

Valorisation des sous-produits issus de la transformation de l'Ananas comosus L. Merrill : Etat de l'art.

Valorization of by-products from the processing of Ananas comosus L. Merrill:
State of the art

Auteur 1 : AGOGNON Prisca,

Auteur 2 : ADJAHOSSOU Sédami,

Auteur 3 : GBAGUIDI A. N. Magloire,

Auteur 4 : KPADONOU Dominique,

AGOGNON Prisca, (Doctorante)

Université d'Abomey-Calavi (UAC) / Ecole Doctorale des Sciences de la Vie et de la Terre

ADJAHOSSOU Sédami (Docteur écologie (MC) Enseignant-Chercheur)

Université d'Abomey-Calavi (UAC)/ Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC)/ Département de Génie de l'Environnement (GEn)

GBAGUIDI A. N. Magloire, (Docteur en écotoxicochimie (MC) Enseignant-Chercheur)

Université d'Abomey-Calavi (UAC)/ Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC)/ Département de Génie Chimique-Procédés (GC-P)

KPADONOU Dominique (Ingénieur de conception en génie Chimique-Procédés)

Université d'Abomey-Calavi (UAC)/ Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC)/ Département de Génie Chimique-Procédés (GC-P)

Déclaration de divulgation : L'auteur n'a pas connaissance de quelconque financement qui pourrait affecter l'objectivité de cette étude.

Conflit d'intérêts : L'auteur ne signale aucun conflit d'intérêts.

Pour citer cet article : AGOGNON .P, ADJAHOSSOU .S, GBAGUIDI A. N .M & KPADONOU .D , (2023) «Valorisation des sous-produits issus de la transformation de l'Ananas comosus L. Merrill : Etat de l'art », African Scientific Journal « Volume 03, Numéro 20 » pp: 256 – 281.

Date de soumission : Septembre 2023

Date de publication : Octobre 2023



DOI : 10.5281/zenodo.8409769

Copyright © 2023 – ASJ



Résumé

L'industrie de transformation de l'ananas produit d'énormes quantités de déchets, contribuant ainsi à aggraver le problème environnemental. Dans l'optique de préserver l'environnement de ces déchets, ils sont valorisés en des produits finis de valeur. L'objectif de cette revue est de faire l'état de l'art actuel sur la composition physico-chimique et l'utilisation des déchets d'ananas en général et en particulier pour la production du biogaz et du digestat. La méthode utilisée a consisté en une consultation en ligne et dans des bibliothèques des thèses, articles et autres documents portant sur l'ananas, ses déchets et leurs utilisations ; la recherche sur la méthanisation, les produits obtenus et leurs valorisations. Les résidus d'ananas sont riches en sucre (82 % en sucres totaux, 55 % pour les réducteurs et 27 % pour les non réducteurs) en des composés volatils, phénoliques et en matière lignocellulosique. Mais étant riches en ces composés en plus du potassium, ils sont pauvres en Fe, Ca, Mn, Zn, Cu, Cd et Na. Grâce aux éléments nutritifs qu'ils contiennent, ils sont utilisés comme produits alimentaires pour les bétails et entrent dans la production des produits chimiques (comme l'acide citrique, le xylitol, le vinaigre), pharmaceutique et cosmétique. En outre, par méthanisation, ils produisent de forte quantité de biogaz pauvre ou dépourvu de méthane. Par contre la codigestion avec d'autres déchets organiques ou résidus de récolte (feuilles d'ananas), l'ajout de la soude (cendre) et de consortiums microbiens, le traitement des épluchures par ensilage, à l'acide sulfurique (H_2SO_4) et au peroxyde d'hydrogène alcalin (H_2O_2) permettent d'optimiser la production biométhanogène.

Mots clés : *Ananas comosus*, déchets d'ananas, valorisation, biogaz et digestat

Abstract

Processing pineapple industry produces huge amounts of waste, thus contributing to aggravate the environmental problem. With a view to preserving the environment from this waste, it is recycled into valuable finished products. The aim of this review is to make the current state of art on the physico-chemical composition and the use of pineapple waste in general and for the production of biogas and digestate. Pineapple residues are rich in sugar (82% total sugars, 55% reducing and 27% non-reducing), volatile compounds, phenolics and lignocellulosic matter. But being rich in these compounds in addition to potassium, they are low in mineral elements. Because the nutrients they contain, they are used as food products for livestock and are used in the production of chemicals (such as citric acid, xylitol, and vinegar), pharmaceuticals and cosmetics. Also, through anaerobic digestion, they produce large quantities of biogas that devoid of methane. On the other hand, co-digestion with other organic waste or harvest residues (pineapple leaves), the addition of soda (ash) and microbial consortia, the treatment of peelings by silage, with sulfuric acid (H_2SO_4) and alkaline hydrogen peroxide (H_2O_2) to optimize bio-methanogen production.

Keywords: *Ananas comosus*, pineapple waste, recovery, biogas and digestate

Introduction

La transformation agro-alimentaire est une activité industrielle importante qui permet la valorisation des produits agricoles bruts permettant d'éviter les pertes après récolte, l'apport de plus-value qui augmentent la valeur marchande du produit fini. Elle offre des produits diversifiés, issus de filières variées, adaptés aux besoins du marché. Elle contribue ainsi largement à la régulation du marché atténuant les variations saisonnières de prix (Broutin et al., 2012). Ce pendant cette activité, génère de grandes quantités de déchets en l'occurrence l'industrie de transformation de fruits d'ananas. L'ananas du nom scientifique *Ananas comosus* L. Merril et de la famille des Broméliaceae, est le troisième fruit tropical le plus produit, après la banane et la mangue (Zhang, et al., 2014 ; Ahouansou, 2018 ; Azevedo et al., 2021). Ce fruit contient une importante potentialité nutritive, commerciales et industrielles (Edoh et al., 2016). Dans le monde, les principaux pays, producteurs d'ananas sont : Costa Rica (3.056.445 tonnes), Philippines (2.671.711 tonnes), Brésil (2.253.897 tonnes), la Chine (2.129.936 tonnes), la Thaïlande (2.123.177 tonnes) et l'Inde (1.861.000 tonnes) (Ravindra et Subhajit, 2020). En Afrique et surtout en Afrique de l'Ouest le Bénin avec ses Tonnes/an fait partie des meilleurs producteurs d'ananas surtout avec sa variété pain de sucre très savoureuse et par ricochet très convoitée dans la sous-région et à l'échelle internationale (...). Sa culture génère beaucoup de résidus de récoltes généralement mal gérés (Roda et Lambri, 2019). De même ce fruit très appétissant est très périssable. Ainsi, sa conservation pour l'avoir à plein temps passe par diverses transformations industrielles et/ou semi-industrielle génératrices de déchets solides qui possèdent une forte charge organique, dont la dégradation présente un réel danger pour différents écosystèmes (pollution visuelle, dégagement de mauvaises odeurs, attirance des insectes, vecteurs de maladies, production de gaz à effet de serre, pollution des ressources en eau,...) (Hess, 2007 ; Gardeur-Algros et al., 2013 ; FAO, 2013 ; Banerjee et al., 2018). Ces nombreuses conséquences ont suscité plusieurs études pour une gestion efficace de ces déchets. Le présent travail porte sur l'état de l'art de la valorisation énergétique et agronomique des déchets d'ananas.

1. Cadre d'étude et méthodologie

1.1. Cadre d'étude

1.1.1 Cadre physique

L'étude se déroule à l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi plus précisément au Département de Génie de l'environnement en association avec les laboratoires d'Etudes et de Recherche en Chimie Appliquée (LERCA).

