

Valorisation énergétique des déchets issus de la transformation de l'ananas en jus à promo fruits Bénin: Etude de faisabilité et émergence de solution

[Energy recovery of pineapple juice processing waste at Promo fruits Benin: Feasibility study and solution emergence]

Romain AKPASSONOU¹, Thierry GODJO¹, Farid ADAMON¹⁻², Honorat SATOQUINA³, Clotilde Guidé², and Joachim GBENOU¹⁻⁴

¹Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur et de Mathématiques Appliquées, Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques, B.P. 2282 Goho, Abomey, Benin

²Laboratoire des Procédés et d'Innovations Technologiques, Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques, Institut National Supérieure de Technologie Industrielle, BP : 133 B.P. Lokossa, Benin

³Laboratoire Kaba de Recherche en Chimie et Applications, Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques, B.P. 2282 Goho, Abomey, Benin

⁴Laboratoire d'Economie Publique, Université d'Abomey Calavi, B01 BP 526, Cotonou, Benin

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Pineapple waste at Promo Fruits Benin is bulky and difficult to manage. In addition, the company is dependent on electrical and thermal energy. With the aim of reducing waste and the energy bill, a technical-economic and environmental study was carried out. The methodology used is based on the analysis of energy needs, the study of recovery processes, economic and environmental analysis. The results showed that the company's annual energy consumption in electricity and diesel is 600 MWh and 307,695 liters respectively. The annual waste potential available is 11,607 T while that necessary to meet the company's energy needs is 14,904 T. The study of the choice of process retained biomethanation. The Functional Specifications of the reactor allowing said recovery has been defined and the digester has been sized. The economic study for a period of 25 years revealed that the investment cost is 2,101,196,208 FCFA and that the operating cost is 19,385,128 FCFA per year. In addition, the study made it possible to reduce from 96,434,691.12 FCFA to 0 FCFA the annual bill for electrical energy and from 123,078,750 FCFA to 71,898,186 FCFA for thermal energy of the company. From an environmental point of view, a reduction of 472.76 tonnes CO₂/year is obtained from emissions produced by non-recovered waste.

KEYWORDS: Biomass recovery, Pineapple waste, Biogas, Benin.

RESUME: Les déchets d'ananas au sein de l'entreprise Promo Fruits Bénin sont encombrants et difficiles à gérer. Par ailleurs, l'entreprise est dépendante en énergies électrique et thermique. Dans le but de réduire les déchets et la facture énergétique, une étude technico-économique et environnementale a été menée. La méthodologie utilisée repose sur l'analyse du besoin énergétique, l'étude des procédés de valorisation, l'analyse économique et environnementale. Les résultats ont montré que les consommations énergétiques annuelles de l'entreprise en électricité et gasoil sont respectivement de 600 MWh et 307 695 litres. Le potentiel annuel de déchet disponible est 11 607 T tandis que celui nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques de l'entreprise est 14 904 T. L'étude du choix du procédé a retenu la biométhanisation. Le Cahier des Charges Fonctionnel du réacteur permettant ladite valorisation a été défini et un digesteur a été dimensionné pour une production de 715 035 m³ par an de méthane. L'étude économique pour une durée de 25 ans a révélé que le coût d'investissement est 2 101 196 208 FCFA et que celui d'exploitation est 19 385 128 FCFA par an. Par ailleurs, l'étude a permis de réduire de 96 434 691,12 FCFA à 0 FCFA la facture annuelle en énergie électrique et de 123 078 750 FCFA à 71 898 186 FCFA celle en énergie thermique de l'entreprise. Sur le plan environnemental, une réduction de 472,76 tonnes CO₂/an est obtenue des émissions produites par les déchets non valorisés.

MOTS-CLEFS: Valorisation Biomasse, Déchets Ananas, Biogaz, Bénin.

1 INTRODUCTION

Au Bénin, l'ananas est la troisième culture à potentiel d'exportation après le coton et l'anacarde. Il représente 0,42 % du PIB national et 1,95 % du PIB agricole [1] et constitue un enjeu socio-économique important au sein du pays. C'est un fruit présent sur un large éventail de marchés et sa croissance favorise l'amélioration des revenus de la population active rurale et la création d'emplois [2]. Il est périssable et sa dégradation commence 4 à 5 jours après la récolte dans les conditions normales, d'où la nécessité de le traiter et de le convertir en un produit plus stable avec une longue durée de conservation [3]. Pour Adda [4], au cours de la campagne 2020-2021, les quantités d'ananas commercialisées au Bénin sont de l'ordre de 264 834 tonnes et la quantité totale annuelle transformée pour l'ensemble des unités dénombrées s'élève à 99 814 tonnes entre 2020-2021. Ces quantités sont transformées à trois niveaux d'échelle : artisanale, semi-industrielle et industrielle. La caractéristique commune de ces trois échelles est de générer un produit fini qui sera consommé [5]. Ces différentes échelles vivent en harmonie, formant un continuum d'activités aux caractéristiques bien définies et répondant à différents segments de marché. L'échelle industrielle regroupe des unités de production qui sont mises à niveau avec une meilleure structuration des activités sur les plans technique, économique et social. C'est le cas de l'entreprise Promo Fruits Bénin, une usine agroalimentaire spécialisée dans la production de jus d'ananas. Elle est située à Allada, une commune au Sud-Bénin. Sa capacité de transformation est 21 900 tonnes d'ananas par an. La transformation de l'ananas en jus nécessite une quantité importante d'énergie. Au cours du processus, deux sources d'énergie principales sont utilisées : l'énergie électrique pour l'alimentation en électricité des différents outils de production de l'entreprise et l'énergie thermique constituée de gazoil pour la production de vapeur d'eau nécessaire pour la pasteurisation du jus. Malheureusement, l'accès à ces différentes formes d'énergie est difficile. En effet, au Bénin, le secteur de l'énergie connaît des crises importantes dues à des pénuries de gaz, de pétrole et d'électricité. Face à ce déficit énergétique, une alternative est de se baser sur les ressources naturelles dont dispose le Bénin pour réduire sa dépendance énergétique. Concernant la transformation de l'ananas en jus au sein de l'entreprise Promo Fruits Bénin, les déchets issus de celle-ci sont majoritairement constitués de couronnes et tourteaux brûlés [6] ou laissés dans la nature générant ainsi des nuisances sur le plan de la santé et de l'environnement (dioxyde de carbone, méthane, etc.). Sur la santé humaine, il a été largement prouvé que les déchets produisent à court, moyen ou long termes, des incidences allant de l'intoxication ou l'asphyxie jusqu'à la maladie chronique (asthme, hypersensibilité, etc.) ou encore la cancérogénèse [7]. Sur le plan environnemental, il est aujourd'hui indéniable que les déchets ont un fort pouvoir polluant et nuisible pour les composantes des écosystèmes. Au regard de ce qui précède n'est-il pas impératif pour rendre plus compétitive l'entreprise de valoriser énergétiquement les déchets en son sein afin de réduire sa dépendance énergétique et aussi le gisement des déchets nuisibles et difficiles à gérer ? Pour y parvenir, la présente étude technico-économique et environnementale a été menée.

2 PROCESSUS DE TRANSFORMATION DE L'ANANAS EN JUS AU SEIN DE PROMO FRUITS BÉNIN

Au sein de l'entreprise Promo Fruits Bénin, le processus de transformation de l'ananas en jus est décrit dans la Figure 1.

Les étapes unitaires de ce processus sont les suivantes : le triage et le parage des fruits d'ananas, le lavage, le brossage et le rinçage, le broyage, le pressage, le filtrage, la pasteurisation, le remplissage et sertissage, le refroidissement et puis le conditionnement (Fig. 1). La qualité du jus final dépend principalement de la qualité des fruits d'ananas et de la manière par laquelle les étapes de transformation ont été menées. Au Bénin, deux variétés sont utilisées dans le processus de transformation de l'ananas en jus : la cayenne lisse en minorité et majoritairement le pain de sucre [8]. Le triage et le parage de l'ananas constituent la première étape du processus de production de jus d'ananas naturel. Ils sont principalement menés par les femmes qui trient et en débarrassent les fruits abimés, les fruits trop mûrs et les couronnes. Les ananas conservés pour la production du jus sont des ananas fermes, peu mûrs ou juste à maturité. Au sein de l'entreprise, le rendement de triage et parage est de l'ordre de 85 %. Les déchets générés sont des fruits avariés et des couronnes d'ananas. Ces déchets représentent 13,78 % de la masse totale des fruits d'ananas. Un lavage soigneux permet l'élimination du sable, les micro-organismes et les traces de traitement phytosanitaire. Les fruits triés et parés sont ensuite convoyés vers le bac de lavage pour le processus de lavage avec de l'eau comestible. L'eau est vidée du bac et renouvelée chaque 2 min. A partir du lavage, les opérations unitaires sont mécanisées. La machine laveuse est composée d'un réservoir de lavage, d'un convoyeur de transport avec des volées, de buses de pulvérisation aériennes, d'un réservoir de pompe avec filtre et d'un panneau de commande. L'opération de lavage nécessite beaucoup d'eau [9] et il en découle des effluents. L'entreprise ne dispose pas de traitement ou d'infrastructure d'évacuation des eaux usées. A la fin du lavage, les fruits sont brossés par une machine électrique d'une puissance munie de brosse de haute qualité en acier inoxydable et durable. Les ananas brossés sont ensuite rincés pour éliminer d'avantages les micro-organismes. A la suite de cette étape, les fruits sont récupérés sur les claies de la vis de presse pour le broyage. Les ananas broyés sont répartis en couches régulières sur les claies de la presse qui permet l'extraction du jus d'ananas. A la sortie de la presse, les tourteaux sont produits et transportés hors de l'entreprise. Ces tourteaux représentent 39,22 % de la masse totale des fruits d'ananas.

