chiffre d'affaires HT vente de CC CDM		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges d'exploitation	5.208.204	392.540	387.740	387.740	387.740	387.740	387.740	387.740	387.740	387.740	387.740
CAPEX (sans certification)	5.190.154	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OPEX (sans certification)		374.490	374.490	374.490	374.490	374.490	374.490	374.490	374.490	374.490	374.490
Investissement certification carbone biochar	18.050										
Investissement certification CDM	-										
Charges certification carbone biochar		18.050	13.250	13.250	13.250	13.250	13.250	13.250	13.250	13.250	13.250
Charges certification carbone CER		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Excédent Brut d'Exploitation	- 5.208.204	73.152	811.552	811.552	811.552	811.552	811.552	811.552	811.552	811.552	811.552
Dotations aux amortissements		- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153
Résultat d'exploitation		- 129.001	609.399	609.399	609.399	609.399	609.399	609.399	609.399	609.399	609.399
Produits financiers		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges financières		264.577	256.643	248.306	239.545	230.339	220.666	210.501	199.820	188.596	176.802
Résultat financier		- 264.577	- 256.643	- 248.306	- 239.545	- 230.339	- 220.666	- 210.501	- 199.820	- 188.596	- 176.802
Résultat courant avant impôts		- 393.578	352.756	361.093	369.854	379.059	388.733	398.897	409.579	420.802	432.596
Impôts sur le bénéfice	33%	-	116.409	119.161	122.052	125.090	128.282	131.636	135.161	138.865	142.757
Bénéfice ou perte (résultat net)		- 393.578	236.346	241.932	247.802	253.970	260.451	267.261	274.418	281.938	289.839

COMPTE DE RÉSULTATS	Année 11	Année 12	Année 13	Année 14	Année 15	Année 16	Année 17	Année 18	Année 19	Année 20	Total
Produits d'exploitation	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292	1.199.292	23.252.241
Chiffre d'affaires HT Biochar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Économie gasoil	465.692	465.692	465.692	465.692	465.692	465.692	465.692	465.692	465.692	465.692	9.313.841
Chiffre d'affaires HT vente de CC biochar	733.600	733.600	733.600	733.600	733.600	733.600	733.600	733.600	733.600	733.600	13.938.400
Chiffre d'affaires HT vente de CC CDM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges d'exploitation	387.740	387.740	387.740	387.740	387.740	387.740	387.740	387.740	387.740	387.740	7.759.602
CAPEX (sans certification)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.190.154
OPEX (sans certification)	374.490	374.490	374.490	374.490	374.490	374.490	374.490	374.490	374.490	374.490	7.489.802
Investissement certification carbone biochar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.050
Investissement certification CDM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges certification carbone biochar	13.250	13.250	13.250	13.250	13.250	13.250	13.250	13.250	13.250	13.250	269.800
Charges certification carbone CER	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Excédent Brut d'Exploitation	811.552	811.552	811.552	811.552	811.552	811.552	811.552	811.552	811.552	811.552	15.492.639
Dotations aux amortissements	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 202.153	- 4.043.067
Résultat d'exploitation	609.399	609.399	609.399	609.399	609.399	609.399	609.399	609.399	609.399	609.399	11.449.572
Produits financiers	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Charges financières	164.409	151.387	137.703	123.323	108.214	92.336	75.653	58.121	39.699	20.341	3.206.982
Résultat financier	- 164.409	- 151.387	- 137.703	- 123.323	- 108.214	- 92.336	- 75.653	- 58.121	- 39.699	- 20.341	- 3.206.982
Résultat courant avant impôts	444.989	458.012	471.696	486.075	501.185	517.062	533.746	551.278	569.700	589.057	8.242.591
Impôts sur le bénéfice 33%	146.846	151.144	155.660	160.405	165.391	170.631	176.136	181.922	188.001	194.389	2.849.936
Bénéfice ou perte (résultat net)	298.143	306.868	316.036	325.670	335.794	346.432	357.610	369.356	381.699	394.668	5.392.655



ANNEXE 8 : ANALYSE DES LOIS ENVIRONNEMENTALES ET RÉGLEMENTATIONS NATIONALES

L'implantation d'une unité de production de biochar en concessions forestières a nécessité l'analyse du cadre légal de chacun des pays visés par le projet. À cet effet, l'ensemble des lois, et autres documents règlementaires pouvant potentiellement affecter le projet sont explicités dans le présent document.

Les aspects légaux pour chacun des trois pays sont présentés ci-dessous. Ensuite, la thématique des crédits est abordée.

République du Congo

La constitution Congolaise donne une place importante à l'environnement, on y trouve de nombreux articles évoquant des dispositions relatives à sa protection. D'ailleurs, en son article 35, la Constitution de la République du Congo garantit à tout citoyen un environnement sain, satisfaisant et durable et l'oblige à le défendre.

Loi sur l'environnement

La gestion de l'environnement au Congo Brazzaville est régie par sa constitution et la **Loi N°003/91** du 23 Avril 1991 sur la protection de l'environnement. Les objectifs de cette loi sont (i) le renforcement de la législation sur l'exploitation des installations dangereuses, insalubres ou hostiles, la planification et le développement et pour protéger et préserver la faune et la flore, les ressources marines et fluviales, (ii) la gestion, l'entretien, la restauration et la protection des ressources naturelles, culturelles et historiques, et (iii) la prévention et la lutte contre les atteintes à l'environnement et à la santé des personnes ou de leurs biens.

Dans le cadre de la mise en œuvre de centrale de cogénération à vocation de production de biochar, les articles suivants sont à considérer :

- **Article 2** : « impose des études d'impact environnemental pour tout projet de développement économique ».
- **Article 39** : « Les dispositions de la présente loi sont applicables aux [...] installations [...] qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients soit pour la santé, la sécurité et la salubrité publique, soit pour l'agriculture, soit pour la conservation des sites ou monuments, soit pour la protection de la nature et de l'environnement ».

L'**Arrêté N°3196** du 14 juillet 2008 fixe la nomenclature des installations classées (cf. section 2.2.3).

1.1. Etudes d'impact

L'étude d'impact environnemental est obligatoire au Congo depuis le 17 juin 1986, conformément au **Décret N°86/775** qui en décrit les obligations et les procédures.

En effet, l'article premier stipule que « la réalisation de tout projet [...] d'implantation d'unité industrielle [...] sur le territoire national doit être précédée d'une étude d'impact sur l'environnement annexée au dossier technique de demande d'autorisation. Cette étude doit être réalisée par une agence ou une institution agréée. [...] ». La liste des projets soumis aux études d'impact est annexée à ce décret et expose notamment l'obligation pour les installations de 1^{ère} et 2^{ème} classes explicitées dans la loi 003/31 sur la protection de l'environnement.

Le décret N°86/775 a été remplacé par le **Décret N°2009/415** de novembre 2009 qui régit actuellement les modalités d'évaluation environnementale. Ce décret fixe la portée, le contenu et les modalités de l'étude et de l'avis d'impact environnemental et social. Des arrêtés ministériels pour définir les

catégories et activités soumises à l'EIES²⁷ ou à l'avis d'impact et préciser les zones sensibles sont toujours attendus.

Certains articles sont à considérer dans le cadre de la réalisation d'une étude d'impact pour la mise en œuvre d'un projet biochar :

- **Article 8** : fixe les catégories de projets pour lesquels une étude doit être réalisée
 - Catégorie A : activités à fort impact nécessitant une EIES.
 - Catégorie B : activités à impact moyen nécessitant un avis d'impact environnemental et social (**NIE**).
 - Catégorie C : activités à faible impact qui ne nécessitent ni EIES ni avis.
- **Article 9** : fixe les projets appartenant à la catégorie C
 - Projets entrepris à des fins domestiques ou artisanales et qui ne touchent pas les milieux sensibles ou n'ont pas de rejets dans l'environnement
 - Projets mis en œuvre en réaction à une situation d'urgence décrétée par les autorités nationales et qu'il est indispensable sans délai
- **Article 47** : Les frais inhérents au suivi environnemental et social, à l'évaluation et au contrôle, sont imputables au budget de l'Etat.

