

Biochar for new forest concession model

Rapport intermédiaire



EticWood

Mai 2023

www.eticwood.com

Avenue de Tervueren, 204/1
1150 Bruxelles - Belgium



EticWood

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





Table des matières

1. Introduction	6
2. Évolution de la convention	7
2.1. Rappel des objectifs initiaux tels que prévus par la convention	7
2.2. Evolution du cadre du projet	7
2.2.1. Ajout de la composante énergétique	7
2.2.2. Ajout de nouveaux sites forestiers pour CIB et GSEZ	8
2.2.3. Intégration de la méthodologie carbone CDM (Clean Development Mechanism)	8
2.2.4. Evolution des résultats à atteindre et adaptation des livrables attendus	8
2.2.5. Evolution des partenariats	11
2.2.6. Ressources humaines mobilisées	13
3. Principales activités réalisées depuis le début de la convention	15
3.1. Recherche documentaire	15
3.2. Rencontres avec les principaux acteurs	16
3.3. Visite des sites forestiers des entreprises partenaires	20
4. Description des technologies permettant la production de biochar et d'énergie	21
4.1. Pyrolyse	22
4.2. Pyrogazéification	24
5. Élaboration des solutions techniques	25
5.1. Rappel des définitions, notions et unités	25
5.1.1. Puissance et énergie	25
5.1.2. Pouvoir calorifique	25
5.1.3. Charge de base	26
5.1.4. Plaquettes forestières	26
5.1.5. Volume de bois, volume apparent et foisonnement	26
5.1.6. Masse volumique et densité	26
5.1.7. Broyeur	27
5.1.8. Séchoir à plaquettes	27
5.2. Approche utilisée pour l'élaboration des solutions techniques	28
5.2.1. Établissement des scénarios	28
5.2.2. Schéma de base des flux de bois et d'énergies	30
5.2.3. Hypothèses et choix stratégiques	33
5.2.4. Sélection des constructeurs	38
5.3. Description des solutions techniques par site	39
5.3.1. CIB - Pokola	40
5.3.2. CIB - Enyéllé	44
5.3.3. CEB - Bambidie	49
5.3.4. GSEZ - Nkok	54
5.3.5. GSEZ - Lambaréné	59
5.3.6. Pallisco - Mindourou	64
5.4. Synthèse et bilan des solutions	71
5.5. Aperçu des prix catalogues de chaque solution	72
5.5.1. Prix généraux	72
5.5.2. Prix total par site et solution	72
6. Activités à venir	73
7. Annexes	74



FIGURES

Figure 1 – Températures pour les réactions thermiques de pyrolyse et pyrogazéification	21
Figure 2 – Curseur production d'énergie - production de biochar et technologies associées	21
Figure 3 - Le procédé de pyrolyse et ses produits (European Biochar Industry)	22
Figure 4 – Schéma du cycle organique de Rankine (crédit image : Enogia)	23
Figure 5 – Mécanismes de la gazéification	24
Figure 6 – Schéma des deux scénarios envisagés	29
Figure 7 – Schéma de base du procédé industriel de pyrolyse	31
Figure 8 - Schéma de base du procédé industriel de pyrogazéification	32
Figure 9 - Projection des flux de bois et consommations de gasoil du site de la CIB à Pokola en 2025	40
Figure 10 - Schéma de la solution 3R Systems du site de Pokola – Scénario A	42
Figure 11 - Schéma de la solution Arti du site de Pokola – Scénario A	43
Figure 12 - Flux de bois et consommations de gasoil du site de la CIB à Enyéllé, situation future	44
Figure 13 - Schéma de la solution 3R Systems du site d'Enyéllé – Scénario A	46
Figure 14 - Schéma de la solution Arti du site d'Enyéllé – Scénario A	47
Figure 15 - Schéma de la solution Energy&+ du site d'Enyéllé – Scénario B	48
Figure 16 - Flux de bois et consommations de gasoil du site de la CEB à Bambidie	49
Figure 17 – Schéma de la solution 3R Systems du site de la CEB – Scénario A	51
Figure 18 – Schéma de la solution Arti du site de la CEB – Scénario A	52
Figure 19 – Schéma de la solution Energy&+ du site de la CEB – Scénario B	53
Figure 20 - Flux de bois et consommations de gasoil du site de GSEZ à Nkok	54
Figure 21 - Schéma de la solution 3R Systems du site de Nkok – Scénario A	56
Figure 22 - Schéma de la solution Arti du site de Nkok – Scénario A	57
Figure 23 - Schéma de la solution Energy&+ du site de Nkok – Scénario B	58
Figure 24 - Flux bois et gasoil du site de GSEZ à Lambaréné	59
Figure 25 - Schéma de la solution 3R Systems du site le Lambaréné – Scénario A	61
Figure 26 – Schéma de la solution Arti du site de Lambaréné – Scénario A	62
Figure 27 – Schéma de la solution Energy&+ du site de Lambaréné – Scénario B	63
Figure 28 - Flux bois et gasoil du site de Pallisco à Mindourou	64
Figure 29 - Schéma de la solution 3R Systems du site de Pallisco – Scénario A	67
Figure 30 - Schéma de la solution Arti du site de Pallisco – Scénario A	68
Figure 31 - Schéma de la solution Arti du site de Pallisco – Scénario B	69
Figure 32 - Schéma de la solution Energy&+ du site de Pallisco – Scénario B	70
Figure 33 – Photographie des modules de pyrogazéification installés à Yangambi (crédit image : Energy&+)	78



TABLEAUX

Tableau 1 - Adaptation des résultats et livrables du projet	9
Tableau 2 - Adaptation de la mobilisation des ressources humaines mobilisées sur le projet au 30 avril 2023	14
Tableau 3 – Liste des échanges avec différents acteurs	17
Tableau 4 – Comparatif entre pyrolyse et pyrogazéification	21
Tableau 5 – Masses volumiques moyennes du bois frais hypothétiques des sites	34
Tableau 6 – Résultat du processus de sélection des différents constructeurs	38
Tableau 7 – Détails du scénario A pour le site CIB - Pokola	41
Tableau 8 – Détail des scénarios A et B du site de la CIB à Enyéllé.....	45
Tableau 9 – Détails des scénarios A et B site de la CEB.....	50
Tableau 10 – Détail du scénario A du site de la GSEZ à Nkok	55
Tableau 11 – Détails des scénarios A et B du site de la GSEZ à Lambaréné.....	60
Tableau 12 – Scénarios A et B site de Pallisco.....	65
Tableau 13 – Prix des équipements de pyrolyse, pyrogazéification et broyeur	72
Tableau 14 – Prix des équipements	72

ANNEXES

ANNEXE 1 : Présentation des constructeurs de pyrolyseurs.....	74
ANNEXE 2 : Présentation des constructeurs de Pyrogazéificateurs.....	78
ANNEXE 3 : Comparatif des constructeurs de broyeurs	80
ANNEXE 4 : Calendrier de la mission	81
ANNEXE 5 : Questionnaire de collecte de données	83



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.

Le présent rapport, a pour principale ambition d'évaluer la faisabilité technique de solutions associant la production de biochar et d'énergie, à partir de déchets de scierie, pour chaque entreprise partenaire.

Le rapport se compose de trois parties essentielles :

1. Une description de l'évolution des objectifs et des activités du projet afin de répondre à la demande des entreprises forestières partenaires d'inclure un aspect « énergétique », non prévu initialement ;
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 (constructeurs et modèles) 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 ;
 - e. Les prix « catalogue » de l'ensemble des équipements présentés et le coût total matériel de chaque solution par site.

Une synthèse des principales solutions et de leur performance proposée. Un chapitre complémentaire présentant les différents prix catalogue des composants et coût de chaque solution est proposé en fin de document.

Pour rappel, ce rapport est un rapport intermédiaire, il sera complété d'un rapport de synthèse évaluant la faisabilité économique des solutions envisagées, les potentialités de certification carbone (sur les méthodologies biochar et *Clean Development Mechanism* – voir section 2.2.3), la génération de crédits carbone associée ainsi que les modalités de valorisation agronomique du biochar.



2. ÉVOLUTION DE LA CONVENTION

2.1. RAPPEL DES OBJECTIFS INITIAUX TELS QUE PREVUS PAR LA CONVENTION

Le projet « Biochar for new forest concession model », tels que prévus par le contrat C243, était focalisé sur la production de biochar, à partir de déchets de scierie, en lien avec la génération de crédit carbone associée et l'étude des modalités d'utilisation de biochar dans une perspective agronomique.

L'**objectif général** du projet visait ainsi à produire des rapports technico- stratégiques sur la production et la valorisation de biochar à destination des entreprises forestières partenaires.

Les objectifs spécifiques de l'intervention, étaient les suivants :

- Caractériser les produits transformables en biochar ;
- Identifier les techniques industrielles de production de biochar adaptée aux différents contextes et leurs coûts respectifs (des mix biochar-engrais minéraux). Ceux-ci seront étudiés et optimisés selon l'algorithme simplex d'une programmation linéaire qui tiendra compte des contraintes de coûts d'accès variables, aux composantes d'une formule la plus efficiente ;
- Identifier les différentes utilisations envisageables du biochar et les marchés associés potentiels ;
- Définir les modalités de génération et de certification des crédits carbone ;
- Identifier des investisseurs privés pour l'achat des crédits carbone ;
- Mettre en place un business plan par entreprise pour un projet carbone axé sur le biochar (y compris son impact sur la réduction de l'agriculture sur brûlis sur les forêts naturelles) ;
- Mettre en évidence les avantages du biochar pour les sols équatoriaux.

2.2. EVOLUTION DU CADRE DU PROJET

Le projet ayant débuté dans un contexte de crise énergétique et de flambée des prix des hydrocarbures, l'intérêt des entreprises partenaires pour la production de « biochar » par pyrolyse a rapidement évolué vers un intérêt plus marqué sur le potentiel de production « énergétique » de cette technologie.

2.2.1. Ajout de la composante énergétique

Tel que présenté dans le rapport d'activité couvrant la période de juin à septembre 2022 et à la demande des entreprises forestières, ETICWOOD a adapté son cadre de travail pour explorer le potentiel de production d'énergie associé à la production de biochar.

Dans ce sens, les possibilités de récupération et de conversion de chaleur générée par la pyrolyse en électricité moyennant l'utilisation d'un ORC (dispositif permettant de convertir de la chaleur en électricité, voir section 4.1) ont été explorées. La technologie de pyrogazéification a ensuite été ajoutée au champ de l'étude (voir section 4.2).

Ces ajustements, réalisés dès le début du projet et sans incidence de prix sur le montant de la convention, ont notamment permis d'adapter les questionnaires d'enquête des missions de terrain afin d'y intégrer les niveaux de consommation en hydrocarbure et les coûts énergétiques des entreprises.

2.2.2. Ajout de nouveaux sites forestiers pour CIB et GSEZ

Il était initialement prévu de n'étudier qu'un seul site par entreprise partenaire.

Toutefois, afin de répondre aux demandes des entreprises, un deuxième site a été étudié pour CIB et GSEZ. Ces sites additionnels ont requis une extension des visites de terrain et un travail d'analyse supplémentaires qui ont été assumés sur les fonds propres d'ETICWOOD.

2.2.3. Intégration de la méthodologie carbone CDM (Clean Development Mechanism)

L'intégration de la composante énergétique permettra de diminuer les consommations en gasoil des groupes électrogènes utilisés pour alimenter les sites.

Le remplacement d'énergie fossile par de la biomasse pour la production d'énergie est reconnue comme un « Mécanisme de Développement Propre » (*Clean Development Mechanism - CDM*), prévu par un standard de certification carbone, disposant d'un ensemble de méthodologies permettant de quantifier les réductions d'émission et la génération de crédit associés.

ETICWOOD a donc également élargi le champ d'application de l'étude sur les crédits carbone issus des CDM afin de consolider le montage financier des projets.

2.2.4. Evolution des résultats à atteindre et adaptation des livrables attendus

Au regard de l'extension du périmètre de l'étude, un ajustement des résultats et des livrables attendus par le projet doit être réalisé et de nouveaux résultats attendus doivent être définis.

Le Tableau 1 décrit ainsi le statut (maintenu, ajouté ou adapté) des résultats et livrables initialement prévus par la convention, et ajoutés par l'extension du périmètre de l'étude. Ce tableau indique également à quel niveau le lecteur pourra retrouver les informations associées : dans le rapport d'activité juin-sept 2022, dans le présent rapport intermédiaire (avec la référence aux chapitres concernés), et / ou dans le prochain rapport de synthèse.

Tel qu'indiqué au Tableau 1, la seule activité qui devra être adaptée et ne pourra pas être conduite telle que prévue initialement est le test de terrain. Cette activité était néanmoins considérée comme une activité complémentaire décrite dans le résumé de projet et non indiquée formellement dans les activités et résultats attendus du programme.

Le budget prévu initialement pour ce test était de 2.000 € sans indication des ressources humaines mobilisées sur le test. ETICWOOD propose de réallouer ce budget à la mobilisation additionnelle des ressources humaines mobilisées sur le projet (voir section 2.2.6).

Etant donné les difficultés rencontrées pour l'importation de biochar au Cameroun depuis l'Europe, la durée trop limitée pour mesurer l'effet du biochar sur des cultures pérennes (une année de projet), ainsi que la priorité donnée par les entreprises sur les volets énergétiques plutôt que l'utilisation agronomique du biochar, il est proposé de remplacer cette activité par la capitalisation d'un test de terrain réalisé par ETICWOOD en Côte d'Ivoire (projet de restauration forestière dans la Forêt d'Agbo) et par une revue bibliographique.

Tableau 1 - Adaptation des résultats et livrables du projet

ID	Proposition d'ajustement des résultats attendus et contenu des livrables du projet	Statut	Réf. Livrable
1	Etude et description des gisements disponibles	Maintenu	Rapport d'activité juin-sept 2022 + \$3.3 + \$5.3
2	Identification de la solution technique afin d'établir une installation industrielle de production de biochar :		
	○ Identification de l'équipement de pyrolyse qui correspond à la biomasse disponible par secteur	Maintenu	Rapport d'activité juin-sept 2022 + \$4.1 + \$5.2.4 + \$5.3
	○ Description détaillée du scénario biochar avec « bonus énergie »	Ajouté	\$5.2.1.1
	○ Descriptif détaillé de composants, des flux, des hypothèses de travail et des formules utilisées (bois / énergie / chaleur)	Ajouté	\$5.2.2 + \$5.2.3
	○ Analyse des coûts	Maintenu	\$5.4 + Rapport de synthèse
	○ Logistique de transport	Maintenu	Rapport de synthèse
	○ Logistique d'établissement	Maintenu	Rapport de synthèse
	○ Modalités de mélange du biochar avec des engrais	Maintenu	Rapport de synthèse
3	Identification de la solution technique afin d'établir une installation industrielle de production d'énergie		
	○ Identification de l'équipement de pyrogazéification adapté à la biomasse disponible par secteur	Ajouté	\$4.2 + \$5.2.4 + \$5.3
	○ Description détaillée du scénario	Ajouté	\$5.2.1.2
	○ Descriptif détaillé de composants, des flux, des hypothèses de travail et des formules utilisées	Ajouté	\$5.2.2 + \$5.2.3
	○ Analyse des coûts	Ajouté	\$5.4 + Rapport de synthèse
4	Identification des utilisations finales potentielles pour la production de biochar		
	○ Distribution aux agriculteurs locaux dans la périphérie des concessions forestières	Maintenu	\$3.1+ Rapport de synthèse
	○ Distribution / vente aux plantations industrielles	Maintenu	\$3.1+t \$3.2 + Rapport de synthèse
	○ Exportation de biochar vers l'Europe.	Maintenu	\$3.2 + Rapport de synthèse
5	Exigences de la certification carbone biochar		
	○ Calcul de réduction des émissions par l'arrêt de la combustion des déchets et par la séquestration du biochar dans le sol	Maintenu	Rapport de synthèse
	○ Garanties sociales	Maintenu	Rapport de synthèse
	○ Conditions d'applicabilité	Maintenu	Rapport de synthèse
	○ Exigences des standards	Maintenu	Rapport d'activité juin-sept 2022 + Rapport de synthèse
6	Feuille de route pour la certification carbone « biochar »		
	○ Procédures et coûts de la certification carbone	Maintenu	Rapport de synthèse



ID	Proposition d'ajustement des résultats attendus et contenu des livrables du projet	Statut	Réf. Livrable
	○ Production de crédits carbone et potentiels revenus	Maintenu	Rapport de synthèse
7	Montage de business plan pour un projet carbone axé sur biochar	Maintenu	Rapport de synthèse
8	Exigences de la certification CDM	Ajouté	Rapport de synthèse
9	Adaptation des <i>business plans</i> pour un projet carbone axé sur énergie	Ajouté	Rapport de synthèse
10	Mettre en évidence les avantages du biochar sur les sols équatoriaux		
	○ Revue bibliographique et description de projets similaires, axés sur le biochar, certifiés par des standards tels que Verra, EBC et Puro.earth	Maintenu	Rapport de synthèse
	○ Analyse financière : coûts et revenus	Maintenu	Rapport de synthèse
	○ Aperçu de la stratégie climatique pour les secteurs identifiés	Maintenu	Rapport de synthèse
	○ Avantages du biochar pour l'action climatique	Maintenu	Rapport de synthèse
	○ Contribution du biochar aux objectifs des certifications PEFC et FSC.	Maintenu	Rapport de synthèse
	○ Activité complémentaire – test terrain au Cameroun	Adapté	-

2.2.5. Evolution des partenariats

En lien direct avec l'évolution des résultats et du champ d'application de l'étude, une évolution des partenariats a été requise.

En effet, il était prévu que FORLIANCE, entreprise spécialisée dans la gestion et le négoce de crédits carbone, soit le principal partenaire technique d'ETICWOOD pour la réalisation de ce projet. Néanmoins il s'est avéré que FORLIANCE ne disposait pas d'une expertise technique sur la production de biochar et n'avait pas d'expérience quant à la production d'énergie associée à la production de biochar. En outre, les connaissances en lien avec les méthodologies biochar, le réseau d'investisseurs et l'expertise de l'entreprise South Pole (voir ci-dessous) s'avéraient plus pertinents pour la présente étude.

Le partenariat initial a donc été adapté au travers de l'incorporation :

- De la société **Sense Engineering**, spécialisée dans l'audit énergétique, les réseaux de chaleur, la cogénération et le développement de solution industrielles ;
- **South Pole**, leader mondial dans le financement et le développement de projet carbone présentés ci-dessous.

Par ailleurs et en lien avec l'expertise opérationnelle, la certification et le marché du biochar, ETICWOOD a monté « **Prise de Terre®** »¹, centre pilote de Recherche et Développement axé sur le biochar en Belgique.