1.1.2 Cadre conceptuel

La présente étude est conduite dans le cadre d'un doctorat au sein d'une équipe pluridisciplinaire composé d'énergéticiens, d'agronomes, de chimistes environnementaliste et de spécialistes en biologie végétale.

1.2. Méthodologie

La principale méthodologie de collecte des travaux s'est basée sur l'utilisation des moteurs de recherche d'articles scientifiques comme google scholar, scrib hub, Scinapse et Semantic Scholar et sur la bibliographie existante et disponible sur place, dans les bibliothèques et centres de documentation des institutions publiques et privées au plan national, régional voire international. A cet effet, il a été répertorié des ouvrages généraux et spécifiques ainsi que des rapports d'études et de travaux divers sur la thématique.

2. Résultats

Edoh *et al.*, (2016) ont rapporté que les produits de transformation de l'*Ananas C.*, sont les jus simples ou concentrés obtenus à partir de la chaire pressée d'ananas épluché ou non, les ananas séché ou confits (replacé par la viande ou du poisson), le sirop, les gâteaux, la confiture. Certains utilise également l'ananas fruit pour produire du vin, du vinaigre, et de purée (CNUCED, 2016). Ravindra et Subhajit (2020) ont répertorié les différentes transformations de l'ananas fruit sources de déchets à savoir le découpage de la couronne, l'épluchage, le découpage en longueur pour séparer la chaire du rachis ou noyau, la récupération du jus par pressage conduisant à la production des drèches. Plusieurs études ont rapporté qu'habituellement, la couronne constitue 13% des déchets d'ananas contre 30 à 42% pour les épluchures, le cœur 7% à 10%, et la pulpe 50% (Roda et Lambri, 2019 ; Campos *et al.*, 2020). Dans les industries de transformations alimentaires, la quantité de déchets produits varie entre 25 et 65 % du poids total du fruit d'ananas (Banerjee *et al.*, 2018). Beniche, (2021) a notifié que l'étude des caractéristiques des déchets est indispensable pour mieux appréhender

l'utilisation des déchets lors d'une valorisation biologique. Ainsi, les déchets de transformation de l'ananas fruit comme les épluchures, sont riches en matières organiques 89,94% (Montcho *et al.*, 2016). Et les teneurs en matière sèche (MS) varient de 11,5 à 16,6 % avec une moyenne de 14,8 % \pm 15,78. Par conséquent, ils contiennent un fort taux d'humidité (83-92,2% avec une moyenne de 87,94 % \pm 3,69) (Tableau 1). Ils contiennent aussi de matières minérales (MM) comme le phosphore (P), le potassium (K), les phosphates ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}), le sulfate (SO_4^{2-}), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) (Aboh *et al.*, 2008, 2010 ; Dahunsi, 2021). Comme microéléments présents on a le fer (Fe), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le cadmium (Cd), le sodium (Na) (Ravindra *et al.*, 2020). En ce qui concerne les autres déchets de transformation de l'ananas fruit, Romelle *et al.*, (2016) rapporte que 100 g de peau sèche d'ananas renferment 5,1 g de protéines brutes, 5,3 g de lipides, 4,3 g de cendres et 55,5 g de glucides. Le tableau 1 résume la composition de quelques organes retrouvées dans la littérature. Les résultats montrent que tous les déchets de transformation de l'ananas sont très riches en eau et en matières organiques volatiles.

Tableau 1. Teneur en matières sèches, organiques et minérales des sous-produits de l'ananas

Organe	%MO	%H	%MS	%MV	Auteur (s)
Couronne			15,8		Toleba <i>et al.</i> , 2009
Epluchures	-	-	11,5	96	Tcha-Thom, 2019
	-	83,4	16,6	94,9	Kumar <i>et al.</i> , 2017
	-	-	16,3	-	Toleba <i>et al.</i> , 2009
	-	92,2	-	89,4	Ravindra and Subhajit, 2020
	-	86,8	-	-	Dahunsi, 2019
	89,94	-	-	-	Montcho <i>et al.</i> , 2016
Drèche	-	-	14,04-18,07	-	Azonkpin <i>et al.</i> , 2019
	-	-	13,72	-	Tcha-Thom, 2019
Feuille		85,6	14,4	93,4	Kumar <i>et al.</i> , 2017
		81,6	-	-	Zawawi <i>et al.</i> , 2014

Légende : %= pourcentage ; MO= Matière Organique ; H= Humidité ; MS= Matière Sèche ; MV= Matière volatile

Plusieurs auteurs ont rapporté que les déchets d’ananas sont des résidus de type CHL (Cellulose, Hémicelluloses et Lignines). Ainsi, selon ces auteurs, la couronne contient plus de cellulose que de lignine avec respectivement 27,24% et 6,03% puis 29,6% et 4,5% (Aboh *et al.*, 2008 ; Ravindra and Subhajit, 2020). Pour d’autres auteurs, la lignine est plus abondante dans les épluchures (2-19,4%) que dans les autres déchets à l’exception des feuilles. Le reste est constitué de fraction sucre soluble et de cendres avec 4,58±65,10% pour la couronne ; 5,95±37,71% pour les épluchures et 5,55±18,91% pour les feuilles d’ananas (Aboh, 2008 ; Montcho *et al.*, 2014 ; Kumar *et al.*, 2017 ; Dahunsi, 2019 ; Ravindra and Subhajit, 2020 ; Toléba *et al.*, 2009 ; Azevedo *et al.*, 2021 ; Ornaghi *et al.*, 2022 ; Casabar *et al.*, 2020 ; Pardo *et al.*, 2014 ; Rani et Nand, 2014). D’autres études ont montré que les déchets d’ananas sont riches en matière lignocellulosique, en particulier la peau et les feuilles (Roda et Lambri, 2019). Le tableau 2 résume les résultats de quelques études sur la composition de quelques déchets d’ananas.

Tableau 2. Fraction lignocellulosique contenus dans les déchets de transformation de l’ananas

Organe	Couronne	Epluchure	Drèche	Feuille	Mélange de déchets d’ananas	Auteur (S)
Cellulose (%)	27,24	19,99				Aboh <i>et al.</i> , 2008
	22,4	10,7				Toléba <i>et al.</i> , 2009
	66,2	-		19,5		Zawawi <i>et al.</i> , 2014
	29,6	19,8	14,3		19,4	Ravindra and Subhajit, 2020
		13,32		15,61		Kumar <i>et al.</i> , 2017
		32,4				Dahunsi, 2019
		12,17				Montcho <i>et al.</i> , 2016
		24,15				Ornaghi <i>et al.</i> , 2022
		20,9				Casabar <i>et al.</i> , 2020
		11,2				Pardo <i>et al.</i> , 2014

Hémicellulose (%)		22,1		22,4	Ravindra and Subhajit, 2020 Zawawi <i>et al.</i> , 2014 Kumar <i>et al.</i> , 2017
Lignines (%)	6,03 4,5	2,49 4,7 19,4 15,03 7,1 6,35 10,4 3,8	2,3	4,7	Aboh <i>et al.</i> , 2008 Ravindra and Subhajit Dahunsi, 2019 Kumar <i>et al.</i> , 2017 Azevedo <i>et al.</i> , 2021 Ornaghi <i>et al.</i> , 2022 Casabar <i>et al.</i> , 2020 Pardo <i>et al.</i> , 2014 Zawawi <i>et al.</i> , 2014
Sucre soluble (%)		38,14 4,77		41,02	Kumar <i>et al.</i> , 2017 Dahunsi, 2019
Sucre totaux (g/kg)		221,17			Kouassi, 2017

