



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعرييرج

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم البيولوجية

Département des Sciences Biologiques



# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Microbiologie

## Intitulé:

**Fermentation anaérobie pour la production des acides  
gras volatils à partir de déchets organiques**

## Présenté par:

BOUZIDI Imene et BELFERKOUS Nour EL Houda

Soutenu le 10/06/2025, Devant le Jury:

	Nom et Prénom	Grade	Affiliation / institution
<b>Président:</b>	M. /Mme. ZERROUG AMINA	MCA	Université de Bordj Bou Arreridj
<b>Encadrant:</b>	M. /Mme. TAMINE MILOUDA	MCB	Université de Bordj Bou Arreridj
<b>Examineur:</b>	M. /Mme. IRATNI NADJAT	MAA	Université de Bordj Bou Arreridj

Année Universitaire 2024/2025

## ***Remerciements***

*Nous remercions tout d'abord ALLAH, qui nous a donné la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre directrice de mémoire, Madame **Tamine Milouda**, pour nous avoir offert l'opportunité de réaliser ce projet de master et pour son accompagnement constant tout au long de ce travail. Nous lui sommes particulièrement reconnaissants pour ses précieux conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.*

*Nous remercions chaleureusement Madame **Zerroug Amina** d'avoir accepté de présider notre jury, ainsi que Madame **Iratni Nadjat**, qui a bien voulu examiner notre travail et y apporter son regard critique.*

*Nous tenons également à remercier tous nos enseignants, depuis l'école primaire jusqu'à l'université, pour leur patience, leur dévouement et les savoirs qu'ils nous ont transmis.*

*Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble de nos collègues de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, en particulier à ceux du département de Microbiologie Appliquée. Un grand merci à Monsieur **Lazazga**, ancien chef du département, pour ses conseils et son soutien.*

*Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos parents, à nos familles et à nos proches pour leur soutien moral, leur confiance et leurs encouragements tout au long de notre parcours.*

## *Dédicace*

*Chaque fois que nous achevons une étape importante de notre vie, nous prenons un moment de pause pour regarder en arrière et nous rappeler toutes ces personnes qui ont partagé avec nous les bons moments de notre existence, mais surtout les plus difficiles.*

*Ces personnes qui nous ont aidés sans qu'on ait eu à le leur demander, soutenus sans réserve, aimés sans condition. Celles pour qui notre bonheur devient le leur, et pour qui nos peines se transforment en larmes.*

*À mes très chers parents, ce travail représente l'aboutissement de leur soutien constant tout au long de notre scolarité. Aucun mot ne saurait égaler leur amour, leurs encouragements et leurs innombrables sacrifices.*

*À mon frère Oussama, mon frère Mouad et ma sœur Inesse,*

*À toute ma famille, proche ou éloignée,*

*À mes chères amies, pour leurs encouragements, leurs conseils et leur précieux soutien moral,*

*À mon binôme Imene Bouzidi,*

*À toutes ces âmes chères, je dédie ce travail en témoignage de reconnaissance et de respect.*

*Houda*

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire :*

*À mes parents, qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager tout au long de mes études. Vos prières et votre bénédiction ont été une source inestimable de force et de réussite.*

*Puisse ALLAH, le Tout-Puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.*

*Merci du fond du cœur, papa et maman. Je vous aime profondément.*

*À mon très cher frère Alaeddine, qui a toujours été présent pour moi, ne cessant jamais de me soutenir et de m'encourager. Les mots ne suffiront jamais à exprimer toute ma gratitude.*

*À mes chères cousines: Ghofrane, Boutheina, Mounia, Maroua, Racha et Nada.*

*À tous les membres de ma famille, sans aucune exception.*

*À mon binôme et partenaire dans l'accomplissement de ce travail, Nour El Houda Belferkous.*

*À tous mes amis, et plus particulièrement Amina et Ilham, pour leur soutien et leur amitié sincère.*

*Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail :*

*Un grand merci à vous tous.*

*Imene*

## المخلص

تجذب عملية الإنتاج الحيوي للأحماض الدهنية الطيارة من النفايات العضوية اهتمامًا متزايدًا، نظرًا لتزايد الطلب عليها، وتعدد تطبيقاتها الصناعية، وتأثيرها البيئي المنخفض. تتيح هذه المقاربة تحويل تدفقات النفايات إلى مركبات كيميائية مفيدة.

يقدم هذا العمل مراجعة لطرق الإنتاج البيولوجية الرئيسية لهذه الأحماض، مع التركيز على التخمر، وهي تقنية فعالة تستخدم مزارع ميكروبية مختلطة لتحويل ركائز عضوية متنوعة إلى أحماض الأستيك والبروبيونيك والبيوتيريك. تؤثر عدة عوامل مثل درجة حموضة الوسط، درجة الحرارة ونوع الركيزة بشكل مباشر على المردود.

وفي هذا السياق، تم إجراء دراسة مقارنة حول الإنتاج البيولوجي لحمض البروبيونيك. تعتمد الاستراتيجية الأولى على استخدام مستخلص من نبات خرشف القدس الغني بالإينولين داخل نظام غشاء حيوي ثابت لضمان إنتاج مستقر. أما الاستراتيجية الثانية فتستخدم الجليسرين الخام، وهو ناتج صناعي ثانوي، في تخمير مستمر مع خلايا مثبتة، مما يحقق إنتاجية عالية.

رغم اختلاف العمليتين، تُعدّ هاتان الطريقتان مكملتين لبعضهما البعض: الأولى تضمن مردودًا عاليًا باستخدام ركيزة نباتية، والثانية تحقق إنتاجًا سريعًا من نفايات صناعية. وتبرزان معًا مرونة وجدوى العمليات الحيوية لإنتاج مستدام يتماشى مع متطلبات الصناعة المختلفة. وعليه، فإنّ تميم النفايات العضوية لإنتاج الأحماض الدهنية الطيارة يمثل حلاً مبتكرًا يجمع بين تقليل النفايات، والحفاظ على البيئة، وضمان توفير مركبات كيميائية أساسية.

**الكلمات المفتاحية:** أحماض الدهنية المتطيارة، النفايات العضوية، التخمر، حمض البروبيونيك، *Propionibacterium*، العمليات الحيوية، تميم النفايات.

## Résumé

La production biosourcée d'acides gras volatils (AGV) à partir de déchets organiques attire de plus en plus d'intérêt, en raison de la demande croissante, de leurs nombreuses applications industrielles, et de leur faible impact environnemental. Cette approche permet de transformer des flux de déchets en composés chimiques utiles, tout en s'inscrivant dans une logique d'économie circulaire.

Ce travail propose une étude bibliographique des principales méthodes biologiques de production des AGV, en mettant l'accent sur la digestion anaérobie, une technique efficace utilisant des cultures microbiennes mixtes pour convertir divers substrats organiques en acides acétique, propionique et butyrique. Plusieurs facteurs comme le pH, la température ou le type de substrat influencent directement les rendements obtenus.

Dans ce cadre, une étude comparative a été menée sur la production biologique d'acide propionique. Une première stratégie repose sur l'utilisation d'un extrait de topinambour riche en inuline dans un système à biofilm fixe, assurant une production stable. Une seconde stratégie utilise la glycérine brute, un résidu industriel, en fermentation continue avec cellules immobilisées, obtenant une productivité élevée.

Ces deux approches, bien que différentes, sont complémentaires : l'une favorise un rendement élevé grâce à un substrat végétal, l'autre une production rapide à partir d'un déchet industriel. Elles démontrent la flexibilité et le potentiel des bioprocédés pour une production durable et adaptée à divers besoins industriels.

Ainsi, la valorisation des déchets organiques pour produire des AGV représente une solution innovante, combinant la réduction des déchets, le respect de l'environnement et la sécurité d'approvisionnement en produits chimiques essentiels.

**Les mots clés:** Acides gras volatils (AGV), Déchets organiques, Fermentation, Acide propionique, *Propionibacterium*, Bioprocédés, Valorisation des déchets

## **Abstract**

The bio-based production of volatile fatty acids (VFAs) from organic waste is gaining increasing attention due to growing demand, wide industrial applications, and low environmental impact. This approach transforms waste streams into valuable chemical compounds while promoting a circular economy model.

This work provides a bibliographic study of the main biological methods used for VFA production, with a focus on anaerobic digestion an efficient technique using mixed microbial cultures to convert various organic substrates into acetic, propionic, and butyric acids. Key factors such as pH, temperature, and substrate type directly influence the yield.

In this context, a comparative study was conducted on the biological production of propionic acid. The first strategy uses a Jerusalem artichoke extract rich in inulin in a fixed biofilm system, ensuring stable production. The second strategy employs crude glycerol, an industrial by-product, in continuous fermentation with immobilized cells, achieving high productivity.

Although different, these two approaches are complementary: one promotes high yield from a plant-based substrate, while the other enables fast production using an industrial waste. They demonstrate the flexibility and potential of bioprocesses for sustainable production adapted to various industrial needs.

Thus, valorizing organic waste to produce VFAs represents an innovative solution, combining waste reduction, environmental preservation, and secure supply of essential chemical compounds.

**Keywords:** Volatile Fatty Acids (VFA), Organic Waste, Fermentation, Propionic Acid, *Propionibacterium*, Bioprocesses, Waste Valorization.

## Table des matières

المخلص .....	
Résumé .....	
Abstract .....	
Listes des tableaux .....	
Listes des figures .....	
Liste des abréviations .....	
Introduction .....	1

### *Chapitre I:*

#### *Les acides gras volatils*

Chapitre I: Les acides gras volatils .....	3
I.1. Généralités .....	3
I.2. Les différents acides gras volatils .....	3
I.2.1. L'acide acétique .....	4
I.2.2. L'acide propionique .....	4
I.2.3. L'acide butyrique .....	5
I.3. Les sources des acides gras volatils .....	7
I.3.1. La synthèse chimique .....	7
I.3.2. Production naturelle .....	7
I.3.3. La fermentation anaérobie .....	8
I.3.3.1. L'hydrolyse .....	8
I.3.3.2. L'acidogènes .....	8
I.3.3.3. L'acétogénèse .....	9
I.3.3.4. La méthanogénèse .....	9
I.3.4. Bioproduction d'AGV à partir de déchets organiques .....	10
I.3.4.1. Contrôle de la méthanogénèse pour la production d'AGV .....	10
I.3.4.2. Les facteurs influençant la production des AGV .....	11

I.3.4.2.1. La température .....	11
I.3.4.2.2. Le pH .....	11
I.3.4.2.3. Le temps de rétention hydraulique.....	12
I.3.4.2.4. La charge organique.....	13
I.3.4.2.5. Substrat .....	13
I.4. Les voies d'application des AGV .....	14
I.4.1. Polyhydroxyalcanoates (PHA).....	14
I.4.2. Biocarburant.....	15
I.4.3. Production d'hydrogène.....	15
I.4.4. Production d'électricité.....	16
I.4.5. Production de lipides pour le biodiesel.....	16
I.4.6. Production de méthane.....	17
I.4.7. Traitement des eaux usées .....	17
I.4.8. Autres applications.....	18

## ***Chapitre II:***

### ***Les déchets organiques***

Chapitre II: Les déchets organiques .....	21
II.1. Définition des déchets.....	21
II.2. Les différents déchets utilisés pour la production des AGV .....	21
II.2.1. Les déchets alimentaires .....	21
II.2.2. Les déchets ménagers .....	23
II.2.3. Les eaux usées .....	23
II.2.4. Les déchets agricoles .....	25
II.2.5. Les déchets agro-industriels .....	25
II.3. Le prétraitement des déchets .....	26
II.3.1. Prétraitement physique .....	27
II.3.2. Prétraitements chimiques.....	27
II.3.3. Prétraitement biologique.....	28

II.4. Valorisation des déchets organique .....	29
--	----

**Chapitre III:**

***Etude comparative de la production d'acide propionique à partir de déchets organiques par  
Propionibacterium sp***

III.1. Introduction .....	31
III.2. Méthodes de travail .....	31
III.2.1. Préparation de la pré-culture .....	31
III.2.2. Procédé de fermentation.....	32
III.2.3. Méthodes analytiques.....	33
III.3. Analyse des résultats .....	35
III.5. Conclusion.....	38
Conclusion.....	40
Références bibliographiques .....	41

## Liste des tableaux

Tableau I: Propriétés générales des AGV. ....	6
Tableau II: Concentrations d'AGV et rendements de production.....	22
Tableau III: Caractérisation des déchets ménagers et assimilés (DMA) .....	23
Tableau IV: Comparaison de diverses sources de carbone pour la fermentation de l'acide propionique.....	37

## Liste des figures

Figure 1: Les étapes du processus de dégestion anaérobie (DAn).....	9
Figure 2: Production de fermentation riche en acide propionique (FRAP) à partir de déchets organiques. ....	18
Figure 3: Les AGV produits à partir d'eaux usées riches en matières organiques par dégestion anaérobie (DAn).....	24
Figure 4: Schéma des expériences de fermentation. Tous les échantillons de biomasse lignocellulosique (BLC) ont été explosés à la vapeur à 195°C, sauf pour la paille de canne à sucre. ....	26
Figure 5: Construction du système FBB utilisé pour la fermentation afin de produire de l'acide . .....	34
Figure 6: Conception du bioréacteur pour la production d'acide propionique à partir de glycérol, en modes batch, recycle-batch et continu, comprenant deux unités principales.....	35

## Liste des abréviations

**AGLC:** Acides gras à longue chaîne

**AGV:** Acides gras volatiles

**ATCC:** American Type Culture Collection

**BA:** Boues activées

**BAE:** Boues activées en excès

**BE:** Boues d'épuration

**BLC:** Biomasse lignocellulosique

**ChO:** Charge organique

**CO:** Monoxyde de carbone

**DA:** Déchets alimentaires

**DAn:** Digestion anaérobie

**DBO:** Demande biologique en oxygène

**DCO:** Demande chimique en oxygène

**DCOs:** Demande chimique en oxygène soluble

**DMA:** Déchets ménagers et assimilés

**DO:** Densité optique

**DMS:** Déchets ménagers solides

**DSM:** Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen

**EBN:** Élimination biologique des nutriments

**FAO:** Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

**FBB:** Bioréacteur à lit fibreux

**FDA:** Administration américaine des aliments et des médicaments

**FODSM:** Fraction organique des déchets solides municipaux

**FRAP:** Fermentation riche en acide propionique

**HAc:** Acide acétique

**HPLC:** Chromatographie liquide à haute performance

**HPr:** Acide propionique

**HT:** Hydrolysats de topinambour

**L-phe:** L-phénylalanine

**NCD:** Noix de coco desséchée

**PCM:** Piles à combustible microbiennes

**PE:** Phényléthanol

**PEI:** Polyéthylénimine

**PHA:** Polyhydroxyalcanoates

**PhaC:** PHA synthase

**PID:** Proportionnel–Intégral–Dérivé (régulateur de processus)

**PM:** Paille de maïs

**PNS:** Pourpres non Sulfurées

**POR:** Potentiel d'oxydoréduction

**RS:** Résidus solides

**SSV:** Solides en suspension volatils

**ST:** Solides totaux

**SV:** Solides volatils

**TAC:** Cycle de l'acide tricarboxylique

**TAG:** Triacylglycérols

**TRH:** Temps de rétention hydraulique

# **Introduction**

## **Introduction**

Les acides gras volatils (AGV) sont des acides gras à chaîne courte (formique, acétique, propionique, etc.), pouvant être produits de manière synthétiquement à partir de ressources fossiles ou générés biologiquement en tant qu'intermédiaires métaboliques lors de l'étape d'acidification (fermentation) de la digestion anaérobie (DAn). A l'instar de nombreux produits chimiques de base, leur production industrielle repose majoritairement sur la synthèse chimique à partir de dérivés pétrochimiques (**Alkaya et al., 2009**).

Les AGV présentent une grande diversité d'applications: ils servent à la fabrication de composés organiques tels que les alcools, aldéhydes, cétones, esters et oléfines, et interviennent dans des domaines variés comme la production de bioplastiques, la bioénergie, ou encore l'élimination biologique des nutriments dans les eaux usées (**Jiang et al., 2009**).

Traditionnellement, des sources de carbone pures comme le glucose ou le saccharose sont utilisées pour leur production. Cependant, cette pratique soulève des questions éthiques liées à la concurrence entre usage alimentaire et industriel (**Hasan et al., 2015**), en plus d'engendrer des coûts élevés qui limitent la compétitivité du procédé. Pour pallier ces limites, l'utilisation de substrats alternatifs issus de déchets organiques tels que la biomasse lignocellulosique (BLC), les boues activées (BA), les résidus alimentaires, ou encore certaines eaux usées industrielles est de plus en plus explorée comme solution économique et durable (**Vázquez-Fernández et al., 2022**).

La production biologique d'AGV peut être réalisée dans des conditions douces par DAn, un processus microbiologique complexe impliquant quatre étapes principales: l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. Les AGV sont principalement générés durant la phase acidogène et constituent des précurseurs pour la méthanogénèse. Ainsi, l'inhibition ciblée de cette dernière étape permettrait de maximiser l'accumulation des AGV, transformant la DAn en un procédé de valorisation des déchets organiques à fort potentiel (**Magdalena et al., 2018**).

L'objectif de cette synthèse bibliographique est d'examiner l'état actuel des connaissances sur la production d'AGV à partir de déchets organiques, en mettant l'accent sur les mécanismes microbiens impliqués, les paramètres influençant la fermentation, et les perspectives de valorisation dans une optique d'économie circulaire.

# **Chapitre I:**

## **Les acides gras volatils**

## **Chapitre I: Les acides gras volatils**

### **I.1. Généralités**

Les AGV sont des acides organiques à chaîne courte ( $C \leq 6$ ), présents dans divers milieux biologiques, notamment le fluide gingival, et regroupent des composés comme l'acide acétique, propionique ou butyrique. Leur valeur économique varie selon leur structure (**Hasan et al., 2015; Magdalena et al., 2018**).

Ils sont utilisés dans les industries alimentaires, pharmaceutiques, cosmétiques et chimiques, les AGV présentent également un fort potentiel pour la production de bioproduits comme les polyhydroxyalcanoates (PHA), les biocarburants, l'hydrogène ( $H_2$ ), ou l'électricité via des piles à combustible microbiennes (PCM) (**Feng et al., 2022; Vázquez-Fernández et al., 2022**).