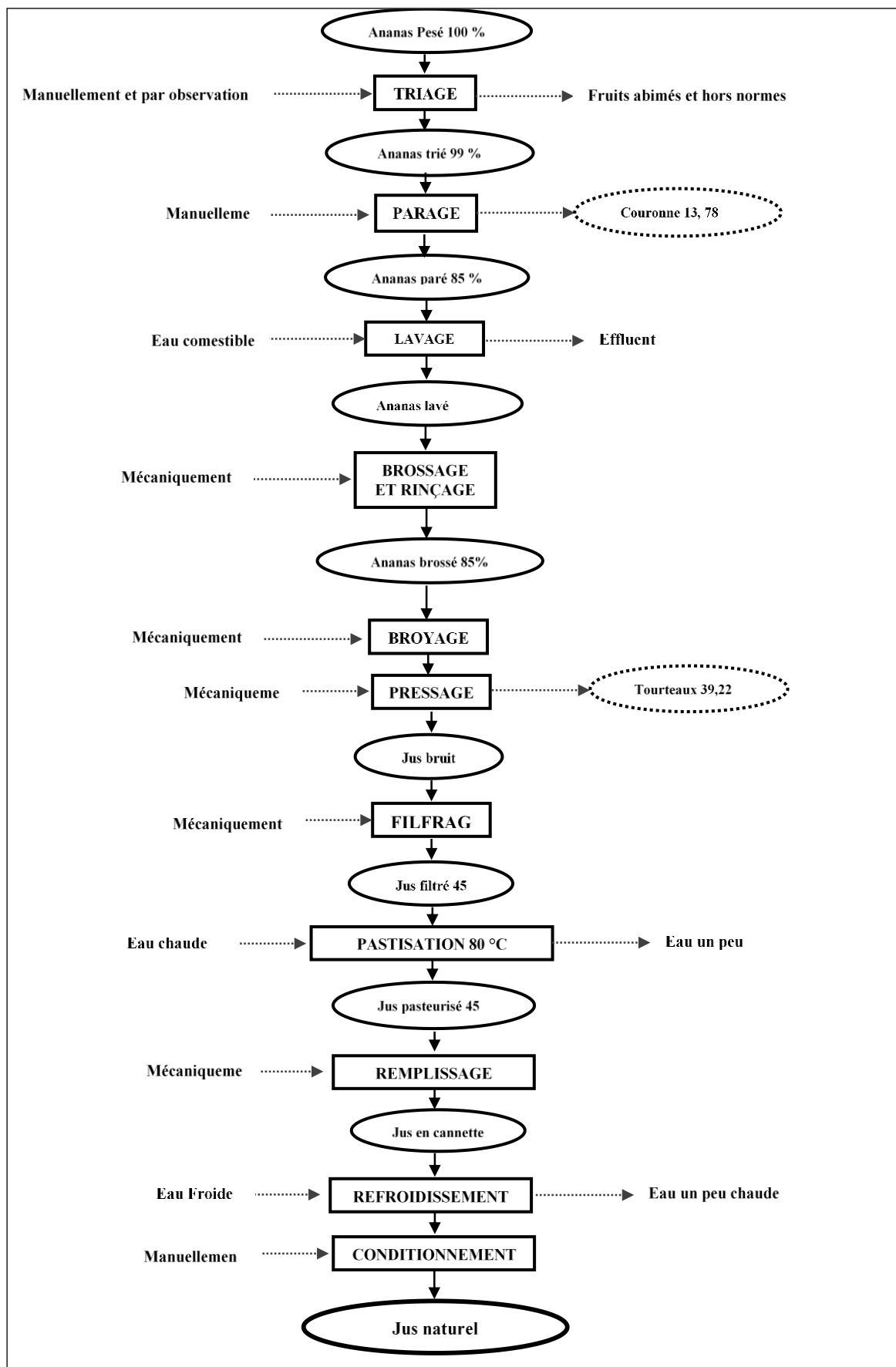


Fig. 1. Description des opérations séquentielles de production de jus naturel à Promo Fruit Benin

La filtration permet d'obtenir du jus brut qui est stocké dans un réservoir. La pasteurisation s'effectue dans un échangeur à plaque ou tubulaire à une température de 88 à 95°C pendant 10 à 12 sec. L'opération de sertissage permet la mise en cannette par une doseuse remplisseuse et une sertisseuse automatique du jus d'ananas pasteurisé. L'activité de transformation de l'ananas en jus génèrent d'importants volumes d'effluents qui contiennent des substances hautement létales et qui affectent la biodiversité, l'homme, les animaux, la faune et la flore, et affectent les paramètres physico-chimiques de l'eau et du sol. Roda et Lambi [10] ont rapporté que les déchets issus de la transformation de l'ananas peuvent avoir des conséquences néfastes sur l'homme. Pour Derek [11], la pollution olfactive peut déclencher une sensation désagréable qui pourrait avoir des réactions physiologiques et des fonctions olfactives indésirables. Il a ajouté que certaines des réactions indésirables associées à la pollution olfactive comprennent des difficultés à respirer et à dormir, la toux, la perte d'appétit, l'irritation des yeux, du nez et de la gorge, la perturbation de l'environnement extérieur, la gêne, etc. Du point de vue impact socio-économique, Izah et al. [12] ont opiné que l'odeur de l'usine de transformation de l'ananas pourrait aggraver ou dévaloriser la fierté de la communauté, en particulier dans les communautés avec un taux élevé de transformation de l'ananas, interférer avec les relations humaines conduisant à une gêne malsaine, décourager les investissements en capital conduisant à une croissance lente dans cette communauté en dehors de la transformation de l'ananas.

3 MATERIEL ET METHODES

3.1 CADRE D'ÉTUDE

Cette étude de faisabilité de la valorisation énergétique des déchets issus de la transformation de l'ananas en jus a été réalisée au sein de l'entreprise Promo Fruit Bénin spécialisée dans la production de jus d'ananas. Cette entreprise est située dans le sud du Bénin à 90 km de la capitale (Fig. 2).

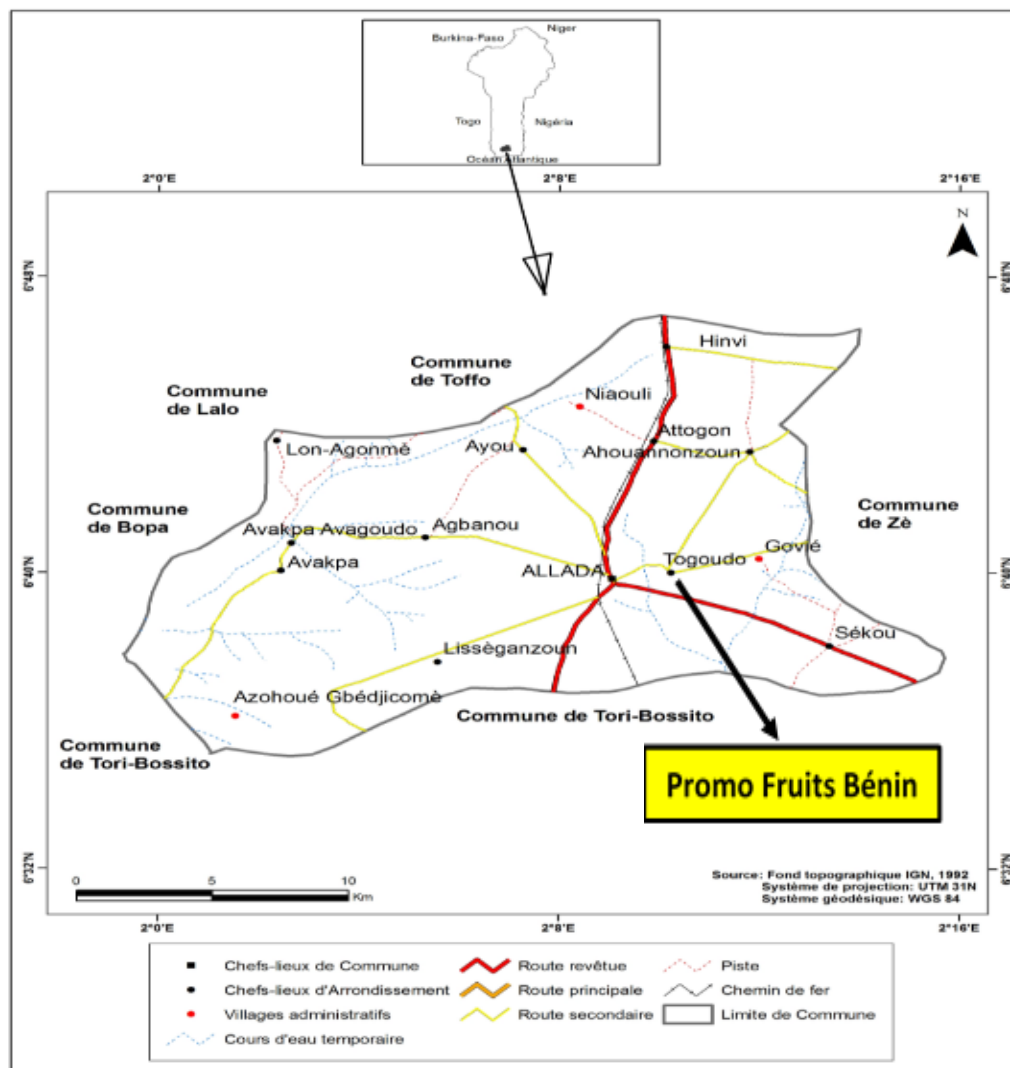


Fig. 2. Situation géographique de Promo Fruits Bénin

Le nombre d'employés de l'entreprise est 105 personnes et sa capacité de transformation annuelle est 21 900 tonnes d'ananas. Promo Fruits Bénin a été enregistrée au registre de commerce et bénéficie des agréments de la CEDEAO, de l'UEMOA et de DANA. Certifié HACCP en Janvier 2017 et ISO 22000 pour ses jus en cannette, elle met sur le marché actuellement (Fig. 3.) :

- Le jus de fruits en cannette et en Gable Top sans additifs chimiques ;
- Le nectar de fruits en cannette et en Gable Top ;
- La tranche d'ananas et d'autres fruits tropicaux en conserve ;
- Le concentré d'ananas et purée de mangue ;
- Jus en doypack de 150 ml ;
- Et la purée jus en poche aseptique de 200 l.



Jus de fruits en cannette

Nectar de fruits en cannette

Tranche d'ananas

Jus en poche aseptique

Fig. 3. Jus de fruits fabriqués par Promo Fruits Bénin

3.2 MATÉRIEL

Le matériel végétal utilisé dans le cadre de cette étude est constitué de déchets de couronne et de tourteaux d'ananas (Fig. 4) issus du parage et du pressage de l'ananas.



a-couronnes d'ananas

b-tourteaux d'ananas

Fig. 4. Déchets d'ananas au sein de Promo Fruits Bénin

Les études menées par Kumar et al. [13] ont révélé que les couronnes d'ananas ont en moyenne une teneur en humidité et en matière sèche qui s'élèvent respectivement à 83,4 % et 16,8 % en base humide. Le taux de matière volatile et la teneur en cendre en base sèche sont respectivement estimés à 94,9 % et 5,1 %. Quant à la composition centésimale des couronnes d'ananas, elles sont constituées de carbone, d'hydrogène, d'azote et d'oxygène dont les pourcentages sont respectivement 44,05 %, 5,81%, 0,87 % et 49,27 %. Le tableau 1 présente les caractéristiques physico-chimiques de la couronne d'ananas.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques de la couronne d'ananas [13]

Paramètre	Couronne d'ananas
Humidité H (%) ^h	83,4±1,8
Matière Sèche MS (%) ^h	16,8±1,8
Matière Volatile MV (%) ^s	94,9±0,6
A (% cendre) ^s	5,1±0,6
Sucre soluble totaux ^s	38,14±4,2
Hémicellulose (%) ^s	11,63±0,6
Cellulose (%) ^s	13,32±24
Lignine (%) ^s	15,03±0,6
Sucre réductible ^s	5,23±0,1
C	44,05
H	5,81
N	0,87
O	49,27
C/N	50,63

/ h : en base humide, s : en base sèche.

L'étude menée par Perraud [14] sur la fermentation en milieu solide de tourteaux d'ananas a relevé que la teneur en matière sèche, le pH et le rapport carbone-azote des tourteaux d'ananas sont respectivement 26 %, 5,6 % et 43,3% (Tableau 2).

Tableau 2. Caractéristiques physico-chimiques de tourteaux d'ananas [14]

Composition (en MS)	Tourteau d'ananas
MS	26 %
Cendres	2,8 %
Amidon	23,2 %
Cellulose	28,2 %
Hémicellulose	34,9 %
Lignine	2,2 %
PH	5,6
Sucres Totaux	4,8 %
C/N	43,3

3.3 MÉTHODES

3.3.1 ANALYSE DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

La méthode pour déterminer les besoins énergétiques consiste à évaluer la consommation en énergie et ensuite réaliser l'analyse fonctionnelle du besoin.