Outre le Décret N°2009/415, les textes de lois suivants détaillent les modalités de réalisation des évaluations environnementales :

- Le **Décret N°835/MIME/DGE** (septembre 1999) détaille les conditions d'agrément des agences spécialisées, des institutions et des bureaux d'études conduisant ces études ;
- Le **Mémorandum 1647/MDDEFE/CAB-DGE** (mai 2010) établit l'organisation et le fonctionnement du comité technique chargé de la validation des EIES ;
- Le **Mémorandum 2521 / MDDEFE / CAB-DGE** (juillet 2010) fixe les frais à payer pour la révision des TDR et des EIES par le comité de validation technique (Tableau 59).

Bien que l'arrêté ministériel déterminant les catégories soumises à l'étude d'impact ou à l'avis d'impact n'ait encore été produit, l'analyse du mémorandum 2521 permet de faire ressortir que ce projet appartient à la catégorie B (Tableau 59).

Tableau 59 - Coûts relatifs à l'analyse des rapports d'étude d'impact et à la catégorisation des installations classées.

Catégorie	Activités	TdR (FCFA)	Analyse des rapport EIES (FCFA)
A	- Exploitation pétrolière	2.000.000	- 8.000.000
	- Industries extractives non pétrolières		- 6.000.000
	- Industries chimiques		- 7.000.000
	- Autres		- 5.000.000
B	- Conditionnement et produits de l'eau, implantation d'usines et installations d'énergie thermique	1.000.000	- 3.000.000
	- Autres activités		- 2.000.000

Aucune directive n'existe sur l'audit environnemental. Cependant, la procédure d'audit environnemental est largement développée par certaines sociétés promotrices de projets au Congo ayant intégré à leur politique interne environnementale des dispositifs qui font intervenir l'audit environnemental.

²⁷ <https://www.eia.nl/fr/pays/congo+brazzaville/profil-eies>



Installation classée

Certains articles de La **Loi N°003/91** du 23 Avril 1991 sur la protection de l'environnement sont à considérer dans le cadre de l'implantation d'une unité de production de biochar. À commencer par l'article 39 précédemment décrit, suivi de :

- **Article 40** : Les installations visées à l'article 39 sont réparties en deux classes suivant les dangers ou inconvénients que peut présenter leur exploitation.
- **Article 41** : Constituent les installations de 1ère classe les installations dangereuses ou polluantes dont l'exploitation ne peut être autorisée qu'à la condition que des mesures soient prises pour prévenir les dangers ou inconvénients mentionnés à l'article 39. Le promoteur doit joindre à la demande d'autorisation un dossier comportant notamment une notification expresse sur la nature, la quantité, la toxicité des résidus de l'installation, le mode de traitement ou d'élimination prévu pour ces résidus et une étude d'impact sur l'environnement et dans certains cas une étude de danger. Ce dossier est soumis à une enquête publique à la charge de l'intéressé.
- **Article 42** : « Font partie des installations de 2ème classe, les installations qui ne présentent pas de dangers ou inconvénients graves visés à l'article 39, mais qui doivent néanmoins respecter les prescriptions générales destinées à assurer la protection des intérêts visés audit article. L'ouverture de ces installations fera l'objet d'une déclaration écrite agréée par le Ministre Chargé de l'Environnement ».
- **Article 46** : La nomenclature des installations classées, les procédures administratives et l'organisation des contrôles et les conditions d'autorisation, sont fixés par arrêté du Ministre Chargé de l'Environnement (cf. **Arrêté N°3196**).
- **Article 66** : L'exploitation d'une installation classée donne lieu au paiement de [...] taxe unique à l'ouverture, [...] redevance annuelle, [...] redevance superficielle annuelle (Tableau 60).

Tableau 60 - Récapitulatif des taxes et redevances pour l'exploitation d'une installation classée

Classe	Taxe à l'ouverture (F)	Redevance annuelle (F)	Redevance superficielle annuelle (F/m ²)
Classe 1	500.000 à 5.000.000	1.000.000 à 10.000.000	40 premier m ² : 1.000 50 m ² suivants : 500
Classe 2	250.000 à 500.000		Au-delà de 90 m ² : 100

L'**Arrêté N°3196** du 14 juillet 2008 porte sur la description des différentes installations classées, leurs effets sur l'environnement, leurs conditions d'ouverture ainsi que les taxes soumises. Une unité de biochar appartient à la catégorie des centrales thermiques et sera classée selon sa capacité, telle que décrite dans le Tableau 61. Le **Décret N°2022-307** du 13 juin 2022 fixe les conditions d'implantation, d'exercice et de contrôle d'une telle activité industrielle.

Tableau 61 – Nomenclature des installations classées de la Loi N°003/91 sur la protection de l'environnement, relative aux centrales thermiques

Capacité des centrales thermiques	Classement	Condition d'ouverture
> 32,5 MW	Classe 1	Autorisation ²⁸
< 32,5 MW	Classe 2	Déclaration

L'**Arrêté N°1450** du 18 novembre 1999 fixe les procédures administratives et les modalités d'organisation des inspections ainsi que des contrôles, de recouvrement des taxes et redevances sur les installations classées. L'article 17 stipule que « Chaque année, deux contrôles obligatoires doivent

²⁸ Décret n° 2022-307 du 13 juin 2022 fixant les conditions d'implantation, d'exercice et de contrôle de l'activité industrielle



être effectués aux frais de l'exploitant, par les Inspecteurs des installations classées des administrations centrales afin de : (i) vérifier les informations reçues, (ii) contrôler l'état de l'environnement immédiat de l'installation, le fonctionnement de certains équipements et la sécurité de l'installation ».

Rejets atmosphériques

Aucun texte de loi n'a encore été produit afin de réglementer la pollution atmosphérique. Certains articles de la Loi N°003/91 du 23 Avril 1991 sur la protection de l'environnement sont néanmoins à considérer dans le cadre de l'implantation d'une unité de production de biochar :

- **Article 24** : « Sont soumis aux contrôles périodiques obligatoires de l'Administration, les moteurs de véhicules automobiles, les appareils et équipements des installations à combustion fixes ou mobiles ».
- **Article 25** : « Les Ministres Chargés respectivement de l'Environnement et de l'Industrie déterminent par arrêté conjoint l'utilisation et les caractéristiques techniques des moteurs, des installations à combustion fixes ou mobiles et des carburants en vue de prévenir la pollution de l'atmosphère ».
- **Article 26** : « Des arrêtés pris en application de la présente loi fixent les conditions de production, d'importation et d'utilisation de produits susceptibles d'altérer la qualité de l'atmosphère et de nuire à la santé et à l'environnement. »
- **Article 27** : « La production, l'importation et l'utilisation des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, notamment les composés de chlore et de halons, sont réglementées conformément au protocole de Montréal²⁹ y relatif. »

Crédits carbone

Aucune loi spécifique aux crédits carbone issus de projets de séquestration ou de CDM n'existe à ce jour. La **Loi N° 33-2020** du 8 juillet 2020, soit le code forestier, mentionne néanmoins une procédure pour réglementer l'émission de crédits issus de projets REDD+ :

- **Article 179** : *Le droit de générer les crédits carbone et de les commercialiser est reconnu aux personnes physiques ou morales. Les crédits carbone peuvent être générés [...] par les promoteurs de projets de réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts [...], sur la base d'une autorisation délivrée par le Ministre en charge des forêts [...]*
- **Article 180** : *Dans les forêts appartenant à l'Etat, aux collectivités locales ou aux autres personnes morales de droit public, les crédits carbone générés appartiennent respectivement à l'Etat, à la collectivité locale ou à une autre personne morale de droit public concernée. [...] projet dirigé par une personne [...] de droit privé, celle-ci en est également co-proprétaire. [...] les titulaires des droits coutumiers et des droits d'usage sont Bénéficiaires des crédits-carbone.*
- Les **articles 181 à 185** détaillent les modalités pour l'octroi des crédits issus de projets REDD+.