L'analyse du tableau 2 révèle que beaucoup de travaux ont porté sur les épluchures que les autres déchets. Les résultats obtenus varient d'un auteur à un autre. Dans son ensemble, la couronne à la forte proportion en cellulose (22 à 66%) suivie des épluchures (11 à 32%). Les feuilles et le mélange de déchets viennent en troisième position avec 16 à 19% de cellulose. L'hémicellulose est présente de façon prépondérante dans le drèche et le mélange de déchets. La lignine est très présente dans les épluchures et les feuilles. L'étude de la proportion des sucres solubles a concerné deux types de déchets à savoir les épluchures et les feuilles avec des proportions atteignant 38 et 41%. La seule étude concernant les sucres totaux porte sur les épluchures avec une teneur de 221,17 g/kg. Pour certains auteurs les déchets d'ananas sont aussi riches en composés phénoliques (myricétine, acide salicylique, acide tannique, acide trans-

cinnamique et acide p-coumarique) et polyphénoliques évaluée à environ 4% comme teneur totale, de fibres insolubles, de pectines, de sucres (saccharose, le glucose et le fructose), de monosaccharides et de disaccharides solubles, de protéines, de minéraux (potassium) de bromélaïne, de vitamines A et C, de flavonoïdes, de tanins, d'acides organiques, de composés aliphatiques oxygénés (Banerjee *et al.*, 2018 ; Roda et Lambri, 2019 ; Hikal *et al.*, 2021). Sur le plan des analyse élémentaires, plusieurs auteurs ont travaillé sur le sujet et ont montré que l'élément principal retrouvé dans les déchets d'ananas est le carbone organique (41,72% dans les feuilles d'ananas, 450, 40±1,20 g/kg dans les épiluchures, 39,79% dans l'ensemble des déchets d'ananas), suivi de l'azote (25, 30 ± 0.20 g/kg de matière sèche et 1,02% dans les épiluchures puis 0,89% dans l'ensemble des déchets d'ananas) (Kumar *et al.*, 2017 ; Dahunsi, 2019 ; Hamzah *et al.*, 2020). Au vu de ces caractéristiques chimiques des déchets d'ananas plusieurs auteurs ont évalué leur potentiel méthanogène et/ou fertilisant afin d'envisager leur valorisation énergétique ou agronomique. Ainsi, Motte (2013) a rapporté que la digestion anaérobie d'un substrat dépend fortement de la proportion de carbone et d'azote. Plusieurs auteurs ont fait cette évaluation dont les résultats sont consignés dans le tableau 3.

Tableau 3. Eléments principaux des résidus d'ananas

	C (%)	NT (%)	C/N (%)	Corg (g.kg ⁻¹ MS)	Auteur (s)
Couronne		6,81			Aboh <i>et al.</i> , 2008
Epluchure		6,12			Aboh <i>et al.</i> , 2008
		6,39			Montcho <i>et al.</i> , 2016
		25,3			Dahunsi, 2019
			43,3	342	Tcha-Thom, 2019
			61,1	62,27	Kumar <i>et al.</i> , 2017
			18/1	450,4	Dahunsi, 2019
Drèche			74	370	Tcha-Thom, 2019
Feuille			19,25	41,72	Kumar <i>et al.</i> , 2017
Mélange de déchets d'ananas	39,79	0,89	44,95		Hamzah <i>et al.</i> , 2020

De l'analyse des données du tableau 3, on note que la proportion en azote total (NT) a plus élevée est de 25,3% et est retrouvée au niveau des épluchures. Plusieurs auteurs ont trouvé des proportions de NT comprises entre 6 et 7% au niveau de la couronne et les épluchures. Le rapport C/N est le plus élevé au niveau du drèche avec une proportion de 74%. Ce rapport varie entre 18 et 61,1% au niveau des épluchures. La teneur en carbone organique varie entre 62,3 et 450,4% au niveau des épluchures. Au regard de ces compositions chimiques des déchets d'ananas, plusieurs produits ont été formulés. La couronne, les épluchures et les drèches servent d'aliment pour le bétail, les ovins, les lapereaux, les aulacodes, les porcs, les moutons (Haendler *et al.*, 1952 ; Aboh *et al.*, 2008 ; Edoh Adabe *et al.*, 2016 ; CNUCED, 2016). Par ailleurs, la couronne et le noyau sont très privilégiés à cause de leur richesse en bromélaïne un mélange naturel d'enzymes protéolytiques facilitant la digestion et le renouvellement des protéines dans l'organisme. Dans les industries alimentaires, la bromélaïne ou broméline est un additif attendrisseur de viande, un clarificateur des boissons comme la bière (Banerjee *et al.*, 2018). Son usage se fait également dans la médecine pour empêcher une agrégation plaquettaire qui est la principale cause des accidents vasculaires cérébraux (AVC) (Maurer, 2001). Une dose orale de la bromélaïne s'avère efficace pour prévenir l'AVC (Tochi *et al.*, 2008). Elle est également utilisée pour traiter le cancer des seins, la leucémie, le carcinome pulmonaire, le mélanome et le cancer de l'ovaire (Maurer, 2001; Pavan *et al.*, 2012). Il traite l'asthme (Secor, *et al.*, 2013), les inflammations du côlon (Doreswamy & Darshan, 2004), l'arthrose (Walker *et al.* 2002), la polyarthrite rhumatoïde (Maurer, 2001), les troubles gastro-intestinaux. En un mot la bromélaïne est un anti-tumoral et un anti-inflammatoire (Banerjee *et al.*, 2018). Autres effets de la bromélaïne rapportés sont la neutralisation des effets d'agents pathogènes intestinaux comme *Vibrio cholera* et *Escherichia coli* qui provoquent des nausées, des vomissements et la diarrhée (Wen et coll., 2006). D'après la même source, il améliore la distension abdominale et augmente la teneur en eau de pastilles fécales, traitant ainsi la constipation et la dysmotilité gastro-intestinale postopératoire. La bromélaïne traite des troubles dermatologiques en cas de brûlures/escarres (Rosenberg *et al.* 2012) et la maladie d'Alzheimer (Sancesario *et al.*, 2018). De même, Banerjee *et al.* (2018) rapportent à partir des travaux de Anderson *et al.* (2009) que les fibres alimentaires des épluchures utilisés comme compléments alimentaires, normalisent les selles, réduisent le risque d'accident vasculaire cérébral, guérir du diabète, de l'obésité, de la maladie coronarienne, l'hypertension et des troubles gastro-intestinaux. Aussi, les fibres des feuilles d'ananas entrent dans la production de faux cils (Widowati et Amalia, 2021). Les épluchures grâce aux polyphénols qu'ils contiennent, interviennent dans la production de

l'acide citrique, des acides organiques et même de nutriments pour la culture des bactéries (Kouassi *et al.*, 2017 ; Roda et Lambri, 2019). Les couronnes et les épluchures à cause de leur richesse en cellulose sont utilisées dans les l'industrie des polymères pour la fabrication de matériaux d'emballage alimentaire, de l'hydrogels (Banerjee *et al.*, 2018 ; Pereira *et al.*, 2022). Les déchets d'ananas interviennent dans la production du bioéthanol, du biobuthanol, du xylitol, de l'acide lactique et du xylo-oligosaccharides (XOS) (Giroto *et al.*, 2015 ; Khedkar *et al.* 2017 ; Roda et Lambri, 2019). Le développement des éco-procédés innovants sont des initiatives qui permettent de réduire ou mettre fin, au rejet de quantités importante d'épluchures d'ananas dans la nature.