Méthode d'évaluation de la consommation énergétique

La méthode utilisée pour évaluer la consommation énergétique de l'entreprise Promo Fruits Bénin est basée sur la méthode de [15] consistant à :

- Inventorier toutes les sources d'énergie de l'entreprise
- Calculer l'énergie absorbée instantanée de chaque dispositif $W_i(t)$, et
- Calculer la somme des énergies consommées $W_T(t)$ par la formule :

$$W_T(t) = \sum_1^n W_i(t)$$

Avec n le nombre d'équipement au sein de l'entreprise.

Analyse Fonctionnelle du Besoin

L'Analyse Fonctionnelle du Besoin est un outil normalisé (NF X 50-150) constituant la référence en Génie Industriel. Elle permet d'exprimer les attentes en termes de Services rendus. La philosophie de l'Analyse Fonctionnelle de Besoin consiste à "Eviter toute première solution", c'est-à-dire ne pas avoir en tête une solution technique mais avoir un certain nombre de fonctions attendues par les utilisateurs, pour définir clairement ce que le produit attendu doit pouvoir répondre aux attentes des utilisateurs, notamment avec une mission prioritaire [16]. L'analyse fonctionnelle externe exprime le besoin sous forme de fonctions de service en raisonnant fonctions et non solutions. Ces fonctions mettent en évidence les relations entre le produit et son environnement [17]. Le cahier des charges fonctionnel présente cette modélisation du besoin sous la forme d'un ensemble de fonctions validées, caractérisées et hiérarchisées. Il représente également le document d'engagement d'un projet dont il constitue le "contrat" pendant toute la durée du projet. L'analyse fonctionnelle interne permet de représenter graphiquement l'enchaînement logique des fonctions techniques nécessaires à la réalisation de la fonction principale de l'analyse fonctionnelle externe. La fonction technique est une action interne au produit (entre ses constituants) définie par le concepteur, dans le cadre d'une solution, pour assurer les fonctions de service. Une fonction de service correspond à une chaîne de fonctions techniques. Le "Functional Analysis System Technic (FAST)" est un outil de définition des fonctions techniques.

Méthode d'évaluation du Potentiel de Biomasse

L'évaluation du potentiel de biomasse de l'entreprise Promo Fruits Bénin est basée sur une observation participante [18] de la transformation de l'ananas au sein de l'entreprise. Le potentiel de biomasse brute est la quantité totale de déchets résultant de la transformation de l'ananas en jus. Le potentiel de biomasse nette est la différence entre la quantité de biomasse brute et la quantité de déchets vendus par l'entreprise.

3.3.2 MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT DU BIODIGESTEUR

La méthode utilisée pour le dimensionnement du biodigesteur est basée sur la méthodologie de dimensionnement des digesteurs [19]. De nombreux paramètres déterminent ce dimensionnement. Il s'agit du volume, le taux de charge organique et la production volumique du digesteur.

Volume du digesteur

Le volume du digesteur est calculé à partir du volume de substrat apporté par jour multiplié par le temps de séjour théorique de celui-ci dans le digesteur. En référant aux travaux de Rousseau et al. [20], le temps de séjour des déchets est estimé à 20 jours. Aussi le vide qu'il faut laisser dans le digesteur pour favoriser la décomposition des déchets est intégré dans le calcul du volume de ce dernier. Ce vide représente environ 20 % du volume total du substrat pendant le temps de séjour de celui-ci. La formule suivante donne l'expression du volume du digesteur.

$$V_{\text{digesteur}} = V_{\text{substrat}} \times TRH + 0,2 V_{\text{substrat}} \times TRH$$

$$\text{Soit } V_{\text{digesteur}} = 1,2 V_{\text{substrat}} \times TRH$$

Avec V_{substrat} : le volume journalier du substrat (m^3/jour) et TRH : le temps de rétention hydraulique ou le temps de séjour du substrat dans le digesteur (jour).

Le digesteur est modélisé par une cuve de forme cylindrique et ayant à sa base inférieur une demi-sphère. L'expression du volume est aussi donc $V_{\text{digesteur}} = V_1 + V_2$ avec V_1 et V_2 les volumes respectifs de la partie cylindrique et de la partie hémisphérique. Les dimensions de la partie cylindrique du digesteur sont déterminées par la formule :

$$V_1 = \pi r^2 h$$

Avec r le rayon et h la hauteur de la partie cylindrique. Connaissant le volume de la partie cylindrique et en posant $h = 2r$, le rayon et la hauteur de la partie cylindrique du digesteur sont déterminés.

Les dimensions de la partie hémisphérique du digesteur sont déterminées en connaissant aussi le volume de la partie hémisphérique par la formule suivante :

$$V_2 = \frac{1}{3} \pi \times (r_1^2 + r_2^2 + r_1 \times r_2) \times H$$

Avec r_1 le rayon supérieur de l'hémisphère égal au rayon r du cylindre, r_2 et H respectivement le rayon inférieur et la hauteur de l'hémisphère. Le rayon r_2 étant la sortie du digestat sa dimension est fixé à 1,5 m.

Le taux de charge organique

Le taux de charge organique (TCO) est la quantité de matière organique apportée par unité de volume du digesteur et par jour [21]. Il s'exprime en kg de matière volatile par jour par mètre cube du digesteur. Ce taux d'alimentation est déterminé par l'expression suivante.

$$TCO = \frac{MV \times Q}{V_{\text{digesteur}}}$$

Avec MV : teneur en Matière Volatile du substrat (kgMV.m⁻³), Q : débit d'entrée (m³/jour).

La production volumique

C'est le volume de biogaz produit par unité de volume du digesteur [22]. La production volumique P_v est déterminée par la formule suivante :

$$P_v = \frac{M_{\text{biomasse}} \times P_{mt}}{V_{\text{digesteur}}}$$

Avec M_{biomasse} la masse des déchets d'ananas (en tonne) et P_{mt} la production de biogaz théorique par tonne de déchets (m³/tonne).

3.3.3 MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU DIGESTEUR

La modélisation numérique du digesteur est réalisée sur TopSolid, un logiciel de conception et fabrication assistées par ordinateur. A partir des informations sur le procédé, le digesteur dimensionné est modélisé puis le dossier de fabrication est élaboré par la suite.

3.3.4 ÉVALUATION DE L'ÉNERGIE RÉCUPÉRÉE DE LA MÉTHANISATION DU POTENTIEL NET DES DÉCHETS D'ANANAS

L'énergie récupérée de la méthanisation du potentiel net des déchets d'ananas est l'énergie contenue dans le biogaz. Les travaux de Amon et al. [23], ont relevé un rendement de biogaz de 0,55 m³/kg de matière volatile avec une teneur en méthane de 51 % de la méthanisation les déchets d'ananas frais. Le Pouvoir Calorifique Inférieure du méthane est 9,94 kWh/m³ [24]. L'expression suivant donne une estimation de cette énergie.

$$E_{CH_4} = 0,51 M_{\text{biomasse}} \times P_{\text{biomasse}} \times PCI_{CH_4}$$

Avec M_{biomasse} , la masse des déchets d'ananas en kg de matière volatile,

P_{biomasse} : le Potentiel méthanogène des déchets d'ananas et

PCI_{CH_4} , le Pouvoir Calorifique Inférieure du méthane.

Cette énergie du bio méthane est utilisé dans un groupe à biogaz à cogénération dont le rendement électrique et le rendement thermique sont respectivement 38 % et 40%. L'objectif est de produire de l'électricité et de la chaleur. La chaleur produite par le groupe de cogénération est utilisée par l'installation d'un échangeur de chaleur qui permettra l'échange de chaleur entre les fumées produites par le groupe et l'eau contenue dans la chaudière de l'entreprise. Pour son fonctionnement, l'unité de méthanisation consomme entre 30 % et 40 % l'électricité produite à partir du biogaz obtenu [25]. L'énergie thermique utilisée représente 20 % de l'énergie thermique produite également.

3.3.5 MÉTHODE D'ÉTUDE ÉCONOMIQUE

La méthode d'étude économique regroupe la détermination des critères de rentabilité définis [26]. Il s'agit de la Valeur Actuelle Nette du projet, du Délai de récupération du capital investi et le Taux de rendement interne

Valeur Actuelle Nette du projet

Avec la méthode fiscale, la Valeur Actuelle Nette du projet (VAN) est donnée par la formule suivante :

$$VAN = -I + \sum \text{recettes} \times (P/A, i\%, n) - \sum \text{Coûts} \times (P/A, i\%, n)$$

Avec, I : Coût initial,

Σ coûts : Somme des dépenses actualisées (frais de fonctionnement, de renouvellement, d'entretien et de maintenance) durant toute la durée de vie du projet,

Σ recettes : Somme des bénéfices réalisés sur la consommation électrique, du carburant,

n = Durée du projet,

P = valeur Présente d'un montant,

A = valeur actuelle d'un montant au cours de l'année n,

(P/A, i%, n) = coefficient de calcul de P sachant A au taux i sur n années.

Les coûts d'investissement I comprennent les dépenses effectuées lors de l'installation de l'unité de méthanisation, les frais de transport et d'installation des différents composants du système, ainsi que les coûts de génie civil associés. Les frais généraux couvrent les frais de réalisation, et de surveillance du chantier.

Les charges d'exploitation Σ coûts peuvent se diviser comme suit :

- Les frais de fonctionnement : Coût de rémunération des opérateurs ;
- Les frais d'entretien et de réparation : Coût d'intervention du personnel qualifié assurant la maintenance du système (main-d'œuvre et déplacement) et la réparation ;
- Les frais de renouvellement: Coût des composants à renouveler durant la durée de vie du système.

Les recettes prévues pour le fonctionnement de l'installation du système se basent sur la vente d'électricité nette, la vente de compost et la vente de l'énergie thermique produite par l'unité de méthanisation.

Le mode d'utilisation du critère de la VAN est la suivante:

Si la VAN > 0, le projet est rentable;

Si la VAN < 0, le projet est rejeté.

Délai de récupération du capital investi

Le Délai de récupération du capital investi (DRC) est le délai nécessaire pour que les recettes du projet équilibrent le montant des dépenses d'investissement.

$$DRC = \frac{\text{Montant des dépenses}}{\text{Recette par an}}$$

Taux de rendement interne

Le taux de rendement interne (TRI) est le taux pour lequel la valeur actuelle des revenus est égale au capital investi.

Si le TRI est supérieur au coût du capital de 10% ; le projet est retenu.

Si le TRI est inférieur à 10 %, le projet est rejeté.

3.3.6 MÉTHODE D'ÉTUDE ENVIRONNEMENTALE

La méthode développée par Smith et al. [27] permet d'estimer les émissions du méthane issu des déchets pendant une année. Ces émissions s'observent à trois niveaux : l'émission de méthane produit par décomposition anaérobie des déchets du dépotoir qui n'a pas oxydé; l'émission de la fraction de méthane produit par le dépotoir qui s'oxyde pour donner le CO₂ et l'émission par décomposition qui proviennent de la lente décomposition des déchets qui libère des substances carbonés (comme le CO₂) et azotés. Les équations utilisées pour réaliser les calculs des émissions est comme indiqué ci-dessous.

Emission du méthane du dépotoir $E_{m\text{éthane}}$

$$E_{m\text{éthane}} = [(MSWT \times MSWF \times L_0) - (MSWT \times MSWF \times L_0 \times R)] \times (1 - OX)$$

Avec, $E_{m\text{éthane}}$: Quantité de méthane émis pour l'année spécifique (Gg/an) ;

MSWT : quantité générée de déchets pour l'année spécifique (Gg/an)

MSWF : fraction de déchets déposée dans le dépotoir ;

L_0 : potentiel de production du méthane de la biomasse (Gg CH₄/Gg de déchet) ;

R : fraction captée du méthane (Gg/an) ;

OX : facteur d'oxydation ;

Gg : tonne métrique, compte tenu que les valeurs dans le rapport de caractérisation de déchets sont exprimées en kg.