Aujourd'hui, leur production repose majoritairement sur la pétrochimie, qui consomme environ 4% du pétrole mondial (**Magdalena et al., 2018**). Les tensions sur les ressources fossiles et les enjeux économiques renforcent l'attractivité des alternatives biologiques (**Hasan et al., 2015**).

La DAN acidogène constitue une solution prometteuse pour valoriser les déchets organiques en AGV (**Singhania et al., 2013**). Ce procédé, reposant sur l'action de bactéries acétogènes (**Sapmaz et al., 2022**), inclut quatre étapes: solubilisation, hydrolyse, acidogénèse et méthanogénèse, les AGV étant produits principalement durant la phase acidogène (**Yuan et al., 2019**).

Cependant, la séparation et la purification des AGV restent coûteuses (**Alkaya et al., 2009**). L'utilisation de substrats alternatifs, comme les boues d'épuration (BE), les déchets alimentaires (DA) ou les eaux usées industrielles, apparaît comme une voie durable et éthique pour réduire ces coûts et limiter l'usage de ressources alimentaires (**Hasan et al., 2015**).

### **I.2. Les différents acides gras volatils**

Les AGV peuvent être produits de manière synthétique et biologique à partir des dérivés pétrochimiques et de processus de fermentation respectivement. La demande du marché dans le cas des AGV dépend de 90% de la technique de production. Divers AGV, tels que l'acide formique, acétique, propionique, butyrique, valérique ou caproïque, présentent des caractéristiques variées. Chacun d'eux offre un large éventail d'applications intéressantes dans les bioraffineries, la production de produits chimiques plateformes, ainsi que dans les industries pharmaceutiques et alimentaires (**Tableau I**) (**Kumar et al., 2019**).

### **I.2.1. L'acide acétique**

L'acide acétique (C2), est un acide organique d'importance mondiale, dont la demande est augmentée actuellement (**Liu et al., 2021; Merli et al., 2021**). Naturellement présent chez les plantes, les animaux et dans divers effluents et émissions industrielles, il est aujourd'hui principalement produit à partir de ressources fossiles via l'oxydation de l'acétaldéhyde, des hydrocarbures ou par carbonylation du méthanol (**Merli et al., 2021**), cependant, ces procédés sont limités par une faible productivité due à l'inhibition bactérienne (**Kumar et al., 2019**).

Des voies biologiques alternatives existent (**Merli et al., 2021**), notamment via les genres *Acetobacter*, *Gluconacetobacter* et *Gluconobacter*, particulièrement efficaces en conditions de pH alcalin, qui favorisent l'accumulation d'acide acétique (**Dahiya et al., 2015**). Ce composé est aussi produit lors de l'acétogénèse, avec libération d'H<sub>2</sub> et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) (**Kalloum et al., 2007; Zhang et al., 2020**). Sa prédominance varie selon la température: il est dominant à 35°C alors que le butyrate est à 55°C (**Atasoy et al., 2018**).

L'acide acétique possède de nombreuses applications industrielles: il est utilisé comme solvant, conservateur alimentaire (**Pal et Nayak, 2017**), dans la production de polyuréthanes, papiers spéciaux, détergents pour la microélectronique, ainsi que dans la fabrication de polymères (**Fukaya et al., 1992**), de fibres synthétiques, de pesticides, et de textiles (**Pal et Nayak, 2017**). Il est également un précurseur clé du monomère d'acétate de vinyle (**Nayak et al., 2013**) utilisé dans les résines, les émulsions polymères, et les revêtements (**Pal et Nayak, 2017**). Dans l'agroalimentaire, il sert comme arôme, conservateur, et régulateur d'acidité. En raison de l'épuisement progressif des ressources fossiles, la production biosourcée d'acide acétique par fermentation oxydative ou anaérobie représente une alternative durable. Néanmoins, des efforts sont encore nécessaires pour améliorer la productivité de ces procédés, notamment par l'optimisation des souches bactériennes et des conditions de culture (**Kumar et al., 2019**).

### **I.2.2. L'acide propionique**

L'acide propionique (C3), est un composé chimique largement utilisé comme matière première dans divers secteurs, notamment les industries chimique, pharmaceutique, agricole et alimentaire (**Feng et al., 2010; Kumar et al., 2019**). Il intervient également dans la fabrication de la vitamine E, comme arôme artificiel de fruits, dans les solvants verts, les émulsions, les formulations de revêtements, les fibres de cellulose synthétique, les herbicides, ainsi que dans les sels inorganiques de calcium et de sodium. Actuellement, la production industrielle repose principalement sur des matières premières pétrochimiques, soit par oxydation ou carboxylation de l'éthylène en présence de monoxyde de carbone (CO) et d'eau (H<sub>2</sub>O), soit par oxydation directe des hydrocarbures (**Kumar et al., 2019**). Il peut aussi être un sous-produit lors de la

fabrication d'acide acétique. Cependant, en raison de la hausse du prix du pétrole (Ammar et al., 2014), et des préoccupations environnementales, un intérêt croissant s'est développé pour les procédés biologiques à base de ressources renouvelables, notamment par fermentation utilisant les Propionibacteria (Wang et al., 2014).

Cette voie biologique présente des avantages notables: elle pourrait devenir économiquement compétitive, tout en réduisant les déchets industriels polluants. Les dérivés de l'acide propionique, notamment ses sels de calcium, sodium et potassium, sont utilisés comme conservateurs alimentaires et sont généralement reconnus comme sûrs (Coral et al., 2008). L'acide propionique joue aussi un rôle important comme précurseur de produits pharmaceutiques, et comme additif antifongique dans l'alimentation animale (Baumann et Westermann, 2016).

### **I.2.3. L'acide butyrique**

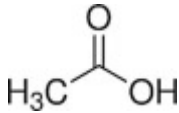
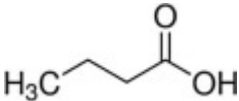
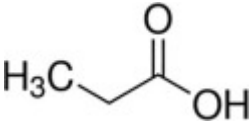
L'acide butyrique (C4) est un acide carboxylique saturé, largement utilisé dans les industries agroalimentaire, cosmétique et pharmaceutique (Jang et al., 2014; Baroi et al., 2015). Il est principalement produit par voie chimique à partir du pétrole, via l'oxydation du butyraldéhyde obtenu par oxosynthèse du propylène (Jang et al., 2013; Jawed et al., 2016). Bien que cette méthode soit peu coûteuse et repose sur des matières premières abondantes, elle n'est pas d'origine naturelle, ce qui limite son usage dans les secteurs sensibles comme l'alimentation ou les boissons. Une alternative naturelle, bien que coûteuse et énergivore, consiste à l'extraire du beurre, où il est présent à 2–4% (Kumar et al., 2019).

En réponse à la demande croissante en produits biosourcés, la production microbienne d'acide butyrique a suscité un fort intérêt (Jang et al., 2014). De nombreux substrats fermentescibles ont été testés pour cette bio-production: glucose, xylose, saccharose, lactosérum, hydrolysats de fibre ou de farine de maïs et de blé (Jiang et al., 2009). *Clostridium tyrobutyricum* ATCC 25755T est considéré comme le micro-organisme le plus prometteur pour cette application (Dwidar et al., 2013).

D'autres bactéries anaérobies strictes comme *Clostridium butyricum*, *C. pasteurianum*, *C. kluyveri*, *C. acetobutylicum*, *Eubacterium limosum*, *Megasphaera sp.*, *Fusobacterium nucleatum*, *Sarcina sp.* ou encore *Butyrivibrio fibrisolvens* sont aussi utilisées dans des procédés de fermentation sombre. L'acide butyrique d'origine biologique est valorisé comme source potentielle de biodiesel et d'énergie animale, notamment pour les porcs et les volailles, grâce à ses effets anticancéreux, antipathogènes et de stimulation cellulaire (Kumar et al., 2019). Il est également approuvé par l'administration américaine des aliments et des médicaments (FDA) comme agent aromatisant dans l'industrie alimentaire, tandis que ses esters sont employés

comme agents parfumés et exhausteurs de goût dans les aliments, les boissons et les cosmétiques (Saini et al., 2014).

**Tableau I. Propriétés générales des AGV (Atasoy et al., 2018).**

AGV	Formule chimique	Taille du marché (kton/an)	Prix du marché (€/tonne)	Utilisation/application	Méthodes de production
Acide acétique		14 000–17 000	400–800	De vinyle monomère (polymères, adhésifs, colorants), additif alimentaire, solvant, vinaigre, production d'esters, produits chimiques	Synthèse chimique (carboxylation du méthanol) et fermentation microbienne (oxydative et anaérobie)
Acide butyrique		90–105	1500–1650	Additif alimentaire pour animaux et humains, intermédiaire chimique, solvant, agent aromatisant	Synthèse chimique (oxydation du butyraldéhyde), extraction du beurre, fermentation microbienne
Acide propionique		350–470	2000–2500	Esters utilisés dans l'industrie alimentaire comme additif aromatique, additif alimentaire, arôme, produits pharmaceutiques, complément alimentaire pour animaux, additif pour appâts de pêche	Synthèse chimique (hydroformylation de l'éthylène, carboxylation de l'éthylène, oxydation directe des hydrocarbures), sous-produit de la fabrication de l'acide acétique, fermentation microbienne

### **I.3. Les sources des acides gras volatils**

#### **I.3.1. La synthèse chimique**

Les AGV individuels sont généralement produits par des procédés thermochimiques conventionnels ainsi que par des procédés de bioconversion en culture pure (monospécifique). La production synthétique des AGV est majoritairement réalisée à partir de dérivés pétrochimiques, couvrant près de 90% de la demande mondiale. Chimiquement, l'acide propionique est synthétisé à partir de ressources pétrolières, avec une production annuelle estimée à 995 millions de dollars. Cette synthèse repose sur l'hydroxycarboxylation de l'éthylène, catalysée par du rhodium ou du carbonyle de nickel. En parallèle, une alternative écologique consiste en sa biosynthèse via des bactéries du genre *Propionibacterium*. Quant à l'acide butyrique, sa production industrielle repose sur une synthèse chimique impliquant l'oxydation du butyraldéhyde, obtenu à partir de propylène (issu du pétrole brut) par un procédé appelé oxo-synthèse. Cette méthode reste privilégiée en raison de son faible coût de production et de la grande disponibilité du propylène (Agnihotri et al., 2022).

#### **I.3.2. Production naturelle**

Les AGV, ou acides gras à chaîne courte, sont produits dans le tractus gastro-intestinal par la fermentation microbienne des glucides et de substrats endogènes comme le mucus. Cela représente un avantage pour l'animal, car il ne possède pas d'enzymes digestives capables de dégrader la cellulose ou d'autres glucides complexes. Les AGV sont produits en grande quantité chez les herbivores, notamment dans le pré-estomac des ruminants. Toutefois, ils sont aussi générés dans l'intestin inférieur chez l'humain et chez toutes les espèces animales, via une fermentation similaire à celle du rumen. Les principaux AGV sont l'acétate, le propionate et le butyrate (Bergman et al., 1990).

Les AGV peuvent également provenir de la viande fraîche, à la suite de l'hydrolyse des triglycérides et phospholipides. D'autres voies, comme la dégradation des acides aminés ou l'oxydation de cétones, esters et aldéhydes, peuvent aussi conduire à leur formation (Pellissery et al., 2020).

Dans les caeca, les concentrations en AGV principalement acétate, propionate et butyrate sont élevées. Elles peuvent atteindre 125 mM chez le poulet et 70 mM chez l'oie. Ces niveaux sont plus élevés dans le sang portal des oiseaux élevés de manière conventionnelle que chez ceux exempts de germes, indiquant une absorption active des AGV produits par la flore intestinale (Denbow, 2015).

Chez les bovins, l'absorption ruminale des AGV représente le flux de nutriments le plus important (Storm et al., 2012).

L'acide butyrique est produit par divers genres bactériens anaérobies tels que *Butyribacterium*, *Butyrivibrio*, et *Clostridium* (notamment *C. tyrobutyricum* et *C. butyricum*) (Harirchi et al., 2022).

L'acide acétique, quant à lui, peut être produit par plusieurs souches microbiennes, dont *Acetobacter*, *Thermoanaerobacter*, *Acetomicrobium*, *Acetothermus* et *Clostridium*. Les bactéries du genre *Acetobacter* sont capables d'utiliser divers sucres industriels (glucose, ribose, mannose, mélibiose, tréhalose, arabinose, galactose, xylose) pour produire de l'acide acétique à l'échelle industrielle (Agnihotri et al., 2022).

### **I.3.3. La fermentation anaérobie**

La production d'AGV représente les premières phases du processus de DAN, qui décompose la matière organique en biogaz, un mélange de méthane (CH<sub>4</sub>) et de CO<sub>2</sub> (Figure 1). Elle comprend successivement l'hydrolyse et l'acidogènes (ou fermentation acidogène). Durant l'hydrolyse, des enzymes produites par les microorganismes hydrolytiques du consortium bactérien décomposent la matière organique complexe dérivée des déchets en monomères simples. Les produits d'hydrolyse sont ensuite transformés en AGV (acétate, propionate, butyrate et valérate), alcools, H<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> (Castiello et al., 2022).

#### **I.3.3.1. L'hydrolyse**

Lors de l'hydrolyse, première étape de la DAN, les polymères organiques complexes (glucides, protéines et lipides) sont décomposés en monomères solubles tels que les sucres simples, les acides aminés et les acides gras, sous l'action d'enzymes extracellulaires produites par des micro-organismes hydrolytiques (Singhania et al., 2013; Eryildiz et Taherzadeh, 2020). Des bactéries telles que *Bacteroides*, *Clostridia*, *Micrococcus*, *Selenomonas* et *Streptococcus* participent activement à cette dégradation enzymatique (Khan et al., 2016).

#### **I.3.3.2. L'acidogènes**

La phase d'acidogénèse constitue une étape cruciale du processus de DAN (Singhania et al., 2013). Au cours de cette phase, les produits issus de l'hydrolyse principalement les sucres, acides aminés et acides gras sont transformés par les bactéries acidogènes en AGV, ainsi qu'en composés secondaires tels que H<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> (Eryildiz et Taherzadeh, 2020). La concentration en H<sub>2</sub> produite à ce stade joue un rôle déterminant, car elle influence le type de métabolites finaux générés au cours de la fermentation. Il est à noter que les AGV formés lors de l'acidogénèse ne peuvent pas être directement utilisés par les archées méthanogènes pour la production de CH<sub>4</sub> (Khan et al., 2016).

### I.3.3.3. L'acétogénèse

Lors de la phase d'acétogénèse, les bactéries acétogènes convertissent AGV en acétate, CO<sub>2</sub> et/ou H<sub>2</sub> (Singhania et al., 2013; Eryildiz et Taherzadeh, 2020). Cette troisième étape du processus implique spécifiquement la transformation des AGV tels que l'acide acétique, l'acide propionique et l'acide butyrique ainsi que des alcools, en acétate, H<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>. Il est important de noter que les acides butyrique et acétique sont considérés comme les principaux précurseurs de la production de CH<sub>4</sub>. En effet, entre 65% et 95% du CH<sub>4</sub> est directement issu de l'acide acétique, tandis que l'acide propionique reste en grande partie non converti, sa dégradation étant thermodynamiquement moins favorable que celle du butyrate (Khan et al., 2016).

### I.3.3.4. La méthanogénèse

L'acétate, le formaldéhyde, H<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> sont convertis en CH<sub>4</sub> et en H<sub>2</sub>O (Singhania et al., 2013). Dans la phase finale du processus, les micro-organismes méthanogènes transforment les produits issus de l'acidogénèse et de l'acétogénèse en CH<sub>4</sub> et en CO<sub>2</sub>. Cette étape, appelée méthanogénèse, repose principalement sur l'action de deux types de méthanogènes: les acétotrophes et les hydrogéntrophes. Les méthanogènes acétotrophes convertissent l'acétate formé lors de l'acétogénèse en CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>, tandis que les méthanogènes hydrogéntrophes utilisent H<sub>2</sub> pour réduire le CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub> (Khan et al., 2016).

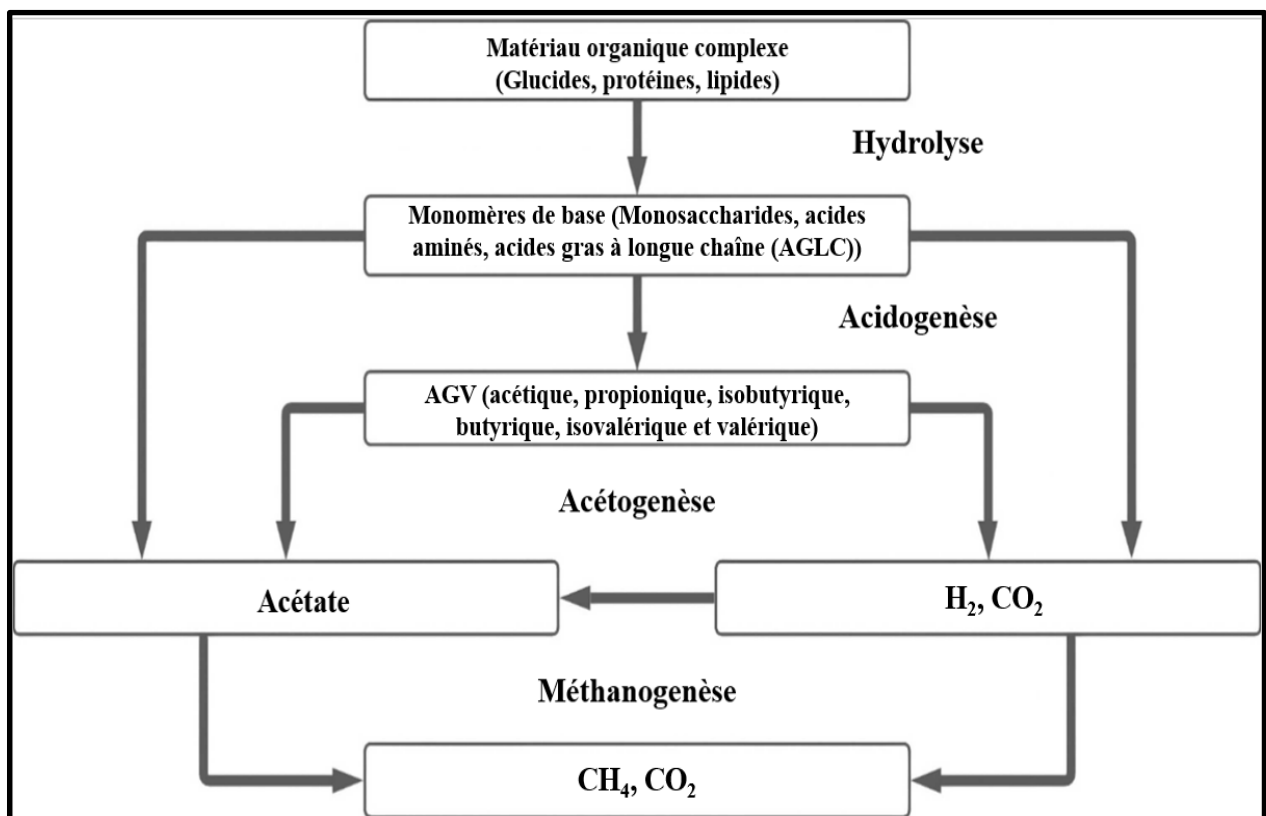


Figure 1. Les étapes du processus de digestion anaérobie (DA) (Vázquez-Fernández et al., 2022).