3. Production et optimisation du Biogaz à base des sous-produits d'ananas et autres déchets organiques

3.1. Processus de méthanisation

Le biogaz est un produit final à haute valeur énergétique obtenir suite à un processus biochimique complexe mis en œuvre en absence d'oxygène et faisant intervenir différentes communautés microbiennes dans la dégradation et la conversion de polymères de la matière organique (Mshandete *et al.*, 2006, Lacour, 2012). Ce processus se déroule suivant des étapes que sont : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse, et la méthanogénèse (Moletta, 2008 ; Lacour 2012 ; André, 2016). Lors de l'hydrolyse, les macromolécules complexes sont transformées par des bactéries hydrolytiques (*Clostridium sp Bacillus sp. Proteus vulgaris, Bacteroides sp., Staphylococcus sp., Micrococcus sp*) en des composés simples (Hess, 2007 ; André, 2016 ; Tanios, 2017). Au cours de la deuxième étape, les produits de l'hydrolyse sont transformés par les bactéries acidogènes (cas de *Lactobacillus sp, E.coli, Staphylococcus sp., Bacillus sp,*) en hydrogène ou formate, dioxyde de carbone, pyruvate, Acides Gras Volatils (AGV) (acides acétique, propionique, butyrique, valérique, etc.) et autres produits organiques (éthanol, cétones ou acides lactique, succinique, etc.) (Lacour, 2012 ; André, 2016 et Tanios, 2017). Les produits de l'hydrolyse et de l'acidogénèse sont réduits en acétate, hydrogène et dioxyde de carbone par un groupe hétérogène de trois populations bactériennes : acétogènes syntrophes, bactéries sulfato-réductrices et les bactéries acétogènes non-syntrophes ou homoacétogènes (Hess, 2007 ; Lacour 2012 ; André, 2017) pendant l'acétogénèse. Et lors de la dernière étape, les archaees convertissent l'hydrogène, le dioxyde de carbone, et l'acide formique ou acétique en méthane et dioxyde de carbone (Lacour, 2012 ; André, 2017 ; Tanios, 2017). Ce mélange gazeux est appelé le

biogaz. D'après la littérature, divers déchets organiques subissent ces différentes étapes pour produire du biogaz, valorisé sous forme d'énergie de cuisson et électrique.

3.2. Paramètres physico-chimiques influant la production du biogaz

Les paramètres physico-chimiques qui conditionnent le déroulement de la digestion anaérobie et qui déterminent la production optimale du biogaz sont :

- **Granulométrie** : Une taille réduite des particules offre une plus grande surface spécifique favorisant une meilleure absorption du substrat qui se traduit par une meilleure cinétique d'activité microbienne et de production méthanogène (Angelidaki et Ahring, 2000; Lacour, 2012).
- **Température** : Au cours de la digestion anaérobie, la température peut être psychrophile (en dessous de 25°C), mésophile (20-45°C), ou thermophile (55-70°C). La plage mésophile est la plus recommandée par plusieurs études. (Hess, 2007). Lorsqu'elle est thermophile, le processus est plus rapide et plus efficace par la croissance élevée et rapide des bactéries de méthanisation. Mais les enzymes sont dénaturées et le taux de croissance des bactéries décroît. A 32°C, la production de biogaz à augmenter par rapport à 45°C (Afilal *et al.*, 2014). Ainsi, la production optimale du biogaz dépendrait d'une part du niveau de la température.
- **pH** : La nature du pH est fonction de la croissance des organismes et par conséquent de l'activité enzymatique. On distingue, les acidophiles ($1 < \text{pH} < 5,5$) ; les neutrophiles ($5,5 < \text{pH} < 8$) et les alcalophiles ($8,5 < \text{pH} < 11,5$). Il est conseillé de maintenir le pH d'un digesteur dans la gamme optimale (entre 6,7 et 7,3 avec un optimum entre 7 et 8) pour la méthanisation (Braun, 2007 ; Hess, 2007; Lacour, 2012).
- **Teneur en eau** : La relation liant la production de méthane et la teneur en eau est l'activité spécifique des méthanogènes qui a été démontrée comme étant linéaire avec la teneur en eau (Le Hyaric *et al.*, 2012). Afilal *et al.*, (2014) déduisent des résultats (faible proportion des masses volumiques et la forte humidité des déchets sauf celui d'animalerie) obtenu, que la fermentation méthanique est la meilleure technique de valorisation des déchets qui présentent une teneur importante en humidité. Girotto *et al.*, (2015) ajoutent aussi qu'une forte humidité et la biodégradabilité contenu dans les déchets alimentaires sont des caractéristiques idéales pour la production de biogaz. Ainsi, l'humidité des déchets organiques est un facteur important à considérer dans le choix du type de déchets et de traitement à adopter.

Rapport C/N : Il permet de définir la nécessité d'une codigestion de la matière première à étudier avec autres déchets. Lorsqu'un déchet organique présente des rapports C/N inférieurs à l'optimum qui est de 20 à 30 pour la bio-méthanisation (Marchaim, 1992 ; Kuria, 2008, Afilal *et al.*, 2014), il est nécessaire de faire la codigestion avec d'autres déchets riches en carbone pour optimiser la production de biogaz. Un rapport C/N élevé entraîne une faible production de biogaz et s'il est faible, il peut conduire à une accumulation d'ammoniac et par conséquent à l'élévation du pH.

3.3. Résidus ou digestats issus de la méthanisation

Après la digestion anaérobie, les sous-produits qu'on obtient sont répartis en deux. Un liquide appelé biol et l'autre solide ou biosol sont d'excellents engrais pour de nombreuses plantes (Gomero, 2005 ; Girotto *et al.*, 2015). D'après Haendler *et al.* (1952), le son (biosol) d'ananas est un produit riche en sucres et en cellulose, en calcium, en vitamine A. Le biol contient de nombreuses substances essentielles à la croissance des plantes telles que l'azote, le phosphore, le potassium et le calcium. Ils interviennent dans le fonctionnement physiologique de la plante (maintenance et régulation de la pression osmotique des cellules végétales) (Afilal, 2014). Le biol est constitué également des régulateurs de croissance tels que l'IAA (auxines) et la gibbérelline, ainsi que d'autres substances qui accélèrent le développement des plantes (Gomero, 2005). La partie solide, le biosol, a des teneurs en substances nutritives similaires. Ces deux engrais favorisent activent la germination des semences, l'enracinement, le développement du feuillage et la floraison (Gomero, 2005).

3.4. Enjeux de la digestion anaérobie

3.4.1. Atouts de la digestion anaérobie

La méthanisation (traitement anaérobie) des déchets ou des sous-produits organiques présente des atouts incontestables. Selon Tanios (2017), elle permet une dépollution et le retour au sol de la matière organique, donc supprime les nuisances locales (odeurs et insectes autour des sites, réduction de maladies) ; permet une gestion durable des déchets organiques ; produit trois fois moins le CO₂ que le compostage, donc permet une diminution de la charge polluante de près de 95% protégeant ainsi l'environnement des rejets de méthane dans l'atmosphère, le gaz à effet de serre. Elle a également pour avantage une production d'énergie 100% renouvelable en substitution des énergies fossiles émettrices de GES, une énergie « verte » valorisable en électricité, par chauffage, et climatisation et enfin permet une réduction du réchauffement climatique. La méthanisation crée de la richesse, de l'emploi (sur le site de production par

conséquent diminue le taux de chômage) et le lien social (ATEE, 2016). A l'aide du produit fini, le biogaz, on produit la chaleur, le biocarburant qui sont sources de revenus supplémentaires, surtout que les énergies fossiles utilisées (massivement) de nos jours sont épuisables (Tanios, 2017). La bio méthanisation par ses nombreux avantages constitue une des options particulièrement intéressantes pour une dépollution et un traitement très efficace des déchets organiques et par conséquent un bouclage d'un cycle d'économie circulaire des déchets organiques industriels ou agricoles.