Une tonne de méthane a une puissance de réchauffement équivalent à 25 tonnes de CO₂ [28].

Emissions du méthane oxydé M_{oxydE}

$$M_{oxydE} = [(MSWT \times MSWF \times L_0) - (MSWT \times MSWF \times L_0 \times R)] \times (OX)$$

M_{oxydE} : Emission de la fraction de méthane produit par le dépotoir qui s'oxyde pour donner le CO₂.

Emission du méthane par décomposition des déchets

$$CO_2 = (MSWT \times MSWF \times L_0)$$

Par ailleurs, l'émission du dioxyde de carbone du système de méthanisation est estimée suivant la quantité de dioxyde de carbone du biogaz des déchets d'ananas et suivant l'émission du dioxyde de carbone, produit du processus d'oxydation du biogaz. En effet, le biogaz est le résultat de la digestion anaérobie des matières organiques [29]. Il contient principalement du méthane et du dioxyde de carbone. Selon Jena et al. [30], le biogaz des déchets d'ananas contient environ 60 % de méthane et 35 % de dioxyde de carbone. Le méthane est utilisé dans notre cas d'étude dans un moteur à cogénération pour la production d'électricité et de vapeur. Les fumées issues de la combustion de ce dernier contiennent du dioxyde de carbone et d'autres gaz nuisible [31]. Selon Daelman et al. [32], la combustion d'une tonne de CH₄ produit 2,75 tonne CO₂.

La quantité de CO₂ évitée par la valorisation des déchets d'ananas est calculée par la formule suivante :

$$CO_2 \text{ Evité} = M_{oxydE} + E_{m\text{éthane}} + CO_2 - CO_2 \text{ Emis par le système de méthanisation}$$

Cette quantité évitée est la différence entre les émissions des déchets du dépotoir de l'entreprise lorsqu'ils ne sont pas valorisés et les émissions du système choisi pour la valorisation des déchets du dépotoir. Un crédit carbone associé à la quantité de CO₂ évitée est estimé par l'expression ci-dessus.

$$Coûts (FCFA) = 10 \text{ €} \times 656 \times Q_{CO_2 \text{ Evitée par an}} \times \text{Durée du projet}$$

4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 ÉVALUATION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

Les résultats de la consommation énergétique et du coût afférent de l'entreprise sont présentés dans le Tableau 3 suivant.

Tableau 3. Consommation énergétique de l’entreprise et Coût

	Quantité utilisée par an (litres)	Energie consommée par an (MWh)	Coût par an (FCFA)
Electricité pour les équipements électriques	-	600	96 434 691
Gasoil pour l’alimentation de la chaudière	307 695	3 077	123 078 750

L’électricité et le gasoil sont les sources d’énergie utilisées par l’entreprise pour mener à bien ses activités. Concernant l’alimentation des équipements électriques, l’énergie absorbée par les équipements est évaluée à 600 MWh. En termes de dépenses, cela équivaut à 96 434 691 francs CFA. En ce qui concerne le combustible pour le fonctionnement de la chaudière, l’énergie absorbée par cette dernière est évaluée à 3 077 MWh. Les dépenses liées au fonctionnement de la chaudière s’élèvent à 123 078 750 francs CFA par an.

4.2 POTENTIEL DE BIOMASSE ÉVALUÉ PAR AN AU SEIN DE L’ENTREPRISE PROMO FRUITS BÉNIN

L’observation participante de l’activité de transformation de l’ananas en jus au sein de l’entreprise Promo Fruits Bénin, nous a permis de représenter le bilan massique du produit et des dérivés issus de la transformation de l’ananas dans la Fig. 5.

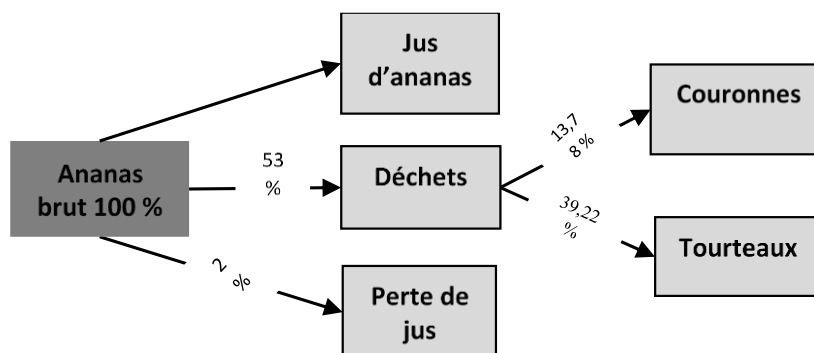


Fig. 5. Bilan massique du produit et des dérivés issus de la transformation de l’ananas

Comme le montre la Figure 5, les déchets issus de la transformation de l’ananas en jus, au sein de l’entreprise Promo Fruits Bénin représentent 53 % de la masse des fruits d’ananas. Ils sont constitués de couronnes (13,78% de la masse des fruits d’ananas) et de tourteaux (39,22%). Nunes et al. [33] et Tortoe et al. [34] ont rapporté des taux respectivement de l’ordre de 55 % et 50- 55 % de déchets produits à partir des fruits entiers d’ananas. Au Bénin comme dans de nombreux pays subsahariens, ces sous-produits sont rejetés dans l’écosystème sans traitement. Les quantités moyennes d’ananas transformées par l’entreprise par jour et par an sont respectivement 60 T et 21 900 T. En outre, les tourteaux d’ananas issus de cette transformation par jour et par an sont respectivement 23,53 T et 8 589,18 T. Concernant les couronnes d’ananas issues de la transformation de l’ananas en jus, les quantités par jour et par an sont respectivement 8,27 T et 3 017,82 T.

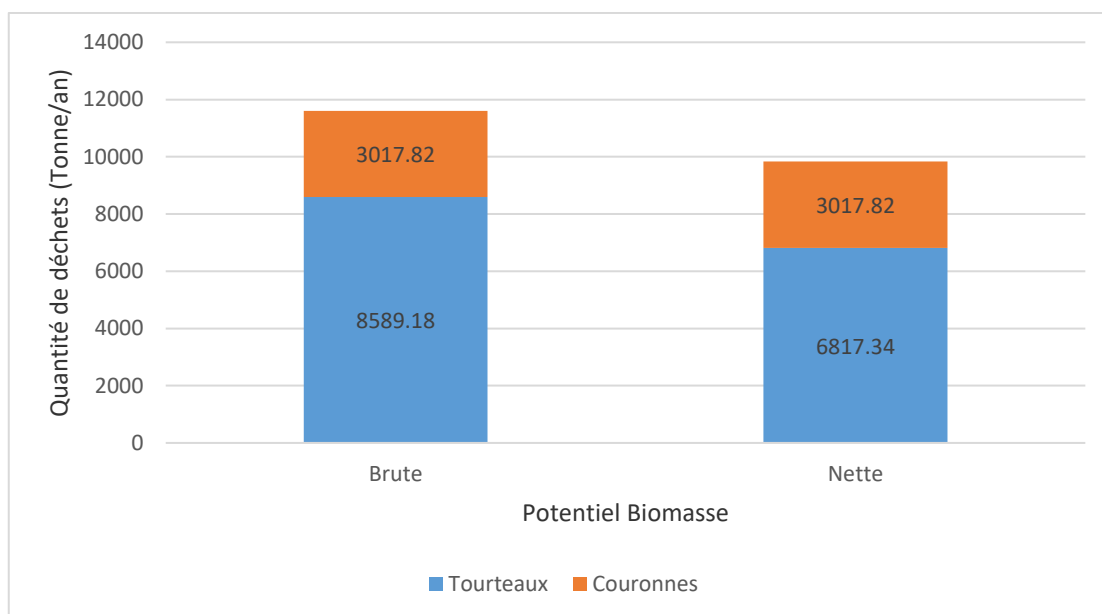


Fig. 6. Potentiel de Biomasse produit par an au sein de l'entreprise Promo Fruits Bénin

En se basant sur les déchets résultant de la transformation et sur la quantité de tourteaux vendus qui représente 20 % des tourteaux générés par l'entreprise, le potentiel de biomasse brut estimé s'élève à 11 607 T par an, dont 3 017,82 T de couronnes et 8 589,18 T de tourteaux. Le potentiel net, quant à lui, s'élève à 9 285,6 T par an dont 3 017,82 T de couronnes et 6 871,34 T de tourteaux.

4.3 POSSIBILITÉS ET ANALYSE DE VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES DÉCHETS D'ANANAS AU SEIN DE L'ENTREPRISE PROMO FRUITS BÉNIN

Possibilités de valorisation énergétique des déchets

Les facteurs qui influencent le choix du procédé sont : le type et la quantité de matière première de biomasse, la forme souhaitée de l'énergie, c'est-à-dire les exigences d'utilisation finale, les normes environnementales, les conditions économiques et les facteurs spécifiques au projet [35]. Les possibilités de valorisation énergétique des couronnes et tourteaux d'ananas sont présentées dans la Fig. 7.