Ces articles sont également cités dans les textes suivants, relatifs au mécanisme REDD+ :

- **Décret N°2015-260** du 27 février 2015 porte sur la création, l'organisation, les attributions et le fonctionnement des organes de gestion de la mise en œuvre du processus de réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la déforestation, à la dégradation des forêts avec inclusion de la gestion forestière durable, de la conservation de la biodiversité et de l'accroissement des stocks de carbone.

29

Le protocole de Montréal est relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone (1987). Cet accord international vise protéger la couche d'ozone stratosphérique en éliminant progressivement l'utilisation de substances qui contribuent à sa destruction.



- **Décret N° 2018-223** du 5 juin 2018 portant approbation de la stratégie nationale de réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la déforestation, à la dégradation des forêts avec inclusion de la gestion forestière durable, de la conservation de la biodiversité et de l'accroissement des stocks de carbone
- **Arrêté N° 113/MEF** du 08 janvier 2019 déterminant les principes sur le processus de réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la déforestation, à la dégradation des forêts avec l'inclusion de la gestion forestière durable, de la conservation de la biodiversité et de l'accroissement des stocks de carbone durable.

Une convention a également été signée avec différentes structures pour générer des crédits REDD+ dans le cadre d'un projet pilote de création de plantations forestières et agroforestières destinées à :

- (i) La production de bois et de commodités agricoles (plantations agroforestières et forestière)
- (ii) La constitution d'un puits de carbone naturel, sur les Plateaux Batéké, en RC.

Cette convention consiste en la **Loi N° 7-2022** du 26 janvier 2022 portant approbation de la convention de partenariat entre le Gouvernement de la République du Congo et les sociétés Total Nature Based Solution (TNBS), Congo Forest Company (CFC) et Forest Neutral Congo (FNC) pour la mise en valeur de la réserve foncière de l'Etat située au lieu-dit Léfini, département des Plateaux. Les crédits carbone générés sont également issus d'un mécanisme REDD+, ce qui n'est pas le cas des crédits visés à être générés dans le cadre du projet Biochar. Cependant, une des activités du projet s'avère être l'installation d'une unité de cogénération de 2,5 MW électrique à des fins de valorisation de tous les déchets de bois issus des processus industriels (Article 4). Cette activité pourrait alors potentiellement être génératrice de crédits autres que REDD+ et donc nécessiter une réglementation spécifique.

Gabon

Fortement engagé dans la lutte contre la crise climatique et l'érosion de la biodiversité depuis les années 1990, le Gabon s'est démarqué parmi les autres pays africain et est devenu une référence en termes de gestion de l'environnement. En 2021, le Gabon est le premier pays du continent dont les efforts pour lutter contre la déforestation ont été financièrement valorisés par un accord avec l'Initiative pour la forêt d'Afrique centrale (CAFI), un programme de l'ONU. Outre ses initiatives et réglementations environnementales nationales fortes, le pays est engagé dans de nombreux partenariats internationaux pour la protection de l'environnement et le développement de politiques carbone (PFBC, REDD+, etc.). Ces efforts en matière de lutte contre la déforestation ont mené le pays en octobre 2022 à être certifié au crédit carbone par la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), autorisant la mise sur le marché de 90 millions de tonnes de crédits carbone REDD+.

De plus, le Gabon encourage le développement des énergies renouvelables, à travers des investissements, incitations fiscales et des programmes de formation pour encourager l'adoption de technologies propres et l'efficacité énergétique.



Loi sur l'environnement

La **Loi cadre N°007/2014** relative à la protection de l'environnement en République Gabonaise concerne les EES, EIES, les études de dangers et les audits environnementaux :

- **Article 30** : « *Les travaux, ouvrages ou aménagements industriels, [...] qui risquent, en raison de l'importance de leur dimension ou de leurs incidences écologiques, de porter atteinte à l'environnement, doivent donner lieu à une étude d'impact préalable soumise à l'examen du Ministre chargé de l'environnement, et ce, conformément à la législation en vigueur et aux textes pris en application de la présente loi.*
Toutefois, cette étude n'est pas exigible si la portée et la durée de l'opération ainsi que les méthodes techniques utilisées ne sont pas susceptibles de produire des effets néfastes significatifs sur l'environnement. »
- **Article 87** : « *Au sens de la présente loi, peuvent être considérés comme facteurs potentiels de pollutions et nuisances : les installations classées, les déchets, les substances dangereuses, les biotechnologies, les bruits et vibrations, les odeurs, les lumières, les champs électromagnétiques* »
- **Article 88** : « *Les installations classées sont réparties en trois catégories dans une nomenclature établie par voie réglementaire. Elles sont soumises selon le cas à : déclaration préalable au ministre chargé de l'environnement [...], autorisation préalable du ministre [...], autorisation assortie de servitude du ministre [...]* »

Les textes réglementaires cités dans l'article 88 et comprenant la nomenclature des installations classées sont à ce jour inexistants.

Il existe en plus de cette loi, la prise en compte des considérations environnementales et sociales dans la prise de décision en vue d'un développement durable. Il s'agit de la **Loi N°002/2014** portant Orientation du Développement Durable en République gabonaise.

Etudes d'impact

Au Gabon, l'évaluation environnementale et les outils associés font l'objet de la **Loi cadre N°007/2014** précédemment présentée, spécifiquement l'article 30.

Le **Décret N°539** du 15 juillet 2005 constitue le cadre fondamental de l'évaluation environnementale au Gabon, portant réglementation des études d'impact. Ce décret décline les règles et les procédures applicables aux EIES et NIE ou EIE simplifié.

Il est pris en application des dispositions de l'article 67 de la **Loi N°16/93** du 26 Août 1993 relative à la protection et à l'amélioration de l'environnement.

- **Article 3** : fixe les projets nécessitant une étude d'impact : « *Sont obligatoirement soumis à une EIE, les projets relatifs : [...] les installations de traitement de déchets chimiques, toxiques, dangereux, industriels, [...]; aux activités relevant du secteur de l'énergie, notamment [...] les centrales thermiques et autres installations à combustibles fournissant une puissance calorifique de 50 mégawatts au moins ; aux activités et projets relevant du secteur industriel, notamment les installations industrielles de toute catégorie, [...] les industries de transformation de produits forestiers, l'aménagement des zones industrielles, [...]* »
- **Article 4** : « *Pour les travaux et projets d'aménagements autres que ceux énumérés à l'article 3 ci-dessus dont les inconvénients sont limités, la dispense de la procédure d'étude d'impact est*



subordonnée à l'élaboration d'une notice d'impact³⁰ indiquant les incidences éventuelles de ceux-ci sur l'environnement et les conditions dans lesquelles l'opération projetée satisfait aux préoccupations d'environnement ».

Le **manuel de procédure générale des EIE** vient en appui au Décret N°539 afin de renforcer le cadre législatif et réglementaire sur les impacts environnementaux liés aux projets mis en œuvre par les promoteurs dans différents secteurs d'activités. Il indique la manière dont le promoteur doit procéder pour obtenir une autorisation de l'administration compétente dans le domaine de l'environnement.

Le **guide** pour l'élaboration d'un dossier de demande d'autorisation d'exploiter les installations classées pour la protection de l'environnement complète le dispositif réglementaire en matière d'EIE.

Les audits environnementaux sont prévus par Loi-cadre N°007/2014 relative à la protection de l'environnement mais aucune procédure d'élaboration n'y est cependant mentionnée. La loi sur l'environnement au Gabon prescrit néanmoins des examens externes et indépendants des études.

Installation classée

La réglementation relative aux installations classées est reprise dans le **code de l'environnement** (Loi N°16/93), spécifiquement dans les articles suivants :

- **Article 48** : « *Les installations classées [...] sont soumises : (1) soit à autorisation préalable du ministre chargé de l'environnement, lorsqu'elles présentent des inconvénients graves pour la santé, la qualité de l'environnement ou la commodité du voisinage; (2) soit à déclaration préalable agréée par le ministre chargé de l'environnement, lorsqu'elles ne présentent pas des inconvénients graves mais doivent, en raison de la nature de leurs activités ou du lieu de leur implantation, obéir à la réglementation générale édictée en vue d'assurer la protection de l'environnement et la commodité du voisinage.* »
- **Article 49** : L'autorisation peut être accordée après l'étude d'impact (art 67-71).
- **Article 52** : S'il y a autorisation, l'installation doit disposer d'un plan d'urgence.