3.4.2. Inconvénient de la digestion anaérobie

Les inconvénients de la digestion anaérobie ou méthanisation, sont liés à la conception des ouvrages et aux processus de production du biogaz :

- Le stockage du biogaz nécessite d'importants volumes. Sa compression est coûteuse et consomme de l'énergie, ce qui est donc adapté aux grandes installations.
- Les investissements sont assez lourds bien qu'il y ait des subventions possibles ;
- Acceptabilité du public : ce point est surtout sensible pour les grosses installations.
- L'entretien des installations doit être régulier et demande du temps.

En dehors de ces inconvénients le biogaz a d'autres limites liées à l'environnement. Lorsque la production du biogaz s'effectue dans un milieu et n'est donc pas récupéré elle provoque la destruction de la couche d'ozone et par conséquent le changement climatique. Lorsqu'après production, le biogaz n'est pas épuré avant son utilisation comme bio carburant dans les moteurs celui-ci détruit le moteur.

3.5. Déchets organiques entrant dans la production du biogaz

Les sous-produits agricoles (résidus végétaux, résidus de fruits et légumes), les fumiers (rejets de bovins laitiers, des volailles, des caprins etc...), les déchets d'abattoir et municipaux sont les différents types de déchets organiques utilisés pour produire le biogaz. La digestion anaérobie de la bouse de vache et de la fiente de poulet a donné chacune 19,26 L et 31,05 L de biogaz et la codigestion des deux résidus a donné 35,5L (Sakouvoqui *et al.*, 2018). Celle effectuée avec les effluents de palmipèdes a donné 500 Nm³CH₄/t MO ; lisiers de porcs entre 167 et 442 Nm³CH₄/t MO ; graisses agro-industrielles valeur inférieure à 500Nm³CH₄/t MO; graisses de palme 738 Nm³CH₄/t MO et substrats lignocellulosiques entre 292 et 441 Nm³CH₄/t MO (Pouech *et al* 2005). La codigestion des : lisiers de porcins (>80 %) et lisiers de palmipèdes (canards gavages (<20 %)); déchets lipidiques et lisiers ; déchets lipidiques et

lignocellulosiques, a donnée respectivement 92 m³/j pour 614 kWh ; 470 Nm³CH₄/t MO pour 1020 kWh et 296 Nm³/kgMO.j. pour 1471 kWh. D'après Afilal *et al.* (2014), les lipides sont plus méthanogènes (1444 mL/gMV) que les protéines (992 mL/gMV) suivi des sucres 746 mL/gMV. Cette déduction corrobore l'idée selon laquelle l'apport un coproduit de nature lipidique permet une augmentation de la quantité de biogaz produite quotidiennement ainsi que la teneur en méthane ; mais l'ajout du substrat ligno-cellulosique diminue la teneur en méthane (Pouech *et al.*, 2005). Selon ces derniers, ce phénomène s'explique par le fait que les molécules lipidiques sont des chaînes carbonées relativement simples (longues chaînes linéaires, avec peu de ramifications), très réduites tandis que les fractions ligno-cellulosiques sont constituées par des molécules plus complexes (celluloses, lignines...), ramifiées, et très oxydées). Pour Tahri *et al.* (2012), la teneur du biogaz en méthane dépend de la nature du substrat méthanisé : plus il est chargé en matière carbonée, plus il produit de méthane. Néanmoins, il existe des déchets organiques qui nécessitent des traitements préliminaires comme les crottes de chèvre ou de mouton qui possèdent une couche muqueuse gluante et qui, par ailleurs, rend difficile l'accès des bactéries se trouvant dans le digesteur aux matières fermentescibles ; donc avant toute utilisation, ils doivent être écrasés (Anyanzo, 2005). Ces résultats démontrent l'intérêt d'étudier différents scénarios de codigestion pour permettre un gain de production de biogaz.

3.6. Production du biogaz à partir des sous-produits d'*Ananas comosus*

La forte teneur en eau (supérieure à 80%), les matières volatiles présentes dans les épiluchures et feuilles d'ananas, (89 à 94% MS) et les glucides font d'eux, une source prometteuse pour la production de carbone pour la fermentation microbienne, du biogaz et de biométhane (Khari *et al.*, 2014 ; Banerjee *et al.*, 2018 ; Bautista Angeli, 2019 ; Beniche, 2021). Mais d'après les travaux de recherches de Rani et Nand, (2004) rapporté par Tcha-Thom (2019), l'acidité (pH voisin de 4), la teneur élevée en AGV (pH=3,5) en plus de leurs caractères lignocellulosiques (rend difficile leur dégradation par les micro-organismes en raison de leurs structures complexe) ne favorisent pas la digestion anaérobie (Hmazah *et al.*, 2020). En effet, l'acide citrique que constitue les épiluchures d'ananas malgré sa faible quantité, entraîne une baisse du potentiel Hydrogène du milieu qui inhibe la production du biogaz (Kouassi *et al.*, 2017). Plusieurs études témoignent de la forte production de gaz par ces déchets : 965 cm³ et 975 mL, mais dépourvu de méthane (Sagagi *et al.*, 2009 ; Chakravarty, 2016 ; Tcha-thom, 2019). Mais le traitement par broyage, codigestion avec d'autres substrats comme le cas de la

bouse de vache (en faibles proportions) et l'usage de la cendre comme régulateur a permis de stabiliser le pH proche de 7, et de produire 87 % de méthane (Tcha-thom, 2019). De même, l'étude menée par Hamzah *et al.* (2020) sur l'effet du solide total des déchets d'ananas toujours en codigestion avec des bouses de vaches conduit à la conclusion selon laquelle un rendement élevé en méthane (17,19 CH₄/g VS) est obtenu à faible proportion (12% à un ratio 1:1 bouse de vache et déchet ananas) du solide total des déchets d'ananas qu'à forte proportion (28% avec un ratio 1:2). Autrement dire, plus la teneur en solide totale des déchets d'ananas augmente, plus la quantité de biogaz produite est élevée, plus la quantité de méthane produite est plus faible. Des résultats similaires ont été mentionnés par Liotta *et al.* (2014) et Ogunleye *et al.* (2016) selon Hamzah *et al.* (2020). En revanche, ils sont contraire aux travaux de Unnikrishnan and Ramasamy (2022), où le volume de biogaz le plus élevé (0,43 m³/jr) est obtenu à un ratio 1:1 comparativement au ratio 1:1,5 (0,39 m³/jr) mais avec une forte teneur en méthane : 60,49% pour le ratio 1:1 et 63,81% pour le ratio 1:1,5. Cette différenciation s'expliqueraient par le manque d'eau dans le milieu qui ralentit le processus de transport, ce qui d'autre part, réduit le niveau d'activité microbienne, réduisant ainsi le méthane produit (Liotta *et al.*, 2014). Par ailleurs, il a été observé un rendement en biogaz élevé (0,80 L soit 80.000 ml) par codigestion avec le lisier de porc (80 % d'épluchures d'ananas et 20 % de lisier de porc) avec des rendements en méthane de 0.58 L CH₄ g TVSajouté⁻¹ (Azevedo, 2021). De même, il ressort que l'utilisation des feuilles d'ananas avec les déchets d'ananas (épluchures) en termes de production de biogaz et d'optimisation du potentiel méthanogène est plus efficace (187.19 L/kg de biogaz et 56.61% de méthane) que l'utilisation des bouses de vache (84,46 L/Kg TS de biogaz et 49,20 % de méthane) et encore plus avec les consortiums microbiens : *Cornybacterium nuruki*, *Aneurinibacillus migulans*, *Staphylococcus epidermidis*, *Enterobacter cloacae*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Methanosarcina barkeri* and *Methanothrix concillii* (208,29 L/Kg TS de biogaz et 72,45 % de méthane) (Kumar *et al.*, 2017). En réalité, le fumier de bétail est un principal déchet organique qui contient une grande quantité d'azote (N) et phosphore (P) et des micro-organismes utiles qui peuvent améliorer l'activité biologique (Chakravarty 2016). Cependant, le carbone présent dans la bouse de vache est insuffisance et ne peut répondre complètement aux exigences de la digestion anaérobie (Hamzah *et al.*, 2020).