Enfin, les sociétés Alpicam et Rougier ont également demandé à intégrer le projet.

Intervention de Sense Engineering

Créé en 2012 par Gerald Senden, le cabinet Sense Engineering a pour ambition de proposer un ensemble de services, depuis la phase de diagnostic jusqu'à la mise en service d'installations industrielles, en passant par l'étude de faisabilité, l'engineering, l'acquisition et la gestion de chantier.

L'activité de l'entreprise intègre également la gestion environnementale et la gestion de projets industriels de tout secteur.

Sense Engineering est le second bureau wallon spécialisé dans l'optimisation énergétique en industrie. Ses principales références en lien avec la valorisation de biomasse en énergie sont les suivantes :

- Une étude faisabilité pour une chaudière biomasse de 10MW pour le groupe GSK ;
- Différentes études de faisabilité pour Nekto, Atelier Delcourt, Orval, 3B Fibreglass, Atelier de Tertre, Abbaye de Maredsou, PeterMueller,...
- L'installation d'une chaudière plaquette à l'abbaye de Maredsou ;
- Le dimensionnement d'une unité de cogénération de 100 MW pour un fabricant de panneaux ;
- Le dimensionnement d'un réseau de distribution de chaleur pour une cogénération de 15MW à la paletterie François à Virton ;
- La participation à la conception d'une unité pilote de gazéification bois pour Xylowatt.

L'expertise de Sense Engineering a été mobilisée pour fournir un ensemble de conseils sur le développement de l'approche (Chapitre 5.2) incluant l'établissement des scénarios, le développement des schémas de base, les hypothèses et choix stratégiques mais également pour valider les solutions techniques retenues et leurs performances / résultats respectifs (Chapitre 5.3).

¹ [Prise de Terre | Produire de l'énergie et stocker du carbone](#)



Intervention de South Pole

South Pole est une entreprise qui développe et finance des projets dans le monde entier qui réduisent les émissions de carbone, protègent la biodiversité et apportent des avantages réels aux communautés locales.

South Pole dispose d'une grande expérience et propose une plateforme de marché de vente de crédits carbone. South Pole a d'ailleurs participé à la rédaction du document « [VM0044 Methodology for Biochar Utilization in Soil and Non-Soil Applications, v1.0](#) » de VERRA et se positionne donc comme spécialiste incontournable de ce type de projet.

South Pole et ETICWOOD ont en conséquence décidé de collaborer pour la mise en place du projet Biochar Afrique.

En ce sens, South Pole a conseillé ETICWOOD sur les aspects liés aux exigences et aux procédures de certifications avec le standard Verra, la confection des questionnaires d'enquête de terrain, mais également dans sa recherche d'investisseurs pour ce type de projet biochar en Afrique Centrale.

En complément, en cas d'intérêt marqué par une ou des entreprises partenaires pour une des solutions proposées, South Pole pourra proposer son accompagnement dans la mise en place du projet, depuis son étude de faisabilité interne jusqu'à la génération, la certification puis la vente de crédits sur le registre South Pole.

Prise de Terre®

ETICWOOD a investi, sur fonds propres, dans une unité de production de biochar et lancé l'initiative [Prise de Terre](#) en septembre 2022. Cette initiative propose les services suivants :

- Des solutions de recherche et développement :
 - o Réalisation de tests de transformation de matière organique d'origine végétale (résidus de culture, résidus d'élagage, etc.) ;
 - o Production de rapports de production incluant le rendement matière et les paramètres de process (température de pyrolyse, temps de production, taux d'oxygène) ;
 - o Analyses physico-chimiques du produit fini et du pouvoir de séquestration de carbone du biochar ;
 - o Accompagnement de tout autre projet de recherche et développement en lien avec la transformation de matière organique et la valorisation du biochar en résultant.
- Des solutions de compensation carbone locale :
 - o Proposition et mise en place de programmes de compensation carbone, à travers la séquestration de carbone par le biochar produit par Prise de Terre ;
 - o Valorisation des programmes de compensation carbone au travers du soutien à des projets agricoles locaux ;
- De la vente de biochar aux professionnels et particuliers.

En outre, ETICWOOD est membre du réseau International Biochar Initiative (IBI)², permettant ainsi un accès privilégié à de l'information et à un important réseau d'acteurs du biochar (équipementiers, producteurs de biochar, organismes de certification) au niveau international.

² [Home - International Biochar Initiative \(biochar-international.org\)](#)



ALPICAM/GRUMCAM a pour ambition de poursuivre le développement de projets structurants autour d'une exploitation responsable et d'approfondir une réflexion sur son impact environnemental et social. Une sous-filière optimisée « biochar » constituerait une première action concrète en faveur d'un modèle économique plus efficient, plus résilient et plus engagé face aux enjeux environnementaux actuels et futurs. Ainsi, l'entreprise souhaiterait agir rapidement sur sa consommation en énergie fossile en explorant, notamment, des solutions technologiques innovantes telles que la cogénération. Cette démarche s'inscrit également dans une volonté d'amélioration continue de ses performances d'exploitation, dans le cadre de son processus de certification FSC et un souci constant de réduction de son impact environnemental.

L'entreprise souhaiterait plus spécifiquement étudier le potentiel de production associée de biochar et d'énergie pour ses sites de Mindourou (sciage et base-vie) et de Douala (déroulage et sciage). A noter que le déroulage n'a pas été étudié dans la première phase de l'étude au vu des caractéristiques des déchets produits (faible épaisseur, foisonnement élevé, taux d'humidité, etc.).

ROUGIER GABON se distingue des autres entreprises forestières étudiées par son souhait de valoriser ses déchets d'exploitation (c'est-à-dire des déchets issus des chantiers forestiers) issus de l'UFA du Haut-Abanga.

Ainsi, l'étude de l'UFA du Haut-Abanga prendrait en compte plusieurs facteurs qui lui sont spécifiques :

- La valorisation des déchets des chantiers forestiers, visant à produire de l'énergie pour la base-vie, en remplacement d'un groupe électrogène d'une capacité de l'ordre de 350 kW consommant près d'un million de litres de gasoil par an et représentant un budget annuel de l'ordre du million d'Euro ;
- L'étude d'une solution de mobilisation des déchets forestiers (transport, logistique, préparation, stockage, mise à disposition à l'unité biochar du site) ;
- L'identification d'un broyeur adapté aux déchets forestiers ;
- Au regard de ces contraintes, l'UFA Haut-Abanga constituerait donc un cas particulièrement intéressant pour proposer des solutions de mobilisation et de valorisation de déchets de chantiers forestiers, adaptables à d'autres entreprises forestières.

Outre ce site reculé, ROUGIER GABON a également sollicité une étude portant sur son site industriel de sciage de Franceville.

2.2.6. Ressources humaines mobilisées

L'évolution du périmètre de projet a engendré une adaptation des ressources humaines prévues au contrat initial (Tableau 2).

Les principales adaptations ont été réalisées sur l'encadrement du programme, l'expertise en lien avec l'agriculture / agroforesterie et les aspects techniques liés aux aspects énergétiques.

Tel qu'indiqué au Tableau 2, les ressources humaines mobilisées à ce stade sont nettement supérieures aux prévisions initiales et demanderont encore à être mobilisées de façon significative pour la production du rapport de synthèse.

Néanmoins, cette mobilisation additionnelle est réalisée sur fonds propres d'ETICWOOD et sans incidence sur le prix de la convention.



Tableau 2 - Adaptation de la mobilisation des ressources humaines mobilisées sur le projet au 30 avril 2023

Ressources Humaines		Unité	Prévisions initiales du contrat		Réalisation au 30/04/23
			N tot	N à charge du Programme	
Experts initialement prévus	J. Laporte / J. Philippart - Coordination de projet – capitalisation – communication partenaires	ho.j	20	15	25
	B. Houters / J. Philippart - Experts forestiers - biomasse (mission de terrain – analyses - rapports)	ho.j	30	20	43
	M. d'Aspremont - Expert agriculture - agroforesterie (entretiens terrain - recherche bibliographique)	ho.j	60	55	10
	Expert biochar - valorisation biomasse - dimension outil pyrolyse	ho.j	55	45	adapté
	Expert biochar - finance climat - recherche investisseurs	ho.j	60	50	adapté
Experts mobilisés pour l'adaptation aux nouvelles attentes	M. Bouchat - Ingénieure civile - dimensionnement outils pyrolyse - pyrogaz - recherche investisseurs – salons - certification (15 jours/mois depuis aout 2023)	ho.j	-	-	135
	South Pole - Différents experts (formations, réunions, conseils certification - investisseurs)		-	-	10
	Sense Engineering - Gerald Senden		-	-	5
Sous-total RH			225	185	228



3. PRINCIPALES ACTIVITES REALISEES DEPUIS LE DEBUT DE LA CONVENTION

3.1. RECHERCHE DOCUMENTAIRE

Une des principales activités menées a été la recherche documentaire transversale et approfondie sur l'ensemble des sujets prévus et pertinents de cette étude. 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 5.2.3) et à la sélection des technologies industrielles (chapitre 5.2.4).

- **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 4.1) et de pyrogazéification (chapitre 4.2) ont été étudiés en détail. Les autres technologies de production d'énergie à partir de déchets bois appréhendées, ne permettant pas la production de biochar et donc en dehors du champ d'application de cette étude, ont été exclues.

- **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 voire des réunions en ligne ou en présentiel avec ces derniers (chapitre 3.2). 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 XXX. La teneur des échanges avec chaque constructeur est résumée au Tableau 3.

- **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 3.2). 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.

3.2. 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 à lors de la mission de terrain, à l'occasion du salon BIO360 dédié aux bioénergies, au biochar, à la bioéconomie et la décarbonation, organisé les 8 et 9 février 2023 à Nantes, ou encore lors de diverses réunions organisées dans les bureaux d'ETICWOOD à Bruxelles. Les échanges avec les autres acteurs se sont faits à travers des échanges d'email et des visioconférences.

Le Tableau 3 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 3 – Liste des échanges avec différents acteurs

Type d'acteur	Nom	Personne.s rencontrée.s	Modalité de rencontre	Thématiques abordées
Centre de recherche	CENAREST	Alfred Ngomanda (Commissaire général)	Mission de terrain	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	Intérêt éventuel pour le biochar
	PARSA – volet maraichage	Marcia Kibendo	Mission de terrain	
Agence de coopération	GIZ	Didier Bastin (Conseiller technique senior pour les projets forêt et environnement)	Mission de terrain	
Sociétés forestières	Rougier	Éric Chezeaux (directeur RSE et certifications)	Mission de terrain	Présentation du projet, intérêt éventuel pour l'étude
	SEFECCAM	Honorable Mathurin (président), Arnaud Tchokomeni (directeur des aménagements et de la certification)	Mission de terrain	
	Alpicam	Emmanuel Bon (directeur général) et Samuele Vitali (responsable production)	Mission de terrain	
Bureau d'études en foresterie et agroforesterie	FRM	Michel Gally (directeur exécutif Congo)	Mission de terrain	Intérêt éventuel pour le biochar
Société Agroalimentaire - Plantations de palmiers à huile	OLAM	Quentin Meunier (Vice-Président RSE et Développement Durable)	Mission de terrain	
Société minière – extraction de manganèse	COMILOG	Safi Virginius (direction générale)	Mission de terrain	
Négoce et distribution de produits chimiques pour l'industrie, l'agriculture et de l'élevage	La Gabonaise de Chimie	Charlie Gillot (directeur général)	Mission de terrain	
Distribution de fruits et légumes au Gabon et Cameroun	La clé des champs	Yane et deux maraîchers partenaires	Mission de terrain	

Type d'acteur	Nom	Personne.s rencontrée.s	Modalité de rencontre	Thématiques abordées
Production, transport et distribution de fruits et légumes au Cameroun	Compagnie fruitière	Gabriel Berges	Echange téléphonique	
Constructeurs de pyrolyseurs	Pyreg	Philipp Reichardt (directeur commercial)	Échanges emails	Spécifications techniques des modèles disponibles
	Pyrocore	Gilles Godissart (directeur commercial régional), Yves Désiront (CFO)	Réunion à Bruxelles, salon BIO360, échanges emails.	
	Beston	Alicia Wen et Ava Zheng (consultantes de projets)	Visioconférence, échanges emails	
	3R Systems	Egbert Hellwig (consultant technique)	Salon BIO360, échanges emails	
	Arti	Juan Marcos Cueva (directeur des ventes), Martina Leon (responsable des ventes)	Salon BIO360, échanges emails	
Constructeurs de de pyrogazéificateurs	Energy&+	Adrien Haller (CEO)	Visioconférence, salon BIO360, échanges emails	Spécifications techniques des modèles disponibles
	Syncraft	Marcel Huber (CEO), Fabian Isele (développeur de projets)	Visioconférence, salon BIO360, échanges emails	
Constructeurs de broyeurs	China Foma	Jason Guo (directeur général adjoint de la division outre-mer)	Échanges emails	Spécifications techniques des modèles recommandés
	Komptech	Christian Kulmer (directeur des ventes régionales)	Échanges emails	
	Morbark	James Kamau (commercial Afrique)	Échanges emails	
	Ropa	Bastien Leclercq (technico-commercial)	Salon BIO 360, échanges emails	
	Rotochopper	Andy Bulson	Échanges emails	
	Van Laecke Group	Geoffrey Verzele (vendeur)	Visioconférence, échanges emails	

Type d'acteur	Nom	Personne.s rencontrée.s	Modalité de rencontre	Thématiques abordées
	Vecotrade	Robert Königs (directeur)	Réunion à Bruxelles, téléphone, échanges emails	
	ZhangSheng	Aria Li (commerciale département outre-mer)	Échanges emails	
Standard certification biochar	EBC	Julia Winter (responsable opérationnelle)	Visioconférence, Salon BIO360, échanges emails	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	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	Fonctionnement et modalités de mise en vente
Investisseur en projets carbone	South Pole	Hannes Etter (responsable projets biochar), Adam Siphthorpe (responsable portefeuille de projets)	Visioconférence, Salon BIO360, échanges emails	Vision du marché, panel de projets, profil d'investisseurs, potentiel de cofinancement
Bureaux d'audit certification biochar et CDM	Tuv Nord	Gregor Kochaniewicz (consultant et auditeur), Anna Kröger (auditrice)	Visioconférence, échanges emails	Processus de validation et vérification pour la certification biochar et CDM
	Applus	Agustín Calle de Miguel (responsable technique CDM)	Échanges emails	



3.3. 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, établi préalablement, permettant de balayer l'ensemble des informations nécessaire à la bonne compréhension du contexte de chaque site et au développement des solutions techniques adaptées (chapitre 5.3). Ces informations portaient principalement 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 pu être obtenues au cours des différentes discussions tels 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.



4. 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 4.1 et 4.2.

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°C³.

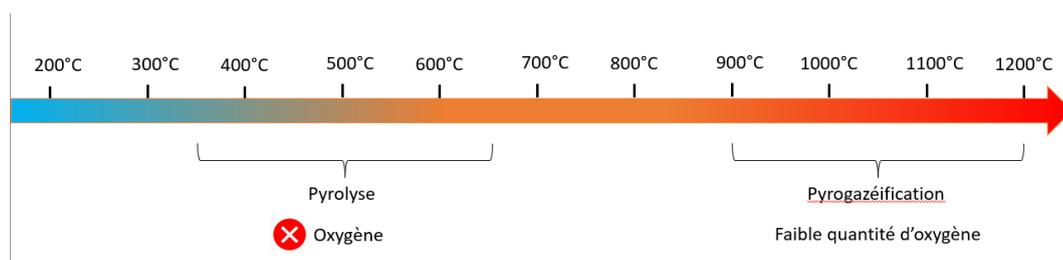


Figure 1 – Températures pour les réactions thermiques de pyrolyse et pyrogazéification

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 4.

Tableau 4 – 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 [Les principes de la pyrolyse et gazéification – Ademe](#)



4.1. 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.

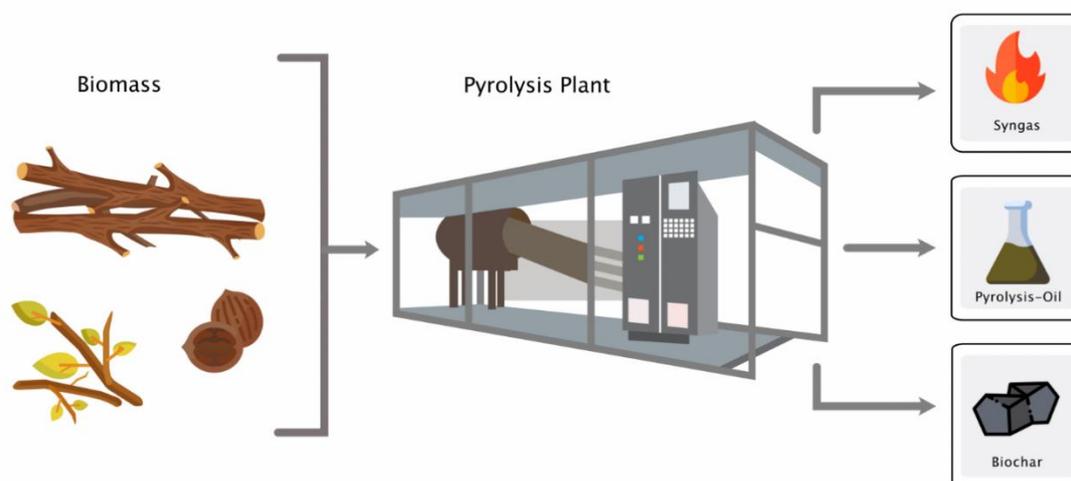


Figure 3 - Le procédé de pyrolyse et ses produits (European Biochar Industry⁴)

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.

⁴ [Biochar – The European Biochar Industry Consortium \(biochar-industry.com\)](http://biochar-industry.com)



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%^{5,6}.