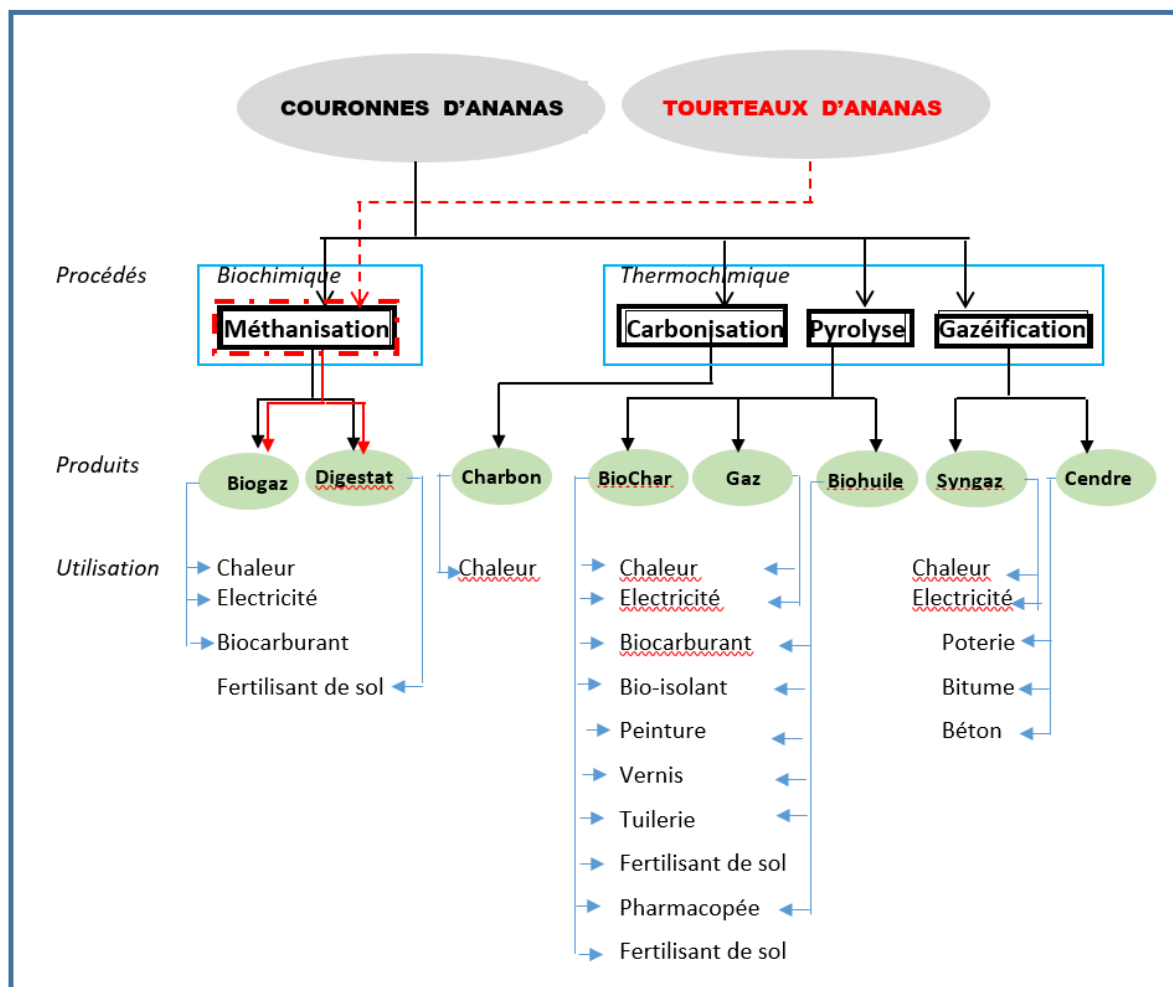


Fig. 7. Possibilités de valorisation énergétiques des déchets d'ananas

Compte tenu du faible niveau technologique des pays subsahariens, deux principales voies sont utilisées pour la valorisation énergétique des déchets issus de la transformation de l'ananas : la voie biochimique et la voie thermochimique [36]. La voie thermochimique comprend plusieurs procédés basés sur le craquage des biomolécules sous l'effet de la chaleur [37]. Il s'agit de la carbonisation, la pyrolyse [38] et la gazéification [39]. La carbonisation des couronnes d'ananas donne du charbon [40] qui peut être utilisé pour la production de chaleur [41] ou d'électricité. La valorisation des couronnes par pyrolyse permet d'obtenir du gaz de pyrolyse utilisé comme chaleur ou Électricité, de l'huile de Pyrolyse [42] utilisée comme huile de frein dans l'aéronautique [43], la peinture et le vernis [44], l'isolation électrique [45], les tuiles [46] et le biocarburant [47]. Le biochar est obtenu à partir de la pyrolyse des couronnes d'ananas. Le biochar est utilisé notamment pour la production de charbon actif, la combustion et la fertilisation des sols [48]. La gazéification [49] permet d'obtenir du syngaz utilisé comme chaleur, électricité et biocarburant et des cendres valorisables dans le béton hydraulique [50] et dans le béton bitumineux [51]. La voie biochimique consiste en des processus de digestion anaérobie. Les couronnes et les tourteaux d'ananas peuvent être valorisés par voie biochimique [52]. On y obtient du biogaz qui est utilisé comme chaleur, électricité ou biocarburant et du digestat utilisé comme engrais pour la régénération des sols et le bioéthanol utilisé comme carburant dans les moteurs à l'essence. La biodigestion des tourteaux ou des couronnes d'ananas permet d'obtenir du biogaz qui peut être utilisé comme chaleur, électricité ou biocarburant et du digestat qui est un très bon engrais pour les sols [53]. Pour Baidhe et al. [54] l'utilisation du biogaz pour l'éclairage et la pasteurisation pourrait améliorer les conditions de vie globale des acteurs de la transformation d'ananas et le digestat convient à un amendement organique du sol.

Analyse des possibilités de valorisation énergétique des déchets d'ananas

Au regard des possibilités de valorisation présentées ci-dessus, il apparaît que les couronnes d'ananas issus du parage d'ananas offrent plus de possibilités de valorisation que les tourteaux d'ananas. En effet, les tourteaux ne peuvent être valorisés que par le procédé de méthanisation ou de fermentation alcoolique alors qu'au sein de l'entreprise, les tourteaux d'ananas occupent eux seuls 74 % des déchets issus de la transformation de l'ananas. Dans ce cas, le procédé ayant la capacité de traitement des tourteaux est privilégié. Par ailleurs, l'entreprise Promo Fruits Bénin est créé par l'association des producteurs d'ananas de la région d'Allada (situé au Sud du Bénin) qui

fournissent la majorité de la matière première ananas pour la production du jus au sein de l'entreprise. La culture de l'ananas par les producteurs est fortement artificialisée par l'utilisation des engrais chimiques qui outre la pollution qu'ils engendrent [55], sont pour la grande majorité importés alors que les déchets issus de la transformation de l'ananas peuvent être valorisés par méthanisation pour donner non seulement du biogaz pour la production de l'électricité et de vapeur mais aussi du digestat utilisé comme fertilisant agricole [54]. Le digestat permet de réduire de moitié la fertilisation minérale sans baisser le rendement de la production [56]. Aussi il assure une bonne qualité des fruits, entretient la fertilité du sol et offre une couverture du sol entre les cycles d'ananas réduisant l'érosion, le travail du sol et les traitements herbicides avant plantation [57]. Le digestat est donc très profitable aux producteurs, membre de l'entreprise Promo fruits Bénin et un procédé permettant d'obtenir non seulement un produit utilisé pour la production de l'électricité mais de fertilisant agricole est souhaitable. Du point de vue des produits finaux, il semble que la méthanisation offre de possibilité de production du biogaz utilisé pour produire d'électricité et du digestat utilisé comme de fertilisant agricole. En résumé, la méthanisation semble être le procédé approprié pour la valorisation des couronnes et tourteaux d'ananas pour la production de l'électricité et de vapeur utilisable à l'entreprise Promo Fruits Bénin. Afin de retenir une technologie de valorisation prenant en compte non seulement les possibilités de valorisation énergétique des déchets d'ananas mais aussi les attentes des utilisateurs, les échanges avec ces derniers ont permis d'élaborer le cahier des charges fonctionnel du dispositif permettant de transformer les déchets d'ananas en énergie au sein de l'entreprise Promo Fruits Bénin.

Analyse de faisabilité technique

L'application envisagée pour le biogaz obtenu est la production d'énergie par combustion dans un moteur de cogénération. L'unité de méthanisation permet d'obtenir une production de CH₄ qui s'élève à 715 035 m³ par an. Cela correspond à une énergie de 7 106,55 MWh par an. Cette énergie est utilisée dans un moteur à cogénération qui fournit une énergie totale de 5 544,35 MWh/an dont 2 701 MWh/an d'énergie électrique (correspondant à 48,72 % de la production totale) et 2843,35 MWh/an d'énergie thermique (52,28 % de la production totale). La part de l'énergie consommé par l'unité de méthanisation s'élève à 1 663,3 MWh/an environ dont 801,3 MWh/an d'énergie électrique et 853 MWh/an d'énergie thermique. La production d'énergie par le procédé de méthanisation est évaluée par conséquent à 3 881,05 MWh/an dont 1890,7 MWh/an pour l'énergie électrique et 1990,35 MWh/an pour l'énergie thermique. Nous pouvons dire qu'une tonne de déchet produit environ 417,96 kWh d'énergie qui peut être directement utilisé par l'entreprise Promo Fruits Bénin. Le graphe suivant résume l'énergie qu'économisera Promo Fruits Bénin en valorisant énergétiquement ses déchets d'ananas.

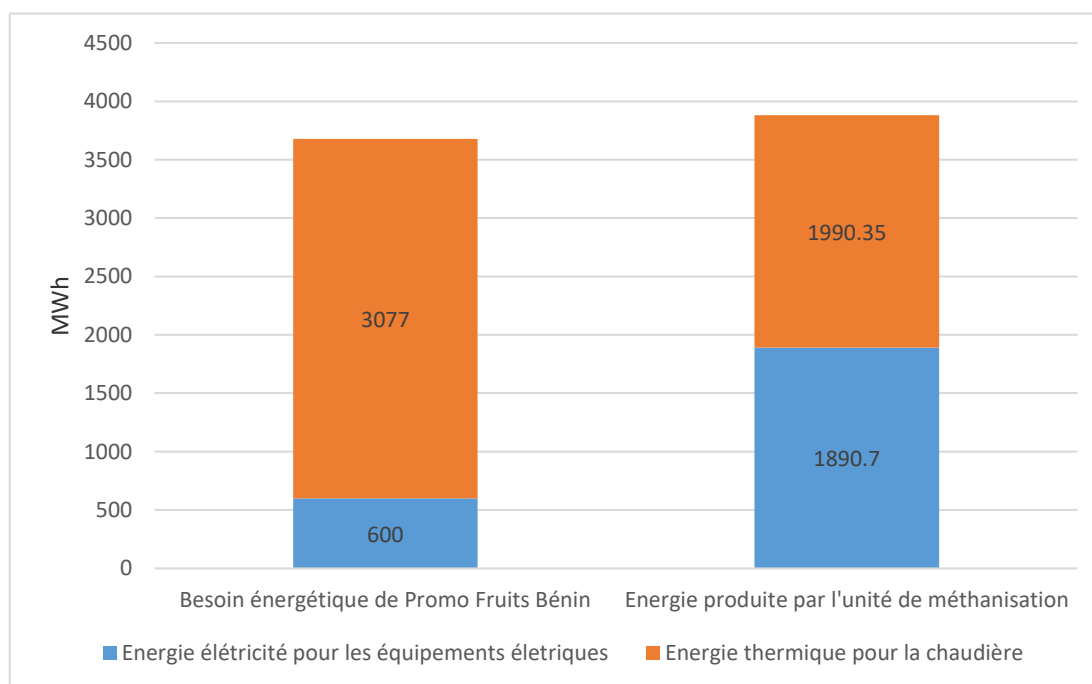


Fig. 8. Bénéfice énergétique du projet

A partir de ce graphique, on constate que la valorisation énergétique des déchets d'ananas au sein de l'entreprise permet de fournir toute l'énergie nécessaire pour l'alimentation des équipements électriques de transformation (600 MWh). Par ailleurs, cette valorisation permet de fournir 3 077 MWh (soit 35,32 % de l'énergie nécessaire) pour alimenter la chaudière à vapeur. En somme, le projet permettra de réduire à 0 kWh la consommation électrique annuelle de l'entreprise. Une énergie électrique annuelle estimée à 1 290 MWh représente l'énergie électrique résiduelle après la satisfaction de l'entreprise. En outre, il réduit à 64,68 % la consommation d'énergie thermique de Promo Fruits Bénin.

4.4 ANALYSE FONCTIONNELLE DU BESOIN DE L'ENTREPRISE PROMO FRUITS BÉNIN

L'analyse du besoin a révélé que les attentes de l'entreprise Promo Fruits Bénin sont satisfaites si le dispositif à innover permet de réduire la facture énergétique (électrique et gasoil), le gisement de déchets et les nuisances causées par ces déchets sur la santé et l'environnement. La Fig. 9 présente l'expression du besoin du dispositif de biométhanisation.