Cet article nécessite donc de déterminer la classe à laquelle appartiendra l'installation d'une unité de production de biochar.

Le **Décret N°39** du 10 janvier 1979 est relatif à la classification des industries et à la détermination des éléments à considérer dans l'évaluation de la pollution.

- **Article 1** : « *Les unités de production industrielle [...] sont classés en trois catégories suivant le degré de nocivité produit par ces éléments [...]* »
- **Article 2** : « *Les unités de production industrielle doivent, en fonction de leur capacité et du type de production, appartenir à l'une des trois catégories données en annexe.* »

Les annexes mentionnées dans l'article sont, à ce jour, inexistantes.

Le **Décret N°543** du 15 juillet 2005 fixe le régime juridique des installations classées. Les articles suivants doivent être considérés dans le cadre de ce projet :

- **Article 2** : « *Sont considérées comme installations classées, les usines, ateliers, dépôts, charniers et, d'une manière générale, les installations publiques ou privées, industrielles,*

³⁰ Dans le cas où une étude d'impact n'est pas requise, le promoteur se doit d'élaborer une notice d'impact consistant en une procédure allégée de l'étude d'impact. Elle concerne les projets qui ne présentent pas de risques graves pour l'environnement, mais qui, en raison de leurs activités et/ou du lieu de leur implantation, doivent obéir à la réglementation en matière de protection de l'environnement.



agricoles, minières, artisanales, commerciales ou autres susceptibles de nuire au voisinage, à la santé ou de porter atteinte à la qualité de l'environnement. »

Les articles 3 et 4 de ce décret stipulent que lorsque l'installation présente des inconvénients graves pour la santé, la qualité de l'environnement ou la commodité du voisinage, ou non, elle sera soumise à une autorisation du Ministre chargé de l'Environnement ou à une déclaration. Les articles 11 et 12 détaillent le contenu de la déclaration. Conformément à l'article 13, la classification finale de l'installation relève du Ministre, après instruction du dossier.

L'**Arrêté N°3** du 14 Avril 2006, fixe les modalités de contrôle des installations classées.

L'**Ordonnance N° 020 PR/2013** d'orientation relative au Développement Durable en République Gabonaise aborde également les études d'impact dans l'article 10 stipulant que « *Tout projet qui a [...] une conséquence sur le développement durable doit faire l'objet d'une étude d'impact de développement durable préalable. Ce projet doit, pour sa mise en œuvre, recevoir une autorisation préalable ».*

Rejets atmosphériques

Le **code de l'environnement** traite de la pollution de l'air dans son article 20 stipulant l'obligation de construire, exploiter et utiliser les installations de façon à réduire ou éviter la pollution de l'air. De plus, tout usager est tenu « *d'éviter d'émettre dans l'air, au-delà des seuils réglementaires, toute substance polluante [...] »*. L'article 21 précise que les conditions d'application de l'article 20 seront détaillées dans des textes d'application.

Le **Décret N°39** relatif à la classification des industries et à la détermination des éléments à considérer dans l'évaluation de la pollution détaille en article 6 la liste des « *éléments à prendre en considération pour évaluer les quantités de pollution atmosphérique* », à savoir :

- Les particules en suspension ;
- Les fumées ;
- Les oxydes de soufre et plus particulièrement : l'anhydride sulfureux et l'anhydride sulfurique ;
- L'oxyde de carbone ;
- Le monoxyde et le dioxyde d'azote ;
- L'ozone et les oxydants ;
- Le fluor ;
- Les hydrocarbures ;
- Les odeurs nauséabondes ;
- Les radio-isotopes ;

L'Article 7 de ce décret précise que la « *définition de ces éléments, la détermination de leurs valeurs admissibles, ainsi que la définition des méthodes de mesures correspondantes, seront données par des textes ultérieurs* ». Ces textes n'ont, à ce jour, pas été produits.

Une loi et deux décrets complètent cette réglementation :

- La **Loi N° 8/77** relative à la lutte contre la pollution ;
- Le **Décret N°541** sur l'élimination des déchets ;
- Le **Décret N°653** relatif à la préparation et la lutte contre les pollutions par les hydrocarbures et autres substances nuisibles.



En 2014, le Gabon a abrogé la **Loi N°002/2014** portant orientation du développement durable en République Gabonaise. Cette loi d'orientation esquisse le cadre de la politique nationale en matière de développement durable afin de poser les bases d'un marché national d'échange de crédits, sans fournir de détail quant à sa mise en œuvre. Elle vise spécifiquement à :

- Compenser les impacts négatifs sur le développement durable, notamment par l'achat de crédits de développement durable ;
- Créer des droits de développement durable et de crédits de développement durable qui constituent des biens incorporels pouvant faire l'objet de sûretés et qui peuvent être valorisés et négociés conformément à la réglementation en vigueur ;
- Disposer d'un registre national du développement durable pour l'enregistrement des politiques, programmes, projets, ainsi que les concessions, droits et crédits de développement durable
- Disposer d'un système d'institutions garantissant la fiabilité des échanges des crédits de développement durable ainsi que l'homogénéité des pratiques de développement durable sur l'ensemble du territoire national ;
- Promouvoir toute mesure permettant le maintien et l'amélioration des patrimoines de développement durable
- Mettre en œuvre toute mesure incitative, notamment en matière fiscale, visant à favoriser des actions et des politiques, programmes et projets de développement durable

Cette Loi est donc la base qui garantit la stabilité législative pour les investisseurs, témoignant de l'ambition du Gabon de préserver l'environnement et réduire ses émissions.

L'**Ordonnance N° 019/2021** du 13 septembre 2021 relative aux changements climatiques est le texte d'application de la Loi N°002/2014, détaillant les modalités pratiques de mise en œuvre et en permettant le déploiement. Cette ordonnance est communément appelée « **Loi climat** ».

La Loi climat prévoit la mise en œuvre d'un système national de quotas d'émissions de gaz à effet de serre et dont les émissions pourront être mesurées, déclarées et vérifiées avec précision ainsi que la mise en place d'un système de compensation carbone. Le cadre du marché de crédit carbone gabonais y est défini et la validation d'un Plan National d'Adaptation aux Changements Climatiques de façon régulière y est prévue.

- **Article 73** : Tout d'abord, il y est stipulé que tous les stocks de carbone existant ou les variations positives des stocks de carbone qui viennent à exister par un projet de réduction des émissions ou augmentation d'absorption des GES, programme ou activité au Gabon sont la propriété exclusive de l'Etat.
- **Article 74** : Cependant, l'Etat concède la propriété légale des changements positifs des stocks de carbone obtenus à la suite de projets de réduction des GES aux promoteurs desdits projets.
- **Article 75** : Néanmoins, l'Etat a droit à 20 % des crédits délivrés et issus de projets de réduction des émissions, réalisés conformément à un permis d'atténuation climatique et à la méthodologie applicable.

Les méthodologies approuvées sont décrites en article 78 de cette loi :

- Méthodologie de réduction des émissions approuvée par la CCNUCC ;
- Méthodologie Verified Carbon Standard ;
- Méthodologie Gold Standard ;
- Toute autre méthodologie admise par la pratique internationale et approuvée par le Ministre en charge du Climat.

Un organisme de gestion des enjeux climatiques a également créé pour commercialiser des crédits carbone à l'international et financer d'autres actions grâce aux bénéfices obtenus. Cette commercialisation ne pourra toutefois se faire que sur les réductions d'émissions ne rentrant pas dans les objectifs de la présente CDN, pour éviter un double comptage des émissions.

Cameroun

Lors de la COP26, le Cameroun a démontré son engagement en faveur de la séquestration carbone à long terme et est un pays pionnier dans l'intégration de la technologie du biochar dans sa stratégie climatique et de développement³¹.