### **I.3.4. Bioproduction d'AGV à partir de déchets organiques**

La DAn est un procédé biologique utilisé pour le traitement des déchets organiques, reposant sur la dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène par l'action de consortiums microbiens. L'efficacité de ce processus notamment la production de biogaz, la réduction de la charge organique (ChO), la stabilité du système et la prévention des inhibitions dépend fortement des caractéristiques du substrat utilisé. Le processus anaérobie comprend quatre étapes principales: l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse (**Kurita-Ochiai et al., 1995**). Ces étapes sont généralement regroupées en deux phases. La première phase, incluant l'hydrolyse, l'acidogénèse et l'acétogénèse, permet la formation de métabolites intermédiaires tels que les AGV, considérés comme des produits chimiques à haute valeur ajoutée. La seconde phase, appelée méthanogénèse, conduit à la transformation de ces AGV en CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> par des archées méthanogènes, assurant ainsi la stabilisation finale des déchets. Le bon déroulement de la méthanisation est fortement influencé par divers paramètres physico-chimiques, notamment le pH, la demande chimique en oxygène (DCO), la concentration en AGV, le taux d'ammoniac, l'alcalinité totale, ainsi que la présence d'oligo-éléments essentiels (**Croce et al., 2016; Khan et al., 2016**).

#### **I.3.4.1. Contrôle de la méthanogénèse pour la production d'AGV**

Dans des conditions naturelles, la fermentation anaérobie conduit principalement à la formation de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> par les archées méthanogènes. Cependant, afin de favoriser l'accumulation des AGV, composés à haute valeur ajoutée issus des étapes d'acidogénèse et d'acétogénèse, il est essentiel d'inhiber la méthanogénèse, qui consomme ces intermédiaires. Plusieurs stratégies ont été développées à cet effet. L'ajout de composés spécifiques comme le 2-bromoéthanesulfonate constitue une méthode chimique efficace pour bloquer l'activité des méthanogènes. D'autres approches consistent à promouvoir des conditions ferriréductrices, à ajuster le pH du milieu, ou encore à réguler la pression partielle en H<sub>2</sub>, ce dernier étant un élément clé dans le métabolisme des archées. Une méthode innovante, la fermentation électro-stimulée, repose sur l'application d'un faible courant électrique pour stimuler la production de H<sub>2</sub> par certaines bactéries et ainsi entraver la méthanogénèse. Par ailleurs, la disponibilité en nutriments inorganiques et le contrôle précis de la température peuvent également influencer cette inhibition, permettant d'optimiser la production d'AGV lors du processus anaérobie (**Singhania et al., 2013**).

### **I. 3.4.2. Les facteurs influençant la production des AGV**

#### **I.3.4.2.1. La température**

La température constitue un facteur clé parmi les paramètres influençant la production d'AGV, car elle affecte directement la croissance des micro-organismes, l'activité enzymatique et le taux d'hydrolyse (**Annamalai et al., 2020**). La production d'AGV à partir de déchets organiques a été étudiée sous différentes plages de température. Dans des conditions psychrophiles (4–20°C) et mésophiles (20–50°C), il a été observé que l'augmentation de la température améliore la concentration des produits, le taux de production des AGV et leur rendement global (**Maharaj et Elefsiniotis, 2001**).

Par ailleurs, **Hao et Wang, (2015)** ont rapporté qu'une fermentation menée en conditions thermophiles (au-dessus de 50°C) pouvait produire jusqu'à dix fois plus d'AGV comparée à une fermentation mésophile sans ajustement de pH. De même, **Zhang et al. (2009)** ont noté que les conditions thermophiles favorisent un taux d'hydrolyse plus élevé, ce qui améliore la production d'AGV. En conséquence, une température de fonctionnement plus élevée, typique des plages thermo- et hyperthermophiles (40–80°C), favorise l'hydrolyse et fournit davantage de substrats solubles disponibles pour le métabolisme fermentatif. Cependant, cette amélioration n'est effective que si la température reste dans les limites de tolérance des bactéries acidogènes, car beaucoup d'entre elles ne survivent pas à des températures extrêmes (**Strazzera et al., 2018**).

#### **I.3.4.2.2. Le pH**

Le pH est l'un des paramètres les plus critiques influençant la concentration et la composition des AGV (**Atasoy et al., 2018**). Il agit directement sur l'activité des micro-organismes impliqués dans le processus de fermentation. Lors de la fermentation acidogène des déchets organiques, le pH influence non seulement l'hydrolyse, mais aussi le déroulement de la phase acidogène (**Zhou et al., 2018**). Il est donc essentiel de réguler le pH dans le réacteur, car la majorité des bactéries acidogènes ne peuvent survivre dans des environnements extrêmement acides (pH ≈ 3) ou très alcalins (pH ≈ 12) (**Liu et al., 2012**).

**Kalloum et al. (2007)** ont montré qu'un pH inférieur à 4 entraîne une inhibition marquée de la méthanogenèse, tandis qu'un ajustement du pH autour de 7 favorise le développement des bactéries méthanogènes, responsables de la formation de CH<sub>4</sub>. Dans leur étude, la quantité de biogaz produite dans le système à pH contrôlé était deux fois plus élevée que celle obtenue sans régulation du pH (**Zhang et al., 2020**).

Par ailleurs, **Zhang et al. (2005)** ont évalué la performance de la fermentation dans un réacteur en continu en ajustant le pH à différentes valeurs (5, 7, 9, 11). Ils ont constaté qu'un pH

proche de la neutralité (pH 7) optimise le métabolisme fermentatif et permet d'atteindre un rendement en AGV de 0,27 g AGV/g solides totaux (ST), contre 0,15 g AGV/g ST dans un réacteur sans contrôle du pH. Ainsi, **Kalloum et al. (2007)** et **Zhang et al. (2005)** aboutissent à la même conclusion concernant l'importance d'un pH contrôlé autour de 7 pour optimiser la production d'AGV.

De plus, **Jiang et al. (2013)** ont étudié l'effet du pH dans une plage légèrement acide (5–7) sur la production d'AGV à partir de déchets de cuisine synthétiques. Ils ont observé qu'un pH compris entre 6 et 7 augmentait d'environ 20% le taux d'hydrolyse, atteignant une concentration en DCO soluble (DCOs) de 82 g/L, contre 60 g/L à pH non contrôlé. Cette amélioration de la solubilisation a permis de doubler la production d'AGV dans le réacteur.

Cependant, le pH optimal pour la production d'un AGV spécifique dépend également du type de substrat. Par exemple, **Lee et al. (2014)** ont montré que la production d'acide propionique à partir d'eaux usées laitières est favorisée à un pH de 4,0–4,5, tandis que celle des acides acétique et butyrique est optimale à un pH de 6,0–6,5. Plusieurs études soulignent ainsi que le pH idéal varie selon la nature des substrats utilisés et les voies métaboliques des micro-organismes impliqués.

#### **I.3.4.2.3. Le temps de rétention hydraulique**

Le temps de séjour hydraulique (TRH), ou temps de rétention hydraulique (TRH), correspond à la durée moyenne pendant laquelle la matière (substrat et biomasse) reste dans un réacteur (**Strazzera et al., 2018**). Ce paramètre joue un rôle crucial dans la production d'AGV, influençant à la fois le rendement et la composition des produits finaux. **Jankowska et al. (2015)** ont montré que la concentration maximale d'AGV était atteinte après 15 jours de rétention, lorsqu'ils ont comparé des périodes de 5, 10 et 15 jours. De même, **Bolaji et Dionisi, (2017)** ont évalué l'effet de TRH de 10, 20 et 30 jours sur la fermentation anaérobie de déchets de légumes et de salades. Ils ont observé que l'augmentation du TRH améliorait la réduction des solides volatils (SV) et influençait la composition des AGV: le caproate n'a été détecté qu'à partir de 20 jours, bien que le butyrate et l'acétate soient restés les principaux produits. Ces résultats suggèrent que le TRH ne détermine pas uniquement le rendement global en AGV, mais aussi leur profil de distribution.

De leur côté, **Lim et al. (2008)** ont étudié l'impact du TRH sur l'acidogénèse à partir de DA, dans un fermenteur semi-continu fonctionnant sous conditions mésophiles, avec un pH ajusté à 5,5 et une ChO de 5 g ST/j. Trois temps de rétention ont été testés: 4, 8 et 12 jours. Ils ont constaté une augmentation progressive de la concentration totale en AGV, passant de 5,5 g/L à 13 g/L puis à 22 g/L. Un changement de la distribution des AGV a également été observé:

l'acide acétique (HAc) dominait à TRH court, tandis qu'à TRH de 12 jours, l'acide propionique (HPr) devenait prédominant. Ces études soulignent que le TRH optimal varie selon le type de substrat, en particulier en fonction de son taux d'hydrolyse. Il peut même fluctuer pour un même substrat selon les conditions opératoires. Il est donc essentiel d'adapter ce paramètre en fonction des objectifs de production (quantité ou type spécifique d'AGV) et des caractéristiques du substrat traité.

#### **I.3.4.2.4. La charge organique**

La production d'AGV augmente également avec l'élévation de la ChO, en raison de la plus grande disponibilité en substrat. Par exemple, la production d'AGV à partir de DA a augmenté avec une ChO croissante de 5 à 13 g/(L.j) ; toutefois, à des ChO élevées, le milieu est devenu très visqueux, entraînant une instabilité du fonctionnement du système. Les recherches sur l'influence de ChO sur la composition des AGV ont montré qu'une faible ChO favorisait la production de propionate et de butyrate, tandis que les proportions d'acétate et de valérate augmentaient avec une ChO plus élevée (Zhou et al., 2018).

#### **I.3.4.2.5 . Substrat**

Le substrat utilisé pour la production d'AGV joue un rôle central dans le rendement et la composition des produits obtenus. Sa nature biochimique notamment la teneur en glucides, protéines et lipides ainsi que sa concentration en matières solides influencent directement les voies métaboliques microbiennes impliquées dans la fermentation (Annamalai et al., 2020). Par exemple, une forte teneur en matières solides peut provoquer une accumulation d'ammonium, modifiant la structure de la communauté microbienne et favorisant l'émergence de bactéries syntrophes spécialisées dans l'oxydation de l'acétate, ce qui perturbe la dynamique de production des AGV (Yuan et al., 2019).

Un facteur déterminant est également le degré d'acidification, défini comme le pourcentage de DCO initiale transformée en acides organiques. Des substrats tels que le lactosérum, la mélasse ou la fraction organique des déchets solides municipaux (FODSM) présentent des taux d'acidification élevés, ce qui permet d'atteindre de meilleurs rendements en AGV (Annamalai et al., 2020). La composition biochimique du substrat influe directement sur le profil des AGV formés au cours de la fermentation. Ainsi, les substrats riches en glucides favorisent la production d'acide propionique et d'acide butyrique, tandis que ceux à forte teneur en protéines stimulent la formation d'acides valérique et iso-valérique. Shen et al. (2017) ont confirmé cette tendance en utilisant comme substrats le tofu et le blanc d'œuf, deux matrices protéiques. Ils ont observé que l'acide valérique représentait 18 à 25% du total des AGV produits, se classant juste derrière l'acide acétique en termes d'abondance.

Par ailleurs, la co-digestion de substrats variés peut améliorer significativement les performances de la fermentation. Ce procédé repose sur le mélange de différentes sources de carbone, permettant une meilleure synergie entre les populations microbiennes. **Yin et al. (2016)** ont étudié l'effet de la co-digestion de glucose, peptone et glycérine, et ont obtenu des rendements respectifs en AGV de 38,2 g DCO/L, 32,1 g DCO/L et 31,1 g DCO/L. Ces résultats démontrent que la co-digestion stimule l'acidogénèse, en favorisant une plus grande diversité fonctionnelle au sein de la communauté microbienne.

#### **I.4. Les voies d'application des AGV**

Les AGV ont diverses applications, telles que l'utilisation comme source de carbone dans la dénitrification biologique, la production de biodiesel, la génération d'électricité à travers des PCM, et la synthèse de polymères complexes. Ces dernières années, les AGV et leurs dérivés ont été largement utilisés dans les industries alimentaires, textiles, pharmaceutiques, du cuir et du plastique (**Lukitawesa et al., 2020**).

##### **I.4.1. Polyhydroxyalcanoates (PHA)**

Les PHA sont des bioplastiques biodégradables produits directement par de nombreux micro-organismes en réponse à des conditions de stress, notamment un excès de carbone associé à une limitation d'autres nutriments. Plus de 300 espèces bactériennes sont capables de synthétiser des PHA, parmi lesquelles *Cupriavidus necator*, *Bacillus megaterium*, *Azotobacter vinelandii*, et certaines bactéries photosynthétiques telles que *Rhodospseudomonas palustris* (**Dan et al., 2013**).

La biosynthèse des PHA repose sur l'action de la PHA synthase (PhaC), une enzyme qui catalyse la polymérisation des acides gras hydroxylés (hydroxyacyl-CoA) en liaisons esters, formant des polymères de différents types et poids moléculaires selon la source de carbone et les conditions environnementales. Les AGV, une source efficace de substrats carbonés, sont d'abord activés sous forme d'acyl-CoA par des acyl-CoA synthétases spécifiques, puis transformés en hydroxyacyl-CoA, précurseur direct de la synthèse des PHA. La production de PHA dépend fortement de la souche microbienne, de la nature des AGV présents, et des conditions de culture, notamment la disponibilité des nutriments et le pH du milieu (**Cavaille, 2015**).

**Valentino et al. (2019)** et **Moretto et al. (2020)** ont démontré qu'une co-fermentation de BE et de DA, dans un rapport 28/72 sur la base des SV, permet d'obtenir un effluent enrichi en AGV favorable à la production de PHA.

#### **I.4.2. Biocarburant**

Les AGV dérivés de déchets organiques représentent une matière première économique et prometteuse pour la production de biocarburants. Leur valorisation permet la synthèse de carburants tels que le biobutanol, le biodiesel issu d'huiles microbiennes, H<sub>2</sub> et le biogaz (Agnihotri et al., 2022). En complément, d'autres résidus organiques peuvent être exploités dans des procédés fermentaires. Par exemple, Woldu et al. (2015) ont utilisé de la poudre d'hydrolysat de graines d'avocat comme substrat pour la production de bioéthanol. Grâce à l'action de *Saccharomyces cerevisiae*, une fermentation optimale a été obtenue après trois jours à pH 5,5 et 30°C.

#### **I.4.3. Production d'hydrogène**

H<sub>2</sub> est considéré comme l'un des vecteurs d'énergie renouvelable les plus prometteurs, souvent qualifié de carburant du futur (Strazzera et al., 2018). Le biohydrogène peut être produit par des procédés de fermentation anaérobie, principalement via la fermentation sombre et la photofermentation (Srikanth et al., 2009).

La photofermentation est réalisée par des bactéries pourpres non sulfurées (PNS) telles que les espèces du genre *Rhodobacter*, capables de convertir des AGV en H<sub>2</sub> sous l'effet de la lumière. Ces bactéries peuvent utiliser une grande variété de substrats organiques, incluant des acides organiques, des sucres simples comme le glucose, le fructose et le saccharose, ainsi que divers effluents industriels et agricoles (Singhania et al., 2013).

Selon Bundhoo et al. (2015), la production d'H<sub>2</sub> à partir d'AGV issus de la DAN des BE peut être efficacement réalisée par photofermentation. Toutefois, comme le soulignent Wang et al. (2018), la fermentation sombre des BE génère à la fois d'H<sub>2</sub> et des AGV, mais le rendement en H<sub>2</sub> reste limité, nécessitant une seconde étape de conversion des AGV via la photofermentation (Singhania et al., 2013). Par ailleurs, l'électrohydrolyse constitue une autre voie de valorisation des AGV pour la production d'H<sub>2</sub> (Lee et al., 2013). Ce procédé consiste à appliquer un courant continu de faible intensité (1–3 V) à des effluents riches en AGV, issus par exemple de la fermentation sombre de poudre de blé. À un pH acide, une tension de 3 V et une concentration d'AGV de 5 g/L, une production optimale d'H<sub>2</sub> a été obtenue à l'aide d'électrodes en cuivre, connues pour leur bonne conductivité électrique (Agnihotri et al., 2022).

Enfin, Srikanth et al. (2009) ont confirmé que les AGV tels que le malate, le propionate, l'acétate, le lactate et le butyrate sont des substrats efficaces pour la production d'H<sub>2</sub> par photofermentation à l'aide de cultures microbiennes mixtes.

#### **I.4.4. Production d'électricité**

Les AGV représentent une source d'énergie peu coûteuse pouvant être valorisée sous diverses formes, notamment pour la production d'électricité. Cette valorisation est rendue possible par les PCM, qui exploitent l'activité bioélectrochimique de certains microorganismes pour convertir l'énergie chimique des substrats organiques en électricité (Du et al., 2007).

Dans ce contexte, la génération directe d'électricité à partir d'AGV dérivés de déchets fermentés est économiquement viable. Les PCM alimentées par des déchets riches en AGV, notamment en acétate, propionate et butyrate, produisent un courant plus élevé, l'acétate étant reconnu comme l'un des substrats les plus efficaces (Lee et al., 2014; Annamalai et al., 2020).