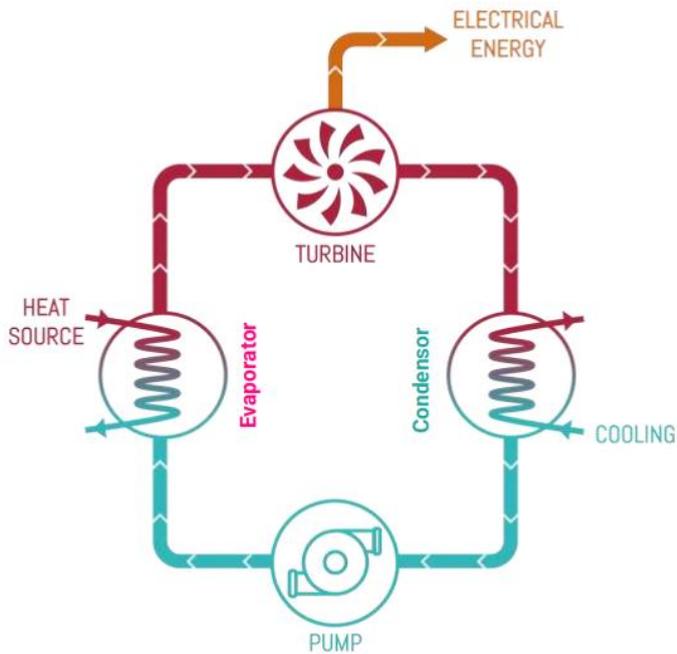


Figure 4 – Schéma du cycle organique de Rankine (crédit image : Enogia)

⁵ [Cycle ORC \(recuperation-chaleur.fr\)](http://recuperation-chaleur.fr)

⁶ [Cours en ligne et simulateur de thermodynamique appliquée \(mines-paristech.fr\)](http://mines-paristech.fr)



4.2. PYROGAZEIFICATION

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.

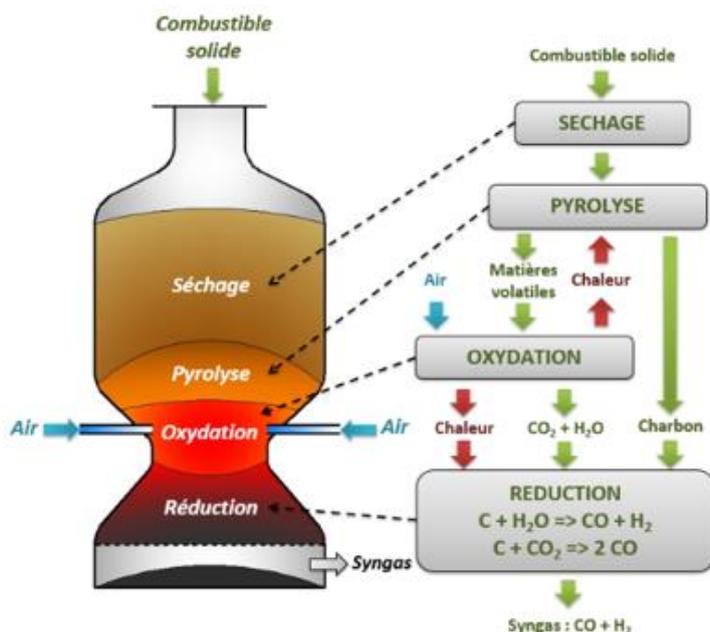


Figure 5 – Mécanismes de la gazéification⁷

⁷ [La Gazéification : Principes \(gazeification.info\)](http://LaGazéification:Principes(gazeification.info))



5. ÉLABORATION DES SOLUTIONS TECHNIQUES

5.1. RAPPEL DES DEFINITIONS, NOTIONS ET UNITES

5.1.1. 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].

5.1.2. 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/L⁸. 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/kg⁹ alors que ce même bois, à 50% d'humidité, disposera d'un pouvoir calorifique moyen de ~2,2 kWh/kg⁹.

⁸ [Pouvoir calorifique : définition, calcul & différence entre PCI et PCS \(selectra.info\)](http://selectra.info)

⁹ [Le bois énergie : définition, usages et chiffres clés \(connaissancesenergies.org\)](http://connaissancesenergies.org)

5.1.3. 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.

5.1.4. 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^{10,11,12,13}.

5.1.5. 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'une volume « réel » vers un volume « apparent » passe par l'utilisation d'un facteur de foisonnement.

5.1.6. Masse volumique et densité

La masse volumique est définie comme la masse d'un matériau par unité de volume (ρ = 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/m³ a une densité telle que définie par la formule ci-dessous :

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

¹⁰ [Plaquettes forestières - Bois de France \(preferezlesboisdefrance.fr\)](http://preferezlesboisdefrance.fr)

¹¹ [Plaquettes \(bois déchiqueté\) | FEBHEL](http://FEBHEL.com)

¹² [COPEAUX : Définition de COPEAUX \(cnrtl.fr\)](http://cnrtl.fr)

¹³ [Microsoft Word - Referentiel_PF.doc \(cibe.fr\)](http://cibe.fr)



5.1.7. 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 dépendent du design du broyeur. Pour des raisons de sécurité, certains broyeurs sont adaptés afin d'éviter l'éjection vers l'utilisateur des morceaux de bois trop court, telles les chutes d'éboutage.

Le broyeur de la marque Jenz considéré dans le cadre de cette étude est un broyeur de forte puissance (132 kW) et de grande capacité (120 m³ plaquettes/h), adapté aux dimensions des déchets de scierie (dosses, délignures, etc.) et permettant le broyage des chutes d'éboutage. Celui-ci est stationnaire et alimenté par un moteur électrique.

5.1.8. 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.



5.2. APPROCHE UTILISEE POUR L'ELABORATION 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-Engineering¹⁴, 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.

5.2.1. 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.

¹⁴ [Sense Engineering - Home \(sense-eng.be\)](http://sense-eng.be)

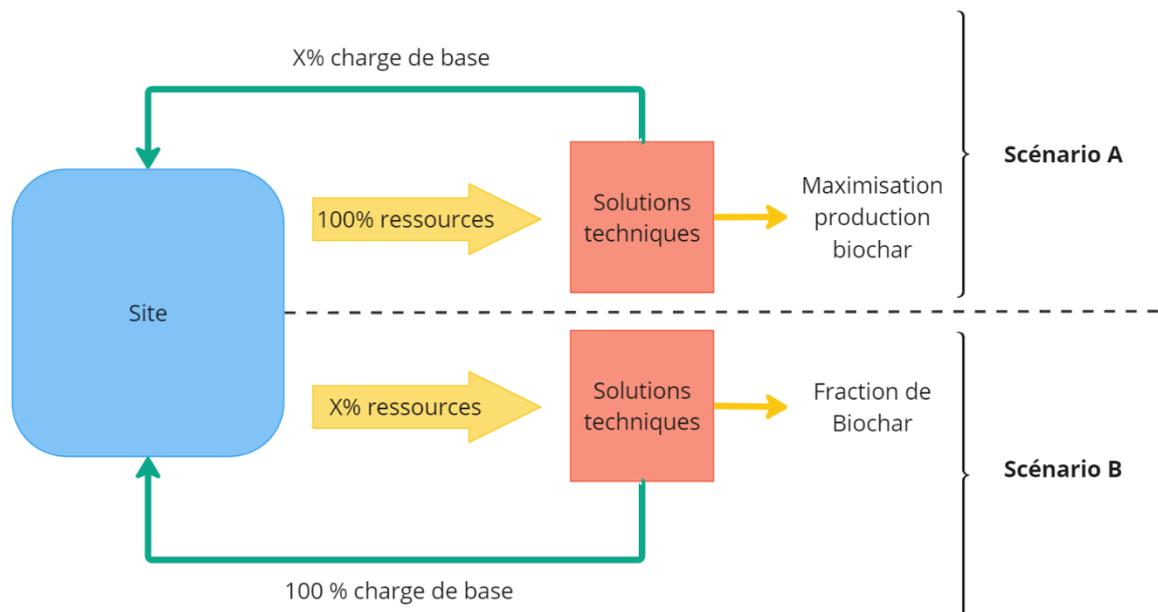


Figure 6 – Schéma des deux scénarios envisagés

Les flux matières et énergie sont schématisés de façon simplifiée pour chacun des sites à la section 5.2.3. 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.



5.2.2. 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.

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.

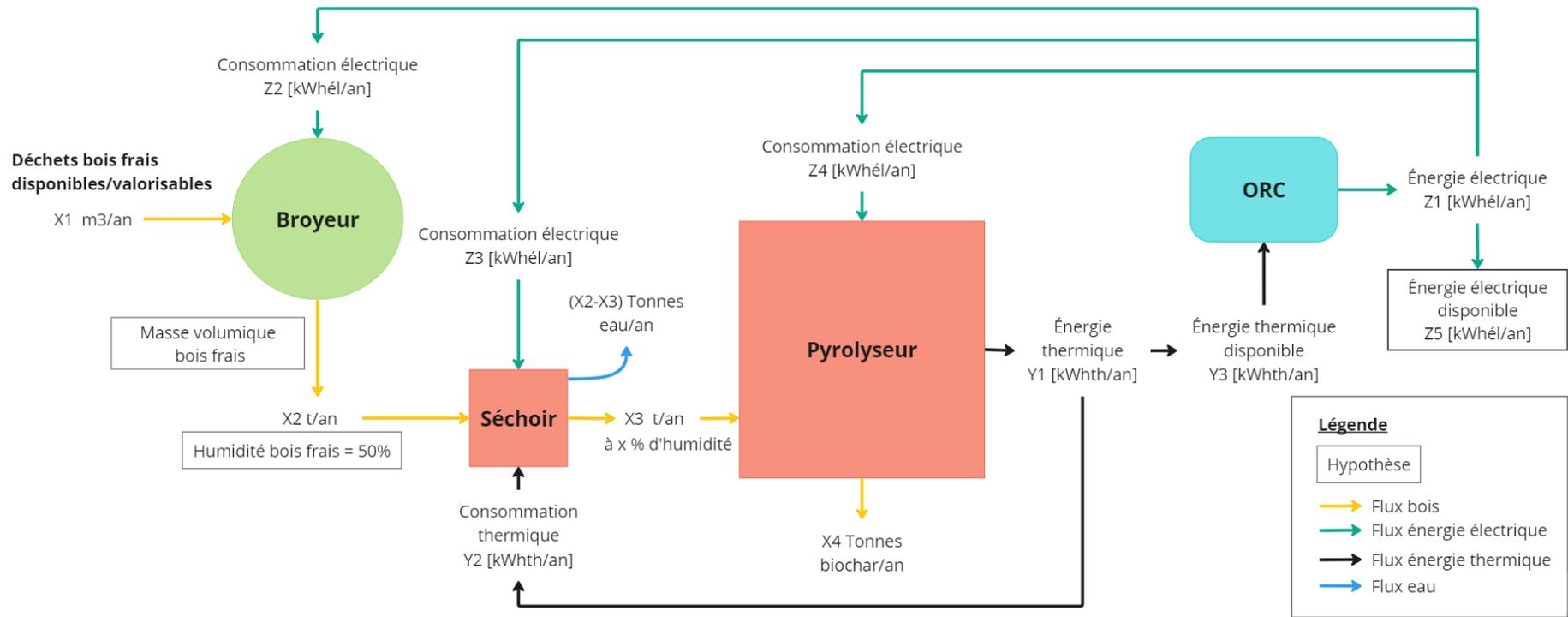


Figure 7 – Schéma de base du procédé industriel de pyrolyse

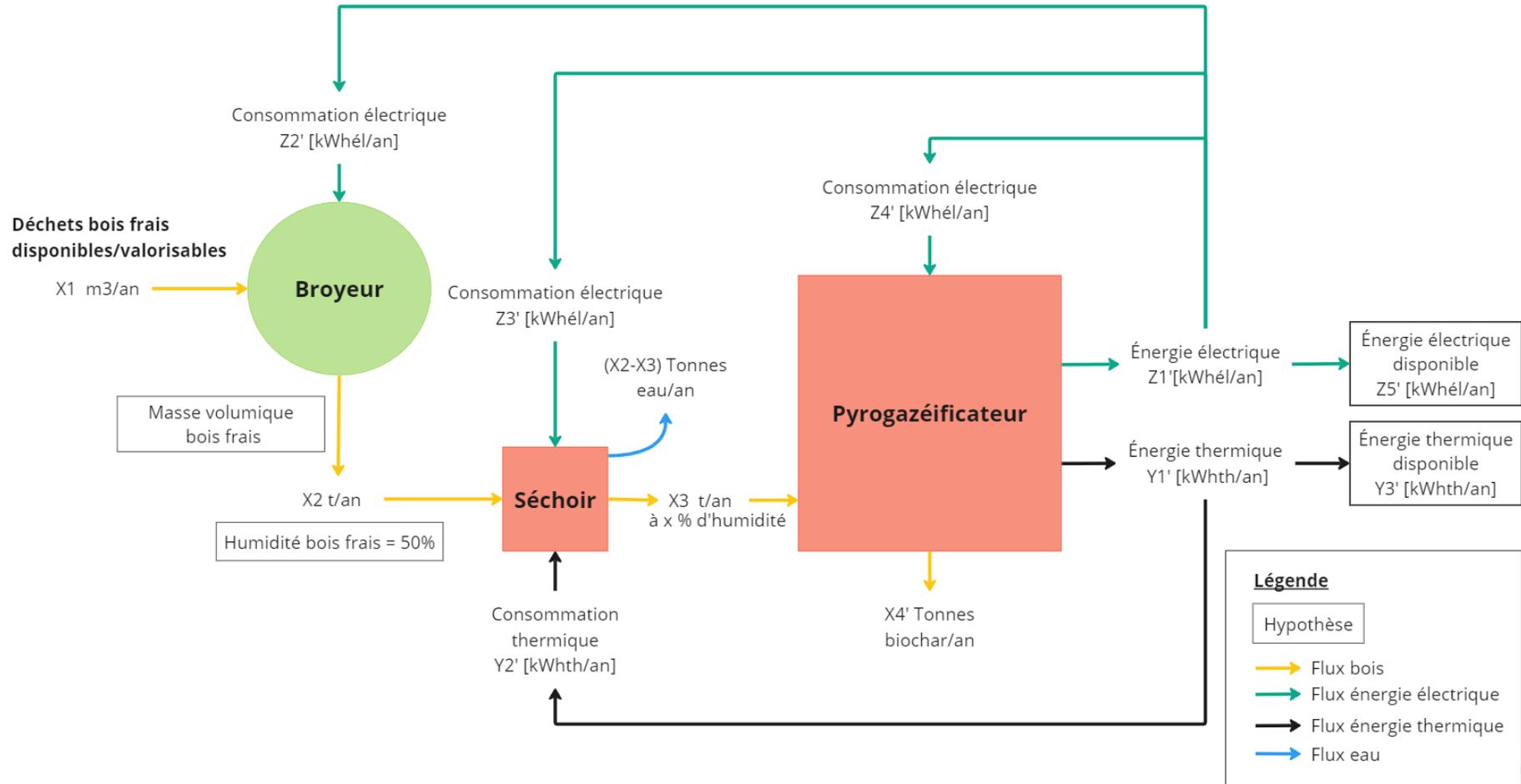


Figure 8 - Schéma de base du procédé industriel de pyrogazéification

5.2.3. 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.

Caractéristique du site

Les différents sites ont été caractérisés selon plusieurs paramètres :

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%¹⁵.
- Pouvoir calorifique du gasoil utilisé par les sites de 10 kWh/litre⁸.

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

¹⁵ Valeur recommandée par les CEO de Sense Engineering et Energy&+



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.

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)¹⁶.

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 :

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

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.

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 5).

Tableau 5 – Masses volumiques moyennes du bois frais hypothétiques des sites

Sites	Masse volumique moyenne du bois frais [t/m ³]	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 :

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

¹⁶ [Coefficients de conversion pour les sciages-2.pdf](#)



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'eau¹⁷).

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 :

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

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 :

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

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.

¹⁷ [Water - Heat of Vaporization vs. Temperature \(engineeringtoolbox.com\)](http://www.engineeringtoolbox.com)



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 :

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

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:

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

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%¹⁸
- 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 :

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

¹⁸ [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.

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

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

5.2.4. 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, toutes les marques/modèles n'ont pas été retenus. Les résultats de ce processus de sélection pour chaque technologie sont présentés dans le Tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6 – 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 5.3), 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.



5.3. DESCRIPTION DES SOLUTIONS TECHNIQUES PAR SITE

Les différentes solutions techniques retenues par site et par scénario sont présentées dans les chapitres suivants. Pour chaque site, un récapitulatif des déchets disponibles, consommations gazoil 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 de bois 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 $\text{kWh}_{\text{él}}$ ne sera pas indiquée.

Pour les solutions correspondant au scénario B, l'objectif étant la production d'énergie, le volume de bois nécessaire pour la production d'un $\text{kWh}_{\text{él}}$ 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.



5.3.1. CIB - Pokola

Flux de bois et d'énergie du site

Actuellement, il n'y a pas de déchets disponibles valorisables sur le site de Pokola. En effet, l'ensemble des délignures et une partie des dosses sont valorisées dans l'usine de cogénération. L'autre partie des dosses est donnée aux populations locales.

Néanmoins, à l'horizon 2025, il est attendu une augmentation du volume d'entrée en scierie de 80.000 m³ pour atteindre 290.000 m³/an. La cogénération étant au maximum de sa capacité d'absorption, des déchets bois seront alors disponibles pour une quantité estimée, à la suite d'une réflexion avec le directeur industriel, à 31.200 m³ de bois par an sous forme de dosses (Figure 9), l'ensemble des autres déchets étant amenés à être valorisés sur le site.

L'extension de la scierie, couplée à d'autres projets d'investissement (fabrication de briquettes par exemple) nécessitera la production d'énergie supplémentaire estimée à 12.264.000 kWh_{él}/an. Celle-ci devrait être assurée par des technologies renouvelables sans consommation de gasoil supplémentaire.

L'usine de cogénération actuelle pourra néanmoins assurer la charge de base de la nouvelle configuration. Pour cette raison, seul le scénario A « production de biochar avec bonus d'énergie » a été étudié pour ce site. La production d'énergie issue de ce scénario est comparée au besoin énergétique complémentaire attendu pour 2025.