Pour optimiser la production du biogaz à partir des déchets d'ananas, un prétraitement par ensilage avait convertir 55 % des carbohydrates des déchets en Acide Gras Volatils (AGV) et réduit de 91%, la demande chimique en oxygène (Rani et Nand, 2004). Cette méthode de

traitement (d'une durée de six mois) a permis d'obtenir un rendement de biogaz de $0,67 \text{ m}^3/\text{kg}$ de solides volatils ajoutés, avec une teneur en méthane de 65%. Un rendement plus meilleur que le rendement en biogaz de bouse de vache ($0,2\text{-}0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$ de matière sèche) (Tauseef *et al.*, 2013). Le traitement des déchets par ensilage est une méthode qui limite la possibilité de formation d'écume lors de la digestion (Rani et Nand, 2004), ce qui s'avère important, mais cette technique du fait de sa durée de traitement, est peu efficace comparativement à l'utilisation des feuilles d'ananas et des micro-organismes anaérobies (consortiums microbiens). En outre, il ressort des travaux de Dahunsi (2019), que le prétraitement des épiluchures à l'acide sulfurique (H_2SO_4) a conduit à une énorme solubilisation de la lignine avec une production de $194,2 \pm 3,0$ quantité de biogaz, une production inférieure à la production ($587,5 \pm 5,2$) obtenue après un prétraitement avec du peroxyde d'hydrogène alcalin (H_2O_2) et avec un temps de rétention plus réduit (10 jours). Le peroxyde d'hydrogène alcalin aurait rendus plus perméable la structure complexe des épiluchures, ce qui a favorisé l'accès facile des micro-organismes pour leur dégradation. De plus, les épiluchures non tamisées non traités et tamisés non traités ont produit respectivement $287,8 \pm 2,1$ et $245,4 \pm 3,1$ de biogaz. La réduction de la taille des épiluchures d'ananas n'est donc pas nécessaire avant le prétraitement au peroxyde d'hydrogène alcalin.

Conclusion

Les déchets de l'ananas, grâce aux éléments qu'ils contiennent, ils sont utilisés dans plusieurs domaines (élevage, pharmaceutique, agronomique, industrielles, textile), et en association avec d'autres déchets organiques, par digestion anaérobie il est produit du biogaz à haut potentiel, une énergie renouvelable ayant un effet positif sur l'effet de serre puisqu'elles se substituent aux énergies fossiles, réduisant ainsi les impacts environnementaux. L'utilisation des digestats obtenus après la digestion comme fertilisants des sols, est une pratique qui nécessite d'être promu, encourager, car non seulement elle permettra de réduire voir supprimer l'utilisation des fertilisants chimiques nuisible à la santé humaine et qui dégradent le sol, mais aussi de développer la culture biologique au Bénin. Malgré la structure complexe qu'ils constituent, des traitements chimiques sont effectués pour permettre l'accessibilité par les micro-organismes pour une biodégradation intégrale et optimisation de la production méthanogène. Néanmoins les traitements chimiques de ces déchets à grande échelle dans le contexte des pays-sous-développés comme le cas du Bénin, constitue un verrou. Le traitement chimique est plus avantageux pour les micro-technologies de digestion anaérobie. La digestion anaérobie de la couronne et le drèche d'ananas et l'étude de leurs aptitudes digestibles est peu étudié. De plus les proportions optimales avec la cendre qui est une matière facile à produire et en grande quantité sont peu expérimentées. La valeur fertilisante du digestat issu de ce mélange n'est donc pas connue. Autant d'études sont encore envisageables pour une valorisation complète des déchets d'ananas en méthanisation et la production des digestats à valeur fertilisante répondant aux normes pour une utilisation en agriculture.

BIBLIOGRAPHIE

- Aboh A B., Ehouinsou M. A., Olaafa M. et Brun A., 2008. Complémentation alimentaire des ovins Djallonké avec les sous-produits de transformation d'ananas : potentiel nutritif, préférence et développement pondéral. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, Numéro 61
- Aboh B., Olaafa M., 2010. Méthodes de traitement et de conservation des épiluchures d'ananas (*Ananas comosus*) utilisées rationnellement pour engraisser le mouton Djallonké ; Fiche technique ; Bibliothèque Nationale (BN) du Bénin ISBN 978 -99919-337-1-9 ; 4p.
- Afilal M.E., Elasri O., Merzak Z., 2014. Caractérisations des déchets organiques et évaluation du potentiel Biogaz (Organic waste characterization and evaluation of its potential biogas). *J. Mater. Environmental Science*. 5 (4) (2014) 1160-1169.
- Ahouansou R.H., Yemadje F.J., Agbobatinkpo P.B., 2018. Etude et conception d'une épilucheuse de fruits d'ananas. *Revue Internationale des Sciences Appliquées (RISA)*. Vol1, n°03, 26-39.
- Anderson J., Baird P., Davis R. J., Ferreri, S., Knudtson M., Koraym A., Williams C., 2009. Health benefits of dietary fiber. *Nutrition Reviews*, 67(4), 188-205.
- André L., 2016. Étude de verrous scientifiques et technologiques pour la compréhension et l'optimisation du procédé de méthanisation voie sèche discontinu de sous-produits d'origine agricole. Thèse de Doctorat. Génie des Procédés. Université de Technologie de Compiègne. France. 260 p.
- Angelidaki I. et Ahring B. K., 2000. Methods for increasing the biogas potential from the recalcitrant organic matter contained in manure. *Water Science and Technology*, vol. 41, pp. 189-194.
- Anyanzo T. A., 2005. Biogaz en Ouganda - une nouvelle expérience, *AGRIDAPE*, Vol 21 n°1, 19 p.
- ATEE (Association Technique Energie Environnement), 2016; Vers l'autonomie énergétique des territoires : Méthanisation et biogaz, une filière d'avenir, Document ; 28p ;

- Azevedo A. Gominho J. Duarte E., 2021. Performance of Anaerobic Co-digestion of Pig Slurry with Pineapple (*Ananas comosus*) Bio-waste Residues; *Waste and Biomass Valorization*; 12:303–311; <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00959-w>
- Azonkpin S., Chougourou C.D., Aboudou K., Hedible L., Soumanou M.M., 2019. Evaluation de la qualité de l'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merr.) de cinq itinéraires techniques de production dans la Commune d'Allada au Bénin; *Revue Internationale des Sciences Appliquées* ; Vol2, n°01, 48-61
- Bautista Angeli, J-R. 2019. « Etude de faisabilité de la micro-méthanisation par co-digestion à l'échelle des quartiers » ; Thèse de Doctorat ; Ecole Nationale Supérieure Mines-Télécom Atlantique ; Comue Université Bretagne Loire ; Bretagne ; 203p.
- Banerjee, S., Ranganathan, V., Patti, A., Arora, A., 2018. Valorisation of pineapple wastes for food and therapeutic applications, *Trends in Food Science & Technology*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.024>
- Braun R., 2007. Improvement of Crop Plants for Industrial End Uses, chap. Anaerobic digestion: a multi-faceted process for energy, environmental, management and rural development, p. 335–416, Springer, 2007.
- Burmeister, J., Walter R. et Fritz M., 2014. Fertilisation à base de digestats – Effets sur la faune du sol Extrait de : Biogas Forum Bayern N° I - 27/2015, éd. ALB Bayern e.V ; 18 p.
- Campos D.A.¹, Ribeiro T.B.¹, Teixeira J.A.², Pastrana L.³ and M.M. Pintado ¹, 2020. Integral Valorization of Pineapple (*Ananas comosus* L.) By-Products through a Green Chemistry Approach towards Added Value Ingredients; *Foods*, 9, 60; doi:10.3390/foods9010060
- Carrere, 2008. « Valorisation énergétique de la biomasse lignocellulosique par digestion anaérobie : prétraitement fongique ». Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées DELYON.
- Casabar J.T., Ramaraj R., Tipnee S., Unpaprom Y., 2020. Enhancement of hydrolysis with *Trichoderma harzianum* for bioethanol production of sonicated pineapple fruit peel. *Fuel* 279:118437. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118437>