En plus de la production d'électricité, les AGV peuvent également servir à générer d'autres formes d'énergie comme le biogaz, H<sub>2</sub> ou encore le biodiesel (Lee et al., 2014).

Le fonctionnement des PCM repose sur un principe simple: dans la chambre anodique (en conditions anaérobies), les microorganismes oxydent les substances organiques, libérant des électrons et des protons. Les électrons sont ensuite transférés vers la cathode via un circuit externe, où ils se combinent avec les protons et un accepteur d'électrons (souvent l'oxygène) pour produire de l'H<sub>2</sub>O. Les communautés microbiennes impliquées dans les PCM sont dominées par des classes spécifiques, principalement les Proteobacteria (*Geobacter*, *Shewanella*, *Pseudomonas*) et les Bacilli (*Clostridium*). Les inoculums utilisés dans ces systèmes proviennent généralement de BA ou d'autres PCM déjà opérationnelles (Luo et al., 2019).

#### **I.4.5. Production de lipides pour le biodiesel**

Face aux préoccupations environnementales et à l'épuisement progressif des réserves pétrolières, le biodiesel apparaît comme une alternative prometteuse aux combustibles fossiles. Toutefois, l'usage de cultures alimentaires ou de plantes énergétiques cultivées sur des terres arables soulève des questions éthiques et environnementales, ce qui a orienté la recherche vers l'exploitation de matières premières issues de déchets (Atasoy et al., 2018).

Dans ce contexte, plusieurs études ont mis en évidence le potentiel des AGV, dérivés de déchets, pour la production de lipides microbiens destinés à la fabrication de biodiesel. Ces lipides, produits par des micro-organismes oléagineux, représentent une alternative durable aux huiles végétales classiques (colza, palme, soja). En conditions de carence en azote, ces micro-organismes peuvent accumuler entre 20% et 80% de leur poids sec sous forme de triacylglycérols (TAG), un précurseur essentiel du biodiesel (Annamalai et al., 2020).

Le mécanisme repose sur la capacité des cellules oléagineuses à convertir certains acides organiques en acétyl-CoA, via l'acétyl-coenzyme A synthétase, un intermédiaire clé dans la biosynthèse des acides gras. Les AGV sont particulièrement efficaces dans ce processus, car leur

conversion en lipides nécessite moins d'étapes métaboliques et offre une meilleure efficacité théorique (Fei et al., 2011).

#### **I.4.6. Production de méthane**

En tant que biocarburants gazeux, le H<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub> sont deux transporteurs d'énergie importants, qui peuvent être produits par fermentation anaérobie à partir de divers déchets organiques. Du fait que la fermentation d'H<sub>2</sub> à partir de substrats organiques est incomplète, l'intégration de cette production avec la fermentation méthanogène permet une meilleure récupération de l'énergie à partir de biomasses renouvelables. Plusieurs études ont été publiées sur la production combinée d'H<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> à partir de déchets organiques et de biomasse renouvelable par un procédé en deux étapes. Dans la nature, les AGV produits lors de la fermentation anaérobie des boues résiduaires sont transformés en CH<sub>4</sub> et en CO<sub>2</sub> par les méthanogènes durant la méthanogenèse. Ainsi, au cours de l'acétogenèse, les AGV sont convertis en acétate et en H<sub>2</sub>, suivis d'un processus de méthanogenèse où l'acétate, le H<sub>2</sub>, le formiate et le CO<sub>2</sub> sont convertis en CH<sub>4</sub> et en H<sub>2</sub>O (Singhania et al., 2013). Les méthanogènes jouent un rôle clé en tant que producteurs de CH<sub>4</sub> lors de la DAN (étape 3). Bien que l'acétate et le couple H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> soient les principaux substrats dans l'environnement naturel, le formiate, le méthanol, les méthylamines et le CO peuvent également être convertis en CH<sub>4</sub> (Agnihotri et al., 2022).

#### **I.4.7. Traitement des eaux usées**

Les AGV constituent une application pratique prometteuse en tant que sources de carbone pour améliorer l'élimination biologique de l'azote et du phosphore dans les eaux usées. En effet, l'élimination de l'azote repose sur un enchaînement de nitrification aérobie suivie de dénitrification anoxique, tandis que l'élimination du phosphore est assurée par un processus biologique amélioré combinant phases anaérobies et aérobies alternées (Annamalai et al., 2020).

Traditionnellement, des sources de carbone chimiques coûteuses comme le méthanol, le glucose ou l'acétate commercial sont utilisées pour alimenter les étapes de dénitrification. Cependant, les AGV produits à partir de flux de déchets représentent une alternative économique viable. La composition des AGV influence directement l'efficacité de la dénitrification. Une étude comparative utilisant différents types d'AGV a révélé que l'acide acétique et l'acide propionique permettaient d'atteindre les meilleurs taux d'élimination des nitrates. Ces deux acides, appartenant aux AGV à chaîne courte ( $\leq C3$ ), ont montré une cinétique de réaction en deux étapes (rapide puis lente), avec parfois une accumulation de nitrites observée. Par ailleurs, l'utilisation d'un liquide fermenté riche en AGV, issu de déchets organiques, a démontré une

efficacité comparable à celle de l'acide acétique pur, atteignant des taux d'élimination de l'azote de 72,39% et du phosphore de 89,65% (Atasoy et al., 2018).

#### I.4.8. Autres applications

Les esters d'acide butyrique à faible poids moléculaire sont largement utilisés comme additifs alimentaires et agents parfumants, notamment dans l'Union européenne où ils sont autorisés pour l'aromatisation des aliments. Ces composés trouvent également des applications pharmaceutiques, notamment comme vasoconstricteurs, agents anticancéreux et antioxydants (Jang et al., 2014).

Sous sa forme pure, l'acide butyrique est utilisé pour renforcer les notes beurrées dans les arômes alimentaires, tandis que ses esters sont prisés pour leurs fragrances fruitées, servant dans la formulation de parfums. Par ailleurs, ses propriétés biologiques sont étudiées dans le cadre du traitement des hémoglobinopathies, du cancer et de certaines maladies gastro-intestinales (Jiang et al., 2009).

Quant à l'acide propionique, il possède de nombreuses applications industrielles: en tant qu'agent antifongique dans les denrées alimentaires et les aliments pour animaux, mais aussi comme ingrédient dans la fabrication de thermoplastiques, de médicaments anti-arthritiques, de parfums, arômes et solvants (Figure 2) (Himmi et al., 2000).

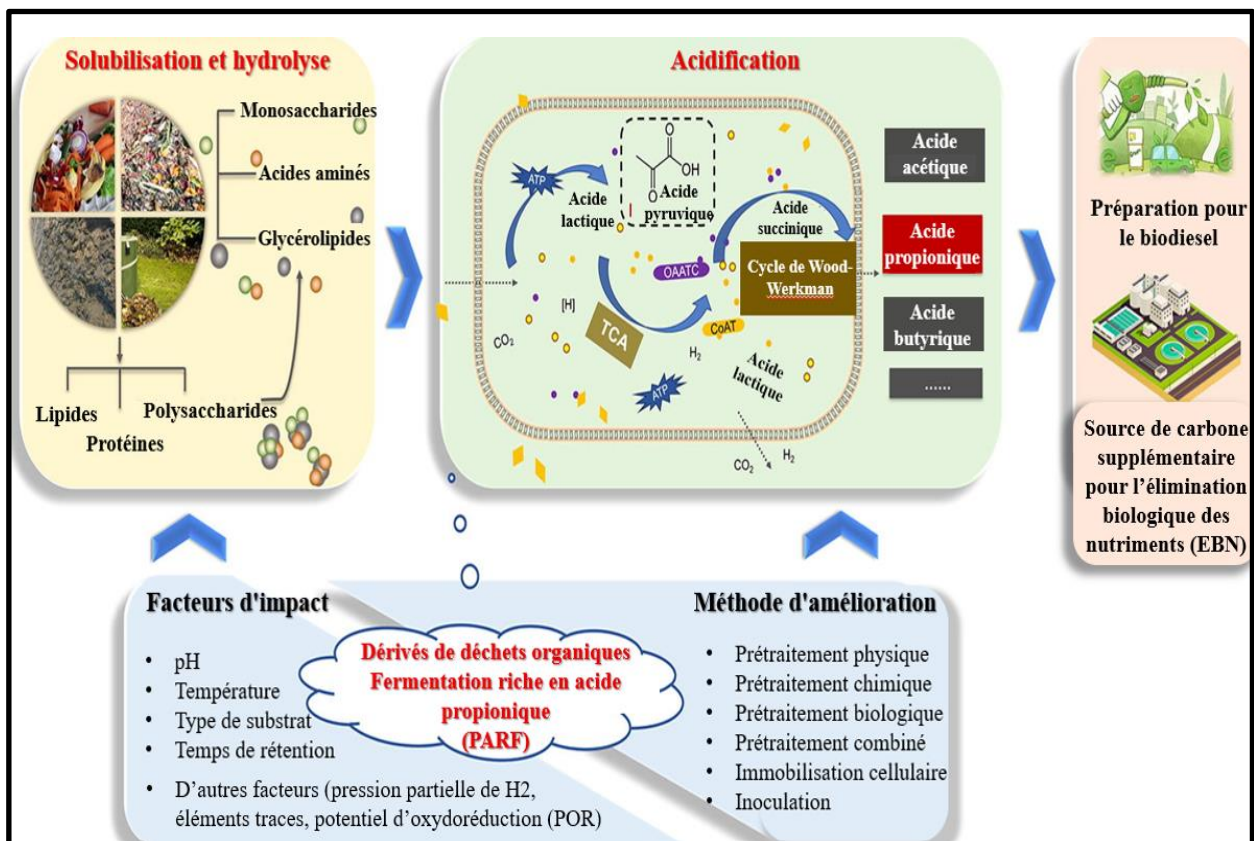


Figure 2. Production de fermentation riche en acide propionique (FRAP) à partir de déchets organiques (Chen et al., 2021).

# **Chapitre II:**

## **Les déchets organiques**

## **Chapitre II: Les déchets organiques**

### **II.1. Définition des déchets**

Les déchets sont définis comme tout résidu provenant d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, ou encore toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou destiné à l'être par son détenteur, ou dont celui-ci a l'obligation de se défaire, afin de prévenir les nuisances pour la collectivité et de protéger l'environnement (**Zhang et al., 2022**).

La première définition juridique du terme « déchet » remonte à la loi-cadre n°75-442 du 15 juillet 1975, qui le caractérise comme: « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » (**Hatik, 2015**).

### **II.2. Les différents déchets utilisés pour la production des AGV**

Une grande variété de résidus organiques a été étudiée pour la production d'AGV. Ils incluent à la fois des flux solides et liquides, en particulier la FODSM, les boues municipales (à la fois les boues primaires et les boues activées usées), les DA et les déchets de transformation alimentaire, les résidus de culture et les déchets d'élevage (**Rigaud et al., 1970**).

#### **II.2.1. Les déchets alimentaires**

Les industries agroalimentaires et les activités domestiques produisent chaque année d'importantes quantités de DA. Ces résidus proviennent des usines de transformation (jus, viandes, chips, fruits, légumes, confiseries), mais aussi des ménages, cantines, restaurants, marchés et supermarchés (**Strazzera et al., 2018; Perwez et Al asheh, 2025**). L'organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) estime que près de 1,3 milliard de tonnes de DA sont jetés chaque année dans le monde (**He et al., 2019**).

Ces déchets présentent une grande diversité mais partagent des caractéristiques physico-chimiques communes: une teneur en eau élevée (70 à 93%), un rapport (SV/ST) de 0,79 à 0,97, un pH de 3,68 à 6,50 et un rapport C/N variant de 9,2 à 63,6 (**Zhou et al., 2018**).

Sur le plan biochimique, ils sont riches en glucides, protéines, lipides et cellulose (**Wang et al., 2018**). Par exemple, les fruits et légumes contiennent jusqu'à 70–90% de glucides sur poids sec (**Magama et al., 2022**). Cette richesse organique favorise leur dégradation, mais peut entraîner des problèmes environnementaux s'ils ne sont pas traités correctement (**Tang et al., 2019**).

Grâce à leur biodégradabilité, les DA sont des substrats adaptés à la DAN, permettant la production de biogaz ou d'AGV, la composition du déchet influence le rendement en AGV. Par exemple, à 37°C avec 4,5% de matière sèche, les pelures de pommes de terre produisent 452 mg

DCO/g SV\_aliment (la quantité de matière organique volatile (ou biodégradable) présente dans la matière d'alimentation (substrat) introduite dans le réacteur au début de l'expérience), soit plus que les carottes, le céleri ou le chou chinois (**Zhang et al., 2020**). Les glucides et protéines favorisent la fermentation, tandis que les lipides, bien qu'énergétiques, ralentissent la dégradation et peuvent inhiber certaines bactéries par libération d'AGLC (**Strazzera et al., 2021**).

Enfin, les performances dépendent aussi des paramètres opératoires. Un pH neutre (6,0–7,0), une température thermophile (ex. 55°C) et un TRH court (<10 jours) permettent d'atteindre des concentrations élevées d'AGV (10–30 g DCO/L). Un pH plus élevé favorise aussi l'activité enzymatique et la solubilisation de la matière organique (**Tableau II**) (**Zhang et al., 2020**).

**Tableau II. Concentrations d'AGV et rendements de production (Uludag-Demirer et al., 2019).**

Matière première	TRH (d = jours)	CO (kg SV/m <sup>3</sup> ·d)	Température (°C)	Concentration d'AGV (g AGV/L)	Rendement en AGV (g AGV/kg DCO)
Lactosérum fromager	2,1	-	37	0,84	-
FODSM	3,5	16	55	13,8	263
DA	3,0	16,8	55	12,3	221
Déchets de fruits/légumes	1-11	11-102	37	7,6-28,5	33-279
DA + BE	8,92	8,31	35	24,1	-
FODSM + boues activées en excès (BAE)	3,3	18	55	8,1	137
Effluent de moulin à huile de palme	4,0	-	30	15,3	-
FODSM	6	4,1	23	9,5	127
Riche en gélatine protéique Eaux usées	0,5	-	37	1,57	-
BAE	4,6-9,5	1,2-1,9	35	3,2-7,5	207-325
Industrie sucrière Eaux usées + pulpe de betterave pressée	2	-	35	3,64	-
Effluent de moulin à huile d'olive	1,4	-	25	10,7	-

**II.2.2. Les déchets ménagers**

Les déchets ménagers et assimilés (DMA), également appelés déchets municipaux, englobent les déchets issus des ménages, mais aussi ceux produits par les entreprises industrielles, les artisans, les commerçants, les établissements scolaires, les services publics, les hôpitaux (hors déchets dangereux) et le secteur tertiaire. Leur composition est variée, comme illustré dans le **tableau II (Paillet, 2017)**.

Les déchets de cuisine constituent une part importante des DMA. Ils comprennent des résidus tels que les épluchures d'oignon, de pomme de terre, de carotte, de betterave, de salade et d'artichaut (**Tableau III (Zhang et al., 2020)**).

Parmi ces déchets, les déchets ménagers solides (DMS), riches en glucides, ont été particulièrement étudiés pour la production de CH<sub>4</sub> par digestion. En raison de leur abondance et de leur forte ChO, ils constituent aujourd'hui l'une des principales sources de pression environnementale, avec des volumes en constante augmentation.

Toutefois, leur potentiel de valorisation biotechnologique est considérable. Grâce à leur richesse en matière organique, les déchets ménagers peuvent être recyclés et transformés via des procédés tels que la méthanisation, permettant de produire de l'énergie renouvelable tout en réduisant les impacts environnementaux (**Saïdi-Boulahia et al., 2018**).

**Tableau III: Caractérisation des déchets ménagers et assimilés (DMA) (Paillet, 2017).**

<b>Déchets ménagers et assimilés</b>	Déchets résiduels
	Déchets recyclables
	Déchets verts et organiques
	Déchets d'équipements électriques et électroniques
	Déchets ménagers spéciaux
	Déchets toxiques en quantités dispersées
	Déchets inertes
	Déchets amiante/ciment
	Déchets assainissement
	Déchets issus du traitement de l'eau potable

**II.2.3. Les eaux usées**

Les eaux usées issues des industries agroalimentaires telles que l'agriculture, les laiteries et les usines de pâte et papier sont couramment valorisées pour la production d'AGV comme

indique dans la **figure 3**, en raison de leur forte ChO. Par exemple, les effluents de l'huile de palme, avec une DCO élevée pouvant atteindre 88 000 mg/L, permettent la production d'AGV jusqu'à 15 300 mg/L. De même, les perméats de lactosérum et les eaux usées de papeterie, riches en substrats facilement fermentescibles, sont particulièrement adaptés à cette valorisation (**Lee et al., 2014**).

Ces effluents industriels sont généralement riches en matières organiques (DCO, demande biologique en oxygène (DBO)), en nutriments (azote, phosphore) et peuvent contenir des métaux lourds (**Amara et al., 2023**). Par exemple, les eaux usées issues de la pétrochimie présentent une DCO et une DBO élevées, ainsi qu'une toxicité importante (**Ghosh et al., 2010**).

Les industries de transformation de la noix de coco desséchée (NCD) produisent entre 6 et 150 m<sup>3</sup>/jour d'eaux usées, selon les capacités de traitement (de 10 000 à 100 000 noix/jour). Ces effluents incluant l'eau de coco, l'eau de lavage et l'eau d'extraction de l'huile contiennent des lipides (1–55 g/L), des solides en suspension (6–80 g/L) et des AGV à des concentrations inhibitrices pour les bactéries anaérobies. L'eau de coco seule représente 20 à 50% du volume total et jusqu'à 60% de la ChO, provoquant une latence initiale allant jusqu'à 30 jours pour la fermentation (**Chanakya et al., 2015**).

Les eaux usées issues de la transformation du manioc sont également considérées comme une excellente source de carbone. Elles présentent les caractéristiques suivantes: pH 4,0 ; acidité 0,4% ; alcalinité 2,5 mmol/L ; sucre réducteur 1,0 g/L ; DCO 8 865 mg O<sub>2</sub>/L ; DBOs 11,32 mg/L ; ST 0,74% ; solides en suspension volatils (SSV) 0,67% ; azote total 116,5 mg/L ; phosphore total 26,9 mg/L ; cyanure 1,9 mg/L (**Hasan et al., 2015**).