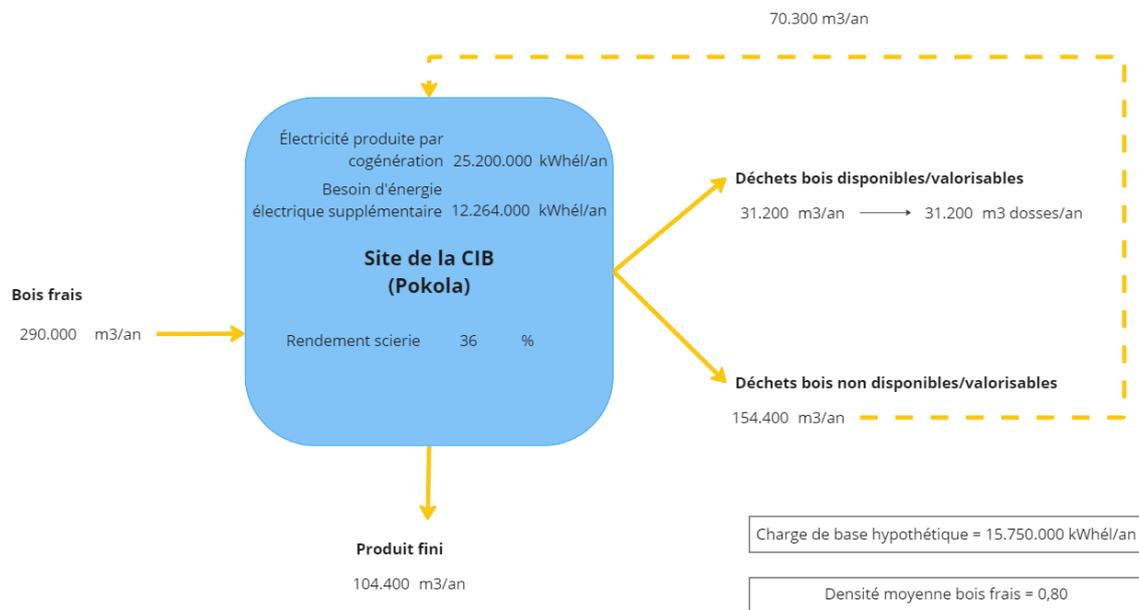


Figure 9 - Projection des flux de bois et consommations de gasoil du site de la CIB à Pokola en 2025

Solutions techniques envisageables

Le Tableau 7 reprend les différentes solutions techniques retenues pour la production de biochar à partir de 2025. L'énergie disponible en sortie des installations de pyrolyse est exprimée en énergie thermique [kWh_{th}/an] et son équivalent électrique [kWh_{él}/an] possible à travers l'utilisation d'un dispositif (ORC).

Pour le site de Pokola, afin d'absorber l'ensemble des déchets disponibles, la combinaison de plusieurs modèles par constructeur est nécessaire. Les constructeurs 3R Systems avec 3 modules « 8000-B » et Arti avec un module « 5 trains » + un module « 2 trains » ont été retenus¹⁹. Les détails de ces designs sont schématisés aux Figure 10 et Figure 11.

Tableau 7 – Détails du scénario A pour le site CIB - Pokola

Pokola	Scénario A	
Constructeur	3R Systems	Arti
Modèle	Module 8000-B	5 trains + 2 trains
Nombre de machines	3	1+1
Technologie	Pyrolyse	Pyrolyse
Énergie disponible sous forme		
Électrique [kWh_{él}/an]	985.750	833.150
Thermique [kWh_{th}/an]	Ou 21.340.800	Ou 19.047.250
Biochar [T/an]	4.490	2.530
Volume des déchets valorisés [m³/an]	31.200	31.200
(Proportion du volume disponible [%])	(100%)	(100%)
Pourcentage de la production électrique par les GE	8%	7%
Pourcentage de la charge de base	6%	5%
Litres de gasoil économisés [L/an]*	/	/
Volume bois nécessaire pour la production d'une tonne de biochar [m³]	6,9	12,3
Énergie électrique produite par tonne de biochar produite [kWh_{él}]	219,6	329,3

*Le nombre de litres de gasoil économisés n'apparaissent pas dans ce tableau étant donné que les besoins énergétiques futurs seront couverts par des technologies renouvelables, sans consommation de gasoil supplémentaire attendue.

Les rendements biochar et énergie diffèrent en fonction des constructeurs. La solution avec 3R Systems permet d'obtenir une quantité de biochar près de 1,8 fois supérieure à la solution de Arti, avec une quantité d'énergie légèrement supérieure.

¹⁹ Les modules sont décrits en ANNEXE 1

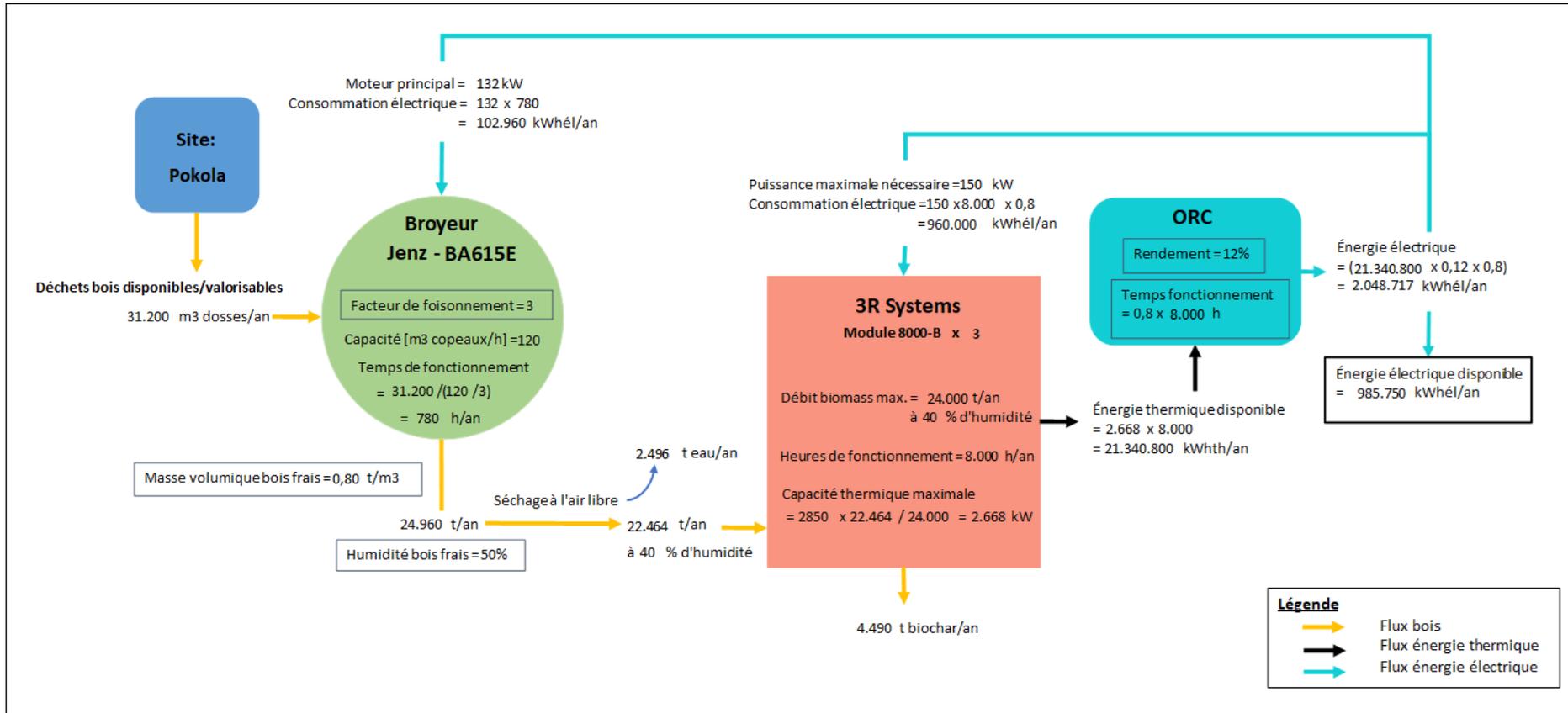


Figure 10 - Schéma de la solution 3R Systems du site de Pokola – Scénario A

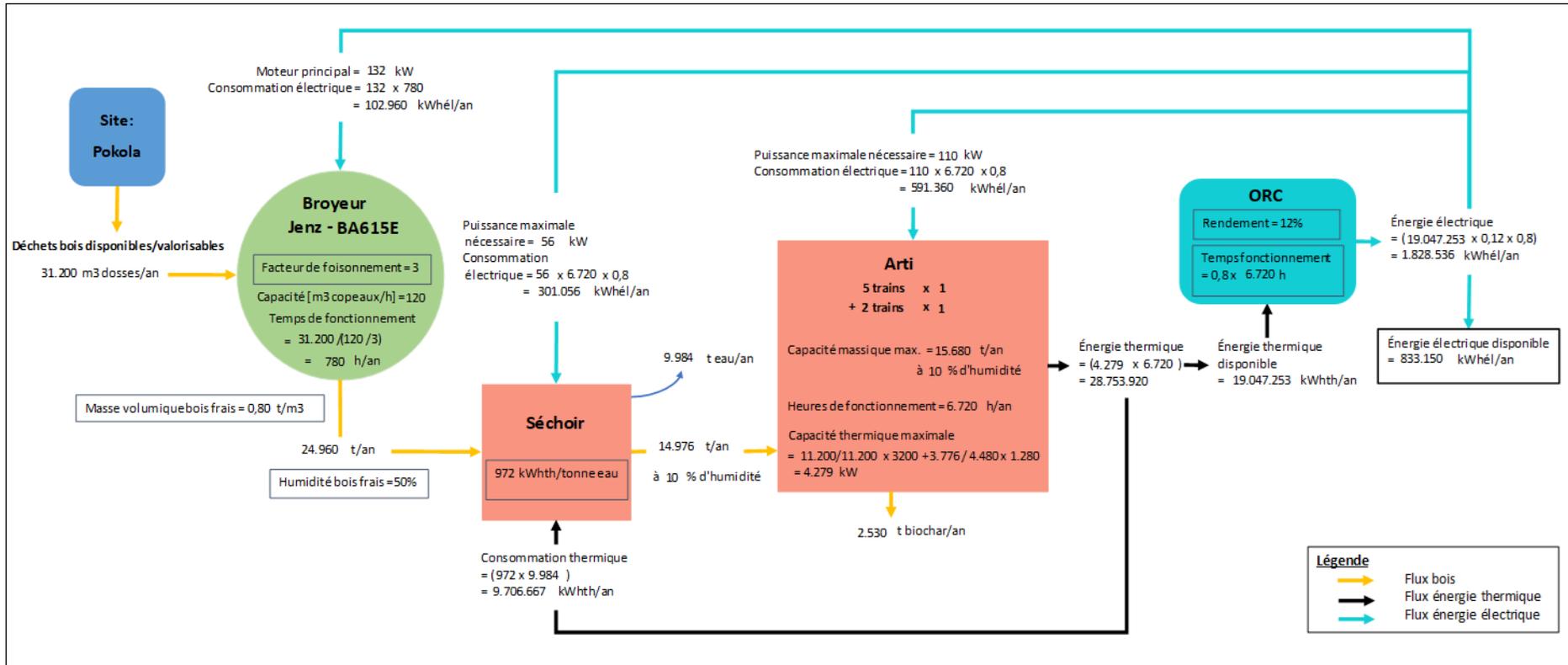


Figure 11 - Schéma de la solution Arti du site de Pokola – Scénario A



5.3.2. CIB - Enyéllé

Flux de bois et d'énergie du site

Les valeurs de consommation de gasoil et de flux de bois du site d'Enyéllé sont reprises à la Figure 12. Les proportions entre les différents types de déchets bois sont similaires à celles de Pokola. Après déduction des dons, le volume de déchets disponibles et valorisables est estimé à 39.400 m³ annuellement. À l'instar du site de Pokola, le site d'Enyéllé 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.

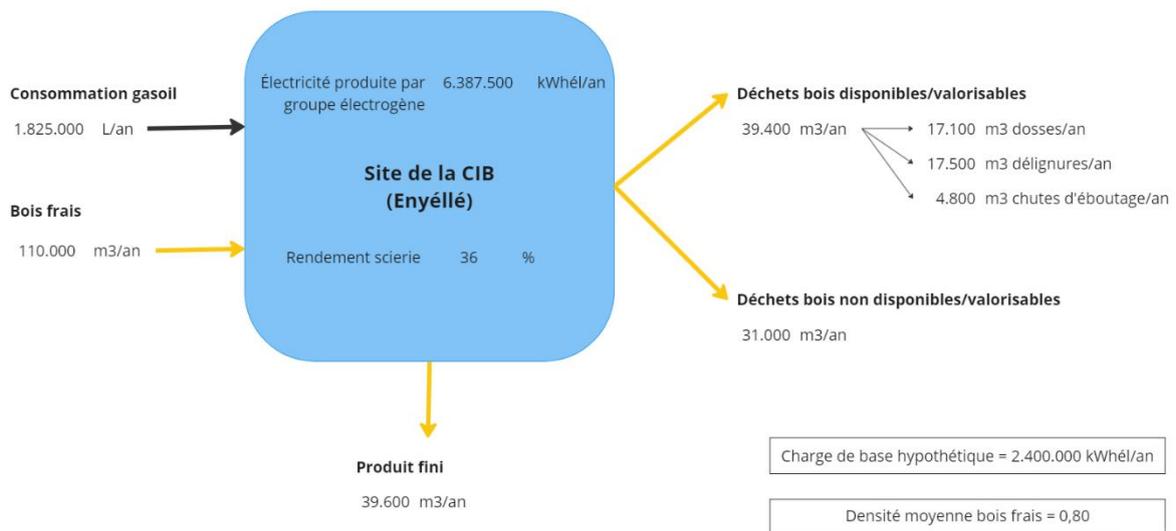


Figure 12 - Flux de bois et consommations de gasoil du site de la CIB à Enyéllé, situation future

Solutions techniques envisageables

Pour le site d'Enyéllé, les constructeurs 3R Systems avec 4 modules « 8000-B » (Figure 13), et Arti avec 1 module « 5 trains » et 1 module « 3 trains » ont été retenus pour le scénario A (Figure 14). Energy&+ et son module « 300 kW » ont été retenus pour le scénario B (Figure 15).

Les résultats obtenus des configurations proposées pour le site de d'Enyéllé pour les scénarios A et B sont détaillés au Tableau 8.

Tableau 8 – 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 [kWh _{él} /an] Thermique [kWh _{th} /an]	1.177.150 Ou 26.949.600	1.082.400 Ou 24.053.250	2.125.150 Et 2.770.850
Biochar sec [T/an]	5.670	3.190	80
Volume des déchets valorisés [m ³ /an] (Proportion du volume disponible [%])	39.400 (100%)	39.400 (100%)	3.750 (10%)
Pourcentage de la production électrique par les GE théoriques ²⁰	18%	17%	34%
Pourcentage de la charge de base	49%	45%	89%
Litres de gasoil économisés [L/an]	336.300	309.300	607.200
Volume bois nécessaire pour la production d'une tonne de biochar [m ³]	6,9	12,4	
Énergie électrique produite par tonne de biochar produite [kWh _{él}]	207,6	339,3	
Volume bois nécessaire pour la production d'un kWh _{él} [m ³]			0,002
Quantité de biochar produit par kWh _{él} produit [kg]			0,04

A l'instar du site de Pokola, 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). L'énergie électrique résiduelle obtenue est plus importante avec le dimensionnement de 3R Systems également.

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.

²⁰ 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.