Le projet d'implémentation d'une unité de production de biochar est en accord et est encouragé par la **Loi N°2013/004 du 18 avril 2013 fixant les incitations à l'investissement privé en République du Cameroun** qui promeut l'investissement privé et l'accroissement de la production nationale. Cette loi vise l'atteinte des objectifs nationaux prioritaires comme la lutte contre la pollution, la protection de l'environnement et le développement de l'énergie (**Article 14**).

Loi sur l'environnement

La **loi N°96/12** du 05 août 1996 portant Loi-cadre relative à la gestion de l'environnement fixe le cadre juridique général de la gestion de l'environnement, qui constitue un patrimoine commun de la nation. Cette loi a pour but de protéger et de préserver l'environnement dans une vision de développement durable. À cet effet, des stratégies, plans ou programmes nationaux sont élaborés.

Certains articles sont à considérer dans le cadre de la mise en œuvre d'un projet biochar :

- **Article 17** : « *Le promoteur ou le maître d'ouvrage de tout projet d'aménagement, d'ouvrage, d'équipement ou d'installation qui risque, en raison de sa dimension, de sa nature ou des incidences des activités qui y sont exercées sur le milieu naturel, de porter atteinte à l'environnement, est tenu de réaliser, [...] une étude d'impact permettant d'évaluer les incidences directes ou indirectes dudit projet [...]* ».
- **Article 51** : « (1) *L'enfouissement des déchets dans le sous-sol ne peut être opéré qu'après autorisation conjointe des Administrations compétentes qui fixent les prescriptions techniques et les règles particulières à observer. (2) L'enfouissement des déchets sans l'autorisation prévue à l'alinéa (1) du présent article donne lieu à un désenfouissement opéré par le responsable de l'enfouissement ou, après mise en demeure de l'Administration compétente, en collaboration avec les autres Administrations concernées* ».

Cependant, cette loi n'évoque pas la promotion de l'utilisation des déchets de bois à des fins énergétiques ou de génération de crédits carbone.

Etudes d'impact

La loi sur l'environnement susmentionnée détaille en son article 19³² que les catégories soumises à étude d'impact ainsi que les conditions dans lesquelles l'étude doit être réalisée sont fixées par un

³¹ [Glasgow COP26: Cameroon's Minister Presents Biochar, Pioneer Plant In Africa - The Post \(thepostnp.com\)](https://www.thepostnp.com/news/2016/06/23/glasgow-cop26-cameroon-s-minister-presents-biochar-pioneer-plant-in-africa/)

³² Article 19 : « (1) La liste des différentes catégories d'opérations dont la réalisation est soumise à une étude d'impact, ainsi que les conditions dans lesquelles l'étude d'impact est rendue publique sont fixées par un décret d'application de la présente loi. (2) L'étude d'impact doit comporter obligatoirement les indications suivantes : l'analyse de l'état initial du site et de l'environnement ; les raisons du choix du site ; l'évaluation des conséquences prévisibles de la mise en œuvre du projet sur le site et son environnement naturel et humain ; l'énoncé des mesures envisagées par le promoteur ou maître d'ouvrage pour supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement et l'estimation des dépenses correspondantes ; la présentation des autres solutions possibles et des raisons pour lesquelles, du point de vue de la protection de l'environnement, le projet présenté a été retenu »

décret d'application, le Décret N°2013/0171. L'article 20³³ de la loi sur l'environnement détaille ensuite la procédure de dépôt de l'étude d'impact et les délais à respecter par l'administration.

Le **Décret N°2013/0171** du 14 février 2013 fixant les modalités de réalisation des Etudes d'Impact Environnemental et Social permet la mise en application des EIES mentionnées dans l'article 17 de la Loi n°1996-12. Ce décret détermine les procédures, le contenu, l'élaboration, l'approbation et toutes les autres étapes liées à ces études.

L'**Arrêté N°00001/MINPEDED** du 8 février 2016 fixant les différentes catégories d'opérations dont la réalisation est soumise à une évaluation environnementale stratégique ou à une étude d'impact environnemental et social présente les différentes activités soumises à une EIES.

- **Article 4 :** « Les opérations ou activités suivantes sont soumises à une étude d'impact environnemental et social détaillée : [...] construction des centrales thermiques et autres installations à combustibles de puissance installée de plus de 10 mégawatts [...] ».
- **Article 5 :** « Les opérations ou activités suivantes sont soumises à une étude d'impact environnemental et social sommaire [...] »

Sont notamment cités :

- *Projet d'aménagement, de modification ou d'extension connexe à des installations ayant fait l'objet d'une étude d'impact environnemental et social détaillée ou d'un audit environnemental et social,*
- *La construction de centrales thermiques de puissance de 2 à 10 MW,*
- *La construction d'unités de production d'énergie électrique à base de biomasse de capacité supérieure à 3 MW.*

Quel que soit le scénario choisi, la capacité électrique est inférieure à 3MW alors que la capacité thermique se trouve entre 2 et 10 MW à l'exception d'un scénario. Dès lors, il y a de grandes probabilités que l'EIE à réaliser soit de type sommaire.

Les frais pour la soumission de l'étude d'impact à l'administration, le Fonds National de l'Environnement et du Développement Durable, sont détaillées dans le **manuel de procédure générale** des études d'impact et audits environnementaux (Tableau 62).

Tableau 62 - Coûts de soumission/dépôt d'une EIE

Type de frais	Coût (FCFA)
Soumission des TDR pour examen	2.000.000
Dépôt du rapport – EIE/AE sommaire	3.000.000
Dépôt du rapport – EIE/AE détaillé	5.000.000

Le **Décret N°2013/0172** du 14 février 2013 fixe les modalités de réalisation de l'audit environnemental et social.

Outre ces décrets, les textes de lois suivants reprennent les modalités de réalisation des évaluations environnementales :

- **L'Arrêté N°00004/MINEP** du 3 juillet 2007 fixant les conditions d'agrément des bureaux d'études à la réalisation des études d'impacts et audits environnementaux ;

33. Article 20 : « (1) Toute étude d'impact donne lieu à une décision motivée de l'Administration compétente, après avis préalable du Comité Interministériel prévu par la présente loi, sous peine de nullité absolue de cette décision. La décision de l'Administration compétente doit être prise dans un délai maximum de quatre mois à compter de la date de notification de l'étude d'impact. Passé ce délai, et en cas de silence de l'Administration, le promoteur peut démarrer ses activités. (2) Lorsque l'étude d'impact a été méconnue ou la procédure d'étude d'impact non respectée en tout ou en partie, l'Administration compétente, ou, en cas de besoin, l'Administration chargée de l'environnement requiert la mise en œuvre des procédures d'urgence appropriées permettant de suspendre l'exécution des travaux envisagés ou déjà entamés. Ces procédures d'urgence sont engagées sans préjudice des sanctions pénales prévues par la présente loi ».

- L'Arrêté N°00002/MINEPDED du 8 février 2016 définissant les canevas type des termes de référence et contenu de la notice d'impact environnemental.

1.2. Installation classée

La Loi N°98/015 du 14 Juillet 1998 régit les établissements classés dangereux, insalubres ou incommodes régit, dans le respect des principes de gestion de l'environnement et de protection de la République.

- **Article 2** : « Sont soumis aux dispositions de la présente loi, les usines, les ateliers, les dépôts, les chantiers, les carrières et, de manière générales, les installations industrielles artisanales ou commerciales exploitées ou détenue par toute personne physique ou morale, publique ou privée, et qui présentent ou peuvent présenter soit des dangers pour la santé, la sécurité, la salubrité publique, l'agriculture, la nature et l'environnement en général, soit des inconvénients pour la commodité du voisinage ».
- **Article 3** : « Les établissements classés dangereux, insalubres ou incommodes sont divisés en deux classes suivant les dangers ou la gravité des inconvénients inhérents à leur exploitation
 - a) La première classe comprend les établissements dont l'exploitation ne peut être autorisée qu'à la condition que des mesures soient prises pour prévenir les dangers ou les inconvénients visés à l'article 2 ci-dessus. Cette autorisation peut être subordonnée à l'implantation desdits établissements en dehors des zones d'habitation ou à leur éloignement des captages des cours d'eau, de la mer et des immeubles occupés par les tiers ;
 - b) La deuxième classe comprend les établissements qui, ne présentant pas des dangers et inconvénients importants pour les intérêts cités à l'article 2 ci-dessus, sont néanmoins soumis à des prescriptions générales visant à assurer la protection de leurs intérêts ».