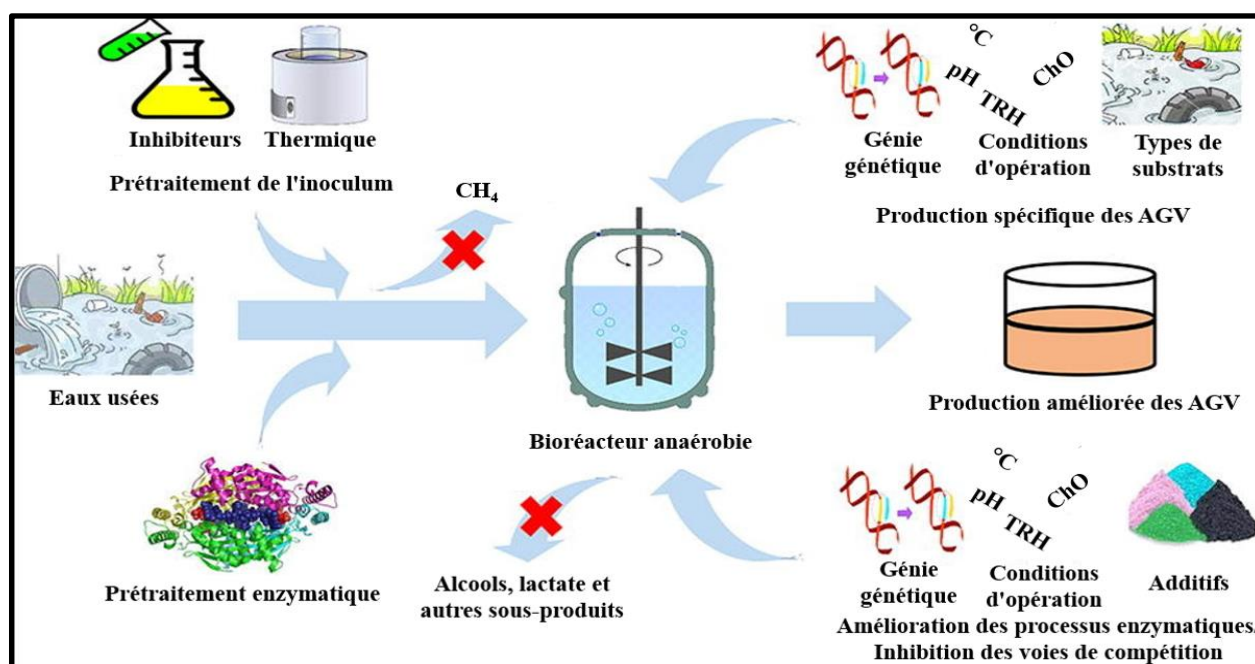


Figure 3. Les AGV produits à partir d'eaux usées riches en matières organiques par digestion anaérobie (DAn) (**Feng et al., 2022**).

#### **II.2.4. Les déchets agricoles**

Les déchets agricoles sont riches en composés organiques valorisables, tels que les glucides, les protéines et la cellulose, pouvant être transformés par fermentation en biogaz, biocarburants ou métabolites secondaires d'intérêt. Leur disponibilité à faible coût permet de réduire à la fois les coûts de production et la pollution environnementale associée à leur accumulation. Les résidus issus des activités agricoles et industrielles, appelés déchets agro-industriels, comprennent notamment les tiges, feuilles, graines, balles, pulpe, racines, pelures, et pailles. Ces sous-produits peuvent être valorisés en tant qu'aliments pour animaux, composts ou amendements organiques (**Perwez et Al asheh, 2025**).

À titre d'exemple, la paille de maïs (PM), riche en cellulose et hémicellulose mais pauvre en lignine, s'avère être un co-substrat efficace pour la conversion des BE en AGV (**Luo et al., 2019**). Dans l'étude de **Zhou et al. (2013)**, l'augmentation de la proportion de PM de 20 à 50% dans le mélange a permis une hausse du rendement en AGV de 12 à 69%.

#### **II.2.5. Les déchets agro-industriels**

Les industries agroalimentaires génèrent d'importantes quantités de déchets, dont le rejet non traité peut entraîner de graves impacts environnementaux (**Atasoy et al., 2018**). Ces déchets comprennent divers résidus tels que les coques de riz, les résidus de brasserie, les fibres de soja et de riz, les tiges d'asperges, les pelures d'orange et de banane, ainsi que les marcs de pommes vertes et rouges (**Martínez-Avila et al., 2021**).

Pourtant, ces déchets agro-industriels représentent une ressource précieuse en nutriments, en matière organique et inorganique (**Atasoy et al., 2018**). Ils sont majoritairement constitués de BLC, dont l'intérêt croissant en ingénierie des matériaux et en chimie s'explique par ses propriétés remarquables: résistance mécanique, stabilité thermique, renouvelabilité, non-toxicité, faible coût et disponibilité élevée. Ces caractéristiques permettent la valorisation de la BLC en produits à forte valeur ajoutée (**Figure 4**) (**Mora-Sandí et al., 2021**).

Ces résidus peuvent ainsi servir de substrats alternatifs en carbone ou en azote pour la production de divers métabolites microbiens (**Atasoy et al., 2018**). Par exemple, la biotransformation de la L-phénylalanine (L-phe) à partir de résidus de pomme rouge a permis d'obtenir une concentration élevée de 2-phényléthanol (2-PE), un composé aromatique commercialisable, atteignant 25,2 mg 2-PE/g de ST après 70 heures. La productivité volumique et le rendement en précurseur étaient respectivement de 39,6 mg 2-PE/L/h et de 0,69 g 2-PE/g de L-phe (**Martínez-Avila et al., 2021**).

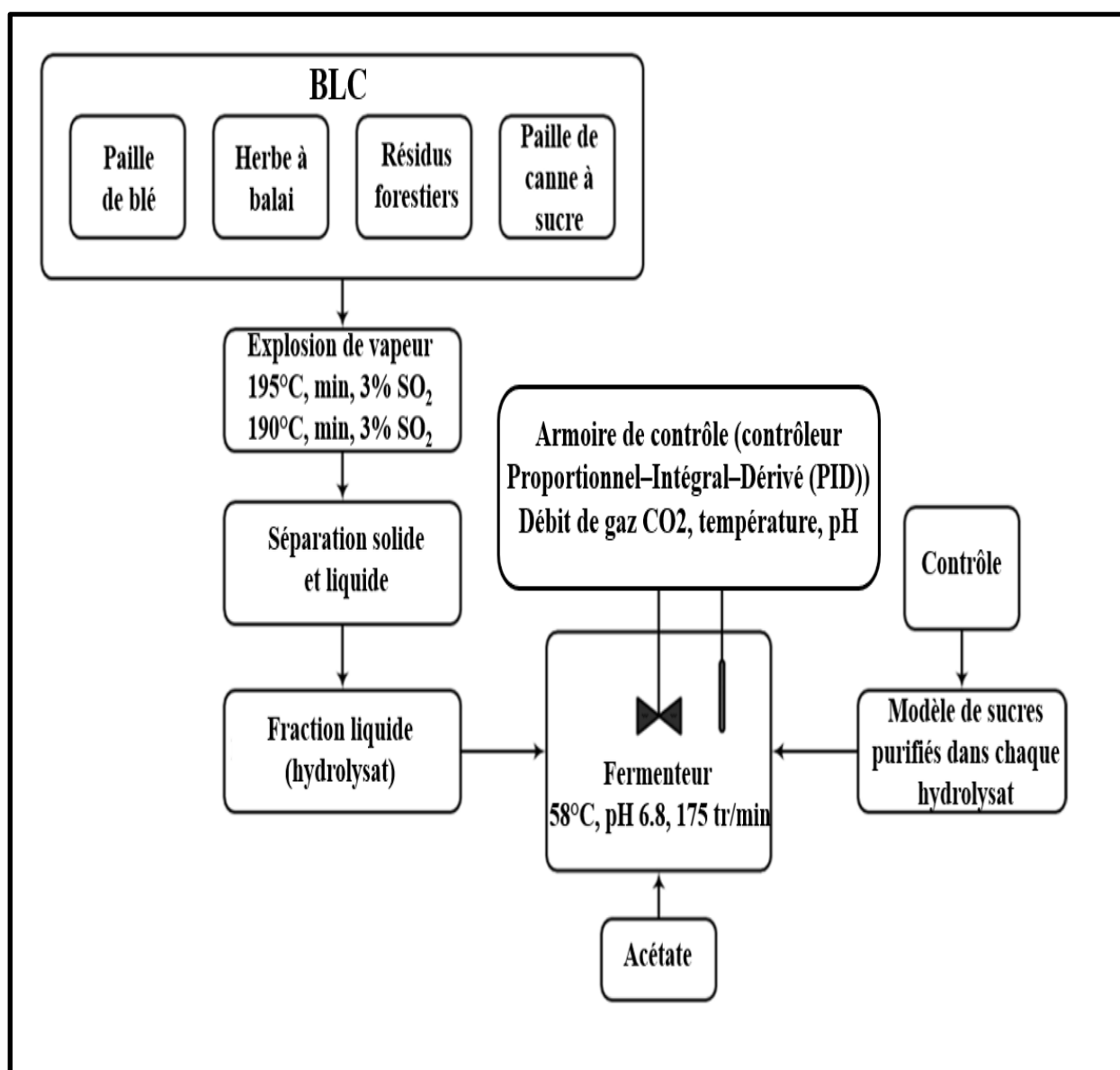


Figure 4. Schéma des expériences de fermentation. Tous les échantillons de biomasse lignocellulosique (BLC) ont été explosés à la vapeur à 195°C, sauf pour la paille de canne à sucre. Astérisque La paille de canne à sucre a été explosée à la vapeur à 190°C (Ehsanipour et al., 2016).

### II.3. Le prétraitement des déchets

L'objectif principal du prétraitement des biomasses est de lever les barrières structurelles et compositionnelles qui entravent leur dégradation ou leur conversion en produits valorisables. Trois grands types de prétraitements sont généralement utilisés: (1) le prétraitement physique (comme le moulage, le broyage ou le déchiquetage), (2) le prétraitement chimique (utilisant des acides, des bases ou des agents oxydants), et (3) le prétraitement biologique. Ces technologies

entraînent des modifications chimiques et/ou physiques de la biomasse (**Mothe et Polisetty, 2021**).

### **II.3.1. Prétraitement physique**

Le prétraitement physique vise à améliorer la biodégradabilité des substrats en augmentant leur porosité et leur surface spécifique, tout en réduisant la cristallinité de la cellulose et son degré de polymérisation. Parmi les techniques les plus utilisées figurent le broyage, l'extrusion, l'explosion à la vapeur et les traitements à l'eau chaude (**Mothe et Polisetty, 2021**).

Le broyage, en particulier, est largement appliqué en DAN des résidus solides (RS), car il permet de diminuer la taille des particules, ce qui favorise l'hydrolyse. Il a été démontré que des particules de biomasse inférieures à 0,4 mm n'entravent pas ce processus (**Mora-Sandí et al., 2021**). De plus, la taille optimale des particules de paille, entre 0,45 et 0,6 mm, a permis d'atteindre une production maximale de biogaz de 0,52 m<sup>3</sup>/kg de matières volatiles, avec une teneur en CH<sub>4</sub> de 60,29%. Cependant, le broyage seul a une efficacité limitée en termes d'amélioration significative de la digestibilité (**Mothe et Polisetty, 2021**). Pour cette raison, il est souvent combiné à d'autres traitements (**Croce et al., 2016**). Par exemple, **Zhang et al. (1999)** ont observé une augmentation de 20% de la production de CH<sub>4</sub> après la combinaison du broyage avec du chauffage.

Parmi les autres procédés, l'extrusion s'avère particulièrement performante. Elle a permis une amélioration de la dégradation de la cellulose et de l'hémicellulose d'environ 6% et 9%, respectivement, lors de la DAN de RS (**Mothe et Polisetty, 2021**). D'autres travaux rapportent même une augmentation de 40% de la production de CH<sub>4</sub> après extrusion (**Croce et al., 2016**). Enfin, le broyage à disque humide a été identifié comme un prétraitement efficace et économique pour la biomasse agricole, notamment en comparaison avec le broyage à sec ou les traitements à l'eau chaude comprimée (**Mothe et Polisetty, 2021**).

### **II.3.2. Prétraitements chimiques**

Les prétraitements chimiques visent à améliorer la dégradabilité de la cellulose en éliminant partiellement la lignine et en dépolymérisant les composants cellulosiques (**Croce et al., 2016**).

Ces méthodes reposent principalement sur l'utilisation de solvants acides, alcalins ou organo-aqueux (comme l'éthanol, le benzène, l'éthylène glycol ou le butanol), utilisés à différentes concentrations pour favoriser la solubilisation des fractions organiques complexes (**Strazzera et al., 2018**).

Parmi les procédés les plus répandus en DAN, on retrouve les traitements à la soude (NaOH), à l'acide sulfurique dilué, à l'hydroxyde de calcium, au peroxyde d'hydrogène, ainsi que l'utilisation de solvants ioniques (**Mothe et Polisetty, 2021**).

Les traitements acides, en particulier, provoquent l'hydrolyse de l'hémicellulose et la solubilisation de la lignine. Toutefois, cette lignine précipite rapidement après solubilisation, ce qui peut freiner la digestibilité de la matière organique. En outre, l'usage d'acide sulfurique ou nitrique peut générer des sous-produits indésirables (sulfites, ions nitrite), responsables d'une baisse de la teneur en CH<sub>4</sub> dans le biogaz (**Croce et al., 2016**). Une étude de **Gu et al. (2011)** a montré qu'une combinaison de traitements acide et thermique permettait d'augmenter la production de CH<sub>4</sub> de 67%.

Les prétraitements alcalins, quant à eux, agissent sur les parois cellulaires en les désintégrant, ce qui augmente la porosité du substrat et facilite la libération du contenu intracellulaire (**Luo et al., 2019**). Ce mécanisme améliore l'accessibilité du substrat aux micro-organismes et réduit la concentration d'inhibiteurs tels que l'acétylène et les acides uroniques substitués, ce qui favorise la dégradation des sucres (**Mothe et Polisetty, 2021**).

### **II.3.3. Prétraitement biologique**

Les prétraitements enzymatiques, fondés sur l'action d'enzymes hydrolytiques telles que les cellulases, permettent de dégrader la cellulose et de solubiliser l'hémicellulose, favorisant ainsi la libération de sucres et la production accrue d'AGV (**Strazzera et al., 2018**). Ils présentent plusieurs avantages: absence de produits chimiques, faible consommation énergétique et aucune formation de composés inhibiteurs, ce qui en fait une alternative écologique aux prétraitements chimiques. L'application enzymatique peut se faire par ajout direct d'enzymes exogènes ou par inoculation de micro-organismes producteurs d'enzymes (**Luo et al., 2019**). Ces procédés génèrent également des résidus riches en fibres, huiles essentielles et composés bioactifs, offrant des perspectives de valorisation durable dans divers secteurs (**Mora-Sandí et al., 2021**).

Toutefois, l'hydrolyse enzymatique est un processus sensible à plusieurs facteurs opérationnels, notamment le mode d'introduction des enzymes (prétraitement ou co-digestion), le type de réacteur (batch, fed-batch ou continu) et le dispositif de mélange. De plus, sa cinétique plus lente que celle des prétraitements chimiques limite son efficacité (**Strazzera et al., 2018**), tandis que le coût élevé des enzymes commerciales constitue un frein économique majeur à sa généralisation (**Luo et al., 2019; Mothe et Polisetty, 2021**).

#### **II.4. Valorisation des déchets organique**

Les déchets organiques peuvent être définis comme tout matériau ou sous-produit biodégradable issu de processus végétaux ou animaux. Les principales catégories incluent les DA domestiques, les déchets agricoles, les déchets industriels, ainsi que les déchets humains et animaux. Leur dégradation dépend de leur composition et de leur teneur en humidité, qui varient selon la nature du matériau d'origine (**Abu Yazid et al., 2017**).

Ces biodéchets peuvent être transformés par des méthodes physiques, chimiques ou biologiques en une large gamme de produits et matériaux destinés à diverses utilisations finales. La valorisation des déchets organiques permet de réduire la pression sur les ressources non renouvelables tout en limitant la production de déchets, ce qui suscite un intérêt croissant dans les domaines fondamentaux et appliqués, en raison de leur abondance et de leur polyvalence (**Lizundia et al., 2022**).

Par exemple, les déchets de biomasse peuvent servir de matières premières alternatives pour la production de biocarburants verts et durables, tels que le bioéthanol, le biogaz et le biodiesel. Parmi eux, les résidus de culture riches en cellulose, comme la paille de blé et les tiges de maïs, sont des déchets agricoles courants présentant un fort potentiel pour les bioraffineries. De même, les eaux usées de digestat, les fumiers de volaille et animaux constituent des sources riches en azote et oligo-éléments, favorables à la bioénergie et à la croissance microbienne (**Sun et Peng, 2023**).

L'exploitation biotechnologique de ces déchets via la DAn, la fermentation et le compostage permet de produire divers produits de bioraffinerie, notamment des biofertilisants, de la biomasse, des biocarburants et des produits chimiques secondaires (**Ansari et al., 2024**).

### **Chapitre III:**

**Étude comparative de la production d'acide propionique à partir de déchets organiques par *Propionibacterium* sp**

### III.1. Introduction

L'acide propionique est un composé chimique important utilisé dans les domaines alimentaires, pharmaceutique et chimique (Liu et al., 2016). Il sert notamment d'agent antifongique dans les aliments et les produits pour animaux. Ses sels sont également employés comme conservateurs. En dehors de l'alimentaire, il intervient dans la fabrication de plastiques, d'herbicides, de solvants, de parfums, d'arômes et de médicaments. Sa production industrielle repose principalement sur la synthèse chimique à partir de dérivés pétroliers (Himmi et al., 2000). Cependant, la hausse du prix du pétrole et les préoccupations environnementales ont conduit à envisager la fermentation biologique comme une alternative plus durable, utilisant des matières premières renouvelables ou des déchets industriels à faible coût (Coral et al., 2008; Wang et al., 2014).

Dans ce cadre, les propionibactéries, et en particulier le genre *Propionibacterium*, sont capables de produire de l'acide propionique par fermentation anaérobie. Ce sont des bactéries à Gram-positives, anaérobies facultatifs, qui transforment divers substrats carbonés en propionate, acétate et CO<sub>2</sub> selon le cycle de Wood–Werkman (Goswami et Srivastava, 2001; Wang et al., 2014).