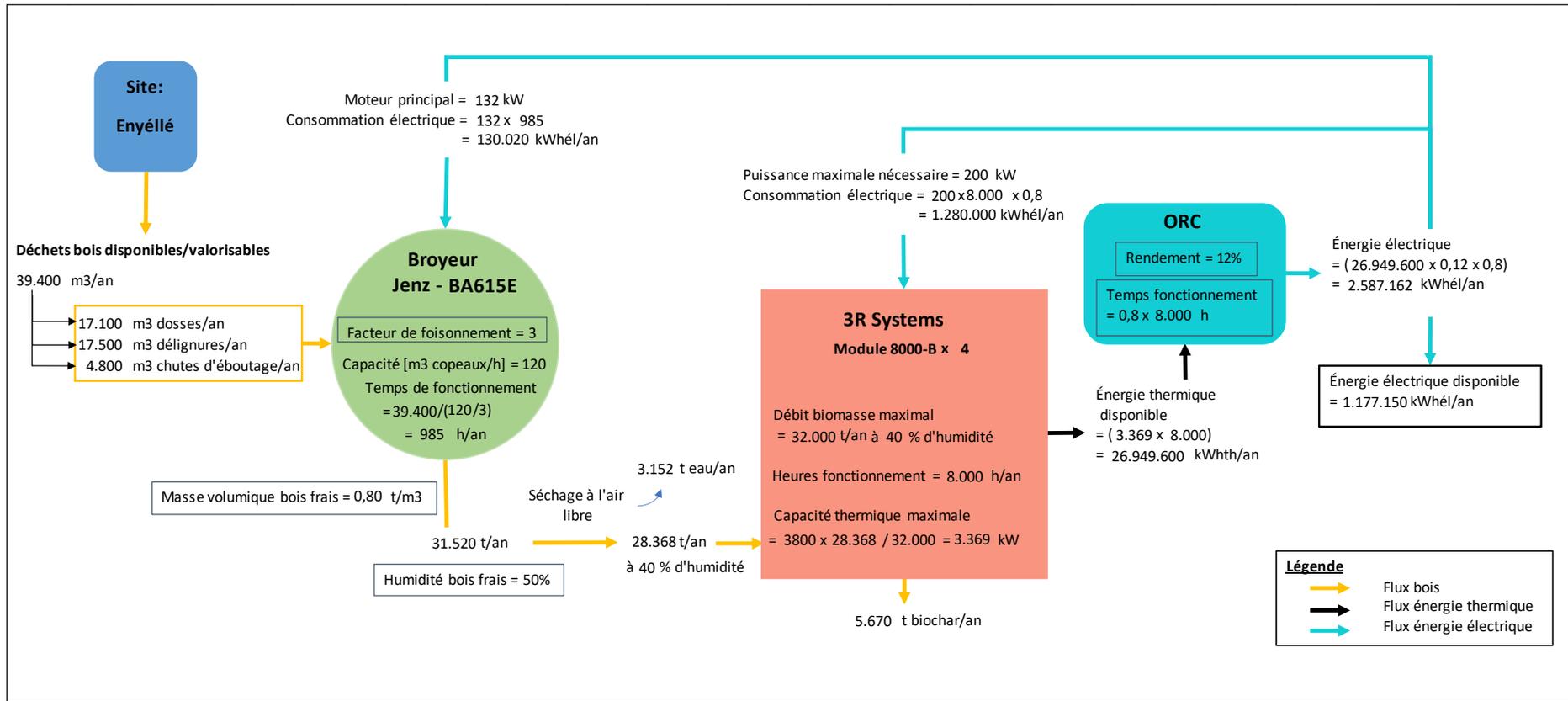


Figure 13 - Schéma de la solution 3R Systems du site d'Enyéllé – Scénario A

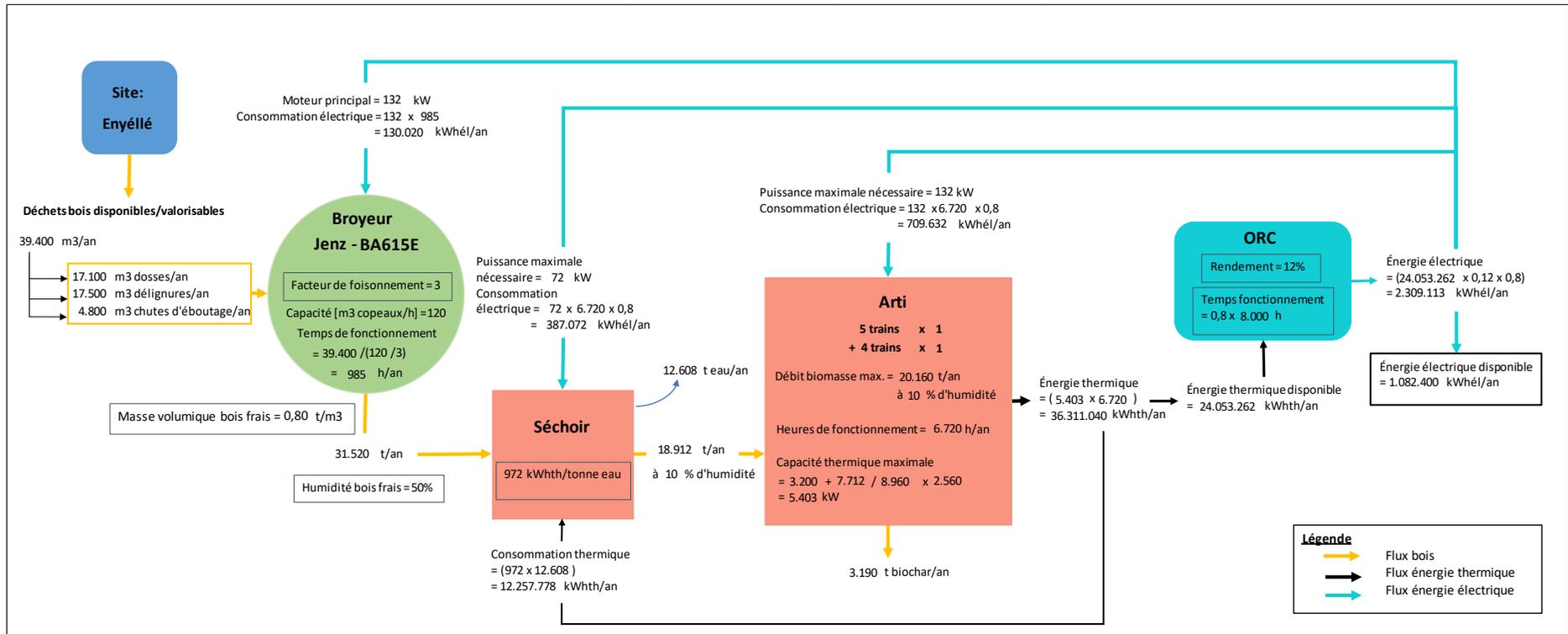


Figure 14 - Schéma de la solution Arti du site d'Enyéllé – Scénario A

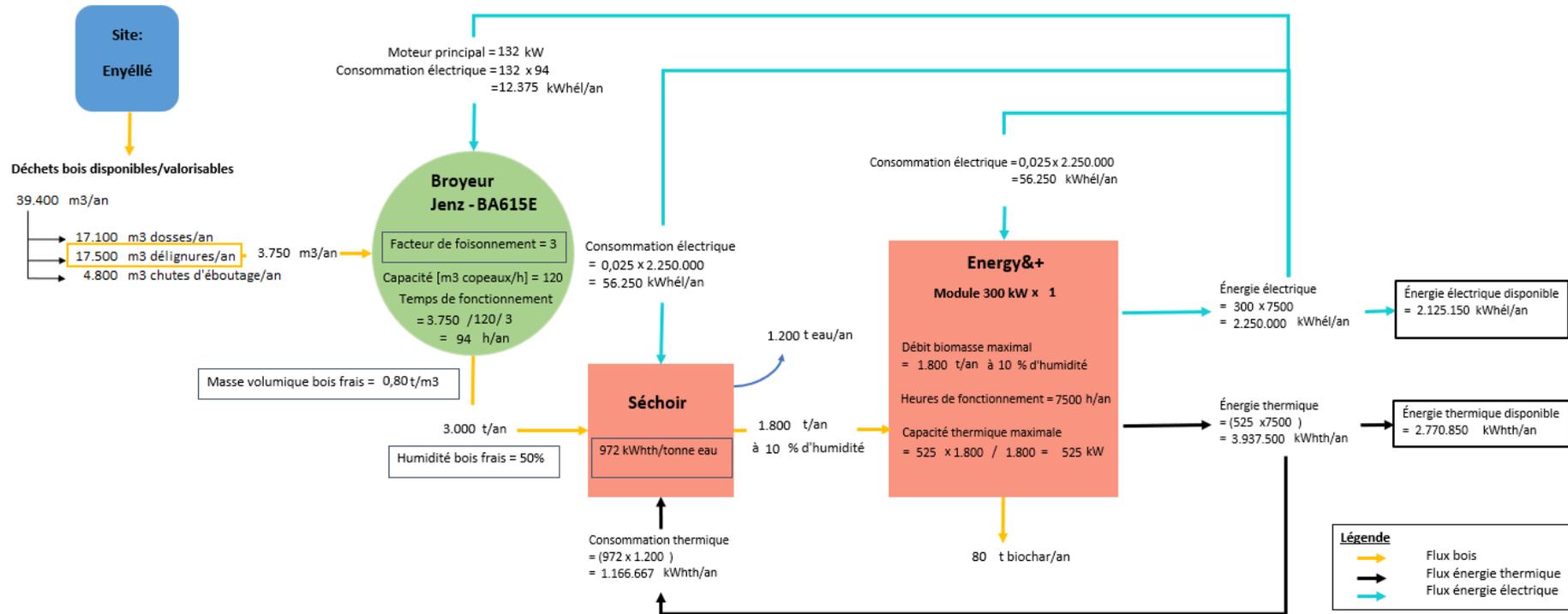


Figure 15 - Schéma de la solution Energy&+ du site d'Enyellé – Scénario B



5.3.3. CEB - Bambidie

Flux de bois et d'énergie du site

Sur le site de Bambidie, la situation du site présentée à la Figure 16 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}.

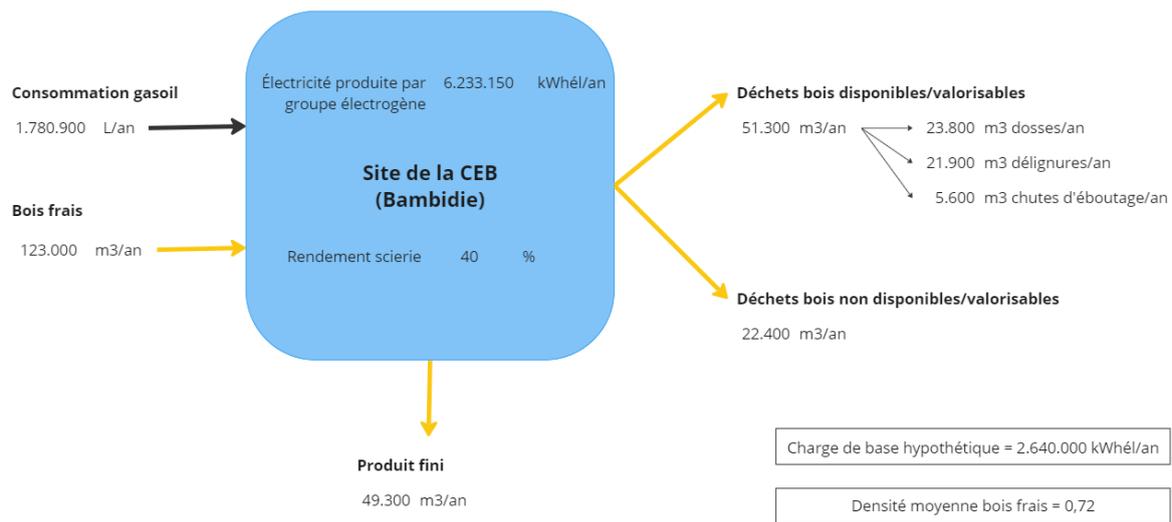


Figure 16 - Flux de bois et consommations de gasoil du site de la CEB à Bambidie

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 17 et Figure 18 respectivement. Le constructeur Energy&+ et son module « 300 kW » ont été retenus pour le scénario B (schématisé à la Figure 19). Les résultats obtenus pour les configurations proposées pour le site de la CEB sont présentés au Tableau 9.

Tableau 9 – 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] Thermique [kWh_{th}/an]	942.400 Ou 31.580.300	1.343.100 Ou 28.186.250	2.123.750 Et 2.770.850
Biochar [T/an]	6.650	3.740	80
Volume des déchets valorisés [m³/an] (Proportion du volume disponible [%])	51.300 (100%)	51.300 (100%)	4.170 (8%)
Pourcentage de la production électrique par les GE	15%	22%	34%
Pourcentage de la charge de base	36%	51%	80%
Litres de gasoil économisés [L/an]	269.300	383.700	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}]	141,7	359,1	
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 est cependant plus élevée, la consommation de la machine étant moindre que le module de taille intermédiaire de 3R Systems. 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.

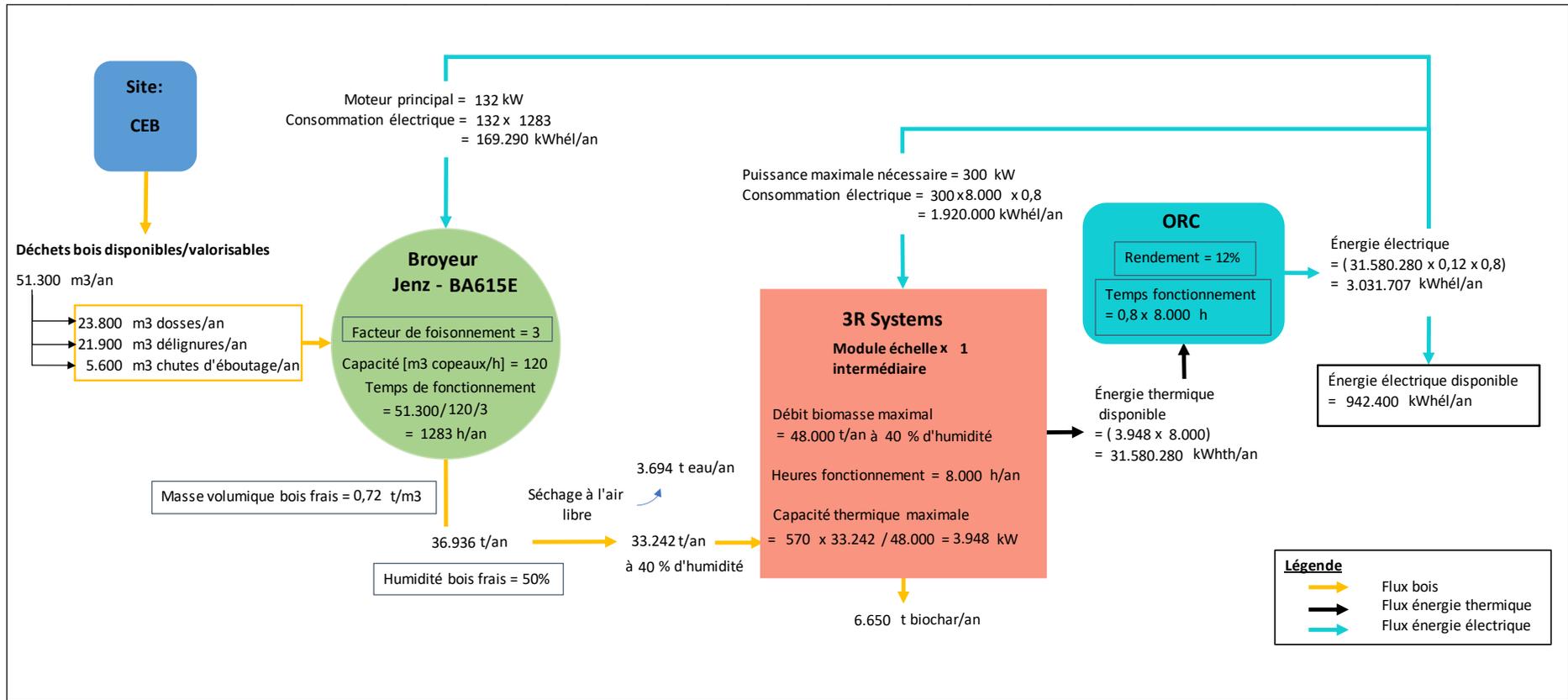


Figure 17 – Schéma de la solution 3R Systems du site de la CEB – Scénario A

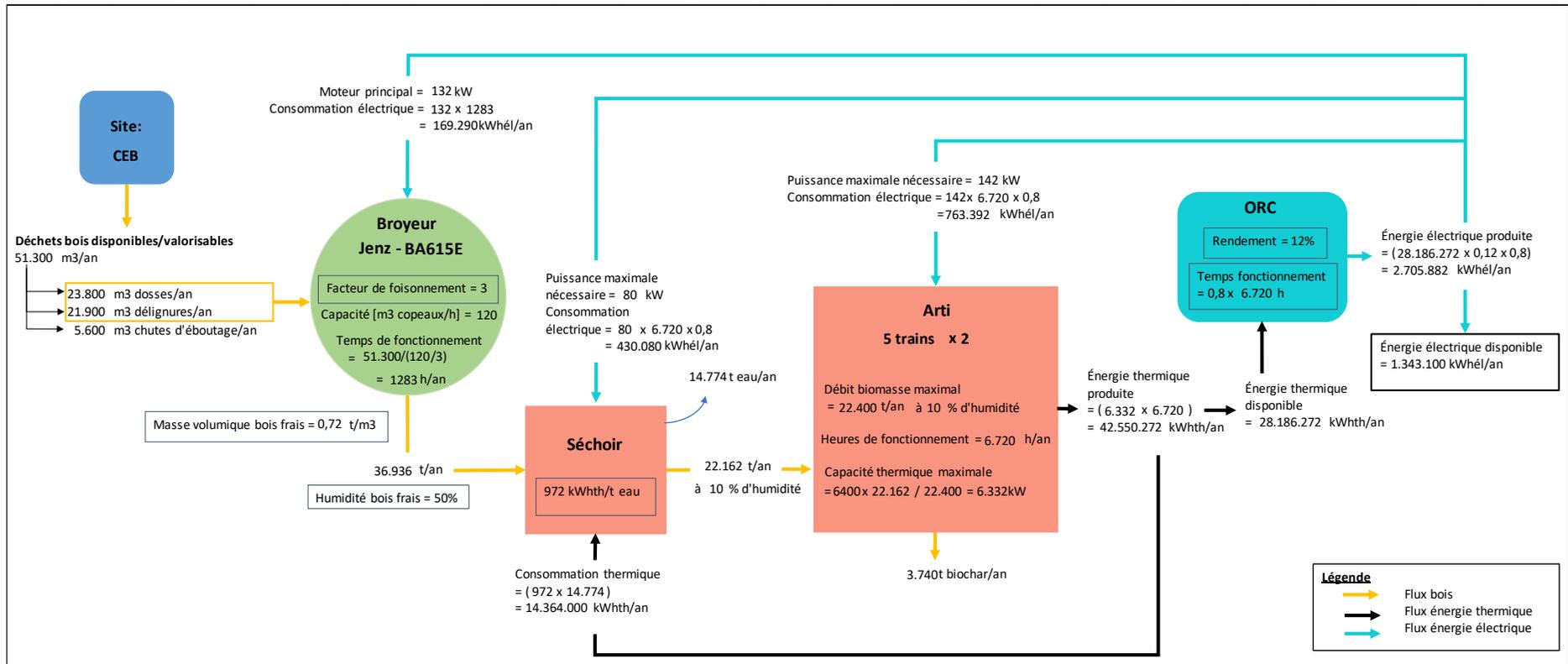


Figure 18 – Schéma de la solution Arti du site de la CEB – Scénario A

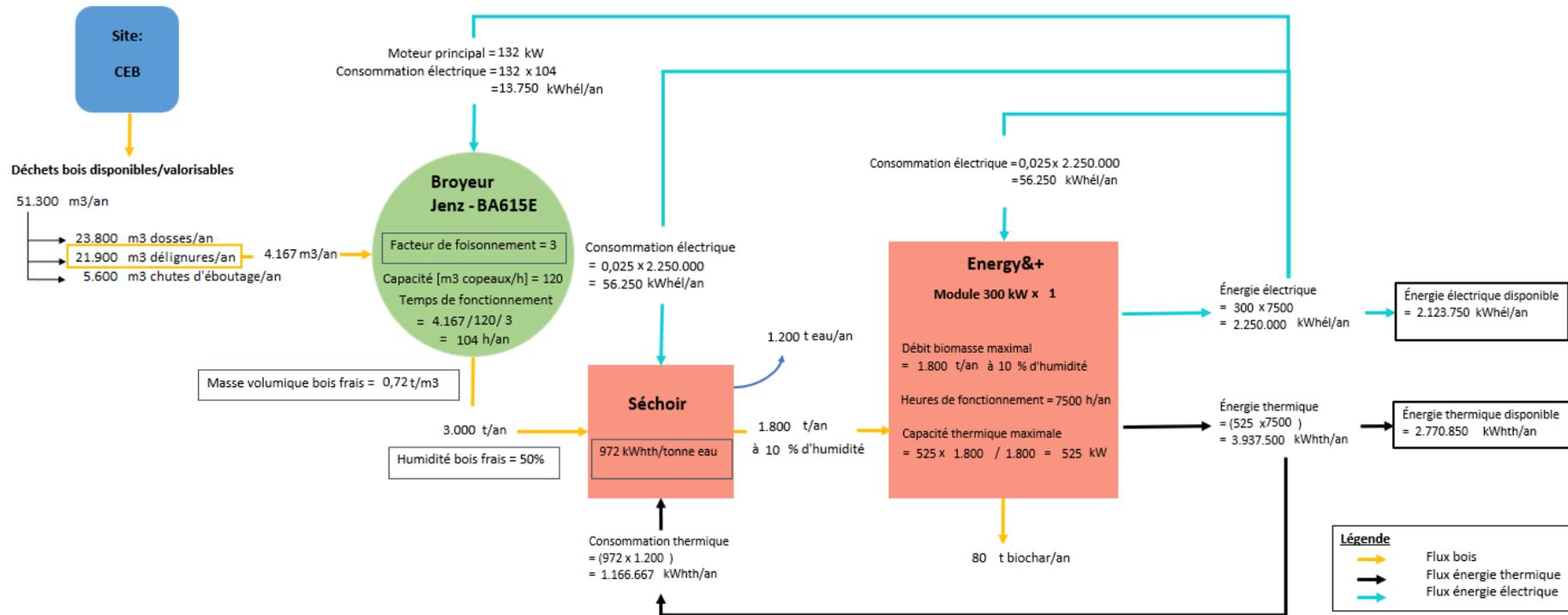


Figure 19 – Schéma de la solution Energy&+ du site de la CEB – Scénario B

5.3.4. GSEZ - Nkok

Flux de bois et d'énergie du site

Le site de Nkok comprend de nombreuses industries de transformation du bois. Certaines, comme l'usine de production de panneaux à particules, utilisent comme matière première les déchets des autres industries. Néanmoins, une certaine quantité de déchets, estimée à ~29.000 m³/an, par le responsable opération et maintenance du site, pourrait être allouée au projet. Le site est alimenté par une centrale au gaz et aucune consommation de gasoil n'est donc annoncée. La production électrique moyenne, calculée à partir de données partagées lors de la mission de terrain, est mentionnée à la Figure 20, à titre indicatif afin de donner un ordre de grandeur. La charge de base n'étant pas connue, celle-ci a été estimée à 30% de la valeur de l'énergie électrique annuelle consommée par le site, conformément aux hypothèses et choix stratégique posés.