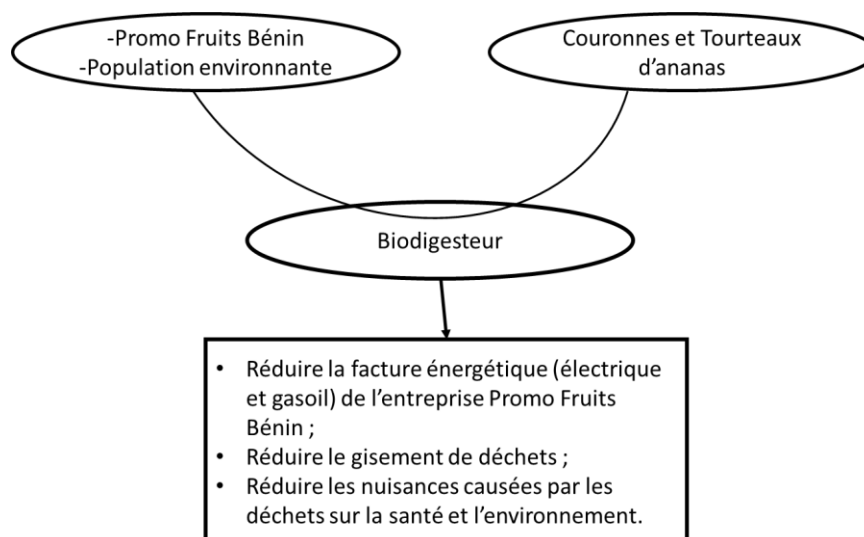


Fig. 9. Bénéfice énergétique du projet

Après la définition de l'expression du besoin, l'analyse des interactions à identifier huit (08) éléments du milieu environnant qui interagissent avec le futur équipement pendant la séquence d'utilisation : les couronnes et les tourteaux d'ananas, le biogaz, le digestat, les opérateurs, le fabricant, l'entreprise Promo Fruits Bénin, la maintenance et puis les normes (Fig. 10).

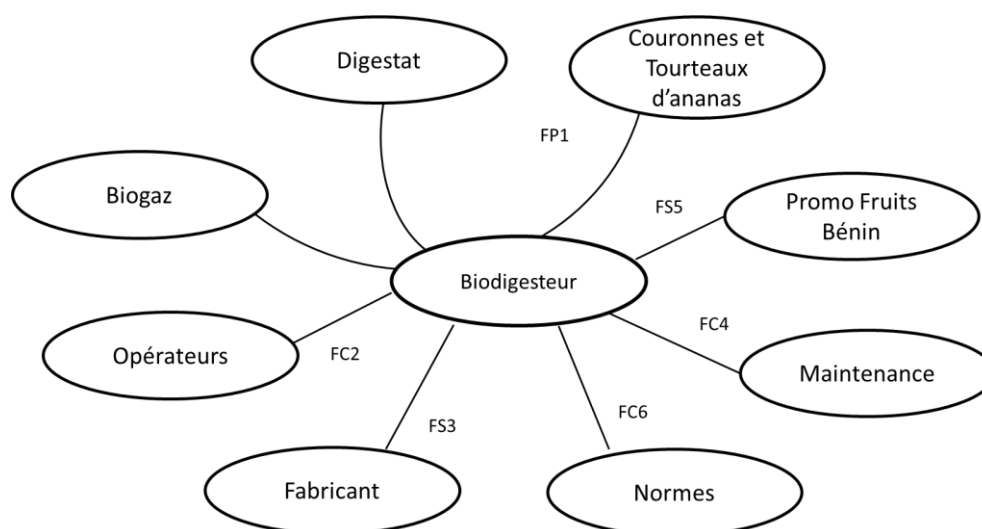


Fig. 10. Pieuvre fonctionnelle du dispositif

Le Cahier des Charges fonctionnel résumant les fonctions que doit assumer le dispositif, les critères d'appréciation des fonctions et leur niveau est présenté dans le Tableau 4. L'analyse fonctionnelle a défini six fonctions de service dont une principale (FP₁), trois contraintes (FC₂, FC₄ et FC₆) et deux secondaires (FS₃ et FS₅). Comme le soulignent les références Rivier [58] et Boroze [59], les équipements destinés à être utilisés dans les pays d'Afrique subsaharienne ont généralement une fonction de service car ce sont des équipements simples. Cette spécification fonctionnelle représente les caractéristiques du futur équipement.

Tableau 4. Cahier des Charges Fonctionnel

Fonctions de service	Critères	Niveaux
FP ₁ : Transformer les couronnes et les tourteaux d’ananas en biogaz et digestat	C ₁ : Température d’opération	50-55°C
	C ₂ : Mode de fonctionnement	Continu
	C ₃ : Taux d’humidité	75-80 %
	C ₄ : pH	6,5-8
	C ₅ : C/N	25-30
	C ₆ : Volume du gaz par jour	2000 m ³ /jour
	C ₇ : % CH ₄	>55%
FC ₂ : Etre manipulé par un opérateur local	C ₈ : Hauteur de la cuve d’alimentation par rapport au sol	1 m
	C ₉ : hauteur de la boite de commande de la pompe	1 m
FS ₃ : Etre reproduit par un fabricant local	C ₁₀ : Disponibilité de la technicité	Oui
	C ₁₁ : Disponibilité des matériaux	Oui
FC ₄ : Etre maintenu en bon état	C ₁₂ : Plan de maintenance	1 fois par mois
FS ₅ : Etre économiquement rentable	C ₁₃ : Coût d’investissement	< 3 milliards
	C ₁₄ : Coût d’opération	< 20 millions/an
	C ₁₅ : Bénéfice généré	> 1 milliard/an
FC ₆ : Etre respectueux des normes environnementales, sociales, ergonomies et agroalimentaires	C ₁₆ : Impact des effluents sur l’environnement	Faible
	C ₁₇ : Impact des effluents sur la santé	Néant
	C ₁₈ : Impact du biogaz sur la qualité du jus produit	Néant

Bloc diagramme fonctionnel du dispositif à concevoir

Le Bloc diagramme fonctionnel correspondant au dispositif à développer est présenté dans la Fig. 11. Dans cette figure, la première colonne (à gauche) correspond à la fonction de service principale définie dans les spécifications fonctionnelles. Le déploiement de la technique du système d’analyse autour de la fonction de service a permis d’identifier différentes fonctions techniques présentées dans la colonne du milieu. A l’issue de ce déploiement, les solutions techniques représentant les entités fonctionnelles du dispositif ont émergé. Il s’agit d’un réacteur, d’une tube d’admission, d’une tube sortie biogaz et puis d’une sortie digestat.

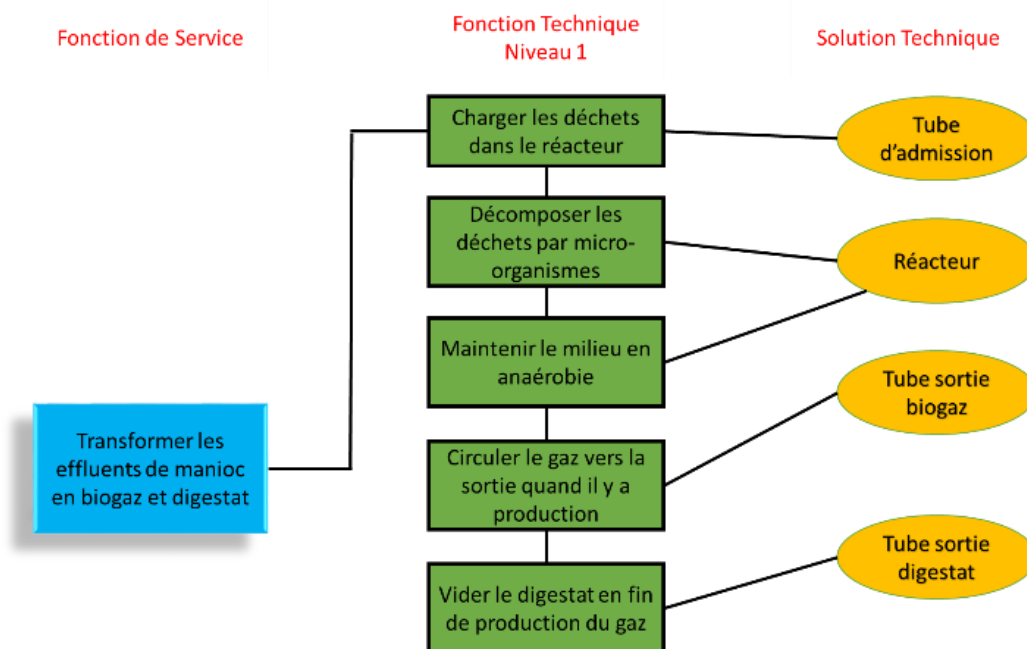


Fig. 11. Bloc diagramme fonctionnel du biodigesteur

Le model du biodigesteur présenté à la figure 11 est identique au modèle DRANCO continu sec. Les déchets d’ananas prétraités d’une taille inférieure à 40 mm sont mélangés à une grande quantité de résidus digérés provenant du digesteur. Une petite quantité de vapeur est

ajoutée au mélange afin d’augmenter la température à 50-55°C pour un fonctionnement thermophile. Le mélange préchauffé de matières organiques fraîches et de résidus digérés est ensuite pompé vers le haut du digesteur par un tube d’alimentation. Le temps de rétention moyen dans le digesteur est d’environ 20 jours avec un temps de passage tous les 2 à 4 jours. Le biogaz produit sort de la sortie biogaz vers le groupe à cogénération pour la production d’électricité et de chaleur.

4.5 DIMENSIONNEMENT DU DIGESTEUR

Le Tableau 5 présente les caractéristiques du biodigesteur et ses paramètres techniques.

Tableau 5. Dimension du digesteur et ses paramètres techniques

	Unité	Valeur
Volume Substrat par jour (1)	m ³	85,32
TRH (2)	Jour	20
Volume digesteur (3) = (1) / (2)	m ³	1706,4
Masse substrat (4)	tonne	35,62
Taux de charge par jour (5) = (4) / (3)	Kg.MO/ m ³	20,87
Production théorique par jour (6) = 100 (4)	m ³	3562
Production de biogaz par jour (7) = (6) / (3)	m ³ / m ³	2,09
Production Spécifique (8) = (6) / (4)	m ³ / Kg.MO	0,1
Masse biogaz par jour (9)	tonne	3,56
Rendement (10) = (9) / (4)	%	10
Volume digesteur utile (11) = 1,2 (3)	m	2050
Partie cylindrique		
Volume	m ³	2000
Rayon	m	6,8
Hauteur	m	13,7
Partie hémisphérique		
Volume	m ³	50
Rayon supérieur	m	6,8
Hauteur	m	1

Du Tableau 5, le volume du biodigesteur s’élève à 2 050 m³. Il est constitué de deux parties : la partie cylindrique et la partie hémisphérique. La partie cylindrique a un volume de 2 000 m³, un rayon de 6,8 m et une hauteur de 13,7 m. La partie hémisphérique quant à elle possède un volume de 50 m³, un rayon de 6,8 m et une hauteur de 1 m. Le Taux de charge est estimé 20,87 kg de matière organique par unité de volume du digesteur par jour. Quant à la production du biogaz, sa valeur est évaluée à 0,1 m³ de biogaz par kg de masse de matière organique.

4.6 DIGESTEUR CONÇU POUR LA VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES DÉCHETS D’ANANAS DE PROMO FRUIT

La Maquette numérique du digesteur conçu pour la valorisation énergétique des déchets d’ananas de Promo Fruit est présentée à la Fig. 12.