Ces établissements doivent donc faire l'objet soit :

- D'une autorisation délivrée par le Ministre chargé des établissements classés (classe 1), délivrée avant implantation et exploitation (articles 4 à 8) ;
- D'une déclaration écrite adressée au même Ministre qui statue, des modalités fixées par voie réglementaire (classe 2), délivrée avant ouverture pour les établissements (Articles 9 à 11).

Peu importe la classe, un plan d'urgence propre à assurer l'alerte des autorités compétentes et des populations avoisinantes en cas de sinistre ou de menace de sinistre, l'évacuation du personnel, ainsi que les moyens pour circonscrire les causes du sinistre doit être établi par l'exploitant. Ce plan doit être agréé par les Administrations concernées qui effectuent un contrôle périodique du matériel prévu pour sa mise en œuvre (Article 12).

Les dispositions financières varient en fonction de la classe d'établissement et sont à charge des exploitants. Elles concernent la délivrance de l'autorisation ou de la déclaration ainsi que les frais d'inspection ou de contrôle périodique (Articles 21 à 23, Tableau 63). La taxe annuelle à la pollution y est présentée dans l'article 25.

Tableau 63 - Frais d'inspection et de contrôle des établissements de classe 1 et 2

Superficie (m ²)	Taux classe 2 (frs/m ²)	Taux classe 1 (frs/m ²)
0 à 10 inclus	10.000	20.000
10 à 50 inclus	200	400
50 à 100 inclus	120	240
100 à 200 inclus	60	120
200 à 1000 inclus	40	80
Plus de 1000	30	60



Le **Décret N° 99/818/PM** du 09 Novembre 1999 fixe les modalités d’implantation et d’exploitation des établissements classés dangereux, insalubres ou incommodes stipule. Le contenu et les conditions de dépôt de la demande sont précisés au sein de l’article 2 alors que ses annexes sont explicitées dans l’article 3. Les articles 6³⁴ et 7³⁵ détaillent la procédure de demande d’autorisation.

Ce même décret reprend les dispositions financières à considérer lors de l’implémentation d’une unité telle que décrite dans ce projet :

- Les frais de délivrance de l’autorisation et du récépissé de déclaration (article 27, Tableau 64) ;
- La taxe annuelle à la pollution (article 28, Tableau 65)

Tableau 64 - Prix du droit de délivrance de l'autorisation d'exploitation ou du récépissé de déclaration.

Type d'établissement	Prix (francs CFA)
Etablissement soumis à autorisation (classe 1)	500.000
Etablissement soumis à déclaration (classe 2)	200.000

Tableau 65 - Coefficient multiplicateur de la taxe annuelle à la pollution en fonction de la typologie et la quantité des rejets

Typologie des rejets	Quantité des rejets	Coefficient multiplicateur N
Pollution biodégradable		
Rejets liquides	$V < 10m^3/J$	$1 < N < 4$
	$V > 10m^3/J$	$N = 5$
Rejets solides	$Q < 1T/J$	$1 < N < 3$
	$Q > 1T/J$	$N = 4$
Pollution non (ou difficilement) biodégradable		
Rejets liquides	$V < 5m^3/J$	$5 < N < 8$
	$V > 5m^3/J$	$N = 8$
Rejets solides	$Q < 0,5T/J$	$5 < N < 7$
	$Q > 0,5T/J$	$7 < N < 9$
Pollution gazeuse		
Gaz à effet de serre	Quel que soit V	$N = 8$
Gaz CFC		$N = 10$
Particules		$N = 6$
Pollution par les rayonnements ionisants		
Générateurs de rayon X		$N = 10$
Radio nucléides		$N = 10$
Pollution Acoustique		
	$I < 100 \text{ DB}$	$N = 4$
	$I > 100 \text{ DB}$	$N = 6$

³⁴ Article 6 : (1) Dès l’ouverture de l’enquête, le ministre chargé des établissements classés communique pour avis un exemplaire de la demande d’autorisation aux administrations chargées de l’environnement, de la santé publique et, s’il y a lieu, de l’agriculture, de l’élevage et du développement industriel et commercial. Les administrations susvisées doivent se prononcer dans un délai de vingt (20) jours à compter de la date de saisine. Passé ce délai, leurs observations ne sont pas prises en considération. (2) Le ministre chargé des établissements classés prend un arrêté fixant la date de présentation et d’explication du projet aux populations par le promoteur de l’établissement, en présence des autorités administratives visées à l’article 4 ci-dessus. Le procès-verbal de cette cérémonie est dressé et signé par les commissaires-enquêteurs »

³⁵ L’article stipule une durée de l’enquête publique à 30 jours. Au-delà de cette période, les autorités administratives (i.e., préfet du département, sous-préfet de l’arrondissement et maire de la commune) adressent un certificat d’affichage et de non-opposition (en cas de non-objection des populations locales) ou, à défaut, les oppositions du public intéressé, au ministre chargé des établissements classés.



La **Loi N°98/022** du 24 décembre 1998 régit le secteur de l'électricité au Cameroun. Cette loi ne traite pas de la production de l'électricité à partir de la biomasse forestière mais laisse cette ouverture aux promoteurs.

Outre ces réglementations, les textes suivants sont potentiellement pertinents dans le cadre de l'organisation de l'installation de l'unité.

- Le **Décret 2014/2379/PM** du 20 août 2014 fixant les modalités de coordination des inspections des établissements classés dangereux, insalubres ou incommodes se réfère à la surveillance administrative et au contrôle technique des établissements classés.
- Le **Décret N°2000/464 PM** du 30 juin 2000 régissant les activités du secteur de l'électricité.

1.3. Rejets atmosphériques

Le **Décret N°2011/2582/PM** du 23 Aout 2011 fixant les modalités de protection de l'atmosphère au Cameroun s'applique à toutes les sources d'émissions polluantes dans l'atmosphère :

- **Article 8** : « (1) la mise en fonction de toute nouvelle source fixe³⁶ est subordonnée à l'obtention d'un permis environnemental (2) un arrêté du ministre chargé de l'environnement précise les modalités d'obtention, de suspension et de retrait dudit permis ».

Selon les définitions de l'article 3, l'installation d'une unité de production de biochar est en effet considérée comme source stationnaire.

- **Article 9** : « (1) [...] toutes unité de combustion fixe doit respecter les limites d'émission atmosphérique suivant les normes en la matière fixé par l'organisme chargé de la normalisation et de la qualité. (2) pour chacune des catégories d'industrie listée dans l'annexe du présent décret, le ministre en charge de l'environnement prend un arrêté fixant les limites d'émission des polluants atmosphériques contrôlés. »

Une unité de production de biochar correspond au 28^e élément cité en annexe dudit décret, à savoir usines d'électricité thermique.

L'ensemble des exigences relatives aux normes atmosphériques sont listées dans la **norme camerounaise NC 2858 : 2021**

Crédits Carbone

Différents textes de loi ont été analysés pour affiner la question de la gestion des crédits carbone au Cameroun. Cependant, aucune réglementation spécifique à la finance carbone n'existe à ce jour dans les lois relatives à la gestion de l'environnement (**Loi N°96/12**) et portant régime des forêts, de la faune et de la pêche (**Loi N°94/01**).

Néanmoins, le **décret n°2009/410** du 10 décembre 2009 porte sur la création, l'organisation et le fonctionnement de l'observatoire national des changements climatiques. Cette structure a pour but d'évaluer et de suivre les impacts socio-économiques et environnementaux des changements climatiques et de proposer des mesures de prévention, d'atténuation et/ou d'adaptation aux effets néfastes et risques liés à ces changements. Une de leurs actions consiste en la préparation et la validation du bilan climatique annuel du Cameroun, incluant l'estimation des stocks de carbone au niveau national (Articles 8 et 10), pouvant constituer une base pour l'élaboration de textes réglementant spécifiquement la finance carbone.