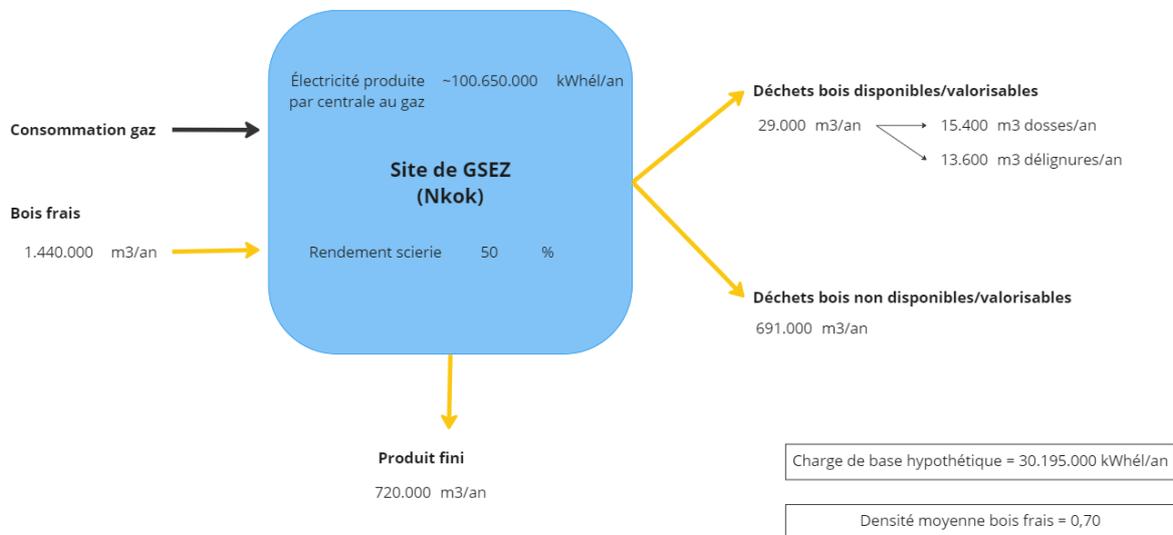


Figure 20 - Flux de bois et consommations de gasoil du site de GSEZ à Nkok

*Solutions techniques envisageables*

Pour le premier scénario, les constructeurs de pyrolyseur 3R Systems avec 3 modules « 8000-B » et Arti avec 1 unité du modèle « 5 trains » ont été retenus. Ces solutions sont schématisées aux Figure 21 et Figure 22 respectivement. Pour le second scénario, visant la production d'énergie pour s'approcher au mieux de la charge de base, l'installation de 7 modules « 300 kW » d'Energy&+ serait nécessaire pour valoriser tous les déchets pouvant être mis à disposition (Figure 23). Les résultats de ces solutions sont présentés au Tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10 – Détail du scénario A du site de la GSEZ à Nkok

Nkok	Scénario A		Scénario B
Constructeur	3R Systems	Arti	Energy&+
Modèle	Module 8000-B	5 trains	Module 300 kW
Nombre de machines	3	1	7
Technologie	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrogazéification
Énergie disponible sous forme Électrique [kWh _{él} /an] Thermique [kWh _{th} /an]	610.500 Ou 17.356.500	682.750 Ou 14.244.750	14.368.050 Et 18.749.300
Biochar sec [T/an]	3.650	1.890	550
Volume des déchets valorisés [m ³ /an] (Proportion du volume disponible [%])	29.000 (100%)	26.665 (92%)	29.000 (100%)
Pourcentage de la production électrique par les GE	1%	1%	14%
Pourcentage de la charge de base	2%	2%	48%
Litres de gasoil économisés [L/an]	174.400	195.100	4.105.200
Volume bois nécessaire pour la production d'une tonne de biochar [m ³]	7,9	15,3	
Énergie électrique produite par tonne de biochar produite [kwh _{él}]	167,3	361,2	
Volume bois nécessaire pour la production d'un kwh _{él} [m ³]			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 Nkok, les trois modules « 8000-B » de 3R Systems permettent une production de près du double de biochar comparé au système Arti. Ce dernier propose cependant une énergie électrique résiduelle disponible plus importante. La solution d'Energy&+ dans le scénario B permettrait de valoriser l'intégralité des déchets bois pouvant être mis à disposition et d'ainsi couvrir environ 48% de la charge de base nécessaire estimée sur le site. Cela représenterait une économie annuelle en gasoil estimée à près de 4.105.200 litres.

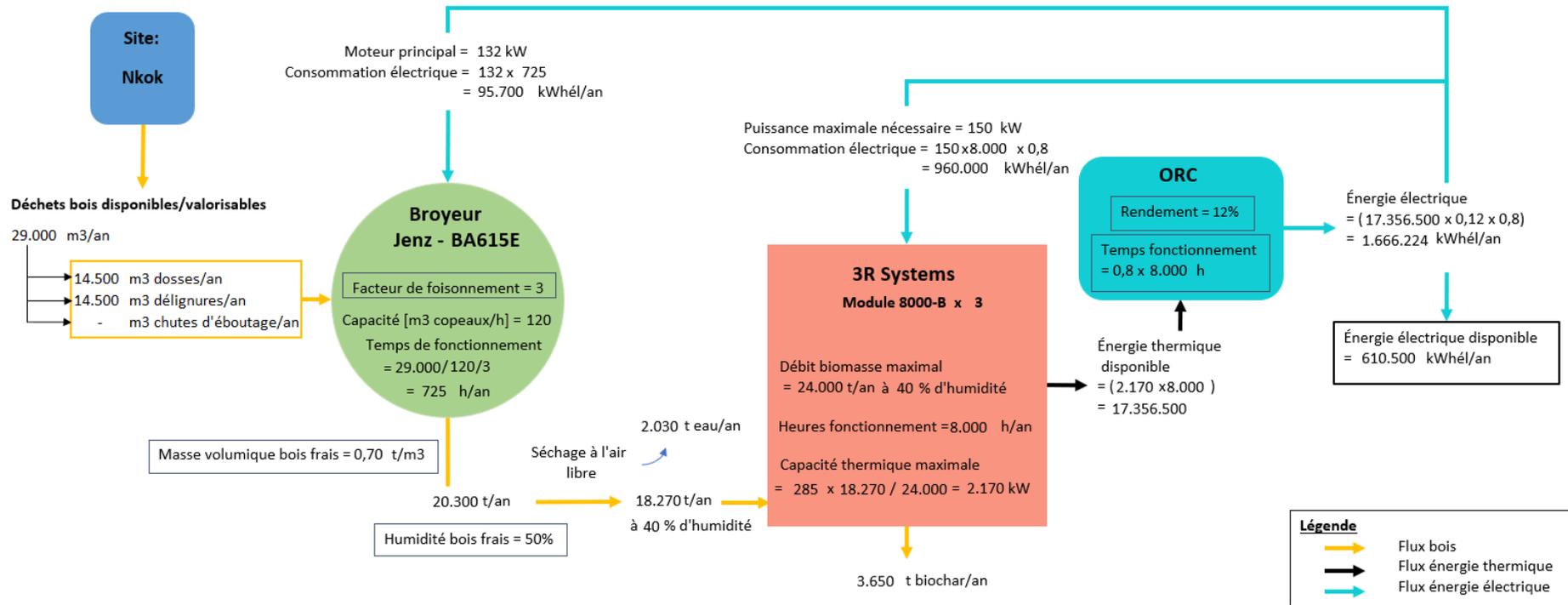


Figure 21 - Schéma de la solution 3R Systems du site de Nkok – Scénario A

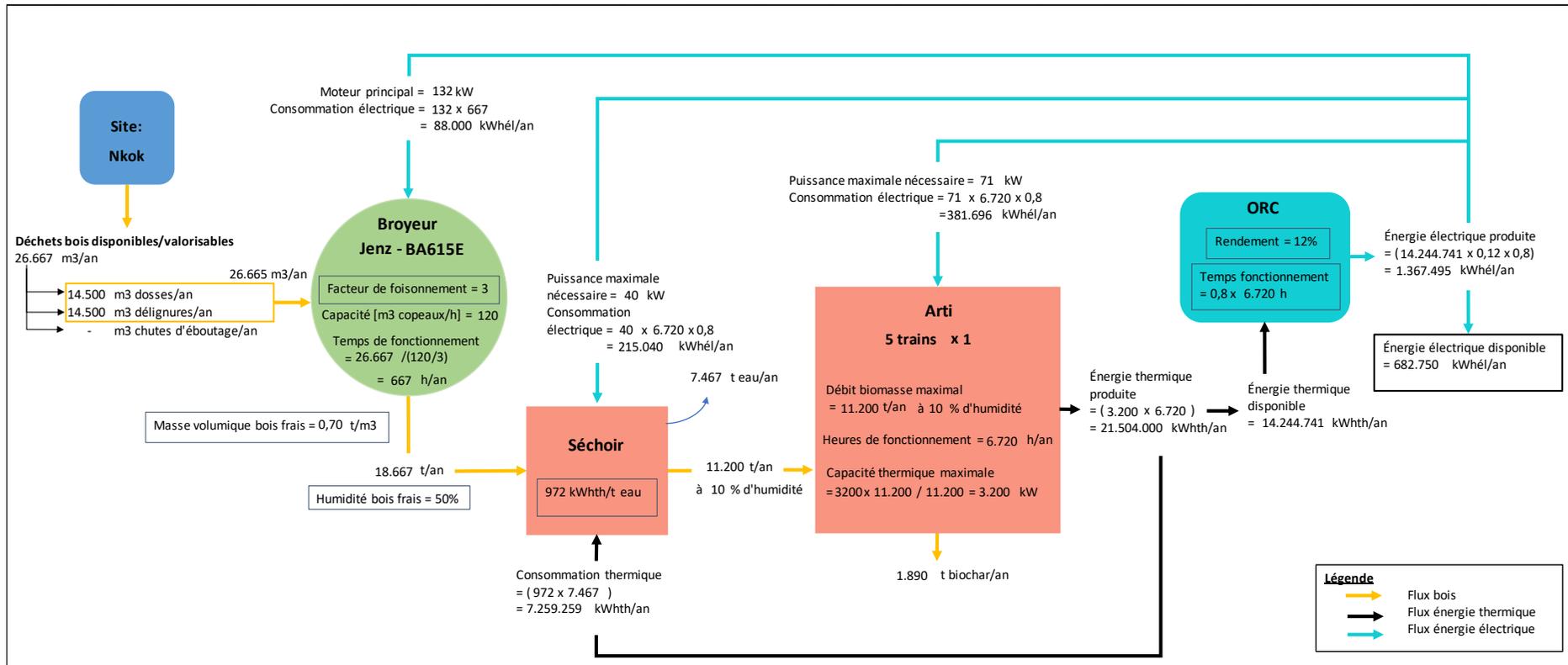


Figure 22 - Schéma de la solution Arti du site de Nkok – Scénario A

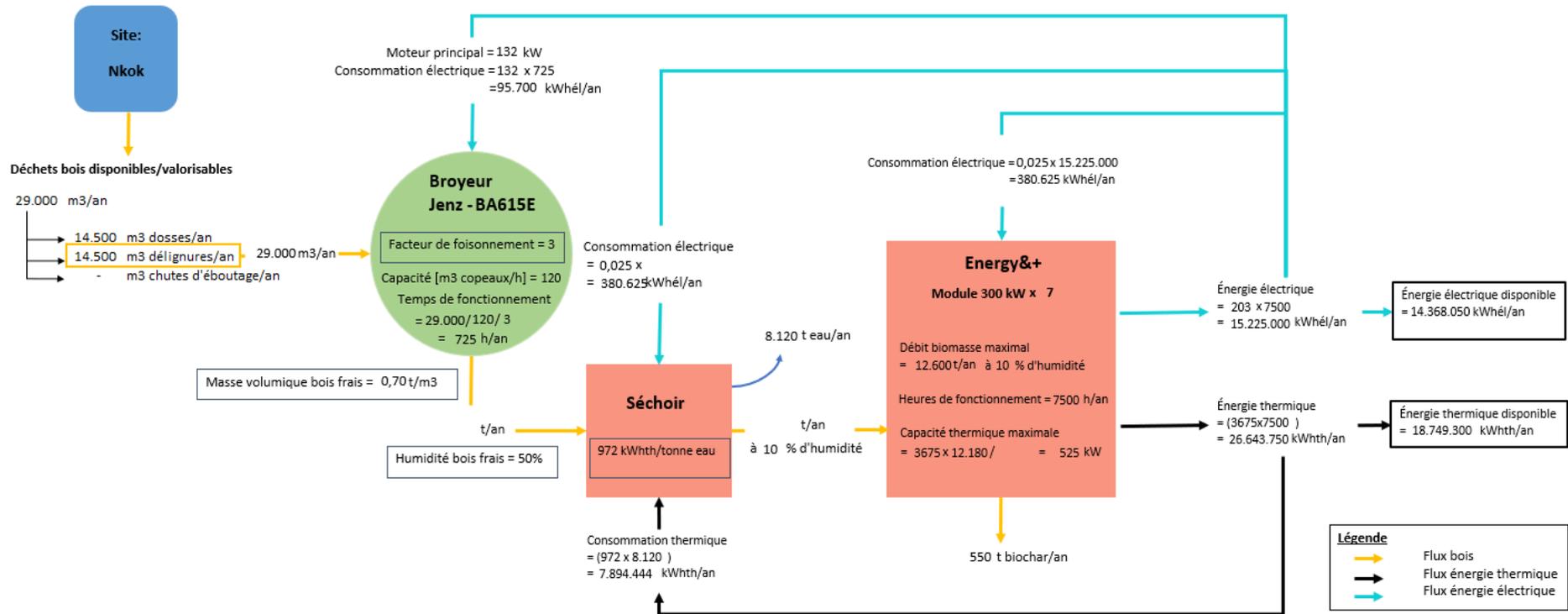


Figure 23 - Schéma de la solution Energy&+ du site de Nkok – Scénario B



5.3.5. GSEZ - Lambaréné

Flux de bois et d'énergie du site

Le site d'Ikolo à Lambaréné 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 24.

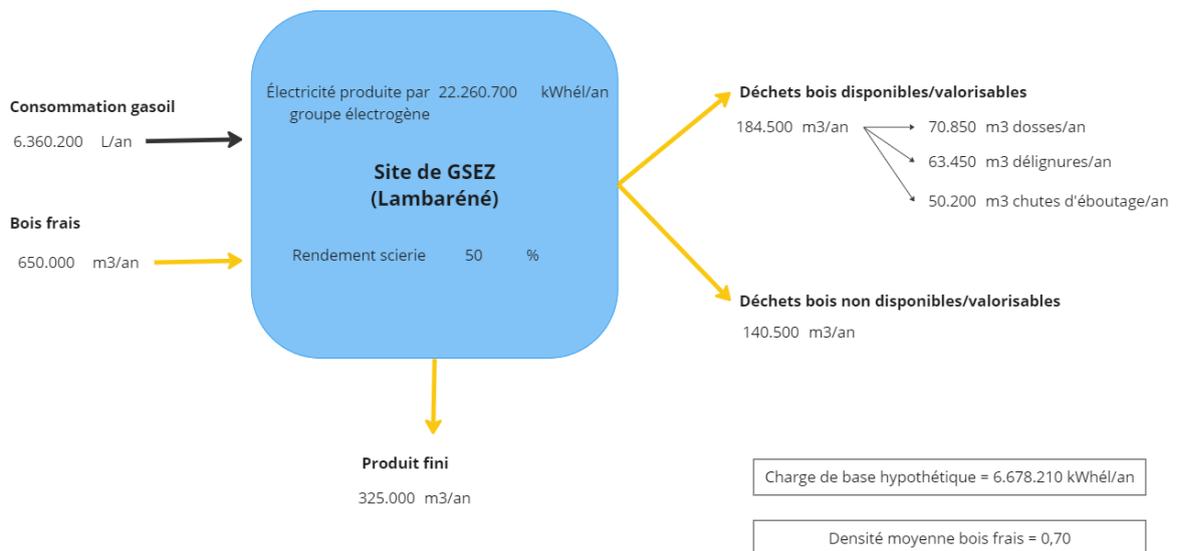


Figure 24 - Flux bois et gasoil du site de GSEZ à Lambaréné

*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. Energy&+ et 3 modules « 300 kW » ont été retenus pour le scénario B. Ces dimensionnements sont schématisés aux Figure 24, Figure 25 et Figure 26 respectivement. Les résultats de ces configurations sont détaillés au Tableau 11.

Tableau 11 – Détails des scénarios A et B du site de la GSEZ à Lambaréné

Lambaréné	Scénario A		Scénario B
Constructeur	3R Systems	Arti	Energy&+
Modèle	Module grande échelle + Modules 8000-B	5 trains	Module 300 kW
Nombre machines	1+3	7	3
Technologie	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrogazéification
Énergie disponible sous forme			
Électrique [kWh_{él}/an]	5.191.800	4.675.400	6.370.050
Thermique [kWh_{th}/an]	110.423.200	Ou 98.555.800	Et 8.312.500
Biochar sec [T/an]	23.250	13.080	240
Volume des déchets valorisés [m³/an]	184.500	184.500	12.860
(Proportion du volume disponible [%])	(100%)	(100%)	(7%)
Pourcentage de la production électrique par les GE théoriques	23%	21%	29%
Pourcentage de la charge de base	78%	70%	95%
Litres de gasoil économisés [L/an]	1.483.400	1.335.800	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}]	223,3	357,4	
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 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, ainsi qu'une énergie électrique résiduelle disponible supérieure. La solution d'Energy&+ dans le scénario B 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.