Ce travail compare deux études portant sur la production d'acide propionique par *Propionibacterium acidipropionici*. Le premier article, de Liang et al. (2012), s'intéresse à l'utilisation de l'hydrolysate de topinambour (HT) dans un bioréacteur à lit fibreux (FBB). Le second, de Dishisha et al. (2012), explore la fermentation du glycérol, un sous-produit du biodiesel, en mode batch, continu et recycle-batch avec cellules libres ou immobilisées.

L'objectif de cette comparaison est d'identifier la stratégie de fermentation la plus efficace et économique pour produire de l'acide propionique par *Propionibacterium acidipropionici*. Elle s'appuie sur deux études représentatives utilisant des substrats différents, le glycérol brut et le HT ainsi que diverses souches et procédés (batch, fed-batch, continu, immobilisation). Ces travaux visent à valoriser des sources de carbone renouvelables et peu coûteuses, issues de coproduits agricoles ou industriels, dans une démarche durable et d'économie circulaire, alternative à la synthèse chimique classique.

### III.2. Méthodes de travail

#### III.2.1. Préparation de la pré-culture

Les deux études ont utilisé des souches de *Propionibacterium acidipropionici*, mais de sources différentes: Dishisha et al. (2012) ont travaillé avec la souche DSM 4900, tandis que Liang et al. (2012) ont utilisé la souche ATCC 4875. Ces souches sont reconnues pour leur

capacité à produire de l'acide propionique, bien qu'elles puissent varier en termes de rendement ou de tolérance aux conditions de culture.

Pour la préparation de la préculture, **Dishisha et al. (2012)** ont utilisé un milieu à base de glycérol (40 g/L), d'extrait de levure, de sels phosphatés et de cystéine. La culture était réalisée en deux étapes: une première incubation de 5 jours, suivie d'une sous-culture de 3 jours, jusqu'à atteindre la phase stationnaire (densité optique (DO)<sub>620</sub> ≈ 7,3). En comparaison, **Liang et al. (2012)** ont cultivé leur souche dans un milieu contenant un mélange de glucose et de fructose, de l'extrait de levure, du trypticase et des sels minéraux. L'inoculum (5% v/v) était directement ajouté au fermenteur sans phase de sous-culture prolongée.

Concernant la préparation du substrat, **Liang et al. (2012)** ont utilisé du topinambour. Les tubercules ont été lavés, pelés, séchés, broyés, puis hydrolysés avec de l'acide sulfurique dilué à 121°C pendant 40 minutes. Le liquide obtenu, riche en fructose (40 g/L) et en glucose (20 g/L), a été filtré, ajusté à pH 6,5 et conservé à 4°C. Ce substrat servait ensuite comme source de carbone dans le milieu de fermentation.

### **III.2.2. Procédé de fermentation**

L'étude de **Liang et al. (2012)** a évalué deux méthodes de fermentation: l'une avec des cellules libres, l'autre avec des cellules immobilisées dans un FBB (**Figure 5**). La fermentation en cellules libres a été réalisée dans un fermenteur de 5 litres contenant 2 litres de milieu, à 32°C et à un pH de 6,5, par injection d'azote pour maintenir l'anaérobiose. Pour l'immobilisation, un système FBB a été mis en place, composé d'un fermenteur principal relié à une colonne de 0,5 L remplie d'un linge de coton spiralé. Les cellules y étaient immobilisées, puis cultivées en mode fed-batch, avec ajout de substrat dès que le sucre était épuisé. En mode batch répété (repeated batch), seul le milieu était remplacé à chaque cycle, tandis que les cellules immobilisées restaient en place.

De leur côté, **Dishisha et al. (2012)** ont expérimenté plusieurs modes de fermentation: batch, recycle-batch et continu, en utilisant soit des cellules libres, soit des cellules immobilisées sur des supports traités à la polyéthylénimine (PEI), comme la *Luffa cylindrica* et les billes de verre Poraver (**Figure 6**). Les fermentations ont été réalisées dans un fermenteur en verre jacketé de 600 mL, avec une colonne intégrant la matrice d'immobilisation. Les paramètres de culture étaient rigoureusement contrôlés: la température à 32°C, le pH est maintenu à 6,5 à l'aide de NH<sub>4</sub>OH, et l'anaérobiose est assurée par injection d'azote. Le réacteur contenait 300 mL de milieu, inoculé par 15 mL de culture. Après immobilisation, le système fonctionnait en mode

continu, avec recirculation du milieu entre la colonne (contenant 200 g de Poraver) et le réacteur à un débit de 30 mL/min, afin de tester différents taux de dilution.

Dans l'ensemble, **Dishisha et al. (2012)** ont mis l'accent sur la comparaison de différents supports d'immobilisation et sur la cinétique de fermentation, tandis que **Liang et al. (2012)** se sont concentrés sur la stabilité à long terme du système FBB, utilisant un substrat complexe tel que l'HT.

### **III.2.3. Méthodes analytiques**

Dans l'étude de **Liang et al. (2012)**, la croissance cellulaire a été suivie par mesure de l'absorbance à 600 nm, puis convertie en biomasse sèche à l'aide d'un facteur (1 DO = 0,362 g/L). Les concentrations de glucose, fructose, acide propionique, acétique et succinique ont été analysées par chromatographie liquide à haute performance (HPLC), en utilisant une colonne Bio-Rad HPX-87H à 60°C et un éluant d'acide sulfurique dilué (2,5 mM).

De leur côté, **Dishisha et al. (2012)** ont utilisé l'HPLC pour mesurer le glycérol et les produits de fermentation (acide propionique, acétique, succinique, n-propanol), avec une colonne Aminex HPX-87H à 55°C. La croissance cellulaire a été suivie par absorbance à 620 nm, puis convertie en poids sec après centrifugation et séchage. Pour les cellules immobilisées, la biomasse a été estimée à partir de l'augmentation du poids des supports (Poraver ou Luffa) après fermentation.

Les deux études ont utilisé des techniques similaires pour analyser les substrats et les produits. Cependant, l'étude de **Dishisha et al. (2012)** fournit une évaluation plus précise de la biomasse immobilisée. En revanche, **Liang et al. (2012)** ont mis en évidence la stabilité du système à travers plusieurs cycles de fermentation, bien qu'ils ne détaillent pas la quantification de la biomasse adsorbée.

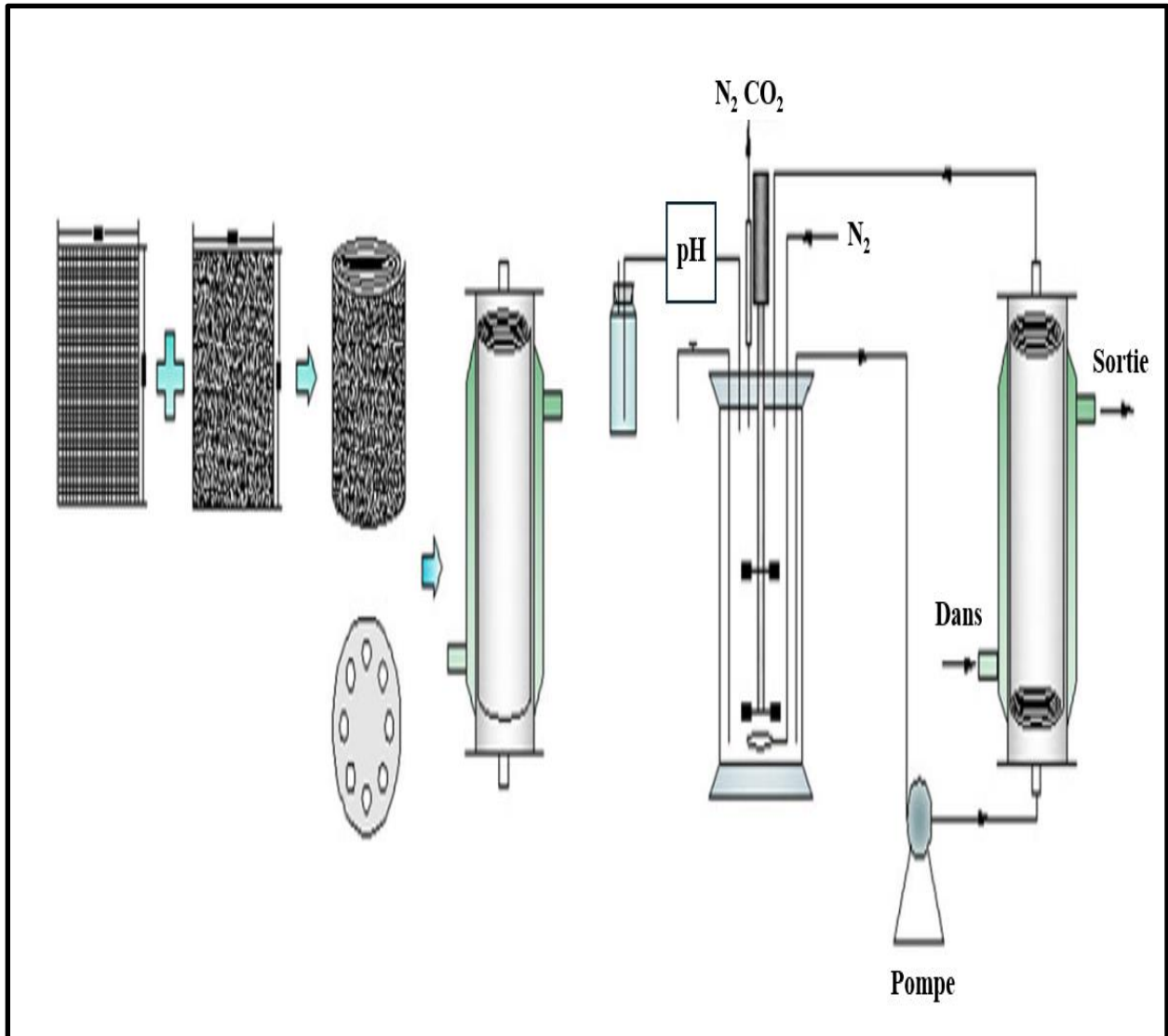


Figure 5. Construction du système FBB utilisé pour la fermentation afin de produire de l'acide (Liang et al., 2012).

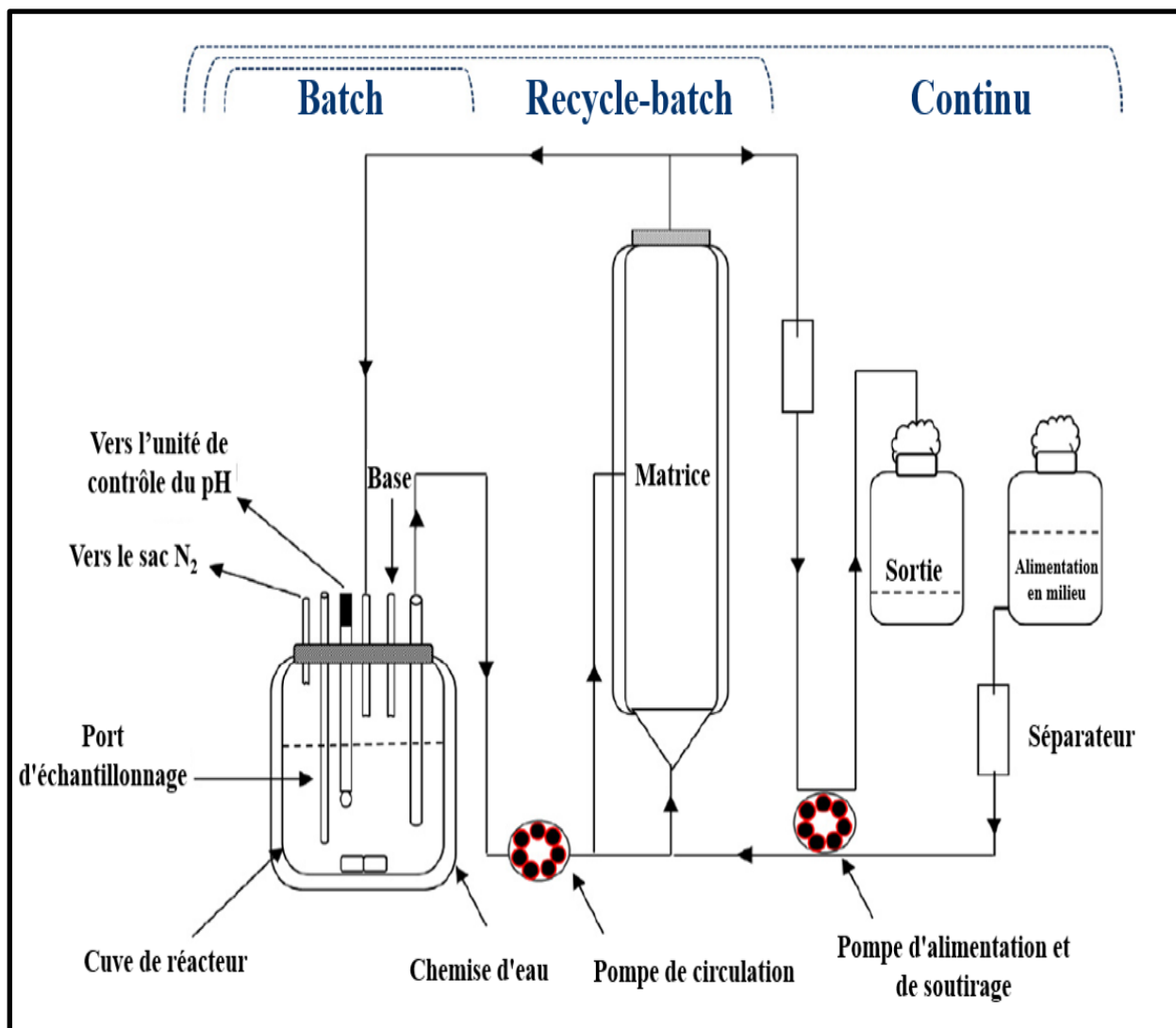


Figure 6. Conception du bioréacteur pour la production d'acide propionique à partir de glycérol, en modes batch, recycle-batch et continu, comprenant deux unités principales:

- (I) un récipient de réaction permettant le contrôle du pH et l'échantillonnage,
- (II) une colonne à lit fixe contenant les cellules immobilisées.

Dans le cas de la fermentation avec cellules immobilisées, le milieu était recirculé entre les deux unités à l'aide d'une pompe péristaltique. Pour le fonctionnement en continu, l'alimentation du milieu était assurée par une pompe contrôlant également le débit de sortie du produit (Dishisha et al., 2012).

### III.3. Analyse des résultats

Dans l'étude de Liang et al. (2012), plusieurs sources de carbone ont été testées (glucose, fructose, mélange de sucres, HT), toutes permettant la production d'acide propionique à partir d'une concentration initiale d'environ 60 g/L (Tableau IV). Le meilleur rendement (0,42 g/g) et

la meilleure concentration (22,9 g/L) ont été obtenus avec l'HT, qui a aussi permis une croissance cellulaire élevée (12,3 g/L de biomasse), probablement grâce à la richesse nutritive du substrat.

**Dishisha et al. (2012)** ont travaillé avec différentes concentrations de glycérol. À 42 g/L, le glycérol est entièrement consommé en 62,5 h, produisant 19,5 g/L d'acide propionique avec un rendement de 85%. Cependant, dès que la concentration d'acide dépasse 15 g/L, la croissance cellulaire s'arrête. À 63,6 g/L de glycérol, la production atteint 26,3 g/L, avec un rendement de 89% sur les acides totaux, mais la croissance et la productivité ralentissent fortement, en raison d'un manque de nutriments ou de l'inhibition par l'acide produit.

En utilisant des cellules immobilisées, **Liang et al. (2012)** ont atteint jusqu'à 68,5 g/L d'acide propionique, soit près de 70% de plus qu'en cellules libres (40,6 g/L). Les cellules ont montré une bonne tolérance à l'acide (jusqu'à 68,9 g/L après 225 h) et une productivité supérieure. De plus, ce mode de fermentation a réduit la formation de sous-produits (acétate, succinate) et permis un rendement amélioré de 14,4%.

Dans l'étude de **Dishisha et al. (2012)**, l'immobilisation sur supports PEI (Poraver et Luffa) a permis de réduire le temps d'immobilisation à 1–2 semaines tout en maintenant une bonne production. En fermentation recycle-batch, ils ont atteint 35,2 g/L d'acide propionique à partir de 84,6 g/L de glycérol, avec un rendement de 0,59 mol/mol et une productivité maximale de 0,86 g/L/h.

Contrairement à **Liang et al. (2012)**, **Dishisha et al. (2012)** a exploré la fermentation continue, ce qui a permis de réduire l'accumulation d'acide et d'améliorer la productivité. En fermentation continue avec cellules libres, une perte cellulaire était observée à fort taux de dilution. Ce problème a été corrigé grâce à l'immobilisation sur PEI-Poraver, permettant de maintenir la production stable, avec une productivité de 1,4 g/L/h et un rendement de 0,86 mol/mol, tout en réduisant les sous-produits.

Enfin, dans l'étude de **Liang et al. (2012)**, le procédé fed-batch avec les cellules immobilisées dans un FBB et l'HT a permis d'atteindre une concentration maximale de 68,9 g/L, soit presque le double de celle obtenue par **Dishisha et al. (2012)**. Le rendement massique était de 0,434 g/g, avec une productivité maximale de 1,55 g/L/h. En fermentation batch répétée, la productivité moyenne atteignait 3,69 g/L/h, avec une production stable sur 8 cycles, démontrant la robustesse du procédé.