- Chakravarty, G., 2016. Evaluation of fruit wastes as substrates for the production of biogas. *Scholars Research Library Annals of Biological Research*, 7(3), 25–28. Retrieved from <http://scholarsresearchlibrary.com/archive.html>
- COPROinov, 2016. Les éco-procédés au service de la valorisation des (co-) produits tropicaux. BIOVAL OCEAN INIEN. 11p.
- Chapoutot P., Rouillé B., Sauvant D., Renaud B., 2018. Les coproduits de l'industrie agro-alimentaire : des ressources alimentaires de qualité à ne pas négliger. *INRA Production. Animales*.31 (3), 201-220
- CNUCED (Conférence Des Nations Unies sur le Commerce et le Développement), 2016. Ananas ; un profil de produit de base par INFOCOMM. 23p.
- Dahunsi S.O., 2019. Liquefaction of pineapple peel: Pretreatment and process optimization; *Elsevier*; 185 1017-1031
- Djaâfri M., Khelifi M., Kalloum S., Tahri A., Kaidi K. et Touzi A., 2009. Effet de l'ensemencement sur la digestion anaérobie des déchets ménagers de la ville d'Adrar. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 12 N°3 369 – 374
- Doreswamy R., & Darshan S., 2004. Patented anti-inflammatory plant drug development from traditional medicine. *Phytotherapy Research*, 18, 343-357.
- Edoh Adabe K., Hind S. et Maïga A., 2016. Production et transformation de l'ananas. Collection Pro-Agro. 44 p.
- FAO., 2013. Food wastage footprint: Impacts on natural resources- Summary report.
- Gardeur-Algros *et al.*, 2013
- Unnikrishnan, G. and Ramasamy, V., 2022. Anaerobic Digestion of Pineapple Waste for Biogas Production and Application of Slurry as Liquid Fertilizer Carrier for Phosphate Solubilizers. *Indian Journal of Agricultural Research*. 56(4): 408-414. DOI: 10.18805/IJARE.A-5777
- Giroto F., Alibardi L., Cossu R., 2015. Food waste generation and industrial uses: A review, *Waste Management*, 45 (2015) 32–41

- Grigoraş C-G., 2012. Valorisation des fruits et des sous-produits de l'industrie de transformation des fruits par extraction des composés bioactifs. Thèse de Doctorat. Ecole Doctorale Sciences et Technologies / Faculté de Ingénierie. Université d'Orléans et de l'Université « Vasile Alecsandri » de Bacău. 262 p.
- Haendler L. et Py C., 1952. Station Centrale des Cultures Fruitières Tropicales. *Fruit*. Vol. 7, n° 5. 231-233
- Hamzah A.F.A1., HamzahM. H. 1,2, Mazlan F. N. A1., Man H.C. 1, 2, Jamali N. S. 3, Siajam S. I. 2020. Anaerobic Co-digestion of Pineapple Wastes with Cow Dung: Effect of Different Total Solid Content on Biomethane Yield; *Advances in Agricultural and Food Research Journal*; 1(1): a0000109; <https://doi.org/10.36877/aafjr.a0000109>
- Hess J., 2007. Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation, Thèse de Doctorat. UFR Sciences, Université de Nice-Sophia Antipolis, France, 229 p.
- Hikal W.M., Mahmoud A.A., Said-Al Ahl, H.A.H., Bratovcic A., Tkachenko K.G., Kačániová M. and Rodriguez, R.M., 2021. Pineapple (*Ananas comosus L. Merr.*) Waste Streams, Characterisation and Valorisation: An Overview. *Open Journal of Ecology*, 11, 610-634. <https://doi.org/10.4236/oje.2021.119039>
- João A. L. A., 2010. Biométhanisation des déchets putrescibles municipaux – technologies disponibles et enjeux pour le Québec. Essai, Centre Universitaire de Formation en Environnement, Université de Sherbrooke, Québec, 99p.
- Khai Lun O., Bee Wai, T. & Siew Ling, L., 2014. Pineapple cannery waste as a potential substrate for microbial biotransformation to produce vanillic acid and vanillin. *International Food Research Journal*, 21. Kalloum S., Khelafi M., Djaafri M., Tahri A. et Touzi A., 2007. Etude de l'influence du pH sur la production du biogaz à partir des déchets ménagers. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°4. 539 – 543
- Khedkar M. A., Nimbalkar P. R., Gaikwad S. G., Chavan P.V., Bankar S. B., 2017. Sustainable biobutanol production from pineapple waste by using *Clostridium acetobutylicum* B 527: Drying kinetics study. *Bioresource Technology*, 225, 359–366. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.058>

- Kouassi E. K. A., Soro Y., Vaca-Garcia C., Kouassi B. Y., 2017. Valorisation des déchets d'agroressources par bioproduction d'acide citrique. *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*. 044 : 36 - 42
- Kpenavoun Chogou S., Dohou S. Falade H., Soule A. H., Ichola J., 2014. Recensement des producteurs et des unités de transformation d'ananas au Bénin. 46 p.
- Kumar M., Jacob S. B., Upadrasta L., Banerjee R., 2017. Biomethanation of pineapple wastes using potent anaerobic consortia substituting cow manure; *Environmental Engineering and Management Journal*; Vol.16, No. 11, 2647-2655 DOI: 10.30638/eemj.2017.275
- Kuria J., 2008. *International Journal for Service Learning in Engineering*, 3(1), 9-40, ISSN 1555-9033.
- Lacour J., 2012. Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organiques par digestion anaérobie en Haïti. Thèse de Doctorat, Ecole doctorale Société et Environnement, Haïti, 217 p
- Le Hyaric R., 2009. Caractérisation, tartinabilité et valorisation des refus de dégrillage des stations d'épuration. Laboratoire de Génie Civile et d'Ingénierie Environnementale. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 190 p.
- Liotta F., D'Antonio G., Esposito G., 2014. Effect of total solids content on methane and volatile fatty acid production in anaerobic digestion of food waste. *Waste Management and Research*, 32(10), 947–953. <https://doi.org/10.1177/0734242X14550740>
- Maurer, H., 2001. Bromelain: biochemistry, pharmacology and medical use. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 58(9), 1234-1245.
- Marchaim U., FAO, 1992. Agricultural services bulletin 95.
- Mellak, A. Le Roux Y., Bouarab R., Ahmed-Zaid T., 2019. Contribution à la production du biogaz à partir d'effluents d'élevage animaliers en Algérie. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*. Vol.5. N°1.
- Moletta, R., 2008. La méthanisation. Edition Lavoisier. ISBN : 978-2-7430-1271-7. 1-532