De plus, le terme « crédit carbone » apparaît dans l'**article 13** de La **Loi n° 2011/025** du 14 décembre 2011 portant valorisation des gaz associés : « L'opérateur peut solliciter le bénéfice du mécanisme de développement propre ou tout autre mécanisme similaire permettant d'obtenir des crédits carbone

³⁶ Une source fixe est un bâtiment, structure ou installation qui émet ou qui est susceptible d'émettre un polluant atmosphérique contrôlé.



auprès du Ministre chargé des questions environnementales ». Cependant, cette loi ne concerne pas le secteur ciblé par cette étude, mais uniquement les activités pétrolières (**article 4**).

Crédits

Accords de Paris

Les Accords de Paris sont un accord international sur le changement climatique adopté lors de la 21e Conférence des Parties (COP21) à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en décembre 2015. L'objectif principal de cet accord est de limiter l'élévation de la température mondiale bien en dessous de 2 degrés Celsius par rapport aux niveaux préindustriels et de poursuivre les efforts pour limiter l'élévation de la température à 1,5 degré Celsius.

Les pays signataires se sont également engagés à renforcer leurs efforts pour faire face aux impacts du changement climatique, à renforcer l'adaptation aux changements climatiques et à mobiliser des financements pour soutenir ces actions, à travers des stratégies nationales.

Contributions Déterminées Nationales (CDN) et autres stratégies nationales

Dans ce cadre, les CDN font référence aux engagements pris par les pays pour contribuer à l'atteinte de l'objectif global des Accords de Paris. Chaque pays a la responsabilité de soumettre sa propre CDN, qui peut comprendre des objectifs de réduction des émissions, des stratégies d'adaptation, des plans d'action, des politiques et des mesures spécifiques. Ces engagements doivent être régulièrement mis à jour et renforcés pour assurer la progression des efforts mondiaux de réduction des émissions et d'adaptation au changement climatique.

Les CDN du Cameroun, du Congo et du Gabon mettent en avant la pertinence de l'implantation d'une unité de production de biochar au sein de compagnies forestières par rapport à leurs stratégies nationales respectives. En effet, une telle unité permettrait la création d'énergie renouvelable et la diminution de la consommation de fioul au sein des entreprises, la valorisation des déchets bois, et la génération de crédits carbone grâce le biochar.

En effet, chaque pays aborde les **questions énergétiques** en fixant des objectifs spécifiques au secteur de l'énergie promouvant les énergies renouvelables. Les actions promues en matière d'énergie au **Cameroun** sont typiquement l'augmentation et la diversification de l'offre énergétique ainsi que l'amélioration de l'efficacité énergétique incluant une valorisation efficiente des ressources. La CDN du **Congo** prend en compte la production d'électricité (cogénération) à partir de résidus de biomasse et le remplacement des combustibles fossiles par du gaz naturel dans la volonté de parvenir à un développement durable allant vers la transition énergétique. Au **Gabon**, le remplacement des sources d'énergie à base d'hydrocarbures par des sources d'énergie renouvelables et l'amélioration de l'efficacité sont citées comme option pour générer des crédits de compensation carbone, dans une approche de séquestration nette par rapport aux émissions qui auraient été produites sans ces mesures, et donc une approche CDM.

La finance climat et la finance carbone ne sont abordées spécifiquement que dans la CDN du **Gabon**, fortement basée sur la génération de crédits de compensation carbone (Tableau 66).

Sous réserve de conditions devant être remplies pour que le Gabon puisse financer son développement durable et sa sortie de l'économie pétrolière et gazière, le pays s'engage en matière de financement climat et carbone à travers les textes suivants :

- Financement climat : *Le Gabon doit pouvoir accéder au financement international du climat sous la forme de paiements basés sur les résultats dans le cadre de l'Accord de Paris pour ses stocks existants de carbone forestier et de l'environnement et des services écosystémiques associés (c'est-à-dire la régulation du climat et des conditions météorologiques).*



- Financement carbone : *Le Gabon doit pouvoir accéder au financement international du carbone dans le cadre de l'Accord de Paris et des marchés volontaires qui reconnaissent la contribution historique et continue du Gabon à l'atténuation des crises climatiques et environnementales.*

Au **Cameroun**, la CDN ne mentionne pas cette thématique. Cependant, dans le rapport national sur le climat et le développement du Cameroun rédigé par les experts de la Banque Mondiale, l'impérativité du développement du marché de carbone est soulignée à plusieurs reprises (Banque Mondiale, 2022) :

- « *Les actions urgentes et coordonnées portées à la considération du Cameroun et des partenaires du bassin du Congo comprennent : [...] ; l'appui à la conception et au déploiement d'instruments de tarification et de marché du carbone pour faciliter la réduction des émissions ; [...]* » ;
- « *[...] Les forêts offrent une opportunité que le Cameroun ne doit pas manquer de saisir pour éliminer de l'atmosphère les émissions d'origine humaine, et bénéficier des dividendes, en utilisant des instruments innovants de tarification et de marché du carbone [...]* ».



Tableau 66 - Options pour les financements climat et carbone proposées dans la CDN du Gabon

	Paiements de pays à pays basé sur les résultats pour versements liés aux résultats pour la séquestration continue au-dessus des émissions sectorielles du Gabon de l'ITMO (article 5.2 de l'Accord de Paris)	Vente de pays à pays des résultats d'atténuation transférés au niveau international (article 6.2 de l'Accord de Paris)	Vente de crédits de compensations de carbone pour répondre aux obligations de conformité et aux obligations volontaires (article 6.4 de l'Accord de Paris ; marchés volontaires)
Finance climat			
Stock de carbone forestier existant , environnement et services écosystémiques associés (Régulation du climat et conditions météorologiques)	x		
Finance carbone			
Séquestration nette (option 1) Une partie des absorptions nettes de CO ₂ dans les forêts, au-delà de ce qui est nécessaire pour assurer la neutralité carbone du Gabon	x	x	x
Déforestation évitée (accroissement de la séquestration nette par rapport au BAU) (option 2) Émissions nettes de CO ₂ évitées grâce à la mise en œuvre des politiques de protection des forêts du Gabon par rapport à une base de référence 2000-2009, y compris le CO ₂ absorbé en raison de l'augmentation du stock forestier existant sur une base annuelle qui est attribuable à la déforestation évitée	x	x	x
Dégradation des forêts évitée (accroissement de la séquestration nette par rapport au BAU) (option 2) Émissions nettes de CO ₂ évitées grâce à la mise en œuvre des politiques de protection des forêts du Gabon par rapport à la période de référence 2000-2009.	x	x	x



Reboisement (accroissement de la séquestration nette) (option 2) Émissions de CO ₂ absorbées issues des activités de reboisement et de restauration	x	x	x
Réductions conformes à l'Accord de Paris, « équivalentes au Mécanisme pour un Développement Propre (MDP) » dans les secteurs de l'Énergie, de l'agriculture, de l'industrie et des déchets (option 2)	x		x

Le **Plan d'Action sur le Changement Climatique (2021 – 2025)** de la Banque Mondiale vise à aider à la conception et la mise en œuvre de la tarification du carbone en mentionnant que pour être efficace, il faut qu'elle fasse partie d'un large ensemble de mesures en lien avec d'autres problèmes liés au changement climatique. Pour ce faire, elle fournira une assistance technique aux pays.

La Figure 42 illustre les pays où les mécanismes de crédit carbone sont implémentés ou en cours d'élaboration³⁷. Les trois pays concernés, à savoir le Cameroun, la République du Congo et le Gabon n'ont pas encore de mécanismes développés.