**Tableau IV. Comparaison de diverses sources de carbone pour la fermentation de l'acide propionique (Liang et al., 2012).**

Sources de carbone	Acide propionique (g/L)	Acide acétique (g/L)	Acide succinique (g/L)	Poids sec des cellules (g/L)	Sucre consommé (g/L)	Rendement en acide propionique (g/g)	Acide propionique/ acide total (%)
Glucose	22.7 ± 0.60	5.93 ± 0.12	3.62 ± 0.10	8.98 ± 0.21	58.3 ± 0.72	0.39 ± 0.04	70.4 ± 0.10
Fructose	20.1 ± 0.12	3.65 ± 0.24	4.70 ± 0.12	10.6 ± 0.11	54.1 ± 0.24	0.37 ± 0.06	70.7 ± 0.13
Mélange de sucres <sup>a</sup>	23.3 ± 0.21	6.13 ± 0.23	2.19 ± 0.13	9.10 ± 0.16	58.8 ± 0.53	0.40 ± 0.03	73.1 ± 0.08
HT <sup>b</sup>	22.9 ± 0.17	6.16 ± 0.21	4.75 ± 0.15	12.3 ± 0.25	54.7 ± 0.63	0.42 ± 0.02	67.7 ± 0.05

<sup>a</sup> Mélange de sucres: 20 g/L de glucose, 40 g/L de fructose

<sup>b</sup> HT: 20 g/L de glucose, 40 g/L de fructose

#### III.4. Discussion

La comparaison des deux études révèle des stratégies différentes mais complémentaires pour améliorer la production d'acide propionique à partir de substrats renouvelables. **Dishisha et al. (2012)** ont misé sur la valorisation du glycérol (sous-produit du biodiesel) et l'optimisation de l'immobilisation sur matrices solides (Poraver et Luffa), en testant différents régimes (discontinus, recyclés, continus). Leurs résultats montrent une excellente productivité à faible concentration de substrat, une bonne conversion molaire, et une réduction des sous-produits avec l'immobilisation, notamment sur PEI-Poraver. Cependant, la concentration maximale atteinte en acide propionique (35 g/L) reste limitée par rapport à l'étude de **Liang et al. (2012)**.

À l'inverse, **Liang et al. (2012)** ont obtenu des concentrations beaucoup plus élevées (jusqu'à 68,9 g/L) grâce à un FBB utilisant un substrat peu coûteux et abondant, le topinambour. Ce système a permis non seulement une meilleure tolérance à l'inhibition par l'acide propionique, mais aussi une stabilité exceptionnelle sur plus de 200 heures de fermentation en batch répété, avec une productivité multipliée par plus de 4 par rapport aux cellules libres. Leur stratégie s'avère donc particulièrement adaptée pour des procédés industriels à long terme, malgré une cinétique légèrement plus lente et des substrats moins concentrés en énergie que le glycérol pur.

En résumé, **Dishisha et al. (2012)** démontre l'efficacité d'un système à haut rendement et flexibilité opérationnelle, idéal pour des procédés modulables (batch ou continu), tandis que **Liang et al. (2012)** propose une solution écologiquement durable et très performante en termes de concentration finale et stabilité du procédé. Pour un déploiement industriel, le choix entre les deux dépendra du type de substrat disponible, des contraintes économiques, et du modèle de production souhaité. L'idéal serait d'explorer une combinaison des deux approches: utiliser le FBB avec des substrats riches comme le glycérol, pour tirer profit à la fois de la haute productivité et de la résilience du système.

### **III.5. Conclusion**

Cette étude comparative met en évidence deux approches complémentaires pour la production d'acide propionique à partir de substrats renouvelables et peu coûteux. **Liang et al. (2012)** ont utilisé l'HT, une source végétale riche en inuline, permettant d'atteindre des concentrations finales élevées grâce à la stabilité du système FBB. En parallèle, **Dishisha et al. (2012)** ont exploité la glycérine brute, un coproduit industriel, permettant une productivité élevée en fermentation continue, notamment grâce à l'immobilisation sur supports synthétiques. Les deux travaux répondent au même objectif de durabilité, tout en proposant des stratégies adaptées à des contextes industriels différents: rendement élevé et tolérance d'un côté, vitesse de production et contrôle du procédé de l'autre. Cette complémentarité renforce l'intérêt d'une approche intégrée pour optimiser la production biologique d'acide propionique.

# **Conclusion**

## Conclusion

La demande croissante en AGV devrait être satisfaite soit par des voies pétrochimiques, soit par des approches biotechnologiques. Bien que les ressources fossiles aient historiquement constitué la principale source de production d'AGV, en raison de leur faible coût et de leur disponibilité, leur caractère non renouvelable, leur répartition géographique inégale, la volatilité de leurs prix et les impacts environnementaux qu'elles engendrent limitent leur rôle dans une perspective de développement durable, tant pour les pays développés que pour ceux en développement.

Cependant, des alternatives prometteuses sont en cours de développement. Les approches biotechnologiques, reposant sur l'utilisation de ressources renouvelables, offrent une solution plus respectueuse de l'environnement pour la production d'AGV. En particulier, la biosynthèse d'AGV à partir de la DAN de déchets organiques, de résidus agricoles ou de sous-produits industriels suscite un intérêt croissant (**Agnihotri et al., 2022**).

Bien que les AGV biosourcés n'occupent pas encore une place dominante sur le marché, ils représentent une voie durable de valorisation des déchets, tout en assurant une production pérenne de ces composés chimiques essentiels pour les générations futures. La conversion des flux de déchets en AGV attire d'ailleurs une attention croissante en raison de ses avantages économiques et environnementaux (**Atasoy et al., 2018**).

# **Références bibliographiques**

- Abu Yazid, N., Barrena, R., Komilis, D., & Sánchez, A. (2017).** Solid-state fermentation as a novel paradigm for organic waste valorization: a review. *Sustainability*, 9(2), 224. <https://doi.org/10.3390/su9020224>.
- Agnihotri, S., Yin, D. M., Mahboubi, A., Sapmaz, T., Varjani, S., Qiao, W., Koseoglu-Imer, D. Y., & Taherzadeh, M. J. (2022).** A glimpse of the world of volatile fatty acids production and application: a review. *Bioengineered*, 13(1), 1249-1275. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.1996044>.
- Alkaya, E., Kaptan, S., Ozkan, L., Uludag-Demirer, S., & Demirer, G. N. (2009).** Recovery of acids from anaerobic acidification broth by liquid–liquid extraction. *Chemosphere*, 77(8), 1137–1142. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.027>.
- Amara, N. I., Chukwuemeka, E. S., Obiajulu, N. O., & Chukwuma, O. J. (2023).** Yeast-driven valorization of agro-industrial wastewater: An overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(10), 1252. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11863-w>.
- Ammar, E. M., Jin, Y., Wang, Z., & Yang, S. T. (2014).** Metabolic engineering of *Propionibacterium freudenreichii*: effect of expressing phosphoenolpyruvate carboxylase on propionic acid production. *Applied microbiology and biotechnology*, 98, 7761-7772. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5836-y>.
- Annamalai, N., Elayaraja, S., Oleskiewicz-Popiel, P., Sivakumar, N., & Al Bahry, S. (2020).** Volatile fatty acids production during anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. In *Recent Developments in Bioenergy Research* (pp. 237-251). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819597-0.00012-x>.
- Ansari, S. A., Kumar, T., Sawarkar, R., Gobade, M., Khan, D., & Singh, L. (2024).** Valorization of food waste: A comprehensive review of individual technologies for producing bio-based products. *Journal of Environmental Management*, 364, 121439. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121439>.
- Atasoy, M., Owusu-Agyeman, I., Plaza, E., & Cetecioglu, Z. (2018).** Bio-based volatile fatty acid production and recovery from waste streams: Current status and future challenges. *Bioresource technology*, 268, 773-786. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.042>.
- Baroi, G. N., Baumann, I., Westermann, P., & Gavala, H. N. (2015).** Butyric acid fermentation from pretreated and hydrolysed wheat straw by an adapted *Clostridium tyrobutyricum* strain. *Microbial biotechnology*, 8(5), 874-882. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12304>.

- Baumann, I., & Westermann, P. (2016).** Microbial production of short chain fatty acids from lignocellulosic biomass: current processes and market. *BioMed research international*, 2016(1), 8469357. <https://doi.org/10.1155/2016/8469357>.
- Bergman, E. N. (1990).** Energy contributions of volatile fatty acids from the gastrointestinal tract in various species. *Physiological reviews*, 70(2), 567-590. <https://doi.org/10.1152/physrev.1990.70.2.567>.
- Bolaji, I. O., & Dionisi, D. (2017).** Acidogenic fermentation of vegetable and salad waste for chemicals production: effect of pH buffer and retention time. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(6), 5933-5943. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.001>.
- Bundhoo, M. Z., Mohee, R., & Hassan, M. A. (2015).** Effects of pre-treatment technologies on dark fermentative biohydrogen production: a review. *Journal of environmental management*, 157, 20-48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.006>.
- Castiello, M., Vazquez, B. G., Peyre-Lavigne, M., Dumas, C., & Paul, E. (2022).** *Production d'acides gras volatils (AGV) à partir de pelures de pommes de terre* (Doctoral dissertation, Université de Toulouse ; INSA ; INRAE ; CNRS).
- Cavaille, L. (2015).** *Production de Polyhydroxybutyrates à partir d'acides gras volatils en culture ouverte : influence du degré de limitation en phosphore sur les réponses cinétiques et les sélections microbiennes* (Doctoral dissertation, INSA de Toulouse).
- Chanakya, H. N., Khuntia, H. K., Mukherjee, N., Aniruddha, R., Mudakavi, J. R., & Thimmaraju, P. (2015).** The physicochemical characteristics and anaerobic degradability of desiccated coconut industry waste water. *Environmental monitoring and assessment*, 187, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4991-7>.
- Chen, Y., Zhang, X., & Chen, Y. (2021).** Propionic acid-rich fermentation (PARF) production from organic wastes: A review. *Bioresource Technology*, 339, 125569. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125569>.
- Coral, J., Karp, S. G., Porto de Souza Vandenberghe, L., Parada, J. L., Pandey, A., & Soccol, C. R. (2008).** Batch fermentation model of propionic acid production by *Propionibacterium acidipropionici* in different carbon sources. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 151, 333-341. <https://doi.org/10.1007/s12010-008-8196-1>.
- Croce, S., Wei, Q., D'Imporzano, G., Dong, R., & Adani, F. (2016).** Anaerobic digestion of straw and corn stover: The effect of biological process optimization and pre-treatment on total bio-methane yield and energy performance. *Biotechnology Advances*, 34(8), 1289-1304. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.09.004>.

- Dahiya, S., Sarkar, O., Swamy, Y. V., & Mohan, S. V. (2015).** Acidogenic fermentation of food waste for volatile fatty acid production with co-generation of biohydrogen. *Bioresource technology*, *182*, 103-113. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.007>.
- Dan, T., Jing, H., Shen, T., Zhu, J., & Liu, Y. (2023).** Performance of production of polyhydroxyalkanoates from food waste fermentation with *Rhodospseudomonas palustris*. *Bioresource Technology*, *385*, 129165. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129165>.
- Denbow, D. M. (2015).** Gastrointestinal anatomy and physiology. In *Sturkie's avian physiology* (pp. 337-366). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407160-5.00014-2>.
- Dishisha, T., Alvarez, M. T., & Hatti-Kaul, R. (2012).** Batch-and continuous propionic acid production from glycerol using free and immobilized cells of *Propionibacterium acidipropionici*. *Bioresource Technology*, *118*, 553-562. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.079>.
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007).** A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology advances*, *25*(5), 464-482. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004>.
- Dwidar, M., Kim, S., Jeon, B. S., Um, Y., Mitchell, R. J., & Sang, B. I. (2013).** Co-culturing a novel Bacillus strain with *Clostridium tyrobutyricum* ATCC 25755 to produce butyric acid from sucrose. *Biotechnology for biofuels*, *6*, 1-10. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-35>.
- Ehsanipour, M., Suko, A. V., & Bura, R. (2016).** Fermentation of lignocellulosic sugars to acetic acid by *Moorella thermoacetica*. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, *43*(6), 807-816. <https://doi.org/10.1007/s10295-016-1756-4>.
- Eryildiz, B., & Taherzadeh, M. J. (2020).** Effect of pH, substrate loading, oxygen, and methanogens inhibitors on volatile fatty acid (VFA) production from citrus waste by anaerobic digestion. *Bioresource technology*, *302*, 122800. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122800>.
- Fei, Q., Chang, H. N., Shang, L., Kim, N., & Kang, J. (2011).** The effect of volatile fatty acids as a sole carbon source on lipid accumulation by *Cryptococcus albidus* for biodiesel production. *Bioresource technology*, *102*(3), 2695-2701. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.141>.
- Feng, S., Ngo, H. H., Guo, W., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Liu, Y., Zhang, S., Vo, H. N. P., Bui, X. T., & Hoang, B. N. (2022).** Volatile fatty acids production from waste streams by anaerobic digestion: A critical review of the roles and application of enzymes. *Bioresource Technology*, *359*, 127420. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127420>.
- Feng, X. H., Chen, F., Xu, H., Wu, B., Yao, J., Ying, H. J., & Ouyang, P. K. (2010).** Propionic acid fermentation by *Propionibacterium freudenreichii* CCTCC M207015 in a multi-

point fibrous-bed bioreactor. *Bioprocess and biosystems engineering*, 33, 1077-1085. <https://doi.org/10.1007/s00449-010-0433-7>.

**Fukaya, M., Park, Y. S., & Toda, K. (1992).** Improvement of acetic acid fermentation by molecular breeding and process development. *Journal of applied bacteriology*, 73(6), 447-454. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1992.tb05004.x>.

**Ghosh, P., Samanta, A. N., & Ray, S. (2010).** COD reduction of petrochemical industry wastewater using Fenton's oxidation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 88(6), 1021-1026. <https://doi.org/10.1002/cjce.20353>.

**Goswami, V., & Srivastava, A. (2001).** Propionic acid production in an in situ cell retention bioreactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 56, 676-680. <https://doi.org/10.1007/s002530000582>.

**Gu, S., Xiong, J., Kou, W., Yi, K., Zhao, Y., Lun, X., & Zhang, D. (2011).** Comparison of the physical-chemical properties of corn stalk by expansion and chemical pretreatments and their effect on the yield of biogas. In *International Conference on New Technology of Agricultural* (pp. 737-741). <https://doi.org/10.1109/ICAE.2011.5943899>.

**Hao, J., Wang, H. (2015).** Volatile fatty acids productions by mesophilic and thermophilic sludge fermentation: Biological responses to fermentation temperature. *Bioresource technology*, 175, 367–373. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.106>.

**Harirchi, S., Wainaina, S., Sar, T., Nojoumi, S. A., Parchami, M., Parchami, M., Varjani, S., Khanal, S.K., Wong, J., Awasthi, M.K., Taherzadeh, M.J. (2022).** Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review. *Bioengineered*, 13(3), 6521-6557. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2035986>.

**Hasan, S. D. M., Giongo, C., Fiorese, M. L., Gomes, S. D., Ferrari, T. C., & Savoldi, T. E. (2015).** Volatile fatty acids production from anaerobic treatment of cassava waste water: effect of temperature and alkalinity. *Environmental Technology*, 36(20), 2637-2646. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1041426>.

**Hatik, C. (2015).** *Proposition de scénarios de gestion raisonnée des déchets en vue de leur valorisation énergétique* (Doctoral dissertation, Université de la Réunion).

**He, X., Yin, J., Liu, J., Chen, T., & Shen, D. (2019).** Characteristics of acidogenic fermentation for volatile fatty acid production from food waste at high concentrations of NaCl. *Bioresource Technology*, 271, 244-250. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.116>.

**Himmi, E. H., Bories, A., Boussaid, A., & Hassani, L. (2000).** Propionic acid fermentation of glycerol and glucose by *Propionibacterium acidipropionici* and *Propionibacterium freudenreichii* ssp. *shermanii*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 53, 435-440. <https://doi.org/10.1007/s002530051638>.

- Jang, Y. S., Im, J. A., Choi, S. Y., Im Lee, J., & Lee, S. Y. (2014).** Metabolic engineering of *Clostridium acetobutylicum* for butyric acid production with high butyric acid selectivity. *Metabolic engineering*, 23, 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2014.03.004>.
- Jang, Y. S., Woo, H. M., Im, J. A., Kim, I. H., & Lee, S. Y. (2013).** Metabolic engineering of *Clostridium acetobutylicum* for enhanced production of butyric acid. *Applied microbiology and biotechnology*, 97, 9355-9363. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5161-x>.
- Jankowska, E., Chwiałkowska, J., Stodolny, M., & Oleskiewicz-Popiel, P. (2015).** Effect of pH and retention time on volatile fatty acids production during mixed culture fermentation. *Bioresource Technology*, 190, 274-280. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.096>.
- Jawed, K., Mattam, A. J., Fatma, Z., Wajid, S., Abdin, M. Z., & Yazdani, S. S. (2016).** Engineered production of short chain fatty acid in *Escherichia coli* using fatty acid synthesis pathway. *PLoS One*, 11(7), e0160035. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160035>.
- Jiang, J., Zhang, Y., Li, K., Wang, Q., Gong, C., & Li, M. (2013).** Volatile fatty acids production from food waste: effects of pH, temperature, and organic loading rate. *Bioresource technology*, 143, 525–530. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.025>.
- Jiang, L., Wang, J., Liang, S., Wang, X., Cen, P., & Xu, Z. (2009).** Butyric acid fermentation in a fibrous bed bioreactor with immobilized *Clostridium tyrobutyricum* from cane molasses. *Bioresource Technology*, 100(13), 3403-3409. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.032>.
- Kalloum, S., Khelafi, M., Djaafri, M., Tahri, A., & Touzi, A. (2007).** Etude de l'influence du pH sur la production du biogaz à partir des déchets ménagers. *Journal of Renewable Energies*, 10(4), 539-543.
- Khan, M. A., Ngo, H. H., Guo, W. S., Liu, Y., Nghiem, L. D., Hai, F. I., ... & Wu, Y. (2016).** Optimization of process parameters for production of volatile fatty acid, biohydrogen and methane from anaerobic digestion. *Bioresource technology*, 219, 738-748. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.073>.
- Kumar, G., Kumar Ponnusamy, V., Bhosale, R. R., Shobana, S., Yoon, J.-J., Bhatia, S. K., Banu, J. R., Kim, S.-H. (2019).** A review on the conversion of volatile fatty acids to polyhydroxyalkonates using dark fermentative effluents from hydrogen production. *Bioresource Technology*, 121427. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121427>.
- Kurita-Ochiai, T., Fukushima, K., & Ochiai, K. (1995).** Volatile fatty acids, metabolic by-products of periodontopathic bacteria, inhibit lymphocyte proliferation and cytokine production. *Journal of dental research*, 74(7), 1367–1373. <https://doi.org/10.1177/00220345950740070801>.