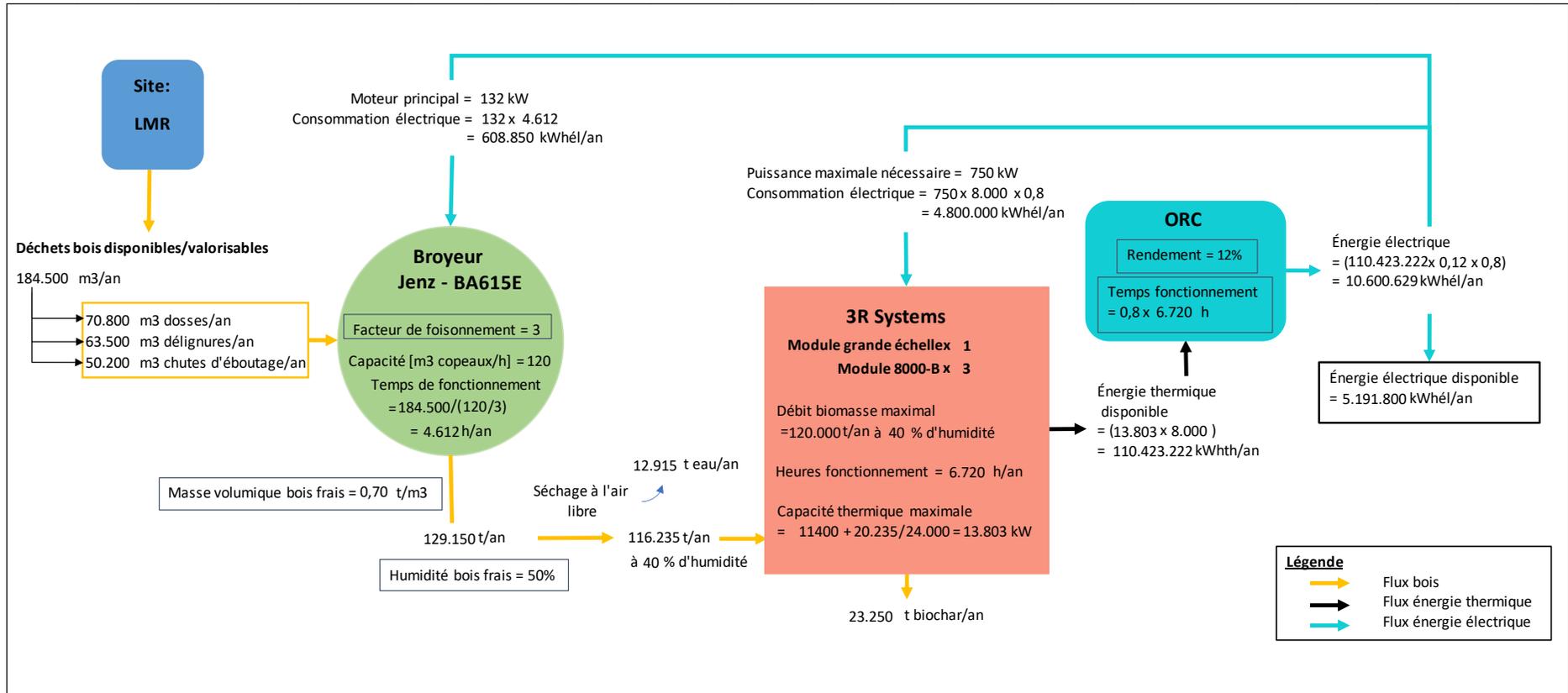


Figure 25 - Schéma de la solution 3R Systems du site le Lambaréné – Scénario A

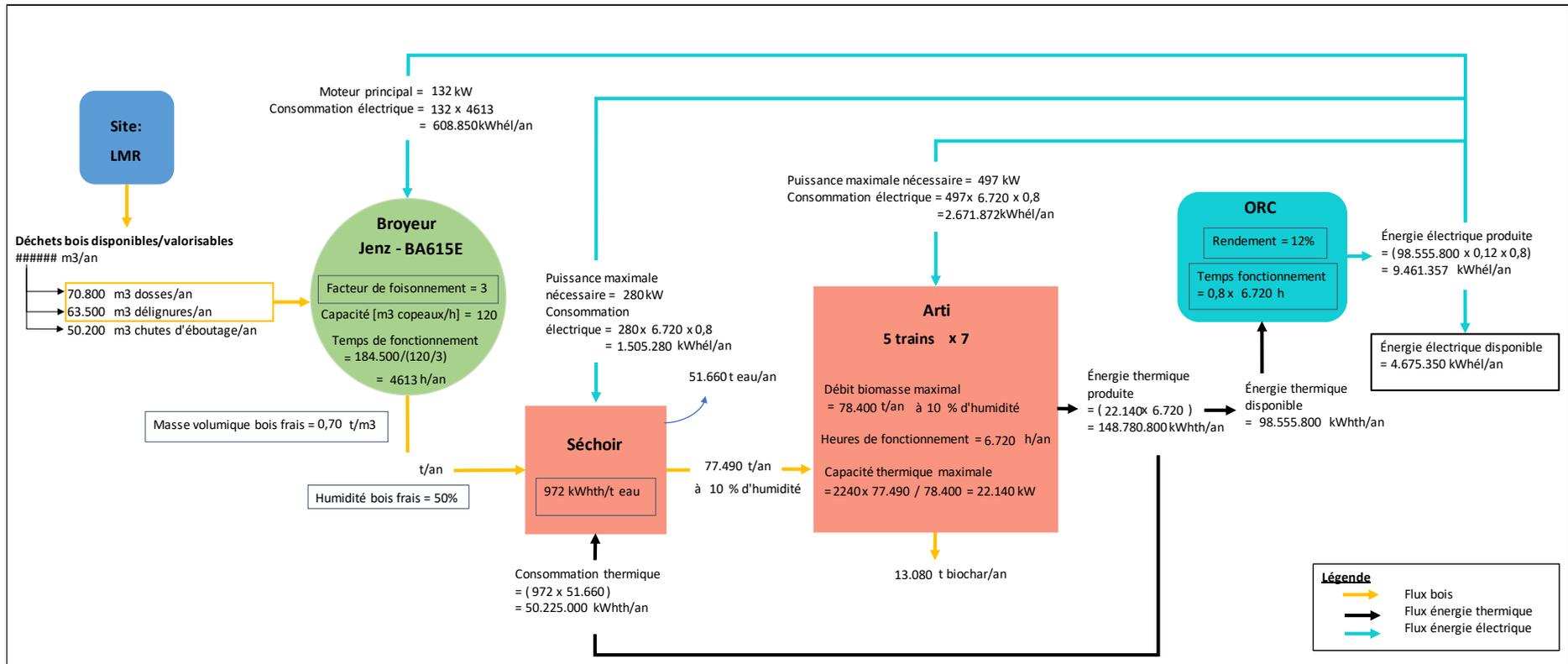


Figure 26 – Schéma de la solution Arti du site de Lambaréné – Scénario A

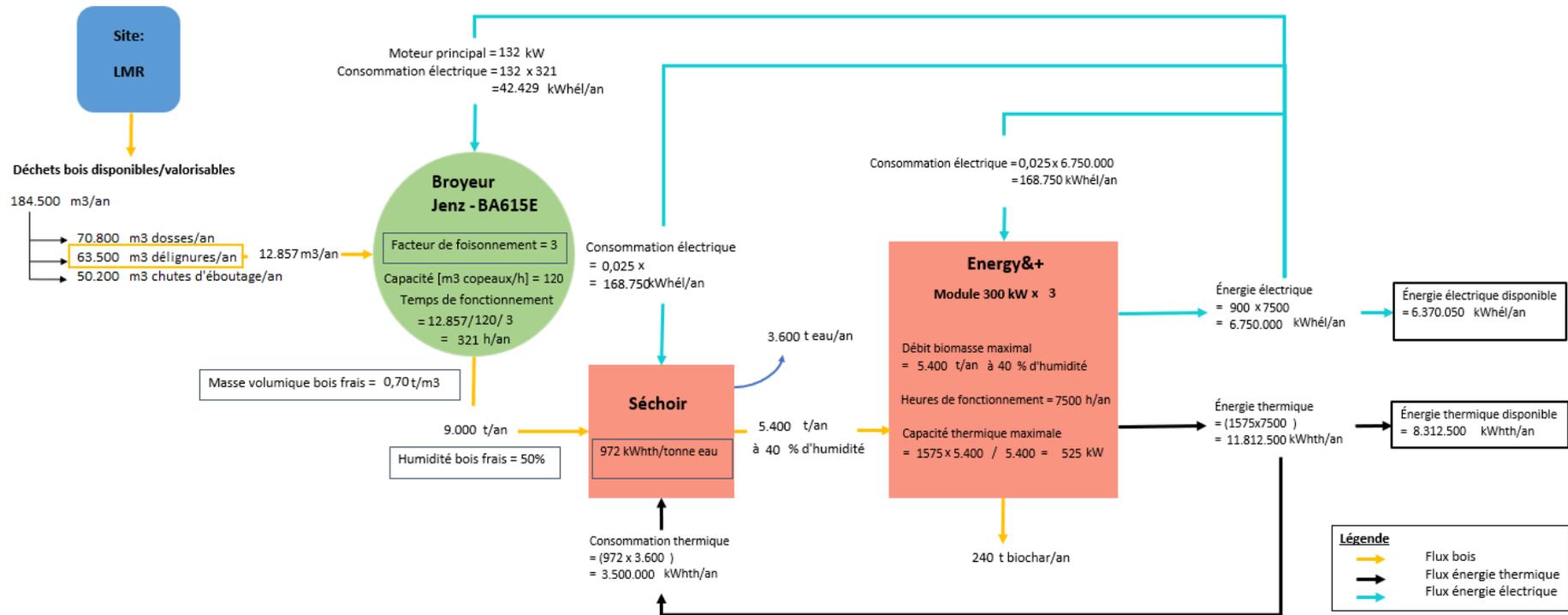


Figure 27 – Schéma de la solution Energy&+ du site de Lambaréné – Scénario B



5.3.6. Pallisco - Mindourou

Flux de bois et d'énergie du site

Sur le site de Pallisco, la situation présentée à la Figure 28 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 28 - 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 29 et Figure 30). Pour le scénario B, 1 unité du modèle « 5 trains » de Arti et 1 module « 300 kW » d'Energy&+ ont été retenus (Figure 31 et Figure 32). Les résultats des configurations proposées pour le site de Pallisco sont présentés au Tableau 12.

Tableau 12 – 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	5 trains	Module 300 kW
Nombre machines	3	1+1	1	1
Technologie	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrogaz
Énergie disponible sous forme Électrique [kWh_{él}/an] Thermique [kWh_{th}/an]	1.057.500 Ou 22.127.400	896.800 Ou 19.749.300	693.750 Ou 14.244.700	750.000 Et 977.900
Biochar sec [T/an]	4.660	2.620	1.890	30
Volume des déchets valorisés [m³/an] (Proportion du volume disponible [%])	32.300 (100%)	32.300 (100%)	23.300 (72%)	1.320 (4%)
Pourcentage de la production électrique par les GE théoriques	46%	39%	30%	33%
Pourcentage de la charge de base	141%	120%	93%	100%
Litres de gasoil économisés [L/an]	302.100	256.200	198.200	214.300
Volume bois nécessaire pour la production d'une tonne de biochar [m³]	6,9	12,3		
Énergie électrique produite par tonne de biochar produite [kwh_{él}]	226,9	342,3		
Volume bois nécessaire pour la production d'un kwh_{él} [m³]			0,034	0,002
Quantité de biochar produit par kwh_{él} produit [kg]			2,72	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. L'énergie produite est également plus élevée. Au vu des besoins énergétiques, l'énergie électrique produite par les solutions 3R Systems et 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, la solution Energy&+ permet de couvrir entièrement la charge de base nécessaire sur le site avec une économie annuelle en gasoil estimée à près de 214.300 litres. La solution Arti, permet de couvrir 93% des besoins de charge de base, correspondant à 198.200 litres de gasoil pouvant être économisés.

Le site de Pallisco a la particularité de disposer d'une charge de base relativement basse. De ce fait, la solution de pyrolyse Arti permettrait de satisfaire à la fois une production de biochar intéressante et 93% du besoin énergétique de la charge de base par la valorisation de l'ensemble des déchets disponibles.