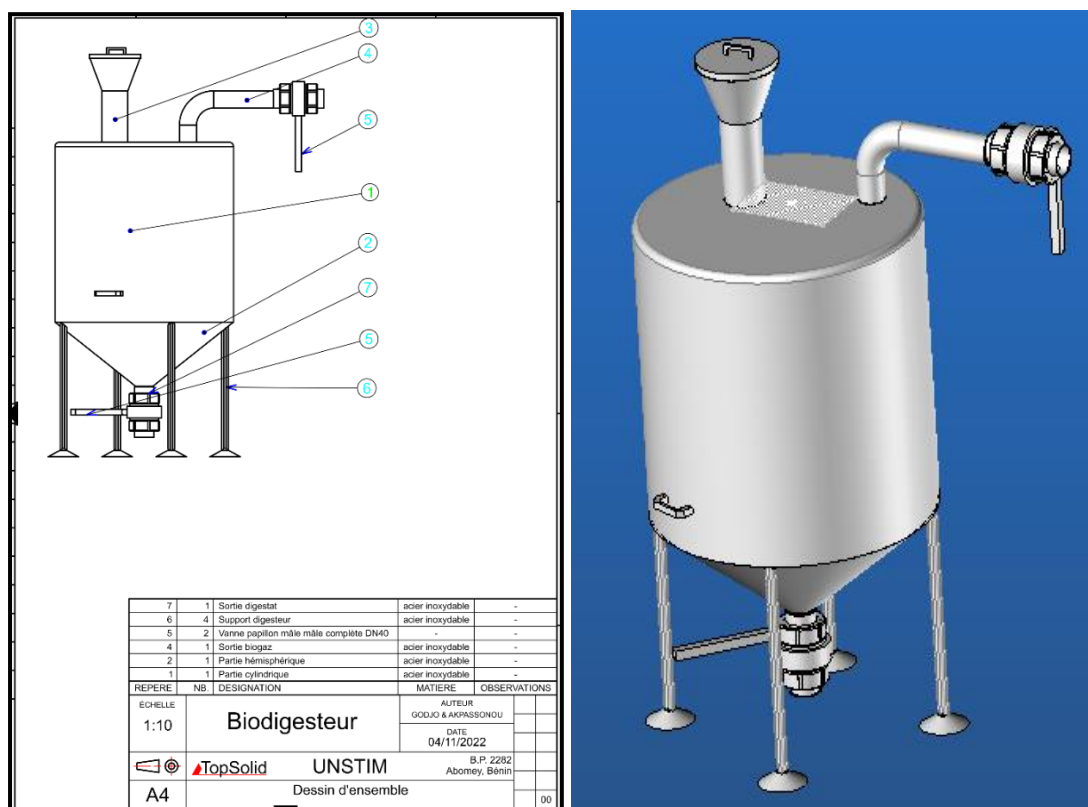


Fig. 12. Maquette numérique du digesteur

Le digesteur est une construction mécanosoudée constituée de :

- Un réacteur à l'intérieur duquel se produit la transformation biologique des déchets d'ananas: il s'agit d'une cuve de forme cylindrique de rayon 6,8 m et de hauteur 13,7 m et ayant à sa base inférieure une demi-sphère de rayon 6,8 m et de hauteur 1m.
- Un tube d'admission monté au-dessus du réacteur permettant l'admission des déchets d'ananas dans le réacteur. Le chargement du réacteur en déchets d'ananas se fait chaque jour.
- Une sortie biogaz et une sortie digestat assurant respectivement la sortie du biogaz et du digestat, produits de la transformation des déchets dans le réacteur. Deux vannes sont placées, une à la sortie biogaz et l'autre à la sortie digestat pour permettre le passage ou la fermeture de ces produits respectifs du digesteur.

4.7 ÉTUDE ÉCONOMIQUE

Les indicateurs économiques sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6. Indicateurs économiques de l'étude

	Durée de la Période	Valeur Annuelle (F CFA/an)	Valeur Actualisée (F CFA)
I Investissement initial			2 101 196 208
II Coût d'exploitation actualisé sur 25 ans	25	19 385 128	88 456 935,84
III Recette actualisée sur 25 ans avant impôt	25	1 291 165 656	11 480 107 160
Amortissement linéaire		105 042 098,4	
Revenu imposable		1 189 207 040	
Impôts payés		392 438 322,4	
Recette après impôt		898 727 334,1	8 157 748 011
VAN			5 968 094 874
DRC			2,34 ans
TRI			38 %
TRE			37 %
IR			3,7

Comme le montre le Tableau 6, l'étude économique a relevé que le coût d'investissement initial s'élève à 2 101 196 208 FCFA. Le coût d'exploitation est estimé à une valeur de 19 385 128 FCFA par an. On en déduit que le coût de traitement d'une tonne de déchets est 3 147 FCFA par an. La valorisation permettra d'économiser un montant après impôt qui s'élève à 898 727 334,1 FCFA par an. La Durée de Récupération du Capital Investit est de 2,34 ans soit une durée environ de 2 ans 4 mois.

A partir des résultats obtenus, on peut conclure que le projet est rentable car l'économie actualisée générée après impôt qui s'élève à 8 157 748 011 FCFA pendant la durée de vie du projet dépasse l'investissement initial (2 101 196 208 FCFA) et le coût d'exploitation actualisé (88 456 935,84 FCFA) du projet. La Valeur Actuelle Nette s'élevant environ à 5 968 094 874 FCFA étant supérieure à zéro confirme la rentabilité du projet. Le taux de rendement interne et externe estimés respectivement à 38 % et à 37 % sont supérieurs au taux d'actualisation de 10%. Ces indicateurs économiques du projet prouvent que le projet est rentable et faisable économiquement.

4.8 ÉTUDE ENVIRONNEMENTALE

Le Tableau 7 présente les résultats de l'étude environnementale.

Tableau 7. Émission de méthane du dépotoir

	Unité	Valeur
Déchets produits	tonne/an	11607
Déposé dans le dépotoir	tonne/an	3017,82
L0	m ³ CH ₄ /tonne	74
R	-	0
OX	-	0,36
MSW _t	tonne/an	11607
MSW _F	tonne/an	0,8
Emission direct du dépotoir		
Emission CO ₂	tonne CO ₂	2386,83
Emission par l'oxydation du méthane		
Emission CO ₂	tonne CO ₂	147,69
Emission par la décomposition des déchets		
Emission CO ₂	tonne CO ₂	410,24
Emission par l'installation du système de méthanisation		
Emission CO ₂	tonne CO ₂	2472

La valorisation des déchets dans l'unité de méthanisation entraîne que moins de déchets organiques seront déposés sur le dépotoir, ainsi il y aura moins de déchets qui vont se décomposer pour produire des Gaz à l'Effet de Serre. Les résultats de l'étude environnementale (Tableau 8) montrent que la quantité de déchets générés (MSW_t) au sein de la coopérative s'élève à 11607 tonnes par an et que la quantité de déchets déposée dans le dépotoir après qu'une partie ait été vendue représente environ 0,8 % de la quantité de déchets générée. Ces quantités de déchets déposés sur le dépotoir engendrent des émissions de méthane dû au dépotoir lui-même, à l'oxydation du méthane produit par les déchets et à la décomposition des déchets, qui s'élèvent respectivement à 2386,83 tonne de CO₂ par an, 147,69 tonnes de CO₂ par an et 410,24 tonnes de CO₂ par an. Par ailleurs, l'unité de pyrogazéification produit une émission qui avoisine 2472 tonne de CO₂ par an. La quantité de CO₂ évitée par ce projet de méthanisation par année est de 25,19 tonne/an. Cette quantité de CO₂ évitée pourrait constituer un projet de Mécanisme de Développement Propre (MDP) et pourrait donc être un crédit carbone vendable sur le marché de Kyoto. Il coûterait : 1 637 522,264 FCFA, ce qui permettra un financement du projet de 3,7 % de l'investissement initial.

5 CONCLUSION

La présente étude a montré que les déchets, issus de la transformation de l'ananas en jus dans l'entreprise Promo Fruit Bénin, difficile à gérer sont valorisables en biogaz. L'énergie produite est évaluée à 3 881,05 MWh/an. Cette énergie permet de substituer les énergies fossiles utilisées pour le fonctionnement des équipements : 100 % pour l'électricité et 64,68 % pour la thermique. Ceci implique une réduction des factures énergétiques et des nuisances environnementales et de santé. Par ailleurs, l'étude a montré que le projet est économiquement rentable. Sur le plan environnement, une réduction des GES du dépotoir des nuisances générées par les déchets sur l'environnement a pu être observée. Ainsi une émission de 472,76 tonnes CO₂ est en moyenne évitée chaque année.

REFERENCES

- [1] Marignol A., Enjeux et contraintes socio-économiques de la valorisation des résidus post-récolte de l'ananas (*Ananas comosus*) pour les acteurs majeurs de la filière au Sud du Bénin, 2021.
- [2] S. K. Chogou, E. Gandonou & N. Fiogbe, "Mesure de l'efficacité technique des petits producteurs d'ananas au Bénin," *Cahiers Agricultures*, vol. 26, no. 2, p. 25004, 2017.
- [3] M. F. Hossain, "World pineapple production: An overview," *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, vol. 16, no. 4, pp. 11443-11456, 2016.
- [4] C. Adda, "Evaluation la performance de la productivité, de la transformation et de la commercialisation de l'ananas au Bénin," *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, pp. 310-321, 2021.
- [5] T. Godjo, A. Idani, R. Akpassonou, N. Ahonoukoun, "Feasibility study for energy recovery of peels resulting from cassava processing into gari: case of the Mawudagba cooperative in Benin," *International Journal of Advanced Research*, vol.10, no. 10, pp. 907-922, 2022. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/15560>
- [6] A. Valdés García, M. I. Domingo Martínez, M. Ponce Landete, M. S. Prats Moya, A. Beltrán Sanahuja, "Potential of Industrial Pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merrill) By-Products as Aromatic and Antioxidant Sources," *Antioxidants*, vol. 10, no. 11, p. 1767, 2021.
- [7] R. H. Jaro, M. A. A. Icalina, R. T. Talemporos, P. M. Napiñas, L. G Manuel, G. M. Cubio, R. O. Arazo, "Biogas production from waste pulps of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) via anaerobic digestion," *Energy, Ecology and Environment*, vol. 6, no. 3, pp. 204-212, 2021.
- [8] C. C. Tossou, D. E. Capo-Chichi, H. Yedomonhan, "Diversité et caractérisation morphologique des variétés d'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merrill) cultivées au Bénin," *Journal of Applied Biosciences*, vol. 87, pp. 8113-8120, 2015.
- [9] A. D. Uchekukwu-Agua, O. J. Caleb, U. L. Opara, "Postharvest handling and storage of fresh cassava root and products: a review," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 8, no. 4, pp.729-748, 2015.
- [10] A. Roda, M. Lambri, "Food uses of pineapple waste and by-products: a review," *International journal of food science & technology*, vol. 54, no. 4, pp. 1009-1017, 2019.
- [11] M.B. Derek, *Atmospheric Pollution - A Global Problem*, 2nd ed., Oxford, 1992.
- [12] S.C. Izah, S.E. Basse, E.I. Ohimain, "Impacts of Cassava Mill Effluents in Nigeria," *Journal of Plant and Animal Ecology*, vol. 1, no. 1, pp. 14-42, 2018.
- [13] M. Kumar, L. Upadrasta, R. Banerjee, "Biomethanation of pineapple wastes using potent anaerobic consortia substituting cow manure," *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, vol. 16, no. 11, 2017.
- [14] I. Perraud, *Etude de la fermentation en milieu solide du tourteau d'ananas*, Fort-de-France: ORSTOM, 94 p, 1994.
- [15] G. Zhao, C. Hou, J. Qiao, X. Cheng, "Energy consumption characteristics evaluation method in turning," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 11, pp.1-8, 2016. <https://doi.org/10.1177/1687814016680737>
- [16] T. Godjo, C. Marouzi, J. F. Boujut, F. Giroux, "Participatory design in developing countries: How to improve user integration in design process for small scale food processing? In: Tichkiewitch S. (Ed.), Tollenaere M. (Ed.)," *6th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, May 17-19, 2006 Grenoble, France, 2006.
- [17] Yannou, B., *Analyse Fonctionnelle et Analyse de la Valeur, Conception de Produits Mécaniques : Méthodes, Modèles et Outils*, 1997. [Online] Available: https://www.researchgate.net/publication/228740139_Analyse_fonctionnelle_et_analyse_de_la_valeur (7 Novembre 2022)
- [18] J. Seim, "Participant Observation, Observant Participation, and Hybrid Ethnography" *Sociological Methods and Research*, 2021. <https://doi.org/10.1177/0049124120986209>
- [19] R. Girault, P. Rousseau, J.P. Steyer, N. Bernet, F. Béline, "Combination of batch experiments with continuous reactor data for ADM1 calibration: application to anaerobic digestion of pig slurry" *Water Science and Technology*, vol. 63, no. 11, pp. 2575- 2582, 2011.
- [20] P. Rousseau, J.-P. Steyer, E.I.P. Volcke, N. Bernet, F. Béline, "Combined anaerobic digestion and biological nitrogen removal for piggery wastewater treatment: A modelling approach," *Water Science and Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 133-141, 2008.
- [21] Hanni, Z., Drissi, F., & TAHRI, A., *Optimisation de taux de charge organique moyenne pour La digestion anaérobie des déchets ménagers de la ville D'Adrar*, Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR, 2022.
- [22] T. Amon, B. Amon, V. Kryvoruchko, A. Machmüller, K. Hopfner-Sixt, V. Bodiroza, R. Hrbek, W. Zollitsch, "Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations," *Bioresource Technology*, vol. 98, no. 17, pp. 3204-3212, 2007.
- [23] D.S. Rani, K. Nand, "Ensilage of pineapple processing waste for methane generation," *Waste Management*, vol. 24, pp. 523-528, 2004.
- [24] F. Haloua, B. Hay, J. Filtz, "New French reference calorimeter for gas calorific value measurements," *Journal of thermal analysis and calorimetry*, vol. 97, no. 2, pp. 673-678, 2009.
- [25] L. De Baere, *The DRANCO technology: a unique digestion technology for solid organic waste*, In OWS. Publications, 2009. [En ligne]. http://www.ows.be/pub/The_Dranco_technology_2009_ms_22038.pdf
- [26] Fellah, M., & Hamdane, D., *Le financement d'un projet d'investissement par une banque Cas de la BADR, Agence 015 Tizi-Ouzou*, Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2021.