- Lee, W. S., Chua, A. S. M., Yeoh, H. K., & Ngoh, G. C. (2014).** A review of the production and applications of waste-derived volatile fatty acids. *Chemical Engineering Journal*, 235, 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.002>.
- Liang, Z. X., Li, L., Li, S., Cai, Y. H., Yang, S. T., & Wang, J. F. (2012).** Enhanced propionic acid production from Jerusalem artichoke hydrolysate by immobilized *Propionibacterium acidipropionici* in a fibrous-bed bioreactor. *Bioprocess and biosystems engineering*, 35, 915-921. <https://doi.org/10.1007/s00449-011-0676-y>.
- Lim, S. J., Kim, B. J., Jeong, C. M., Ahn, Y. H., & Chang, H. N. (2008).** Anaerobic organic acid production of food waste in once-a-day feeding and drawing-off bioreactor. *Bioresource Technology*, 99(16), 7866-7874. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.028>.
- Liu, H., Wang, J., Liu, X., Fu, B., Chen, J., & Yu, H. Q. (2012).** Acidogenic fermentation of proteinaceous sewage sludge: effect of pH. *Water research*, 46(3), 799-807. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.047>.
- Liu, L., Guan, N., Zhu, G., Li, J., Shin, H. D., Du, G., & Chen, J. (2016).** Pathway engineering of *Propionibacterium jensenii* for improved production of propionic acid. *Scientific reports*, 6(1), 19963.
- Liu, P., Wang, Y., Yang, G., Zhang, Q., Meng, L., Xin, Y., & Jiang, X. (2021).** The role of short-chain fatty acids in intestinal barrier function, inflammation, oxidative stress, and colonic carcinogenesis. *Pharmacological research*, 165, 105420. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2021.105420>.
- Lizundia, E., Luzi, F., & Puglia, D. (2022).** Organic waste valorisation towards circular and sustainable biocomposites. *Green Chemistry*, 24(14), 5429-5459. <https://doi.org/10.1039/d2gc01668k>.
- Lukitawesa, Patinvoh, R. J., Millati, R., Sarvari-Horvath, I., & Taherzadeh, M. J. (2020).** Factors influencing volatile fatty acids production from food wastes via anaerobic digestion. *Bioengineered*, 11(1), 39-52. <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1703544>.
- Luo, K., Pang, Y., Yang, Q., Wang, D., Li, X., Lei, M., & Huang, Q. (2019).** A critical review of volatile fatty acids produced from waste activated sludge: enhanced strategies and its applications. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 13984-13998. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04798-8>.
- Magama, P., Chiyanzu, I., & Mulopo, J. (2022).** A systematic review of sustainable fruit and vegetable waste recycling alternatives and possibilities for anaerobic biorefinery. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101031. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101031>.

- Magdalena, J. A., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., & González-Fernandez, C. (2018).** Volatile fatty acids production from protease pretreated *Chlorella* biomass via anaerobic digestion. *Biotechnology Progress*, 34(6), 1363-1369. <https://doi.org/10.1002/btpr.2696>.
- Maharaj, I., & Elefsiniotis, P. (2001).** The role of HRT and low temperature on the acid-phase anaerobic digestion of municipal and industrial wastewaters. *Bioresource technology*, 76(3), 191-197. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(00\)00128-0](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(00)00128-0).
- Martínez-Avila, O., Muñoz-Torrero, P., Sánchez, A., Font, X., & Barrena, R. (2021).** Valorization of agro-industrial wastes by producing 2-phenylethanol via solid-state fermentation: Influence of substrate selection on the process. *Waste Management*, 121, 403-411. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.036>.
- Merli, G., Becci, A., Amato, A., & Beolchini, F. (2021).** Acetic acid bioproduction: The technological innovation change. *Science of the Total Environment*, 798, 149292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149292>.
- Mora-Sandí, A., Ramírez-González, A., Castillo-Henríquez, L., Lopretti-Correa, M., & Vega-Baudrit, J. R. (2021).** Persea americana agro-industrial waste biorefinery for sustainable high-value-added products. *Polymers*, 13(11), 1727. <https://doi.org/10.3390/polym13111727>.
- Moretto, G., Russo, I., Bolzonella, D., Pavan, P., Majone, M., & Valentino, F. (2020).** An urban biorefinery for food waste and biological sludge conversion into polyhydroxyalkanoates and biogas. *Water Research*, 170, 115371. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115371>.
- Mothe, S., & Polisetty, V. R. (2021).** Review on anaerobic digestion of rice straw for biogas production. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 24455-24469. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08762-9>.
- Nayak, J., & Pal, P. (2013).** Transforming waste cheese-whey into acetic acid through a continuous membrane-integrated hybrid process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(8), 2977-2984. <https://doi.org/10.1021/ie3033729>.
- Paillet, F. (2017).** *Optimisation d'un procédé à deux étapes pour la production d'un mélange hydrogène/méthane (biohythane) à partir de la fraction fermentescible des ordures ménagères* (Doctoral dissertation, Montpellier SupAgro).
- Pal, P., & Nayak, J. (2017).** Acetic acid production and purification: critical review towards process intensification. *Separation & Purification Reviews*, 46(1), 44-61. <https://doi.org/10.1080/15422119.2016.1185017>.
- Pellissery, A. J., Vinayamohan, P. G., Amalaradjou, M. A. R., & Venkitanarayanan, K. (2020).** Spoilage bacteria and meat quality. In *Meat quality analysis* (pp. 307-334). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819233-7.00017-3>.

- Perwez, M., & Al Asheh, S. (2025).** Valorization of agro-industrial waste through solid-state fermentation: Mini review. *Biotechnology Reports*, *45*, e00873. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2024.e00873>.
- RiGAUD, J., Journet, M., & Flechet, J. (1970).** Méthode de dosage des acides gras volatils dans le liquide du rumen. In *Annales de Biologie Animale Biochimie Biophysique* (Vol. 10, No. 1, pp. 151-157). EDP Sciences.
- Saïdi-Boulaïhia, A., Abada, S., & Saber, M. (2018).** Valorisation des déchets organiques ménagers et les déjections bovines par la méthanisation. *Journal of Renewable Energies*, *21*(4), 537-543. <https://doi.org/10.54966/jreen.v21i4.712>.
- Saini, M., Wang, Z. W., Chiang, C. J., & Chao, Y. P. (2014).** Metabolic engineering of *Escherichia coli* for production of butyric acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *62*(19), 4342-4348. <https://doi.org/10.1021/jf500355p>.
- Sapmaz, T., Mahboubi, A., Taher, M. N., Beler-Baykal, B., Karagunduz, A., Taherzadeh, M. J., & Koseoglu-Imer, D. Y. (2022).** Waste-derived volatile fatty acid production and ammonium removal from it by ion exchange process with natural zeolite. *Bioengineered*, *13*(6), 14751-14769. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2109507>.
- Shen, D., Yin, J., Yu, X., Wang, M., Long, Y., Shentu, J., & Chen, T. (2017).** Acidogenic fermentation characteristics of different types of protein-rich substrates in food waste to produce volatile fatty acids. *Bioresource Technology*, *227*, 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.048>.
- Singhania, R. R., Patel, A. K., Christophe, G., Fontanille, P., & Larroche, C. (2013).** Biological upgrading of volatile fatty acids, key intermediates for the valorization of biowaste through dark anaerobic fermentation. *Bioresource technology*, *145*, 166-174. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.137>.
- Srikanth, S., Mohan, S. V., Devi, M. P., Peri, D., & Sarma, P. N. (2009).** Acetate and butyrate as substrates for hydrogen production through photo-fermentation: process optimization and combined performance evaluation. *International journal of hydrogen energy*, *34*(17), 7513-7522. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.095>.
- Storm, A. C., Kristensen, N. B., & Hanigan, M. D. (2012).** A model of ruminal volatile fatty acid absorption kinetics and rumen epithelial blood flow in lactating Holstein cows. *Journal of dairy science*, *95*(6), 2919-2934. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4239>.
- Strazzera, G., Battista, F., Andreolli, M., Menini, M., Bolzonella, D., & Lampis, S. (2021).** Influence of different household food wastes fractions on volatile fatty acids production by anaerobic fermentation. *Bioresource technology*, *335*, 125289. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125289>.

- Strazzera, G., Battista, F., Garcia, N. H., Frison, N., & Bolzonella, D. (2018).** Volatile fatty acids production from food wastes for biorefinery platforms: A review. *Journal of environmental management*, 226, 278-288. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.039>.
- Sun, P. T., & Peng, H. (2023).** Valorisation of Biomass Waste for Sustainable Bioenergy and Biofuel Production. *Bioengineering*, 10(5), 619. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10050619>.
- Tang, J., Pu, Y., Wang, X. C., Hu, Y., Huang, J., Ngo, H. H., ... & Zhu, N. (2019).** Effect of additional food waste slurry generated by mesophilic acidogenic fermentation on nutrient removal and sludge properties during wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 294, 122218. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122218>.
- Uludag-Demirer, S., Liao, W., & Demire, G. N. (2019).** Volatile fatty acid production from anaerobic digestion of organic residues. *Microbial Lipid Production: Methods and Protocols*, 357-367. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9484-7\\_20](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9484-7_20).
- Valentino, F., Moretto, G., Gottardo, M., Pavan, P., Bolzonella, D., & Majone, M. (2019).** Novel routes for urban bio-waste management: a combined acidic fermentation and anaerobic digestion process for platform chemicals and biogas production. *Journal of Cleaner Production*, 220, 368-375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.102>.
- Vázquez-Fernández, A., Suárez-Ojeda, M. E., & Carrera, J. (2022).** Review about bioproduction of Volatile Fatty Acids from wastes and wastewaters: Influence of operating conditions and organic composition of the substrate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107917. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107917>.
- Wang, D., Duan, Y., Yang, Q., Liu, Y., Ni, B. J., Wang, Q., Zeng, G. M., Li, X. M., & Yuan, Z. (2018).** Free ammonia enhances dark fermentative hydrogen production from waste activated sludge. *Water Research*, 133, 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.051>.
- Wang, K., Yin, J., Shen, D., & Li, N. (2014).** Anaerobic digestion of food waste for volatile fatty acids (VFAs) production with different types of inoculum: effect of pH. *Bioresource technology*, 161, 395-401. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.088>.
- Wang, P., Jiao, Y., & Liu, S. (2014).** Novel fermentation process strengthening strategy for production of propionic acid and vitamin B12 by *Propionibacterium freudenreichii*. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 41(12), 1811-1815. <https://doi.org/10.1007/s10295-014-1513-5>.
- Wang, P., Wang, H., Qiu, Y., Ren, L., & Jiang, B. (2018).** Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production—A review. *Bioresource technology*, 248, 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.152>.

- Woldu, A. R., Ashagrie, Y. N., & Tsigie, Y. A. (2015).** Bioethanol production from avocado seed wastes using *Saccharomyces cerevisiae*. *American Journal of Environment, Energy and Power Research*, 3(1), 1-9.
- Yin, J., Yu, X., Wang, K., & Shen, D. (2016).** Acidogenic fermentation of the main substrates of food waste to produce volatile fatty acids. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(46), 21713-21720. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.094>.
- Yuan, Y., Hu, X., Chen, H., Zhou, Y., Zhou, Y., & Wang, D. (2019).** Advances in enhanced volatile fatty acid production from anaerobic fermentation of waste activated sludge. *Science of the Total Environment*, 694, 133741. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133741>.
- Zhang, B., Zhang, L. L., Zhang, S. C., Shi, H. Z., & Cai, W. M. (2005).** The Influence of pH on Hydrolysis and Acidogenesis of Kitchen Wastes in Two-phase Anaerobic Digestion. *Environmental technology*, 26(3), 329-340. <http://dx.doi.org/10.1080/09593332608618563>.
- Zhang, C., Hu, M., Di Maio, F., Sprecher, B., Yang, X., & Tukker, A. (2022).** An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *Science of the Total Environment*, 803, 149892. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>.
- Zhang, L., Loh, K. C., Dai, Y., & Tong, Y. W. (2020).** Acidogenic fermentation of food waste for production of volatile fatty acids: bacterial community analysis and semi-continuous operation. *Waste Management*, 109, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.052>.
- Zhang, P., Chen, Y., & Zhou, Q. (2009).** Waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation under mesophilic and thermophilic conditions: effect of pH. *Water research*, 43(15), 3735-3742. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.05.036>.
- Zhang, Q., Lu, Y., Zhou, X., Wang, X., & Zhu, J. (2020).** Effect of different vegetable wastes on the performance of volatile fatty acids production by anaerobic fermentation. *Science of the Total Environment*, 748, 142390. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142390>.
- Zhang, R., & Zhang, Z. (1999).** Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system. *Bioresource technology*, 68(3), 235-245. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00154-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00154-0).
- Zhou, A., Guo, Z., Yang, C., Kong, F., Liu, W., & Wang, A. (2013).** Volatile fatty acids productivity by anaerobic co-digesting waste activated sludge and corn straw: effect of feedstock proportion. *Journal of biotechnology*, 168(2), 234-239. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2013.05.015>.
- Zhou, M., Yan, B., Wong, J. W., & Zhang, Y. (2018).** Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: A mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways. *Bioresource technology*, 248, 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.121>.

## المخلص

تجذب عملية الإنتاج الحيوي للأحماض الدهنية الطيارة من النفايات العضوية اهتمامًا متزايدًا، نظرًا لزيادة الطلب عليها، وتعدد تطبيقاتها الصناعية، وتأثيرها البيئي المنخفض. تتيح هذه المقاربة تحويل تدفقات النفايات إلى مركبات كيميائية مفيدة.

يقدم هذا العمل مراجعة لطرق الإنتاج البيولوجية الرئيسية لهذه الأحماض، مع التركيز على التخمر، وهي تقنية فعالة تستخدم مزارع ميكروبية مختلطة لتحويل ركائز عضوية متنوعة إلى أحماض الأستيك والبروبيونيك والبيوتيريك. تؤثر عدة عوامل مثل درجة حموضة الوسط، درجة الحرارة ونوع الركيزة بشكل مباشر على المردود.

وفي هذا السياق، تم إجراء دراسة مقارنة حول الإنتاج البيولوجي لحمض البروبيونيك. تعتمد الاستراتيجية الأولى على استخدام مستخلص من نبات خرشف القدس الغني بالإينولين داخل نظام غشاء حيوي ثابت لضمان إنتاج مستقر. أما الاستراتيجية الثانية فتستخدم الجليسيرين الخام، وهو ناتج صناعي ثانوي، في تخمير مستمر مع خلايا مثبته، مما يحقق إنتاجية عالية.

رغم اختلاف العمليتين، تُعد هاتان الطريقتان مكملتين لبعضهما البعض: الأولى تضمن مردودًا عاليًا باستخدام ركيزة نباتية، والثانية تحقق إنتاجًا سريعًا من نفايات صناعية. وتبرزان معًا مرونة وجدوى العمليات الحيوية لإنتاج مستدام يتماشى مع متطلبات الصناعة المختلفة.

وعليه، فإن تحسين النفايات العضوية لإنتاج الأحماض الدهنية الطيارة يمثل حلاً مبتكرًا يجمع بين تقليل النفايات، والحفاظ على البيئة، وضمان توفير مركبات كيميائية أساسية.

**الكلمات المفتاحية:** أحماض الدهنية المتطايرة، النفايات العضوية، التخمر، حمض البروبيونيك، *Propionibacterium*، العمليات الحيوية، تحسين النفايات.

## Résumé

La production biosourcée d'acides gras volatils (AGV) à partir de déchets organiques attire de plus en plus d'intérêt, en raison de la demande croissante, de leurs nombreuses applications industrielles, et de leur faible impact environnemental. Cette approche permet de transformer des flux de déchets en composés chimiques utiles, tout en s'inscrivant dans une logique d'économie circulaire.

Ce travail propose une étude bibliographique des principales méthodes biologiques de production des AGV, en mettant l'accent sur la digestion anaérobie, une technique efficace utilisant des cultures microbiennes mixtes pour convertir divers substrats organiques en acides acétique, propionique et butyrique. Plusieurs facteurs comme le pH, la température ou le type de substrat influencent directement les rendements obtenus.

Dans ce cadre, une étude comparative a été menée sur la production biologique d'acide propionique. Une première stratégie repose sur l'utilisation d'un extrait de topinambour riche en inuline dans un système à biofilm fixe, assurant une production stable. Une seconde stratégie utilise la glycérine brute, un résidu industriel, en fermentation continue avec cellules immobilisées, obtenant une productivité élevée.

Ces deux approches, bien que différentes, sont complémentaires : l'une favorise un rendement élevé grâce à un substrat végétal, l'autre une production rapide à partir d'un déchet industriel. Elles démontrent la flexibilité et le potentiel des bioprocédés pour une production durable et adaptée à divers besoins industriels.

Ainsi, la valorisation des déchets organiques pour produire des AGV représente une solution innovante, combinant réduction des déchets, respect de l'environnement et sécurité d'approvisionnement en produits chimiques essentiels.

**Les mots clés :** Acides gras volatils (AGV), Déchets organiques, Fermentation, Acide propionique, *Propionibacterium*, Bioprocédés, Valorisation des déchets.

## Abstract

The bio-based production of volatile fatty acids (VFAs) from organic waste is gaining increasing attention due to growing demand, wide industrial applications, and low environmental impact. This approach transforms waste streams into valuable chemical compounds while promoting a circular economy model.

This work provides a bibliographic study of the main biological methods used for VFA production, with a focus on anaerobic digestion an efficient technique using mixed microbial cultures to convert various organic substrates into acetic, propionic, and butyric acids. Key factors such as pH, temperature, and substrate type directly influence the yield.

In this context, a comparative study was conducted on the biological production of propionic acid. The first strategy uses a Jerusalem artichoke extract rich in inulin in a fixed biofilm system, ensuring stable production. The second strategy employs crude glycerol, an industrial by-product, in continuous fermentation with immobilized cells, achieving high productivity.

Although different, these two approaches are complementary: one promotes high yield from a plant-based substrate, while the other enables fast production using an industrial waste. They demonstrate the flexibility and potential of bioprocesses for sustainable production adapted to various industrial needs.

Thus, valorizing organic waste to produce VFAs represents an innovative solution, combining waste reduction, environmental preservation, and secure supply of essential chemical compounds.

**Keywords:** Volatile Fatty Acids (VFA), Organic Waste, Fermentation, Propionic Acid, *Propionibacterium*, Bioprocesses, Waste Valorization.