- Montcho M., Babatoundé S. Aboh B. A. Bahini M. J. D. Chrysostome A. A. M. C. Mensah G. A., 2016. Disponibilité, valeurs marchande et nutritionnelle Des Sous-Produits Agricoles Et Agroindustriels utilisés dans l'alimentation des ruminants au Benin
- Motte J-C., 2013 Digestion anaérobie par voie sèche de résidus lignocellulosiques : Etude dynamique des relations entre paramètres de procédés, caractéristiques du substrat et écosystème microbien ; école doctorale SPSA Et de l'Unité de Recherche Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (INRA), Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II ; France ; 310 p.
- Mshandete A., Björnsson L., Kivaisi A. K., Rubindamayugi M. S. T., Mattiasson B. 2006, Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste. *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2385-2392.
- Ogunleye O. O., Aworanti O. A., Agarry S. E., 2016. Enhancement of animal waste biomethanation using fruit waste as co-substrate and chicken rumen as inoculums. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 38(11), 1653–1660. [https://doi.org/10.1080/15567036.2014.933286*](https://doi.org/10.1080/15567036.2014.933286)
- Ornaghi H. L., de Oliveira D. M., Pereira B., Arantes V., Cioffi M. O. H., 2022. Effect of Chemical Treatment Sequence on Pineapple Peel Fiber: Chemical Composition, Thermal Stability and Thermal Degradation Kinetics, *Research Square*, DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1121648/v1>
- Pardo M., Cassellis M., Escobedo R. & Garcia E., 2014. Chemical characterisation of the Industrial residues of the pineapple (*Ananas comosus*). *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 3(2B), 53-56.
- Pavan R., Jain S., Shraddha & Kumar, A., 2012. Properties and Therapeutic Application of 707 Bromelain: A Review. *Biotechnology Research International*, 1-6.
- Pereira P. H. F., Ornaghi H. L., de Oliveira D. M., Pereira B., Arantes V., Hilário Cioffi M. O., 2022. Effect of Chemical Treatment Sequence on Pineapple Peel Fiber: Chemical Composition, Thermal Stability and Thermal Degradation Kinetics; *Research Square*; 22p; DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1121648/v1>

- Pouech P., Coudure R., Marcato C-E., Intérêt de la co-digestion pour la valorisation des lisiers et le traitement de déchets fermentescibles à l'échelle d'un territoire, *Journées Recherche Porcine*, 37, 39-44.
- Rani, D., & Nand, K., 2004. Ensilage of pineapple processing waste for methane generation. *Waste Management*, 24(5), 523-528.
- Ravindra R S. and Subhajit R., 2020. Comprehensive study of different extraction methods of extracting bioactive compounds from pineapple waste - A review, *The Pharma Innovation Journal*; 9(6): 327-340
- Roda A et Lambri M., 2019. Food uses of pineapple waste and by-products: a review, *International Journal of Food Science and Technology*; 84, 29122, doi:10.1111/ijfs.14128 doi:10.1111/ijfs.14128
- Romelle F., Ashwini R., & Manohar R. (2016). Chemical composition of some selected fruit peels. *European Journal of Food Science and Technology*, 4, 12-21.
- Rosenberg L., Krieger Y., Silberstein E., Arnon O., Sinelnikov I., Bogdanov-Berezovsky A., Singer A., 2012. Selectivity of a bromelain based enzymatic debridement agent: a porcine study. *Burns*, 38(7), 1035-1040.
- Sagagi, B. S., B. Garba and N. S. Usman., 2009. Studies on biogas production from fruits and vegetable; *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 2(1): 115 – 118
- Sakouvogui A., Balde Y.M., Barry M. F., Kante C., et Keita M., 2018. Évaluation du potentiel en biogaz de la bouse de vache, de la fiente de poule et en codigestion à Mamou, République de Guinée. *Afrique SCIENCE* 14(5) 147 – 157.
- Sancesario G., Nuccetelli M., Cerri A., Zegeer J., Severini C., Ciotti M., Bernardini S., 2018. Bromelain Degrades A β 1-42 Monomers and Soluble Aggregates: An In Vitro Study in Cerebrospinal Fluid of Alzheimer's Disease Patients. *Current Alzheimer Research*, 15(7), 628-636.
- Secor E., Szczepanek S., Castater C., Adami A., Matson A., Rafti E.T., Guernsey L., Natarajan P., McNamara J.T., Schramm C.M., Thrall R.S., Silbart L.K., 2013. Bromelain inhibits Allergic Sensitization and Murine Asthma via modulation of dendritic cells. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2013, 1-9.

- Tahri A., Djaafri M., Khelafi M., Kalloum S. et Salem F., 2012. Amélioration du rendement de la production de biogaz par codigestion des déchets organiques (déchets d'abattoir et de volaille). *Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa*. 375 – 380
- Tanios C., 2017. Caractérisation, évaluation de la toxicité du biogaz issu de déchets ménagers et valorisation par reformage catalytique ; Thèse de Doctorat ; Université du Littoral Côte d'Opale, France et l'Université Libanaise, Liban ; 234p.
- Tcha-Thom M., 2019. Recherche d'une filière durable pour la méthanisation des déchets de fruits et d'abattoirs du Togo : Evaluation du potentiel agronomique des digestats sur les sols de la Région de la Kara ; Thèse de Doctorat ; Université de Lomé, Togo en cotutelle avec l'Université de Limoges, France ; 205p.
- Tochi B., Wang Z., Xu S., & Zhang W., 2008. Therapeutic Application of Pineapple Protease(Bromelain): A Review. *Pakistan J Nutrition*, 7(4), 513-520.
- Toléba S.S., Youssao A. K. I., Dahouda M., Missainhoun U. M. A. et Mensah G.A., 2009. Identification et valeurs nutritionnelles des aliments utilisés en élevage d'aulacodes (*Thryonomys swinderianus*) dans les villes de Cotonou et Porto-Novo au Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*. Numéro 64. 10 p.
- Walker A., Bundy R., Hicks S., & Middleton R., 2002. Bromelain reduces mild acute knee pain and improves well-being in a dose dependent fashion in an open study of otherwise healthy adults. *Phytomedicine*, 9(8), 681-686.
- Wei C., Liu S., Liu Y., Lv L., Yang W. and Sun G., 2011. Characteristic Aroma Compounds from Different Pineapple Parts. *Molecules*, 16, 5104-5112. <https://doi.org/10.3390/molecules16065104>
- Wen S., Huang T., Li G., Yamahara J., Roufogalis B., & Li Y., 2006. Bromelain improves decrease in defecation in post-operative rats: Modulation of colonic gene expression of inducible nitric oxide synthase. *Life Sciences*, 78(9), 995-1002
- Widowati T. and Amalia N. S. A., 2021. Utilization of pineapple leaf fiber (*Ananas comosus*) as material for false eyelashes production; *Earth and Environmental Science* 700 012034, DOI: 10.1088/1755-1315/700/1/012034

Zawawi D., Mohd Z.M.H., Angzzas S.M.K. an Ashuvila M.A., 2014. Analysis of Chemical Compositions and Fiber Morphology of Pineapple (*Ananas comosus*) Leaves in Malaysia, *Journal of Applied Sciences* 14 (12): 1355-1358, DOI: 10.3923/jas.2014.1355.1358

Zhang J.S., Liu J., Ming R. 2014. Genomic analyses of the CAM_plant pineapple. *J. Exp. Bot.* 65, 3395–3404. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru101>

Zhang, L., Zhou, C., Yuan, Y., Gong, X., Hu, Y. and Li, J., 2020. Characterisation of Volatile Oil Compounds of Pineapple Peel Wine. International Conference on Environment, Energy and Biotechnology (ICEEB 2020), 22-24 July 2020, Jeju Island, 4 p.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018504065>