- [27] J. B. Smith, S. H. Schneider, M. Oppenheimer, G. W. Yohe, W. Hare, M. D. Mastrandrea... & J. P. van Ypersele, "Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) reasons for concern," *Proceedings of the national Academy of Sciences*, vol. 106, no. 11, pp. 4133-4137, 2009.
- [28] A. Quinet, J. Bueb, B. Le Hir, B. Mesqui, A. Pommeret, M. Combaud, "La valeur de l'action pour le climat," *France stratégie*, pp. 3624-48, 2019.
- [29] Hess, J., *Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation*, Doctoral dissertation, Université Nice Sophia Antipolis, 2007.
- [30] S. P. Jena, S. Mishra, S. K. Acharya, S. K. Mishra, "An experimental approach to produce biogas from semi dried banana leaves," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, pp. 173-178, 2017.
- [31] B. Palm, "Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems—a review," *International journal of refrigeration*, vol. 31, no. 4, pp. 552-563, 2008.
- [32] M. R. Daelman, E. M. van Voorthuizen, U. G. van Dongen, E. I. Volcke, M. C. van Loosdrecht, "Seasonal and diurnal variability of N₂O emissions from a full-scale municipal wastewater treatment plant," *Science of the Total Environment*, vol. 536, pp. 1-11, 2015.
- [33] M.C.N. Nunes, J.P. Emond, M. Rauth, S. DEA, K.V. Chau, "Environmental conditions encountered during typical consumer retail display affect fruit and vegetable quality and waste," *Postharvest Biology and Tech*, pp. 232-241, 2009.
- [34] C. Tortoe, T.P-N. Johnson, T. Slaghek, M. Miedema, T. Timmermans, "Physicochemical, Proximate and Sensory Properties of Pineapple (Ananas sp.) Syrup Developed from Its Organic Side-Stream," *Food and Nutrition Sciences*, pp. 163-168, 2013.
- [35] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies," *Bioresource technology*, vol. 83, no. 1, pp. 47-54, 2002.
- [36] R. M. Braga, T. S. Queiroga, G. Q. Calixto, H. N. Almeida, D. M. A. Melo, M. A. F. Melo,... & F. D. S. Curbelo, "The energetic characterization of pineapple crown leaves," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 22, no. 23, pp.18987-18993, 2015.
- [37] C. Couhert, J. M. Commandre, S. Salvador, "Is it possible to predict gas yields of any biomass after rapid pyrolysis at high temperature from its composition in cellulose, hemicellulose and lignin?," *Fuel*, vol. 88, no. 3, 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.09.019>
- [38] T. Godjo, J.-P. Tagutchou, P. Naquin, R. Gourdon. "Valorisation des coques d'anacarde par pyrolyse au Bénin," *Déchets, Sciences et Techniques*, 2015.
<https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3282>
- [39] A. K. Rajvanshi, "Biomass gasification," *Alternative Energy in Agriculture*, vol. II, no. 4, pp. 1–21, 2014.
- [40] A. W. I. T. D. R. U. S. Awitdrus, M. S. D. Putri, R. F. Syahputra, I. Iwantono, S. Saktioto, "Activated Carbon Based on Pineapple Crown for Heavy Metal Adsorption," *Advanced Materials Research*, vol. 1162, pp. 57-64, 2021.
- [41] C. Y. Liao, Y. J. Guan, M. Bustamante-Román, "Techno-Economic Analysis and Life Cycle Assessment of Pineapple Leaves Utilization in Costa Rica" *Energies*, vol. 15, no. 16, p. 5784, 2022.
- [42] W. T. Vieira, M. D. Bispo, S. de Melo Farias, A. D. S. V. de Almeida, T. L. da Silva, M. G. A. Vieira, ... & T. L. Balliano, "Activated carbon from macauba endocarp (*Acrocomia aculeate*) for removal of atrazine: experimental and theoretical investigation using descriptors based on DFT," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 2, p. 105155, 2021.
- [43] Ü. Ağbulut, M. K. Yeşilyurt, S. Sarıdemir, "Wastes to energy: Improving the poor properties of waste tire pyrolysis oil with waste cooking oil methyl ester and waste fusel alcohol – A detailed assessment on the combustion, emission, and performance characteristics of a CI engine," *Energy*, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119942>
- [44] N. Guilhaume, W. de Rezende Locatel, D. Laurenti, Y. Schuurman. "Can paints and varnish impair the physicochemical properties of wood pyrolysis oils?," *Energy and Fuels*, 2021.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02568>
- [45] Z. An-Xin, T. Xiao-Jun, Z. Zhong-Hua, L. Jun-Hua, "The pyrolytic experiment and thermal dynamics analysis of insulating oil," *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2013.
<https://doi.org/10.1109/CEIDP.2013.6748327>
- [46] G. Jungmeier, "The Biorefinery Fact Sheet," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 23, no. 1, 2017.
- [47] P. O. Okekunle, O. E. Itabiyi, S. O. Adetola, I. O. Alayande, H. O. Ogundiran, K. G. Odeh, "Biofuel production by pyrolysis of cassava peel in a fixed bed reactor," *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2016.
<https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2017018176>
- [48] T. Co, T. Preta, T. Preta, C. The, T. Preta, C. Technique, R. A. Leng, T. R. Preston, S. Inthapanya, H. Urine, D. T. T. Van, N. T. Mui, I. Ledin, H. R. Kutlu, I. Ünsal, M. Görgülü, , S. Inthapanya, J. R. Kana, A. Gerlach, , ... A. Feed, "The use of biochar in cattle farming The effect of activated carbon and biochar in feeding Activated carbon = biochar ?," *Animal Feed Science and Technology*, vol. 24, no. 11, 2012.
- [49] N. J. M. Okoro, U. M. Ikegwu, K. G. Harding, M. O. Daramola, "Evaluation of Fuel Quality of Invasive Alien Plants and Tropical Hardwoods as Potential Feedstock Materials for Pyro-Gasification," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 13, no. 2, pp. 1293-1310, 2022.
- [50] A. Anagonou, T. Godjo, V. Songmene, Y. Tankpinou, "Étude des propriétés physico-mécaniques d'un béton hydraulique contenant des cendres de coques d'anacarde de tailles micrométriques et nanométriques substituant partiellement le ciment," *Déchets, Sciences et Techniques*, 2020.

<https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.4284e>

- [51] A. Anagonou, V. Songmene, T. Godjo, J. Kouam, "Recycling Of West African Cashew Nut Shells Waste In Asphalt Concrete: Impact On The Physico-Mechanical Properties Of Asphalt Concrete," *International Journal of Advanced Research and Publications*, vol. 4, no. 2, pp. 96–106, 2020.
- [52] A. F. Aili Hamzah, M. H. Hamzah, H. Che Man, N. S. Jamali, S. I. Siajam, M. H. Ismail, "Recent updates on the conversion of pineapple waste (*Ananas comosus*) to value-added products, future perspectives and challenges," *Agronomy*, vol. 11, no. 11, p. 2221, 2021.
- [53] S. Banerjee, V. Ranganathan, A. Patti, A. Arora, "Valorisation of pineapple wastes for food and therapeutic applications," *Trends in food science & technology*, vol. 82, pp. 60-70, 2018.
- [54] E. Baidhe, J. Kigozi, I. Mukisa, C. Muyanja L. Namubiru, B. Kitarikawe, "Unearthing the potential of solid waste generated along the pineapple drying process line in Uganda: A review" *Environmental Challenges*, 2021.
- [55] D. Souguir, G. Hörmann, M. Hachicha, "Évaluation de la qualité des eaux de la nappe de Téboulba: risque de contamination des sols agricoles," *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, vol. 32, no. 2, pp. 195-204, 2019.
- [56] Pouech, P., Coudure, R., & Marcato, C., Intérêt de la codigestion pour la valorisation des lisiers et le traitement de déchets fermentescibles a l'échelle d'un territoire, *JOURNEES DE LA RECHERCHE PORCINE EN FRANCE*, 2005.
- [57] A. Tallou, F. Aziz, A. J. Garcia, F. P. Salcedo, F. E. El Minaoui, S. Amir, "Bio-fertilizers issued from anaerobic digestion for growing tomatoes under irrigation by treated wastewater: Targeting circular economy concept," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 19, no. 4, pp. 2379-2388, 2022.
- [58] Rivier, M., Analyse et optimisation multicritères d'un procédé de transfert thermique et de séchage pour une application en Afrique de l'Ouest, Doctoral dissertation, Montpellier SupAgro, 2017.
- [59] Boroze, T. T. E., Outil d'aide à la conception de séchoirs pour les produits agricoles tropicaux, Doctoral dissertation, Université de Lomé, 2011.