Summary map of regional, national and subnational carbon crediting mechanisms

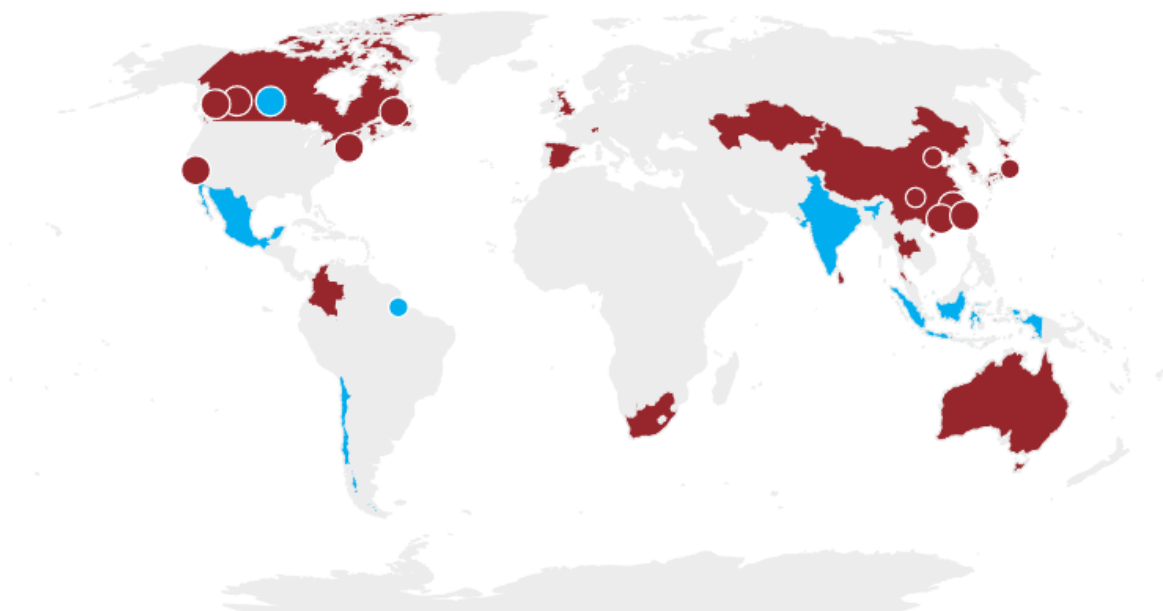


Figure 42 - Carte mondiale des mécanismes de crédits carbone. En rouge, mécanisme en application ; en bleu, mécanisme en cours de développement.

³⁷ https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/carbon_crediting



En dépit de fondements juridiques sur la génération de crédits carbone REDD+ au Cameroun, Congo et Gabon, l'amélioration du processus et la mise sur le marché effective de produits carbone nécessite la prise en compte de nombreux manquements dans les textes réglementaires nationaux. Il s'agira notamment de renforcer le dispositif juridique par des textes spécifiques aux domaines concernés soit :

- Les installations classées : catégorisation, guides de procédures et normes standards sur la qualité de l'air ;
- La génération de crédits carbone issus du biochar ainsi que CDM : définition, cadre légal, application, partage des bénéfices.

Bibliographie des aspects légaux

Aspects légaux Congo

- **Décret N°86/775 du 7 juin 1986** rendant obligatoire les études d'impacts sur l'environnement ;
- **Loi N°003/91 du 23 avril 1991** sur la protection de l'environnement ;
- **Arrêté N°885/MIME/DGE du 26 septembre 1999** fixant les conditions d'agrément pour la réalisation des études d'impacts sur l'environnement au Congo ;
- **Arrêté N°1450 du 14 novembre 1999** relatif à la mise en application de certaines dispositions sur les installations classées de la loi 003/91 sur la protection de l'environnement ;
- **Loi N°6-2000 du 20 novembre 2000** portant code forestier ;
- **Loi n° 14-2003** portant code d'électricité ;
- **Décret N°2009-415 du 20 novembre 2009** fixant le champ, le contenu et les procédures de l'étude et de la notice d'impact environnemental et social ;
- **Décret N°2015-260 du 27 février 2015** porte sur la création, l'organisation, les attributions et le fonctionnement des organes de gestion de la mise en œuvre du processus de réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la déforestation, à la dégradation des forêts avec inclusion de la gestion forestière durable, de la conservation de la biodiversité et de l'accroissement des stocks de carbone ;
- **Décret N° 2018-223 du 5 juin 2018** portant approbation de la stratégie nationale de réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la déforestation, à la dégradation des forêts avec inclusion de la gestion forestière durable, de la conservation de la biodiversité et de l'accroissement des stocks de carbone ;
- **Arrêté n° 113/MEF du 08 janvier 2019** déterminant les principes sur le processus de réduction des émissions de gaz à effet de serre liées à la déforestation, à la dégradation des forêts avec l'inclusion de la gestion forestière durable, de la conservation de la biodiversité et de l'accroissement des stocks de carbone durable ;
- **Décret n° 2022-307 du 13 juin 2022** fixant les conditions d'implantation, d'exercice et de contrôle de l'activité industrielle.

Aspects légaux Gabon

- **Décret n°39/PR-MRSEPN du 10 janvier 1979** relatif à la classification des industries et à la détermination des éléments à considérer dans l'évaluation de la pollution ;
- **Loi n°16/93 du 26 août 1993** relative à la protection de l'environnement ;



- **Décret n°653/PR/MTEPN du 21 mai 2003** relatif à la préparation et la lutte contre les pollutions par les hydrocarbures et autres substances nuisibles ;
- **Décret n°539/PR/MEFEPEPN du 15 juillet 2005** constitue le cadre fondamental de l'évaluation environnementale au Gabon, portant réglementation des études d'impact ;
- **Décret n°541/PR/MEFEPEPN du 15 juillet 2005** sur l'élimination des déchets ;
- **Décret n°543/PR/MEFEPEPN du 15 juillet 2005** fixe le régime juridique des installations classées ;
- **Ordonnance n°020 PR/2013 du 28 février 2013** d'orientation relative au Développement Durable en République Gabonaise ;
- **Loi n°002/2014** portant Orientation du Développement Durable en République gabonaise ;
- **Loi cadre n°007/2014** relative à la Protection de l'Environnement en République gabonaise ;
- **Ordonnance n°019/2021 du 13 septembre 2021** relative aux changements climatiques.

Aspects légaux Cameroun

- **Loi N° 96/12 du 5 août 1996** portant loi-cadre relative à la gestion de l'environnement ;
- **Loi N° 98/015 du 14 juillet 1998** relatif aux établissements classés dangereux, insalubres ou incommodes ;
- **Décret N° 99/818/PM du 09 Novembre 1999** fixant les modalités d'implantation et d'exploitation des établissements classés dangereux, insalubres ou incommodes ;
- **Décret N° 2005/0577/PM du 23 février 2005** sur les modalités de réalisation des études d'impact environnemental ;
- **Décret N° 2011/2582/PM du 23 août 2011** fixant les modalités de protection de l'atmosphère au Cameroun ;
- **Décret N° 2013/0171/PM du 14 février 2013** fixant les modalités de réalisation des études d'impact environnemental et social ;
- **Décret N° 2014/2379/PM du 20 août 2014** fixant les modalités de coordination des inspections des établissements classés dangereux, insalubres ou incommodes ;
- **Arrêté N°00001/MINEPDED du 08 février 2016** fixant les différentes catégories d'opérations dont la réalisation est soumise à une évaluation environnementale stratégique ou à une étude d'impact environnemental et social.

Mais également :

- **Contribution déterminée au niveau National – Actualisée (2021)**. République du Cameroun ;
- **Manuel de procédure générale des études d'impact et audits environnementaux (n.d.)**. Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature ;
- **Norme Camerounaise NC 2858 :2021 : Environnement – Exigences relatives aux rejets atmosphériques (2021)**. Agence des Normes et de la Qualité (ANOR) ;
- **Note technique sur le bois-énergie au Cameroun (2008)**. Equipe Technique du GTZ/PROPSFE/Antenne de la Province de l'Est-Cameroun ;
- **Plan d'Action sur le Changement Climatique, soutenir un développement vert, résilient et inclusif (2021 – 2025)**. Banque Mondiale ;

Rapport National sur le Climat et le Développement (2022). Banque Mondiale.