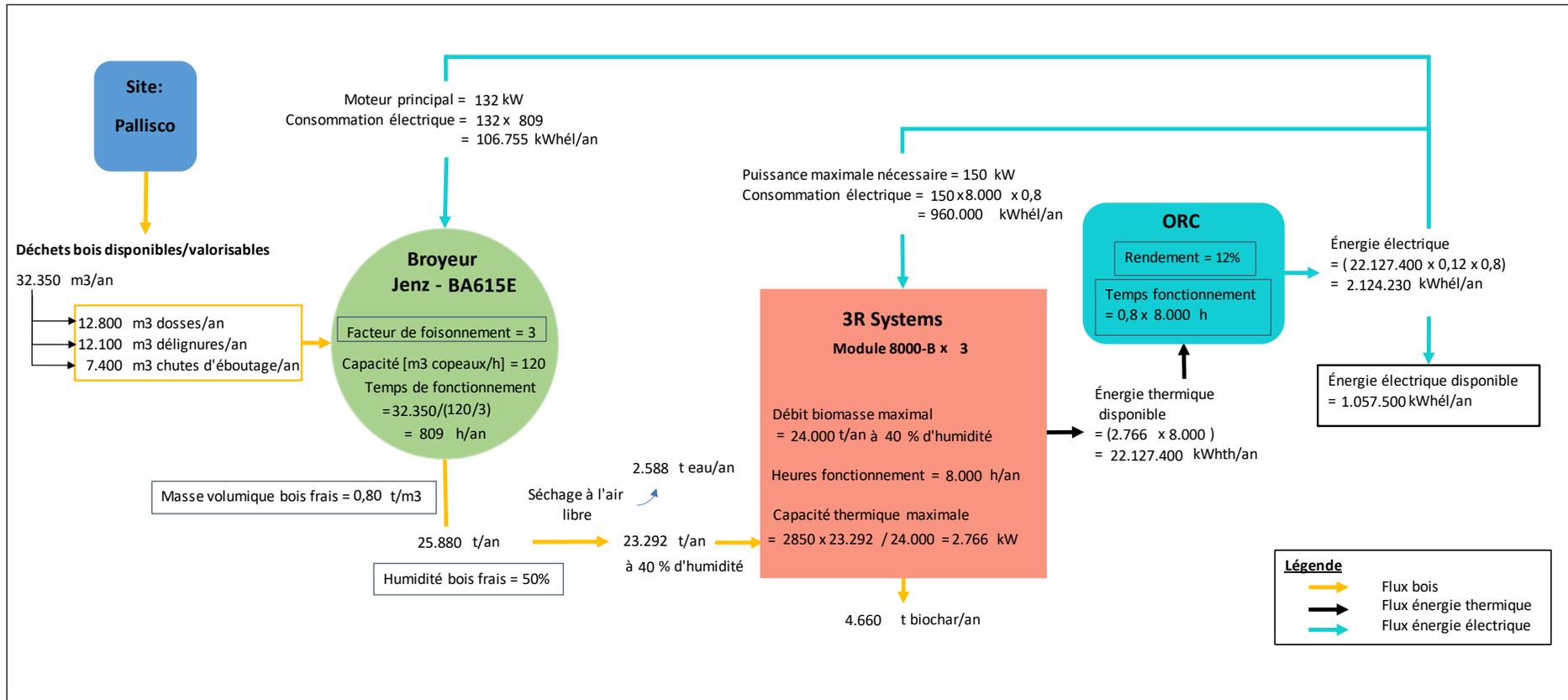


Figure 29 - Schéma de la solution 3R Systems du site de Pallisco – Scénario A

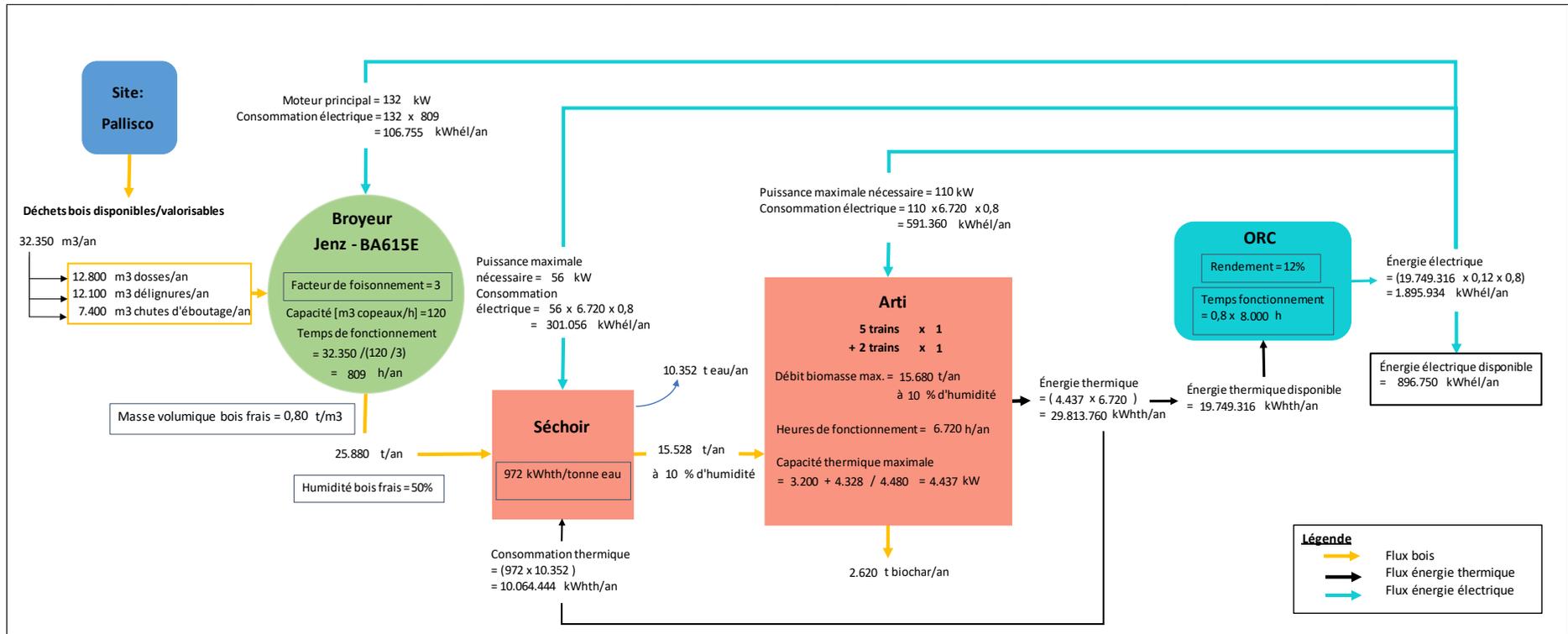


Figure 30 - Schéma de la solution Arti du site de Pallisco – Scénario A

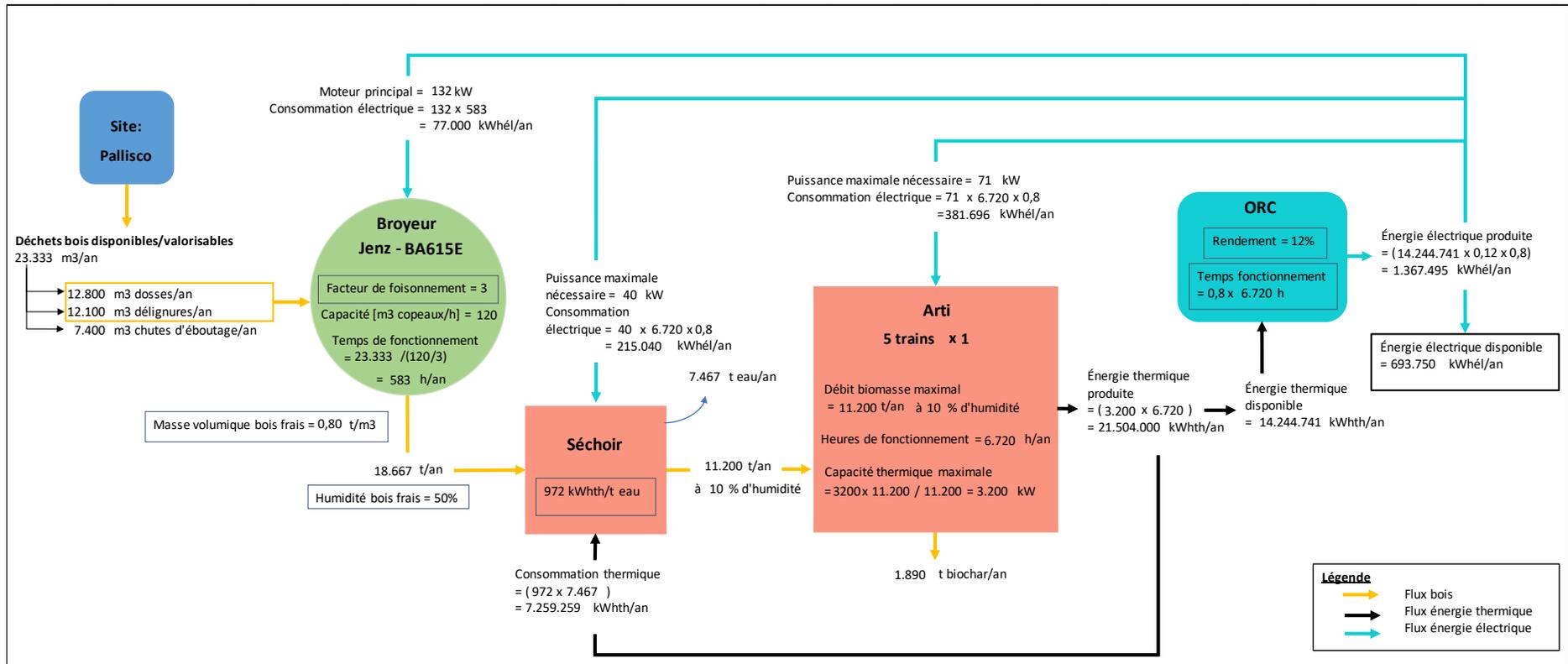


Figure 31 - Schéma de la solution Arti du site de Pallisco – Scénario B

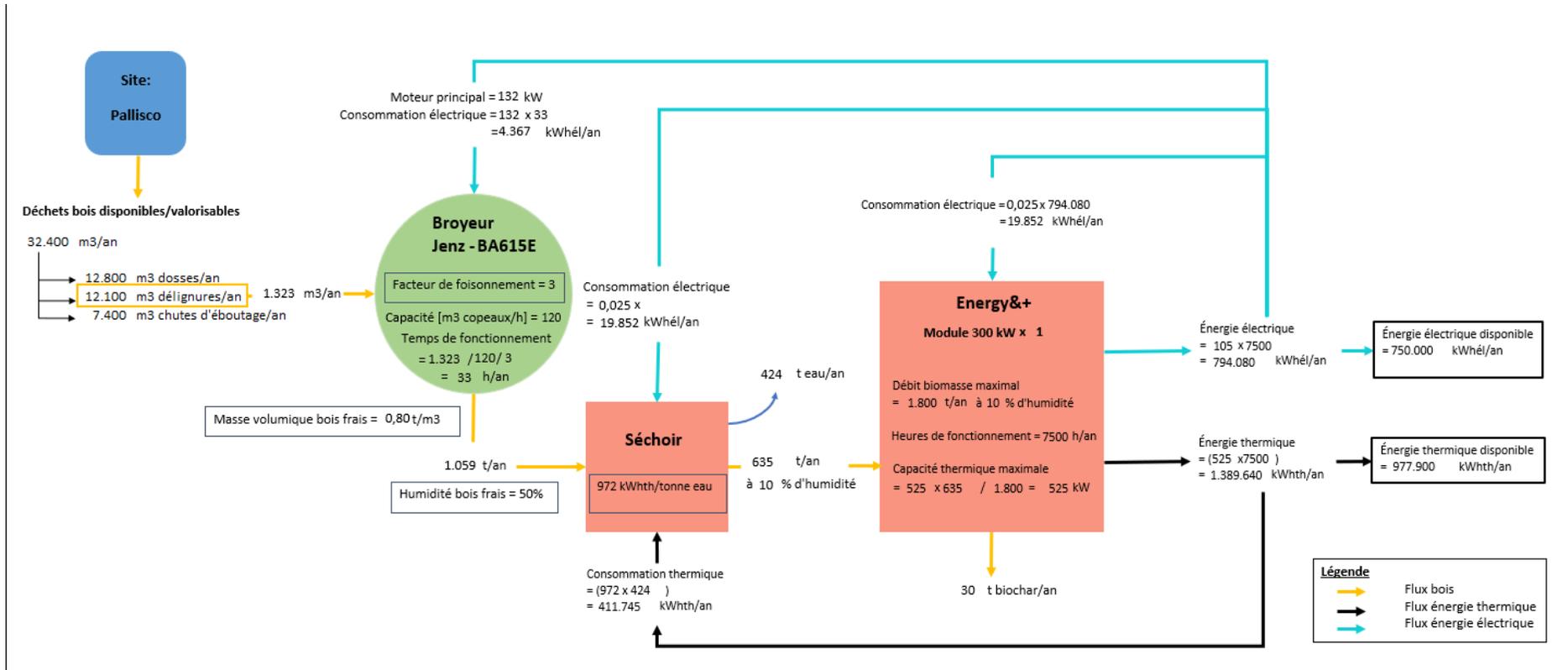


Figure 32 - Schéma de la solution Energy&+ du site de Pallisco – Scénario B



5.4. SYNTHÈSE ET BILAN DES SOLUTIONS

Les solutions proposées pour chacun des sites selon les scénarios A et B montrent que les rendements biochar et énergie diffèrent en fonction des modèles des constructeurs, des quantités de matière disponible et de la consommation énergétique des sites.

La technologie de pyrolyse a pour objectif de produire du biochar avec une énergie thermique résiduelle pouvant être valorisée. À contrario, la pyrogazéification permet un bon rendement énergétique mais ne produit qu'une très faible quantité de biochar.

Dans un objectif de production de biochar, le design de 3R Systems permet l'obtention de 1,5 à 2 fois supérieure à la solution de Arti.

Dans un objectif de production d'énergie, la technologie d'Energy&+, seule retenue et adaptée au contexte de l'étude, permet de produire l'énergie suffisante pour atteindre au moins 80% de la charge de base pour la majorité des sites

Le design Arti permet néanmoins, pour les sites à faible charge de base, comme celui de Pallisco, de couvrir cette dernière en totalité tout en proposant une production de biochar conséquente.

Au niveau des bilans :

Pour le scénario A, les solutions basées sur la technologie de 3R Systems consomment entre 6,9 et 8,7 m³ de bois par tonne de biochar produite. Les solutions basées sur la technologie Arti nécessitent pour leur part un volume compris entre 12,3 et 15,3 m³ de bois par tonne de biochar produite.

A contrario, par tonne de biochar, les modèles de 3R Systems permettent la génération d'une énergie électrique oscillant entre 141 et 230 kWh alors que ceux de Arti propose une énergie relativement constante située entre 330 et 360 kWh.

Pour le scénario B, la solution de Energy&+ propose un rendement électrique constant nécessitant, par kWh électrique produit, un volume de 0,002 m³ de bois. Autrement dit, chaque m³ de bois plaquette injecté dans le pyrogazéificateur permet la production de 500 kWh électrique et 20 kg de biochar.

Comme mentionné en début de rapport, les analyses actuelles ne portent que sur les performances intrinsèques des différentes solutions. Bien que des prix catalogues soient présentés à titre indicatif au chapitre suivant, le choix d'une solution devra tenir compte d'une analyse financière complète qui fera partie intégrante du rapport de synthèse. Celle-ci affinera les valeurs d'investissement requises et inclura les coûts de certification et les revenus potentiels issus de la valorisation du biochar comme intrant agronomique et/ou sous forme de revenus de crédits carbone biochar ou CDM.



5.5. APERCU DES PRIX CATALOGUES DE CHAQUE SOLUTION

5.5.1. Prix généraux

Les prix présentés au Tableau 13 sont les prix d'achat « catalogue » des équipements, fournis par les constructeurs, et ne tiennent pas compte des coûts auxiliaires (transport, installation, maintenance, etc.). Ces derniers seront abordés dans l'analyse financière du rapport de synthèse.

Tableau 13 – Prix des équipements de pyrolyse, pyrogazéification et broyeur

Technologie	Constructeur	Modèle	Prix [millions €]
Pyrolyseur	3R Systems	Module 8000-B	2,20
		Module échelle intermédiaire (1 réacteur)	8,50
		Module grande échelle (2 réacteurs)	15,50
	Arti	1 train	0,62
		2 trains	0,91
		3 trains	1,00
		4 trains	1,35
5 trains		1,66	
Pyrogazéificateurs	Energy&+	Module 300 kW	2,50
Broyeur	Jenz	BA615	0,27

5.5.2. Prix total par site et solution

Pour chaque site et scénario, un ordre de grandeur pour l'achat des équipements des différentes solutions est fourni à titre indicatif au Tableau 14. Ce prix inclut les machines de pyrolyses/gazéification et le broyeur BA615 de la marque Jenz dont le coût est de 0,27 million d'euro. Le coût de l'ORC et les autres coûts auxiliaires seront présentés dans le bilan financier du rapport de synthèse.

Tableau 14 – Prix des équipements

Site	Scénario	Constructeur	Configuration (broyeur inclus)	Coût [M€]
CIB Pokola	A	3R Systems	3 x Module 8000	$3 \times 2,20 + 0,27 = 6,87$
		Arti	1 x « 5-trains » + 1 x « 2-trains »	$1,66 + 0,91 + 0,27 = 2,84$
CIB Enyéllé	A	3R Systems	4 x Module 8000	$4 \times 2,20 + 0,27 = 9,07$
		Arti	1 x « 5-trains » + 1 x « 4-trains »	$1,66 + 1,35 + 0,27 = 3,29$
	B	Energy&+	1 x Module « 300 kW »	$2,50 + 0,27 = 2,77$
CEB	A	3R Systems	1 Module « échelle intermédiaire »	$1 \times 8,50 + 0,27 = 8,77$
		Arti	2 x « 5-trains »	$2 \times 1,66 + 0,27 = 3,60$
	B	Energy&+	1 x Module « 300 kW »	$1 \times 2,50 + 0,27 = 2,77$
GSEZ Nkok	A	3R Systems	3 x Module 8000	$3 \times 2,20 + 0,27 = 6,87$
		Arti	1 x « 5-trains »	$1,66 + 0,27 = 1,93$
		Energy&+	7 x Module « 300 kW »	$7 \times 2,50 + 0,27 = 17,77$
GSEZ LMR	A	3R Systems	1 x Module « grande échelle » + 3 x Module 8000	$15,50 + 0,27 = 15,77$
		Arti	7 x « 5-trains »	$7 \times 1,66 + 0,27 = 11,92$
	B	Energy&+	3 x Module « 300 kW »	$3 \times 2,50 + 0,27 = 7,77$
Pallisco	A	3R Systems	3 x Module 8000	$3 \times 2,20 + 0,27 = 6,87$
		Arti	1 x « 5-trains » + 1 x « 2-trains »	$1,66 + 0,91 + 0,27 = 2,84$
	B	Arti	1 x « 5-trains »	$1,65 + 0,27 = 1,93$
		Energy&+	1 x Module « 300 kW »	$2,50 + 0,27 = 2,77$



6. ACTIVITES A VENIR

Conformément aux résultats attendus de ce projet, plusieurs aspects doivent encore être développés pour mener cette étude à terme, en particulier :

- Les contraintes et potentiel de certification

Cette section présentera les résultats des analyses menées d'une part sur la certification du biochar proprement dite et du potentiel de valorisation sous forme de crédit carbone et, d'autre part, sur le potentiel de valorisation de la réduction de la consommation de gasoil engendrée par l'opérationnalisation des solutions via les méthodologies CDM. Les différents standards de certification seront présentés avec leurs méthodologies, exigences et procédures respectives. Les contraintes et opportunités de chaque certification seront décrites afin de permettre aux entreprises partenaires d'appréhender l'ensemble des étapes et ressources nécessaires pour la mise en place des processus y afférents.

- Le potentiel d'utilisation agronomique du biochar

Les résultats de la revue bibliographique et des échanges avec les différents acteurs rencontrés seront présentés dans cette section. Une analyse succincte des coûts et revenus potentiels de même que la contribution potentielle du biochar aux stratégies climatiques des entreprises et des pays concernés. Les impacts en lien avec les objectifs de certification FSC et PEFC seront également décrits. Finalement, les résultats obtenus lors de test d'utilisation de biochar dans des activités de reboisement en Côte d'Ivoire mis en œuvre par ETICWOOD seront présentés à défaut d'avoir pu mener les tests espérés avec les entreprises partenaires.

- L'analyse financière et la rentabilité

Cette section mettra en balance les coûts de mise en œuvre des solutions techniques proposées (incluant achat, transport, montage, opérationnalisation, maintenance) et les revenus potentiels attendus. Ces revenus seront analysés au travers des différentes possibilités de valorisation des solutions, que ce soit sous forme d'intrant agronomique pour le biochar ou sous forme de crédit carbone par la certification biochar (séquestration de carbone dans les sols) ou les méthodologies CDM (diminution des émissions liées à la consommation d'énergie fossile). Les résultats de l'étude des marchés, menée en collaboration avec South Pole seront également présentés pour étayer les hypothèses posées et les scénarios envisagés.

Tel qu'annoncé en début de document, l'ensemble des résultats de ces analyses fera partie intégrante du rapport de synthèse.



7. ANNEXES

ANNEXE 1 : PRESENTATION 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.

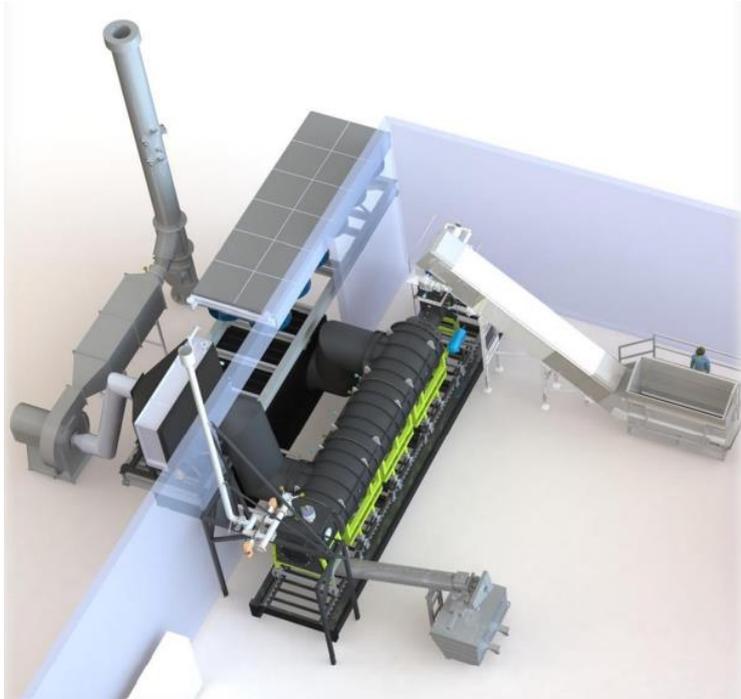


Schéma de l'unité de pyrolyse Pyrocore

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.

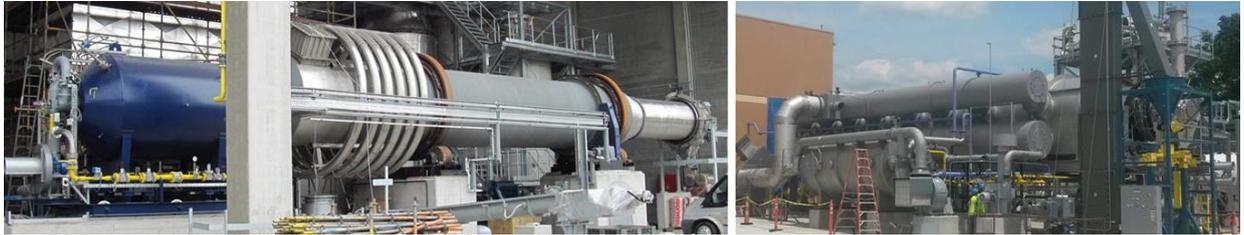


Photographie du modèle Beston BST-50.



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 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 : PRESENTATION DES CONSTRUCTEURS DE PYROGAZEFICIATEURS

Energy&+

[Energy&+](#) est un constructeur français qui a déjà mené un projet de mise en place d'un pyrogazéificateur (Figure 33) à Yangambi, en République Démocratique du Congo.



Figure 33 – 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 DONNEES

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 terrassage, 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	